

การผลิตผงน้ำตาลชูโครสด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะสุญญากาศ



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

Production of sucrose powder using vacuum spray dryer

Mr. Chutiwat Ataboonwongse



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

การผลิตผงน้ำตาลซูโครสด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย  
ภายใต้สภาวะสุญญากาศ

โดย

นายชุติวัด อรรถบุรณวงศ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ชลิตา คล้ายโสม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.อุรษา รักษ์ตานนท์ชัย)

ชุดิวัด อรรถบูรณวงศ์ : การผลิตผงน้ำตาลซูโครสด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Production of sucrose powder using vacuum spray dryer) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. อภินันท์ สุทธิธารวัช, 105 หน้า.

การอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีการอบแห้งที่นิยมในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อาหารผงสำเร็จรูปและผงซักฟอก เนื่องจากเป็นวิธีการไม่ยุ่งยาก ใช้เวลาน้อย และมีต้นทุนต่ำ วิธีนี้ได้ผงแห้งที่มีขนาดเล็กโดยการพ่นสารละลายหรือของเหลวหยดเล็กๆผ่านหัวฉีดเข้าสู่ห้องอบแห้ง หลังจากการนั้นจะมีตัวกลางให้ความร้อนหรือลมร้อนมาให้ความร้อนเพื่อช่วยในการระเหยและรับเอาไอน้ำออกจากอนุภาค ซึ่งโดยทั่วไปแล้วลมร้อนที่ใช้จำเป็นต้องใช้ที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากต้องทำให้ตัวทำละลายระเหยได้อย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้วิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยมักเกิดปัญหาเหนียวติดในสารจำพวกน้ำตาลหรือสารที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำ เนื่องจากเมื่อผิวของอนุภาคมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะทำให้ผิวของอนุภาคที่มีสถานะคล้ายแก้วเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยาง ส่งผลต่อการไหลตัวและปริมาณร้อยละผลได้ที่ได้จากการอบแห้ง จึงมีแนวคิดในการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้ความดันสุญญากาศเพื่อลดอุณหภูมิที่ต้องใช้ในการอบแห้ง แต่ยังคงมีอัตราการระเหยน้ำที่สูงอยู่ ซึ่งจะส่งผลให้ผลต่างของอุณหภูมิของผงหลังการอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วน้อยลง รวมถึงมีการเพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผงแห้งโดยเติมแป้งมอลโตเดกซ์ตรินลงไป ในการทดลองนี้จะศึกษาการอบแห้งแบบพ่นฝอยของแป้งมอลโตเดกซ์ตริน DE11 กับน้ำตาลซูโครสที่ความดันสุญญากาศโดยมีเครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรดเป็นตัวช่วยให้ความร้อนแทนลมร้อนที่หายไป อุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียสและที่ความดัน 0.54 บรรยากาศ นำมาเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิลมร้อน 120 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าที่ความดันสุญญากาศจะได้ปริมาณร้อยละผลได้เพิ่มมากขึ้นกว่าที่ความดันปกติ ความชื้นที่ได้มากกว่าเล็กน้อย และผิวของอนุภาคเกิดการเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยางลดลง ดังนั้นผงแห้งที่ได้มีความเหนียวติดน้อยกว่า รวมถึงการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความดันสุญญากาศยังสามารถได้ผงแห้งของน้ำตาลซูโครสโดยไม่ต้องเติมสารผสมออกมา ซึ่งดีกว่าการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศที่ไม่สามารถได้น้ำตาลซูโครสออกมา

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

# # 5670171021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: VACUUM SPRAY DRYING,SUCROSE POWDER,GLASS TRANSITION TEMPERATURE

CHUTIWAT ATABOONWONGSE: Production of sucrose powder using vacuum spray dryer. ADVISOR: ASST. PROF. APINAN SOOTTITANTAWAT, D.Eng., 105 pp.

Spray drying process is almost found in many industries such as the instant food and detergent. This method is uncomplicated, brief and inexpensive. The dried particles are generated by spraying of solution or liquid into small droplets through an atomizer. These particles flowed into the drying chamber and heated up by heating medium or hot air which are the supporter in evaporation process and stream receiver from the particles. Hot air commonly used at high temperature because fast evaporation of the solvent is needed. But it results in the stickiness problem of sugar or low glass transition temperature substances in the spray drying process. When the surface temperature of the particles is higher than the glass transition temperature, its surface will change glassy state to rubber state. So it affects to the flowability and %yield of dried powder. Vacuum spray drying process is applied for reducing drying temperature which reduces the difference of the drying temperature of a product and its glass transition. This experiment investigated the spray drying process of maltodextrinDE11 and sucrose at vacuum pressure with adding infrared heaters for increasing heat instead of disappeared hot air. The vacuum spray drying is operated at the temperature of 40, 50, 60 and 70 degree Celsius and 0.54 atm which is compared the spray drying process in normal pressure and 120 degree Celsius of hot air. From this experiment, the %yield and the moisture content of vacuum pressure are more than of normal pressure. At vacuum condition, the powder surface which changes into rubber state is less than that at a normal state. So the dried powder is less stickiness. Vacuum spray drying can produce pure sucrose powder which is better than normal spray drying which cannot get any powder.

Department: Chemical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Chemical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี อันเนื่องมาจากความช่วยเหลือ จากหลายฝ่ายด้วยกัน ทั้งในเรื่องเงินทุน คำปรึกษา คำแนะนำในการแก้ปัญหา รวมทั้งกำลังใจจากหลายๆ ท่าน

ท่านแรกที่มีความสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดีและจะขาดไปไม่ได้เลย ท่านนั้นคือ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธรรพ์ชัชที่ได้กรุณาช่วยให้คำแนะนำเพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัย วิเคราะห์ถึงการแก้ปัญหาและความเป็นไปของงานวิจัย คอยเอาใจใส่ในทุกๆ เรื่องอย่างสม่ำเสมอ และเป็นคนกระตุ้นให้งานวิจัยได้ดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ต้องขอขอบพระคุณที่ท่านได้หยิบยื่นประสบการณ์ในการเป็นนักเรียนแลกเปลี่ยนที่มหาลัย Kagawa และขอขอบพระคุณ Prof. Yoshii Hidefumi ที่คอยดูแลเอาใจใส่เมื่อครั้งอยู่ที่ญี่ปุ่นทั้งในเรื่องการเรียนและชีวิตความเป็นอยู่ รวมถึงขอบคุณเพื่อนๆ คนอื่นเมื่อครั้งยังอยู่ญี่ปุ่นที่ยังไม่ได้กล่าวถึงมาในโอกาสนี้ด้วย

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ขรินพานิชกุล ประธานกรรมการ ดร. ชลิตา คล้ายโสมและดร. อรุษา รัชต์दानนท์ชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนเสียสละเวลาอันมีค่าในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ด้วย

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้เงินทุนในการเรียนและในการทำวิจัยให้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณนางสาววิภาดา ดอกไม้และคุณภูษณิศ ภัทรโชติเศวตที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษาที่ดีเสมอมา รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนในศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนาคตที่ช่วยให้ความช่วยเหลือทั้งทางด้านข้อคิดเห็น คำแนะนำและกำลังใจที่ให้อย่างต่อเนื่องเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้เสมอมา เป็นแรงผลักดันสำคัญที่ช่วยให้งานวิจัยดำเนินไปได้ด้วยดี

จึงขอกล่าวนามและแสดงความขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฅ
สารบัญรูป .....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์ .....	ด
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 การเน่าเสียของอาหาร .....	4
2.2 การอบแห้งหรือการทำแห้ง (Drying) .....	6
2.2.1 กลไกการอบแห้ง .....	6
2.2.1.1 การถ่ายโอนความร้อน .....	7
2.2.2 การคำนวณพลังงานที่ได้จากการถ่ายโอนความร้อน .....	9
2.2.2.1 การคำนวณพลังงานความร้อนที่ได้จากการนำความร้อน .....	9
2.2.2.2 การคำนวณพลังงานความร้อนที่ได้จากการพาความร้อน .....	9
2.2.2.3 การคำนวณพลังงานความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสี .....	10
2.2.3 กลไกการระเหยน้ำออกในการอบแห้ง .....	12

2.2.4 การคำนวณของการอบแห้ง .....	14
2.2.4.1 การคำนวณอัตราการอบแห้งในช่วงต่างๆ.....	16
2.2.5 แผนภูมิความชื้นหรือไซโครเมตริกส์ชาร์ท (Psychrometric Chart).....	17
2.3 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) .....	23
2.3.1 หัวฉีด (Atomizer) .....	24
2.3.2 การไหลของลมร้อนในห้องอบแห้ง .....	26
2.3.2.1 การไหลแบบทางเดียวกัน (Co-current) .....	26
2.3.2.2 การไหลแบบสวนทางกัน (Counter-current).....	26
2.3.2.3 การไหลแบบผสม (Mixed flow).....	26
2.3.3 การเคลื่อนที่ของสารในกรณีเป็นสารผสม .....	27
2.3.4 การเกิดปัญหาการเกาะติดในสารจำพวกน้ำตาล .....	28
2.3.4.1 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, $T_g$ ).....	28
2.3.5 การอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะสุญญากาศ (Vacuum spray drying).....	32
2.4 น้ำตาลซูโครส (Sucrose).....	36
2.4.1 คุณสมบัติของน้ำตาลซูโครส.....	36
2.4.2 การทำให้น้ำตาลซูโครสเป็นผง.....	36
2.5 ข้อดีของการตกผลึกของสารประเภทน้ำตาล .....	38
2.6 ข้อจำกัดของปริมาณความร้อนที่สามารถใช้ได้ในการตกผลึกน้ำตาล .....	39
2.7 การอบแห้งแบบพ่นฝอยของน้ำตาลซูโครสที่สภาวะปกติ .....	40
2.8 การอบแห้งแบบพ่นฝอยของสารที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลากชนิดในสภาวะสุญญากาศ.....	41
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	42
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	42



3.2	วิธีการทดลอง.....	43
3.2.1	การเตรียมสารในการอบแห้ง .....	43
3.2.2	การอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะสูญญากาศ .....	43
3.3	การวิเคราะห์สาร.....	45
3.3.1	วิเคราะห์หาปริมาณร้อยละผลได้ .....	45
3.3.2	วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผง .....	45
3.3.3	วิเคราะห์หาความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในผง .....	46
3.3.4	วิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg).....	46
3.3.5	วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาค .....	47
3.3.6	วิเคราะห์ความหนาแน่นของอนุภาคผง .....	48
บทที่ 4	ผลการวิจัย .....	49
4.1	ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะปกติและสภาวะสูญญากาศ .....	49
4.1.1	การคำนวณการถ่ายโอนมวลสารและความร้อน.....	50
4.1.1.1	การคำนวณการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะปกติ.....	55
4.1.1.2	การคำนวณการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะสูญญากาศ .....	56
4.1.2	การคำนวณหาระยะเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอย .....	59
4.1.3	การคำนวณหาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผงแห้งที่ได้.....	63
4.2	อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครส.....	67
4.2.1	ผลต่อลักษณะรูปร่างสัณฐานของผงแห้ง .....	67
4.2.2	ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงแห้ง.....	71
4.2.3	ผลต่อความหนาแน่นของผงแห้ง.....	72
4.2.4	ผลต่อปริมาณความชื้นที่คงเหลือในผง.....	73
4.2.5	ผลต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผงแห้ง.....	74

4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งที่สภาวะสุญญากาศและความดันที่ใช้ในระบบ .....	76
4.3.1 ผลต่อลักษณะรูปร่างสีฐานของผงแห้ง .....	76
4.3.2 ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงแห้ง.....	77
4.3.3 ผลต่อความหนาแน่นของผงแห้ง.....	81
4.3.4 ผลต่อปริมาณความชื้นที่คงเหลือในผง.....	81
4.3.5 ผลต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผงแห้ง.....	82
4.4 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สุญญากาศที่มีการติดตั้ง เครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรดเพื่อช่วยให้ความร้อน .....	85
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย .....	88
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	88
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	89
รายการอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก .....	94
ภาคผนวก ก.....	95
ภาคผนวก ข.....	98
ภาคผนวก ค.....	102
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	105

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ขนาดโมเลกุลและความสามารถในการแพร่ของสารในนม .....	27
ตารางที่ 2.2 การอบแห้งแบบพ่นฝอยของสารที่มีปริมาณน้ำตาลมากด้วยการผสมสารเติมแต่ง .....	32
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติต่างๆของอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากัน แต่ความดันต่างกัน .....	33
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของผงน้ำตาลซูโครสจากบริษัทไทยฟูด .....	42
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของผงแป้งมอลโตเดกซ์ตริน DE11 จากบริษัทไทยฟูดแอนด์เคมิคอล จำกัด .....	42
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของอากาศและอนุภาคของแข็งในการอบแห้ง .....	57
ตารางที่ 4.2 อัตราการไหลของอากาศและระยะเวลาในห้องอบแห้ง .....	61
ตารางที่ 4.3 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่สภาวะความดันปกติและที่สูญญากาศของผงแห้งที่มีมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30 ต่อ 70 .....	62
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและค่าความจุความร้อนของสารต่างๆ .....	64
ตารางที่ ก.1 ค่าต่างๆที่วัดได้จากการทดลองอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิลมร้อน 120 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 มิลลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของแข็งร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของลมร้อนที่ 24 กิโลกรัมต่อชั่วโมง .....	95
ตารางที่ ก.2 ค่าต่างๆที่วัดได้จากการทดลองอบแห้งแบบพ่นฝอยของแป้งมอลโตเดกซ์ตรินที่ความดัน 0.34 บรรยากาศ อัตราการป้อน 3 มิลลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของแข็งร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก .....	96
ตารางที่ ก.3 ค่าต่างๆที่วัดได้จากการทดลองอบแห้งแบบพ่นฝอยของแป้งมอลโตเดกซ์ตรินที่ความดัน 0.74 บรรยากาศ อัตราการป้อน 3 มิลลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของแข็งร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก .....	96
ตารางที่ ก.4 ค่าต่างๆที่วัดได้จากการทดลองอบแห้งแบบพ่นฝอยของแป้งมอลโตเดกซ์ตรินกับน้ำตาลซูโครสที่ความดัน 0.54 บรรยากาศ อัตราการป้อน 3 มิลลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของแข็งร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก .....	97

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของความชื้นผ่านอากาศร้อน .....	6
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของการแผ่รังสีความร้อนกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป .....	8
รูปที่ 2.3 การถ่ายโอนมวลสารและพลังงานระหว่างการอบแห้ง .....	13
รูปที่ 2.4 ความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา .....	14
รูปที่ 2.5 เส้นกราฟอัตราในการอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งลดลงของวัสดุต่างๆ .....	17
รูปที่ 2.6 แผนภูมิความชื้นที่ระดับน้ำทะเล .....	19
รูปที่ 2.7 แผนภูมิความชื้นที่ระดับสูงกว่าน้ำทะเล 1500 เมตร.....	20
รูปที่ 2.8 แผนภูมิความชื้นที่อุณหภูมิสูง ภายใต้ความดันบรรยากาศ.....	21
รูปที่ 2.9 ปრაกฏการณ์ที่เกิดภายในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย .....	23
รูปที่ 2.10 หัวฉีดแบบจานเหวี่ยง .....	24
รูปที่ 2.11 หัวฉีดแบบแรงดันสูง.....	25
รูปที่ 2.12 หัวฉีดแบบของไหล 2 ชนิด .....	25
รูปที่ 2.13 การไหลภายในห้องอบแห้งแบบต่างๆ.....	27
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของระบบกับอุณหภูมิจุดเดือดของของเหลว 4 ชนิด .....	30
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะสุญญากาศ.....	34
รูปที่ 2.16 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ติดตั้งเครื่องทำความร้อนแบบผ้ากับปั๊มสุญญากาศ .....	35
รูปที่ 2.17 โครงสร้างน้ำตาลซูโครส .....	36
รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ติดตั้งเครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรดและปั๊ม สุญญากาศ.....	44
รูปที่ 3.2 เครื่อง Mastersizer 3000 .....	45
รูปที่ 3.3 เครื่อง METTLER TOLEDO STARe SYSTEM TGA/DSC1 Module .....	46
รูปที่ 3.4 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	47

รูปที่ 3.5 เครื่อง Vortex Mixer (VM-300).....	48
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับอัตราเครื่องสูบลมอากาศ .....	50
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับความดันเมื่อใช้ปั๊มสุญญากาศ .....	50
รูปที่ 4.3 ช่วงการอบแห้งที่อัตราแตกต่างกันในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย.....	51
รูปที่ 4.4 ช่วงการอบแห้งโดยใช้แผ่นภูมิกลองในระบบที่มีการไหลทางเดียวกัน.....	51
รูปที่ 4.5 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยในช่วงต่างๆ .....	52
รูปที่ 4.6 อุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดันบรรยากาศและใช้อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส โดยที่ <input type="radio"/> อากาศร้อน <input checked="" type="checkbox"/> ผงแห้ง..	56
รูปที่ 4.7 อุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดัน 0.54 บรรยากาศและใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 40 องศาเซลเซียส โดยที่ <input type="radio"/> อากาศร้อน <input checked="" type="checkbox"/> ผงแห้ง.....	57
รูปที่ 4.8 อุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดัน 0.54 บรรยากาศและใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส โดยที่ <input type="radio"/> อากาศร้อน <input checked="" type="checkbox"/> ผงแห้ง.....	58
รูปที่ 4.9 อุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดัน 0.54 บรรยากาศและใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส โดยที่ <input type="radio"/> อากาศร้อน <input checked="" type="checkbox"/> ผงแห้ง.....	58
รูปที่ 4.10 อุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดัน 0.54 บรรยากาศและใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส โดยที่ <input type="radio"/> อากาศร้อน <input checked="" type="checkbox"/> ผงแห้ง.....	59
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับขนาดของอนุภาคในกรณีของอนุภาคกลมโตเดียวกับลมร้อน .....	63
รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ได้ <input type="checkbox"/> จากการทดลองกับ <input checked="" type="checkbox"/> จากการคำนวณ .....	64
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอนุภาคของแข็งต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ความดันบรรยากาศ ผงแห้งมีความชื้นร้อยละ 7 โดยที่ <input type="checkbox"/> อุณหภูมิการเปลี่ยน	

- สถานะคล้ายแก้ว ○ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิหลังอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว..... 65
- รูปที่ 4.14** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอนุภาคของแข็งต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ความดันสุญญากาศ โดยที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วภายใต้อุณหภูมิในห้องอบเท่ากับ ○ 40°C ◇ 50°C △ 60°C ✕ 70°C..... 66
- รูปที่ 4.15** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอนุภาคของแข็งต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ความดันสุญญากาศ โดยที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิหลังอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ □ 40°C ◇ 50°C △ 60°C ○ 70°C ..... 66
- รูปที่ 4.16** ลักษณะรูปร่างสัณฐานของผงแห้งที่ผ่านการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดันบรรยากาศ ที่ลมร้อนมีอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ป้อนสารด้วยอัตรา 3 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนระหว่างแป้งมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครส (a) 100:0 (b) 90:10 (c) 80:20 (d) 70:30 (e) 60:40 (f) 50:50 (g) 40:60 (h) 30:70 (i) 20:80 (j) 10:90 ที่ภาพซ้ายขวากำลังขยายต่างกัน ..... 70
- รูปที่ 4.17** ผลของอัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสที่ △ 30:70 ○ 20:80 ต่อขนาดและการกระจายตัวของผงแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 120 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ.. 71
- รูปที่ 4.18** ผลของอัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสต่อความหนาแน่นรวมของผงแห้งอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 120 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ ..... 72
- รูปที่ 4.19** ผลของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิหลังการอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่อความหนาแน่นรวมของผงแห้ง อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 120 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ ..... 73
- รูปที่ 4.20** ผลของอัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสต่อร้อยละความชื้นของผงแห้งที่ลมร้อนขาเข้าอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ ..... 74
- รูปที่ 4.21** ผลของอัตราส่วนแป้งมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผงแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 120 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ โดยเก็บบริเวณที่เก็บสาร (เส้นทึบ)ไซโคลน (แห้งที่บ) รวมทั้งหมด (เส้นประ)..... 75
- รูปที่ 4.22** ผลของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิหลังการอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่อปริมาณร้อยละผลได้ในไซโคลนของการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ ..... 75

- รูปที่ 4.23** ลักษณะรูปร่างสัณฐานของผงแห้งที่ผ่านการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยมีอัตราส่วนระหว่างแป้งมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30:70 ป้อนสารด้วยอัตรา 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันและอุณหภูมิที่ใช้ (a) 1 atm, 120 °C (b) 0.54 atm, 40 °C (c) 0.54 atm, 50 °C (d) 0.54 atm, 60 °C (e) 0.54 atm, 70 °C ..... 77
- รูปที่ 4.24** ผลของอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่อขนาดและการกระจายตัวของผงแห้งที่ความดัน 0.54 บรรยากาศ โดยมีอัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสที่ 30:70..... 78
- รูปที่ 4.25** ผลของอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่อขนาดและการกระจายตัวของผงแห้งที่ความดัน 0.54 บรรยากาศ โดยมีอัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสที่ 20:80 (ที่ 40°C = NA) ..... 79
- รูปที่ 4.26** ผลของความดันในห้องอบแห้งต่อขนาดและการกระจายตัวของผงแห้งที่อัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30:70 ภายใต้ความดันบรรยากาศ และความ (เส้นประ) (เส้นทึบ) ดันสุญญากาศ..... 80
- รูปที่ 4.27** ผลของความดันในห้องอบแห้งต่อขนาดและการกระจายตัวของผงแห้งที่อัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 20:80 ภายใต้ความดันบรรยากาศ และความ (เส้นประ) (เส้นทึบ) ดันสุญญากาศ..... 80
- รูปที่ 4.28** ผลของอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่อความหนาแน่นรวมของผงแห้งอัตราส่วนแป้งมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30:70 ที่ถูกอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ ..... 81
- รูปที่ 4.29** ผลของอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่อร้อยละความชื้นของผงแห้งจากการอบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศ 0.54 บรรยากาศ โดยมีอัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ ( 30:70 ..... 82
- รูปที่ 4.30** ผลของอุณหภูมิที่ใช้ต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผงแห้งที่อัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30:70 โดยใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียสที่ความดันสุญญากาศ 0.54 บรรยากาศ และอุณหภูมิม้วน (120 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ ..... 83
- รูปที่ 4.31** ผลของอุณหภูมิที่ใช้และอัตราส่วนต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผงแห้งที่อัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30:70 20:80 10:90 และ 100:0 โดยใช้อุณหภูมิม้วน 120 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ และ (แห้งที่) 70 องศาเซลเซียสที่ความดันสุญญากาศ 0.54 บรรยากาศ(เส้นประ) (..... 84

- รูปที่ 4.32 ปริมาณร้อยละผลได้ของแป้งมอลโตเดกซ์ทริน โดยใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียสที่ความดันสุญญากาศ 0.34 (เส้นทึบ)0.54 (เส้นประ)0.74 (แฉ่งทึบ)... 85
- รูปที่ 4.33 ปฏิกิริยาการเกิดขึ้นในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้ความดันบรรยากาศ ..... 87
- รูปที่ 4.34 ปฏิกิริยาการเกิดขึ้นในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้ความดันสุญญากาศที่มีเครื่องให้ความร้อนแบบอินฟราเรด ..... 87





## คำอธิบายสัญลักษณ์

### สัญลักษณ์

A	คือ พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ( $m^2$ )
$C_{pf}$	คือ ความจุความร้อนที่ความดันคงที่ของลมร้อน ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$C_m$	คือ ความจุความร้อนของผงแห้งที่ปราศจากน้ำ ( $kJ/kg \cdot K$ )
$C_s$	คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุ ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$C_{Sc}$	คือ ความจุความร้อนของอากาศหลังช่วงที่ 2 ( $kJ/kg \cdot K$ )
$C_{s1}, C_{s2}$	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศขาเข้าและขาออก ( $kJ/kg \cdot K$ )
$C_w$	คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$d_p$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (m)
F	คือ แฟคเตอร์รูปร่าง (-)
$G_0$	คือ อัตราการไหลของอากาศ ( $kg/hr$ )
H	คือ ความชื้นของลมร้อน ( $kg_{moisture}/kg_{dry\ air}$ )
$H_c$	คือ ความชื้นอากาศหลังช่วงที่ 2 ( $kg_{moisture}/kg_{dry\ air}$ )
$H_m$	คือ ความชื้นอิ่มตัวของอากาศ ณ อุณหภูมิ $t_m$ ( $kg_{moisture}/kg_{dry\ air}$ )
$H_1, H_2$	คือ ความชื้นอากาศขาเข้าและขาออก ( $kg_{moisture}/kg_{dry\ air}$ )
h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2 \cdot K$ )
$h_D$	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล
$h_G$	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน
K	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ( $kg\text{-น้ำ} \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot \Delta H^{-1}$ )
k	คือ ความสามารถในการนำความร้อน ( $W/m \cdot K$ )
Le	คือ ตัวเลขลิวอิส (-)
Pr	คือ ตัวเลขพรานด์ทัล (-)

$\dot{Q}$	คือ อัตราการให้ความร้อน (kJ/hr)
$q$	คือ อัตราการไหลของความร้อน (W)
$R_c$	คือ อัตราการอบแห้งแบบคงที่ ( $\text{kg-น้ำ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (\text{m}^2\text{-พื้นที่การอบแห้งของวัสดุ})^{-1}$ )
$R_d$	คือ อัตราการอบแห้งช้าลง ( $\text{kg-น้ำ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (\text{m}^2\text{-พื้นที่การอบแห้งของวัสดุ})^{-1}$ )
$Re_p$	คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ (-)
$r_m$	คือ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของน้ำที่อุณหภูมิ $t_m$ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
$T$	คือ อุณหภูมิ ณ ที่ใดๆ (K)
$T_h$	คือ ค่าอุณหภูมิที่อุณหภูมิสูงกว่า (K)
$T_c$	คือ ค่าอุณหภูมิที่อุณหภูมิต่ำกว่าตามลำดับ (K)
$T_{G1}, T_{G2}$	คือ อุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออก (K)
$T'_{G1}$	คือ อุณหภูมิที่ลดลงหลังช่วงที่ 1 (K)
$T_{Gc}$	คือ อุณหภูมิหลังช่วงที่ 2 (K)
$T_g$	คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{mc}$	คือ อุณหภูมิหยดของเหลว (K)
$T_{m1}, T_{m2}$	คือ อุณหภูมิสารขาเข้าและขาออก (K)
$t$	คือ อุณหภูมิลมร้อน (K)
$t_m$	คือ อุณหภูมิวัสดุ (K)
$u$	คือ ความเร็วของลมร้อน ( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )
$\dot{V}_{\text{AIR}}$	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$\dot{V}_{\text{FL}}$	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหล (สารละลาย) ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$V_{\text{REL}}$	คือ ความเร็วสัมพัทธ์หรือความเร็วอากาศขาออกจากหัวฉีด (m/s)
$W$	คือ พลังงานการแผ่รังสีทั้งหมด หรือพื้นที่ทั้งหมดที่อยู่ใต้เส้นโค้งใดๆ (J)
$W$	คือ มวลวัสดุปราศจากน้ำ (kg)

$W_0$	คือ อัตราการป้อนสาร (kg/hr)
$W_\lambda$	คือ พลังงานในการแผ่รังสีเดี่ยว (J)
$w$	คือ สัดส่วนโดยมวล ( $\text{kg}_{\text{moisture}}/\text{kg}_{\text{dry}}$ )
$w_1$	คือ อัตราส่วนความชื้นก่อนการอบแห้ง ( $\text{kg}_{\text{moisture}}/\text{kg}_{\text{dry}}$ )
$w_2$	คือ อัตราส่วนความชื้นหลังการอบแห้ง ( $\text{kg}_{\text{moisture}}/\text{kg}_{\text{dry}}$ )
$w_c$	คือ อัตราส่วนความชื้นวิกฤต ( $\text{kg}_{\text{moisture}}/\text{kg}_{\text{dry}}$ )
$w_e$	คือ อัตราส่วนความชื้นสมดุล ( $\text{kg}_{\text{moisture}}/\text{kg}_{\text{dry}}$ )
$x$	คือ ระยะทางที่วัดจากที่ปกติถึงพื้นผิว (m)
$\sigma$	คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ซึ่งเท่ากับ $5.6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
$\sigma$	คือ แรงตึงผิวของของไหล (N/m)
$\varepsilon$	คือ ความสามารถในการแผ่รังสี (-)
$\lambda_f$	คือ ค่าการนำความร้อนของของไหล(ลมร้อน) ( $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
$\lambda_0$	คือ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ (kJ/kg)
$\rho$	คือ ความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\rho_f$	คือ ความหนาแน่นของลมร้อน ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),
$\mu$	คือ ความหนืดของของไหล (Pa s)
$\mu_f$	คือ ความหนืดของลมร้อน ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ )
$\theta$	คือ เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง (s)
$\theta_c$	คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่ (s)
$\theta_d$	คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งแบบลดลง (s)
$\Delta C_p$	คือ ความแตกต่างความจุความร้อนจำเพาะ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร จึงทำให้ภูมิอากาศเป็นแบบเขตร้อนหรือแบบ  
สะวันนา และมีปริมาณน้ำฝนตกตลอดทั้งปี และด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ประเทศไทยมีสภาพ  
อากาศที่สามารถปลูกอ้อยได้ทุกภาค ยกเว้นภาคใต้ จากสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล  
ทรายได้มีการสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยในปีการผลิต 2556/57 พบว่ามีพื้นที่ปลูกอ้อยทั่วประเทศจำนวน  
กว่า 10,078,025 ไร่และพื้นที่อ้อยส่งโรงงาน 9,234,253 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 7 ของพื้นที่เกษตรกรรม  
จึงถือได้ว่าอ้อยเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งอ้อยเป็นวัตถุดิบ  
หลักในการผลิตน้ำตาลซูโครสหรือน้ำตาลทราย ที่ถูกใช้โดยทั่วไปในการให้ความหวานและเป็นแหล่ง  
พลังงานแก่ร่างกาย การใช้งานโดยทั่วไปอ้อยจะถูกแปรรูปไปเป็นน้ำตาลทรายด้วยวิธีการตกผลึกให้ได้  
กลายเป็นผงของแข็งที่สามารถใช้งานได้ง่าย ยืดอายุการใช้งาน รวมถึงสะดวกทั้งการจัดเก็บและการ  
ขนส่ง อย่างไรก็ตามกระบวนการผลึกยังคงมีปัญหาทางด้านปริมาณพลังงานและเวลาที่สูญเสียไป รวม  
ไปถึงต้องผ่านกระบวนการหลายขั้นตอน ซึ่งเป็นปัญหาทั้งทางด้านต้นทุนลงทุน (Capital cost) และ  
ต้นทุนการผลิต (Production cost) ดังนั้นกระบวนการทำน้ำตาลซูโครสผงด้วยวิธีอื่นจึงเป็นสิ่งจำเป็น  
ที่ต้องศึกษา

วิธีการลดปริมาณน้ำและทำให้เป็นผงมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี กระบวนการที่สำคัญคือการ  
อบแห้ง ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ความร้อนในการกำจัดน้ำหรือตัวทำละลายอื่นออกเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็น  
ของแข็งแห้งหรือมีความชื้นเหลือเพียงเล็กน้อย จุดประสงค์หลักของการอบแห้งที่ใช้ในอุตสาหกรรม  
อาหารเพื่อลดการเจริญของจุลินทรีย์ ซึ่งเกิดจากการที่มีปริมาณน้ำมาก ซึ่งเครื่องอบแห้งที่ใช้ใน  
โรงงานอุตสาหกรรมมีอยู่หลากหลายชนิด เช่น เครื่องอบแห้งแบบถาด เครื่องอบแห้งแบบสายพาน  
เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เป็นต้น โดยเครื่องอบแห้งที่นิยมใช้ในการ  
อบแห้งให้ได้อ้อยของแข็งจากของเหลวข้น (slurry) คือ เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ยา และผงซักฟอก  
เพราะเป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยาก ใช้เวลาในการอบแห้งน้อย และได้อนุภาคขนาดเล็กระดับ  
ไมโครเมตร โดยเครื่องนี้จะทำการอบแห้งด้วยวิธีการฉีดพ่นสารละลายหรือของเหลวเป็นละอองฝอย  
หยดเล็กๆและใช้ลมร้อนไหลผ่านทำหน้าที่ในการให้ความร้อน เพื่อให้ของเหลวหรือความชื้นถูกระเหย  
ออกมา และได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีความชื้นต่ำ แต่เครื่องอบแห้งชนิดนี้จะมีปัญหาการเหนียวติดขึ้น

บริเวณผนังของห้องอบแห้งในการอบแห้งสารอาหารที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบจำนวนมากอยู่ เช่น น้ำผลไม้ต่างๆ เนื่องจากน้ำตาลจะเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยางขึ้นเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว [1] ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทำน้ำตาลให้กลายเป็นผงจะใช้กระบวนการตกผลึก แต่วิธีนี้จำเป็นต้องใช้สารที่มีความบริสุทธิ์สูง กระบวนการซับซ้อน ใช้พลังงานความร้อนมาก และใช้เวลายาวนาน จึงควรปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายที่โดยปกติใช้วิธีการตกผลึก

เนื่องจากปกติการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูง ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนียวติดเกาะกันเป็นก้อนระหว่างอนุภาคผงขึ้น ดังนั้นจึงต้องทำการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำแทน แต่ส่งผลให้ปริมาณความชื้นในของแข็งระเหยออกไปได้น้อยลง และในกรณีความชื้นเหลืออยู่มากจะทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของสารผสมลดต่ำลงอีกด้วย จึงได้มีการทดลองใช้การอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะสุญญากาศขึ้น [2] เพราะน้ำจะสามารถระเหยได้ดีขึ้นเมื่อความดันลดต่ำลง ซึ่งภายใต้เงื่อนไขนี้สามารถประสบความสำเร็จทั้งเรื่องการใช้อุณหภูมิต่ำและความชื้นสามารถระเหยออกไปได้เยอะ โดยปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบปกติได้โดยการติดตั้งปั๊มสุญญากาศแทน และมีเครื่องให้ความร้อนเพิ่มเติม เนื่องจากมีลมร้อนน้อยลงในสภาวะสุญญากาศ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะสุญญากาศของน้ำตาลซูโครส ที่สามารถทำให้เกิดของแข็งที่มีคุณสมบัติในการไหลได้ดี เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตผงน้ำตาลทรายต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งน้ำตาลซูโครสด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะสุญญากาศ

1.2.2 เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผงน้ำตาลที่มีความสามารถในการไหลได้ดีด้วยวิธี การอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สุญญากาศ

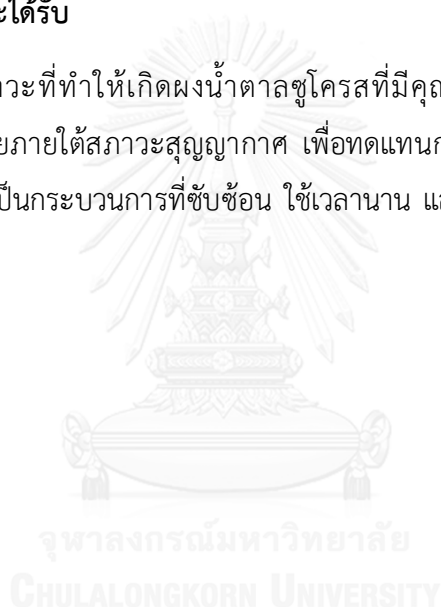
## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยการผลิตผงน้ำตาลซูโครสด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยที่ปริมาณของแข็งเริ่มต้นที่ร้อยละ 40 และอัตราการป้อนที่ 3 มิลลิลิตรต่อนาที โดยทำการศึกษาอิทธิพลดังต่อไปนี้

- 1.3.1 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งที่ 40, 50, 60, 70 และ 120 องศาเซลเซียส
- 1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของสูญญากาศที่เกิดขึ้นโดยใช้ความดันระบบที่ 0.54 และ 1 บรรยากาศ (atm)
- 1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างผงแป้งมอลโตเดกซ์ตริน DE11 กับน้ำตาลซูโครส ที่อัตราส่วน 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยน้ำหนักสำหรับการอบแห้งที่สภาวะปกติ และอัตราส่วน 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 สำหรับการอบแห้งที่สภาวะสูญญากาศ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถหาสภาวะที่ทำให้เกิดผงน้ำตาลซูโครสที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการโดยการใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะสูญญากาศ เพื่อทดแทนการทำให้เป็นอนุภาคผงด้วยวิธีการตกลึกที่ใช้โดยทั่วไป ซึ่งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ใช้เวลานาน และสิ้นเปลืองพลังงานมาก



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การเน่าเสียของอาหาร

การเน่าเสียของอาหาร คือ การเกิดความเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอาหารทั้งทางด้านกายภาพและทางด้านเคมี เช่น สี กลิ่น รส เนื้อสัมผัส คุณค่าทางโภชนาการ เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้อาหารเสื่อมคุณภาพหรือเน่าเสีย ทำให้มีลักษณะที่ไม่พึงประสงค์แก่ผู้บริโภค รวมถึงความปลอดภัยในการบริโภคอาหารเน่าเสียเหล่านี้ เกิดปัญหาด้านสาธารณสุขและสุขภาพขึ้น ซึ่งเกษตรกรและประเทศชาติต้องสูญเสียเงินตราจากปัญหาการเน่าเสียไปเป็นจำนวนมาก สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการเน่าเสียขึ้นเกิดจากจุลินทรีย์ในอาหาร โดยมีเอนไซม์ในอาหารเป็นปัจจัยในการย่อยสลายสารอาหารให้อยู่ในรูปที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้สะดวก จุลินทรีย์จึงเกิดการเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว และทำให้เกิดอาหารเน่าเสียในที่สุด [3, 4]

อาหารแต่ละชนิดจะเกิดการเน่าเสียช้าเร็วแตกต่างกัน โดยสามารถจำแนกหลักๆออกได้เป็น 3 ประเภท ดังต่อไปนี้

1. อาหารเน่าเสียยาก คืออาหารที่มีปริมาณของน้ำปนอยู่น้อยมาก อาทิ ธัญพืช ถั่วเมล็ดแห้งต่างๆ น้ำตาล แป้ง เมล็ดพืช เป็นต้น โดยอาหารเหล่านี้สามารถเก็บไว้ได้นานหลายเดือนหรือเป็นปีได้เลยทีเดียว

2. อาหารเน่าเสียเร็วปานกลาง คืออาหารที่มีปริมาณน้ำอยู่ค่อนข้างมาก เช่น ผัก ผลไม้ พืชหัว แม้จะมีปริมาณน้ำอยู่มาก แต่เนื่องจากมีเนื้อเยื่อเกาะกันแน่น และโดยมากจะมีเปลือกหุ้มจึงทำให้เก็บไว้ได้ค่อนข้างนาน สามารถอยู่ได้นาน 1-4 สัปดาห์

3. อาหารเน่าเสียง่าย คืออาหารที่มีปริมาณน้ำมาก เช่น นม เนื้อสัตว์ ปลา อาหารทะเล โดยมากจะเกิดการเน่าเสียภายใน 1-2 วันเท่านั้น

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเน่าเสียของอาหารมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำภายในอาหาร ดังนั้นการจำกัดปริมาณน้ำจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการเน่าเสียของอาหารได้

วิธีการลดปริมาณน้ำสามารถทำได้หลายวิธี เช่น

1. การกำจัดน้ำออกด้วยหน่วยปฏิบัติการต่างๆ เช่น การทำให้แห้ง การระเหย การอบแห้ง การระเหิด การออสโมซิสโดยใช้เมมเบรน

2. การตกผลึกน้ำในอาหารให้กลายเป็นน้ำแข็ง การมีน้ำแข็งจะทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในน้ำส่วนที่เหลือเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ( $a_w$ ) ลดต่ำลง รวมถึงค่า  $a_w$  ของน้ำ และน้ำแข็งจะต่ำลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส เช่น น้ำบริสุทธิ์จะมีค่า  $a_w$  เท่ากับ 1.00 ที่ 0 องศาเซลเซียส และจะลดลงเหลือ 0.953, 0.907, 0.823 เมื่ออุณหภูมิลดลงไปที่ -5, -10, -20 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3. การตรึงน้ำในอาหาร เช่นการใช้สารคอลลอยด์ที่ชอบอยู่รวมกับน้ำเพื่อให้จุลินทรีย์ไม่สามารถนำน้ำไปใช้ได้ อย่างการใส่วุ้นลงไปในการเพียงเล็กน้อย จะสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ หรือการเติมอิมูนหรือตัวถูกละลายลงในน้ำเพื่อตั้งไม้ให้เป็นน้ำอึสระ เช่น น้ำตาลหรือเกลือ จึงมีผลทำให้อาหารเกิดการแห้งลง ซึ่งนอกจากดึงน้ำจากสารละลายแล้วยังสามารถดึงน้ำที่อยู่ในเซลล์จากกระบวนการออสโมซิสอีกด้วย



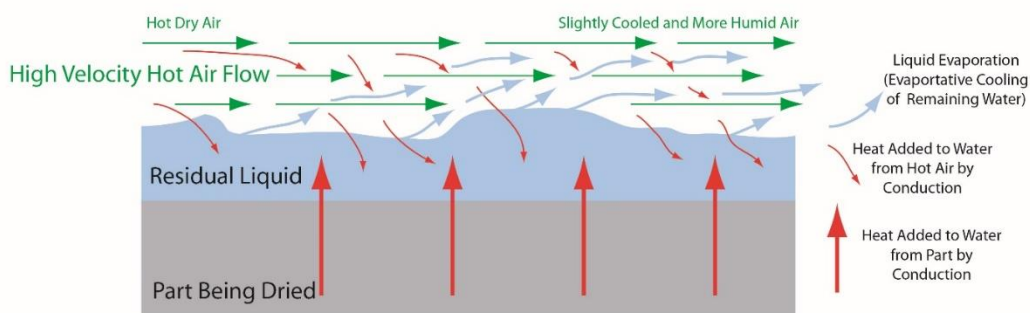


## 2.2 การอบแห้งหรือการทำแห้ง (Drying)

การอบแห้งเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการถนอมอาหาร โดยการแปรสภาพของเหลวหรือของเหลวกึ่งแข็งให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งด้วยวิธีการกำจัดของเหลว (โดยทั่วไปคือน้ำ แต่ในบางกรณีอาจจะเป็นตัวทำละลายอื่น) ส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดโดยการให้ความร้อน [5, 6] วัตถุประสงค์หลักของการอบแห้ง คือเพื่อยืดอายุในการเก็บรักษาอาหารโดยการลดปริมาณน้ำลงหรือกล่าวโดยนัยคือการลดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ซึ่งทำให้จุลินทรีย์หยุดการเจริญเติบโตและหยุดการทำงานของเอนไซม์ลง นอกจากนี้การอบแห้งยังทำให้น้ำหนักและปริมาตรลดลง ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาและการขนส่งผลิตภัณฑ์อีกด้วย

### 2.2.1 กลไกการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อน เนื่องจากกระบวนการนี้ทั้งการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้ไปพร้อมกัน นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางเคมี เช่น เกิดการหดตัว การพองตัว การแตกผลึก การหลอมเหลว เป็นต้น ปัจจัยสำคัญในการอบแห้ง คือ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ปัจจัยรองลงมา คือ ความเร็วของอากาศที่ผ่าน การอบแห้งจะเกิดขึ้นเมื่ออากาศร้อนพัดผ่านผิวหน้า ของเหลวโดยทั่วไปคือน้ำจะได้รับความร้อนและเมื่ออุณหภูมิขึ้นจนถึงจุดเดือด น้ำจะกลายสภาพเป็นไอน้ำและแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของอาหาร อากาศร้อนที่เคลื่อนที่ตามมาจะรับไอน้ำนี้รวมกับอากาศออกไป น้ำที่อยู่ภายในจะแพร่ออกมาที่ผิวหน้าและถูกอากาศพาออกไป ทำให้เกิดการแห้งขึ้น การเคลื่อนที่ของความชื้นผ่านอากาศร้อนแสดงในรูปที่ 2.1 แรงขับ (driving force) ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้คือเกรเดียนต์ของไอน้ำ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความชื้นระหว่างอากาศกับความชื้นภายใน



รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของความชื้นผ่านอากาศร้อน [7]

ชั้นขอบฟิล์มที่เกิดบนผิวหน้าทำหน้าที่ต้านทานการถ่ายโอนความร้อนและมวลสาร (ไอน้ำ) ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ซึ่งความหนาของชั้นฟิล์มขึ้นกับความเร็วของอากาศร้อนที่พัดผ่าน หากอากาศเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วต่ำ ชั้นฟิล์มจะหนาทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนทั้งสองลดลง ส่งผลให้เมื่อไอน้ำถูกกำจัดไปสู่อากาศชั้นจะทำให้เกรเดียนต์ลดลง และอัตราการอบแห้งช้าลง ดังนั้นจึงต้องทำการเพิ่มอัตราเร็วของอากาศร้อนเพื่อทำให้ชั้นฟิล์มบางลงและสามารถอบแห้งได้เร็วยิ่งขึ้น ด้วยเหตุผลข้างต้นปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งมี 3 คือ อุณหภูมิกระแสเป่าแห้งสูง ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต่ำ และอัตราเร็วของอากาศร้อนสูง

### 2.2.1.1 การถ่ายโอนความร้อน

โดยทั่วไป การถ่ายโอนความร้อนหรือการถ่ายเทความร้อน มีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี ดังนี้

#### 1) การพาความร้อน (Convection)

เป็นการถ่ายเทพลังงานความร้อนด้วยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารจากที่หนึ่งสู่อีกที่หนึ่ง เครื่องอบแห้งด้วยวิธีการพาความร้อนสามารถเรียกได้อีกอย่างว่าเป็นเครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยตรง (Direct Dryers) เพราะ ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการจะได้รับความร้อนโดยตรงจากตัวกลางอบแห้งแบบเคลื่อนที่ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วเครื่องอบแห้งชนิดนี้เป็นที่นิยมกันมากในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถนำความร้อนแฝงจากการกลายเป็นไอ (โดยทั่วไป เครื่องอบแห้งชนิดนี้มักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางการอบแห้ง ในบางกรณีอาจใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางได้เช่นกัน) กลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

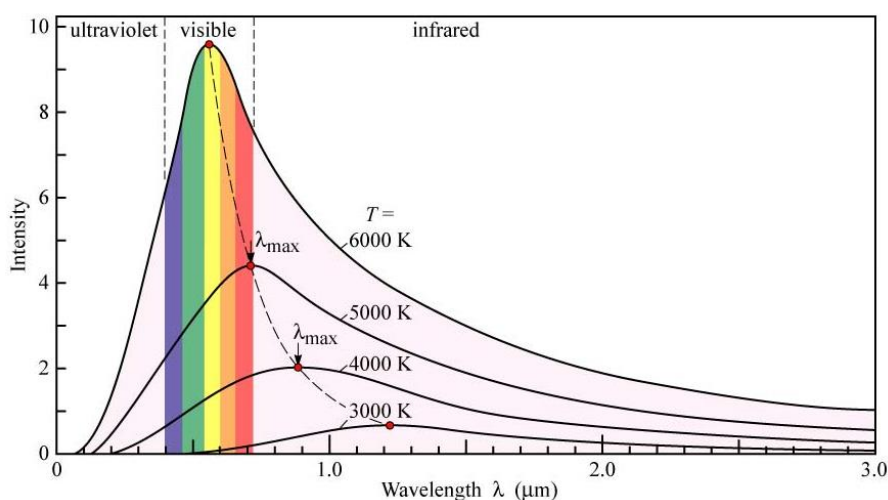
#### 2) การนำความร้อน (Conduction)

เป็นการถ่ายเทความร้อนไปสู่อีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่ติดกันไปเรื่อยๆจากการสั่นของโมเลกุล แต่จะไม่เกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสาร ซึ่งการอบแห้งด้วยการนำความร้อนสามารถเรียกได้ว่าเป็นเครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยอ้อม (Indirect Dryers) อันเนื่องมาจากเครื่องอบแห้งชนิดนี้อาศัยหลักการเป็นการถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางการให้ความร้อน (Heat Transfer Medium) โดยที่ตัวกลางการให้ความร้อนและผลิตภัณฑ์ไม่ได้สัมผัสกันโดยตรง การให้ความร้อนทำโดยผ่านผนังซึ่งกั้นระหว่างตัวกลางการให้ความร้อน เช่น ไอน้ำ น้ำมันร้อน หรือแก๊สร้อน กับผลิตภัณฑ์โดยการนำความร้อน เนื่องจากในเครื่องอบแห้งแบบนี้ไม่เกิดการสัมผัสกันระหว่างผลิตภัณฑ์กับตัวกลางการให้ความร้อน ดังนั้นจึงมักใช้สุญญากาศ (Vacuum) ในการดึงความชื้นที่ระเหยออกมาจากผลิตภัณฑ์ออกไปจากระบบ เพื่อไม่ให้เกิดสถานะอิมัตจนทำให้ไม่สามารถอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ การอบแห้งแบบนี้มีข้อดีที่ไม่มีการสัมผัสกันโดยตรง ทำให้ไม่ก่อเกิดปัญหาการระเบิดหรือติดไฟสำหรับวัสดุที่ติด

ไฟได้ง่าย รวมถึงการนำตัวทำละลายซึ่งระเหยออกมาจากผลิตภัณฑ์กลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายเพราะไม่เกิดการผสมกับอากาศหรือตัวกลางอื่นในปริมาณมาก นอกจากนี้ในสภาวะสุญญากาศ จุดเดือดของของเหลวที่ต้องการกำจัดออกจะลดลงทำให้สามารถอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำได้ ซึ่งสามารถช่วยลดการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ เช่น ผัก ผลไม้ ผลิตภัณฑ์ยา เป็นต้น

### 3) การแผ่รังสี (Radiation)

เป็นการถ่ายโอนความร้อนโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งผ่านความร้อน ต่างจากการนำและการพาความร้อนที่ต้องอาศัยตัวกลาง ดังนั้นจึงดวงอาทิตย์จึงสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านอวกาศด้วยวิธีการแผ่รังสีได้ การถ่ายโอนความร้อนแบบนี้จะเกิดขึ้นกับวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า  $-273$  องศาเซลเซียส หรือ  $0$  องศาเคลวิน โดยวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงจะแผ่รังสีคลื่นสั้น ส่วนวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำจะแผ่รังสีคลื่นยาว พลังงานการแผ่รังสีความร้อน (emissive power, W) ของวัตถุจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.2 โดยวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงจะแผ่พลังงานความร้อนมาก นอกจากนี้พลังงานที่ออกมาขึ้นอยู่กับความสามารถในการแผ่รังสีความร้อน (emissivity,  $\epsilon$ ) ของวัตถุแต่ละชนิดอีกด้วย



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการแผ่รังสีความร้อนกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป [8]

นอกจากการอบแห้งโดยใช้การแผ่รังสีความร้อนนี้ ยังมีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ในการอบแห้งด้วย เช่น ใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave) ในการอบแห้งแอปเปิ้ล [9] หรือการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดของมะกอก [10] ข้อดีของการใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งคือความสามารถในการทะลุเข้าไปในเนื้อของผลิตภัณฑ์ทำให้โมเลกุลของเหลวภายในเกิดการสั่นและเกิดความร้อน จึงทำให้อุณหภูมิภายในสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก ส่งผลทำให้ผิวภายนอกของวัสดุอบแห้งไม่เกิดการพังทลายหรือการเหี่ยวแห้งขึ้น นอกจากนี้การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดยังสามารถให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว

กระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอและใช้พลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย อย่างไรก็ตาม วัสดุอินฟราเรดเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีความร้อนไม่สูงมากนั้นเท่านั้นและมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าวิธีการถ่ายโอนความร้อนสองข้างต้น ดังนั้นการอบแห้งชนิดนี้จึงเหมาะกับวัสดุที่มีราคาแพงหรือที่ต้องการนำความร้อนขึ้นเล็กน้อยภายในที่ออกไปได้ยาก

## 2.2.2 การคำนวณพลังงานที่ได้จากการถ่ายโอนความร้อน

### 2.2.2.1 การคำนวณพลังงานความร้อนที่ได้จากการนำความร้อน

การถ่ายโอนความร้อนด้วยวิธีการนำความร้อนเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของความร้อน (heat flux) กับความแตกต่างของอุณหภูมิ (temperature gradient) [11] ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Fourier โดยหากเป็นการถ่ายโอนหนึ่งมิติในแนวแกน  $x$  จะได้ว่า

$$\frac{dq}{dA} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

โดยที่  $q$  คือ อัตราการไหลของความร้อน (W)

$A$  คือ พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ( $m^2$ )

$T$  คือ อุณหภูมิ ณ ที่ใดๆ (K)

$x$  คือ ระยะทางที่วัดจากที่ปกติถึงพื้นผิว (m)

$k$  คือ ความสามารถในการนำความร้อน (W/m·K)

รูปสมการทั่วไปของกฎ Fourier ในการไหลสามทิศทางจะได้

$$\frac{dq}{dA} = -k \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -k \nabla T \quad (2.2)$$

ในแนวแกนแบบทรงกระบอกจะกลายเป็น

$$\frac{\partial q}{\partial A} = -k \left( \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -k \nabla T \quad (2.3)$$

และในแนวแกนทรงกลมจะได้

$$\frac{\partial q}{\partial A} = -k \left( \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) = -k \nabla T \quad (2.4)$$

### 2.2.2.2 การคำนวณพลังงานความร้อนที่ได้จากการพาความร้อน

ค่าพลังงานการถ่ายโอนความร้อนจากการพาความร้อนสามารถหาได้จากตามสมการดังต่อไปนี้

$$q = hA(T_h - T_c) \quad (2.5)$$

โดยที่ $q$	คือ อัตราการไหลของความร้อน (W)
$h$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2 \cdot K$ )
$A$	คือ พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ( $m^2$ )
$T_h, T_c$	คือ ค่าอุณหภูมิที่อุณหภูมิสูงกว่าและต่ำกว่าตามลำดับ (K)

ซึ่งค่า  $h$  จะหาค่าได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของการพาความร้อนว่าเป็นแบบธรรมชาติ (natural or free convection) หรือ เป็นแบบบังคับ (forced convection)

### 2.2.2.3 การคำนวณพลังงานความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสี

จากที่ได้กล่าวในบทที่แล้ว พลังงานที่ได้จากการแผ่รังสีขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของพื้นผิวและความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมา ดังรูปที่ 2 ซึ่งสามารถหาค่าพลังงานการแผ่รังสีทั้งหมดได้จากการรวมการแผ่รังสีเดี่ยวทั้งหมดจากพื้นผิว หรือจากสมการ

$$W = \int_0^\infty W_\lambda d\lambda \quad (2.6)$$

โดยที่  $W$  คือ พลังงานการแผ่รังสีทั้งหมด หรือพื้นที่ทั้งหมดที่อยู่ใต้เส้นโค้งใดๆ

$W_\lambda$  คือ พลังงานในการแผ่รังสีเดี่ยว

ในการแผ่รังสีได้มีการสมมติวัตถุดำ (Blackbody) โดยหมายถึงวัตถุแผ่รังสีในอุดมคติซึ่งสามารถปลดปล่อยพลังงานได้มากที่สุดที่อุณหภูมิใดๆ รวมถึงสามารถดูดกลืนรังสีทั้งหมดที่เข้ามา (ไม่มีการทะลุผ่านและการสะท้อน) ซึ่งในความเป็นจริงแล้วไม่มีสิ่งใดมีคุณสมบัติตามนี้ แต่อาจจะมีสิ่งที่มีคุณสมบัติใกล้เคียง เช่น คาร์บอนแบล็ค (carbon black) โดยวัตถุดำนี้มักถูกใช้ในการอ้างอิงเป็นมาตรฐานของวัตถุแผ่รังสีอื่น ซึ่งนิยามอัตราส่วนระหว่างพลังงานในการแผ่รังสีของวัตถุใดๆ ( $W$ ) ต่อของวัตถุดำ ( $W_b$ ) คือความสามารถในการแผ่รังสี (emissivity,  $\epsilon$ )

$$\epsilon \equiv \frac{W}{W_b} \quad (2.7)$$

ความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุของแข็งแตกต่างกันตามสภาวะ โลหะที่มีการขัดถูจะมี ความสามารถในการแผ่รังสีต่ำ โดยอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.10 และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น รวมทั้งของแข็งจำพวกฉนวนจะมีการแผ่รังสีต่ำ ในขณะที่โลหะออกไซด์อยู่ในช่วง 0.6 ถึง 0.85 วัสดุจำพวกกระดาษ บอร์ด และวัสดุก่อสร้างมีค่าในช่วง 0.65 ถึง 0.95

การคำนวณพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น มีอยู่ 2 วิธี [11] คือ

### 1. พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการแผ่รังสี

ความสัมพันธ์สำหรับการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำเป็นไปตามกฎของ Stefan-Boltzmann ซึ่งพลังงานการแผ่รังสีทั้งหมดของวัตถุดำแปรผันกับอุณหภูมิยกกำลังสี่

$$W_b = \sigma T^4 \quad (2.8)$$

โดย  $\sigma$  คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ซึ่งเท่ากับ  $5.6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

ซึ่งจากสมการที่ 2.8 สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปการถ่ายโอนความร้อนได้เป็น

$$q = \sigma AT^4 \quad (2.9)$$

โดย  $q$  คือ การถ่ายโอนความร้อนต่อเวลา (W)

$A$  คือ พื้นที่ที่แผ่ความร้อน ( $\text{m}^2$ )

ในกรณีของวัตถุที่ไม่ใช่วัตถุดำสามารถเขียนสมการการถ่ายโอนความร้อนด้วยวิธีการแผ่รังสี โดยใช้ความสามารถในการแผ่รังสี ( $\epsilon$ ) มาช่วย ซึ่งเขียนได้เป็น

$$q = \epsilon \sigma AT^4 \quad (2.10)$$

### 2. พลังงานความร้อนที่ได้รับจากการแผ่รังสี

เมื่อมีการแผ่รังสีตกกระทบบนผิวของแข็งจะมีรังสีบางส่วนถูกสะท้อนออกไป ในขณะที่บางส่วนจะถูกดูดซับไว้ ซึ่งของแข็งส่วนใหญ่ นอกจากแก้ว, พลาสติก, คุวอช และแร่บางชนิด สามารถดูดซับได้ทุกความยาวคลื่น โดยการดูดซับรังสีของของแข็งที่บดแสงนี้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบริเวณพื้นผิว ไม่เกี่ยวข้องกับปริมาตร ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องสนใจภายในของของแข็ง ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ จะไหลผ่านมวลของแข็งด้วยวิธีการนำความร้อน

จากกฎของ Kirchhoff ได้กล่าวว่าที่อุณหภูมิสมดุล อัตราส่วนระหว่างพลังงานการแผ่รังสีทั้งหมดของวัตถุใดๆต่อความสามารถในการดูดความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิวัตถุอย่างเดียวนั้นเมื่อพิจารณาวัตถุใดๆสองชนิดที่อุณหภูมิสมดุลจะได้ว่า

$$\frac{W_1}{\alpha_1} = \frac{W_2}{\alpha_2} \quad (2.11)$$

ถ้าสมมติให้วัตถุแรกเป็นวัตถุดำจะได้ว่า  $\alpha_1 = 1$  และ

$$W_1 = W_b = \frac{W_2}{\alpha_2}$$

$$\alpha_2 = \frac{W_2}{W_b} \quad (2.12)$$

ซึ่งจากนิยามความสามารถในการแผ่รังสีจะได้ว่า

$$\varepsilon_2 = \frac{W_2}{W_b} = \alpha_2 \quad (2.13)$$

ดังนั้นจากสมการข้างต้นจะได้ว่า วัตถุใดๆที่สภาวะอุณหภูมิตลอด ค่าการแผ่รังสีกับค่าการดูดซับจะมีค่าเท่ากัน ซึ่งโดยทั่วไปถ้าไม่ใช้วัตถุดำหรือวัตถุเทาจะมีค่าการแผ่รังสีและการดูดซับไม่เท่ากัน ถ้าวัตถุไม่ได้อยู่ในอุณหภูมิตลอด

จากสาเหตุข้างต้น สามารถแก้ปัญหาโดยคิดจากตัวอย่างง่ายๆ สมมติวัตถุขนาดเล็กที่ไม่ใช่สีดำถูกล้อมรอบด้วยพื้นผิวสีดำ โดยให้พื้นที่ผิวที่ถูกปิดล้อมและที่ล้อมรอบแทนด้วย  $A_1$  และ  $A_2$  ตามลำดับ รวมทั้งแทนอุณหภูมิตั้งพื้นผิวเป็น  $T_1$  และ  $T_2$  ตามลำดับ พลังงานจากการแผ่รังสีจากผิว  $A_2$  ตกกลงไปบนผิว  $A_1$  จะได้  $\sigma A_2 F_{21} T_2^4$  (โดยที่  $F$  คือ แฟคเตอร์รูปร่าง) พลังงานบางส่วนจะถูกดูดซับบนพื้นผิว  $A_1$  พลังงานส่วนที่เหลือจะถูกสะท้อนส่งกลับไปยังสีดำที่อยู่รอบๆ และถูกดูดซับกลับบนพื้นผิว  $A_2$  ทั้งหมด พื้นผิว  $A_1$  ปลอยรังสีเป็นปริมาณเท่ากับ  $\sigma A_1 \varepsilon_1 T_1^4$  ซึ่งรังสีทั้งหมดนี้จะถูกดูดซับโดยพื้นผิว  $A_2$  และไม่มีการสะท้อนกลับมา ค่าความสามารถในการแผ่รังสี,  $\varepsilon_1$  และค่าการดูดซับ  $\alpha_1$  ไม่เท่ากัน เพราะพื้นผิวทั้งสองไม่ได้มีอุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้นพลังงานที่สูญเสียไปบนพื้นผิว  $A_1$  จะได้

$$q_{12} = \sigma \varepsilon_1 A_1 T_1^4 - \sigma A_2 F_{21} \alpha_1 T_2^4 \quad (2.14)$$

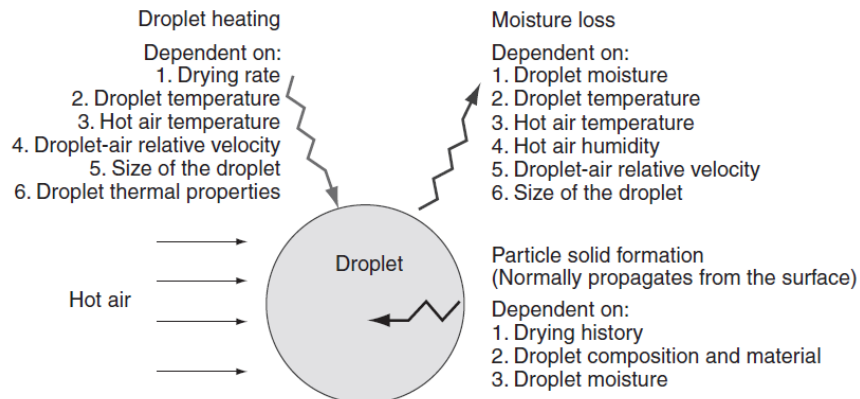
ในทางกลับกัน พลังงานที่ได้รับบนพื้นผิว  $A_1$  จะได้

$$q_{21} = \sigma A_2 F_{21} \alpha_1 T_2^4 - \sigma \varepsilon_1 A_1 T_1^4 \quad (2.15)$$

### 2.2.3 กลไกการระเหยน้ำออกในการอบแห้ง [6]

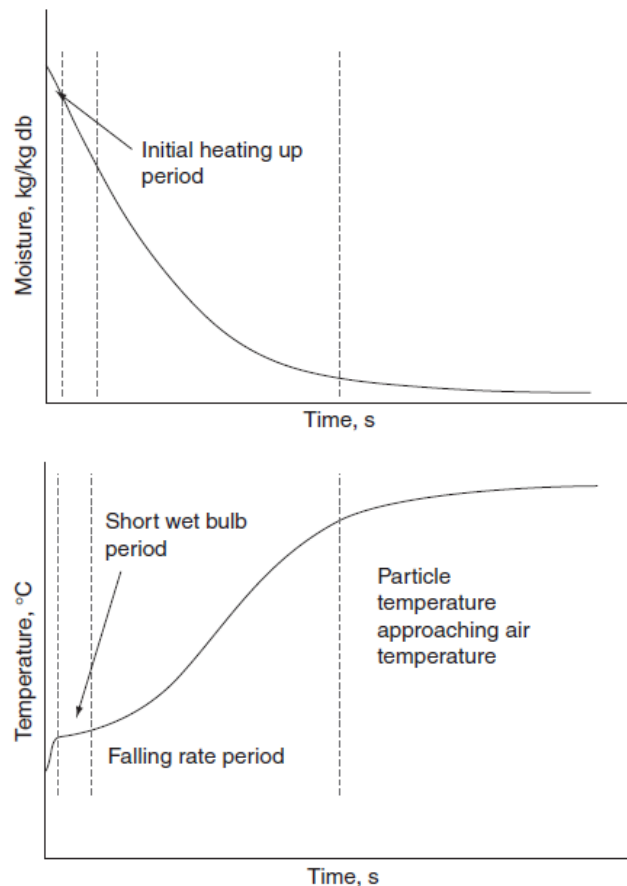
ถ้าเอาวัสดุที่เปียกขึ้นมาให้ความร้อนโดยการอบแห้งจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาจะไม่คงที่ ทั้งนี้เนื่องมาจากความชื้นบริเวณผิวนอกของวัสดุจะเกิดการระเหยได้อย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศร้อนที่พัดผ่าน แต่ความชื้นที่อยู่ภายในจะเกิดการระเหยออกไปได้ช้ากว่าอันเนื่องมาจากต้องเคลื่อนที่จากด้านในสู่ด้านนอกก่อน ซึ่งการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในอาจเกิดจากหลายกลไก เช่น การแพร่ของของเหลว (Liquid Diffusion) การแพร่ของไอ (Vapor Diffusion) การแพร่แบบ Knudsen (Knudsen Diffusion) ซึ่งเกิดขึ้นในการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำและความดันต่ำมากๆ เป็นต้น กลไกที่เกิดระหว่างการ

อบแห้งแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลง (การถ่ายโอน) ของทั้งมวลสารและพลังงานที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.3 การถ่ายโอนมวลสารและพลังงานระหว่างการอบแห้ง [9]

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะสังเกตเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะไม่คงที่ เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4





## รูปที่ 2.4 ความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา [12]

จากรูปที่ 2.4 สามารถแบ่งช่วงของการอบแห้งได้ออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 ช่วงเวลาของการอุ่นวัสดุ (ช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ)

เป็นช่วงแรกเริ่มของการอบแห้งที่วัสดุสัมผัสกับอากาศร้อน ซึ่งวัสดุนำความร้อนจากอากาศมาใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิแรกเริ่มจนถึงอุณหภูมิสมดุล (อุณหภูมิที่ได้จากการรับความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิกับสูญเสียความร้อนแฝงจากการกลายเป็นไอ เนื่องจากการระเหยของน้ำออก มีค่าเท่ากัน) ซึ่งถูกกำหนดด้วยเงื่อนไขการอบแห้ง ในกรณีการพาความร้อน อุณหภูมิสมดุลจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก ส่วนกรณีการนำและการแผ่รังสีนั้นจะไม่เท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก ในช่วงนี้จะเกิดเพียงระยะเวลาสั้นๆและมีการระเหยของเหลว (น้ำ) ออกไปเพียงเล็กน้อยหรือแทบไม่เกิดการระเหยเลย

ช่วงที่ 2 ช่วงเวลาของการอบแห้งที่มีอัตราคงที่

เป็นช่วงที่อุณหภูมิของวัสดุมีค่าคงที่ ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ได้รับมาจากอากาศร้อนจะถูกนำไปใช้ในการระเหยความชื้นออกจากวัสดุ ดังนั้นอัตราการอบแห้งจะมีค่าคงที่ ช่วงเวลานี้จะดำเนินต่อไปตราบเท่าที่มีน้ำอิสระอยู่ที่บริเวณผิวของวัสดุและยังเกิดการระเหยขึ้นอยู่

ช่วงที่ 3 ช่วงเวลาของการอบแห้งที่อัตราลดลง

เป็นช่วงเวลาที่มีอัตราส่วนของความชื้นอิสระบริเวณผิวลดลง และความชื้นจากภายในวัสดุไม่สามารถเคลื่อนที่มาชดเชยได้ทันกับอัตราการระเหยของน้ำ ทำให้น้ำอิสระบริเวณผิวจะหมดไปและการระเหยจะร่นพื้นที่เข้าไปภายในตัววัสดุ ซึ่งช่วงเวลานี้อัตราการระเหยกับความชื้นที่วัสดุได้รับจะไม่สมดุลกัน จึงส่งผลให้อุณหภูมิของวัสดุค่อยๆเพิ่มขึ้นและทำให้อุณหภูมิความร้อนที่วัสดุได้รับค่อยๆลดลง เนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัสดุและอากาศร้อนน้อยลง เพราะเหตุนี้จึงทำให้อัตราการอบแห้งลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งความร้อนที่ได้รับจะถูกใช้ในการระเหยน้ำและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัสดุ

### 2.2.4 การคำนวณของการอบแห้ง

เงื่อนไขในการอบแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เงื่อนไขภายนอก เช่น อุณหภูมิ ลมร้อน ความชื้นของลมร้อน ความเร็วลม ส่วนเงื่อนไขภายใน คือ องค์ประกอบรูปร่าง อัตราส่วน

ความชื้นวิกฤต อัตราส่วนความชื้นสมดุล เงื่อนไขทั้งสองเป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์อบแห้ง

ถ้าสมมุติให้วัสดุมีอุณหภูมิภายในเท่ากันหมด และความร้อนที่ถ่ายเทจากลมร้อนไปให้ถูกใช้ ในการระเหยน้ำและการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ จะได้สมการดุลความร้อนดังนี้

$$\left(\frac{W}{A}\right)(C_s + WC_w) \frac{dt_m}{d\theta} = h(t - t_m) - \frac{W}{A} \left(-\frac{dW}{d\theta}\right) r_m \quad (2.16)$$

$W$  คือ มวลวัสดุปราศจากน้ำ (kg),  $A$  คือ พื้นที่ผิวการอบแห้ง ( $m^2$ ),  $C_s$  คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุ ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $C_w$  คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $h$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนกับวัสดุ ( $kJ \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ),  $t$  คือ อุณหภูมิลมร้อน (K),  $t_m$  คือ อุณหภูมิวัสดุ (K),  $r_m$  คือ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของน้ำที่อุณหภูมิ  $t_m$  ( $kJ \cdot kg^{-1}$ ) จากสมการข้างต้น พจน์ด้านซ้ายบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงความร้อนของวัสดุ และพจน์ที่ 1 ของฝั่งขวา คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปยังวัสดุ ส่วนพจน์ที่ 2 คือ อัตราความร้อนที่ถูกใช้ในการระเหยความชื้นออกจากวัสดุในขณะมีน้ำอิสระอยู่บนผิววัสดุ ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{W}{A} \left(-\frac{dW}{d\theta}\right) = k(H_m - H) \quad (2.17)$$

$K$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ( $kg\text{-น้ำ} \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot \Delta H^{-1}$ ),  $H_m$  คือ ความชื้นอิ่มตัวของอากาศ ณ อุณหภูมิ  $t_m$ ,  $H$  คือ ความชื้นของลมร้อน ถ้าเอาสมการ (2.17) แทนในสมการ (2.16) จะได้

$$\left(\frac{W}{A}\right)(C_s + WC_w) \frac{dt_m}{d\theta} = h(t - t_m) - k(H_m - H)r_m \quad (2.18)$$

ในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง (ช่วงที่ 1)  $t_m$  มีค่าน้อยทำให้ค่า  $H_m$  มีค่าน้อยตามไปด้วย และ  $\frac{dt_m}{d\theta} > 0$  เพราะฉะนั้น ค่า  $t_m$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นพจน์  $t - t_m$  จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเมื่อถึงเวลาหนึ่ง พจน์ทางฝั่งขวาจะมีค่าเป็น 0 แสดงถึงอุณหภูมิของวัสดุ ( $t_m$ ) จะเริ่มคงที่มีค่าเท่ากับ อุณหภูมิกระเปาะเปียก ( $t_w$ ) ในกรณีของการพาความร้อน และเข้าสู่ช่วงที่ 2 โดยในช่วงนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุ (พจน์ทางซ้ายเป็น 0) ความร้อนจะถูกนำไปใช้ในการระเหยความชื้นออก จนกระทั่งเข้าสู่ช่วงที่ 3 อัตราความร้อนที่ไหลเข้ากับอัตราการระเหยไม่สมดุลกันเนื่องจากน้ำภายในไม่สามารถเคลื่อนที่มาชดเชยน้ำบนผิวได้ทัน จึงทำให้พจน์ทางฝั่งขวามีค่ามากกว่า 0 อีกครั้ง อุณหภูมิของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ( $t_m > t_w$ ) ดังสมการที่ 2.18

### 2.2.4.1 การคำนวณอัตราการอบแห้งในช่วงต่างๆ

1. อัตราการอบแห้งช่วงที่ 1 มีค่าน้อยมาก เนื่องจากอุณหภูมิส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ

2. อัตราการอบแห้งช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่เกิดอัตราการอบแห้งแบบคงที่ เมื่อพิจารณาให้วัสดุถูกอบแห้งด้วยลมร้อนที่มีความชื้น  $H$  และอุณหภูมิ  $t$  โดยค่าทั้งสองเป็นค่าคงที่ ตามความสัมพันธ์ของ Lewis จะสามารถหาอัตราการอบแห้งแบบคงที่  $R_c$  ( $\text{kg-น้ำ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (\text{m}^2\text{-พื้นที่การอบแห้งของวัสดุ})^{-1}$ ) ตามสมการดุลมวลสารได้ดังนี้

$$R_c = \left(\frac{W}{A}\right) \left(-\frac{dw}{d\theta}\right) = k(H_m - H) \quad (2.19)$$

ตามสมการดุลพลังงานจะได้

$$R_c = h \frac{t - t_m}{r_m} \quad (2.20)$$

ในกรณีที่วัสดุได้รับความร้อนจากลมร้อนอย่างเดียว (การพาความร้อน) ค่า  $t_m$  จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก  $t_w$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน  $h$  ( $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) ของอนุภาคกลมโตดเดียวกับลมร้อน ( $Re < 7 \times 10^4$ ) [13] สามารถประมาณได้จากสมการดังนี้

$$\frac{hd_p}{\lambda_f} = 2 + 0.6Re_p^{0.5}Pr^{0.33} \quad (2.21)$$

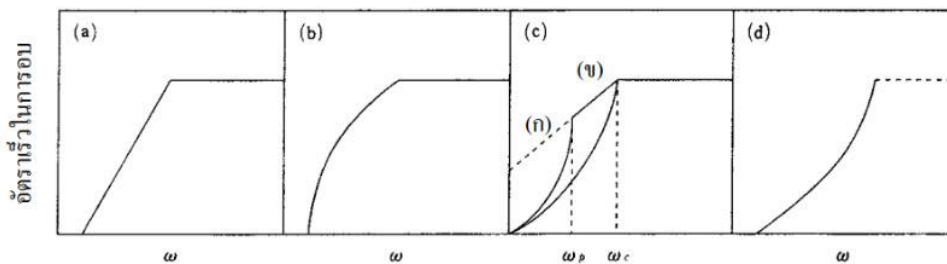
โดยที่  $d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (m),  $\lambda_f$  คือ ค่าการนำความร้อนของของไหล(ลมร้อน) ( $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $Re_p$  คือ ตัวเลขเรย์โนลส์ (ไร้หน่วย) เท่ากับ  $d_p u \rho_f / \mu_f$ ,  $u$  คือ ความเร็วของลมร้อน ( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ ),  $\rho_f$  คือ ความหนาแน่นของลมร้อน ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $\mu_f$  คือ ความหนืดของลมร้อน ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $Pr$  คือ ตัวเลขพรันด์ทล (ไร้หน่วย) เท่ากับ  $C_{p_f} \mu_f / \lambda_f$ ,  $C_{p_f}$  คือ ความจุความร้อนที่ความดันคงที่ของลมร้อน ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

3. อัตราการอบแห้งช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่เกิดอัตราการอบแห้งช้าลงหรือลดลง ( $R_d$ ) ซึ่งในช่วงนี้ อัตราการอบแห้งของวัสดุแต่ละชนิดจะไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับตัววัสดุเอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปร่างลักษณะของวัสดุและสภาพการครอบครองน้ำในตัววัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ถ้าความเร็วการอบแห้ง  $R(w)$  จะอยู่ในรูปฟังก์ชันกับอัตราส่วนความชื้น  $w$  ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด ( $\theta$ ) หาได้จากการอบแห้งแบบคงที่  $R_c$  รวมกับอัตราการอบแห้งแบบช้าลง  $R_d$  ตามสมการนี้

$$\theta = -\frac{W}{A} \int_{w_1}^{w_2} \frac{1}{R(w)} dw = \frac{W}{A} \left( \frac{w_1 - w_c}{R_c} + \int_{w_2}^{w_c} \frac{1}{R_d} dw \right) \quad (2.22)$$

$w_1$  = อัตราส่วนความชื้นก่อนการอบแห้ง ( $w_1 > w_c$ ),  $w_2$  = อัตราส่วนความชื้นหลังการอบแห้ง ( $w_2 < w_c$ ),  $w_c$  = อัตราส่วนความชื้นวิกฤต

เนื่องจากอัตราการอบแห้งลดลงจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและเงื่อนไขการอบ แต่รูปกราฟจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขคุณสมบัติวัสดุภายใน เช่น ลักษณะของวัสดุ สมบัติความชื้นภายใน เป็นต้น ตัวยกกว่าเงื่อนไขการอบภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วของลมร้อน เป็นต้น เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่างอัตราเร็วในการอบของวัสดุต่างๆแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เส้นกราฟอัตราในการอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งลดลงของวัสดุต่างๆ [14]

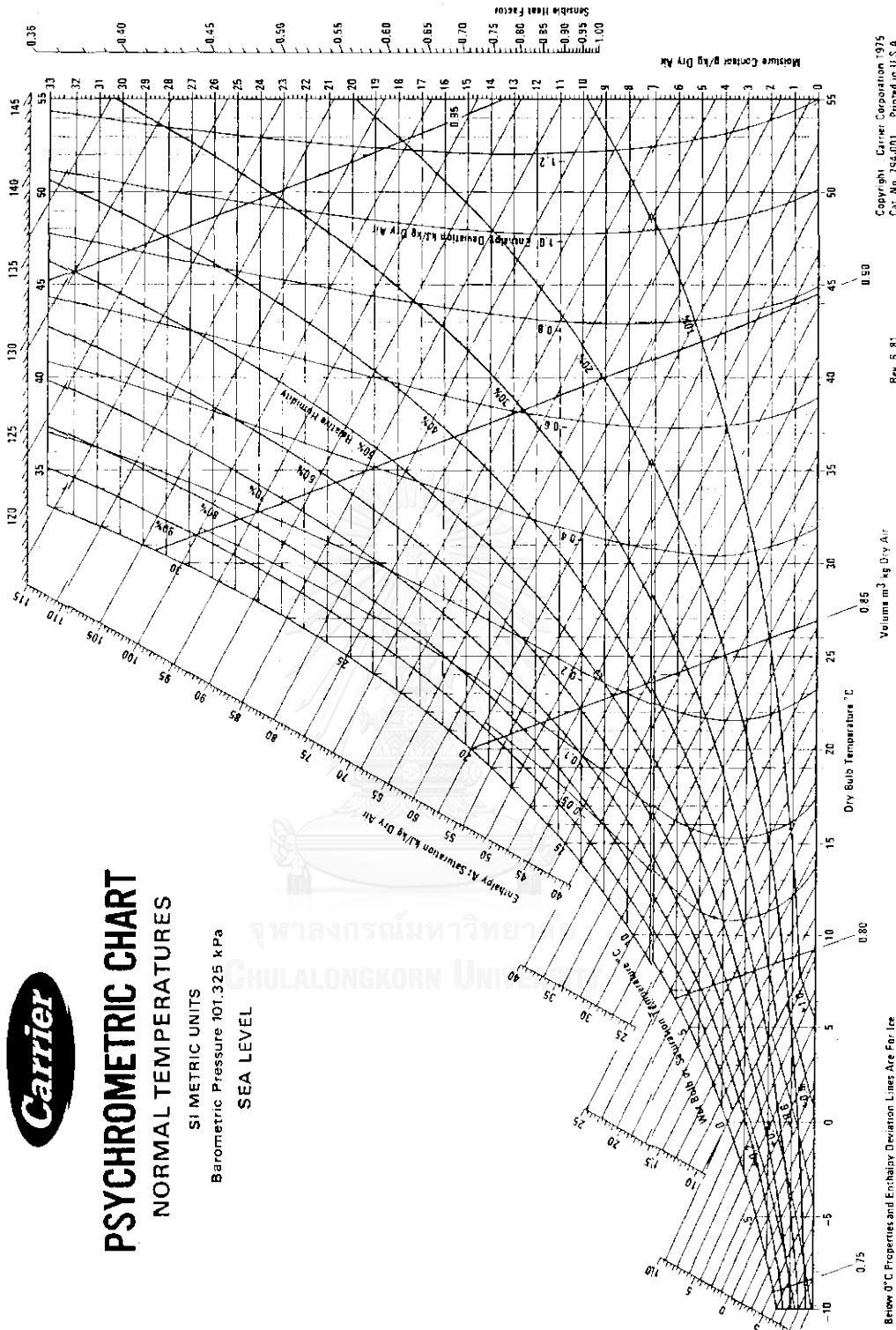
จากรูป (a) จะพบได้ในกรณีของอนุภาควัสดุมีน้ำอยู่ในรูปที่ค่อนข้างอิสระ กล่าวคือการอบแห้งของเหลวเยื่อบาง อนุภาคขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดไม่เกิน 5 มิลลิเมตร เป็นรูป ในรูป (b) พบในอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีสมบัติ non-hydrophilic หรือวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้นๆ เป็นต้น ทั้งรูป (a) และ (b) จะเป็นวัสดุที่น้ำเคลื่อนที่สู่ผิวหน้าด้วยแรง capillary ช่วงอัตราการลดลงของรูป (d) โดยมากจะพบในการอบแห้งของสารเนื้อเดียว เช่น สบู่ กาว เจลาติน ฯลฯ ซึ่งไม่มีช่วงการอบแห้งแบบคงที่ โดยอัตราความชื้นที่ผิวจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเท่ากับอัตราความชื้นสมดุลของลมร้อน หลังจากนั้นการแพร่ของน้ำภายในวัสดุจะมีอิทธิพลอย่างเด่นชัดที่สุด ส่วนในรูป (c) วัสดุจะมีสมบัติอยู่ระหว่าง (a), (b) กับ (d) โดยช่วงอัตราการอบแห้งแบบลดลงจะมี 2 ช่วง กรณี (ก) จะพบในวัสดุที่มีน้ำออสโมติก (osmotic water) เช่น ดินเหนียว และในกรณี (ข) เป็นรูปทั่วไปที่พบได้ในวัสดุหล่อ ขึ้นตะกอน เป็นต้น ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งอย่างคร่าวๆ สำหรับวัสดุแบบ (a) และ (b) จะแปรผันตามความหนาของวัสดุ ขณะที่แบบ (d) จะแปรผันตามความหนายกกำลังสอง ส่วนแบบ (c) จะอยู่ระหว่างสองแบบข้างต้น [14]

### 2.2.5 แผนภูมิความชื้นหรือไซโครเมตริกส์ชาร์ท (Psychrometric Chart)

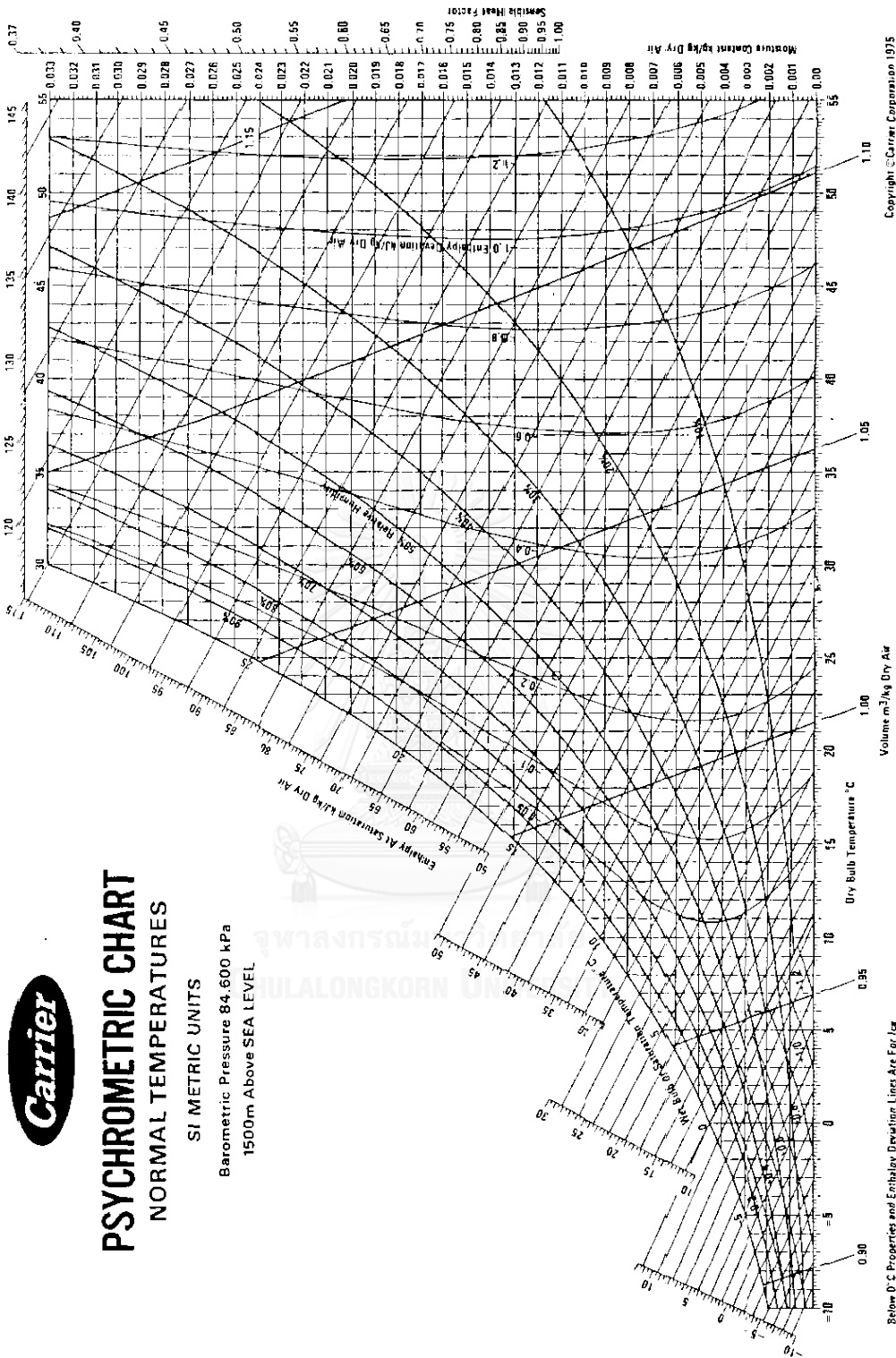
แผนภูมิความชื้นเป็นกราฟที่แสดงสมบัติทางกายภาพและทางเทอร์โมไดนามิกต่างๆของระบบอากาศ-น้ำ ซึ่งมีแกนนอนเป็นอุณหภูมิจากแกนตั้งเป็นความชื้น แต่สามารถอ่านคุณสมบัติอื่นของอากาศชื้นได้จากกราฟ จึงสามารถนำมาใช้เพื่อช่วยในการคำนวณออกแบบเครื่องอบแห้งตามสภาวะ

ที่ต้องการได้ ความดันที่ต่างกันจะมีผลทำให้ได้แผนภูมิความชื้นด้วย แผนภูมิความชื้นที่ความดันระดับน้ำทะเลและสูงกว่าน้ำทะเล 1500 เมตร ถูกแสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าสมบัติต่างๆที่แสดงให้แผนภูมิมียค่าแตกต่างกัน เช่น อุณหภูมิกระเปาะเปียกซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดในการอบแห้งช่วงที่สอง ซึ่งเป็นช่วงที่มีการระเหยน้ำมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสเท่ากัน จะมีปริมาณความชื้นในอากาศเป็น 11 และ 13 กรัมต่อหนึ่งกิโลกรัมของอากาศแห้งที่ความดันระดับน้ำทะเลและสูงกว่าน้ำทะเล 1500 เมตร ตามลำดับ แสดงถึงอากาศที่มีระดับความดันต่ำกว่าจะสามารถรับปริมาณไอน้ำได้มากกว่าอากาศที่มีความดันสูงกว่า ส่วนในรูปที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติต่างๆของอากาศที่อุณหภูมิสูง ภายใต้ความดันบรรยากาศ

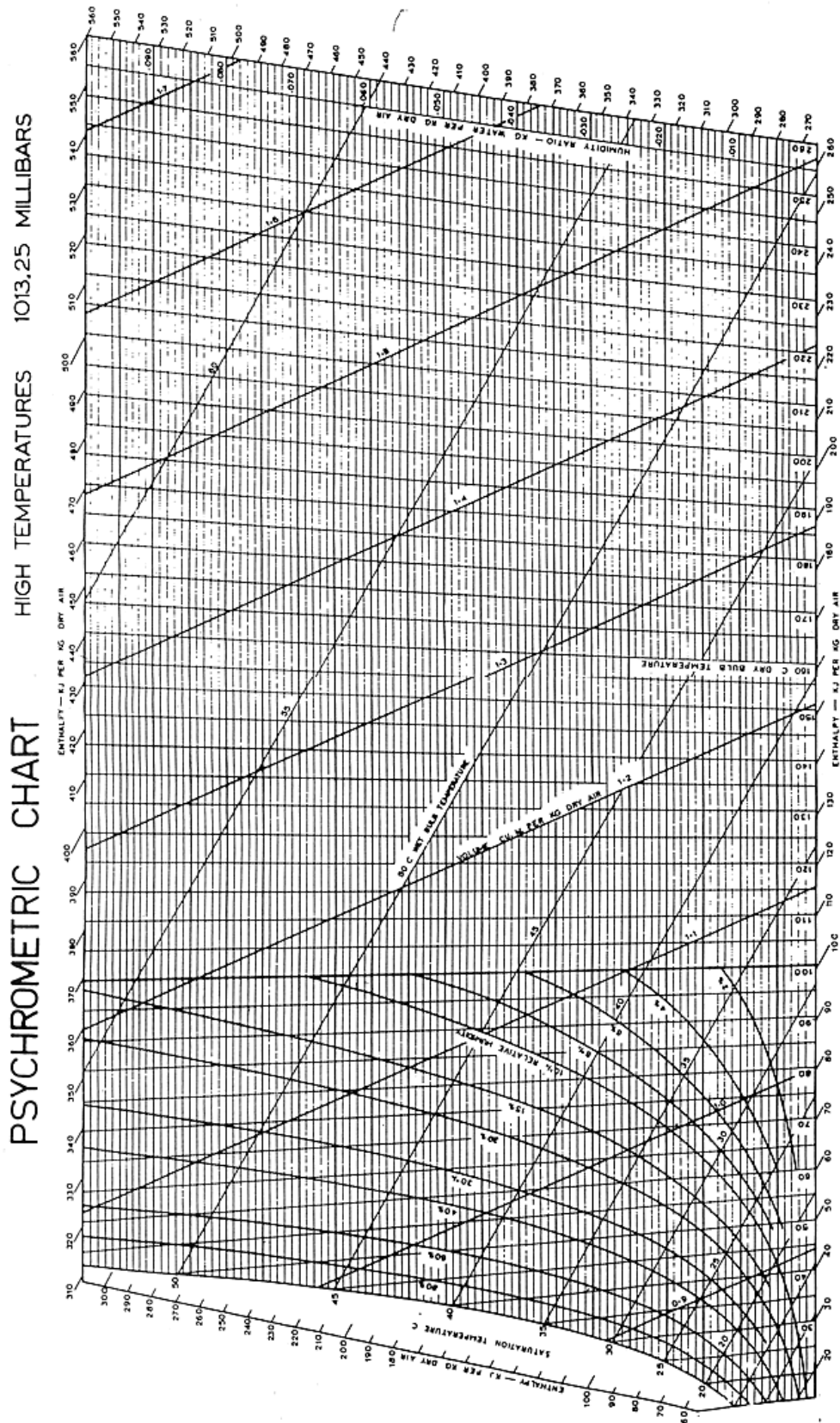




รูปที่ 2.6 แผนภูมิความชื้นที่ระดับน้ำทะเล [15]



รูปที่ 2.7 แผนภูมิความชื้นที่ระดับสูงกว่าน้ำทะเล 1500 เมตร [15]



รูปที่ 2.8 แผนภูมิความชื้นที่อุณหภูมิสูง ภายใต้ความดันบรรยากาศ [16]

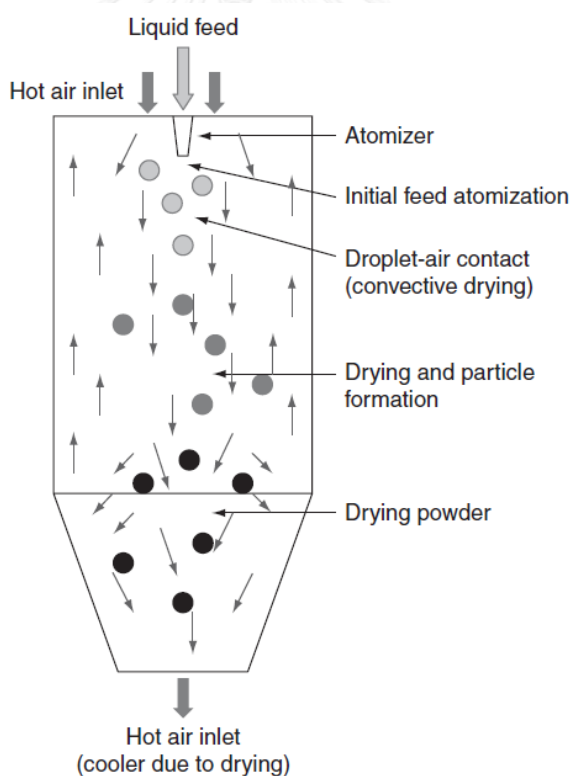


ค่าสมบัติต่างๆที่สามารถอ่านได้จากแผนภูมิความชื้น

- ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) แสดงถึงปริมาณไอน้ำที่อากาศสามารถรับได้อีก ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความดันย่อยของไอน้ำในอากาศกับความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน
- ความชื้นสัมบูรณ์ (Specific Humidity, H) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณไอน้ำโดยมวลต่อปริมาณของอากาศโดยมวลที่อุณหภูมิเดียวกัน
- ความร้อนจำเพาะชื้น (Specific Heat) คือปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการทำให้อากาศแห้ง 1 kg กับไอน้ำ H kg ที่รวมอยู่ในอากาศชื้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 K
- ปริมาตรจำเพาะชื้น (Specific Volume) คือผลบวกของปริมาตรของอากาศแห้ง 1 kg กับปริมาตรของไอน้ำ H kg ที่รวมอยู่ในอากาศชื้น
- เอนทัลปี (Enthalpy) คือผลบวกของเอนทัลปีของอากาศแห้ง 1 kg กับปริมาตรของไอน้ำ H kg ที่รวมอยู่ในอากาศชื้น โดยเอนทัลปีที่ได้เป็นผลรวมระหว่างความร้อนสัมผัส (sensible heat) กับ ความร้อนแฝง (latent heat) ของอากาศชื้นนั้น
- จุดน้ำค้าง (Dew point) คืออุณหภูมิที่ความดันไออิ่มตัวของน้ำเท่ากับความดันย่อยของไอน้ำที่อยู่ในอากาศชื้นพอดี ซึ่งเมื่ออากาศชื้นเย็นตัวลง ไอน้ำจะควบแน่นเป็นหยดน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดน้ำค้าง
- อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature) คืออุณหภูมิของอากาศชื้นปกติซึ่งสามารถอ่านได้จากกราฟจากเส้นแนวนอนได้เลย
- อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) คืออุณหภูมิที่น้ำได้รับความร้อนจากสิ่งแวดล้อม และในขณะที่ผิวเกิดการสูญเสียความร้อนของการกลายเป็นไอ เนื่องจากการระเหย ซึ่งอุณหภูมิของหยดน้ำจะเข้าสู่อุณหภูมิตกทั้งสองเกิดสมดุลกันอย่างรวดเร็ว ซึ่งโดยปกติจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง แต่ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็น 100% ค่าอุณหภูมิทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน เนื่องจากน้ำไม่สามารถระเหยได้อีก

### 2.3 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer)

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นอุปกรณ์ที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารผงสำเร็จรูปและผงซักฟอก โดยเครื่องนี้จะทำการอบแห้งด้วยวิธีการฉีดพ่นสารละลายหรือของเหลวเป็นหยดขนาดเล็กผ่านหัวฉีด (Atomizer) เข้าสู่ห้องอบแห้ง (Drying chamber) ซึ่งมีลมร้อนไหลผ่านทำหน้าที่ในการให้ความร้อน เพื่อให้ของเหลวหรือความชื้นถูกระเหยออกมา และได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีสภาพเป็นอนุภาคขนาดระดับไมโครเมตร หลังจากนั้นจะทำการแยกอากาศร้อนกับอนุภาคโดยใช้ไซโคลน (Cyclone) โดยผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จะตกลงสู่ที่เก็บสาร ส่วนอากาศร้อนจะถูกปล่อยสู่ภายนอกหรืออาจนำความร้อนที่เหลือมาใช้โดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ก็ได้ การอบแห้งด้วยวิธีการพ่นฝอยนี้จะมีต้นทุนของพลังงานความร้อนต่อมวลหนึ่งหน่วยผลิตภัณฑ์สูง อันเนื่องมาจากความชื้นเริ่มต้นสูง แต่การใช้เครื่องชนิดนี้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมสภาพจากความร้อนได้ง่าย เพราะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นมาก รูปที่ 2.9 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดภายในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย



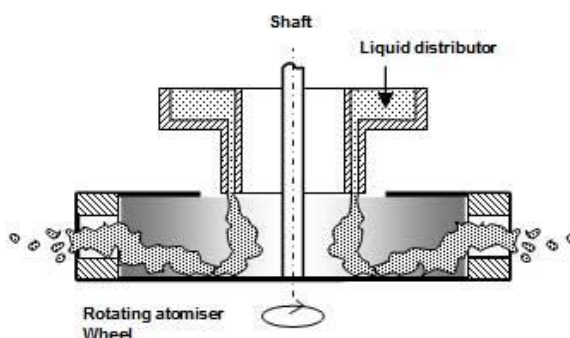
รูปที่ 2.9 ปรากฏการณ์ที่เกิดภายในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย [12]

### 2.3.1 หัวฉีด (Atomizer)

หัวฉีดเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ให้ของเหลวแตกตัวกลายเป็นหยดละอองฝอยออกมา เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสความร้อนให้มากขึ้น รวมถึงเพิ่มพื้นที่การระเหยความชื้นออกจากอนุภาค หัวฉีดที่ใช้มีผลต่อขนาดและคุณสมบัติของอนุภาคที่ได้หลังจากการอบแห้ง มีซึ่งหัวฉีดที่นิยมใช้กันมีอยู่ด้วยกัน 3 ประเภท คือ

#### 1. หัวฉีดแบบจานเหวี่ยง (Centrifugal atomizer หรือ rotary atomizer)

หัวฉีดชนิดนี้จะใช้พลังงานแรงเหวี่ยง (Centrifugal energy) ในการทำให้เกิดเป็นละอองฝอย โดยการปล่อยสารใกล้จุดศูนย์กลางของจาน ซึ่งจานจะหมุนด้วยความเร็วรอบสูงมาก (ประมาณ 2000-20000 รอบต่อนาที) สารจะถูกเหวี่ยงด้วยแรงหนีศูนย์กลางออกไปทางด้านข้าง เกิดเป็นหยดละอองฝอยขนาดเล็กตกลงสู่ห้องอบแห้งต่อไป ซึ่งขนาดอนุภาคที่ได้จะแปรผันตรงกับอัตราการไหลกับความหนืดของสาร แต่จะแปรผกผันกับอัตราการหมุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของจาน ข้อดีของหัวฉีดแบบนี้คือ สามารถเพิ่มอัตราการป้อนสารได้สูง เหมาะสำหรับสารที่ทำให้หัวฉีดสึกกร่อนได้ง่าย เกิดปัญหาการอุดตันของหัวฉีดน้อย และสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคได้ง่ายโดยการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบในการหมุน ส่วนข้อเสียคือ สิ้นเปลืองพลังงานสูงเมื่อเทียบกับหัวฉีดแบบแรงดันสูง ราคาของหัวฉีดค่อนข้างสูง และต้องใช้ห้องอบแห้งขนาดใหญ่เพื่อไม่ให้สารเกาะติดข้างผนังของเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 2.10 หัวฉีดแบบจานเหวี่ยง [17]

#### 2. หัวฉีดแบบแรงดันสูง (Pressure nozzle)

เป็นหัวฉีดที่ใช้พลังงานความดัน (Pressure energy) ในการให้เป็นละอองฝอย โดยสารจะไหลผ่านรูเปิดขนาดเล็ก (Orifice) ด้วยแรงดันสูงเกิดเป็นหยดขนาดเล็ก ซึ่งขนาดของอนุภาคแปรผันตรงกับขนาดของรูเปิด อัตราการไหล ขนาดแรงดัน และความหนืดของของเหลว ข้อดีของหัวฉีดแบบ

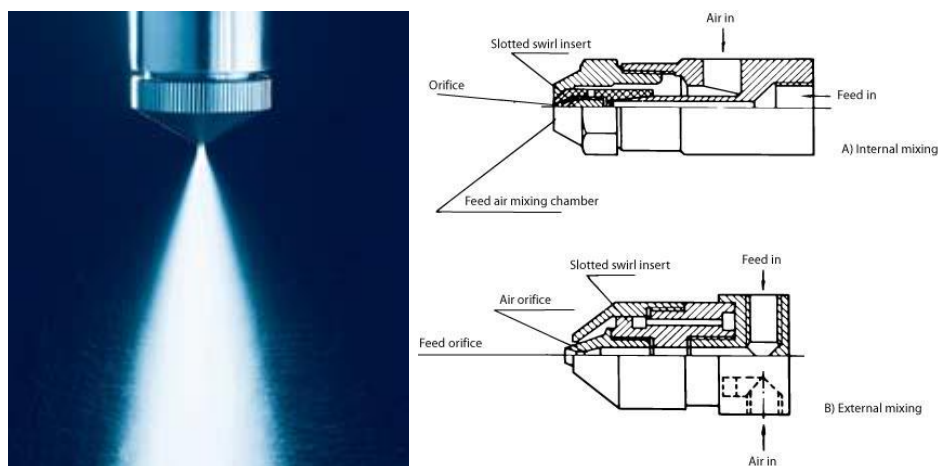
แรงดันสูงคือ ราคาค่อนข้างต่ำ ไม่ขึ้นส่วนที่เคลื่อนที่ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการดูแลและซ่อมบำรุงน้อยกว่า และสิ้นเปลืองพลังงานน้อย ส่วนข้อเสียคือ เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีดได้ง่าย และไม่เหมาะสมสำหรับใช้ที่อัตราการป้อนสารสูง ต้องเปลี่ยนไปใช้หัวฉีดหลายๆหัวแทน



รูปที่ 2.11 หัวฉีดแบบแรงดันสูง [18]

### 3. หัวฉีดแบบของไหล 2 ชนิด (Two fluid nozzle)

เป็นหัวฉีดที่ทำเป็นละอองฝอยจากพลังงานจลน์ (Kinetic energy) โดยจะใช้ก๊าซหรืออากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงปะทะกับของเหลวที่ไหลออกมา ทำให้เกิดการแตกกระจายกลายเป็นหยดของเหลวเล็กๆ ซึ่งจะได้อนุภาคขนาดเล็กมาก และหัวฉีดนี้เหมาะสำหรับของเหลวที่มีความหนืดสูง แต่หัวฉีดนี้จะสิ้นเปลืองพลังงานมากและผลิตอนุภาคได้ครั้งละน้อยๆ ขนาดอนุภาคแปรผันตามความหนืดของของเหลว ขนาดหัวฉีด และอัตราส่วนระหว่างการไหลของก๊าซกับการไหลของของเหลว



รูปที่ 2.12 หัวฉีดแบบของไหล 2 ชนิด [19]

## 2.3.2 การไหลของลมร้อนในห้องอบแห้ง

### 2.3.2.1 การไหลแบบทางเดียวกัน (Co-current)

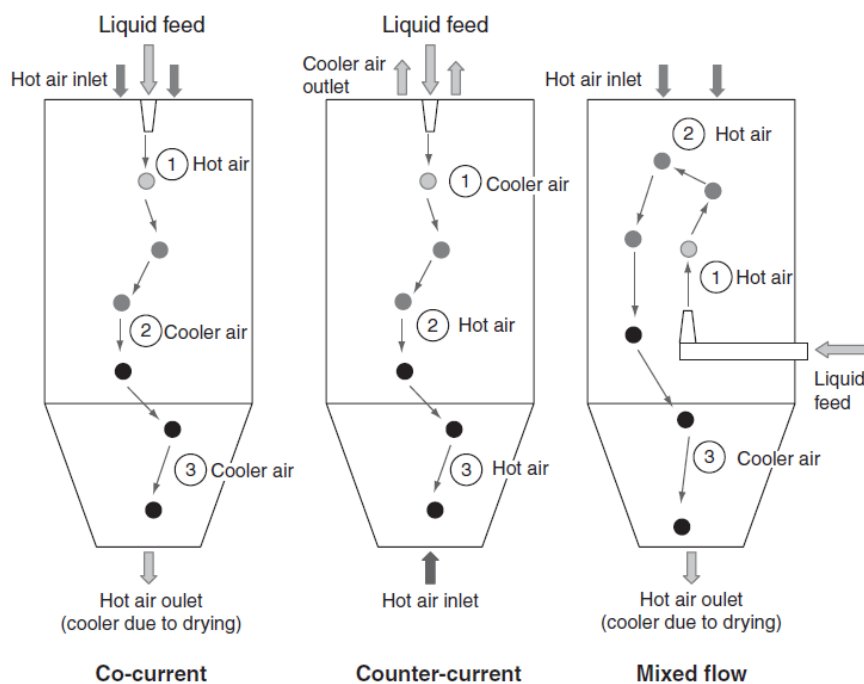
กรณีการไหลแบบนี้ หยอดของเหลวที่พ่นออกมาจากหัวฉีดจะมีทิศทางเดียวกับลมร้อนที่ไหล ดังนั้นด้วยวิธีนี้หยดของเหลวจะสัมผัสกับลมร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดตั้งแต่เริ่มถูกพ่นออกมา ซึ่งจะทำให้ อุณหภูมิในหยดเพิ่มขึ้นในทันทีอย่างรวดเร็วกว่าการไหลแบบอื่น ลมร้อนที่สูญเสียความร้อนให้กับหยด ของเหลวจะมีอุณหภูมิต่ำลงและไหลลงไปตามด้านล่าง โดยในระหว่างการไหลยังคงมีการแลกเปลี่ยน ความร้อนระหว่างอนุภาคกับลมร้อนแต่จะน้อยลงเรื่อยๆ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสอง ลดลง รวมถึงระเหยน้ำออกลดลง นั่นเพราะความชื้นจากในหยดของเหลวได้ส่งไปยังลมร้อนเรื่อยๆ ตามระดับความสูง ทำให้แรงขับ (driving force) ในการถ่ายโอนมวลซึ่งคือผลต่างของความชื้นที่มีอยู่ใน หยดของเหลวกับในลมร้อนลดลง ข้อดีของการไหลแบบนี้ คือหยดของเหลวหรืออนุภาคที่แห้งแล้ว จะสัมผัสกับลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำที่ส่วนล่างของตู้อบแห้ง ทำให้สามารถใช้กับสารที่ไม่สามารถทนความ ร้อนสูงได้ดี ซึ่งการไหลแบบทางเดียวกันนี้มักนิยมใช้ในการผลิตอาหารผง

### 2.3.2.2 การไหลแบบสวนทางกัน (Counter-current)

การไหลแบบนี้ หยดของเหลวที่ถูกฉีดพ่นออกมากับลมร้อนจะมีทิศทางในการไหลต่าง เช่น ฉีดพ่นของเหลวทางด้านบนและพ่นลมร้อนมาด้านล่าง ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งด้วยวิธีการนี้จะทำให้หยด ของเหลวเพิ่มอุณหภูมิช้าในตอนเริ่มต้นของการพ่น ถึงอย่างไรก็ตาม การไหลแบบสวนทางกันนี้จะมี แรงขับของการถ่ายโอนมวลสารและพลังงานมากกว่าการไหลแบบทางเดียวกัน (ความแตกต่าง โดยรวมมากกว่า) ดังนั้นจึงทำให้สามารถระเหยน้ำออกจากอนุภาคได้มากกว่า แต่วิธีนี้ไม่เหมาะกับสาร ที่ไม่สามารถทนความร้อนได้ เนื่องจากอนุภาคมีการสัมผัสกับลมร้อนที่อุณหภูมิสูงยาวนานกว่า ดังนั้น โดยทั่วไปการไหลแบบนี้จึงไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร แต่อาจใช้อุตสาหกรรมอื่น เช่น อุตสาหกรรมผงซักฟอก เป็นต้น

### 2.3.2.3 การไหลแบบผสม (Mixed flow)

การไหลแบบผสมนี้จะแตกต่างจากสองแบบแรก คือมีการฉีดพ่นหยดของเหลวตรงส่วนกลาง ของห้องอบแห้งขึ้นสู่ด้านบน ซึ่งมีลมร้อนไหลลงมา และเมื่อถึงความสูงระดับหนึ่ง หยดของเหลวจะ ไหลตามลมร้อนลงสู่ส่วนล่างของห้องอบ ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งการไหลด้วยวิธีนี้จะเกิดการถ่ายโอนมวลสาร (ความชื้น) และพลังงานมาก แต่การควบคุมระบบเป็นไปได้ยาก ทำให้กำหนดคุณสมบัติหลังการ อบแห้งของอนุภาคได้ลำบาก



รูปที่ 2.13 การไหลภายในห้องอบแห้งแบบต่างๆ [12]

### 2.3.3 การเคลื่อนที่ของสารในกรณีเป็นสารผสม

ในกรณีสารละลาย เช่น นม จะมีส่วนประกอบหลักๆ 3 ส่วน คือ แล็กโตส โปรตีนและไขมัน ซึ่งเมื่อทำการอบแห้งด้วยวิธีพ่นฝอยจะเกิดการแพร่ในน้ำขณะอบแห้งไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากขนาดโมเลกุลของสารแตกต่างกัน โดยในปี 2003 Kim และคณะ [20] ได้ทำการประมาณการแพร่สัมพัทธ์ (relative diffusivity) ของสารแต่ละตัวที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยใช้สมการ Stokes-Einstein ซึ่งจะได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดโมเลกุลและความสามารถในการแพร่ของสารในนม [20]

Component particle	Component diameter (m)	Diffusivity ratio (difference in order of magnitude relative to lactose)		
		Assumption: $D \propto R^{-1}$	Assumption: $D \propto R^{-2}$	Assumption: $D \propto R^{-3}$
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
Salt	$10^{-9}-10^{-10}$	1	1	1

$D$  – binary diffusivity of the component in liquid.

$R$  – radius of the component particle.

Source: Reproduced from Kim *et al.* (2003).

เมื่อหยดของเหลวสูญเสียจากบริเวณผิวไป จึงทำให้ความเข้มข้นของสารที่อยู่บริเวณผิวมีค่าเพิ่มขึ้นจึงเกิดความแตกต่างของความเข้มข้น (concentration gradient) ระหว่างบริเวณผิวนอกกับภายในชั้น ดังนั้นสารจึงเกิดการแพร่จากผิวนอกเข้าสู่ด้านใน ซึ่งจากตารางจะเห็นได้ว่าด้วยปัจจัยทางขนาดโมเลกุลของอนุภาค ทำให้แล็กโตสแพร่เข้าไปด้านในได้เร็วที่สุด ตามมาด้วยโปรตีนและไขมัน ส่งผลให้ไขมันสะสมอยู่รอบบริเวณผิวของอนุภาค ยิ่งเมื่อน้ำหมดไปจากบริเวณผิว ยิ่งจะทำให้เกิดการแพร่มากขึ้น จึงทำให้ไขมันยิ่งปกคลุมผิวมากขึ้น ดังนั้นภายหลังจากอบแห้งแบบพ่นฝอย สารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะอยู่ภายนอก ในขณะที่สารที่มีขนาดเล็กจะอยู่ข้างใน เกิดเป็นปรากฏการณ์การห่อหุ้มขึ้น (Encapsulation phenomenon) ซึ่งในกรณีของนม ไขมันจะอยู่ที่ผิวทำให้เกิดการเกาะติดกันขึ้น แต่ปรากฏการณ์นี้สามารถประยุกต์ใช้โดยการเติมสารที่ทำให้เกิดการเกาะติดน้อยลง เช่น สารจำพวกโปรตีน คาร์โบไฮเดรตลงไปในนม ดังการทดลองการอบแห้งแบบพ่นฝอยของผงนมมะพร้าว ของ Seow และ Gwee ในปี 1997 [21]

#### 2.3.4 การเกิดปัญหาการเกาะติดในสารจำพวกน้ำตาล

อาหารจำพวกผักและผลไม้ถูกนำมาทำเป็นอุตสาหกรรมอาหารผงเป็นจำนวนมาก ซึ่งปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในการอบแห้งแบบพ่นฝอยของอาหารเหล่านี้คือเกิดการเกาะติดของผง เนื่องจากอาหารเหล่านี้มีน้ำตาลสูง ทำให้ผลผลิตที่ได้มีน้อยลงและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ในปี 1997 Bhandari และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งแบบพ่นฝอยของสารที่มีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบ พบว่าเนื่องจากการอบแห้งแบบนี้ทำให้น้ำระเหยออกอย่างรวดเร็ว จึงทำให้น้ำตาลอยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous form) เนื่องจากไม่มีเวลาเพียงพอที่จะสามารถจัดเรียงตัวหรือกลายเป็นรูปผลึก (crystalline form) ซึ่งเมื่ออยู่ในรูปอสัณฐานแล้วได้รับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปจะทำให้อยู่ในสถานะคล้ายยาง (rubber state) ทำให้เกิดการเหนียวและเกาะติดกับผนังของเครื่องอบแห้งขึ้น วิธีหนึ่งในการแก้ปัญหานี้คือการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของสาร

##### 2.3.4.1 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, $T_g$ )

เป็นอุณหภูมิที่บ่งบอกถึงสมบัติการเกาะติดในอนุภาคที่อยู่ในรูปอสัณฐานและสมบัติทางความร้อนที่สำคัญและเป็นเอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ ซึ่งบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงกับสารโซโดยไม่เปลี่ยนสถานะ (ยังคงอยู่ในสถานะของแข็งเหมือนเดิม) แต่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของส่วนสั้นในสายโซ่ คือที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว พอลิเมอร์ที่เป็นสายโซ่ยาวจะเกิดการเคลื่อนไหวได้ยากมาก จึงมีสถานะเป็นของแข็งคล้ายแก้ว ซึ่งค่อนข้างแข็งแต่เปราะ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สายโซ่จะได้รับพลังงานมากขึ้น จนถึงอุณหภูมิเฉพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ส่วนสั้นๆของสายโซ่

โดยเฉพาะปลายสายโซ่จะได้รับพลังงานมากพอที่จะเคลื่อนไหวได้ แต่ไม่เคลื่อนที่ จนกระทั่งเมื่อเกินค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว พอลิเมอร์จะได้รับพลังงานไปใช้ในการสั่นเพิ่มขึ้นจนทำให้มีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น จนมีสถานะเป็นของแข็งคล้ายยาง สมบัติของพอลิเมอร์จะเปลี่ยนไป เช่น ค่าความหนาแน่น ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น ความเหนียว เป็นต้น ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสายโซ่ น้ำหนักโมเลกุล และแรงระหว่างโมเลกุลในพอลิเมอร์นั้นๆ เช่น ถ้าโครงสร้างมีความแข็งแรงเนื่องจากเป็นพันธะคู่ หรือประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันขนาดใหญ่ จะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูง เนื่องจากมีอิสระในการเคลื่อนไหวได้จำกัด ทำให้ต้องใช้พลังงานสูง ซึ่งอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วไม่ได้เป็นอุณหภูมิเดียวกับอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ) โดยปกติอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_g < T_m$ ) ค่า  $T_g$  สามารถหาได้จากเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ในปี 1997 Bhandari และคณะ [1] ได้เสนอวิธีการประมาณค่า  $T_g$  ของสารผสม 2 ชนิดด้วยสมการ Couchman-Karasz ดังนี้

$$T_{\text{gmixture}} = \frac{w_1 T_{g1} + \left(\frac{\Delta C_{p2}}{\Delta C_{p1}}\right) w_2 T_{g2}}{w_1 + \left(\frac{\Delta C_{p2}}{\Delta C_{p1}}\right) w_2} \quad \text{หรือ} \quad = \frac{w_1 \Delta C_{p1} T_{g1} + w_2 \Delta C_{p2} T_{g2}}{w_1 \Delta C_{p1} + w_2 \Delta C_{p2}} \quad (2.23)$$

โดยที่  $T_g$  คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว,  $w$  คือ สัดส่วนโดยมวล,  $\Delta C_p$  คือ ความแตกต่างความจุความร้อนจำเพาะ (differential specific heat capacity), เลขห้อย 1 และ 2 คือ ตัวถูกละลายและตัวทำละลาย

จากสมการที่ (2.23) สามารถประยุกต์ใช้กับของผสมที่มีตัวถูกละลายมากกว่า 1 ชนิดได้ เช่น ในระบบที่มีตัวถูกละลายสองชนิดจะได้ดังต่อไปนี้

$$T_{\text{gmixture}} = \frac{w_1 \Delta C_{p1} T_{g1} + w_2 \Delta C_{p2} T_{g2} + w_3 \Delta C_{p3} T_{g3}}{w_1 \Delta C_{p1} + w_2 \Delta C_{p2} + w_3 \Delta C_{p3}} \quad (2.24)$$

การเกิดสถานะคล้ายยางจะเกิดในช่วงอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ซึ่งจะเห็นการเหนียวติดได้อย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว 20 องศาเซลเซียส [22, 23] ดังนั้นวิธีในการแก้ปัญหาการเหนียวติดที่เกิดจึงทำได้โดยการรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่า  $T_g$  หรืออย่างน้อยสุดไม่ให้เกิน  $T_g$  20 องศาเซลเซียส

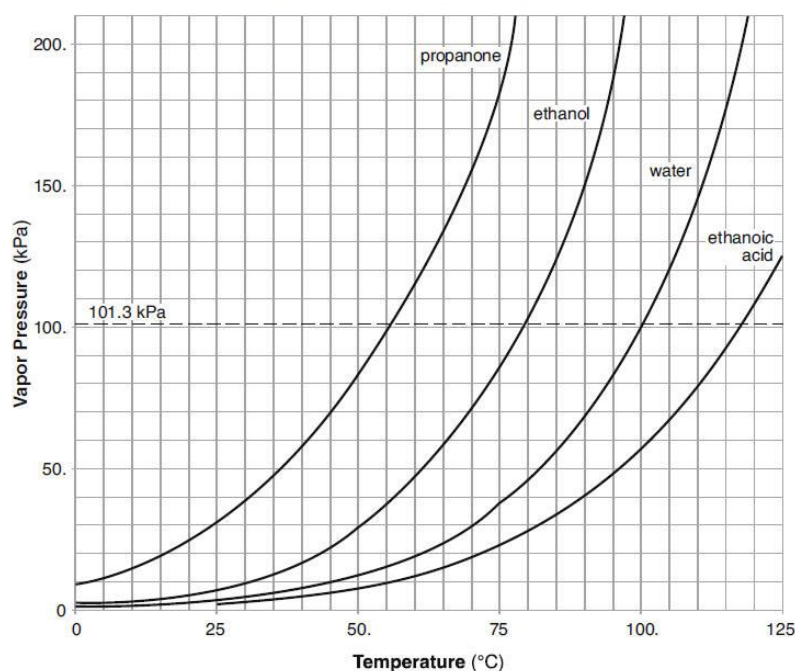
อีกหนึ่งวิธีที่สามารถช่วยได้คือการลดอุณหภูมิขาออกโดยการลดอุณหภูมิขาเข้าหรือใช้วิธีอื่นๆ ใดๆก็ตามการลดอุณหภูมินี้จะส่งผลเสียซึ่งทำให้ปริมาณความชื้นในอนุภาคเพิ่มขึ้น เนื่องจากระเหยความชื้นออกได้น้อยลง ปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจะส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยน



สถานะคล้ายแก้วของสารผสมลดลงมาก เพราะค่า  $T_g$  ของน้ำเท่ากับ  $-137$  องศาเซลเซียส ดังนั้นการลดอุณหภูมิอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดการเหนียวติดมากขึ้นได้

ในทางกลับกัน การใช้วิธีลดปริมาณความชื้นในอนุภาคลงจะช่วยในการเพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วได้ ซึ่งโดยปกติจะทำโดยเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง แต่จะมีความเสี่ยงที่ความร้อนจะทำให้อุณหภูมิของอนุภาคเพิ่มขึ้นสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อีกวิธีหนึ่งซึ่งช่วยในการลดปริมาณความชื้นลงโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิคือการลดความดันของระบบลง ซึ่งจะช่วยให้ความชื้นในอนุภาคสามารถระเหยได้ง่ายขึ้น ดังรูปที่ 2.14 ที่ความดันบรรยากาศ ( $101.3$  กิโลพาสคาล) น้ำมีจุดเดือด (boiling point) อยู่ที่  $100$  องศาเซลเซียส แต่เมื่อความดันลดลง ไปที่  $70$  และ  $50$  กิโลพาสคาล น้ำกลับมีจุดเดือดลดลงไปอยู่ที่  $90$  และ  $82$  องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ายิ่งความดันของระบบลดลง จุดเดือดน้ำจะยิ่งลดลงด้วย ทำให้สามารถระเหยน้ำ (ความชื้น) ออกจากอนุภาคที่ต้องการอบแห้งได้มากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของอนุภาคมีค่ามากขึ้นและเกิดการเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายแก้วได้ยากขึ้น หรือคือการเหนียวติดลดลงนั่นเอง

Table H  
Vapor Pressure of Four Liquids



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของระบบกับอุณหภูมิจุดเดือดของของเหลว 4 ชนิด [24]

นอกจากการปรับตัวแปรที่ใช้ในการดำเนินการแล้ว อีกวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยลดปัญหาการเหนียวที่เกิดขึ้นได้ คือการเพิ่มสารเติมแต่ง (additive) ที่มีมวลโมเลกุลสูงๆผสมลงไปด้วย ซึ่งจะช่วย

เพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วขึ้นตามสมการ (2.24) โดยปกติจะใช้วิธีนี้ในสารที่มีน้ำตาลปริมาณมาก เพราะ  $T_g$  ของน้ำตาลจะมีค่าต่ำมาก จึงยากต่อการอบแห้งแบบพ่นฝอย เช่นในปี 1993 และ 1997 Bhandari และคณะ [25, 26] ได้เติมแป้งที่ถูกไฮโดรไลซ์แล้ว (Hydrolyzed starch) และ กัม (Gum) เป็นสารเติมแต่งเพื่อจุดประสงค์นี้ เนื่องจากสารทั้งสองมีคุณสมบัติที่เหมาะสม คือไม่มีสีและไม่มีกลิ่น จึงไม่ทำให้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเปลี่ยนไปมากนัก อย่างไรก็ตามการผสมลงไปมากเกินไปจะส่งผลต่อการรับรู้รสผิดเพี้ยนไป

นอกจากนี้ยังมีการใช้สารเติมแต่งในอาหารประเภทอื่นที่มีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบอยู่เยาะ ซึ่งรวบรวมไว้ในตารางที่ 2.2 จากตารางจะเห็นว่าแป้งมอลโตเดกซ์ตริน (maltodextrin) นิยมใช้ในการผสมเป็นสารเติมแต่งในอาหารผงหลากหลายประเภท โดยแป้งนี้เป็นสารจำพวกคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ (ย่อย) ของสตาร์ช (starch) จากพืชประเภทต่างๆ ทำให้มีบางส่วนเป็นน้ำตาลกลูโคส (glucose) สายสั้นๆ มีลักษณะสำคัญเป็นผงหรือเกล็ดสีขาว แทบจะไม่มีรสหรือมีรสหวานเพียงเล็กน้อย สามารถละลายน้ำได้ แป้งมอลโตเดกซ์ตรินนี้สามารถแบ่งได้ตามค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose Equivalent, DE) ซึ่งแสดงถึงสตาร์ชที่ถูกย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคสไปมากน้อยเพียงใด โดยค่า DE นี้จะมีค่าตั้งแต่ 2 ถึง 20 ยิ่งมีค่ามากแสดงว่ายิ่งเป็นโมเลกุลสายสั้นและจะมีความหวานมากยิ่งขึ้นด้วย รวมถึงจะมีค่า  $T_g$  น้อยลงถ้าค่า DE สูง ดังนั้นหากต้องการนำมาใช้เพิ่ม  $T_g$  แล้วต้องใช้แป้งมอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE ต่ำๆ นอกจากนี้จะสามารถใช้เพิ่มค่า  $T_g$  ของสารผสมรวมแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ห่อหุ้มสารให้กลิ่นรสได้ด้วย (flavor encapsulation) [27]

ตารางที่ 2.2 การอบแห้งแบบพ่นฝอยของสารที่มีปริมาณน้ำตาลมากด้วยการผสมสารเติมแต่ง [12]

Food material or juices	Type of spray dryer	Scale	Additive	References
Blackcurrent	Niro/Leaflash	Pilot	Maltodextrin	Bhandari <i>et al.</i> (1993)
Raspberry	Niro/Leaflash	Pilot	Maltodextrin	Bhandari <i>et al.</i> (1993)
Apricot	Niro/Leaflash	Pilot	Maltodextrin	Bhandari <i>et al.</i> (1993)
Bayberry	Buchi	Small laboratory	Maltodextrin	Fang and Bhandari (2011)
Orange	Not given	Pilot	Maltodextrin Glucose Methylcellulose	Chegini and Ghobadian (2005)
Mango	Buchi	Small laboratory	Maltodextrin Gum Arabic Waxy starch Cellulose	Cano-Chauca <i>et al.</i> (2005)
Raisin	Lab-Plant	Small laboratory	Maltodextrin	Papadakis <i>et al.</i> (2006)
Lime	Not given	Pilot	Maltodextrin Silicone dioxide	Roustapour <i>et al.</i> (2006)
Tomato	Not given	Small laboratory	Maltodextrin	Goula and Adamopoulos (2008)
Soup (ham by-products)	Buchi	Small laboratory	Not used	Fernandez-Perez <i>et al.</i> (2004)
Fish oil	Niro Minor	Pilot	Maltodextrin Gum Arabic	Fuchs <i>et al.</i> (2006)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

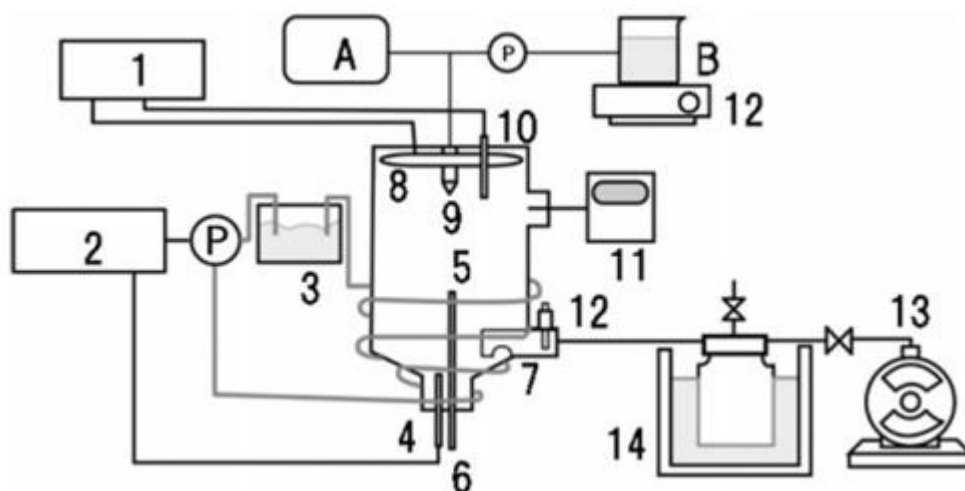
### 2.3.5 การอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะสุญญากาศ (Vacuum spray drying)

จากที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา การอบแห้งที่ความดันปกติโดยการใส่สารเติมแต่งอาจไม่เพียงพอในการอบแห้งสารที่มีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบมาก ดังนั้นการลดปริมาณความชื้นของอนุภาคลงโดยการลดความดันของระบบ จะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีส่วนสำคัญที่ช่วยให้ประสบความสำเร็จในการอบแห้ง จากตารางที่ 2.3 แสดงถึงการลดความดัน จะทำให้อุณหภูมิกระเปาะเปียกลดลง ซึ่งเป็นผลให้ความชื้นในอนุภาคสามารถระเหยได้มากขึ้น ในทางกลับกัน การเพิ่มความดันจะทำให้อุณหภูมิกระเปาะเปียกเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติต่างๆของอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากัน แต่ความดันต่างกัน [28]

$p$ , Pa	101 325	77 058	105 263
$t$ , °C	25	25	25
$\phi$	50%	50%	50%
$\phi/p$ , bar <sup>-1</sup>	0.4935	0.6489	0.4750
$p_w/p$ , kPa/bar	1.57	2.06	1.51
$v_p$ , m <sup>3</sup> bar/kg	0.8695	0.8735	0.8690
$h$ , kJ/kg <sub>a</sub>	50.3	58.4	49.4
$w$ , g/kg	9.9	13.1	9.5
$p_w$ , kPa	1.59	1.59	1.59
$v$ , m <sup>3</sup> /kg	0.858	1.134	0.8256
$t_{wb}$ , °C	17.8	17.2	18
$t_{ds}$ , °C	13.9	13.9	13.9

โดยปกติแล้ว เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยจะถ่ายเทความร้อนโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวให้พลังงาน แต่เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในสภาวะสุญญากาศแล้ว ลมร้อนที่เป็นตัวให้พลังงานนั้นจะมีปริมาณน้อยมาก จนทำให้หยดของเหลวที่ออกมาจากหัวฉีดนั้นได้รับความร้อนไม่เพียงพอต่อการระเหยได้ จึงต้องมีการถ่ายเทความร้อนอื่นเพิ่มเติมนอกจากการพาความร้อนเพียงอย่างเดียว ในปี 2008 Yutaka และคณะ [2] ได้ประดิษฐ์เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้สภาวะสุญญากาศขึ้น โดยใช้หัวฉีดแบบของไหล 2 ชนิด และมีตัวช่วยให้ความร้อนคือเครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรดติดตั้งบริเวณใกล้กับหัวฉีด ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีจึงทำให้หยดของเหลวได้รับความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งในส่วนล่างของห้องอบแห้งได้มีการให้ความร้อนด้วยระบบแจ๊คเก็ตที่ใช้น้ำอุ่นให้ความร้อนโดยไหลผ่านสายยางพันล้อมรอบ เพื่อป้องกันความชื้นที่ถูกระเหยกลับมาควบแน่นอีกครั้ง การทำให้เกิดสุญญากาศขึ้นภายในเครื่องอบแห้งทำได้โดยใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศแบบหมุนด้วยน้ำมัน (oil rotational vacuum pump) ติดที่ส่วนล่างของห้องอบแห้ง ซึ่งระหว่างห้องอบแห้งกับปั๊มจะมีโคลด์แทรป (cold trap) เพื่อควบแน่นไอน้ำก่อนเข้าปั๊ม ใช้แมนอมิเตอร์ (manometer) ในการวัดความดัน โดยติดตั้งไว้ส่วนบนของห้องอบแห้ง และใช้เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) วัดอุณหภูมิใน 4 จุด ที่บริเวณใกล้กับหัวฉีด บริเวณกลาง ด้านล่างและทางออกของห้องอบแห้ง ดังรูปที่ 2.15

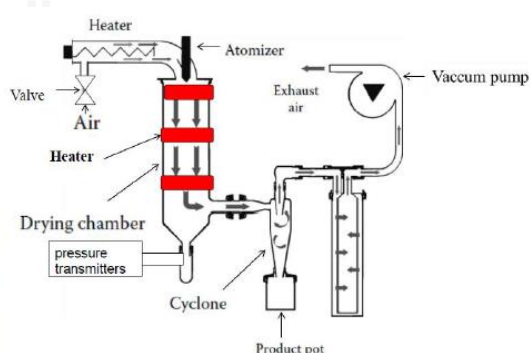


(1 and 2): Temperature controller. (3) Water bath. (4) Temperature sensor. (5) Drying tower.  
 (6) Temperature sensor. (7) Baffle plate. (8) Far Infrared Rays heater. (9) Spray nozzle.  
 (10) Temperature sensor. (11) Digital manometer. (12) Temperature sensor. (13) Vacuum pump.  
 (14) Cold trap. (A) Compressed air. (B). Material. (P) Circulation pump.

### รูปที่ 2.15 ตัวอย่างเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะสูญญากาศ [2]

โดยได้มีงานวิจัยที่มีการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะสูญญากาศ เช่น ในปี 2008 Yukata และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาการอบแห้งนมหมักซึ่งมีปริมาณแบคทีเรียกรดแลคติกมาก โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะสูญญากาศและมีเครื่องอินฟราเรดช่วยให้ความร้อน จะพบว่าเมื่อทำการอบแห้งที่ 4 อุณหภูมิ คือ 35 50 80 และ 120 องศาเซลเซียส โดยทำการป้อนสารที่ 2 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันที่ใช้ในห้องอบแห้งเป็น 5-8 กิโลปาสคาล สามารถได้ผงแห้งแต่จะพบของแข็งเกิดการเหนียวติดอย่างมากที่บริเวณส่วนบนของห้องอบแห้งที่ซึ่งมีอุณหภูมิสูง เนื่องมาจากน้ำตาลที่มีอยู่ภายในเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยาง เพราะอุณหภูมิที่ใช้อบแห้งไม่สามารถทำให้ต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อวัดปริมาณแบคทีเรียที่เหลืออยู่ โดยวัดจากอะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (Adenosine triphosphate, ATP) พบว่าค่า ATP ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเหลืออยู่ประมาณ 30% ซึ่ง ATP หลังการเตรียมสารก่อนการอบแห้งมีค่าอยู่ที่ 35% ถือได้ว่าแทบไม่สูญเสียไปเลย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นไปที่ 80 และ 120 พบว่าค่า ATP ที่ได้เหลือน้อยกว่า 5% อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิต่ำเป็น 35, 50, 80 และ 120 องศาเซลเซียส จะได้ร้อยละผลได้เป็น 28.5, 25.7, 24.6 และ 35.0 ความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในอนุภาคเป็น 10.2, 10.9, 9.0 และ 6.4 % ตามลำดับ แสดงถึงแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความชื้นในอนุภาคลดลง แต่ปริมาณร้อยละผลได้กลับลดลงเนื่องจากอุณหภูมิต่ำมีผลต่อความเหนียวติดของอนุภาคมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของของผสมจากการลดลงของความชื้น และในปี 2011 David, Ory และ Eyal [29] ได้ทำการศึกษาวิธีการทำให้เป็นผงแห้งของแบคทีเรีย *Lactobacillus casei* subsp. *Paracasei* LMG P-21380 ซึ่งใช้มอลโตเดกซ์ตริน (DE5 และ DE19) และทรีฮาโลส (trehalose) ช่วยในการห่อหุ้มเพื่อ

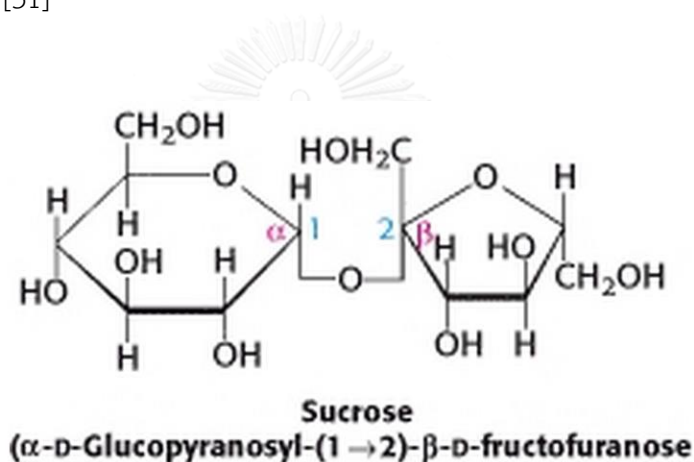
ป้องกันและกักเก็บสารโปรไบโอติก (probiotic) ระหว่างการอบแห้ง เนื่องจากช่วยเพิ่มความเสถียรในโปรตีนของแบคทีเรีย ใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สุญญากาศ มีขดลวดช่วยให้ความร้อน (heating coil) และใช้หัวฉีดแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic nozzle) ใช้ความดันในห้องอบแห้งเป็น 2.27 และ 3.33 กิโลปาสคาล ป้อนสารที่อัตรา 9 มิลลิลิตรต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิหยดของเหลวไม่ให้เกิน 20-30 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเติมทรีฮาโลสผสมลงไปด้วย จะช่วยให้แบคทีเรียมีชีวิตรอดได้มากกว่า เนื่องจากทรีฮาโลสมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงและมีความสามารถในการระเหยน้ำสูง จึงทำให้ยังคงอยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) ได้อยู่แม้จะมีปริมาณความชื้นสูง ด้วยสถานะนี้จะช่วยป้องกันการปนเปื้อนและการเปลี่ยนสถานะที่ทำให้ไซโทพลาซึมรั่วไหลจากการกำจัดความชื้นออก และการใช้มอลโตเดกซ์ทรินที่มี DE5 ดีกว่า DE19 เนื่องจากกลายเป็นสถานะคล้ายแก้วได้ดีกว่า จึงทำให้แบคทีเรียมีร้อยละการรอดชีวิตมากกว่า ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่การผสม มอลโตเดกซ์ทริน DE5 กับทรีฮาโลส ในอัตราส่วน 1:1 จะทำให้แบคทีเรียรอดชีวิตสูงสุดถึง  $70.6 \pm 6.2\%$  ในปี 2012 นายธนากร [30] ได้ทำการศึกษาการกักเก็บสารแอนโธไซยานินจากผลหม่อนด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สุญญากาศ เพื่อป้องกันการสลายตัวของสารดังกล่าวจากอุณหภูมิที่สูง โดยมีแป้งมอลโตเดกซ์ทริน DE 10 เป็นสารห่อหุ้ม ให้ความร้อนผ่านทางเครื่องทำความร้อนแบบผ้า ดังรูปที่ 2.16 ใช้ความดันที่ 0.34, 0.54, 0.74 และ 0.93 บรรยากาศ และอุณหภูมิในห้องอบแห้งเป็น 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าการลดความดันช่วยให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น ทำให้ได้ผงแป้งออกมามากกว่าที่ความดันบรรยากาศ ปริมาณความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในผงแป้งมีค่าร้อยละ 8-10 และปริมาณของแอนโธไซยานินที่กักเก็บได้หลังจากการอบแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 90-98 ซึ่งสามารถกักเก็บได้มากกว่าที่สภาวะการอบแห้งแบบพ่นฝอยปกติ



รูปที่ 2.16 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ติดตั้งเครื่องทำความร้อนแบบผ้ากับปั๊มสุญญากาศ [30]

## 2.4 น้ำตาลซูโครส (Sucrose)

น้ำตาลซูโครสหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าน้ำตาลทราย ใช้เป็นสารให้ความหวาน (sweetener) กว้างขวางไปทั่วโลก สามารถพบได้ในพืชและผลไม้หลายชนิด แต่ที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตน้ำตาลทรายในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ อ้อยและหัวบีท (beet root) โดยในประเทศไทยและประเทศแถบเขตร้อนจะได้จากอ้อย ส่วนประเทศแถบเขตนหนาวจะใช้หัวบีท น้ำตาลซูโครสเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharide) ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) 2 ชนิด คือ น้ำตาลกลูโคส (glucose) และน้ำตาลฟรุกโทส (fructose) ที่ถูกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) เนื่องจากไม่มีหมู่ฟังก์ชันเหลืออยู่ในโมเลกุล จึงเป็นน้ำตาลประเภท non reduction sugar [31]



รูปที่ 2.17 โครงสร้างน้ำตาลซูโครส [31]

### 2.4.1 คุณสมบัติของน้ำตาลซูโครส

มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น สูตรโมเลกุลคือ  $C_{12}H_{22}O_{11}$  มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 342.30 กรัมต่อโมล ความหนาแน่นเท่ากับ 1.587 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถละลายน้ำได้ดี (2000 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) มีจุดหลอมเหลว (melting point) อยู่ที่ 186 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) เท่ากับ 62 องศาเซลเซียส มีความหวาน และให้พลังงาน 4 กิโลแคลอรีต่อกรัม น้ำตาลซูโครสพบมากในอ้อยและหัวบีท

### 2.4.2 การทำให้น้ำตาลซูโครสเป็นผง

ขั้นตอนในการผลิตน้ำตาลซูโครสหรือน้ำตาลทรายมีกระบวนการดังต่อไปนี้ [32]

### 1. กระบวนการสกัดน้ำอ้อย (Extraction)

เริ่มจากเทอ้อยเข้าสู่สายพานลำเลียง อ้อยจะผ่านเครื่องตีอ้อย เครื่องสับอ้อย เครื่องย่อยอ้อย เพื่อช่วยให้สามารถสกัดน้ำอ้อยออกจากอ้อยได้มากที่สุด และเข้าสู่ชุดลูกหีบเพื่อบีบสกัดเอาน้ำอ้อย โดยมีการฉีดพรมน้ำร้อนเพื่อเจือจางน้ำอ้อยเข้มข้นที่ติดค้างอยู่บนกากอ้อย จากนั้นแยกกระหว่างน้ำอ้อยและกากอ้อยออกจากกัน ซึ่งน้ำอ้อยจะถูกส่งไปยังขั้นตอนทำใส่น้ำอ้อย ส่วนกากอ้อยจะถูกนำไปใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงเผาไหม้ในการผลิตไอน้ำ สำหรับใช้ในระบบขับลูกหีบ ต้มเคี้ยวน้ำตาล และส่งไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อไป

### 2. การทำความสะอาดหรือทำใส่น้ำอ้อย (Purification)

น้ำอ้อยที่สกัดได้ทั้งหมดจะเข้าสู่กระบวนการทำใส่น้ำอ้อย เนื่องจากน้ำอ้อยมีสิ่งสกปรกต่างๆ เจือปนเป็นจำนวนมาก เช่น ดิน ทราย เศษกากอ้อย เป็นต้น จึงต้องแยกเอาส่วนเหล่านี้ออกจากน้ำอ้อยด้วยวิธีการทางกล เช่น การกรองต่างๆ และวิธีการทางเคมี เช่นการให้ความร้อนหรือการผสมปูนขาวลงไป

### 3. การต้ม (Evaporation)

น้ำอ้อยที่ผ่านการทำใสแล้วจะเข้าสู่ชุดหม้อต้ม (Multiple Evaporator) ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ เพื่อระเหยตัวทำละลายหรือน้ำออก (ประมาณ 70%) จะได้น้ำอ้อยที่มีความเข้มข้นสูงออกมาจากหม้อต้มลูกสุดท้าย เรียกว่าน้ำเชื่อม

### 4. การตกผลึก (Crystallization)

ในขั้นตอนนี้จะทำการเคี้ยวน้ำเชื่อมในหม้อสุญญากาศ จนเกิดผลึกน้ำตาลและกากน้ำตาลขึ้นในน้ำเชื่อม เรียกรวมว่า แมสควิท (massecuite) โดยในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องควบคุมเมล็ดน้ำตาลให้มีขนาดสม่ำเสมอ โดยเลี้ยงเมล็ดน้ำตาลด้วยน้ำเชื่อมในหม้อเคี้ยวน้ำตาลที่มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

### 5. การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (Centrifuging)

แมสควิทที่ได้จากการเคี้ยวจะถูกส่งไปยังหม้อปั่น เพื่อแยกผลึกน้ำตาลออกจากกากน้ำตาล ภายในหม้อปั่นจะมีตะแกรงรูขนาดเล็ก โดยส่วนที่เป็นผลึกน้ำตาลจะอยู่ภายในหม้อปั่น ส่วนกากน้ำตาล หรือ โมลาสจะถูกแยกสลัดออกไป หลังจากนั้นผลึกน้ำตาลจะถูกส่งไปหม้ออบเพื่อลดความชื้นและลดอุณหภูมิ ซึ่งสุดท้ายแล้วจะได้น้ำตาลทรายดิบออกมา เพื่อส่งขายต่างประเทศหรือนำไปใช้ผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ ส่วนกากน้ำตาลสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่น เช่น อุตสาหกรรมสุรา ซอส ผงชูรส เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วน้ำตาลทรายดิบจะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม เพราะมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่และความบริสุทธิ์ต่ำไม่สามารถนำไปบริโภคได้โดยตรง แต่ถ้าทำให้



คุณภาพสูงขึ้นโดยผ่านกระบวนการทำให้ใสโดยใช้ปูนขาวและความร้อน ทำให้สีของน้ำตาลทรายดิบคุณภาพสูงเป็นสีเหลืองแกมน้ำตาล สามารถนำไปบริโภคได้แต่ไม่เป็นที่นิยมของผู้บริโภคส่วนใหญ่ ยกเว้นในประเทศกำลังพัฒนาที่มีกำลังซื้อค่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีราคาถูกกว่าน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์

#### 6. การผลิตน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์

น้ำตาลทรายดิบคุณภาพสูงที่ผ่านการทำให้ใสมาแล้ว ส่งเข้ากระบวนการผลิตทางสายพานลำเลียงเพื่อส่งไปละลายในน้ำร้อนได้น้ำเชื่อม น้ำเชื่อมจะถูกทำให้ใสอีกครั้งหนึ่งด้วยน้ำปูนขาวและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกว่ากระบวนการคาร์บอนชั่น โดยสารทั้ง 2 จะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นตะกอนและแคลเซียมคาร์บอเนต แล้วดึงสิ่งสกปรกในน้ำเชื่อมแยกตัวออกมา จากนั้นจะกรองตะกอนออกด้วยเครื่องกรองเพื่อให้ได้น้ำเชื่อมใส ไม่มีสิ่งสกปรก น้ำเชื่อมใสจะถูกส่งผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุเรซิน ด้วยเครื่องกรองเรซิน (คล้ายเครื่องกรองน้ำ) ซึ่งเรซินจะทำหน้าที่จับสารละลายที่ทำให้เกิดสีในน้ำเชื่อมไว้ เหลือเพียงน้ำเชื่อมที่ใสบริสุทธิ์ เรียกว่าการดูดค่าสี น้ำเชื่อมที่ใสบริสุทธิ์จะถูกส่งต่อเข้าหม้อต้มสุญญากาศเพื่อเคี่ยวจนเกิดผลึกน้ำตาลในน้ำเชื่อม และควบคุมคุณภาพเม็ดน้ำตาลให้สม่ำเสมอ โดยการเลี้ยงเม็ดน้ำตาลด้วยน้ำเชื่อมในหม้อเคี่ยวน้ำตาลที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ จากนั้นจึงส่งเข้าหม้อปั่น เพื่อแยกผลึกน้ำตาลออกจากน้ำเลี้ยงผลึก โดยมีตะแกรงรูขนาดเล็กลงเม็ดน้ำตาลให้อยู่ภายในหม้อปั่น และสลัดน้ำเลี้ยงผลึกหรือโมลาสออกไป เม็ดน้ำตาลจะถูกนำเข้าหม้ออบเพื่อลดความชื้นและลดอุณหภูมิ แล้วส่งไปบรรจุเป็นผลิตภัณฑ์น้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์เพื่อส่งให้กับลูกค้าต่อไป

#### 2.5 ข้อดีของการตกผลึกของสารประเภทน้ำตาล

จากที่ได้กล่าวข้างต้นในการตกผลึกสารจำพวกน้ำตาลจะพบว่ากระบวนการนี้ต้องใช้พลังงานสูงและเวลายาวนาน จำเป็นต้องมีการควบคุมกระบวนการอย่างแม่นยำมาก เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่คุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำตาลที่มีมวลโมเลกุลต่ำซึ่งไม่สามารถทนความร้อนสูงได้จึงทำให้ต้องใช้อุณหภูมิต่ำมากในการตกผลึก (เพื่อไม่ให้เกิดปรากฏการณ์เปลี่ยนสีขึ้น ซึ่งจะทำให้การตกผลึกแยลง) และในการทำแห้ง ส่งผลให้ต้องใช้เวลายาวนานมากขึ้นและต้องใช้สุญญากาศร่วมด้วย รวมไปถึงต้องมีกระบวนการทำให้สารตั้งต้นมีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากสิ่งเจือปนที่ติดมาอาจทำให้การตกผลึกไม่ได้ผลตามต้องการหรือไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงทำให้ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำตาลโดยการเติมสารอื่นเข้าไปช่วยได้ เช่น การปรับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของน้ำตาลให้เพิ่มขึ้น การเพิ่มความสามารถในการละลายให้มากขึ้น เป็นต้น อีกทั้ง การตกผลึกต้องผ่านกระบวนการหลายขั้นตอน ซึ่งเป็นปัญหาทั้งทางด้านต้นทุนลงทุน (Capital cost) และ ต้นทุนการผลิต

(Production cost) ดังนั้นการตกผลึกนี้จึงอาจไม่เหมาะกับน้ำตาลที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำหรือมวลโมเลกุลต่ำเท่าไรนั้น

## 2.6 ข้อจำกัดของปริมาณความร้อนที่สามารถใช้ได้ในการแปรสภาพน้ำตาล

ปริมาณความร้อนที่สามารถใช้ได้ในการกำจัดตัวทำละลายหรือน้ำออก นอกจากจะถูกจำกัดจากอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นอีกสองประการดังต่อไปนี้

### 1. จุดหลอมเหลว (melting point)

จุดหลอมเหลว คือ จุดที่สารเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว โดยจุดนี้จะมีค่าเท่ากับจุดเยือกแข็ง เพียงแต่จุดเยือกแข็งใช้เรียกเมื่อสารเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ซึ่งจุดหลอมเหลวจะสูงหรือต่ำ ขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมีความแข็งแรงมากน้อยเพียงใด โดยน้ำตาลที่มีมวลโมเลกุลต่ำจะมีจุดหลอมเหลวไม่สูงมากนัก เช่น จุดหลอมเหลวของซูโครส กลูโคส และฟรักโทสอยู่ที่ 186, 146 และ 103 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าหากใช้อุณหภูมิที่เกินกว่าจุดนี้จะทำให้ไม่ได้ของแข็งออกมาหลังจากการอบแห้ง

### 2. ปฏิกริยาการเกิดคาราเมล (Caramelization)

เป็นปฏิกิริยาที่น้ำตาลเกิดการออกซิเดชันทำให้เกิดเป็นสีน้ำตาลออกมา [33] โดยไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ ซึ่งเมื่อสารจำพวกน้ำตาลได้รับความร้อนสูง จะทำให้โมเลกุลของน้ำตาลเกิดการสลายตัวและเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ของสารประกอบคาร์บอนขึ้น เกิดเป็นสารใหม่ที่มีกลิ่นและรสชาติที่ไม่พึงประสงค์ขึ้น คือ Caramelan ( $C_{24}H_{36}O_{18}$ ), Caramelen ( $C_{36}H_{50}O_{25}$ ) และ Caramelin ( $C_{125}H_{188}O_{80}$ ) เช่นในกรณีของน้ำตาลซูโครสเมื่อได้รับความร้อนสูง เริ่มต้นจะเกิดการแตกตัวเป็นน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรักโทส จากนั้นจะเกิดขึ้นขั้นตอนการควบแน่น (Condensation step) ขึ้นโดยน้ำตาลที่สูญเสียน้ำจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันและสร้างพันธะกันก่อนเกิดเป็นสารจำพวกคาราเมลขึ้น ซึ่งในกระบวนการสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งเจือปนที่ไม่พึงประสงค์ (By-product) โดยอุณหภูมิคาราเมลไลเซชัน (Caramelization temperature) ของน้ำตาลแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังต่อไปนี้ อุณหภูมิคาราเมลไลเซชันของน้ำตาลฟรักโทส กลูโคส กาแลกโตส มอลโทส และซูโครสมีค่าอยู่ที่ 110, 160, 160, 180 และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังนั้นหากต้องการผงน้ำตาลที่ไม่มีสิ่งเจือปนควรทำแห่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคาราเมลไลเซชัน

## 2.7 การอบแห้งแบบพ่นฝอยของน้ำตาลซูโครสที่สภาวะปกติ

นอกจากกระบวนการทำให้น้ำตาลซูโครสเป็นผงด้วยการตกผลึกแล้ว ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งแบบพ่นฝอยของน้ำตาลซูโครสภายใต้สภาวะปกติ เช่น ในปี 2008 Lay Ma และคณะ [34] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสต่อสมบัติทางกายภาพในการผลิตผงนมด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 โดยมวล ใช้อัตราการไหลที่ 60 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิของลมร้อนขาเข้าและขาออกเป็น 179 และ 72 องศาเซลเซียสตามลำดับ พบว่าปริมาณน้ำตาลซูโครสที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของนมผงลดลงและผงเหนียวติดกันมากขึ้น รวมถึงลดปริมาณไขมันอิสระลง อย่างไรก็ตามอนุภาคจะมีขนาดและความหนาแน่นเพิ่มขึ้น รวมถึงมีข้อดีที่สามารถปลดปล่อยไขมันในนมระหว่างกระบวนการทำช็อคโกแลตโดยใช้อุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าผงนมมาตรฐาน ในปี 2009 Md. Imtiaz-Ul-Islam และ T.A.G. Langrish [35] ได้ทำการศึกษาการเกิดผลึกในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเปรียบเทียบระหว่างน้ำตาลซูโครสและน้ำตาลแล็กโตส ทดลองโดยใช้สารละลายซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยมวล ทำการอบแห้งโดยใช้ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 45-220 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการไหลของสารละลายที่ 1.1, 1.5 และ 3 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของลมร้อนอยู่ที่ 38 ลูกบาศก์เมตร พบว่าร้อยละของผลึกที่รับรู้จะเริ่มเห็นได้เมื่อใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิดการเหนียวติดของน้ำตาลซูโครสชั้นที่อุณหภูมิสูง โดยได้ร้อยละผลึกได้มากที่สุดเพียง 14 เมื่อใช้อุณหภูมิขาเข้าเป็น 65 องศาเซลเซียสซึ่งยังถือได้น้อย อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิที่ต่ำ (45 องศาเซลเซียส) จะได้รับร้อยละของผลึกได้เพียง 4 เพราะปริมาณความชื้นของอนุภาคเพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำลง จึงทำให้ได้รับผงน้อยลงแทน แต่เมื่อใช้อุณหภูมิสูงมาก (เกิน 200 องศาเซลเซียส) พบว่าจะทำให้เกิดการตกผลึกของน้ำตาลซูโครสซึ่งทำให้ความเหนียวติดลดลงและได้ร้อยละผลึกได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ น้ำตาลเกิดการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาการเกิดคาราเมล เมื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลของสาร ที่อัตราการไหลของสารละลายต่ำจะได้รับการร้อยละของผลึกได้สูงกว่า เพราะอนุภาคที่ได้จะได้รับปริมาณความร้อนมากกว่า จึงทำให้สามารถระเหยความชื้นในอนุภาคได้มากกว่า ในปี 2009 Adhikari และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมโปรตีนในการผลิตผงน้ำตาลซูโครส พบว่าเมื่อทำการอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยคงที่อุณหภูมิขาเข้า 170 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิขาออกเป็น 70 องศาเซลเซียส ในกรณีที่เติมโปรตีนจะไม่ได้รับผงน้ำตาลซูโครสออกมาจากไซโคลนเลย แต่เมื่อเติมโซเดียมคาซิเนตและเวย์โปรตีนที่ถูกไฮโดรไลซ์เพียงเล็กน้อย (ไม่เกินร้อยละ 1) ร้อยละผลึกได้เพิ่มขึ้นประมาณ 60 เนื่องจากโปรตีนเกิดการเคลื่อนย้ายระหว่างอบแห้งและเกิดเป็นฟิล์มห่อหุ้ม ซึ่งเมื่อฟิล์มได้รับความร้อนจะเปลี่ยนเป็นสถานะ

คล้ายแก้วทำให้ลดความเหนียวติดระหว่างอนุภาคกับอนุภาคและอนุภาคกับผนังของห้องอบแห้ง จึงทำให้น้ำตาลซูโครสมีความสามารถในการไหลเพิ่มขึ้นและได้ร้อยละผลได้มากขึ้นด้วย

## 2.8 การอบแห้งแบบพ่นฝอยของสารที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลากชนิดในสภาวะสุญญากาศ

จากปัญหาการเหนียวติดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยางของสารประเภทน้ำตาล (ที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำ) โดยการใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะปกติ จึงได้มีการใช้สภาวะสุญญากาศเพื่อให้สามารถอบแห้งได้ที่อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ไม่สูงเกินไป เช่น ในปี 2016 Islam และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาผลของการอบแห้งที่สภาวะสุญญากาศของน้ำส้มต่อคุณสมบัติกายภาพ การดูดซับน้ำและอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว โดยในการอบแห้งนี้ได้ใช้น้ำร้อนยิ่งยวด (Superheated Steam) เข้ามาช่วยให้ความร้อนแทนลมร้อนที่หายไป ป้อนสารผสมระหว่างน้ำส้มและมอลโตเด็กซ์ตริน DE12 ด้วยอัตรา 300 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงโดยใช้หัวฉีดแบบของไหลสองชนิดผ่านลงไปในห้องอบแห้งที่มีความดันประมาณ 5 กิโลปาสกาล ซึ่งใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศมาช่วยในการลดความดัน มีการควบคุมอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ให้อยู่ที่ 40 องศาเซลเซียสพบว่าผงแห้งที่ได้มีความชื้นต่ำเพียงร้อยละ 2.29-3.49 เท่านั้น ค่าวอเตอร์แอกทิวิตีมีค่าเพียง 0.15-0.25 และค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าสูง ได้ปริมาณร้อยละผลได้ของผงแห้ง 63.3 ที่อัตราส่วนของน้ำส้มต่อมอลโตเด็กซ์ตรินเท่ากับ 30:70 และจะได้ปริมาณร้อยละผลได้ลดลงเมื่ออัตราส่วนปริมาณน้ำส้มเพิ่มขึ้น ซึ่งจากคุณสมบัติต่างๆ ความเสถียร และปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ของผงน้ำส้มที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะสุญญากาศโดยมีไอน้ำร้อนยิ่งยวดช่วยให้ความร้อนสามารถนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรมน้ำส้มผงได้

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุและสารเคมี

- 1 ผงน้ำตาลซูโครส จากบริษัท ไทยฟูด แอนด์ เคมิคอลจำกัด
- 2 ผงแป้งมอลโตเดกซ์ตริน DE11 (Maltodextrin) จากบริษัท ไทยฟูด แอนด์ เคมิคอลจำกัด
- 3 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

#### ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของผงน้ำตาลซูโครสจากบริษัทไทยฟูด

Test Item	Benchmark	Result
Color	46-100 ICUMSA	47
Conductivity Ash	0.1 (%w/w) Max	0.0155
Polarization	99.50% Min	99.96
Moisture (%total)	0.03 (%w/w) Max	0.0277
Invert Sugar	0.1 (%w/w) Max	0.002
Sediment	200 ppm Units Max	9

#### ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของผงแป้งมอลโตเดกซ์ตริน DE11 จากบริษัทไทยฟูดแอนด์เคมิคอลจำกัด

Items	Standards	Results
Dextrose Equivalent%(m/m)	10-12	11
Starch Test	Negative	Conform
Moisture%(m/m)	≤6.0	5.3
Solubility%(m/m)	≥98	99.0
PH value	4.5-5.5	5.2
Heavy metals(ppm)	≤5.0	<5.0

Items	Standards	Results
Ash%(m/m)	<0.6	0.07
Iodin Experiment	No blue reaction	Conform
As mg/kg	≤0.5	<0.5
Pb mg/kg	≤0.5	<0.5
Sulfur Dioxide(mg/kg)	≤10	<10
Total Bacteria Count(cfu/g)	≤1000	Conform
Yeast(cfu/g)	≤50	<50
Mold(cfu/g)	≤50	<50
E.coli MPN/100g	Not detected	Not detected
Salmonella(cfu/g)	Negative to test	Negative to test
Pathogenic Bacteria	Negative to test	Negative to test

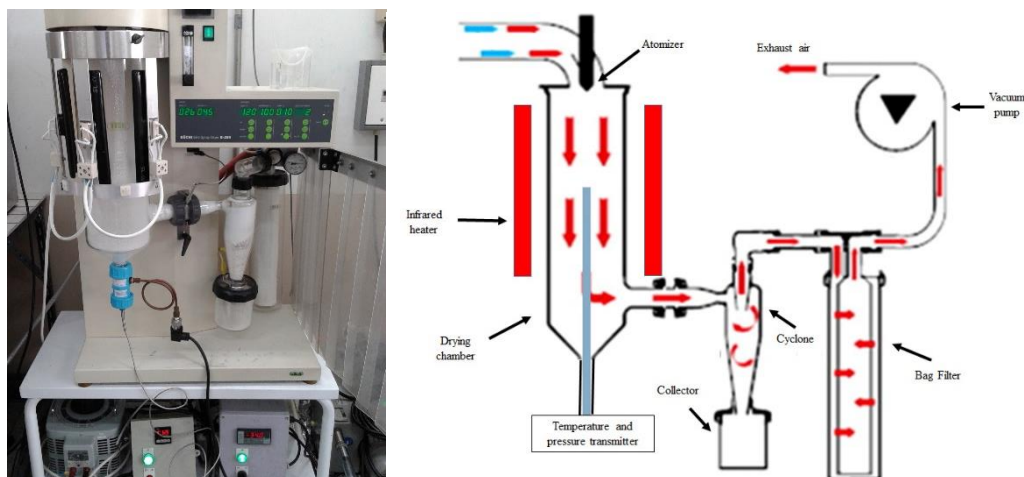
### 3.2 วิธีการทดลอง

#### 3.2.1 การเตรียมสารในการอบแห้ง

เตรียมสารละลายผสมระหว่างผงน้ำตาลซูโครส ผงแป้งมอลโตเดกซ์ตริน และน้ำปราศจากไอออนในอัตราส่วนที่ต้องการโดยปริมาณร้อยละของน้ำเริ่มต้น 60 ของน้ำหนักสารละลายรวม จากนั้นทำการปั่นกวนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

#### 3.2.2 การอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะสุญญากาศ

ใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย Buchi B290, Switzerland เป็นต้นแบบโดยทำการปรับปรุงเครื่องด้วยการติดตั้งปั๊มสุญญากาศของบริษัท P.V.R s.r.l รุ่น PVL 35 ที่สามารถดูดลมได้ 35 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงและสามารถทำความดันต่ำสุดได้ 0.5 มิลลิบาร์ แทนเครื่องสุบลม (Aspirator) เพื่อให้เกิดสภาวะสุญญากาศภายในห้องอบแห้งได้ ติดตั้งเครื่องวัดความดัน (pressure transmitter) ที่บริเวณด้านล่างของห้องอบแห้งเพื่อช่วยในการบ่งบอกและปรับความดันระบบตามที่ต้องการ และมีตัวช่วยให้ความร้อน เนื่องจากมีลมร้อนไหลเข้าน้อยจากสภาวะสุญญากาศ คือเครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรด ติดตั้งรอบห้องอบแห้ง



รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ติดตั้งเครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรดและปั๊มสุญญากาศ

ทดลองโดยนำสารละลายที่เตรียมไว้เข้าสู่กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยกำหนดสภาวะต่างๆที่ทำการศึกษาในเครื่อง ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิในห้องอบแห้งโดยเครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรดที่ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส
2. อุณหภูมิขาเข้าของลมร้อนที่ใช้ในสภาวะปกติที่ 120 องศาเซลเซียส
3. ความดันของระบบในห้องอบแห้งที่ 0.54 และ 1 บรรยากาศ (atm)
4. อัตราส่วนระหว่างน้ำตาลซูโครสกับผงแป้งมอลโตเดกซ์ตริน DE11 ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะปกติที่ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยน้ำหนัก
5. อัตราส่วนระหว่างน้ำตาลซูโครสกับผงแป้งมอลโตเดกซ์ตริน DE11 ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยน้ำหนัก
6. อัตราการป้อนสารที่ 3 มิลลิลิตรต่ออนาที

### 3.3 การวิเคราะห์สาร

#### 3.3.1 วิเคราะห์หาปริมาณร้อยละผลได้

การหาร้อยละผลได้คำนวณจากปริมาณของแข็งผสมที่ออกมาเทียบกับปริมาณผงมอลโตเต็กซ์ตริโนที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะสุญญากาศเดียวกัน

#### 3.3.2 วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผง

ทำการหาขนาดและการกระจายตัวโดยใช้เครื่อง Mastersizer 3000 โดยนำตัวอย่างประมาณ 1 กรัมทำการเทลงใน iso-propanol ซึ่งไม่เกิดละลายซึ่งกันและกัน จากนั้นจึงทำการปั่นกวนด้วยความเร็ว 2500 รอบต่อนาที และนำเข้าเครื่องเพื่อทำการวิเคราะห์ค่าดังกล่าว



รูปที่ 3.2 เครื่อง Mastersizer 3000



### 3.3.3 วิเคราะห์หาความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในผง

การหาปริมาณความชื้นในผงทำได้โดยใช้ระบบ Thermogravimetric Analyzer, TGA ของเครื่อง METTLER TOLEDO STARe SYSTEM TGA/DSC1 Module โดยนำผงที่ได้หลังการอบแห้ง ปริมาณ 10 มิลลิกรัมเข้าไปอบในเครื่อง โดยเริ่มให้ความร้อนด้วยก๊าซไนโตรเจนที่อัตรา 40 มิลลิตรต่อนาที ตั้งแต่ 25 จนถึง 150 องศาเซลเซียส อัตราให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที หลังจากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิสุดท้ายเป็นเวลา 30 นาที และวัดน้ำหนักที่หายไปหลังจากการอบแห้งเปรียบเทียบกับตอนก่อนอบแห้ง เพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในผงแห้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยรายงานผลอยู่ในรูปน้ำหนักเปียก

### 3.3.4 วิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ )

การวิเคราะห์หา  $T_g$  ทำทั้งสารก่อนทำการอบแห้งและหลังทำการอบแห้ง คือ หา  $T_g$  ของผงน้ำตาลซูโครส ผงแป้งมอลโตเดกซ์ตริน และของแข็งผสมที่ได้หลังการอบแห้ง โดยใช้ระบบ Differential Scanning Calorimetry, DSC ของเครื่อง METTLER TOLEDO STARe SYSTEM TGA/DSC1 Module ด้วยการนำสารที่ต้องการหาค่าเข้าไปอบในเครื่อง เพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 25 องศาเซลเซียสจนกระทั่งเกินอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของแต่ละสาร ในอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ด้วยก๊าซไนโตรเจนที่อัตรา 40 มิลลิตรต่อนาที หลังจากนั้นจึงทำการค่อยๆ ลดอุณหภูมิลง



รูปที่ 3.3 เครื่อง METTLER TOLEDO STARe SYSTEM TGA/DSC1 Module

### 3.3.5 วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาค

การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานของแข็งที่ได้จากการอบแห้งสามารถทำได้โดยใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, JSM-6400) โดยนำตัวอย่างของแข็งไปโปรยติดอยู่บนแท่งทองเหลือง หลังจากนั้นทำการเคลือบผิวหน้าด้วยทองเพื่อให้นำไฟฟ้าได้ดีขึ้น และนำเข้าเครื่อง SEM เพื่อส่องดูลักษณะของของแข็งที่ได้



รูปที่ 3.4 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.3.6 วิเคราะห์ความหนาแน่นของอนุภาคผง

ทำการวิเคราะห์โดยนำผงตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ลงในกระบอกตวง 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปสั่นด้วยเครื่อง Vortex (VM-300) เป็นเวลา 1 นาที วัดหาปริมาตรหลังจากทำการสั่น นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความหนาแน่นของผง ทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่น



รูปที่ 3.5 เครื่อง Vortex Mixer (VM-300)

## บทที่ 4

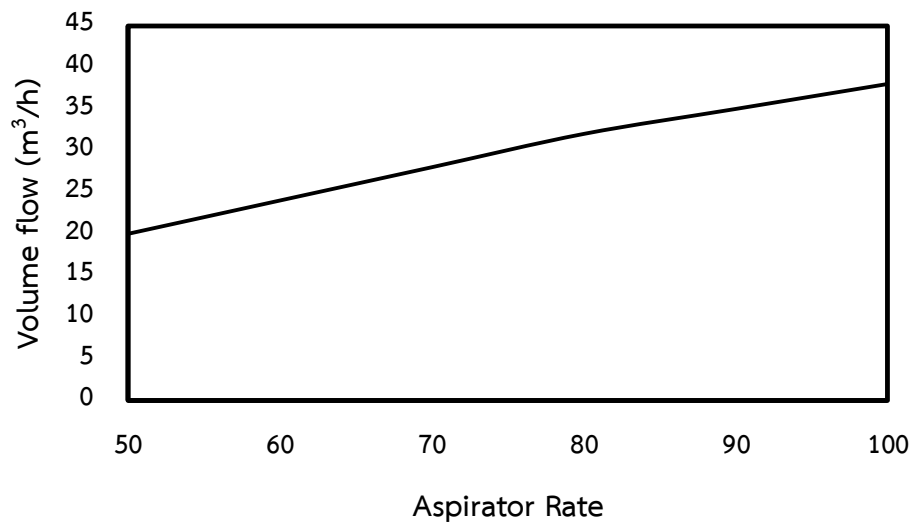
### ผลการวิจัย

บทนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก คือในส่วนของ การคำนวณซึ่งอยู่ในหัวข้อ 4.1 ซึ่งเป็นการคำนวณเพื่อทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะปกติและที่สภาวะสูญญากาศ และอีกส่วนหนึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการทดลอง โดยจะอยู่ในหัวข้อที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ซึ่งได้มาจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยของสารผสมระหว่างแป้งมอลโตเดกซ์ตรินและน้ำตาลซูโครสที่สภาวะความดันทั้งสอง

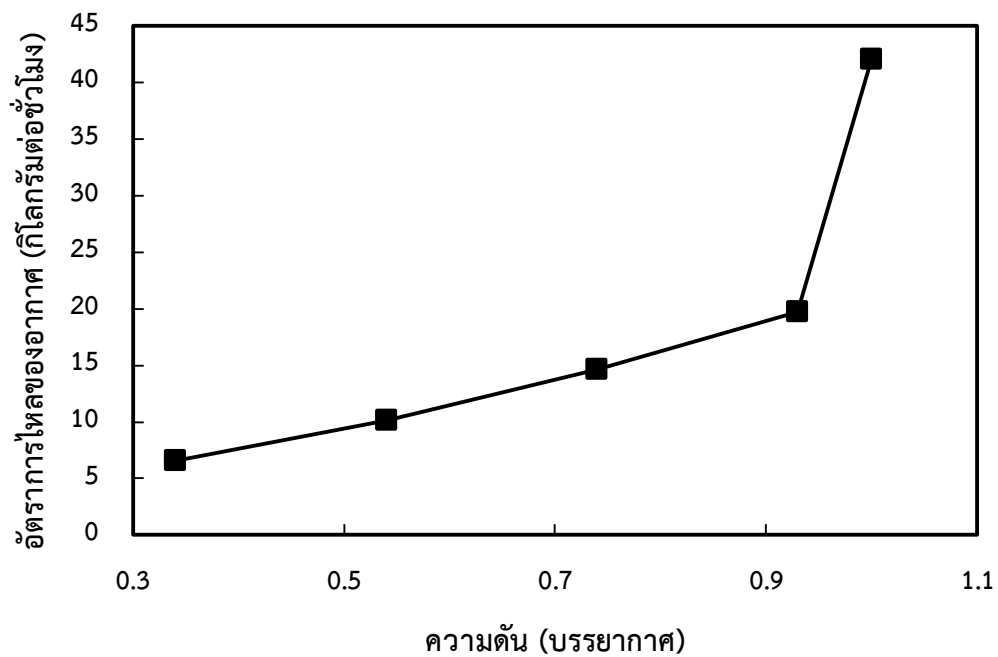
#### 4.1 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะปกติและสภาวะสูญญากาศ

ในการหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบจะหาได้จากการคำนวณจากหลักของวิศวกรรมเคมี โดยใช้กฎการอนุรักษ์มวลสารและพลังงาน เพื่อหาค่าการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนระหว่างแหล่งให้พลังงานความร้อน (ลมร้อนและเครื่องให้ความร้อนแบบอินฟราเรดในกระบวนการการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะปกติและสภาวะสูญญากาศตามลำดับ) และตัวรับพลังงานความร้อน (หยดของเหลวของผสมระหว่างมอลโตเดกซ์ตรินและน้ำตาลซูโครส) นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาเวลาที่สารไหลภายในระบบเพียงพอต่อการอบแห้งให้ได้ผงแห้งออกมาได้หรือไม่ และผงที่ได้ออกมาเกิดการเหนียวติดจากการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยาง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเกินกว่าค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของสาร อย่างไรก็ตามการคำนวณจำเป็นต้องใช้ตัวอย่างค่าที่ได้จากการทดลองจริง เช่น อุณหภูมิขาเข้าและขาออกของสารผสมและของอากาศ ความชื้นขาเข้าและขาออก อัตราการป้อนสาร อัตราการไหลของอากาศ อัตราส่วนระหว่างแป้งและน้ำตาล เป็นต้น โดยข้อมูลจากการทดลองเหล่านี้จะแสดงไว้ในภาคผนวก ก

ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะปกติ อัตราไหลของอากาศได้มาจากเครื่องสูบลมอากาศ (Aspirator) ที่ป้อนอากาศร้อนเข้าระบบ โดยที่อัตราการไหลที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 4.1 ซึ่งจากการทดลองที่สภาวะปกติจะใช้อัตราเครื่องสูบลมอากาศที่ 50% ซึ่งจะได้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 20 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เมื่อทำการแปลงให้อยู่ในหน่วยของมวล จะได้อัตราการไหลเท่ากับ 24 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (ความหนาแน่นของอากาศประมาณ 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) ส่วนในระบบที่สภาวะสูญญากาศจะใช้ปั๊มสูญญากาศ (Vacuum Pump) รุ่น PVL 35 แทนเครื่องสูบลมอากาศ ซึ่งอัตราการไหลจะแปรผันตรงกับความดันที่ลดลง ดังรูปที่ 4.2 อย่างไรก็ตามปริมาณอากาศมีผลต่อประสิทธิภาพของไซโคลน ยังมีปริมาณอากาศน้อยจะทำให้ร้อยละผลได้ของผงแห้งลดลงซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับอัตราเครื่องสูบลมอากาศ

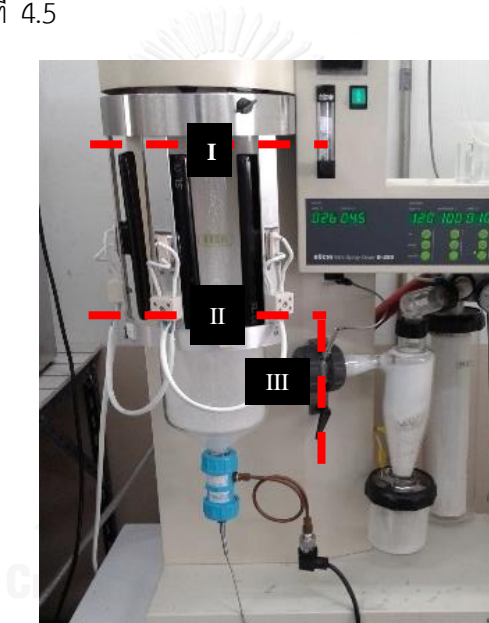


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับความดันเมื่อใช้ปั๊มสุญญากาศ

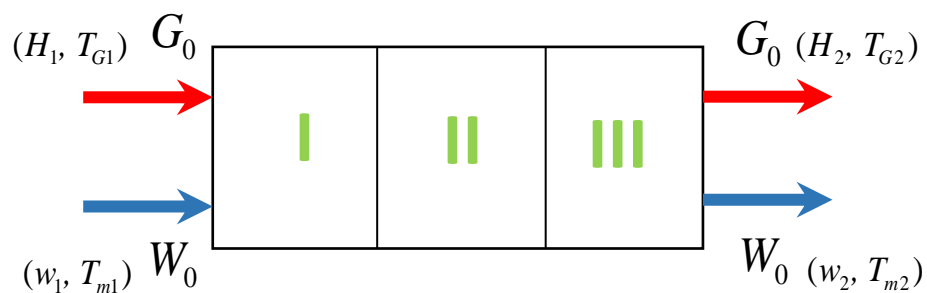
#### 4.1.1 การคำนวณการถ่ายโอนมวลสารและความร้อน

จากหัวข้อที่ 2.2.3 พบว่าอัตราการอบแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงในการอบแห้งแบบกะ รวมถึงการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงได้เช่นเดียวกัน โดยสามารถแบ่งช่วงการอบแห้งภายในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยได้ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบภูมิ

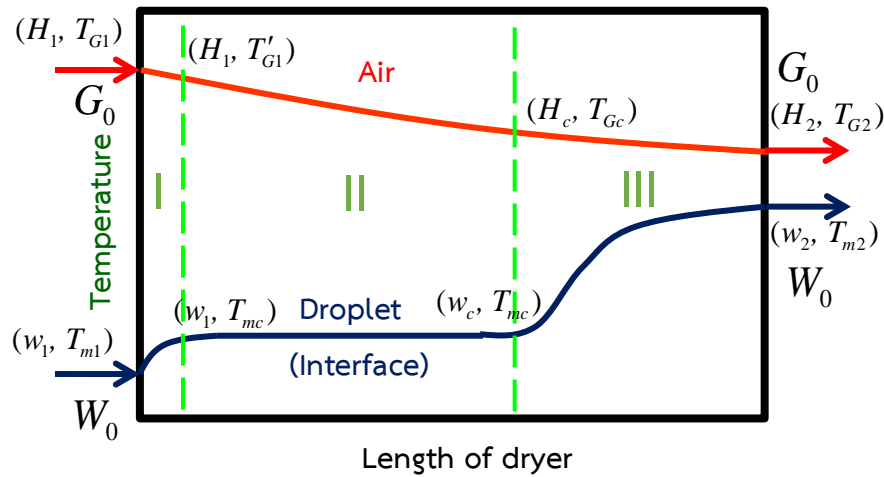
แบบกล่องเพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นในระบบที่มีการไหลของอากาศกับสารละลายไหลทางเดียวกัน (Co-current) ได้ตามรูปที่ 4.4 เนื่องจากในแต่ละช่วงมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้นค่าสมบัติทางกายภาพและทางเคมีจึงแตกต่างกันทั้งในส่วนของสารละลายและอากาศ โดยการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกจะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของหยดของเหลว จนกระทั่งถึงอุณหภูมิระเหยเปียกจะเข้าสู่ช่วงที่สอง ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ได้จากการรับความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิกับสูญเสียความร้อนแฝงจากการกลายเป็นไอ เนื่องจากการระเหยของน้ำออก มีค่าเท่ากัน ซึ่งทำให้ค่าอุณหภูมิของหยดของเหลวไม่เปลี่ยน อัตราการระเหยน้ำมีค่าคงที่ และจะเข้าสู่ช่วงที่สาม เมื่อน้ำที่อยู่ข้างในของอนุภาคไม่สามารถแพร่ออกมาบริเวณผิววนอกไม่ทัน ทำให้อุณหภูมิมันเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้น้ำระเหยออกไปมากขึ้นกว่าเดิม อย่างไรก็ตามอัตราการระเหยในช่วงนี้ยังคงมีค่าต่ำกว่าช่วงที่สองอยู่ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะนำไปตามรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.3 ช่วงการอบแห้งที่อัตราแตกต่างกันในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย



รูปที่ 4.4 ช่วงการอบแห้งโดยใช้แผนภูมิกล่องในระบบที่มีการไหลทางเดียวกัน



รูปที่ 4.5 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยในช่วงต่างๆ

จากปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถเขียนเป็นสมการตามกฎทรงมวลและกฎอนุรักษ์พลังงานได้ดังต่อไปนี้

- 1) จากกฎทรงมวล: มวลรวมของสารขาเข้าเท่ากับมวลรวมของสารขาออกจะได้ว่า

$$G_0 H_1 + W_0 w_1 = G_0 H_2 + W_0 w_2$$

ระบบ :  $G_0 (H_2 - H_1) = W_0 (w_1 - w_2)$  (4.1)

ช่วงที่ 2 :  $G_0 (H_c - H_1) = W_0 (w_1 - w_c)$  (4.2)

- 2) จากกฎอนุรักษ์พลังงาน: ผลต่างพลังงานระบบขาเข้ากับขาออกและผลต่างพลังงานสิ่งแวดล้อมขาเข้ากับขาออกรวมกันเท่ากับศูนย์

ระบบ :  $G_0 (C_{s1} T_{G1} + H_1 \lambda_0) + W_0 (C_m + C_w w_1) T_{m1} + \dot{Q} = G_0 (C_{s2} T_{G2} + H_2 \lambda_0) + W_0 (C_m + C_w w_2) T_{m2}$  (4.3)

ช่วงที่ 1 :  $G_0 (C_{s1} T_{G1} + H_1 \lambda_0) + W_0 (C_m + C_w w_1) T_{m1} + \dot{Q}_1 = G_0 (C_{s1} T'_{G1} + H_1 \lambda_0) + W_0 (C_m + C_w w_1) T_{mc}$  (4.4)

ช่วงที่ 2 :  $G_0 (C_{s1} T'_{G1} + H_1 \lambda_0) + W_0 (C_m + C_w w_1) T_{mc} + \dot{Q}_2 = G_0 (C_{sc} T_{Gc} + H_c \lambda_0) + W_0 (C_m + C_w w_c) T_{mc}$  (4.5)

ช่วงที่ 3 :  $G_0 (C_{sc} T_{Gc} + H_c \lambda_0) + W_0 (C_m + C_w w_c) T_{mc} + \dot{Q}_3 = G_0 (C_{s2} T_{G2} + H_2 \lambda_0) + W_0 (C_m + C_w w_2) T_{m2}$  (4.6)

โดยที่	$G_0$	คือ อัตราการไหลของอากาศ (kg/hr)
	$W_0$	คือ อัตราการป้อนสาร ( $kg_{\text{solution}}/\text{hr}$ )
	$H_1, H_2$	คือ ความชื้นอากาศขาเข้าและขาออก ( $kg_{\text{moisture}}/kg_{\text{dry air}}$ )
	$w_1, w_2$	คือ อัตราส่วนชื้นขาเข้าและขาออก ( $kg_{\text{moisture}}/kg_{\text{solution}}$ )
	$C_{s1}, C_{s2}$	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศขาเข้าและขาออก (kJ/kg·K)
	$T_{G1}, T_{G2}$	คือ อุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออก (K)
	$T_{m1}, T_{m2}$	คือ อุณหภูมิสารขาเข้าและขาออก (K)
	$\lambda_0$	คือ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ (kJ/kg)
	$C_m$	คือ ความจุความร้อนของผงแห้งที่ปราศจากน้ำ (kJ/kg·K)
	$C_w$	คือ ความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kg·K)
	$\dot{Q}$	คือ อัตราการให้ความร้อน (kJ/hr)
	$T'_{G1}$	คือ อุณหภูมิที่ลดลงหลังช่วงที่ 1 (K)
	$T_{mc}$	คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกในกรณีที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน (K) = $T_w$
	$C_{sc}$	คือ ความจุความร้อนของอากาศหลังช่วงที่ 2 (kJ/kg·K)
	$T_{Gc}$	คือ อุณหภูมิหลังช่วงที่ 2 (K)
	$H_c$	คือ ความชื้นอากาศหลังช่วงที่ 2 ( $kg_{\text{moisture}}/kg_{\text{dry air}}$ )
	$w_c$	คือ สัดส่วนความชื้นหลังช่วงที่ 2 ( $kg_{\text{moisture}}/kg_{\text{solution}}$ )

อย่างไรก็ตามจากการวัดค่าอุณหภูมิขาออกที่ออกจากเครื่อง ไม่สามารถบ่งบอกถึงค่าอุณหภูมิสุดท้ายของผงแห้งได้ว่ามีค่าเท่าใด ซึ่งหากสมมติว่าช่วงที่เกิดอัตราการอบแห้งลดลงเป็นอัตราการอบแห้งแบบเส้นตรงในกรณีที่เป็นการอบแห้งของหยดของเหลวจะสามารถหาอุณหภูมิสุดท้ายได้ว่า

$$dQ = dQ_{\text{solid sensible}} + dQ_{\text{liquid sensible}} + dQ_{\text{liquid latent}}$$

$$dQ = h_G A (T_G - T_m) dt$$

$$dQ_{\text{solid sensible}} = W C_{pm} dT_m$$

$$dQ_{\text{liquid sensible}} = W C_L w dT_m$$

$$dQ_{\text{liquid latent}} = W (-dw) \lambda_m$$

ดังนั้น 
$$h_G A (T_G - T_m) dt = W (-dw) \lambda_m + W (C_{pm} + C_L w) dT_m$$



ในกรณีที่เป็นการอบแห้งของหยดของเหลวจะได้ว่า

$$-\frac{W}{R_c A} \frac{F}{F_c} dF = dt$$

แทนลงในสมการข้างบนจะได้

$$h_G A (T_G - T_m) \left(-\frac{W}{R_c A} \frac{F}{F_c} dF\right) = W(-dF) \lambda_m + W(C_{pm} + C_L(F + w_e)) dT_m$$

แก้สมการโดยให้เงื่อนไขเริ่มแรก (Initial condition) คือ  $t_m = t_w$  ที่  $F = F_c$

$$\frac{T_G - T_{m2}}{T_G - T_w} = \frac{\lambda_w F - C_{pm}(T_G - T_w) \left(\frac{F}{F_c}\right) \frac{\lambda_w F_c}{C_{pm}(T_G - T_w)}}{\lambda_w F_c - C_{pm}(T_G - T_w)} \quad (4.7)$$

โดยที่  $F = w_1 - w_e$ ,  $F_c = w_c - w_e$

$w_e$  คือ อัตราส่วนความชื้นสมดุล

$w_c$  คือ อัตราส่วนความชื้นวิกฤต

ในกรณีที่เป็นการอบแห้งแบบกะจะสามารถใช้สมการนี้ประมาณอุณหภูมิแห้งได้เลย เนื่องจากมีสภาวะอุณหภูมิอากาศและความชื้นคงที่ อย่างไรก็ตาม หากเป็นการอบแห้งแบบต่อเนื่อง สมการนี้จะสามารถประมาณได้ดีถ้าคิดที่อุณหภูมิขาออก ดังนั้นจะได้ตามสมการ (4.8)

$$\frac{T_{G2} - T_{m2}}{T_{G2} - T_w} = \frac{\lambda_w F - C_{pm}(T_{G2} - T_w) \left(\frac{F}{F_c}\right) \frac{\lambda_w F_c}{C_{pm}(T_{G2} - T_w)}}{\lambda_w F_c - C_{pm}(T_{G2} - T_w)} \quad (4.8)$$

จากสมการที่ได้กล่าวไปในข้างต้นจะพบว่าสมการยังมีไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องหาสมการเพิ่ม โดยการพิจารณาช่วงที่สองที่มีอุณหภูมิที่น้ำได้รับความร้อนจากสิ่งแวดล้อมและในขณะที่ผิวเกิดการสูญเสียความร้อนของการกลายเป็นไอ เนื่องจากการระเหย กลไกทั้งสองเกิดสมดุลกันอย่างรวดเร็วจนเกิดความสัมพันธ์ที่ว่า

$$Le = \frac{\text{heat transfer coefficient}}{\text{mass transfer coefficient} \cdot \text{humid heat}} = 1$$

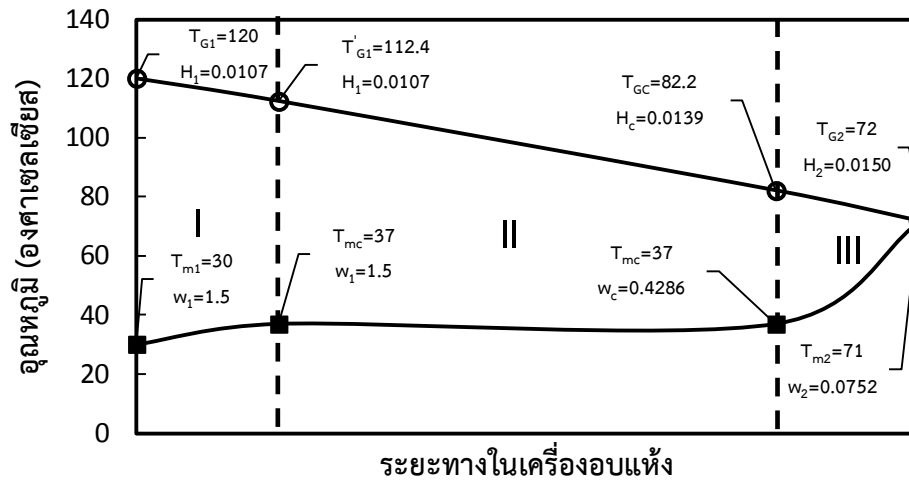
โดยที่  $Le$  คือ ตัวเลขลิวอิส และจะได้ว่าอัตราการให้ความร้อนเท่ากับอัตราการระเหยน้ำออกจากผิวของอนุภาค ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้ (ในกรณีที่มีความร้อนเพิ่มเข้ามา)

$$\lambda_0 C_s h_D (w_1 W_0 - H_1 G_0) + Q_{add} = h_G (T'_{G1} - T_{mc}) \quad (4.9)$$

โดยที่  $h_D$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

$h_G$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน





รูปที่ 4.6 อุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดันบรรยากาศและใช้อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส โดยที่ ○ อากาศร้อน ■ ผนังแห้ง

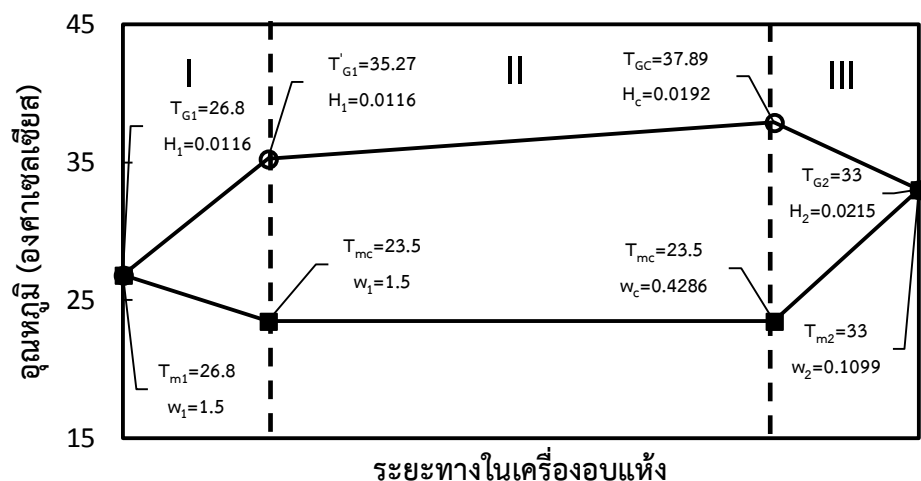
#### 4.1.1.2 การคำนวณการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะสูญญากาศ

ในระบบการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะสูญญากาศโดยมีการให้ความร้อนเพิ่มเติมด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบอินฟราเรดของผนังผสมระหว่างแปงมอลโตเดกซ์ตริน DE11 กับน้ำตาลซูโครสโดยมีอัตราส่วนอยู่ที่ 30:70 โดยมีมวล (12 กรัม : 28 กรัม) โดยมีความดันในเครื่องอบแห้ง 0.54 บรรยากาศ คิดความร้อนของเครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรดที่ให้ในช่วงที่ 1 เป็นร้อยละ 30 ของทั้งหมดและช่วงที่ 2 คิดเป็นร้อยละ 70 ของทั้งหมด ส่วนในช่วงที่ 3 ไม่คิดถึงการให้ความร้อนเนื่องจากไม่อยู่ใกล้กับเครื่องทำความร้อน ปริมาณของแข็งในสารละลายเริ่มต้นร้อยละ 40 โดยมีมวลอัตราการไหลของอากาศร้อนเท่ากับ 10.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการป้อนสารเท่ากับ 3 มิลลิลิตรต่อนาที และมีคุณสมบัติอื่นๆที่อุณหภูมิต่างๆตามตารางที่ 4.1 ซึ่งจากสมการข้างต้น สามารถหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องได้ดังรูปที่ 4.7, 4.8, 4.9 และ 4.10 จากรูปจะเห็นว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะสูญญากาศแตกต่างจากการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากอนุภาคของแข็งมาจากเครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรดโดยมีอากาศเป็นตัวช่วยในการพัดพาอนุภาคในไหลเข้าสู่ไซโคลนและที่เก็บสารรวมถึงรับความชื้นที่เกิดจากการระเหยในผนัง เริ่มแรกอากาศได้รับความร้อนจากเครื่องทำความร้อน จึงทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่หยุดสารละลายมีอุณหภูมิลดลงแทนที่จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีน้ำบางส่วนระเหยออกไป จึงทำให้น้ำพาความร้อนบางส่วนออกจากหยุดสารละลาย โดยการลดความดันลงจะทำให้ น้ำระเหยออกได้ง่ายขึ้น จนกระทั่งถึงสมดุลระหว่างการได้รับความร้อน

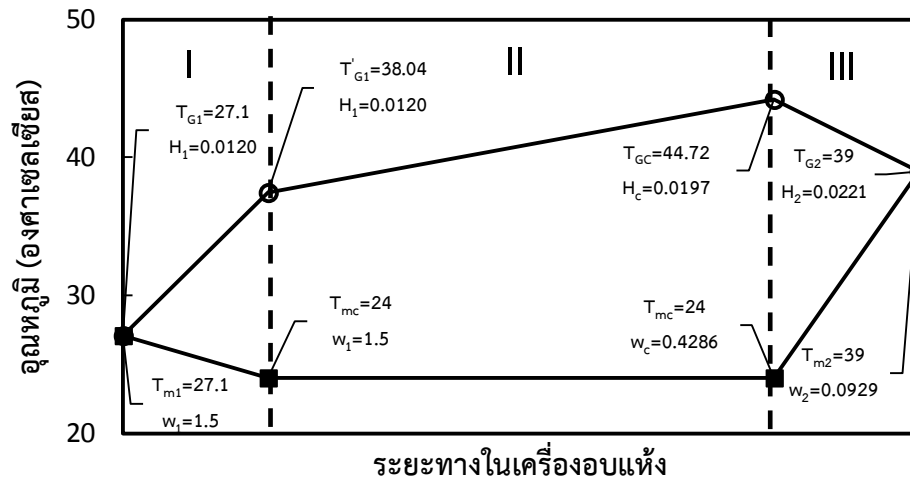
และการระเหยของน้ำออกจากหยดสารละลาย ความร้อนที่อนุภาคได้รับจะยังคงไม่ทำให้อนุภาคเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากความร้อนที่ได้รับนี้นำไปใช้ในการระเหยน้ำออกจากอนุภาค ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศจะเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตามระยะทางการไหลเพราะได้รับความร้อนจากเครื่องทำความร้อน ความชื้นในอากาศจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความชื้นในของแข็งจะลดลง เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนจากอนุภาคสู่อากาศ และเมื่ออัตราการระเหยความชื้นกับการแพร่ในอนุภาคของแข็งไม่เท่ากัน จึงทำให้ผิวอนุภาคมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ อากาศมีอุณหภูมิลดลงจากการที่ไม่ได้รับความร้อนเพิ่มเติมจากเครื่องทำความร้อนแล้วและมีการถ่ายโอนความร้อนให้แก่อนุภาคของแข็ง ความชื้นยังคงมีการถ่ายโอนจากอนุภาคสู่อากาศเช่นเดิม

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของอากาศและอนุภาคของแข็งในการอบแห้ง

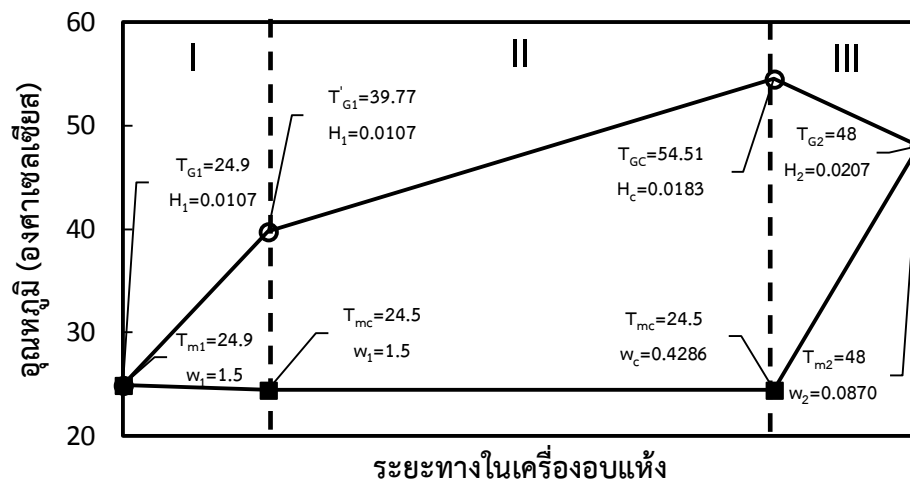
อุณหภูมิห้องอบ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิอากาศขาเข้า (องศาเซลเซียส)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิขาออก (องศาเซลเซียส)	ความชื้นผงแห้ง (%)
40	26.8	52	33.0	9.9
50	27.1	54	39.0	9.2
60	24.9	54	48.0	8
70	27.0	48	50.0	7.6



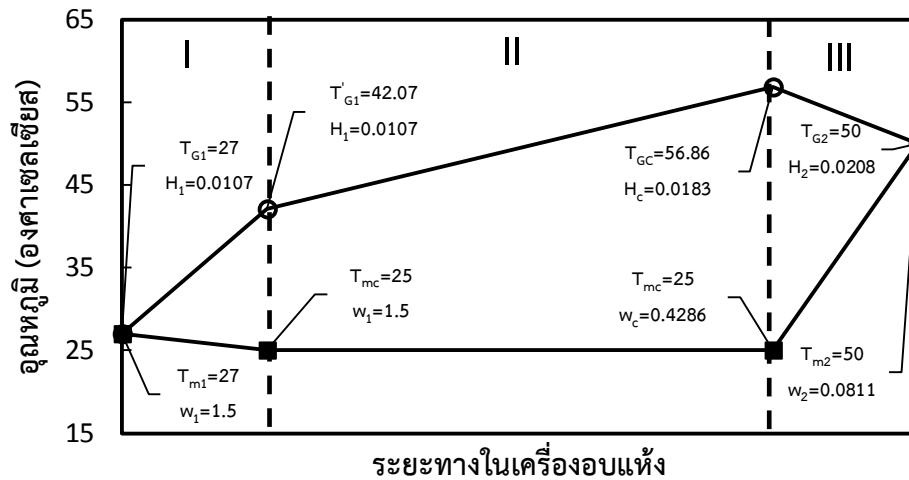
รูปที่ 4.7 อุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดัน 0.54 บรรยากาศและใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 40 องศาเซลเซียส โดยที่ ○ อากาศร้อน ■ ผงแห้ง



รูปที่ 4.8 อุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดัน 0.54 บรรยากาศและใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส โดยที่ ○ อากาศร้อน ■ ผงแห้ง



รูปที่ 4.9 อุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดัน 0.54 บรรยากาศและใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส โดยที่ ○ อากาศร้อน ■ ผงแห้ง



รูปที่ 4.10 อุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดัน 0.54 บรรยากาศและใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส โดยที่ ○ อากาศร้อน ■ ผงแห้ง

#### 4.1.2 การคำนวณหาระยะเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอย

ในการอบแห้งโดยทั่วไปนั้นจะใช้อุณหภูมิลมร้อนที่สูง (120-180 องศาเซลเซียส) เพื่อให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิหรือแรงขับเคลื่อน (driving force) มีค่ามากๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดการถ่ายเทอุณหภูมิได้มากและนำอุณหภูมิที่ได้ไปใช้ในการระเหยความชื้นภายในผงแห้งได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงหรือใช้อุณหภูมิสูงได้ จะทำให้ไม่สามารถใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิสูงได้ ส่งผลให้ต้องใช้เวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่เวลาที่เกิดการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยขึ้นอยู่กับความเร็วลมและปริมาตรของห้องอบแห้ง ดังนั้นหากเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งน้อยกว่าเวลาที่ผงแห้งอยู่ในเครื่องอบแห้ง จะทำให้ไม่ได้ผงแห้งที่มีความชื้นตามที่ต้องการหรือไม่ได้ผงออกมาเลย

จากหัวข้อที่ 2.2.3.1 แสดงถึงการอบแห้งที่ช่วงเวลาต่างๆในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ไม่มี การให้ความร้อนเพิ่มเติมหรือมีเครื่องทำความร้อน โดยในแต่ละช่วงจะใช้เวลาในการอบแห้งไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับอัตราการอบแห้งของช่วงนั้น ซึ่งช่วงแรกจะมีอัตราการอบแห้งที่น้อยมากหรือไม่มีเลยจึงไม่จำเป็นต้องนำมาคิด ส่วนในช่วงที่สองจะเป็นการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบคงที่ ส่วนในช่วงที่ สุดท้ายจะเป็นการอบแห้งแบบลดลง โดยในช่วงที่สองเป็นช่วงที่อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งจะเท่ากับ อุณหภูมิกระเปาะเปียก ( $t_w$ ) ซึ่งตามสมมูลของพลังงานจะหาได้จากสมการ (2.20) ดังนั้น  $t_m = t_w$

$$R_c = h \frac{t - t_m}{r_m} \quad (2.20)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนหรือ  $h$  ของอนุภาคกลมโตดัดเดียวกับลมร้อน สามารถประมาณได้จากสมการ (2.21) ดังนี้

$$\frac{hd_p}{\lambda_f} = 2 + 0.6Re_p^{0.5}Pr^{0.33} \quad (2.21)$$

และช่วงที่สามเป็นช่วงอัตราการอบแห้งแบบลดลง ซึ่งในช่วงนี้อัตราการอบแห้งของวัสดุแต่ละชนิดจะไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับตัววัสดุเอง อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการอบแห้งที่ลดลงมักจะลดลงเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนความชื้น ในกรณีที่อนุภาคของวัสดุมีน้ำอยู่ในรูปที่ค่อนข้างอิสระและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5 มิลลิเมตร ซึ่งตรงกับการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะสามารถประมาณผลการอบแห้งได้แบบเส้นตรง

$$R_d = R_c \frac{F}{F_c} \quad (4.11)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.22) จะหาเวลาทั้งหมดที่จำเป็นต้องใช้ในการอบแห้งได้ว่า

$$\theta = \theta_c + \theta_d = \frac{W}{AR_c} \left[ (F_1 - F_c) + F_c \ln \frac{F_c}{F_2} \right] \quad (4.12)$$

ส่วนในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีให้ความร้อนเพิ่มเติมหรือมีเครื่องทำความร้อนจะไม่สามารถหาได้ค่าอัตราการอบแห้งแบบคงที่ได้ตามสมการข้างต้น ซึ่งในการอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยมีเครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรดจำเป็นต้องประยุกต์สมการดังต่อไปนี้

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2$$

$$\dot{Q} = R_c A \lambda_m$$

โดยที่  $\dot{Q}_1$  คือ ความร้อนที่ได้จากการพาความร้อน

$\dot{Q}_2$  คือ ความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสี

$$\text{ดังนั้น} \quad R_c = [h(t - t_m) + \frac{\dot{Q}_2}{A}] \frac{1}{\lambda_m} \quad (4.13)$$

เวลาที่ฝังแห้งอยู่ภายในเครื่องอบแห้งขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของลมร้อนและปริมาตรของห้องอบแห้ง โดยสมมติฐานว่าผนังแห้งไหลไปกับลมร้อนพร้อมๆกัน ซึ่งจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\text{Residence time} = \frac{\text{Chamber Volume}}{\text{Air flow rate}} \quad (4.14)$$

โดยเวลาที่ฝังแห้งอยู่ภายในเครื่องที่ความดันแตกต่างกันเป็นไปตามตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อความดันของระบบลดลงจะทำให้อนุภาคของแข็งอยู่ภายในห้องอบแห้งนานขึ้น

**ตารางที่ 4.2** อัตราการไหลของอากาศและระยะเวลาในห้องอบแห้ง

ปีที่ใช้	ความดันระบบ (บรรยากาศ)	อัตราการไหลของอากาศ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	ระยะเวลาที่สารไหลใน ห้องอบแห้ง (วินาที)
ปีมสุญญากาศ	0.93	19.7	6.6
ปีมสุญญากาศ	0.74	14.6	8.9
ปีมสุญญากาศ	0.54	10.1	12.9
ปีมสุญญากาศ	0.34	6.6	19.8
เครื่องสูบลมอากาศ (50%)	1	24	5.42

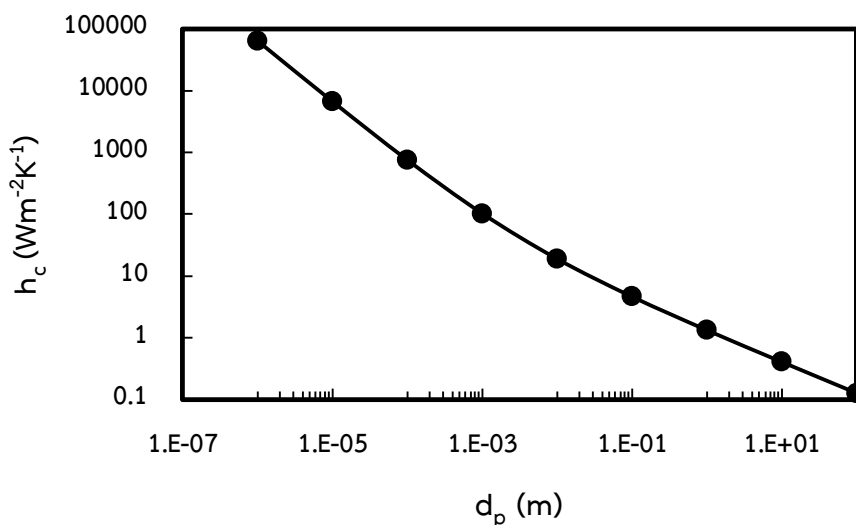
เวลาที่ใช้ในการอบแห้งผงแห้งของสารผสมระหว่างมอลโตเดกซ์ตรินและน้ำตาลซูโครส โดยมีอัตราส่วน 30:70 ที่สภาวะความดันปกติและที่สุญญากาศ แสดงในตารางที่ 4.3 โดยคิดขนาดของหยดของเหลวที่ 100 ไมโครเมตร อุณหภูมิอากาศเข้าเท่ากับ 27 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าการอบแห้งที่สภาวะปกติใช้เวลาน้อยกว่าที่สภาวะสุญญากาศเนื่องจากมีแรงขับเคลื่อนหรือผลต่างระหว่างอุณหภูมิมาก จึงทำให้อัตราการอบแห้งมีค่ามากกว่าและส่งผลให้ใช้เวลาน้อยกว่า ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งที่สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิแตกต่างกัน จะพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้งเพิ่มมากขึ้น อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนในแต่ละอุณหภูมิต่างกันไม่มากนัก แต่ความร้อนที่ได้จากเครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรดที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้อัตราการอบแห้งในช่วงลดลงมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากตารางจะพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ได้จะน้อยกว่าเวลาที่สารอยู่ในเครื่องอบแห้ง ดังนั้นสารจึงมีเวลาเพียงพอที่ใช้ในการอบแห้ง อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงแล้วเวลาที่ใช้ในการอบแห้งอาจไม่เท่ากับเวลาที่ได้จากการคำนวณนี้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนมีการแปรผันตามขนาดของอนุภาคอย่างมาก ตามรูปที่ 4.11 รวมไปถึงอุณหภูมิของอากาศร้อนมีการเปลี่ยนแปลงลดลงไปตามระยะทางที่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นแรงขับเคลื่อน (driving force) จะไม่เท่ากันในทุกๆ ตำแหน่งภายในห้องอบแห้ง อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์อัตราส่วนเวลาที่สารไหลในเครื่องอบแห้งต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จะพบว่าที่ความดันบรรยากาศจะมีค่าเท่ากับ 4.1 ซึ่งค่านี้นับจนถึงมาตรฐานที่ส่งผลให้ได้ผงแห้งออกมาของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้ โดยเมื่อทำการดัดแปลงไปใช้ที่สภาวะสุญญากาศ จะพบว่าค่าที่ได้น้อยกว่าที่ความดันบรรยากาศ แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในห้องอบแห้ง



ขึ้น อัตราส่วนที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลง แสดงถึงจะได้ผงที่แห้ง ออกมาเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม หากต้องการเพิ่มอัตราส่วนที่อุณหภูมิในห้องอบแห้งต่ำ สามารถทำได้โดยการเพิ่มขนาดหรือปริมาตรของห้องอบแห้ง ซึ่งส่งผลทำให้สารไหลภายในห้องอบแห้งยาวนานขึ้นได้ ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มปริมาณผงแห้งได้ในสภาวะอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่ำด้วยเหตุผลข้างต้นได้

**ตารางที่ 4.3** เวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่สภาวะความดันปกติและที่สูญญากาศของผงแห้งที่มีมอลโต เดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30 ต่อ 70

ความดันที่ใช้ (atm)	อุณหภูมิที่ใช้ (°C)	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	ความร้อนที่ใส่เพิ่ม (kJ/hr)	อัตราการอบแห้งแบบคงที่ ( $R_c$ ) ( $g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (s)	อัตราส่วนเวลาที่สารไหลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง
1	120	820	0	20.5	1.31	4.1
0.54	40	634	212	3.79	6.45	2
0.54	50	639	254	4.87	5.16	2.5
0.54	60	645	334	6.61	3.93	3.3
0.54	70	649	334	7.13	3.70	3.5



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับขนาดของอนุภาคในกรณีของอนุภาคกลมโตดเดียวกับลมร้อน

#### 4.1.3 การคำนวณหาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผงแห้งที่ได้

การอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นการอบแห้งที่ใช้เวลานาน ไม่ยาวนานจึงไม่มีเวลามากพอให้ผงแห้งเกิดการจัดเรียงตัวอยู่ในรูปผลึก ส่งผลให้ผงแห้งที่ได้อยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous) ดังนั้นปรากฏการณ์ที่เกิดในอสัณฐานจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องศึกษา ซึ่งอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเป็นอุณหภูมิที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณผิวของวัสดุจากผิวที่มีสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) เป็นสถานะคล้ายยาง (rubber state) โดยจะมีความเหนียวติดเพิ่มขึ้น และจะเห็นได้ชัดเจนเมื่ออุณหภูมิผิวของผงแห้งที่ได้จากการอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว 20 องศาเซลเซียส ซึ่งการหาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสามารถหาได้โดยดูการเปลี่ยนแปลงของความร้อน เมื่อสารได้รับความร้อนจะเปลี่ยนพลังงานทำให้ปลายสายโซ่เกิดการเคลื่อนไหวจนทำให้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น สามารถตรวจวัดได้จากเครื่อง DSC อย่างไรก็ตามอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสามารถหาได้จาก [1]

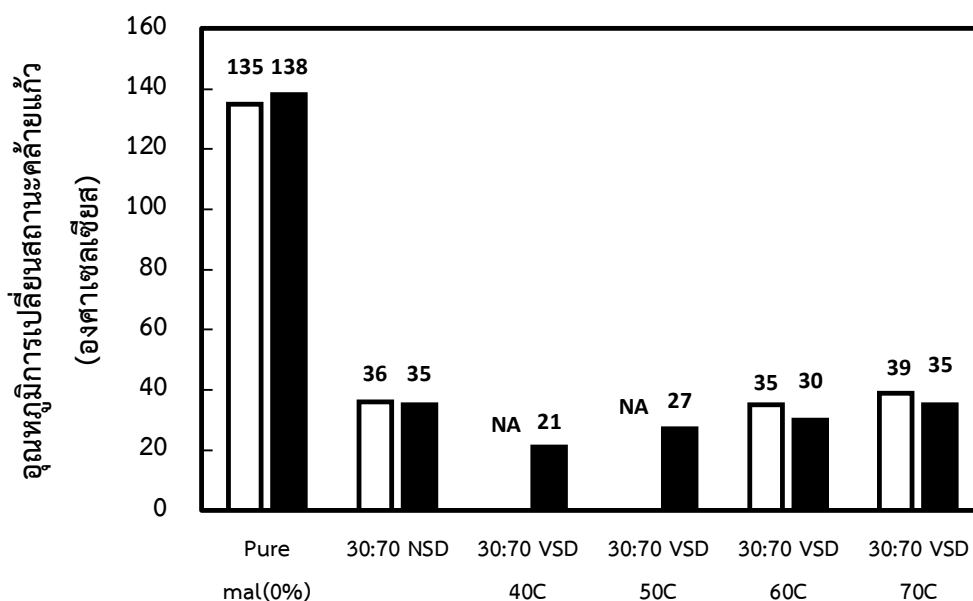
$$T_{g\text{mixture}} = \frac{w_1\Delta C_{p1}T_{g1} + w_2\Delta C_{p2}T_{g2} + w_3\Delta C_{p3}T_{g3}}{w_1\Delta C_{p1} + w_2\Delta C_{p2} + w_3\Delta C_{p3}} \quad (2.24)$$

โดยที่คุณสมบัติของสารที่ใช้ในการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 4.4 ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณมาเปรียบเทียบกันจะพบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.12 ดังนั้นสมการนี้จึงสามารถนำมาใช้หาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของสารผสมระหว่างมอลโตเดกซ์ตรินและน้ำตาลซูโครสได้เพื่อนำมาวิเคราะห์สภาวะที่เกิดขึ้นได้ จากสมการที่ 2.24 จะเห็นว่าค่า

อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของสารขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของผงแห้ง แต่จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง อย่างไรก็ตามอุณหภูมิในการอบแห้งจะส่งผลต่อความชื้นของผงแห้งที่ได้หลังจากการอบแห้ง

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและค่าความจุความร้อนของสารต่างๆ [38, 39]

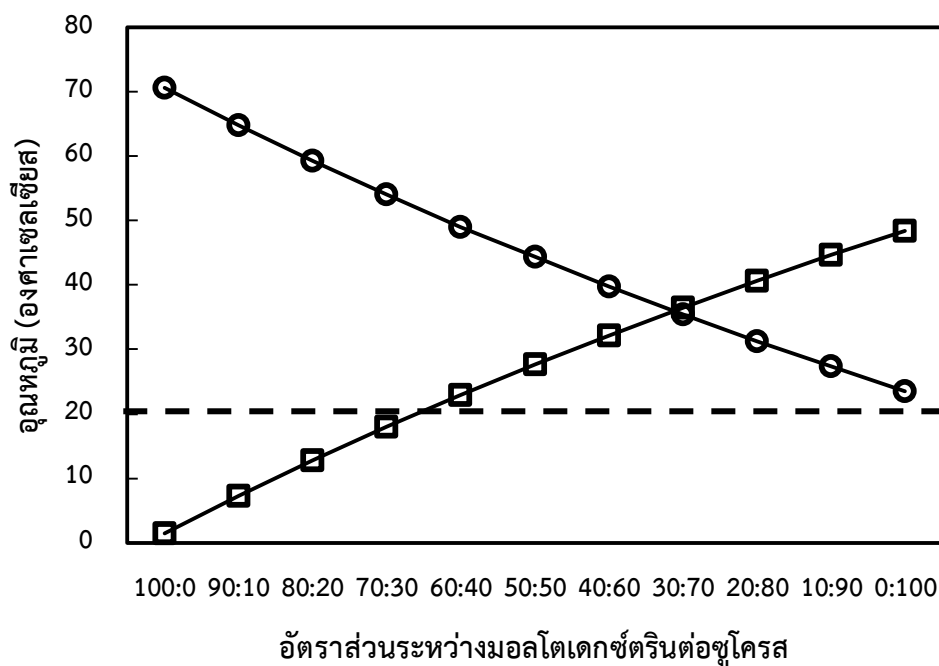
สาร	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (°C)	ค่าความจุความร้อน (J/g °C)
มอลโตเดกซ์ตริน DE11	138	0.444
น้ำตาลซูโครส	62	0.6
น้ำ DI	-137	1.94



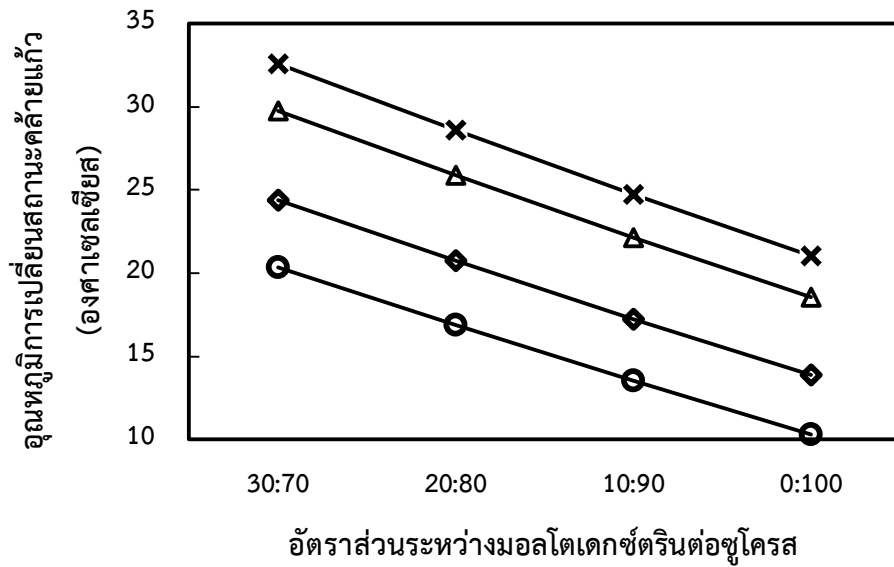
รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ได้ □ จากการทดลอง กับ ■ จากการคำนวณ

เมื่อทำการคำนวณหาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่แปรเปลี่ยนไปตามอัตราส่วนระหว่างแป้งมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสจะได้ดังรูปที่ 4.13 โดยเป็นการอบแห้งที่สภาวะความดันปกติ และอุณหภูมิหลังการอบแห้งที่ 72 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะลดลงตามปริมาณน้ำตาลซูโครสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำตาลซูโครสมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่าของแป้งมอลโตเดกซ์ตริน เมื่อผสมกันอุณหภูมิของผสมจึงลดลง จากการทบทวน

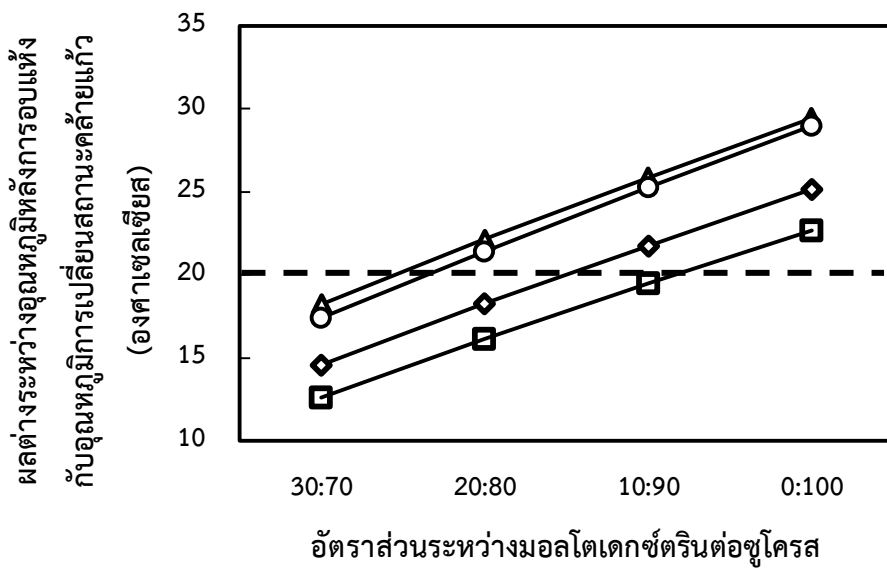
วรรณกรรมพบว่าที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิหลังการอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมากกว่า 10 องศาเซลเซียสจะเริ่มเกิดการเหนียวติดขึ้นจากการที่ผิวเปลี่ยนสภาพเป็นสถานะคล้ายยาง และเมื่อผลต่างมากกว่า 20 องศาเซลเซียสจะเห็นการเหนียวติดได้อย่างชัดเจน จะพบว่าจากรูปเมื่ออัตราส่วนในผงแห้งของมอลโตเดกซ์ตริน มีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 60 ที่ความดันบรรยากาศ จะเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนสภาพพื้นผิวขึ้นอย่างชัดเจน คุณสมบัติของผงแห้งที่ได้จะเปลี่ยนไป ส่วนที่การอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นดังรูปที่ 4.15 เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งมีผลต่อความชื้น ดังนั้นค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจึงไม่เท่ากันที่อัตราส่วนองค์ประกอบเหมือนกัน จากรูปพบว่าที่อัตราส่วนน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิห้องอบแห้งสูงขึ้น ผลต่างของอุณหภูมิหลังการอบแห้งต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะมากกว่า 20 องศาเซลเซียส ดังนั้นจากการทบทวนวรรณกรรมจะเกิดการเปลี่ยนสถานะผิวของอนุภาคขึ้น



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอนุภาคของแข็งต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ความดันบรรยากาศ ผงแห้งมีความชื้นร้อยละ 7 โดยที่ □ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ○ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิหลังอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอนุภาคของแข็งต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ความดันสูญญากาศ โดยที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วภายใต้อุณหภูมิในห้องอบเท่ากับ ○ 40°C ◇ 50°C △ 60°C × 70°C



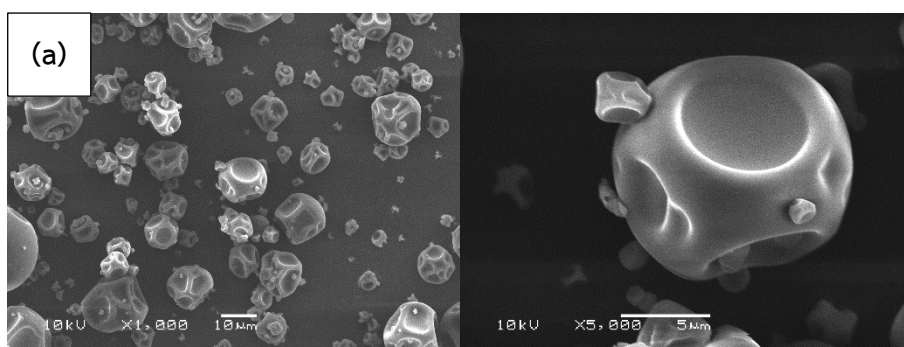
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอนุภาคของแข็งต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ความดันสูญญากาศ โดยที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิหลังอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ □ 40°C ◇ 50°C △ 60°C ○ 70°C

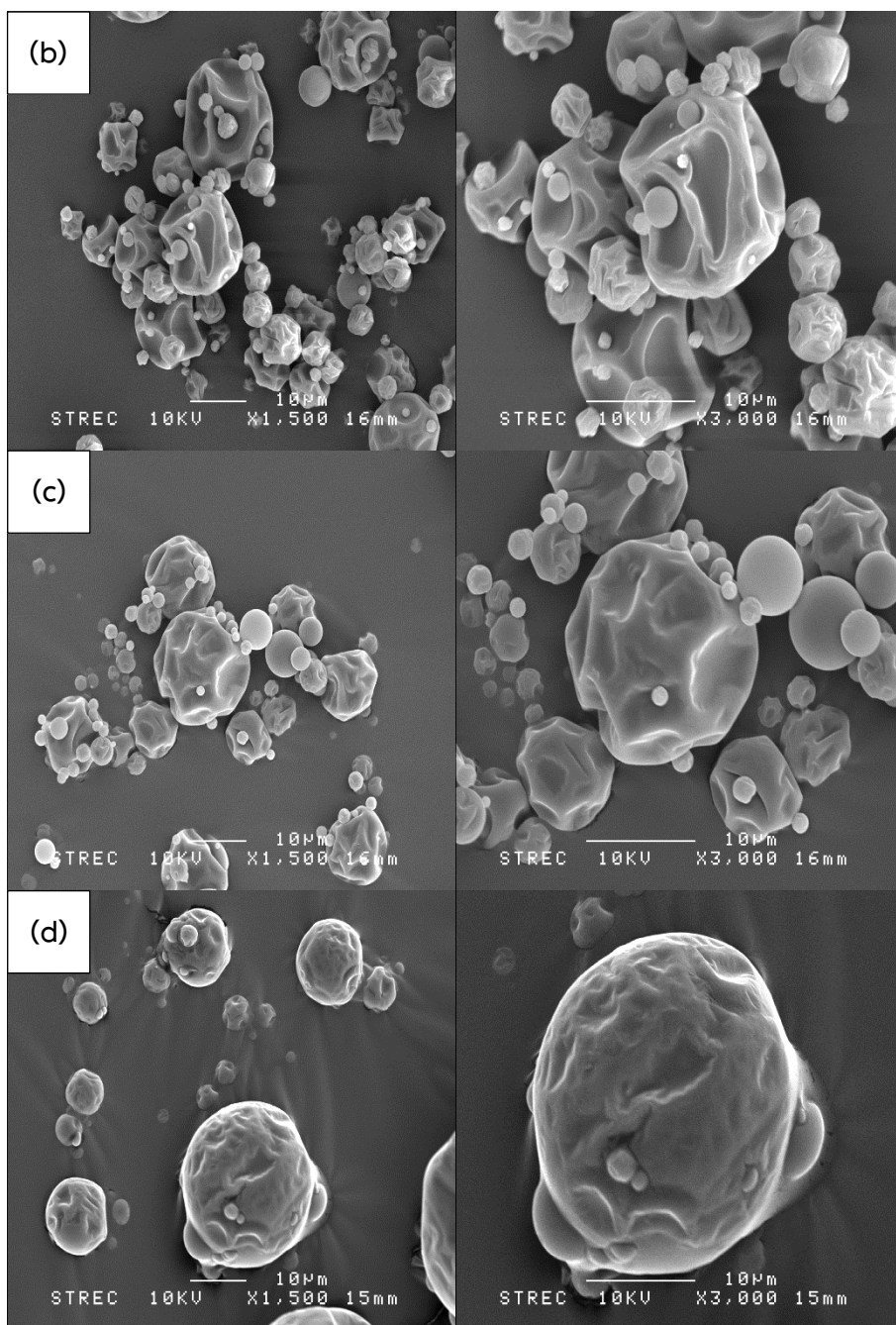
## 4.2 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครส

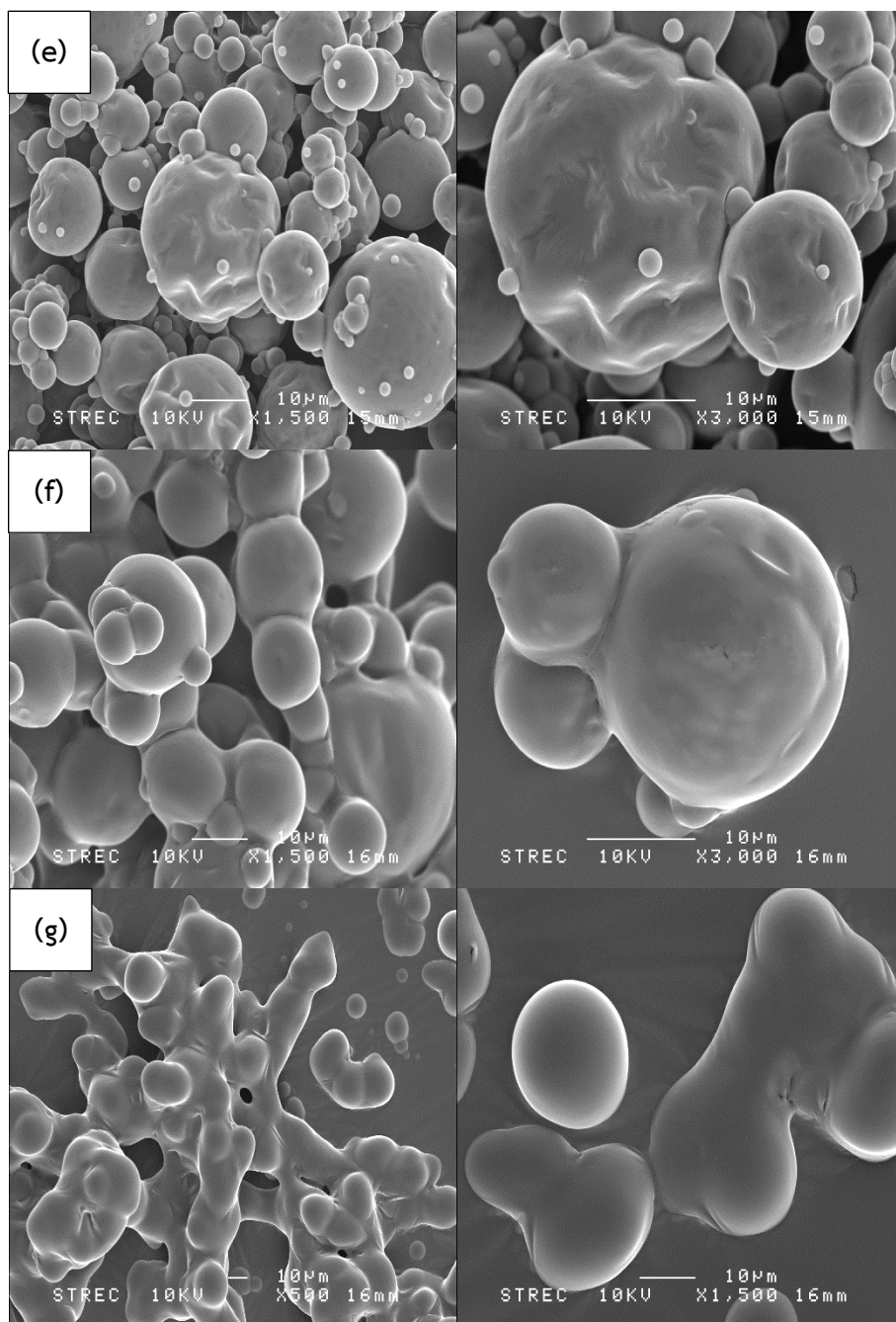
### 4.2.1 ผลต่อลักษณะรูปร่างพื้นฐานของผงแห้ง

จากรูปที่ 4.16 แสดงถึงรูปร่างพื้นฐานของผงแห้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความดันบรรยากาศ โดยมีอัตราส่วนระหว่างแป้งมอลโตเดกซ์ทรินและน้ำตาลซูโครสแตกต่างกัน พบว่าผิวผงแห้งในช่วงที่แป้งมอลโตเดกซ์ทรินมีปริมาณมากจะมีลักษณะรูปร่างทรงกลม แต่จะมีหลุมยุบลงไปหรือมีรอยเหี่ยวย่น ซึ่งเกิดจากของเหลวที่อยู่ภายในหรือน้ำได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอแต่ไม่สามารถระเหยออกมาได้ทัน ทำให้เกิดความดันไอขึ้น ซึ่งความดันไอที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดันที่ทำให้ผนังบางส่วนเกิดการแตกออกเพื่อให้สารระเหยออกไปได้และเมื่อไอออกไป ผนังจึงเกิดการยุบตัวหรือหดตัวลง ทำให้เกิดรอยเหี่ยวย่นขึ้น และจากรูปจะเห็นว่าเกิดการเกาะติดกันระหว่างอนุภาคเพียงเล็กน้อย เนื่องจากแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ แรงแวนเดอร์วาลส์และแรงเกาะติดกันจากน้ำ (Liquid bridge หรือ Capillary bridge)

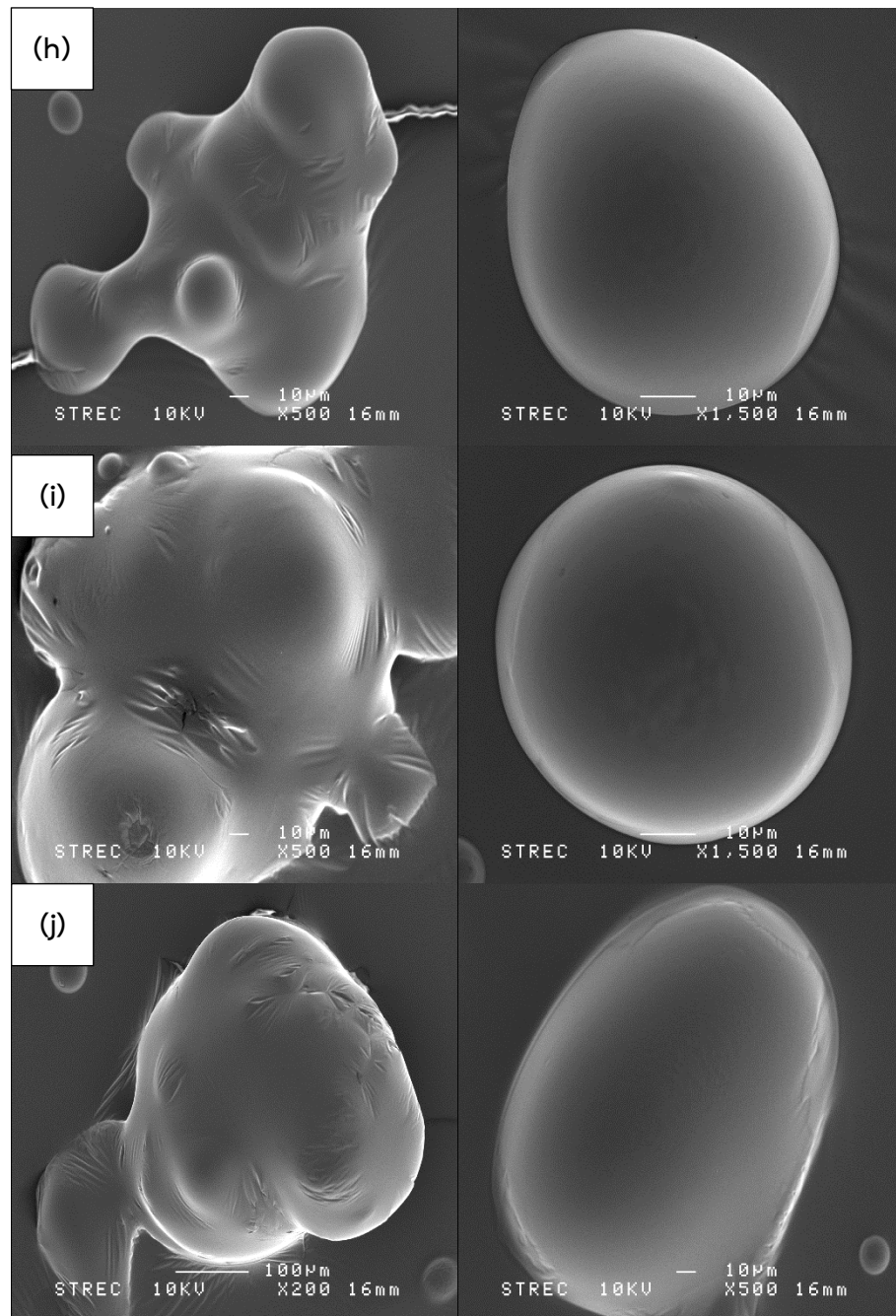
อย่างไรก็ตามจากรูป เมื่อปริมาณน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจะพบว่าลักษณะรูปร่างพื้นฐานของอนุภาคผงแห้งที่ได้จะเปลี่ยนไป โดยจะมีลักษณะกลมมากยิ่งขึ้น ปริมาตรรอยเหี่ยวย่นลดลง รวมถึงอนุภาคเกาะติดกันมากขึ้น และขนาดของอนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นจากการเกาะรวมตัวกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณน้ำตาลทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผงแห้งต่ำลง ส่งผลให้เมื่อผลต่างของอุณหภูมิหลังอบแห้งของผงแห้งต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว 20 องศาเซลเซียส ผิวจะเกิดสถานะคล้ายยางได้อย่างเด่นชัด ซึ่งจากการคำนวณในหัวข้อ 4.1.3 จะพบว่าที่อัตราส่วนของมอลโตเดกซ์ทริน น้อยกว่าร้อยละ 40 ที่ความดันบรรยากาศจะเห็นได้อย่างเด่นชัด ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะรูปร่างพื้นฐานของอนุภาคที่เกิดขึ้น











รูปที่ 4.16 ลักษณะรูปร่างสัณฐานของผนังที่ผ่านการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดันบรรยากาศ ที่ลมร้อนมีอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ป้อนสารด้วยอัตรา 3 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนระหว่างแป้งมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครส (a) 100:0 (b) 90:10 (c) 80:20 (d) 70:30 (e) 60:40 (f) 50:50 (g) 40:60 (h) 30:70 (i) 20:80 (j) 10:90 ที่ภาพซ้ายขวากำลังขยายต่างกัน

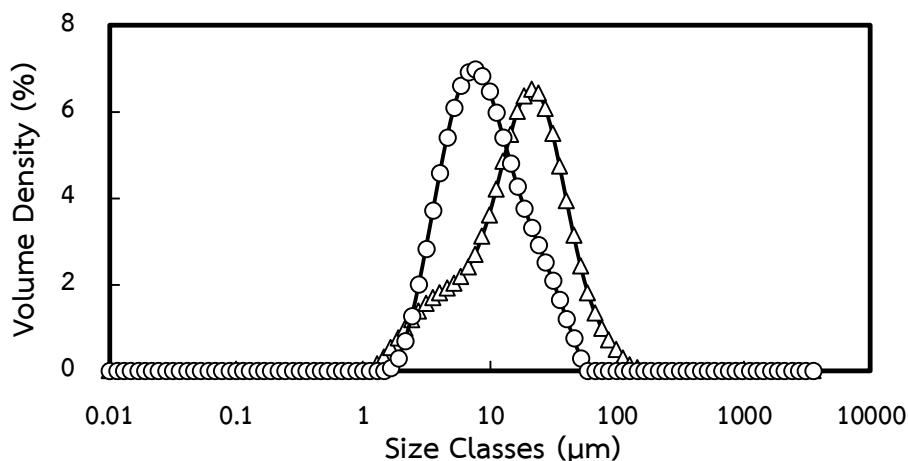
#### 4.2.2 ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงแห้ง

จากรูปที่ 4.17 แสดงถึงขนาดและการกระจายตัวของผงแห้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย ที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้อุณหภูมิร้อนที่ 120 องศาเซลเซียส พบว่าอนุภาคที่ได้อยู่ในระดับไมโครเมตรและการกระจายตัวของอนุภาคเป็นแบบระฆังคว่ำ (log normal distribution) จากรูปเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของแป้งมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครสมีค่าเพิ่มขึ้น จะพบว่าอนุภาคผงแห้งมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากขนาดหยดสารละลายจะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเมื่อมีปริมาณแป้งมอลโตเดกซ์ทรินเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของสารละลายลดลงและความหนืดเพิ่มขึ้น ในขณะที่แรงตึงผิวเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ส่งผลให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นไปตามสมการ (4.15)

ขนาดหยดของสารละลาย ( $D_{3,2}$ ) ในหน่วยไมโครเมตรหาได้จาก [40]

$$D_{3,2} = \frac{535 \times 10^3 \sqrt{\sigma}}{v_{REL} \sqrt{\rho}} + 597 \left( \frac{\mu}{\sqrt{\sigma \rho}} \right)^{0.45} \times \left( \frac{1000 \dot{V}_{FL}}{\dot{V}_{AIR}} \right) \quad (4.15)$$

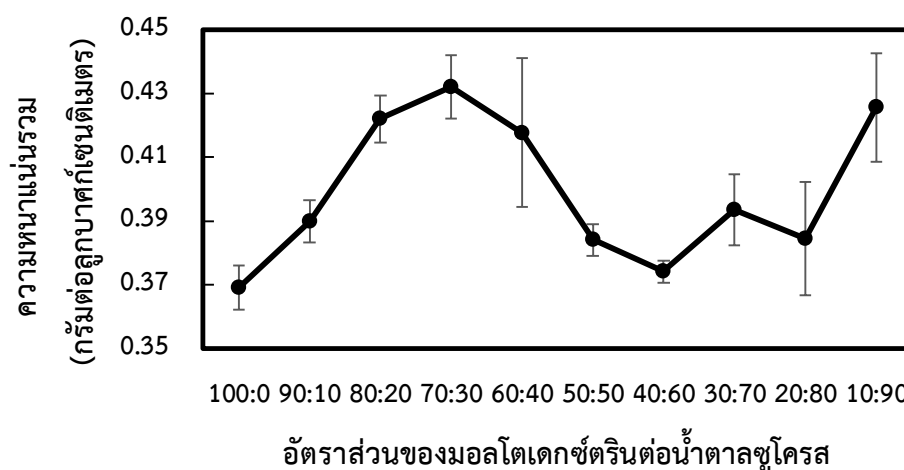
- โดยที่  $\sigma$  คือ แรงตึงผิวของของไหล (N/m)  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\mu$  คือ ความหนืดของของไหล (Pa·s)  
 $v_{REL}$  คือ ความเร็วสัมพัทธ์หรือความเร็วอากาศขาออกจากหัวฉีด (m/s)  
 $\dot{V}_{FL}$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหล (สารละลาย) ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $\dot{V}_{AIR}$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )



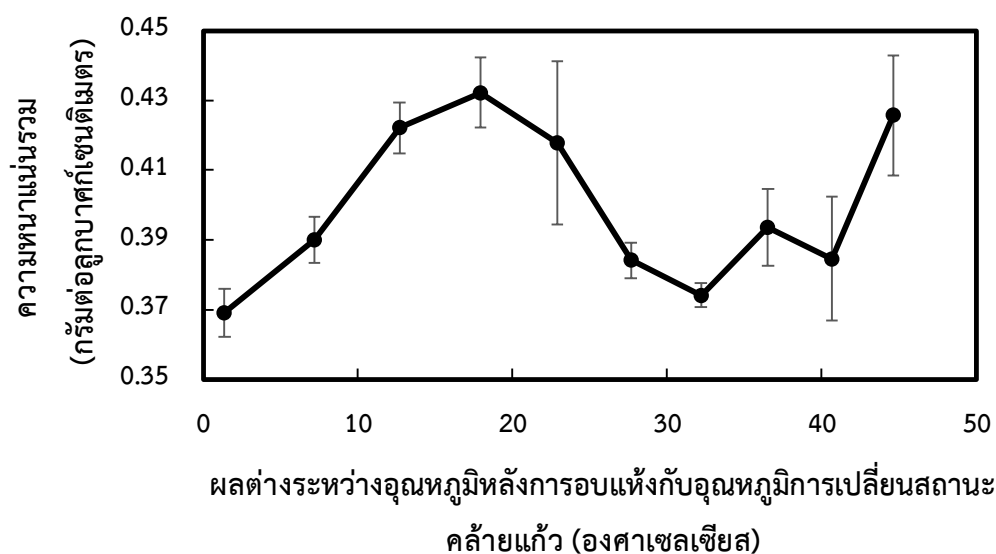
รูปที่ 4.17 ผลของอัตราส่วนมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครสที่  $\triangle$  30:70  $\circ$  20:80 ต่อขนาดและการกระจายตัวของผงแห้งที่อุณหภูมิร้อนเข้า 120 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ

#### 4.2.3 ผลต่อความหนาแน่นของผงแห้ง

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนของแป้งมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสในผงแห้งแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งพบว่าในตอนแรกผงแห้งจะมีความหนาแน่นอยู่ที่ 0.37 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเป็นความหนาแน่นของมอลโตเดกซ์ตรินบริสุทธิ์ แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณน้ำตาลซูโครสลงไปจะพบว่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำตาลซูโครสมีความหนาแน่นสูงกว่า (1.587 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) จึงทำให้ความหนาแน่นรวมมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอัตราส่วนที่ 60:40 ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเพราะอนุภาคเกิดการเกาะตัวกันจากการที่ผิวเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยาง ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะรูปร่างอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SEM จึงทำให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นและทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นที่วัดได้ลดลง โดยการหลอมติดที่เกิดเนื่องจากการที่ผิวของอนุภาคมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเกิน 20 องศาเซลเซียสแสดงในรูปที่ 4.19 และจะเริ่มมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนเป็น 30:70 ซึ่งน่าจะเป็นช่วงที่เทอมความหนาแน่นที่เพิ่มจากความหนาแน่นของซูโครสเอาชนะเทอมความหนาแน่นที่ลดลงจากการเกาะติดได้



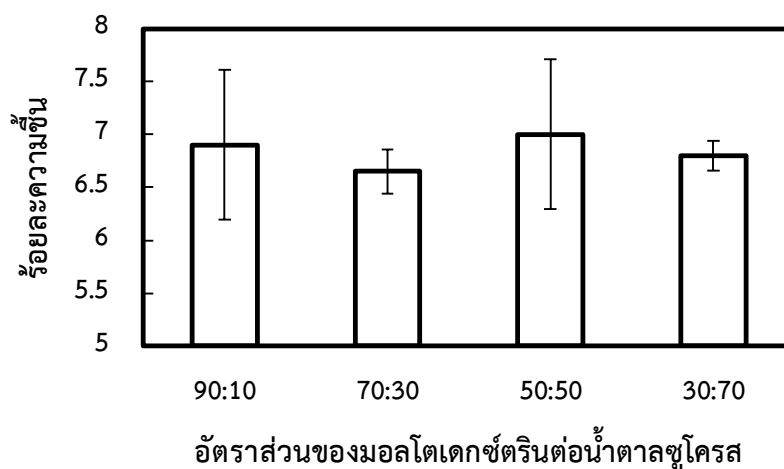
รูปที่ 4.18 ผลของอัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสต่อความหนาแน่นรวมของผงแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเข้า 120 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.19 ผลของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิหลังการอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่อความหนาแน่นรวมของผงแห้ง อุณหภูมิลมร้อนเข้า 120 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ

#### 4.2.4 ผลต่อปริมาณความชื้นที่คงเหลือในผง

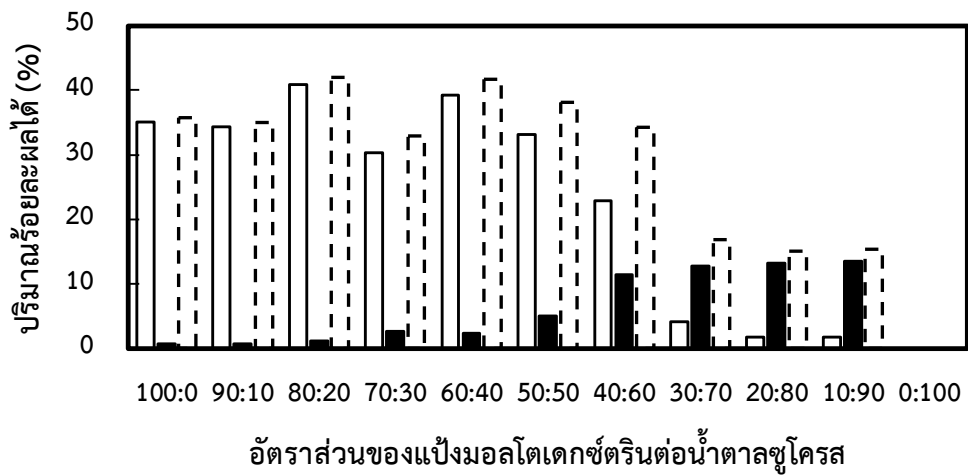
จากรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของผงแห้งที่ได้ต่ออัตราส่วนของแป้งมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครสพบว่าปริมาณน้ำตาลซูโครสไม่มีผลเป็นนัยยะสำคัญต่อความชื้นที่ได้หลังการอบแห้ง โดยมีค่าความชื้นประมาณร้อยละ 7 สำหรับทุกอัตราส่วน เนื่องจากปริมาณความชื้นที่ได้หลังการอบแห้งเป็นผลมาจากการถ่ายเทพลังงานและมวลสาร ซึ่งเทอมพลังงานส่วนใหญ่เป็นผลจากอุณหภูมิอากาศและสารละลาย ส่วนเทอมของมวลสารขึ้นกับปริมาณความชื้นเริ่มต้น ปริมาณลมร้อนและอัตราการป้อนสาร ดังนั้นในเทอมอัตราส่วนจึงไม่มีผลต่อปริมาณความชื้นมากนัก



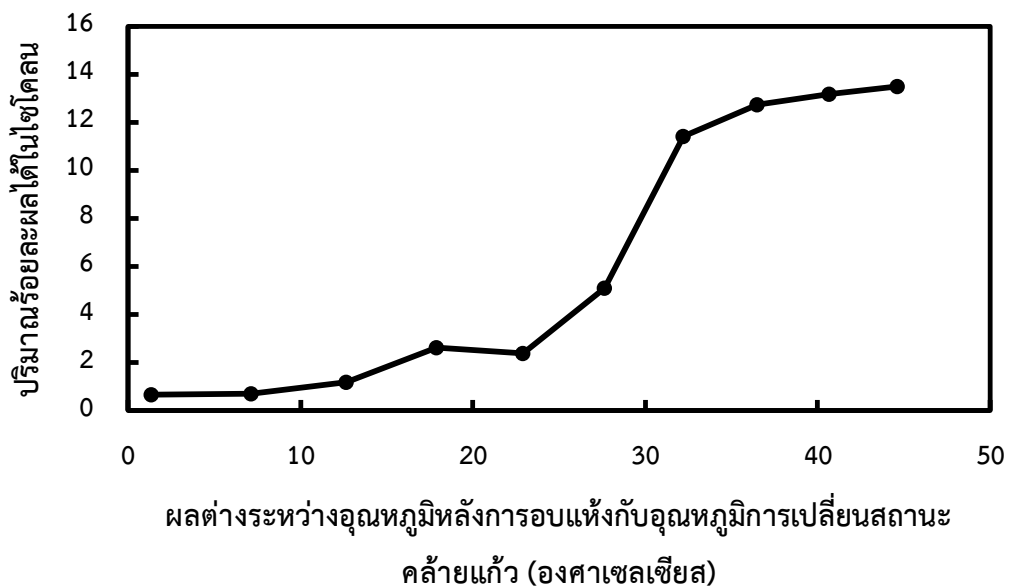
รูปที่ 4.20 ผลของอัตราส่วนมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครสต่อร้อยละความชื้นของผงแห้งที่ลมร้อนเข้าอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ

#### 4.2.5 ผลต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผงแห้ง

การเก็บผงแห้งที่ได้หลังจากการอบแห้งสามารถเก็บได้จากสองส่วนคือ บริเวณไซโคลน (cyclone) และที่เก็บสาร (collector) ซึ่งผงที่เก็บได้บริเวณที่เก็บสารจะมีการไหลที่ตึกกว่าหรือเกิดการเกาะติดที่น้อยกว่า เนื่องจากสามารถไหลผ่านและไม่ติดบริเวณไซโคลน จากรูปที่ 4.21 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของน้ำตาลซูโครส ปริมาณผงแห้งที่ติดอยู่บนไซโคลนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่ได้ผงออกมาเลยทั้งในไซโคลนและที่เก็บสาร เนื่องจากสารเกิดการเหนียวติดที่เครื่องไม่สามารถเก็บออกมาได้ และจะพบว่าที่อัตราส่วนแป้งมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครสน้อยกว่า 30 ต่อ 70 ปริมาณร้อยละผลได้ของผงแห้งทั้งหมดที่ได้จะลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเหนียวติดที่เกิดขึ้นมาก ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการใช้การอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะสุญญากาศมาเพื่อปรับปรุงร้อยละผลได้ให้ดีขึ้น จากรูปที่ 4.22 ปริมาณผงแห้งที่เกาะติดบริเวณไซโคลนบ่งบอกถึงความเหนียวติดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผงแห้งเกิดการเกาะติดและไม่ตกลงสู่บริเวณที่เก็บสาร ซึ่งจะพบว่ามีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว โดยเมื่อผลต่างระหว่างอุณหภูมิหลังการอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณผงที่เกาะติดบริเวณไซโคลนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิต่างกันมากกว่า 23 องศาเซลเซียส จะเริ่มเห็นปริมาณการเกาะติดที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆอย่างชัดเจน เป็นไปตามทฤษฎีที่ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเมื่อความต่างมากกว่า 20 องศาเซลเซียส โดยการเกาะติดนี้เกิดจากการที่ผิวเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยาง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสัดส่วนสารที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วน้อย (น้ำตาลซูโครส) ส่งผลอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง จึงทำให้ปริมาณร้อยละผลได้บริเวณไซโคลนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกัน ปริมาณร้อยละผลได้ทั้งหมดก็ลดลงด้วยเช่นกัน เนื่องจากสารเกิดการเกาะติดอยู่ภายในห้องอบแห้ง



รูปที่ 4.21 ผลของอัตราส่วนแป้งมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผงแห้งที่อุณหภูมิร้อนชาเข้า 120 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ โดยเก็บบริเวณที่เก็บสาร (เส้นทึบ) ไชโคลน (เส้นประ) รวมทั้งหมด (เส้นประดำ)

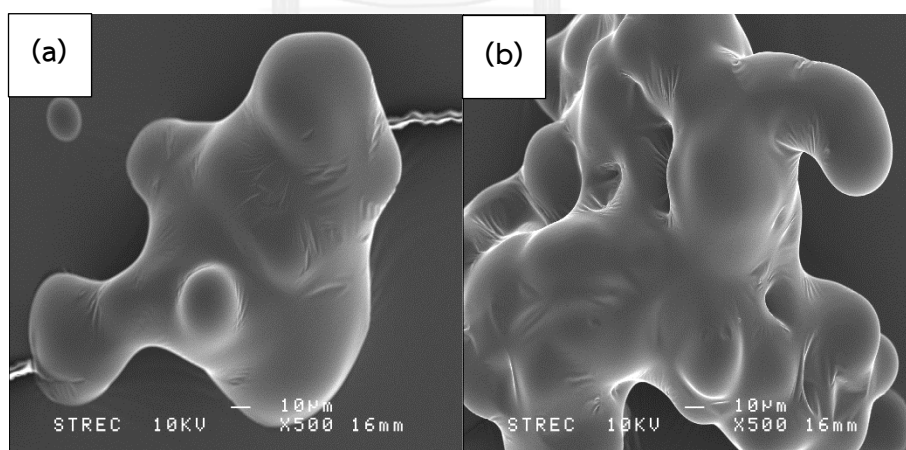


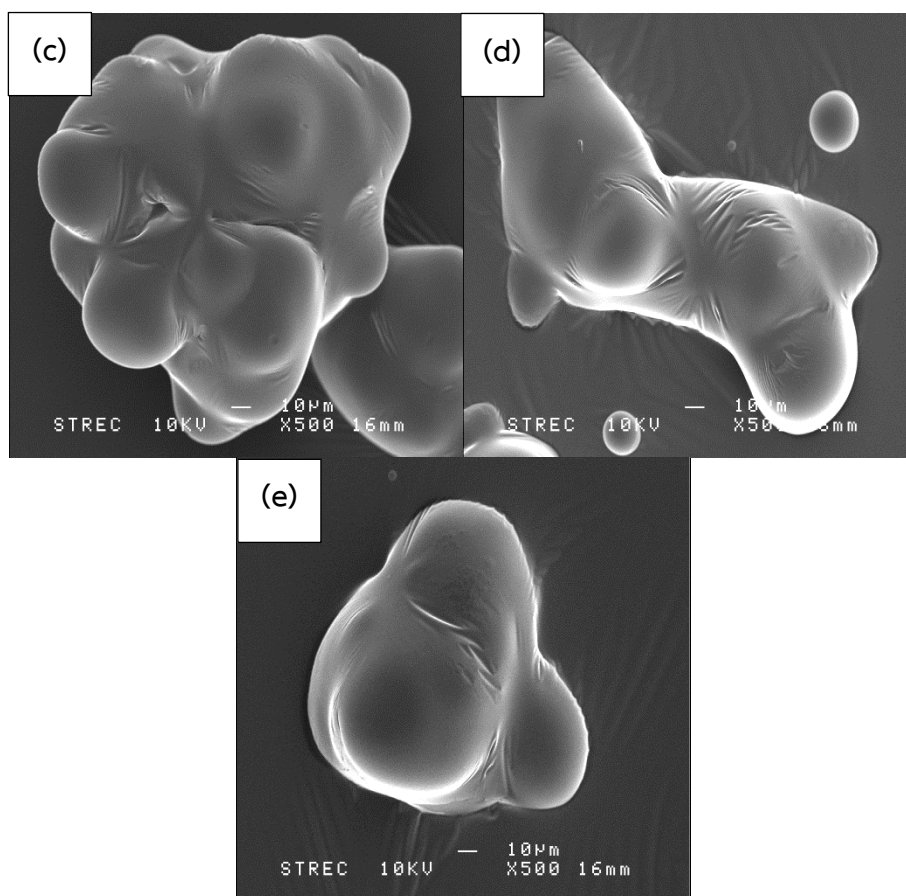
รูปที่ 4.22 ผลของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิหลังการอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่อปริมาณร้อยละผลได้ในไซโคลนของการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ

### 4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งที่สภาวะสูญญากาศและความดันที่ใช้ในระบบ

#### 4.3.1 ผลต่อลักษณะรูปร่างพื้นฐานของผงแห้ง

ในการเปรียบเทียบผลความดันที่ความดันบรรยากาศและที่ 0.54 บรรยากาศของผงแห้งที่อัตราส่วนระหว่างแป้งมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30:70 จากรูปที่ 4.23 จะพบว่าที่ความดันระบบต่างกัน จะพบว่าผิวอนุภาคที่ได้ไม่แตกต่างกัน โดยจะมีลักษณะเรียบ ไม่มีรอยย่นและผงเกิดการเกาะติดกัน ซึ่งเกิดมาจากการเปลี่ยนสถานะคล้ายยางของการที่ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำลงจากการเติมน้ำตาลซูโครสลงไป โดยโมเลกุลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะเกิดการเคลื่อนไหวได้ง่ายและเกิดการรวมตัวกันขึ้น อย่างไรก็ตามภายในเม็ดอนุภาคของการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความดันบรรยากาศจะมีรูพรุนเนื่องจากเกิดแรงดันจากการระเหยของน้ำจึงทำให้ภายในกลวงแต่การอบแห้งภายใต้ความดันสูญญากาศจะเกิดการระเหยน้ำออกอย่างช้าภายในอนุภาค ทำให้เกิดแรงดันน้อย อนุภาคที่ได้จึงกลวงน้อยกว่าหรือตัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งในห้องอบต่างกันที่สภาวะความดันสูญญากาศพบว่าลักษณะของผิวที่ได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ เนื่องจากน้ำในอนุภาคได้รับความร้อนจากเครื่องให้ความร้อน แต่ยังคงมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเดือด ดังนั้นน้ำจึงเกิดเพียงการระเหยแต่ไม่เกิดการกลายเป็นไอ ทำให้ไม่เกิดแรงดันที่ทำให้ผิวอนุภาคเกิดการแตกออกและหด เกิดรอยเหี่ยวย่นขึ้น รวมถึงการเปลี่ยนสถานะของผิวเป็นสถานะคล้ายยาง จึงเกิดผิวลักษณะเช่นนี้ขึ้น





รูปที่ 4.23 ลักษณะรูปร่างสัณฐานของผงแห้งที่ผ่านการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยมีอัตราส่วนระหว่าง แป้งมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30:70 ป้อนสารด้วยอัตรา 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันและอุณหภูมิที่ใช้ (a) 1 atm, 120 °C (b) 0.54 atm, 40 °C (c) 0.54 atm, 50 °C (d) 0.54 atm, 60 °C (e) 0.54 atm, 70 °C

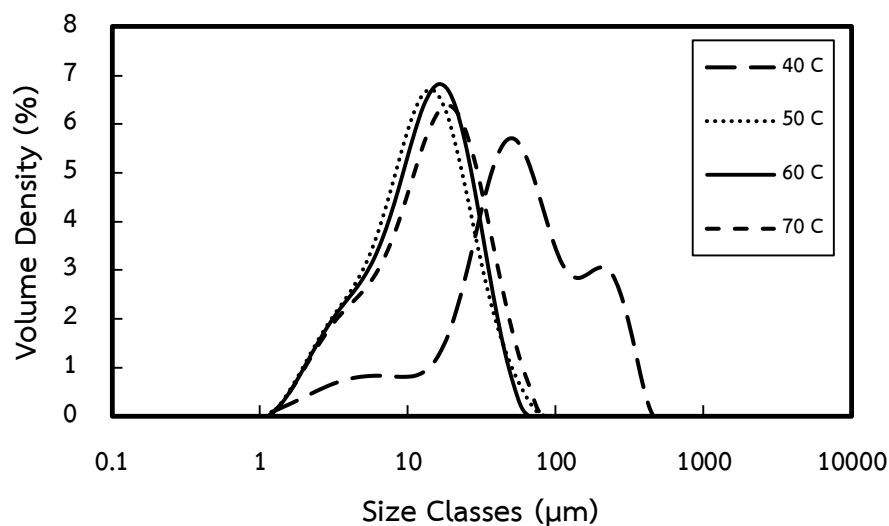
#### 4.3.2 ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงแห้ง

จากรูปที่ 4.24 แสดงขนาดและการกระจายตัวของผงแห้งที่ถูกอบแห้งภายใต้สภาวะสูญญากาศ (0.54 บรรยากาศ) โดยใช้อุณหภูมิห้องอบแห้งที่ 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนแป้งมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30:70 พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในห้องอบเพิ่มขึ้น (ที่ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส) ขนาดของอนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งเพิ่มขึ้นทำให้ความดันของน้ำที่ระเหยเพิ่มขึ้น จึงดันผนังของอนุภาคให้มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ไม่ทำให้เกิดการแตกออกเพราะแรงดันมีไม่มากเพียงพอ การกระจายตัวของอนุภาคที่ได้ใกล้เคียงกัน เป็นการกระจายตัวแบบประฆังคว่ำ (log normal distribution) เบ้เล็กน้อย อย่างไรก็ตามขนาดและการกระจายตัวเมื่อใช้อุณหภูมิที่ห้องอบ 40 องศาเซลเซียสจะแตกต่างจากที่อุณหภูมิอื่นอย่างมาก

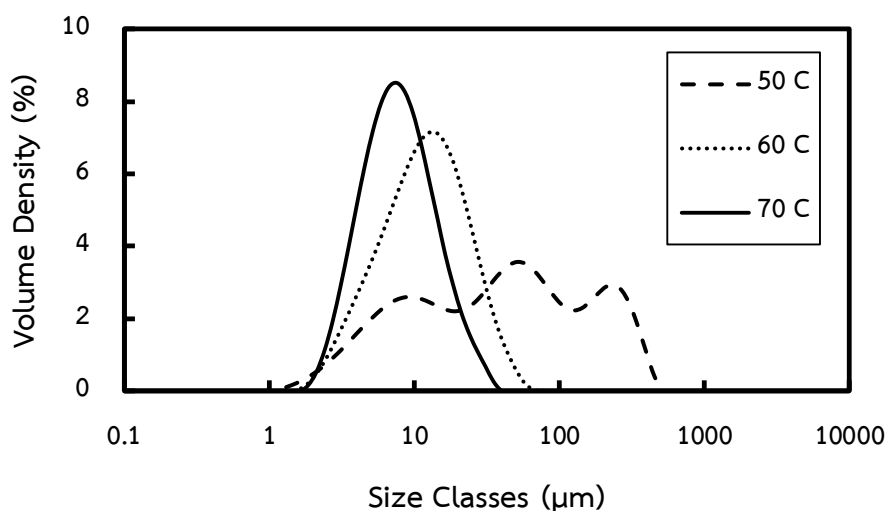


อนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่กว่าและการกระจายตัวของอนุภาคไม่เป็นทรงระฆังคว่ำ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าผงแห้งที่ได้เกิดการเกาะติดกันสูงจึงทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและการกระจายตัวนั้นกระจายเป็นช่วงกว้าง ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่ผิวเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยางเนื่องจากใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว แต่จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิห้องอบ 40 องศาเซลเซียส ค่าของผลต่างระหว่างอุณหภูมิหลังการอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่างกันน้อยกว่า 20 องศาเซลเซียส แสดงว่าผลที่ได้ไม่สอดคล้องกัน เหมือนการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ

รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคกับอุณหภูมิที่ใช้อบแห้ง โดยม้อัตรส่วนระหว่างแป้งมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 20:80 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อนุภาคกลับมีขนาดเล็กลง ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเกิดการเกาะติดกันสูง จึงทำให้ขนาดแตกต่างจากอุณหภูมิอื่นอย่างมาก และจากการที่การกระจายตัวเป็นช่วงกว้างอาจเนื่องมาจากอนุภาคของแข็งได้รับอุณหภูมิไม่เท่ากัน ซึ่งน่าจะเป็นแบบเดียวกับที่อัตราส่วน 30:70 อุณหภูมิในห้องอบที่ 40 องศาเซลเซียส ส่วนที่ 60 องศาเซลเซียสมีการเกาะติดกันสูงกว่าที่ 70 องศาเซลเซียส จึงทำให้มีขนาดใหญ่กว่าแต่การกระจายตัวยังคงเป็นรูประฆังคว่ำ (log normal distribution) เหมือนกัน ซึ่งจากทั้งสามการทดลองที่อุณหภูมิต่างกัน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับในรูปที่ 4.15 จะพบว่าผลที่ได้ไม่สอดคล้องกัน

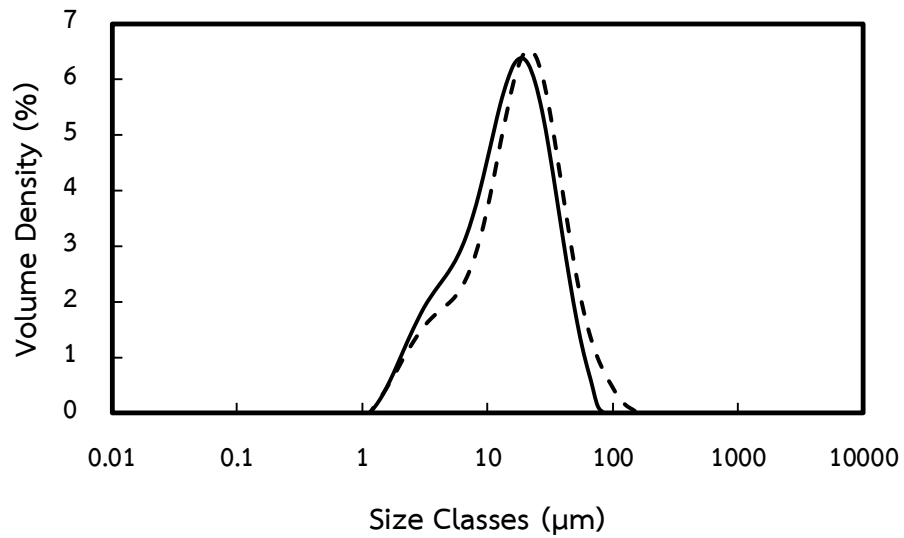


รูปที่ 4.24 ผลของอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่อขนาดและการกระจายตัวของผงแห้งที่ความดัน 0.54 บรรยากาศ โดยมีอัตราส่วนมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครสที่ 30:70

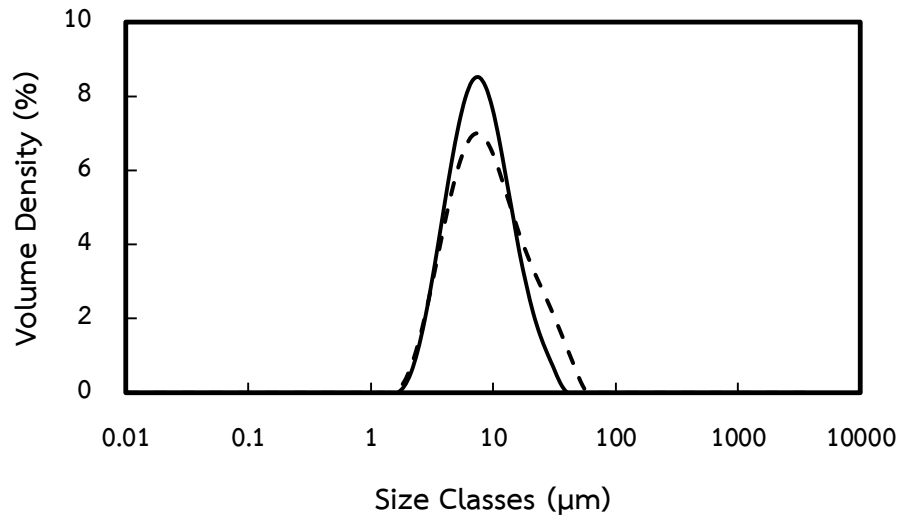


รูปที่ 4.25 ผลของอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่อขนาดและการกระจายตัวของผงแห้งที่ความดัน 0.54 บรรยากาศ โดยมีอัตราส่วนโมลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสที่ 20:80 (ที่ 40°C = NA)

จากรูปที่ 4.26 และ 4.27 แสดงถึงความสัมพันธ์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคที่ได้จากการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศและความดันสุญญากาศของผงแห้งที่มีอัตราส่วนแป้งมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสที่ 30:70 และ 20:80 ตามลำดับพบว่าผงแห้งที่ได้จากการอบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศจะมีขนาดเล็กกว่าเล็กน้อย ทั้งๆที่การลดความดันน่าจะทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากความดันในระบบมีน้อยกว่าจึงทำให้อัตราการไหลของอากาศเชิงปริมาตรน้อย ซึ่งจากสมการที่ (4.15) จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศน้อยลงจะส่งผลให้ขนาดของหยดของสารละลายใหญ่ขึ้นอนุภาคขยายตัวได้มากกว่า อย่างไรก็ตามผลของการเกาะติดของอนุภาคจากการที่ผิวเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยางที่ความดันสุญญากาศมีน้อยกว่าทำให้มีขนาดเล็กกว่าที่ความดันบรรยากาศ ส่วนการกระจายตัวของผงแห้งที่ได้เมื่อเปรียบเทียบที่ความดันบรรยากาศและที่สุญญากาศพบว่าได้ค่าใกล้เคียงกันและเป็นการกระจายตัวแบบระฆังคว่ำ ซึ่งจะได้ว่าความดันไม่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาค



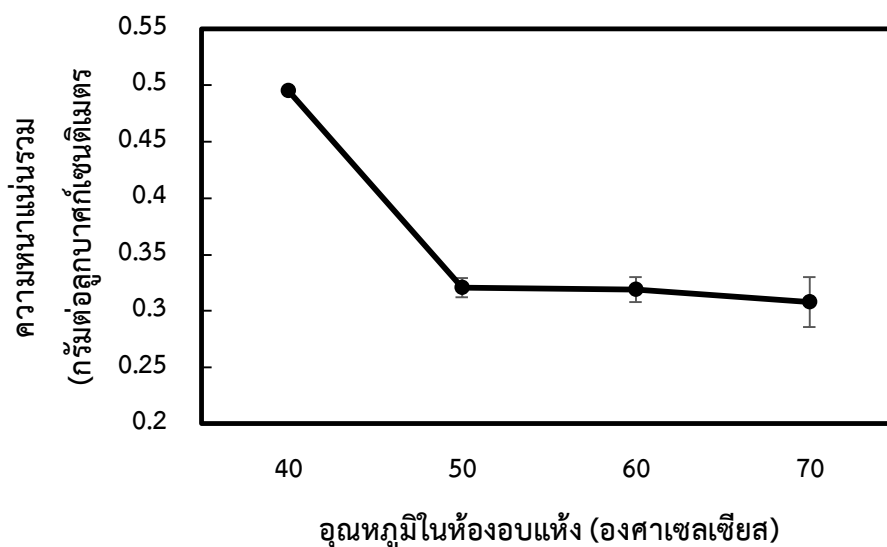
รูปที่ 4.26 ผลของความดันในห้องอบแห้งต่อขนาดและการกระจายตัวของผงแห้งที่อัตราส่วนมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30:70 ภายใต้ความดันบรรยากาศ (เส้นประ) และความดันสุญญากาศ (เส้นทึบ)



รูปที่ 4.27 ผลของความดันในห้องอบแห้งต่อขนาดและการกระจายตัวของผงแห้งที่อัตราส่วนมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 20:80 ภายใต้ความดันบรรยากาศ (เส้นประ) และความดันสุญญากาศ (เส้นทึบ)

### 4.3.3 ผลต่อความหนาแน่นของผงแห้ง

จากรูปที่ 4.28 แสดงความหนาแน่นรวมของผงแห้งที่ถูกอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิในห้องอบต่างๆกัน พบว่าค่าความหนาแน่นรวมที่ได้ในแต่ละอุณหภูมิไม่ค่อยต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากความหนาแน่นรวมขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของแป้งมอลโตเดกซ์ตรินและน้ำตาลซูโครสเป็นหลัก อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิห้องอบ 40 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นรวมกลับสูงกว่าที่อุณหภูมิอื่นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะผิวของผงแห้งที่ได้เกิดการเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยาง ทำให้ผิวมีการเคลื่อนที่มารวมตัวกัน ปริมาณรูพรุนและอากาศในรูพรุนน้อยลงมาก จึงทำให้ค่าความหนาแน่นที่ได้มีความแตกต่างกันมาก

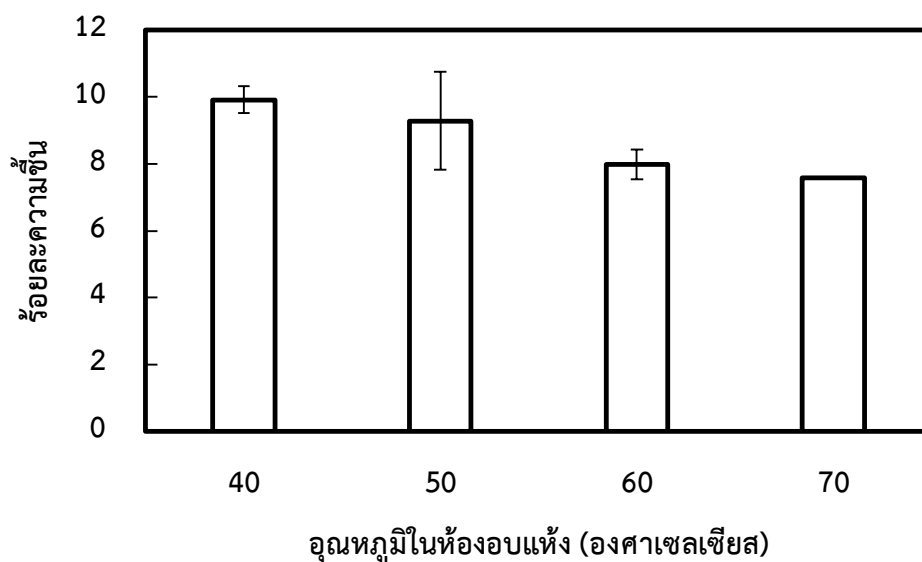


รูปที่ 4.28 ผลของอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่อความหนาแน่นรวมของผงแห้งอัตราส่วนแป้งมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30:70 ที่ถูกอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ

### 4.3.4 ผลต่อปริมาณความชื้นที่คงเหลือในผง

จากรูปที่ 4.29 แสดงถึงปริมาณความชื้นในรูปของร้อยละในผงแห้งที่ได้จากการอบแห้งที่ความดันสุญญากาศที่อุณหภูมิต่างๆ โดยจะได้ความชื้นร้อยละ 10 9 8 และ 7.5 ที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความชื้นลดลงเนื่องจากน้ำในอนุภาคได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นและสามารถระเหยออกจากอนุภาคได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งที่สภาวะความดันปกติที่ลมร้อนมีอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ผงแห้งที่ได้จะมีความชื้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 7 เหตุที่ความชื้นที่ความดันปกติต่ำกว่าเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิลมร้อนกับอุณหภูมิต่อของแข็งต่างกันมาก จึงทำให้มีแรงขับเคลื่อน (driving force) ในการ

ระเหยมากกว่าผลของการลดความดันของน้ำลง ดังนั้นการอบแห้งที่สภาวะสูญญากาศจึงมีความขึ้นมากกว่าการอบแห้งที่ความดันปกติ



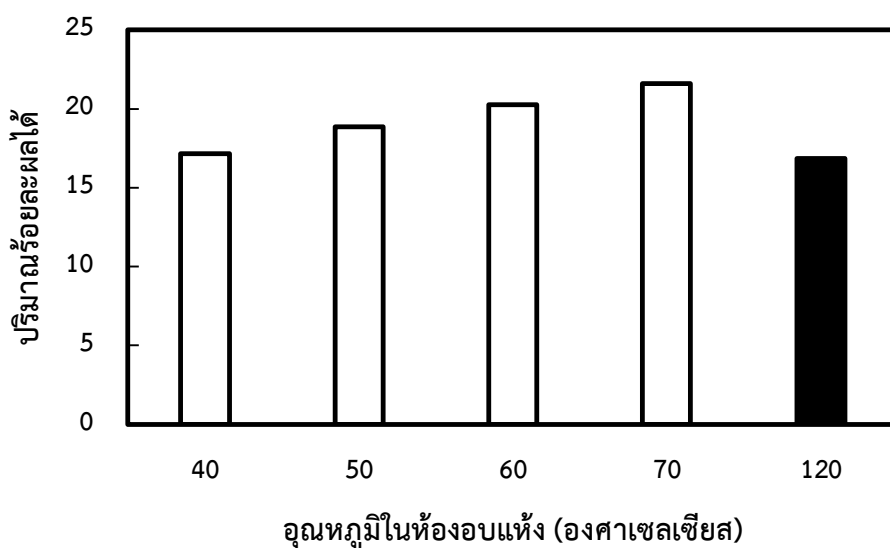
รูปที่ 4.29 ผลของอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่อร้อยละความชื้นของผงแห้งจากการอบแห้งภายใต้ความดันสูญญากาศ (0.54 บรรยากาศ) โดยมีอัตราส่วนมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30:70

#### 4.3.5 ผลต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผงแห้ง

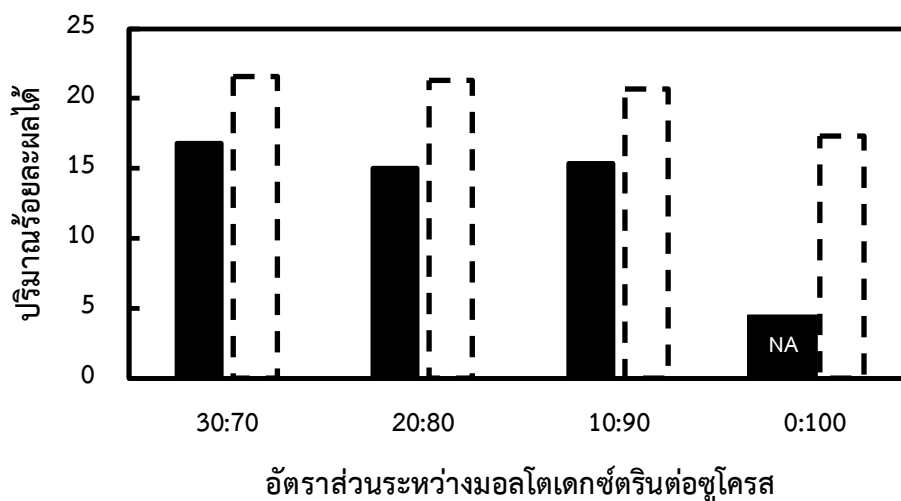
ในรูปที่ 4.30 เป็นการอบแห้งที่สภาวะสูญญากาศ (ความดัน 0.54 บรรยากาศ) ที่ของสารละลายผสมโดยมีอัตราส่วนระหว่างมอลโตเดกซ์ทรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30:70 อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียสพบว่าได้ร้อยละผลได้ เท่ากับ 17.15 18.85 20.28 และ 21.6 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าร้อยละผลได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิในห้องอบแห้ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเหนียวติดที่เกิดขึ้นจากการที่ผิวของอนุภาคเกิดการเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยาง ซึ่งเกิดการผลต่างของอุณหภูมิผงหลังการอบแห้งต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิในห้องอบแห้งจะทำให้อุณหภูมิผงแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมินี้จะมีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วด้วย เนื่องจากอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วแปรผันตามความชื้นที่ได้หลังจากการอบแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ใช้ออบ แต่ค่าผลต่างที่ได้นี้ไม่สอดคล้องกับรูปที่ 4.15 ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 4.4

จากรูปที่ 4.31 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างที่ความดันบรรยากาศกับที่ความดันสูญญากาศจะเห็นว่าปริมาณร้อยละผลได้ที่ความดันสูญญากาศมีปริมาณมากกว่าที่ความดันบรรยากาศทุกอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (40-70 องศาเซลเซียส) ทั้งๆที่ความชื้นของผงแห้งที่ความดันบรรยากาศ

น้อยกว่า ซึ่งส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมากกว่า อย่างไรก็ตามผงที่ได้หลังการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ความดันสุญญากาศมาก แต่ความชื้นที่ได้ระหว่างสองความดันต่างกันน้อยกว่า ดังนั้นผลต่างระหว่างอุณหภูมิหลังการอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ความดันบรรยากาศจึงมากกว่าที่ความดันสุญญากาศ ส่งผลให้ได้ผงแห้งออกมาน้อยกว่า และจากรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนระหว่างแป้งมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสใดๆ การอบแห้งที่สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะได้ปริมาณร้อยละผลได้มากกว่าการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ รวมทั้งพบว่า การอบแห้งที่น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียวภายใต้ความดันบรรยากาศจะไม่สามารถได้ผงแห้งออกมาเลย ในขณะที่การใช้ความดันสุญญากาศจะยังคงสามารถได้ผงแห้งออกมาได้ นั่นแสดงว่าการใช้ความดันสุญญากาศสามารถช่วยในการอบแห้งแบบพ่นฝอยสารจำพวกน้ำตาลได้

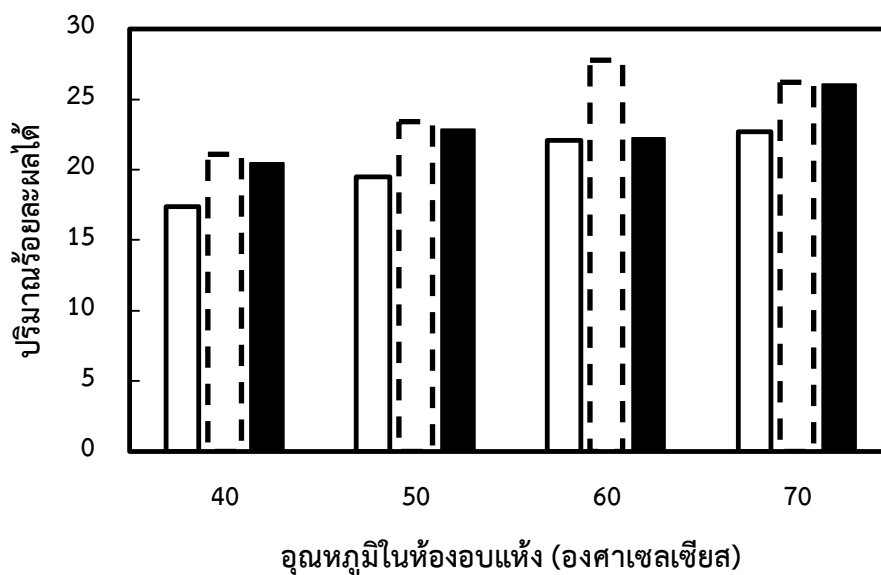


รูปที่ 4.30 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผงแห้งที่อัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30:70 โดยใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียสที่ความดันสุญญากาศ (0.54 บรรยากาศ) และอุณหภูมิลมร้อน 120 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ



**รูปที่ 4.31** ผลของอุณหภูมิที่ใช้และอัตราส่วนต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผงแห้งที่อัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 30:70 20:80 10:90 และ 100:0 โดยใช้อุณหภูมิหม้อนึ่ง 120 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ (แห้งที่บ) และ 70 องศาเซลเซียสที่ความดันสุญญากาศ (0.54 บรรยากาศ) (เส้นประ)

จากรูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร้อยละผลได้ต่ออุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ความดันต่างๆ จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิใดๆ ปริมาณร้อยละผลได้ที่ได้จากความดันที่ 0.54 และ 0.74 บรรยากาศมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่ความดัน 0.34 บรรยากาศมีค่าแตกต่างกันไป ซึ่งความแตกต่างนี้เกิดเนื่องมาจากความดันมีผลต่อปริมาณอากาศที่ไหลผ่าน ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของการแยกในไซโคลนอน้อยลง ผงแป้งบางส่วนจึงติดไปกับอากาศออกไปทางถุงกรอง ซึ่งในความเป็นจริงยิ่งลดความดันให้ต่ำเท่าไรยิ่งดีเนื่องจากจะสามารถระเหยน้ำได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการลดความดันก็จะก่อปัญหาทำให้ไม่ได้รับผงแห้งออกมา ดังนั้นความดันที่ 0.54 บรรยากาศจึงเหมาะสมสำหรับการใช้อบแห้งที่ความดันสุญญากาศนั่นเอง



รูปที่ 4.32 ปริมาณร้อยละผลได้ของแป้งมอลโตเดกซ์ตริน โดยใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียสที่มีความดันสุญญากาศ 0.34 (เส้นทึบ) 0.54 (เส้นประ) 0.74 (แฉ่งทึบ)

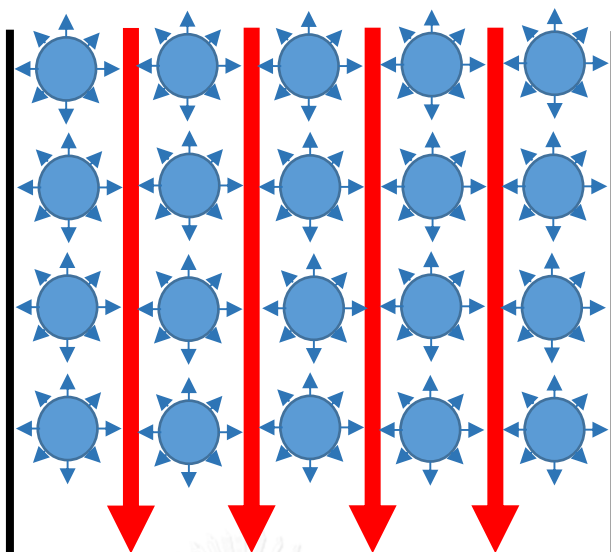
#### 4.4 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สุญญากาศที่มีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรดเพื่อช่วยให้ความร้อน

จากผลการทดลองที่ในหัวข้อผ่านมาจะพบว่าผลการทดลองในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความดันบรรยากาศนั้นสอดคล้องกับรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิแห้งที่ได้หลังจากการอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ความดันบรรยากาศ โดยถ้าผลต่างห่างกันมากกว่า 20 องศาเซลเซียสจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของผงแห้งที่ได้จะแตกต่างกันออกไป เนื่องจากผงเกิดการเกาะติดกันสูงเพราะผิวถูกเปลี่ยนอยู่ในสถานะคล้ายแก้ว อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความดันสุญญากาศจะพบว่าผลที่ได้บางค่าไม่สอดคล้องกับรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิแห้งที่ได้หลังจากการอบแห้งกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ความดันสุญญากาศ เช่น ที่การอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้อุณหภูมิห้องอบ 40 องศาเซลเซียสของผงแห้งที่ประกอบด้วยแป้งมอลโตเดกซ์ตรินกับน้ำตาลซูโครสที่อัตราส่วน 30:70 ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าผงไม่น่าเกิดการเกาะติดเนื่องจากการเปลี่ยนสภาพผิว เพราะผลต่างห่างกันไม่เกิน 20 องศาเซลเซียส

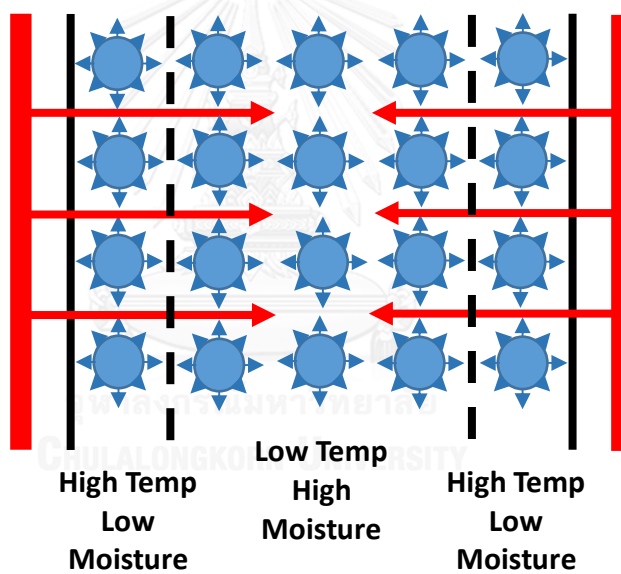
จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสืบเนื่องมาจากการกระจายความร้อนที่ไม่เหมือนกันระหว่างที่ความดันบรรยากาศและที่ความดันสุญญากาศ เนื่องจากลมร้อนที่ความดันบรรยากาศเป็นตัวกลาง



สำคัญในการถ่ายโอนความร้อนและมวลสาร (เป็นตัวกลางให้ความร้อนและรับไอน้ำจากหยดสารละลาย) รวมถึงการตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ของระบบมีค่าต่ำส่งผลให้เป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) จึงทำให้แต่ละจุดในแนวระนาบเดียวกันมีคุณสมบัติเหมือนกัน ดังนั้นเมื่อผงแห้งออกมาจากเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิและความชื้นที่ได้จากการอบแห้งของทุกอนุภาคจึงเหมือนกันหรือใกล้เคียงกัน ในขณะที่การอบแห้งที่สภาวะสูญญากาศจะใช้เครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรดเป็นตัวให้ความร้อน และอากาศในเครื่องเป็นตัวรับความชื้นจากหยดสารละลาย ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบแผ่รังสี โดยจากสมการ (2.15) จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้คิดจากอุณหภูมิยกกำลังสี่จึงทำให้หยดสารละลายในระนาบเดียวกันได้รับความร้อนแตกต่างกันอย่างมากยิ่งกว่าการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน (อุณหภูมียกกำลังหนึ่ง) ดังนั้นอุณหภูมิและความชื้นจึงแปรผันตามระยะห่างของเครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรด นั่นคือหยดสารละลายที่อยู่ใกล้เครื่องทำความร้อนจะได้ผงออกมาโดยที่มีอุณหภูมิล้นการอบแห้งสูงและความชื้นในผงต่ำ ในทางกลับกันหยดสารละลายที่อยู่ไกลเครื่องก็จะได้ผงที่มีอุณหภูมิต่ำแต่ความชื้นสูงแทน จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ผงแห้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้ความดันสูญญากาศในระนาบเดียวกันมีคุณสมบัติทางอุณหภูมิและความชื้นไม่เท่ากัน เพราะฉะนั้นจึงอธิบายได้ว่าเมื่อใช้อุณหภูมิห้องอบที่ 40 องศาเซลเซียส หยดสารละลายที่อยู่ใกล้บริเวณได้รับความร้อนและความชื้นต่ำลง แต่หยดสารละลายอยู่ภายในกลับได้รับความร้อนน้อยเกินไปในการระเหย จึงส่งผลให้ความชื้นในผงสูงและทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วในผงที่อยู่ข้างในต่ำ และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในห้องอบจะทำให้ชั้นของหยดสารละลายที่มีอุณหภูมิและความชื้นหลังการอบแห้งที่เหมาะสมต่อการกลายเป็นผงเข้าไปข้างในชั้นแต่กว้างกว่าเดิม ถึงแม้ว่าอนุภาคบริเวณที่ผิวจะได้รับความร้อนสูงเกินไปจนไหม้ เช่นเมื่อใช้อุณหภูมิของห้องอบที่ 70 องศาเซลเซียส จะเกิดคราบสีน้ำตาลขึ้นบริเวณผิวที่ใกล้กับเครื่องทำความร้อนขึ้น อย่างไรก็ตามเป็นเพียงส่วนน้อยเมื่อเทียบกับความร้อนที่เหมาะสมที่อนุภาคซึ่งอยู่ภายในได้รับ ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นถูกแสดงในรูปที่ 4.33 และ 4.34



รูปที่ 4.33 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.34 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้ความดันสุญญากาศที่มีเครื่องให้ความร้อนแบบอินฟราเรด

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้ความดันสุญญากาศของสารจำพวกน้ำตาล เพื่อแก้ปัญหาการเหนียวติดที่เกิดจากการเปลี่ยนสภาพพื้นผิวเป็นสถานะคล้ายยางของการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ โดยทำการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะปกติและสภาวะสุญญากาศ ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนแป้งมอลโตเดกซ์ตรินที่เติมเข้าไปต่อน้ำตาลซูโครส และศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในสภาวะสุญญากาศและความดันที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

1. ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการอบแห้งแบบพ่นฝอยมีทั้งการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลสาร (ความชื้น) ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดในความดันบรรยากาศกับในความดันสุญญากาศที่มีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนแบบอินฟราเรดจะต่างกัน โดยที่ความดันบรรยากาศจะได้ผงแห้งที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน จึงทำให้ง่ายต่อการคำนวณค่าต่างๆ ในขณะที่การอบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศจะได้ผงแห้งที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ซึ่งทำให้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ยาก
2. อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของสารผสมสามารถคำนวณได้จากสมการ Couchman-Karasz ซึ่งได้มาจากค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของแต่ละสาร สัดส่วนโดยมวลและความจุความร้อนจำเพาะ และเมื่ออุณหภูมิของสารหลังการอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วนี้จะทำให้เกิดการเหนียวติดขึ้นจากการเปลี่ยนสภาพผิวเป็นสถานะคล้ายยาง
3. เมื่อสัดส่วนของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคกลมและผิวเรียบขึ้นจากที่มีรอยย่นและอนุภาคจะเกิดการเกาะติด รวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น
4. เมื่ออัตราส่วนของแป้งมอลโตเดกซ์ตรินต่อน้ำตาลซูโครสมีค่าเพิ่มขึ้น จะพบว่าอนุภาคผงแห้งมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากขนาดของน้ำตาลเล็กกว่า มีผลน้อยต่อการกระจายตัวของอนุภาค
5. เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลซูโครส ความหนาแน่นรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงค่าหนึ่งจะมีค่าลดลงเนื่องจากผงแห้งเกิดการติดกัน ทำให้ความหนาแน่นรวมมีค่าลดลง
6. การเพิ่มหรือลดอัตราส่วนระหว่างแป้งมอลโตเดกซ์ตรินกับน้ำตาลไม่มีผลต่อความชื้นที่เหลืออยู่ในผงแห้งหลังการอบแห้ง

7. การเพิ่มปริมาณน้ำตาลซูโครสจะทำให้ปริมาณร้อยละผลได้ลดลงเนื่องจากการเพิ่มนี้จะทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของสารผสมตกลง เป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนสภาพผิวขึ้น

8. การอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้ความดันสุญญากาศ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ขนาดของอุณหภูมิใหญ่ขึ้นเล็กน้อย จากความดันของน้ำที่อยู่ในอนุภาค และเมื่อลดความดันจะทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงนิดหน่อย แต่จะไม่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคที่ได้

9. การเพิ่มอุณหภูมิในห้องอบแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศไม่มีผลต่อความหนาแน่นของผงแห้งที่ได้ แต่จะทำให้ผงแห้งมีความชื้นลดลง และได้ปริมาณร้อยละผลได้มากขึ้น เนื่องจากการลดลงของความชื้นมีผลต่อผลต่างของอุณหภูมิที่แห้งที่ติดกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมากกว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิหลังการอบแห้ง

10. การอบแห้งแบบพ่นฝอยของสารจำพวกน้ำตาลภายใต้ความดันสุญญากาศที่มีเครื่องช่วยให้ความร้อนแบบอินฟราเรดสามารถช่วยให้ได้ผงแห้งที่มีการเหนียวติดที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งภายใต้ความดันบรรยากาศ จึงทำให้ได้รับปริมาณร้อยละผลได้ที่มากกว่า

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- หากนำเครื่องทำความร้อนใส่เข้าไปในห้องอบแห้งได้น่าจะทำให้ผงแห้งได้รับอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหยน้ำได้โดยตรง ดังนั้นจะช่วยลดอุณหภูมิที่ต้องใช้ในการอบแห้งได้ และ หากแยกเครื่องทำความร้อนเป็นหลายๆอันจะช่วยให้การกระจายความร้อนในห้องอบแห้งได้ดีขึ้น ส่งผลให้อนุภาคในระนาบเดียวกันมีคุณสมบัติคล้ายๆกัน

- ควรมีการติดตั้งไซโคลนเพิ่มเพื่อช่วยดักอนุภาคขนาดเล็กที่ติดไปกับอากาศขาออก เนื่องจากในระบบมีอากาศน้อยประสิทธิภาพของไซโคลนจึงลดลง ดังนั้นการเพิ่มจำนวนน่าจะทำได้ทำให้สามารถดักผงแห้งที่มีขนาดเล็กที่ติดไปกับอากาศร้อนได้เพิ่มขึ้น

- การเปลี่ยนผนังของห้องอบแห้งสามารถช่วยให้ได้รับผงแห้งของแป้งมอลโตเดกซ์ตรินและน้ำตาลซูโครสได้มากขึ้น เช่นการเปลี่ยนจากแก้วเป็นเทฟลอน ซึ่งทำให้พลังงานตรงบริเวณผิวลดลง และส่งผลให้เกิดการเกาะติดของผงแห้งลดลง

- อาจนำการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้ความดันสุญญากาศนี้ไปใช้ในน้ำตาลที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่านี้เพื่อทดสอบว่าสามารถนำไปใช้ได้ที่สภาวะอื่นอีกหรือไม่

## รายการอ้างอิง

1. Bhandari, B.R., N. Datta, and T. Howes, *Problems Associated With Spray Drying Of Sugar-Rich Foods*. Drying Technology, 1997. **15**(2): p. 671-684.
2. Kitamura, Y., et al., *EXPERIMENTAL VACUUM SPRAY DRYING OF PROBIOTIC FOODS INCLUDED WITH LACTIC ACID BACTERIA*. Journal of Food Processing and Preservation, 2009. **33**(6): p. 714-726.
3. ดร.นิอร โฉมศรี, จุลชีววิทยาอาหาร, ed. 1. 2555, เชียงใหม่: บริษัท เชียงใหม่ปริ้นท์ดีง.
4. คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, ed. 3. 2543, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
5. รองศาสตราจารย์ ดร.สิงหนาท พวงจันทร์แดง, เทคโนโลยีการทำแห้งอาหาร, ed. 1. 2555, ขอนแก่น: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
6. ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, et al., เทคโนโลยีอบแห้งในอุตสาหกรรมอาหาร, ed. 1. 2548, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
7. John Fuchs. *Drying-Conduction vs. Radiation*. 2013 May 23, 2013 [cited 2016 5/17].
8. Jon Banks. *Baseball and Physics Unite!* 2011 [cited 2016 5/17].
9. Zarein, M., S.H. Samadi, and B. Ghobadian, *Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices*. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2015. **14**(1): p. 41-47.
10. Ruiz Celma, A., S. Rojas, and F. Lopez-Rodríguez, *Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008. **47**(9-10): p. 1810-1818.
11. Warren L. McCabe, Julian C. Smith, and Peter Harriott, *Unit Operations of Chemical Engineering*, ed. 7. 2005, Singapore: McGraw.Hill. 1140.
12. Woo M. W. and Bhandari B., *2 - Spray drying for food powder production*, in *Handbook of Food Powders*. 2013, Woodhead Publishing. p. 29-56.
13. Maria Elena Carrin and Guillermo Hector Crapiste, *Convective Drying of Foods*. 2009, England: Taylor & Francis Group.

14. iEnergyGuru. การอบแห้ง (Drying). [cited 2016 6/20].
15. Agriculture and Consumer Protection. *Farm structures in tropical climates*. [cited 2016 5/17].
16. Earle, R.L. *PSYCHROMETRIC CHART High temperatures 1013.25 millibars*. 1983 [cited 2016 6/11].
17. Robert Van Durme, et al. *Dominion's Approach to Optimizing Spray Dry Absorbers*. 2016 [cited 2016 5/17].
18. AcmeFil Engineering Systems PVT. Ltd. *Nozzle Atomizer*. [cited 2016 5/18].
19. Nubilos Molekularzerstaebung. *Two Fluid Nozzles Type NUBILOSA*. 2004 [cited 2016 5/18].
20. Kim, E.H.-J., X. Dong Chen, and D. Pearce, *On the mechanisms of surface formation and the surface compositions of industrial milk powders*. *Drying Technology*, 2003. **21**(2): p. 265-278.
21. Seow, C.C. and C.N. Gwee, *Coconut milk: chemistry and technology*. *International Journal of Food Science & Technology*, 1997. **32**(3): p. 189-201.
22. Ozmen, L. and T.A.G. Langrish, *COMPARISON OF GLASS TRANSITION TEMPERATURE AND STICKY POINT TEMPERATURE FOR SKIM MILK POWDER*. *Drying Technology*, 2002. **20**(6): p. 1177-1192.
23. Boonyai, P., T. Howes, and B. Bhandari, *Applications of the Cyclone Stickiness Test for Characterization of Stickiness in Food Powders*. *Drying Technology*, 2006. **24**(6): p. 703-709.
24. KentChemistry. *Determining Boiling Point from Vapor Pressure*.
25. Bhandari, B.R., et al., *A SEMI-EMPIRICAL APPROACH TO OPTIMISE THE QUANTITY OF DRYING AIDS REQUIRED TO SPRAY DRY SUGAR-RICH FOODS*. *Drying Technology*, 1997. **15**(10): p. 2509-2525.
26. Bhandari, B.R., et al., *SPRAY DRYING OF CONCENTRATED FRUIT JUICES*. *Drying Technology*, 1993. **11**(5): p. 1081-1092.
27. ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ and ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนานนท์. *Maltodextrin/มอลโตเดกซ์ตริน*. [cited 2016 5/18].

28. He-Shang Ren, *Construction of a generalized psychrometric chart for different pressures*. International Journal of Mechanical Engineering Education, 2004. **32/3**: p. 212-222.
29. Semyonov David, Ramon Ory, and Shimoni Eyal, *Using ultrasonic vacuum spray dryer to produce highly viable dry probiotics*. LWT - Food Science and Technology, 2011. **44(9)**: p. 1844-1852.
30. ชนากร ศรีรัตนธรรม, การกักเก็บแอนโธไซยานินจากผลหม่อนด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สูญญากาศ, in ภาควิศวกรรมเคมี. 2555, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. p. 120.
31. ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ and ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนานนท์. *Sucrose/น้ำตาลซูโครส*. [cited 2016 5.24].
32. คุณอรวิสา สุ่มทอง. *กระบวนการผลิตน้ำตาลทราย*. [cited 2016 5/24].
33. Science of Cooking. *What is Caramelization?* [cited 2016 5/24].
34. Lay Ma, U.V., G.R. Ziegler, and J.D. Floros, *Effect of Sucrose on Physical Properties of Spray-Dried Whole Milk Powder*. Journal of Food Science, 2008. **73(9)**: p. E431-E438.
35. Imtiaz-Ul-Islam, M. and T.A.G. Langrish, *Comparing the crystallization of sucrose and lactose in spray dryers*. Food and Bioproducts Processing, 2009. **87(2)**: p. 87-95. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
36. 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.
37. Islam, M.Z., et al., *Effect of vacuum spray drying on the physicochemical properties, water sorption and glass transition phenomenon of orange juice powder*. Journal of Food Engineering, 2016. **169**: p. 131-140.
38. Avaltroni, F., P.E. Bouquerand, and V. Normand, *Maltodextrin molecular weight distribution influence on the glass transition temperature and viscosity in aqueous solutions*. Carbohydrate Polymers, 2004. **58(3)**: p. 323-334.
39. Katkov, I.I. and F. Levine, *Prediction of the glass transition temperature of water solutions: comparison of different models*. Cryobiology, 2004. **49(1)**: p. 62-82.

40. Li Xin, H., F. Iva, and S.M. Arun, *Industrial Spray Drying Systems*, in *Handbook of Industrial Drying, Third Edition*. 2006, CRC Press.







ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### ภาคผนวก ก

ค่าที่ได้จากการทดลองอบแห้งแบบพ่นฝอย

**ตารางที่ ก.1** ค่าต่างๆที่วัดได้จากการทดลองอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิลมร้อน 120 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 มิลลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของแข็งร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของลมร้อนที่ 24 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

อัตราส่วนมอลโต เดกซ์ตรินต่อซูโครส	อุณหภูมิอากาศขาเข้า (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิขาออก (°C)
100:0	27	45	71
90:10	27	39	77
80:20	26	39	72
70:30	26	41	72
60:40	27	49	73
50:50	27	49	73
40:60	26	51	73
30:70	27	41	72
20:80	27	56	71
10:90	26	51	72
0:100	27	49	68

**ตารางที่ ก.2** ค่าต่างๆที่วัดได้จากการทดลองอบแห้งแบบพ่นฝอยของแป้งมอลโตเดกซ์ตรินที่ความดัน 0.34 บรรยากาศ อัตราการป้อน 3 มิลลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของแข็งร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

อุณหภูมิในห้องอบ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิขาออก (°C)	ปริมาณร้อยละผลได้ ทั้งหมด
40	48	29	17.35
50	47	40	19.47
60	49	44	22.07
70	50	47	22.682

**ตารางที่ ก.3** ค่าต่างๆที่วัดได้จากการทดลองอบแห้งแบบพ่นฝอยของแป้งมอลโตเดกซ์ตรินที่ความดัน 0.74 บรรยากาศ อัตราการป้อน 3 มิลลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของแข็งร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

อุณหภูมิในห้องอบ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิขาออก (°C)	ปริมาณร้อยละผลได้ ทั้งหมด
40	44	29	20.50
50	44	38	22.86
60	50	41	22.26
70	44	45	26.05

**ตารางที่ ก.4** ค่าต่างๆที่วัดได้จากการทดลองอบแห้งแบบพ่นฝอยของแป้งมอลโตเดกซ์ตรินกับน้ำตาลซูโครสที่ความดัน 0.54 บรรยากาศ อัตราการป้อน 3 มิลลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของแข็งร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

อัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่อซูโครส	อุณหภูมิในห้องอบ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิขาออก (°C)	ปริมาณร้อยละผลได้ทั้งหมด
100:0	40	49	30	21.08
100:0	50	35	36	23.41
100:0	60	37	41	27.74
100:0	70	41	44	26.19
30:70	40	52	33	17.15
30:70	50	54	39	18.85
30:70	60	54	48	20.28
30:70	70	48	50	21.6
20:80	40	39	31	0
20:80	50	40	39	19.12
20:80	60	44	43	17.31
20:80	70	40	52	20.70
10:90	40	48	30	0
10:90	50	44	40	0
10:90	60	41	44	16.21
10:90	70	33	51	21.27
0:100	40	40	33	0
0:100	50	39	39	2.27
0:100	60	36	46	8.36
0:100	70	39	50	12.92

## ภาคผนวก ข

การคำนวณการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดันบรรยากาศ

### 1. การคำนวณหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นด้วยสมการสมดุลมวลและพลังงาน

ในการอบแห้งผงแห้งผสมระหว่างมอลโตเดกซ์ตริน DE11 กับน้ำตาลซูโครสโดยมีอัตราส่วนอยู่ที่ 30:70 โดยมวล (12กรัม : 28กรัม) โดยมีอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องเท่ากับ 27 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศขาเข้าเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส อุณหภูมิขาออกเท่ากับ 72 องศาเซลเซียส ปริมาณของแข็งในสารละลายเริ่มต้นร้อยละ 40 โดยมวล ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าเท่ากับร้อยละ 48 อัตราการไหลของอากาศร้อนเท่ากับ 24 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการป้อนสารเท่ากับ 3 มิลลิเมตรต่ออนาทีเท่ากับ 0.072 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความชื้นของผงแห้งขาออกเท่ากับร้อยละ 7 สามารถหาค่าคุณสมบัติ ณ ช่วงต่างๆได้โดย

ค่าความชื้นของอากาศขาเข้าหาได้จาก

$$H_1 = \frac{RH P_L^{\text{sat}}}{P - P_L^{\text{sat}}} \left( \frac{M_{w,\text{vapor}}}{M_{w,\text{gas}}} \right) = \frac{0.48 \times 3.564}{101.325 - 0.48 \times 3.564} \left( \frac{18}{29} \right) = 0.0107$$

ค่าความชื้นของสารขาเข้าหาได้จาก  $w_1 = \frac{60}{40} = 1.5$

ค่าความชื้นของสารขาออกหาได้จาก

$$w_2 = \left( \frac{0.07}{1 - 0.07} \right) = 0.0752$$

จากระบบจะได้สมการสมดุลมวลสาร :  $G_0(H_2 - H_1) = W_0(w_1 - w_2)$

$$(24)(H_2 - 0.0107) = (0.072)(1.5 - 0.0752)$$

$$H_2 = 0.0150$$

สมมติว่า  $T_G' = T_{G1}$  ดังนั้น  $T_{mc}$  ได้จาก  $T_{G1}$  และ ให้  $T_{m2} = T_{mc} = 38 \text{ }^\circ\text{C} = 311 \text{ K}$

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศขาเข้าจะได้  $C_{s1} = 1 + 1.86H_1 = 1.0199$

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศขาออกจะได้  $C_{s2} = 1 + 1.86H_2 = 1.0279$

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของผงแห้งจะได้

$$C_m = 0.3 \times 0.444 + 0.7 \times 0.6 = 0.5532$$

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำจะได้  $C_w = 1.94$

จากระบบจะได้สมการดุลพลังงาน :

$$G_0(C_{s1}T_{G1} + H_1\lambda_0) + W_0(C_m + C_w w_1)T_{m1} + \dot{Q} = G_0(C_{s2}T_{G2} + H_2\lambda_0) + W_0(C_m + C_w w_2)T_{m2}$$

$$24(1.0199 \times 393 + 0.0107 \times 2202.2) + 0.072(0.5532 + 1.94 \times 1.5)(303) + \dot{Q} = 24(1.0279 \times 345 + 0.0150 \times 2329) + 0.072(0.5532 + 1.94 \times 0.0752)(311)$$

$$\dot{Q} = -895.67 \text{ kJ/hr}$$

สมมติว่าความร้อนที่เสียไปร้อยละ 20 อยู่ในช่วงที่ 1 และ 3 ร้อยละ 60 อยู่ในช่วงที่ 2 จะได้

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_3 = -179.13 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}, \dot{Q}_2 = -537.40 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

จากช่วงที่ 1 จะได้สมการดุลพลังงาน :

$$G_0(C_{s1}T_{G1} + H_1\lambda_0) + W_0(C_m + C_w w_1)T_{m1} + \dot{Q}_1 = G_0(C_{s1}T'_G + H_1\lambda_0) + W_0(C_m + C_w w_1)T_{mc}$$

$$24(1.0199 \times 393 + 0.0107 \times 2202.2) + 0.072(0.5532 + 1.94 \times 1.5)(303) - 179.13 = 24(1.0199T'_G + 0.0107 \times 2224.5) + 0.072(0.5532 + 1.94 \times 1.5)T_{mc}$$

จาก Psychrometric chart จะได้  $T'_G = 112.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{mc} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$

นำค่าที่ได้กลับไปหาค่าใหม่ในสมการดุลพลังงานระบบจะได้

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_3 = -179.14 \text{ kJ/hr}, \dot{Q}_2 = -537.43 \text{ kJ/hr} \text{ ค่าของ } T'_G = 112.4 \text{ }^\circ\text{C}, T_{mc} \text{ เท่าเดิม}$$

จากช่วงที่ 2 จะได้สมการดุลมวลสาร :

$$G_0(H_c - H_1) = W_0(w_1 - w_c)$$

ประมาณค่าความชื้นวิกฤตเป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะได้  $w_c = 30/70 = 0.4286$  จะได้

$$24(H_c - 0.0107) = (1.5 - 0.4286)(0.072)$$

$$H_c = 0.0139 \text{ และจะได้ } C_{sc} = 1.0258$$

จากช่วงที่ 2 จะได้สมการดุลพลังงาน :

$$G_0(C_{s1}T'_G + H_1\lambda_0) + W_0(C_m + C_w w_1)T_{mc} + \dot{Q}_2 = G_0(C_{sc}T_{Gc} + H_c\lambda_0) + W_0(C_m + C_w w_c)T_{mc}$$

$$24(1.0199 \times 385.4 + 0.0107 \times 2224.5) + 0.072(0.5532 + 1.94 \times 1.5)(310) - 537.43 = 24(1.0258 \times T_{Gc} + 0.0139 \times 2303.8) + 0.072(0.5532 + 1.94 \times 0.4286)(310)$$

จะได้  $T_{Gc} = 355.22 \text{ K} = 82.22 \text{ }^\circ\text{C}$

จากช่วงที่ 3 จะได้สมการดุลพลังงาน :

$$G_0(C_{sc}T_{Gc} + H_c\lambda_0) + W_0(C_m + C_w w_c)T_{mc} + \dot{Q}_3 = G_0(C_{s2}T_{G2} + H_2\lambda_0) + W_0(C_m + C_w w_2)T_{m2}$$

$$24(1.0258 \times 355.22 + 0.0139 \times 2303.8) + 0.072(0.5532 + 1.94 \times 0.4286)(310) - 179.14 = 24(1.0279 \times 345 + 0.0150 \times 2329.0) + 0.072(0.5532 + 1.94 \times 0.0752)T_{m2}$$

$$\text{จะได้ } T_{m2} = 320.63 \text{ K} = 47.63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า  $T_{m2}$  ไม่ตรงกับที่กำหนดไว้ตอนแรกต้องนำค่าที่ได้กลับไปแทนใหม่ จนได้ค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจะได้อุณหภูมิหลังการอบแห้งของผงแห้งเท่ากับ  $71 \text{ } ^\circ\text{C}$

## 2.การคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

ในการคำนวณเวลาที่ใช้ของการอบแห้งผงแห้งผสมระหว่างมอลโตเดกซ์ตริน DE11 กับน้ำตาลซูโครส โดยมีอัตราส่วนอยู่ที่ 30:70 โดยมวล (12กรัม : 28กรัม) อุณหภูมิอากาศขาเข้าเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส โดยมีความหนาแน่นของลมร้อนที่ 0.946 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.0314 วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน ความหนืดเท่ากับ  $2.17 \times 10^{-5}$  พาสคาล วินาที มีเลขพรินด์เทิลเท่ากับ 0.703 ปริมาณของแข็งในสารละลายเริ่มต้นร้อยละ 40 โดยมวล อัตราการไหลของอากาศร้อนเท่ากับ 24 กิโลกรัมต่อชั่วโมงหรือเท่ากับ 20 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เส้นผ่านศูนย์กลางห้องอบแห้งมีขนาด 16.4 เซนติเมตร อนุภาคมีขนาดเฉลี่ย 100 ไมโครเมตร ความชื้นของผงแห้งขาออกเท่ากับร้อยละ 7 ความชื้นวิกฤตประมาณร้อยละ 30 และความชื้นสมดุลร้อยละ 0 สามารถหาได้โดย

หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $h_c$ ) ของอนุภาคทรงกลมที่ถูกอบแห้งโดยลมร้อนได้จาก

$$Nu = 2 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/3}$$

$$\frac{h_c D_p}{k_G} = 2 + 0.6 \left( \frac{D_p u \rho_G}{\mu_G} \right) Pr^{1/3}$$

$$\frac{h_c \times 100 \times 10^{-6}}{0.0314} = 2 + 0.6 \left( \frac{100 \times 10^{-6} \times \frac{20 \times 4}{\pi \times 0.164^2 \times 3600} \times 0.946}{2.17 \times 10^{-5}} \right) \times 0.703^{1/3}$$

ดังนั้นจะได้ค่า  $h_c$  เท่ากับ 820 วัตต์ต่อตารางเมตรต่อเคลวิน

หาอัตราการระเหยจะได้จากสมการ

$$R_c = \frac{h_c(t - t_w)}{\lambda} = \frac{820 \times (97.3 - 37)}{2414.1 \times 1000}$$

จะได้ค่าอัตราการระเหยเท่ากับ 0.0205 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที

จากอัตราการระเหยสามารถหาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจากสมการ

$$\theta = \theta_c + \theta_d = \frac{W}{AR_c} \left\{ (F_1 - F_c) + F_c \ln \left( \frac{F_c}{F_2} \right) \right\}$$

สามารถหาค่าแต่ละเทอมได้ดังต่อไปนี้

$$W = 0.4\rho V = 0.4 \times 0.5532 \times 10^3 \times \frac{4}{3} \pi \left( \frac{100 \times 10^{-6}}{2} \right)^3 = 1.16 \times 10^{-10} \text{ kg}$$

$$A = \pi r^2 = \pi \left( \frac{100 \times 10^{-6}}{2} \right)^2 = 7.85 \times 10^{-9} \text{ m}^2$$

$$F_1 = w_1 - w_e = 1.5 - 0 = 1.5$$

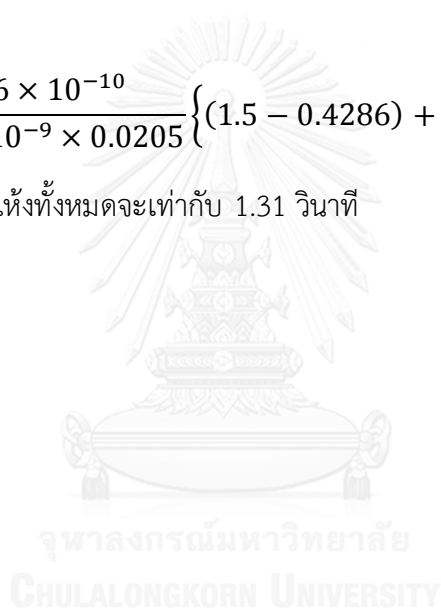
$$F_c = w_c - w_e = 0.4286 - 0 = 0.4286$$

$$F_2 = w_2 - w_e = 0.0752 - 0 = 0.0752$$

จากพจน์ทั้งหมดจะได้ว่า

$$\theta = \frac{1.16 \times 10^{-10}}{7.85 \times 10^{-9} \times 0.0205} \left\{ (1.5 - 0.4286) + 0.4286 \ln \left( \frac{0.4286}{0.0752} \right) \right\}$$

ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมดจะเท่ากับ 1.31 วินาที





### ภาคผนวก ค

การคำนวณการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดันสูญญากาศ

#### 1. การคำนวณหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นด้วยสมการสมดุลมวลและพลังงาน

ในการอบแห้งผงแห้งผสมระหว่างมอลโตเดกซ์ตริน DE11 กับน้ำตาลซูโครสโดยมีอัตราส่วนอยู่ที่ 30:70 โดยมวล (12กรัม : 28กรัม) โดยมีอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องเท่ากับ 26.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในห้องอบแห้งเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส อุณหภูมิขาออกเท่ากับ 33 องศาเซลเซียส ปริมาณของแข็งในสารละลายเริ่มต้นร้อยละ 40 โดยมวล ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าเท่ากับร้อยละ 52 อัตราการไหลของอากาศร้อนเท่ากับ 10.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการป้อนสารเท่ากับ 3 มิลลิลิตรต่อนาทีเท่ากับ 0.072 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความชื้นของผงแห้งขาออกเท่ากับร้อยละ 10 สามารถหาค่าคุณสมบัติ ณ ช่วงต่างๆได้โดย

ค่าความชื้นของอากาศขาเข้าหาได้จาก

$$H_1 = \frac{RH P_L^{\text{sat}}}{P - P_L^{\text{sat}}} \left( \frac{M_{w,\text{vapor}}}{M_{w,\text{gas}}} \right) = \frac{0.52 \times 3.564}{101.325 - 0.52 \times 3.564} \left( \frac{18}{29} \right) = 0.0116$$

ค่าความชื้นของสารขาเข้าหาได้จาก  $w_1 = \frac{60}{40} = 1.5$

ค่าความชื้นของสารขาออกหาได้จาก  $w_2 = \left( \frac{0.1}{1-0.1} \right) = 0.11$

จากระบบจะได้สมการสมดุลมวลสาร :  $G_0(H_2 - H_1) = W_0(w_1 - w_2)$

$$(10.1)(H_2 - 0.0116) = (0.072)(1.5 - 0.11)$$

$$H_2 = 0.0215$$

สมมติให้  $T_{m2}$  เท่ากับอุณหภูมิขาออก = 33 °C = 306 K

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศขาเข้าจะได้  $C_{s1} = 1 + 1.86H_1 = 1.0216$

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศขาออกจะได้  $C_{s2} = 1 + 1.86H_2 = 1.040$

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของผงแห้งจะได้

$$C_m = 0.3 \times 0.444 + 0.7 \times 0.6 = 0.5532$$

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำจะได้  $C_w = 1.94$

จากระบบจะได้สมการดุลพลังงาน :

$$G_0(C_{s1}T_{G1} + H_1\lambda_0) + W_0(C_m + C_w w_1)T_{m1} + \dot{Q} = G_0(C_{s2}T_{G2} + H_2\lambda_0) + W_0(C_m + C_w w_2)T_{m2}$$

$$10.1(1.0216 \times 299.8 + 0.0116 \times 2437.8) + 0.072(0.5532 + 1.94 \times 1.5)(299.8) + \dot{Q} = 10.1(1.040 \times 306 + 0.0215 \times 2423.6) + 0.072(0.5532 + 1.94 \times 0.11)(306)$$

$$\dot{Q} = 303.65 \text{ kJ/hr}$$

สมมติว่าความร้อนที่ได้รับร้อยละ 30 อยู่ในช่วงที่ 1 และร้อยละ 70 อยู่ในช่วงที่ 2 จะได้

$$\dot{Q}_1 = 91.10 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}, \dot{Q}_2 = 212.55 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}}$$

จากช่วงที่ 1 จะได้สมการดุลพลังงาน:

$$G_0(C_{s1}T_{G1} + H_1\lambda_0) + W_0(C_m + C_w w_1)T_{m1} + \dot{Q}_1 = G_0(C_{s1}T'_{G1} + H_1\lambda_0) + W_0(C_m + C_w w_1)T_{mc}$$

$$10.1(1.0216 \times 299.8 + 0.0116 \times 2437.8) + 0.072(0.5532 + 1.94 \times 1.5)(299.8) + 91.10 = 10.1(1.0216T'_G + 0.0116 \times 2418.8) + 0.072(0.5532 + 1.94 \times 1.5)T_{mc}$$

จาก Psychrometric chart จะได้  $T'_G = 35.27 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{mc} = 23.5 \text{ }^\circ\text{C}$

จากช่วงที่ 2 จะได้สมการดุลมวลสาร :

$$G_0(H_c - H_1) = W_0(w_1 - w_c)$$

ประมาณค่าความชื้นวิกฤตเป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะได้  $w_c = 30/70 = 0.4286$  จะได้

$$10.1(H_c - 0.0116) = (1.5 - 0.4286)(0.072)$$

$$H_c = 0.0192 \text{ และจะได้ } C_{sc} = 1.0358$$

จากช่วงที่ 2 จะได้สมการดุลพลังงาน :

$$G_0(C_{s1}T'_{G1} + H_1\lambda_0) + W_0(C_m + C_w w_1)T_{mc} + \dot{Q}_2 = G_0(C_{sc}T_{Gc} + H_c\lambda_0) + W_0(C_m + C_w w_c)T_{mc}$$

$$10.1(1.0216 \times 308.27 + 0.0116 \times 2418.8) + 0.072(0.5532 + 1.94 \times 1.5)(296.5) - 212 = 10.1(1.0358 \times T_{Gc} + 0.0192 \times 2411.7) + 0.072(0.5532 + 1.94 \times 0.4286)(296.5)$$

จะได้  $T_{Gc} = 310.89 \text{ K} = 37.89 \text{ }^\circ\text{C}$

## 2. การคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

ในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ของการอบแห้งแผงแห้งผสมระหว่างมอลโตเดกซ์ตริน DE11 กับ น้ำตาลซูโครสที่ความดัน 0.54 บรรยากาศโดยมีอัตราส่วนอยู่ที่ 30:70 โดยมวล (12กรัม : 28กรัม) อุณหภูมิในห้องอบแห้งเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส โดยมีความหนาแน่นของลมร้อนที่ 1.140 กิโลกรัม

ต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการนำความร้อนเท่ากับ  $0.0269$  วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน ความหนืดเท่ากับ  $1.89 \times 10^{-5}$  พาสคาล วินาที มีเลขพรีน็ดเทิลเท่ากับ  $0.711$  ปริมาณของแข็งในสารละลายเริ่มต้นร้อยละ 40 โดยมวล อัตราการไหลของอากาศร้อนเท่ากับ  $10.1$  กิโลกรัมต่อชั่วโมงหรือเท่ากับ  $8.42$  ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อนุภาคมีขนาดเฉลี่ย  $100$  ไมโครเมตร ความชื้นของผงแห้งขาออกเท่ากับร้อยละ 10 ความชื้นวิกฤตประมาณร้อยละ 30 และความชื้นสมดุลร้อยละ 0 สามารถทำได้โดย

หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $h_c$ ) ของอนุภาคทรงกลมที่ถูกอบแห้งโดยลมร้อนได้จาก

$$Nu = 2 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/3}$$

$$\frac{h_c D_p}{k_G} = 2 + 0.6 \left( \frac{D_p \rho_G}{\mu_G} \right) Pr^{1/3}$$

$$\frac{h_c \times 100 \times 10^{-6}}{0.0269} = 2 + 0.6 \left( \frac{100 \times 10^{-6} \times \frac{8.42 \times 4}{\pi \times 0.164^2 \times 3600} \times 1.140}{1.89 \times 10^{-5}} \right) \times 0.711^{1/3}$$

ดังนั้นจะได้ค่า  $h_c$  เท่ากับ  $634$  วัตต์ต่อตารางเมตรต่อเคลวิน

หาอัตราการระเหยจะได้จากสมการ

$$R_c = \left\{ h_c (t - t_w) + \frac{Q_2}{A} \right\} \frac{1}{\lambda_w} = \left\{ 634 (36.58 - 23.5) + \frac{212.55 \times \frac{1000}{3600}}{\pi \left( \frac{0.164}{2} \right) 0.235} \right\} \frac{10^{-3}}{2446.05}$$

จะได้ค่าอัตราการระเหยเท่ากับ  $3.79 \times 10^{-3}$  กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที

จากอัตราการระเหยสามารถหาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจากสมการ

$$\theta = \theta_c + \theta_d = \frac{W}{AR_c} \left\{ (F_1 - F_c) + F_c \ln \left( \frac{F_c}{F_2} \right) \right\}$$

สามารถหาค่าแต่ละเทอมได้ดังต่อไปนี้

$$W = 0.4 \rho V = 0.4 \times 0.5532 \times 10^3 \times \frac{4}{3} \pi \left( \frac{100 \times 10^{-6}}{2} \right)^3 = 1.16 \times 10^{-10} \text{ kg}$$

$$A = \pi r^2 = \pi \left( \frac{100 \times 10^{-6}}{2} \right)^2 = 7.85 \times 10^{-9} \text{ m}^2$$

$$F_1 = w_1 - w_e = 1.5 - 0 = 1.5, F_c = w_c - w_e = 0.4286 - 0 = 0.4286$$

$$F_2 = w_2 - w_e = 0.11 - 0 = 0.11$$

จากพจน์ทั้งหมดจะได้ว่า

$$\theta = \frac{1.16 \times 10^{-10}}{7.85 \times 10^{-9} \times 3.79 \times 10^{-3}} \left\{ (1.5 - 0.4286) + 0.4286 \ln \left( \frac{0.4286}{0.11} \right) \right\}$$

ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมดจะเท่ากับ  $6.45$  วินาที

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ชูติวัต อรรถบุรณวงศ์ เกิดวันที่ 26 พฤศจิกายน พ.ศ. 2532 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนอัสสัมชัญ สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

