

การกักเก็บแอนโธไซยานินจากผลหม่อนด้วยการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สุญญากาศ

นายชนากร ศรีรัตนธรรม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

ENCAPSULATION OF ANTHOCYANIN FROM MULBERRY USING SPRAY DRYING
UNDER VACUUM

Mr. Tanakorn Srirattanatam

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกักเก็บแอนโทไซยานินจากผลหม่อนด้วยการ

อบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สุญญากาศ

โดย

นายชนากร ศรีรัตนธรรม

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธารวัช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวราจารย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธารวัช)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วัชชัย ชรินพานิชกุล)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.อุรา รักษ์ตานนท์ชัย)

ชนากร ศรีรัตนธรรม : การกักเก็บแอนโทไซยานินจากผลหม่อนด้วยการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สุญญากาศ. (ENCAPSULATION OF ANTHOCYANIN FROM MULBERRY USING SPRAY DRYING UNDER VACUUM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. อภินันท์ สุทธิธารวัช, 120 หน้า.

กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมในการเตรียมผลิตภัณฑ์ในรูปของผง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการผลิตมีความไม่ยุ่งยาก มีต้นทุนต่ำ โดยเป็นวิธีการผลิตอนุภาคจากสารละลายหรืออิมัลชัน โดยการระเหยตัวทำละลายออกจากละอองที่ผ่านการพ่นฝอยออกมา โดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวให้พลังงานในการระเหยและทำให้แห้ง โดยส่วนใหญ่การอบแห้งแบบพ่นฝอยใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงกว่าจุดเดือดของตัวทำละลาย ทั้งนี้เนื่องจากต้องทำให้ตัวทำละลายระเหยออกไปภายในเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งทำให้สารบางชนิดที่สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำสลายตัวระหว่างกระบวนการ เช่น สารจำพวกวิตามิน โปรไบโอติกแบคทีเรีย เอนไซม์ ทำให้มีแนวคิดในการเตรียมผงแห้งจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้ความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศ เพื่อลดอุณหภูมิที่ต้องใช้ในการทำให้แห้ง เพื่อป้องกันการสลายตัวของสารดังกล่าวข้างต้น โดยในการทดลองนี้จะศึกษาการกักเก็บสารแอนโทไซยานินจากผลหม่อนเป็นสารต้นแบบ โดยใช้แป้งมอลโตเด็กทรีนที่มีค่า DE10 เป็นสารห่อหุ้ม โดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความดันสุญญากาศ ที่ 0.34, 0.54, 0.74 และ 0.93 บรรยากาศและ อุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสถานะในการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำที่ความดันนั้น จากการทดลองพบว่าที่ความดันบรรยากาศและการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ไม่มีผงแห้งออกมาจากระบบ แต่สำหรับที่สถานะความดันต่ำกว่าบรรยากาศและอุณหภูมิ 40-70 องศาเซลเซียส จะได้ผงแห้งออกมาที่ถึงเก็บผลิตภัณฑ์ถึงแม้ว่าอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากการลดความดันของระบบลงจะทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น โดยสังเกตได้จากค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกมีค่าลดลงเมื่อความดันระบบลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งที่สุญญากาศจะมีลักษณะกลมผิวเรียบ ซึ่งจะแตกต่างจากการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ผงแป้งที่ได้จะปรากฏรอยเหี่ยวย่นอย่างชัดเจน ผงแป้งมีขนาดใหญ่กว่าการอบแห้งความดันบรรยากาศ ปริมาณความชื้นในผงแป้งจะอยู่ที่ร้อยละ 8-10 ปริมาณแอนโทไซยานินที่กักเก็บได้อยู่ในช่วงร้อยละ 90-98 ซึ่งมากกว่าอาศัยการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สถานะปกติ

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

547022221 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : MULBERRY/ANTHOCYANIN / SPRAY DRYING / VACUUM

TANAKORN SRIRATTANATAM: ENCAPSULATION OF ANTHOCYANIN FROM
MULBERRY USING SPRAY DRYING UNDER VACUUM. ADVISOR: ASST.
PROF. APINAN SOOTTITANTAWAT, D.Eng., 120 pp.

Spray-drying process is commonly use in industry for producing the powder products. This process is most common and a cheap method. Spray drying was used to produce powder from solution or emulsion. The solvent is evaporated from the sprayed droplet by hot gas to form the dried solid powder. The temperature used in the spray drying is normally higher than the boiling point temperature of solvent since the solvent have to quickly evaporate from the sprayed droplet in a limited time. However, most of the heat sensible materials such as vitamin probiotic and enzyme are degraded during the spray drying. Therefore, the spray drying process at low temperature at vacuum pressure is investigated to prevent the degradation of those sensitive materials. In this study, the anthocyanin as a model of heat sensible material which was extracted from mulberry experiment was encapsulated in maltodextrin with DE10 by spray drying under the vacuum conditions. The pressure used was 0.34, 0.54, 0.74 and 0.93 atm with drying temperature at 40, 50, 60 and 70 °C. From the experiment, at the atmospheric pressure with the air inlet temperature lower than 100 °C, the dried powder could not be obtained. However, at vacuum pressure with drying temperature of 40-70 °C, the dried powder could be obtained in the product pot even the temperature used was lower than the boiling point temperature of water. The decreasing of pressure increased the drying rate which could be observed by the decreasing of wet bulb temperature of the air with the decreasing of pressure. The spherical powder was obtained from both ambient and vacuum pressure. However, the size of powder from vacuum conditions was larger with smoother surface comparing to the sherive surface of the powder from ambient pressure at 160 °C. The moisture content was about 8-10 %. The retention of anthocyanin during spary drying process was 90-98 % which was higher than the conventional conditions of 160 °C.

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

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

Academic Year : ..2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ได้รับความช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.อภิรักษ์ สุทธิธรรวัช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำแก้ไขปัญหาและวิเคราะห์งานวิจัยจนสำเร็จเป็นอย่างดี ขอขอบคุณ ผศ.ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์ ประธานกรรมการ รศ.ดร.ชวิชัย ชรินพานิชกุล ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา ดร.อุรษา รัศมีตานนท์ชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับความช่วยเหลือตั้งแต่การตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ให้คำปรึกษาแนะนำตลอดจนแก้ไขเพิ่มเติมส่วนที่บกพร่องของงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ ขอขอบคุณ นายกิจชัย กาญจนประภากุล พี่ๆเพื่อนๆและน้องๆทุกคนในศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีอนาคต ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูลในการทำวิจัยข้อคิดเห็นต่างๆ และกำลังใจที่มอบให้ต่อเนื่องเสมอมา รวมถึง คุณกฤษณิศา ภัทรโชติเสวต ที่คอยให้ความช่วยเหลือดำเนินการด้านการเงินในการซื้ออุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีอนาคต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ รวมถึงพี่ๆในห้องปฏิบัติการ สำหรับการอำนวยความสะดวกในด้านสถานที่ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับงานวิจัยครั้งนี้

จึงขอกล่าวนามและแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กลไกในการอบแห้ง.....	5
2.1.1 วิธีการให้ความร้อน	6
2.1.2 กลไกการอบแห้งการระเหยของความชื้น	7
2.1.3 การคำนวณอัตราการอบแห้ง.....	8
2.1.4 ไซโครเมตริกส์ชาร์ท.....	11
2.2 การอบแห้งแบบพ่นฝอย.....	13
2.2.1 หัวฉีดแบบต่างๆ	14
2.2.2 การไหลของอากาศในห้องอบแห้ง	15
2.2.3 มวลและอุณหภูมิของหยดสารละลาย	17
2.2.4 การแยกผลิตภัณฑ์ออกจากอากาศ.....	18
2.2.5 การเกิดอนุภาคของแข็งในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย.....	19
2.2.6 การอบแห้งแบบพ่นฝอยแบบต่างๆ	20
2.2.6.1 การอบแห้งแบบพ่นฝอยด้วยไอร้อนยิ่งยวด	20

บทที่	หน้า
2.2.6.2 การอบแห้งแบบพ่นฝอยแบบแนวนอนที่แบ่งเป็น 2 ช่วง	20
2.2.6.3 การอบแห้งแบบพ่นฝอยด้วยอากาศความชื้นต่ำ	22
2.2.6.4 การอบแห้งเยือกแข็งแบบพ่นฝอย	23
2.2.6.5 การอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สูญญากาศ	24
2.3 ผลหม่อน	27
2.4 แอนโธไซยานิน	29
2.5 เทคโนโลยีการเก็บสารสำคัญ	32
2.6 การกักเก็บสารสกัดแอนโธไซยานินด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย	33
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	35
3.1 วัสดุและสารเคมี	35
3.2 วิธีการทดลอง	35
3.2.1 การเตรียมสารสกัดแอนโธไซยานินจากผลหม่อน	35
3.2.2 การเตรียมสารในการอบแห้งแบบพ่นฝอย	35
3.2.3 การอบแห้งแบบพ่นฝอย	36
3.2.4 การหาปริมาณร้อยละผลที่ได้	37
3.2.5 การตรวจหาปริมาณสารแอนโธไซยานิน	37
3.2.6 การวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค	39
3.2.7 การวัดความชื้นในผงแป้ง	40
3.2.8 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาค	41
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	42
4.1 การคำนวณพลังงานและเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้ง	42
4.1.1 การคำนวณพลังงานที่ต้องใช้ในการอบแห้ง	43
4.1.1.1 การคำนวณที่อุณหภูมิกับความดันต่างๆ	43
4.1.1.2 การคำนวณที่ความเข้มข้นแป้งกับความดันต่างๆ	45
4.1.1.3 การคำนวณที่อัตราการไหลสายป้อนกับความดันต่างๆ	46
4.1.2 การคำนวณเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง	46
4.1.2.1 การคำนวณที่อุณหภูมิกับความดันต่างๆ	50
4.1.2.2 การคำนวณที่ความเข้มข้นแป้งกับความดันต่างๆ	51
4.1.2.3 การคำนวณที่อัตราการไหลสายป้อนกับความดันต่างๆ	53

บทที่	หน้า
4.1.2.4 การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่สภาวะสูญญากาศกับที่ สภาวะอากาศความชื้นต่ำ.....	54
4.2 ผลของอุณหภูมิและความดัน	56
4.2.1 ผลต่อลักษณะรูปร่างพื้นฐานของผงแป้ง	56
4.2.2 ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค	63
4.2.3 ผลต่อปริมาณความชื้นในผงแป้ง	67
4.2.4 ผลต่อปริมาณแอนโทไซยานินที่เหลืออยู่ในผงแป้ง	68
4.2.5 ผลต่อร้อยละผลได้	70
4.3 ผลของปริมาณความเข้มข้นผงแป้งในสารสกัดแอนโทไซยานินและความดัน	72
4.3.1 ผลต่อลักษณะรูปร่างพื้นฐานของผงแป้ง	72
4.3.2 ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค	78
4.3.3 ผลต่อปริมาณความชื้นในผงแป้ง	82
4.3.4 ผลต่อปริมาณแอนโทไซยานินที่เหลืออยู่ในผงแป้ง	83
4.3.5 ผลต่อร้อยละผลได้	85
4.4 ผลของอัตราการป้อนสารและความดัน	87
4.4.1 ผลต่อลักษณะรูปร่างพื้นฐานของผงแป้ง	87
4.4.2 ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค	94
4.4.3 ผลต่อปริมาณความชื้นในผงแป้ง	97
4.4.4 ผลต่อปริมาณแอนโทไซยานินที่เหลืออยู่ในผงแป้ง	98
4.4.5 ผลต่อร้อยละผลได้	100
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	103
5.1 สรุปผลการวิจัย	104
5.2 ข้อเสนอแนะ	105
รายการอ้างอิง	104
ภาคผนวก	108
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	120

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ตารางแสดงการเปรียบเทียบการพ่นฝอยกับการพ่นฝอยเยื่อแข็งแบบต่างๆ..... 24
2.2	คุณสมบัติต่างๆของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50 %..... 25
2.3	ส่วนประกอบทางเคมีของผลหม่อน (ต่อน้ำหนักแห้ง 100 กรัม) 28
2.4	ส่วนประกอบทางเคมีของผลหม่อนสุกสีดำของพันธุ์ต่างๆ. 29
4.1	อัตราการไหลและเวลาที่สารอยู่ในห้องอบ..... 49
ก.1	อุณหภูมิและความชื้นอากาศขาเข้าที่อุณหภูมิต่างๆ อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นแป้งร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก..... 109
ก.2	อุณหภูมิและความชื้นอากาศขาเข้าที่ความเข้มข้นแป้งกับความดันต่างๆ อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C สำหรับระบบสุญญากาศอุณหภูมิก๊าซร้อน 160 °C สำหรับระบบปกติ..... 110
ก.3	อุณหภูมิและความชื้นอากาศขาเข้าที่อัตราการป้อนสารกับความดันต่างๆ ความเข้มข้นแป้งร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C สำหรับระบบสุญญากาศอุณหภูมิก๊าซร้อน 160 °C สำหรับความดันบรรยากาศ..... 111

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันกับสถานะของน้ำ..... 5
2.2	แผนภาพการอบแห้งด้วยวิธีการนำความร้อน..... 6
2.3	ความชื้นและอุณหภูมิของอนุภาคในระหว่างกระบวนการอบแห้ง..... 7
2.4	ไซโครเมทริกส์ชาร์ท 11
2.5	ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย..... 13
2.6	หัวฉีดแบบหมุน 14
2.7	หัวฉีดแบบแรงดัน..... 14
2.8	หัวฉีดแบบสองของไหล 15
2.9	การไหลของอากาศในห้องอบแห้งแบบต่างๆ..... 16
2.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิและมวลของหยดสารละลายใน กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย..... 17
2.11	กลไกการเกิดอนุภาคจากหยดสารละลาย..... 19
2.12	ระบบการอบแห้งแบบพ่นฝอยในแนวนอน 21
2.13	ระบบการอบแห้งแบบพ่นฝอยในแนวนอน 2 ชั้นตอน 21
2.14	ระบบการอบแห้งแบบพ่นฝอยด้วยความชื้นต่ำ 22
2.15	กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเยือกแข็ง..... 23
2.16	กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเยือกแข็งพร้อมกับฟลูอิดไดซ์เบด 24
2.17	ภาพตัวอย่างเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยในสภาวะสุญญากาศ..... 25
2.18	ภาพผลหม้อน..... 27
2.19	โครงสร้างทั่วไปของแอนโรไซยานิน 30
2.20	ภาพแสดงการดูดกลืนแสงของแอนโรไซยานินด้วยวิธีพีเอชดีฟเฟอเรนเชียล 30
2.21	ภาพแสดงการเปลี่ยนโครงสร้างของแอนโรไซยานินที่ค่า pH 1.0 และ 4.5..... 31
2.22	การกักเก็บรูปแบบต่างๆ 33
3.1	เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ติดตั้งเครื่องทำความร้อนกับบีมสุญญากาศ..... 36
3.2	เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer..... 38
3.3	เครื่อง Laser Diffraction Analyzer 39
3.4	เครื่อง Thermogravimetric Analyzer 40

ภาพที่	หน้า
3.5	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 41
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการไหลในการอบแห้งโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ.. 42
4.2	พลังงานที่อากาศร้อนให้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที..... 44
4.3	พลังงานที่อากาศร้อนให้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ 44
4.4	พลังงานที่อากาศร้อนให้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้งต่างๆ อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 °C 45
4.5	พลังงานที่อากาศร้อนให้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอย อัตราการ ป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 160 °C ความดันบรรยากาศ 46
4.6	พลังงานที่อากาศร้อนให้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 50 °C 47
4.7	พลังงานที่อากาศร้อนให้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 50 °C ความดันบรรยากาศ 47
4.8	เวลาที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที..... 50
4.9	เวลาที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ 51
4.10	เวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C..... 52
4.11	เวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 160 °C ความเข้มข้นแป้งต่างๆ 52
4.12	เวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C. 53
4.13	ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้น แป้ง 40 %wt ที่อุณหภูมิ 160 °C ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อนสารต่างๆ..... 54
4.14	ภาพแสดงเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C อุณหภูมิอากาศขาเข้า 30 °C ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ความดันบรรยากาศ 55

ภาพที่	หน้า
4.15 ภาพแสดงเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C อุณหภูมิอากาศขาเข้า 30 °C ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ที่ความดันต่างๆ.....	55
4.16 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย ที่อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นแป้ง 40 % โดยน้ำหนัก ความดันบรรยากาศ.....	56
4.17 การเกิดรอยเหี่ยวย่นบนผิวอนุภาค	58
4.18 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 40 °C อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที	59
4.19 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที.....	60
4.20 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 60 °C อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที	61
4.21 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 70 °C อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที	62
4.22 ขนาดของผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิอากาศร้อนต่างๆ.....	63
4.23 การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ	64
4.24 การขยายอนุภาคเนื่องจากความดัน.....	64
4.25 ขนาดของผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 40°C ที่ความดันต่างๆ.....	65
4.26 การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 40°C ที่ความดันต่างๆ.....	65
4.27 ขนาดของผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 0.34 atm ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อนต่างๆ.....	66

ภาพที่	หน้า
4.28	การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 0.34 atm ที่อุณหภูมิต่างๆ..... 66
4.29	ปริมาณความชื้นในผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ 67
4.30	ปริมาณความชื้นที่อยู่ในผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที 68
4.31	ปริมาณแอนไฮไดรด์ที่กักเก็บได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ..... 69
4.32	ปริมาณแอนไฮไดรด์ที่กักเก็บได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที 70
4.33	ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาทีความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ..... 71
4.34	ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที 72
4.35	ลักษณะพื้นฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิเข้า 160 °C ความดันบรรยากาศ.... 73
4.36	การเสีรูปร่างกลมของอนุภาคที่ความเข้มข้นแป้งต่ำ..... 74
4.37	ลักษณะพื้นฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้ง 20 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C 75
4.38	ลักษณะพื้นฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้ง 30 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C 76
4.39	ลักษณะพื้นฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C 77
4.40	การเสีรูปร่างกลมเมื่ออัตราการระเหยสูง 78

ภาพที่	หน้า
4.41	ขนาดของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้งค่าต่างๆ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 160 °C..... 79
4.42	การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้งค่าต่างๆ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 160 °C..... 79
4.43	ขนาดของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 50 °C ความเข้มข้นแป้ง 20 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันต่างๆ 80
4.44	การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเข้มข้นแป้ง 20 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันต่างๆ..... 80
4.45	ขนาดของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้งค่าต่างๆ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 0.34 atm ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C 81
4.46	การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้งค่าต่างๆ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 0.34 atm ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C..... 81
4.47	ปริมาณความชื้นในผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้งต่างๆ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 160°C 82
4.48	ปริมาณความชื้นที่อยู่ในผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ที่อุณหภูมิ 50 °C อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที..... 83
4.49	ปริมาณแอนไฮไดรต์ที่กักเก็บได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 160°C ความดันบรรยากาศ ความเข้มข้นแป้งค่าต่างๆ 84
4.50	ปริมาณแอนไฮไดรต์ที่กักเก็บได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราการ ป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50°C..... 85
4.51	ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้งต่างๆ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 160 °C 86

ภาพที่	หน้า
4.52 ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C	87
4.53 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ อุณหภูมิอากาศเข้า 160 °C ความเข้มข้นแป้ง 40 wt%	88
4.54 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความ เข้มข้นแป้ง 40 % อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิฮีเตอร์ 50 °C.....	90
4.55 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความ เข้มข้นแป้ง 40 % อัตราการป้อนสาร 4.5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิฮีเตอร์ 50 °C.....	91
4.56 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความ เข้มข้นแป้ง 40 % อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิฮีเตอร์ 50 °C.....	92
4.57 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความ เข้มข้นแป้ง 40 % อัตราการป้อนสาร 7.5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิฮีเตอร์ 50 °C.....	93
4.58 ขนาดของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความ เข้มข้นแป้ง 40%wt ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 160 °C ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อนสารที่อัตราเร็วต่างๆ	94
4.59 การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้ง แบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 160 °C อัตราการป้อนสารต่างๆ	95
4.60 ขนาดของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 50 °C ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันต่างๆ	95
4.61 การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันต่างๆ.....	96
4.62 ขนาดของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ อุณหภูมิ 50 °C ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันต่างๆ.....	96
4.63 การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ อุณหภูมิ 50 °C ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันต่างๆ.....	97

ภาพที่	หน้า
4.64 ปริมาณความชื้นที่อยู่ในผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 160 °C ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อนสารต่างๆ.....	97
4.65 ปริมาณความชื้นที่อยู่ในผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้ง 40%wt ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C.....	98
4.66 ปริมาณแอนโคโนซานินที่กักเก็บได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 160°C ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อนสารต่างๆ.....	99
4.67 ปริมาณแอนโคโนซานินที่กักเก็บได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50°C.....	100
4.68 ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้น แป้ง 40%wt ที่อุณหภูมิ 160 °C ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อนสารค่าต่างๆ.....	101
4.69 ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้น แป้ง 40 %wt ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50°C.....	102
ข.1 ไชโครเมตริกส์ชาร์ทสำหรับที่ค่าความดันต่างๆ.....	118
ข.2 โมนอกราฟของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ.....	119

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบต่างๆ เพื่อทำการระเหยตัวทำละลายที่มีอยู่ในวัสดุที่ชื้นหรือเปียกเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งที่มีความชื้นอยู่น้อย วิธีการอบแห้งมีการใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อลดปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอาหาร เพื่อลดการเติบโตของแบคทีเรียทำให้การเก็บรักษาอาหารสามารถทำได้ยาวนานขึ้น การอบแห้งในอุตสาหกรรมมีวิธีต่างๆอยู่มากมายเช่น ฟลูอิดไดซ์เบด การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งเยือกแข็ง การอบแห้งแบบพ่นฝอย การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ โดยวิธีหนึ่งที่นิยมในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ให้ได้เป็นผงแห้งจากสารที่เป็นของเหลวคือกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

วิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมากเนื่องจากเป็นวิธีที่มีการใช้กันมาอย่างยาวนานกระบวนการผลิตไม่ยุ่งยากมีต้นทุนถูกและใช้เวลาในการอบแห้งไม่นานการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะเป็นวิธีการผลิตอนุภาคจากสารละลายหรืออิมัลชัน โดยการระเหยน้ำออกจากละอองน้ำที่ผ่านการพ่นฝอยออกมาโดยปกติก๊าซที่ให้ความร้อนจะใช้อากาศเป็นสารให้ความร้อนแต่ในบางกรณีจะใช้ก๊าซเฉื่อยเช่นไนโตรเจนในการให้ความร้อนกรณีที่เป็นสารที่สามารถเกิดการระเบิดได้เช่นกรณีใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายโดยสารละลายจะถูกพ่นฝอยเพื่อสร้างละอองขนาดเล็กของสารละลาย ละอองของสารละลายที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวที่มากทำให้สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนกับแก๊สร้อนได้ทำให้เกิดตัวทำละลายเกิดการระเหยอย่างรวดเร็วซึ่งมีใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหารอุตสาหกรรมยาหรือใช้ในการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยา[1]

เนื่องจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูง [2] (160-200 องศาเซลเซียส) ทำให้สารบางชนิดที่สลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนสลายตัว เช่นสารจำพวกวิตามิน โปรไบโอติกแบคทีเรีย เอนไซม์ ดังนั้นจึงได้มีทดลองการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สุญญากาศเพื่อลดอุณหภูมิที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำออกไป[3] เพื่อป้องกันการสลายตัวของสารหรือการเสื่อมสภาพของแบคทีเรีย [4,5] การอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สุญญากาศจะทำการลดความดันให้ต่ำกว่าบรรยากาศโดยจะใช้ปั๊มสุญญากาศดูดอากาศออกไปจากห้องอบทำให้เกิดสภาวะสุญญากาศขึ้น ซึ่งในสภาวะนี้อากาศที่ให้ความร้อนจะมีอยู่ในปริมาณที่น้อยจึงต้องทำการติดตั้งเครื่องทำความร้อนเพื่อให้พลังงานความร้อนเพิ่มเติม เพื่อใช้ในการระเหยน้ำออกไป

ในการทดลองการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สุญญากาศจะใช้ผลหม่อน (mulberry) ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ในประเทศไทยปลูกหม่อนเพื่อนำใบหม่อนมาเป็นอาหารเลี้ยงตัวไหมเพื่อนำมาผลิตเป็นผ้าไหม และยังมีผลพลอยได้จากการปลูกต้นหม่อนคือผลหม่อน ผลหม่อนเป็นผลไม้ที่อุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุ ซึ่งผลหม่อนนี้เมื่อยังไม่สุก จะมีสีแดงและรสชาติเปรี้ยว เมื่อสุกจะมีสีม่วงหรือดำมีรสหวาน สามารถนำมารับประทานสด อบแห้งเพื่อให้เก็บได้นานขึ้น หรือนำไปแปรรูปเป็นอาหารได้หลายชนิดเช่น น้ำผลหม่อน ไวน์ ทำแยม นำไปผลิตสีผสมอาหาร ฯลฯ นอกจากสี สัน รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการแล้ว ผลไม้ชนิดนี้จะมีสารที่มีประโยชน์หลายชนิด ได้แก่ ฟีนอลิก (Phenolics), ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) วิตามินบี 6 ช่วย บำรุงเลือด ตับ ไต มีวิตามินเอช่วยบำรุงสายตา และมีสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) คือ แอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ซึ่งแอนโทไซยานินเป็นสารที่ให้สีม่วงแดง มีประโยชน์ในการช่วยด้านการอักเสบ ลดความเสี่ยงในการเป็นโรคหัวใจและหลอดเลือด และป้องกันการเกิดมะเร็ง ฯลฯ ผลหม่อนเป็นผลไม้ที่นิยมปลูกกันมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยในจังหวัด นครราชสีมา ขอนแก่น บุรีรัมย์ สุรินทร์ และเพชรบูรณ์ [6]

สารแอนโทไซยานินที่มีในผลหม่อนสามารถสลายตัวได้เมื่อเวลาผ่านไป โดยจะขึ้นอยู่กับกระบวนการเก็บรักษา อุณหภูมิ การยืดอายุของสารแอนโทไซยานินให้สามารถเก็บได้นานขึ้นมีหลายวิธี โดยวิธีการที่นิยมกันมากคือเทคนิคการกักเก็บซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยเทคนิคนี้อาศัยการนำสารมาห่อหุ้ม (wall) สารสำคัญที่ต้องการกักเก็บ (core) เพื่อป้องกันสารที่สลายตัวได้ง่ายให้ไม่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งสารแอนโทไซยานินนี้สามารถสลายตัวได้ง่ายจากแสงแดด ความร้อน pH ออกซิเจน โดยสารที่จะนำมาใช้ในการห่อหุ้มนั้นแบ่งได้เป็นหลายประเภท เช่น โปรตีน ไขมัน กัม และคาร์โบไฮเดรต [7] ซึ่งเป็นสารที่นิยมในการนำมาทำการกักเก็บในอุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากสามารถนำมารับประทานได้ โดยสารกลุ่มคาร์โบไฮเดรตนี้ส่วนใหญ่จะใช้เป็นแป้ง เช่น แป้งมอลโตเดกซ์ตริน (Maltodextrin) แป้งชนิดนี้จะเป็นพวกน้ำตาล โมเลกุลคู่ (Oligosaccharide) สามารถผลิตได้จากการไฮโดรไลซิสสารพวกสตาร์ช มีความหวานปานกลางถึงไม่หวานเลย แป้งชนิดนี้จะมีค่า DE (dextrose equivalents) หลายค่าตั้งแต่ 3-20 ยิ่งมีค่ามากโมเลกุลจะยิ่งสั้นและมีความหวานมากกว่า มอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารที่สามารถละลายน้ำได้และปกป้องสารที่ถูกกักเก็บจากสภาวะแวดล้อมได้ [8,9]

ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สุญญากาศ และศึกษาการกักเก็บแอนโทไซยานินในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สุญญากาศ โดยจะทำการอบแห้งแบบพ่นฝอยในสภาวะสุญญากาศเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้นแป้ง และอัตรา

การป้อนสาร ที่มีผลต่อรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ขนาดและการกระจายตัว ความชื้นของผงแป้ง ปริมาณแอนโรโซยานินที่กักเก็บได้ และร้อยละของผงแป้งที่ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สุญญากาศที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ผงแป้งที่ได้

1.2.2 เพื่อศึกษาการกักเก็บสารแอนโรโซยานินที่สกัดจากผลหม่อนด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สุญญากาศ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะใช้สารสกัดแอนโรโซยานินที่ได้มาจากผลหม่อน(ไร่กำนันจุล จังหวัดเพชรบูรณ์) โดยมีน้ำปราศจากไอออน (Deionize Water) เป็นตัวทำละลาย และใช้แป้งมอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE 10 เป็นสารห่อหุ้ม โดยจะศึกษาอิทธิพลของความดัน อุณหภูมิ ความเข้มข้นของแป้งมอลโตเดกซ์ตริน อัตราการป้อนสาร โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับการอบแห้งที่ความดันปกติ

1.3.1 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งแบบพ่นฝอยในช่วง 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของสุญญากาศในการอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยจะลดความดันลงไปเป็น 0.93 ,0.74, 0.54 และ 0.34 บรรยากาศ (atm)

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของแป้งมอลโตเดกซ์ตรินในช่วง 20, 30, และ 40% โดยน้ำหนัก

1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนสารในการอบแห้งแบบพ่นฝอยในช่วง 3, 4.5 , 6 และ 7.5 มิลลิลิตรต่ออนาที

โดยผลที่จะศึกษาได้แก่

-ลักษณะรูปร่างพื้นฐานของผงแป้งที่ได้

-ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงแป้ง

-ความชื้นที่มีอยู่ในผงแป้งที่ผ่านการอบแห้งแบบพ่นฝอย

-ปริมาณแอนโทไซยานินที่กักเก็บได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

-ปริมาณผลได้ของผงแป้งที่ได้มาจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยในสถานะสุญญากาศ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

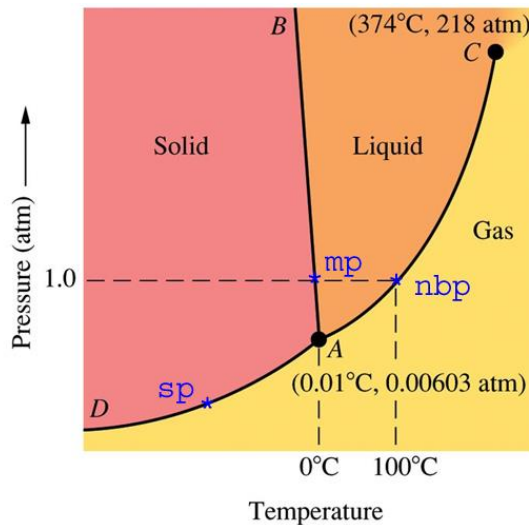
สามารถหาความเป็นไปได้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สถานะสุญญากาศ และสามารถลดอุณหภูมิที่ต้องใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อจะสามารถนำไปใช้เพื่อทำการกักเก็บสารที่ไม่สามารถทนความร้อนได้ชนิดอื่น เพื่อลดการสูญเสียสารสำคัญในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย และสามารถหาคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยในสถานะสุญญากาศได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กลไกในการอบแห้ง [10]

วิธีการในการระเหยน้ำออกจากอนุภาคจะมี 2 วิธี คือ การกลายเป็นไอ (Vaporization) และการระเหย (Evaporation) โดยการกลายเป็นไอจะเกิดขึ้นเมื่อความดันไอของของเหลวบริเวณผิวหน้าของแข็งมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำถึงจุดเดือด การระเหยจะสามารถลดจุดเดือดให้ต่ำลงได้เมื่อความดันลดลง ซึ่งถ้าความดันต่ำกว่าจุดร่วมสาม (Triple point, จุด A) สถานะของเหลวจะไม่สามารถอยู่ได้และของเหลวจะอยู่ในสถานะของแข็ง การให้ความร้อนจะทำให้เกิดการระเหิดจากของแข็งไปเป็นไอโดยตรงซึ่งจะเกิดในกรณีของการอบแห้งเยือกแข็ง



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันกับสถานะของน้ำ [11]

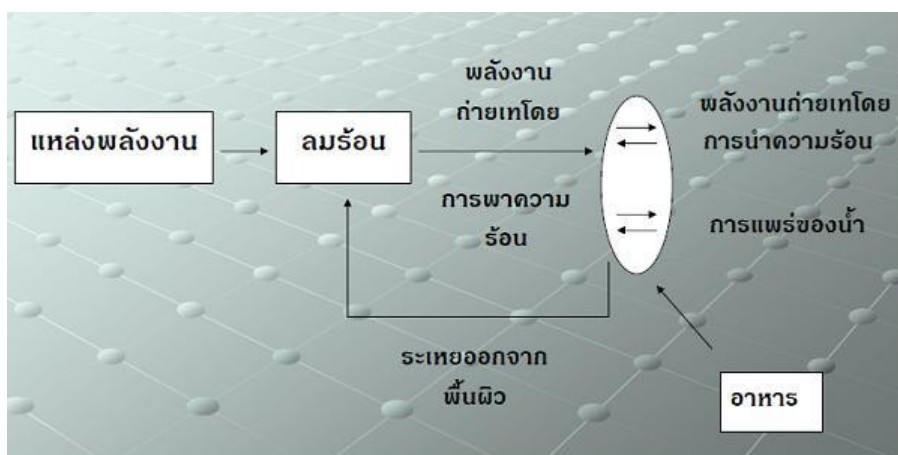
อีกวิธีหนึ่งคือ การระเหย การแห้งจะเกิดจากการพาของอากาศ ทำได้โดยการผ่านอากาศร้อนไปที่ผลิตภัณฑ์ อากาศจะมีอุณหภูมิต่ำลงจากการเสียพลังงานไปในการระเหยความชื้นในผลิตภัณฑ์ โดยความชื้นจะถ่ายเทจากผลิตภัณฑ์ไปที่อากาศและถูกพาออกไป ในกรณีนี้ความดันไออิ่มตัวของของเหลวเหนือของแข็งจะน้อยกว่าความดันบรรยากาศ

2.1.1 วิธีการให้ความร้อนแก่อนุภาคจะมี 3 วิธี

1) การพา

การพาเป็นกระบวนการพื้นฐานในการอบแห้งอนุภาค โดยความร้อนจะมาจากอากาศหรือก๊าซที่ไหลผ่านเหนือของแข็ง ความร้อนที่ใช้ในการระเหยจะมาจากการพาความร้อนไปที่ผิวหน้าของอนุภาคทำให้ความชื้นระเหยออกไป ส่วนความชื้นที่ถูกระเหยจะไหลไปกับอากาศที่ให้ความร้อน โดยกระบวนการนี้จะเรียกการอบแห้งโดยตรง โดยอัตราการระเหยในช่วงแรกจะมีอัตราการระเหยคงที่ ผิวหน้าของอนุภาคจะมีอุณหภูมิประมาณกระเปาะเปียก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ ในช่วงต่อมาอัตราการระเหยจะลดลงและอุณหภูมิสูงขึ้นจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ต้องคิดในกรณีที่สารสลายตัวได้ง่ายเมื่อสัมผัสความร้อน

การอบแห้งด้วยการพาความร้อนโดยปกติจะใช้อากาศเป็นตัวให้พลังงานความร้อนโดยจะให้พลังงานกับอากาศเพื่อนำไปให้กับวัตถุที่ต้องการอบแห้งอีกทีหนึ่งเมื่ออากาศสูญเสียความร้อนไปจะทำให้อุณหภูมิจากอากาศต่ำลงและความชื้นที่ระเหยออกมาจะไปอยู่กับอากาศร้อนทำให้อากาศขาออกมีความชื้นมากขึ้น



รูปที่ 2.2 แผนภาพการอบแห้งด้วยวิธีการนำความร้อน [12]

2) การนำ

การนำเป็นการอบแห้งแบบทางอ้อมซึ่งจะเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่บางหรือมีความเปียกมาก ความร้อนที่ใช้ในการระเหยจะผ่านมาจากผิวหน้าของอุปกรณ์ให้ความร้อน น้ำที่ระเหยไปจะถูกพาออกไปทางระบบสูญญากาศหรือก๊าซ พลังงานที่สูญเสียไปกับอากาศในการให้การอบแห้งด้วยการพานั้นจะมีมากกว่าการอบแห้งด้วยการนำ ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนจะต่ำกว่าการอบแห้งด้วยการนำ

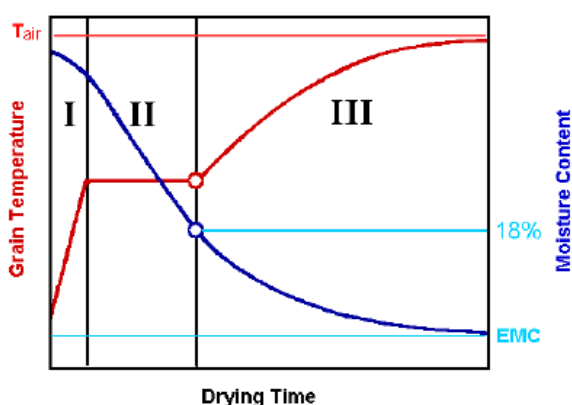
3) การแผ่รังสี

การแผ่รังสีจะใช้คลื่นหลักไฟฟ้าในการให้ความร้อนซึ่งจะมีความยาวคลื่นตั้งแต่คลื่นแสงไปจนถึงคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งการดูดกลืนคลื่นจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น คลื่นแสงจะไม่สามารถผ่านผิวหนังของอนุภาค รังสีอินฟราเรดจะถูกใช้อบแห้งผิวเคลือบ แผ่นบาง และฟิล์ม โดยพลังงานจะถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของน้ำ ซึ่งจะใช้พลังงานในการอบแห้งน้อยกว่า แต่จะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง ดังนั้นเทคนิคนี้จะเหมาะกับการใช้กับวัสดุที่มีราคาแพง หรือเอาความชื้นที่เหลืออยู่ในปริมาณน้อยที่เอาออกยากออกไป

2.1.2 กลไกการอบแห้งการระเหยของความชื้น [13]

ในเม็ดอนุภาคความชื้นจะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนที่อยู่ผิวหน้ากับส่วนที่อยู่ข้างใน เม็ดอนุภาค ความชื้นที่อยู่บนผิวหน้าจะสามารถระเหยได้อย่างรวดเร็วเมื่ออนุภาคสัมผัสกับอากาศร้อน ส่วนความชื้นที่อยู่ข้างในจะระเหยได้ช้ากว่าเนื่องจากต้องเคลื่อนที่จากด้านในมาที่ผิวหน้า ดังนั้นการระเหยความชื้นที่ผิวหน้ากับความชื้นที่ด้านในจะมีอัตราการระเหยที่แตกต่างกัน ทำให้มีอัตราการระเหยที่แตกต่างกันในช่วงเวลาต่างๆที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งอัตราการระเหยจะเป็นอัตราการลดลงของความชื้นในอนุภาคระหว่างกระบวนการอบแห้ง

รูปที่ 2.3 จะแสดงความชื้นที่มีอยู่ในวัสดุและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาต่างๆ จากรูปจะเห็นได้ว่าอัตราการอบแห้งไม่ได้คงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและอุณหภูมิก็เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาด้วย



รูปที่ 2.3 ความชื้นและอุณหภูมิของอนุภาคในระหว่างกระบวนการอบแห้ง [13]

กระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง

ช่วงที่ 1 ช่วงเพิ่มอุณหภูมิ (อัตราการระเหยประมาณ 0)

ช่วงแรกเป็นช่วงที่อนุภาคสัมผัสกับอากาศร้อน จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในเม็ดอนุภาค ความร้อนส่วนใหญ่ที่ได้รับมาจะถูกนำไปใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของอนุภาคจนถึงอุณหภูมิในการอบแห้ง

ช่วงที่ 2 อัตราการระเหยคงที่ (อัตราการระเหยคงที่)

เมื่ออนุภาคมีอุณหภูมิถึงจุดที่โซบแห้ง น้ำจะเริ่มระเหยจากผิวหน้าของอนุภาค ในช่วงนี้พลังงานที่ได้รับมาจะถูกนำไปใช้ในการระเหยความชื้นที่ผิวของอนุภาคซึ่งปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไปจะคงที่ในช่วงเวลานี้ ซึ่งจะถูกระบุว่าช่วงที่มีอัตราการระเหยคงที่ ในช่วงเวลานี้อุณหภูมิจะคงที่

ช่วงที่ 3 อัตราการระเหยลดลง (อัตราการระเหยจะลดลงตามเวลา)

เมื่อเวลาผ่านไปความชื้นที่อยู่ที่ผิวหน้าของอนุภาคจะหมดไปความชื้นจากด้านในจะเคลื่อนที่มาที่ผิวด้านนอก อัตราการระเหยในช่วงนี้จะไม่คงที่ แต่จะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป พลังงานความร้อนบางส่วนจะถูกใช้ไปในการเพิ่มอุณหภูมิของอนุภาค

อัตราการระเหยและอุณหภูมิ

อัตราการระเหยในช่วงที่อัตราการระเหยคงที่สามารถเพิ่มอัตราการระเหยได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิหรือเพิ่มปริมาณอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง ในช่วงที่อัตราการระเหยลดลงการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนจะไม่ช่วยการระเหยแต่จะทำให้อุณหภูมิของอนุภาคเพิ่มขึ้นและอาจทำให้อนุภาคเสียหายได้ ดังนั้นการใช้อุณหภูมิอากาศร้อนที่สูงขึ้นควรใช้ในช่วงที่อัตราการระเหยคงที่และใช้อุณหภูมิต่ำลงในช่วงที่มีอัตราการระเหยตกลง

2.1.3 การคำนวณอัตราอบแห้ง[14]

เงื่อนไขของอัตราอบแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือเงื่อนไขภายนอกของการอบแห้งและเงื่อนไขภายในของวัสดุเอง เงื่อนไขภายนอกคือการถ่ายเทความร้อน ความชื้นในตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง เงื่อนไขภายในจะเป็นองค์ประกอบรูปร่าง อัตราส่วนความชื้น อัตราส่วนความชื้นสมดุลย์ของวัสดุเอง โดยการคำนวณอัตราอบแห้งจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือช่วงที่ความเร็วของอัตราอบแห้งคงที่ (R_c) ช่วงอัตราอบแห้งคงที่โดยปกติอัตราอบแห้ง จะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขภายนอกวัสดุ โดยในกรณีนี้วัสดุได้รับความร้อนจากลมร้อน

อุณหภูมิของผิววัสดุจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก t_w โดยปริมาณความร้อนที่ได้รับต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยจะเท่ากับ $h_c(t-t_w)$ สามารถคำนวณ R_c (kg/m²s) ได้จากสมการ

$$R_c = \frac{h_c(t-t_w)}{\lambda} \quad (2.1)$$

h_c = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์ม (W/m²K), t = อุณหภูมิอากาศร้อน (°C), t_w = อุณหภูมิกระเปาะเปียก (°C), λ = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg) แต่ถ้าแบ่งความสนใจไปที่มวลสมการจะเป็น

$$R_c = k(H_w - H) \quad (2.2)$$

k คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (kg/m²ΔHs) H คือความชื้น (humidity) ของลมร้อน (kg steam/kg dry gas) H_w คือความชื้นอิ่มตัว (saturated humidity) ที่อุณหภูมิ t_w

การประมาณค่าของ h_c สามารถทำได้โดยจะขึ้นกับสภาพการสัมผัสระหว่างวัสดุกับลมร้อน

ในกรณีของลูกวัสดุทรงกลมโคจรอยู่กับลมร้อน

$$Nu = 2 + 0.65Re^{1/2}Pr^{1/3} \quad (2.3)$$

Nu = ตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) = $\frac{h_c D_p}{k_g}$

Re = ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number) = $\frac{D_p u \rho_g}{\mu_g}$

Pr = ตัวเลขพรานด์ทิล (prandtl number) = $\frac{C_p \mu_g}{k_g} = 0.7$ สำหรับก๊าซสองอะตอมและอากาศ

D_p = เส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลม (m), k_g = ความนำความร้อนของลมร้อน (W/mK), μ_g = ความหนืด (viscosity) ของลมร้อน (N/m²), C_p = ความจุความร้อนที่ความดันคงที่ (kJ/kgK) u คือความเร็วลมร้อน (m/s) ρ_g คือความหนาแน่นของลมร้อน (kg/m³)

หลังจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ซึ่งเป็นช่วงที่อัตราเร็วของการอบแห้งลดลง R_d ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและวิธีการอบแห้ง วัสดุมีทั้งประเภทที่ไม่ดูดความชื้น ประเภทที่ดูดความชื้น (วัสดุมีรูพรุน) รูปร่างของวัสดุมีทั้งแบบเม็ดและผง แบบสะเก็ด แบบแผ่น แบบของเหลว การให้ความร้อนก็มีทั้งแบบพาความร้อน การนำความร้อน หรือการแผ่รังสีความร้อน วัสดุอบแห้งที่ถูกกวนอยู่ตลอดเวลา หรือการอบแห้งของหยดของเหลว ในกรณีความเร็วของการอบแห้งที่ลดลง มักจะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนความชื้น โดยจะสามารถแทนผลการอบแห้งอย่างคร่าวๆ ได้ด้วยเส้นตรง

$$R_d = R_c \frac{F}{F_c} \quad (2.4)$$

$F = w - w_c$, $F_c = w_c - w_e$, w = อัตราส่วนความชื้น, w_c = อัตราส่วนความชื้นวิกฤต, w_e = อัตราส่วนความชื้นสมดุล

$$\theta_d = \frac{W F_c}{A R_c} \int_{F_1}^{F_2} -dF/F = \frac{W F_c}{A R_c} \ln \frac{F_c}{F_2} \quad (2.5)$$

เวลาที่ใช้ในการอบแห้งในช่วงความเร็วคงที่จาก $w = w_1$ ถึง $w = w_c$

$$\theta_c = \frac{W}{AR_c} (F_1 - F_c) = \frac{W}{AR_c} (w_1 - w_c) \quad (2.6)$$

ดังนั้นเวลาทั้งหมดที่ต้องใช้ในการอบแห้งจาก w_1 ผ่าน w_c ถึง w_2 ได้จาก

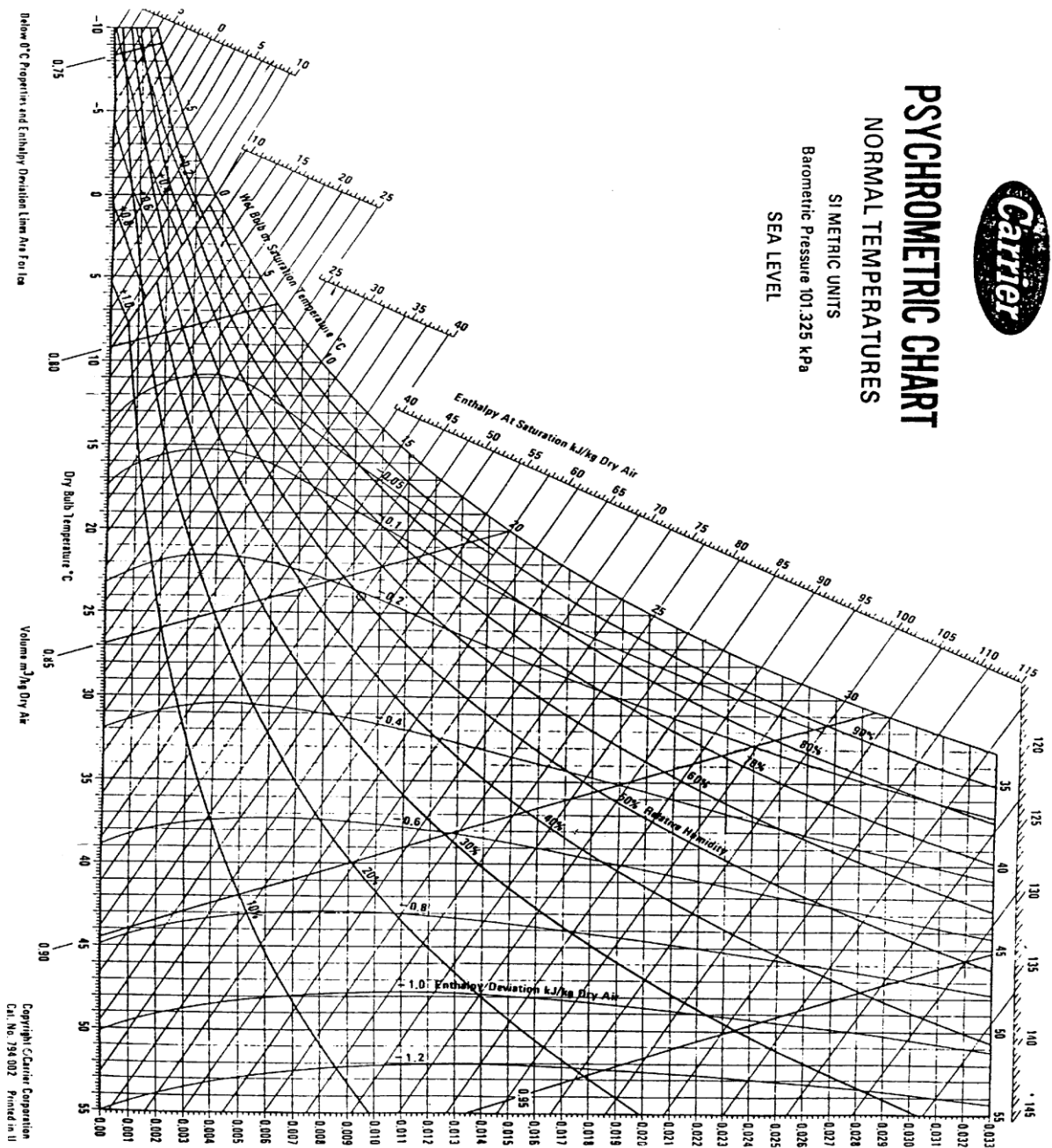
$$\theta = \theta_c + \theta_d = \frac{W}{AR_c} \left\{ (F_1 - F_c) + F_c \ln \left(\frac{F_c}{F_2} \right) \right\} \quad (2.7)$$

Θ = เวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด (s), Θ_c = เวลาที่ใช้ในการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (s), Θ_d = เวลาที่ใช้ในการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (s), W = น้ำหนักแห้งของสาร (kg),

A = พื้นที่ผิวของสารละลาย (m^2), $F_1 = w_1 - w_e$, $F_2 = w_2 - w_e$, $F_c = w_c - w_e$, w_1 = อัตราส่วนความชื้นก่อนอบแห้ง w_2 = อัตราส่วนความชื้นหลังอบแห้ง, w_c = อัตราส่วนความชื้นวิกฤต, w_e = อัตราส่วนความชื้นสมดุล

2.1.4 ไชโครเมตริกส์ชาร์ท (Psychrometric Chart) [15,16]

ไชโครเมตริกส์ชาร์ทเป็นกราฟที่แสดงถึงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกต่างๆของอากาศชื้น โดยจะใช้เพื่อช่วยคำนวณในการอบแห้งที่ใช้อากาศในการให้ความร้อน ซึ่งสามารถอ่านค่าอุณหภูมิ ความชื้น ความหนาแน่น พลังงานได้ โดยจะใช้คุณสมบัติ 2 อย่างของอากาศที่ต้องการอ่านค่าเพื่อหาคุณสมบัติอื่นๆ



รูปที่ 2.4 ไชโครเมตริกส์ชาร์ท [15]

คุณสมบัติต่างๆของไซโครเมตริกส์ชาร์ท

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง(dry bulb temperature) เป็นอุณหภูมิที่สามารถอ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ในสภาพที่ไม่มีน้ำอยู่ที่ผิวหน้า โดยปกติอุณหภูมิของอากาศจะอ้างถึงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะแห้งจะอ่านจากเส้นที่ลากในแนวตั้งไปชนกับสเกลอุณหภูมิด้านล่าง ซึ่งอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจากซ้ายไปขวา โดยปกติอุณหภูมิจะมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

อุณหภูมิกระเปาะเปียก(wet bulb temperature) เป็นอุณหภูมิที่มีความสัมพันธ์กับความชื้นในอากาศ อุณหภูมิกระเปาะเปียกจะอ่านจากเทอร์โมมิเตอร์ที่มีสำลีเปียกหุ้มอยู่ อุณหภูมิกระเปาะเปียกโดยปกติจะต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งจะเท่ากันในกรณีที่อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100%

ความชื้นสัมพัทธ์(relative humidity) จะหาจากปริมาณความชื้นอิมตัวกับปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ ถ้าอากาศมีไอน้ำอยู่ปริมาณสูงสุดเท่าที่รับได้จะเรียกว่าอากาศอิมตัว ที่อากาศอิมตัวนี้จะเรียกว่ามีความชื้นสัมพัทธ์ 100% ความชื้นสัมพัทธ์จะหาจากปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอากาศเทียบกับปริมาณน้ำที่สามารถรับได้เมื่อสถานะอิมตัว

จุดน้ำค้าง(dew point) คืออุณหภูมิที่อากาศจะมีไอน้ำอิมตัว เป็นจุดที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง จุดน้ำค้างจะเป็นจุดที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 100% บนไซโครเมตริกส์ชาร์ท

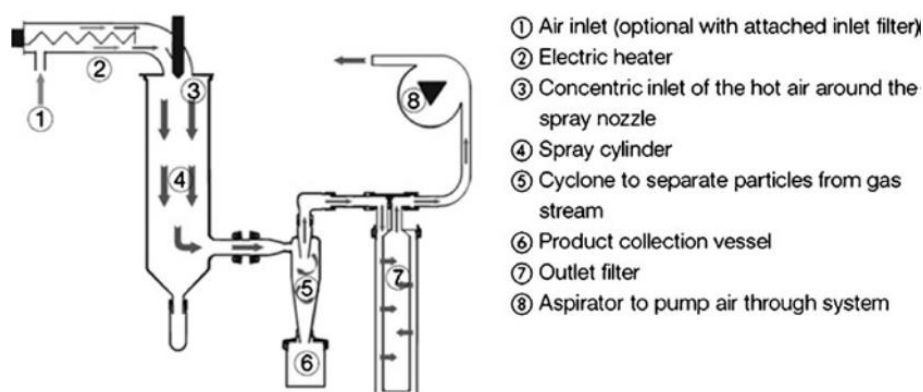
เอนทาลปี(enthalpy) จะคำนวณมาจากพลังงานทั้งหมดที่มีในอากาศ โดยพลังงานจะมาจาก ความร้อนสัมผัส (sensible heat) และความร้อนแฝง (latent heat) ความร้อนสัมผัสของอากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ ความร้อนแฝงจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในอากาศ โดยอากาศที่มีพลังงานเท่ากันสามารถเป็นได้ทั้งอากาศแห้งที่ร้อน(มีพลังงานจากความร้อนสัมผัสเยอะ)หรืออากาศเย็นที่ชื้น(มีพลังงานจากความร้อนแฝงเยอะ) เส้นเอนทาลปีโดยปกติจะเป็นเส้นเดียวกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก

ปริมาณความชื้น(moisture content) จะคิดจากปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ โดยจะคิดเป็นน้ำหนักไอน้ำต่อน้ำหนักอากาศแห้ง

ปริมาตรจำเพาะ(specific volume) เป็นปริมาตรของอากาศที่น้ำหนักของอากาศค่าหนึ่ง โดยจะคิดเป็นลูกบาศก์เมตรต่อน้ำหนักอากาศแห้ง

2.2 การอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) [1,7]

การอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) เป็นวิธีการที่มีการใช้มาอย่างยาวนานในอุตสาหกรรมนิยมนำใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมยา เพื่อผลิตอนุภาคที่เป็นผงแห้ง โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการผลิตอนุภาคจากสารละลาย หรือ อิมัลชัน โดยจะให้ป้อนสารละลายผ่านหัวฉีดหัวฉีดจะทำให้สารละลายกลายเป็นละอองของเหลวไหลผ่านไปห้องอบแห้ง (drying chamber) ซึ่งละอองของเหลวจะสัมผัสกับอากาศร้อน โดยปกติจะใช้อากาศเป็นตัวให้ความร้อนแต่บางครั้งก็ใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน เมื่อละอองของเหลวสัมผัสกับอากาศร้อน ความร้อนจากอากาศจะถูกถ่ายเทไปที่ละอองของเหลวทำให้ตัวทำละลายระเหยออกไป ทำให้ได้อนุภาคที่เป็นของแข็งออกมา จากนั้นอนุภาคจะถูกนำไปแยกออกจากอากาศที่ไซโคลน (Cyclone) อนุภาคที่เป็นของแข็งจะตกลงไปสู่ที่เก็บสาร (Collector) และปล่อยอากาศทิ้งไปข้อดีของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยคือ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายต่ำใช้เวลาในการอบแห้งน้อย สามารถผลิตสารในปริมาณมากได้ ข้อเสียคือการใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้สารบางชนิดที่สลายตัวได้ง่ายสลายตัวในระหว่างกระบวนการอบแห้ง



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย [7]

2.2.1 หัวฉีดแบบต่างๆ

หัวฉีดที่นิยมใช้กันอยู่มี 3 แบบ

1) หัวฉีดแบบหมุน

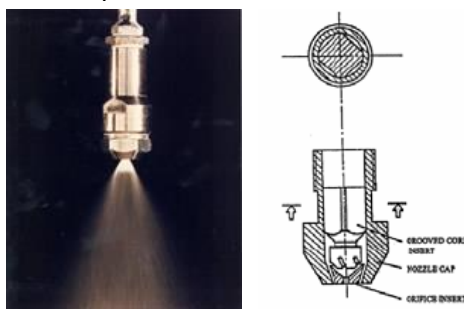
เป็นหัวฉีดที่เป็นแบบวงล้อหรือจานซึ่งสามารถหมุนได้ สารจะไหลออกมารอบหัวฉีด กลายเป็นละอองได้ด้วยความเร็วในการหมุนของหัวฉีด การไหลของสารจะไม่ใช้อากาศและเป็นระบบที่มีความดันของหัวฉีดต่ำ คุณสมบัติของสารและขนาดของอนุภาคที่อบแห้งได้จะขึ้นกับ อัตราการป้อนสาร ความเร็วในการหมุนและการออกแบบ ส่วนใหญ่อนุภาคที่อบแห้งได้จากวิธีนี้จะมีขนาด 20-150 ไมโครเมตร ความเร็วรอบวงของหัวหมุนสูงสุดที่มีการใช้กันในอุตสาหกรรม ประมาณ 300 เมตร/วินาที



รูปที่ 2.6 หัวฉีดแบบหมุน [17]

2) หัวฉีดแบบแรงดัน

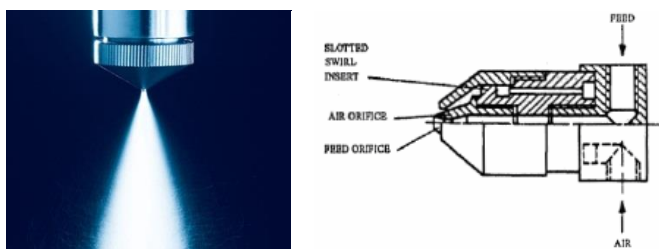
เป็นหัวฉีดที่สารที่เข้ามาจะมีความดันสูง พลังงานจากความดันจะเปลี่ยนเป็นพลังงานกล เมื่อไหลผ่านออริฟิซด้วยความเร็วที่สูงทำให้ของเหลวกลายเป็นละอองฝอยโดยไม่ต้องใช้อากาศ หัวฉีดแบบนี้ส่วนใหญ่จะใช้กับการป้อนสารปริมาณมาก โดยอนุภาคที่ได้จะมีขนาด 120-300 ไมโครเมตร ความดันสูงสุดที่ใช้ในอุตสาหกรรมประมาณ 800 atm



รูปที่ 2.7 หัวฉีดแบบแรงดัน [17]

3) หัวฉีดแบบสองของไหล

หัวฉีดแบบนี้จะมีอากาศไหลมารวมกับของเหลวในหัวฉีด อากาศจะทำให้สารแตกตัวเป็นละอองฝอย ปกติจะใช้ความดันอากาศที่ประมาณ 7 atm หัวฉีดชนิดนี้จะใช้กับสารที่มีความหนืดมาก ระบบนี้มักใช้กับ pilot plant ขนาดเล็ก เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่สูงในการดำเนินการและมีผลผลิตที่ได้น้อย



รูปที่ 2.8 หัวฉีดแบบสองของไหล [18]

2.2.2 การไหลของอากาศในห้องอบแห้งมีได้ 3 วิธี

1) การไหลแบบทางเดียวกัน (Co-current)

การไหลแบบนี้ทิศทางของการไหลของอากาศร้อนจะไหลไปในทิศทางเดียวกับสารละลายที่ป้อนเข้าไป การไหลแบบทางเดียวกันเป็นการไหลที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเมื่อเทียบกับระบบอื่น นิยมใช้กันมากกับสารที่ไม่ทนความร้อน เนื่องจากอนุภาคที่แห้งแล้วจะสัมผัสกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำลงเพราะอากาศเสียพลังงานไปในการระเหยของน้ำในช่วงล่างของห้องอบแห้ง

2) การไหลแบบสวนทางกัน (counter-current)

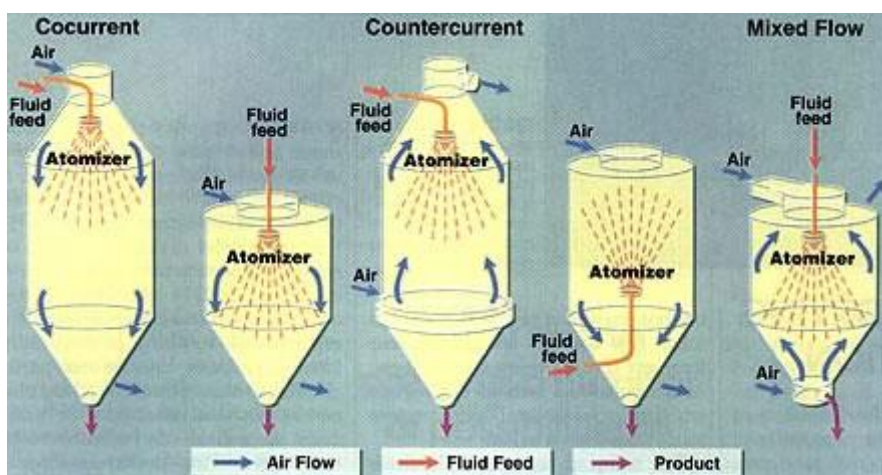
การไหลแบบนี้อากาศจะไหลมาจากด้านล่างของห้องอบแห้ง ตรงข้ามกับจุดที่ป้อนสารเข้าไป ระบบนี้มีไม่ค่อยนิยมใช้ มีผลิตภัณฑ์ไม่กี่ชนิดใช้การอบแห้งด้วยวิธีนี้ เนื่องจากการไหลของอากาศในระบบนี้มีความซับซ้อนปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบนี้จึงยังไม่เป็นที่เข้าใจนัก วิธีการไหลแบบนี้เป็นวิธีการใช้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพ แต่ควรใช้กับสารที่ทนความร้อนได้เนื่องจากอนุภาคที่แห้งแล้วจะสัมผัสกับความร้อนที่สูง วิธีนี้จะใช้กับหัวฉีดแบบแรงดันเนื่องจากการไหลของอากาศจะลดความเร็วของละอองลงทำให้สารอยู่ในห้องอบนานขึ้น

3) การไหลแบบผสม (mixed flow)

การไหลแบบผสมหัวฉีดแบบแรงดันจะพ่นสารละลายขึ้นไปทางด้านบนของห้องอบส่วนอากาศจะไหลมาจากด้านบนของห้องอบ เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในการอบแห้งสารที่ทนความร้อนได้

การระเหยของละอองเมื่อสัมผัสกับอากาศร้อน

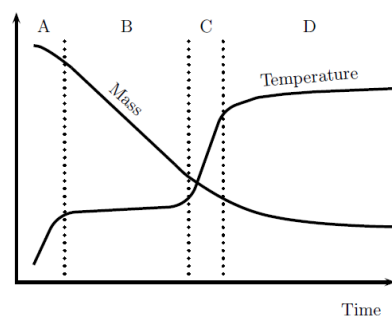
การระเหยของตัวทำละลายจะเกิดที่ชั้นฟิล์มของไอน้ำอิ่มตัว ซึ่งจะเกิดการระเหยอย่างรวดเร็วที่ผิวหน้าของละอองน้ำ โดยมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก การแห้งจะมี 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก ความชื้นที่ผิวจะระเหยไปจะมีความชื้นจากด้านในละอองแพร่เข้ามาแทนที่ผิวหน้าที่เสียความชื้นไปทำให้ผิวหน้ามีอัตราการระเหยคงที่ เมื่อความชื้นในละอองน้ำลดต่ำกว่าจุดที่จะทำให้ผิวหน้ามีความชื้นคงที่ได้ จะเรียกจุดวิกฤตซึ่งจะเกิดการก่อตัวของผนังชั้นที่ผิวหน้าของละอองน้ำ การระเหยของน้ำในช่วงนี้จะขึ้นกับการแพร่ของน้ำผ่านผนัง ผนังจะหนาขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ทำให้การระเหยเป็นไปได้ยากขึ้น อัตราการระเหยลดลงเมื่อเวลาผ่านไป



รูปที่ 2.9 การไหลของอากาศในห้องอบแห้งแบบต่างๆ [19]

2.2.3 มวลและอุณหภูมิของหยดสารละลายในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย [20]

เมื่อหยดสารละลายอยู่ในห้องอบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิตลอดเวลาซึ่งสามารถแบ่งช่วงออกได้เป็น 4 ช่วง



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิและมวลของหยดสารละลายในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย [20]

ช่วง A ช่วงแรกจะเป็นช่วงหลังจากที่พ่นสารละลายเป็นหยดของเหลว อุณหภูมิของสารละลายจะเพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้อุณหภูมิกระเปาะเปียกของสารละลาย โดยอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะต่ำกว่าอุณหภูมิของก๊าซที่ให้ความร้อนซึ่งจะขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของก๊าซ ในช่วงแรกการระเหยจะเกิดขึ้นช้ามากเนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่ที่ถ่ายเทมาจากสภาพแวดล้อมจะถูกใช้ไปกับการเพิ่มอุณหภูมิของหยดสารละลาย

ช่วง B จะเป็นช่วงที่มีการระเหยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ผิวหน้าของหยดของเหลว ซึ่งพลังงานส่วนใหญ่จะถูกใช้ไปกับการระเหยสารละลายโดยอุณหภูมิจะอยู่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก หยดสารละลายจะมีขนาดเล็กลงเนื่องจากการระเหยน้ำออกไปและสารละลายจะมีความเข้มข้นมากขึ้นภายในเม็ดของเหลวจนก่อเกิดเป็นผนัง ดังนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการระเหยจะลดลงเนื่องจากมีผนังมากันการระเหย

ช่วง C เป็นช่วงที่สารละลายเกิดการแห้ง ทำให้เกิดการก่อตัวเป็นผนังเนื่องจากสารมีความเข้มข้นมากขึ้น การก่อตัวเป็นผนังส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของสารละลายและจะห่อหุ้มสารละลายด้านในที่ยังเปียกไว้ เนื่องจากน้ำจากด้านในไม่สามารถแพร่มาที่ผิวหน้าได้ทัน ทำให้อุณหภูมิของอนุภาคมีอุณหภูมิสูงขึ้น

ช่วง D จะเป็นช่วงที่ผนังก่อตัวหนาขึ้น ไปจนถึงของเหลวด้านในจนเกิดเป็นผงอนุภาค ในช่วงนี้ อัตราการระเหยจะลดต่ำลงเพราะชั้นผนังที่หนาขึ้นจะเป็นตัวต้านทานการแพร่ของน้ำจากศูนย์กลางมายังผิวด้านนอก การลดลงของอัตราการระเหยจะทำอุณหภูมิของเม็ดอนุภาคสูงขึ้นเนื่องจากใช้พลังงานไปในการระเหยน้อยลง จนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากับกระเปาะแห้ง

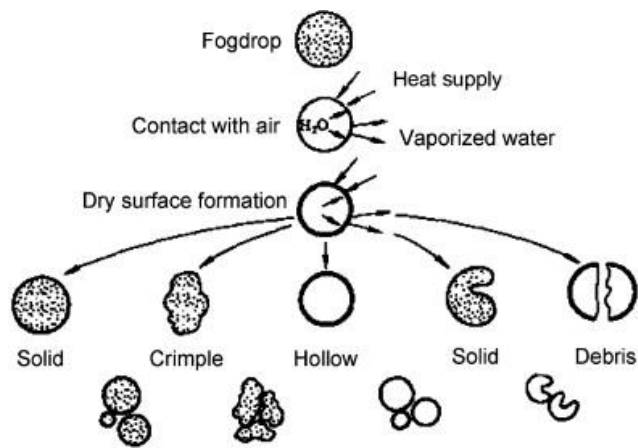
2.2.4 การแยกผลิตภัณฑ์ออกจากอากาศ

เมื่อน้ำระเหยไปแล้วเกิดอนุภาคขึ้นอนุภาคจะตกลงที่ด้านล่างของห้องอบหรือลอยไปกับอากาศแล้วไปแยกที่ไซโคลอน อนุภาคที่ถูกแยกออกจากอากาศจะตกลงไปที่ด้านล่างของไซโคลอน ส่วนอากาศจะไหลไปทางด้านบนของไซโคลอนแล้วนำไปปล่อยทิ้งที่ภายนอกโดยอาจมีผ้ากรอง (bag filter) หรือตัวดูดซับ (scrubber) ช่วยกรองอนุภาคอีกครั้งก่อนปล่อยสู่บรรยากาศภายนอก

2.2.5 การเกิดอนุภาคของแข็งในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

การเกิดอนุภาคของแข็งจะเกิดจากการระเหยของสารละลายเมื่อสารละลายสัมผัสกับอากาศร้อนในห้องอบ โดยในช่วงแรกของการระเหยอุณหภูมิที่ผิวหน้าของหยดสารละลายจะเท่ากับของสารละลายอิมัลชัน แม้ว่าความเข้มข้นของสารละลายที่บริเวณผิวหน้าจะน้อยกว่าสารละลายที่จุดอิมัลชัน การอบแห้งในช่วงแรกจะหยุดลงหลังจากความชื้นตกลงถึงจุดวิกฤต โดยจะเป็นจุดที่เริ่มเกิดของแข็งขึ้นที่ผิวหน้าของหยดสารละลาย หลังจากนั้นจะเป็นการอบแห้งในช่วงที่อัตราการอบแห้งจะตกลง โดยการแพร่ของความชื้นที่อยู่ภายในหยดสารละลายไปที่ผิวหน้าของหยดสารละลายจะช้าลงเรื่อยๆ เนื่องจากการเกิดของแข็งจะทำให้เกิดความต้านทานของการแพร่มากขึ้น โดยอัตราการแพร่ของความร้อนจะมากกว่าอัตราการแพร่ของมวล หยดสารละลายจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ถ้าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงพอจะทำให้เกิดการระเหยขึ้นภายในหยดสารละลาย ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยถ้าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งสูงกว่าจุดเดือดของสารละลาย ของเหลวข้างในหยดสารละลายจะเกิดการเดือดขึ้นและกลายเป็นไอ เมื่อของแข็งเกิดการก่อตัวเป็นเปลือกหุ้มหยดสารละลายไว้จะทำให้เกิดความดันขึ้น ซึ่งผลของความดันจะขึ้นอยู่กัลักษณะของผนังที่ก่อตัว ไอที่เกิดขึ้นจะสามารถระบายออกไปด้านนอกได้ถ้าผนังที่ก่อตัวมีลักษณะเป็นรูพรุน แต่ถ้าผนังไม่มีรูพรุนอนุภาคจะเกิดการแตกออก เวลาที่หยดสารละลายอยู่ในจุดที่ร้อนที่สุดจะสั้นและถ้าอุณหภูมิของหยดสารละลายไม่ถึงจุดเดือดความชื้นในหยดสารละลายจะเคลื่อนที่โดยการแพร่ โดยสารแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะในการอบแห้งช่วงที่อัตราการอบแห้งตกลง ถ้าหยดสารละลายก่อตัวเป็น

ผนังที่จุดวิกฤตและเป็นผนังที่ไอสามารถไหลผ่านได้ยาก อัตราการอบแห้งจะตกลงอย่างรวดเร็ว และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้าผนังที่เกิดขึ้นเป็นผนังที่มีรูพรุน ไอสามารถแพร่ออกไปจากหยดสารละลายได้ง่าย อัตราการอบแห้งจะลดลงจากการอบแห้งในช่วงคงที่ไม่มาก



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดอนุภาคจากหยดสารละลาย [1]

การเกิดอนุภาคที่มีช่องว่าง

การเกิดอนุภาคที่มีรูจะมีผลต่อความหนาแน่นของอนุภาค โดยการเกิดอนุภาคที่มีรูสามารถเกิดได้ดังนี้

- เกิดจากการก่อตัวของผนังที่ไอไม่สามารถแพร่ผ่านออกไปได้ เมื่อของเหลวได้รับความร้อนจะกลายเป็นไอในหยดของเหลวและขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิสูงขึ้น
- เกิดจากการระเหยที่เร็วกว่าการแพร่ของแข็งกลับไปภายในของหยดสารละลาย เมื่อการอบแห้งเสร็จสมบูรณ์จะเกิดช่องว่างอากาศขึ้น จะเกิดขึ้นมากในผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลึก
- เกิดจากของเหลวไหลไปที่ผิวหน้าจากแรงคาพิลลารี ทำให้จุดศูนย์กลางของหยดสารละลายเกิดเป็นช่องว่าง กลไกนี้เกิดในดินเหนียว
- เกิดจากมีอากาศเข้าไปผสมในสารละลายที่ป้อนเข้าไปเกิดเป็นช่องว่างอากาศในสารละลาย

2.2.6 การอบแห้งแบบพ่นฝอยด้วยวิธีต่างๆ[10]

2.2.6.1 การอบแห้งแบบพ่นฝอยด้วยไอร้อนยิ่งยวด (Superheated Steam Spray Drying)

การอบแห้งแบบพ่นฝอยด้วยไอร้อนยิ่งยวดเป็นกระบวนการที่มีมานานแล้ว โดย การอบแห้งแบบนี้จะมีข้อดีคือ

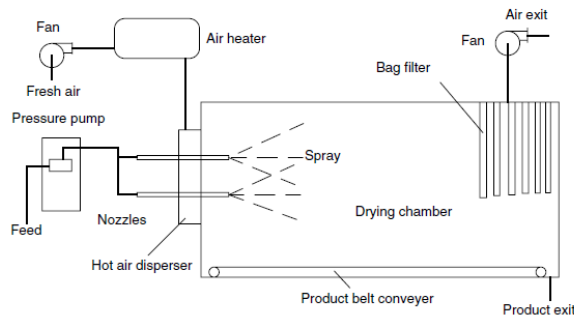
- จะไม่มีการติดไฟหรือระเบิด
 - ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
 - สามารถทำการอบแห้งได้ที่สภาวะสุญญากาศและความดันสูง
 - สามารถนำพลังงานจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอมาใช้ในการผลิตไอน้ำครั้งใหม่ได้
 - ผลิตภัณฑ์คุณภาพดีกว่าภายใต้เงื่อนไขบางอย่าง
 - ทำในระบบปิดทำให้ก่อมลพิษทางอากาศน้อยสุด
- ข้อจำกัด
- ผลิตภัณฑ์ต้องเจออุณหภูมิที่สูงกว่า
 - ต้องใช้เงินลงทุนสูงกว่าเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยอากาศร้อน
 - มีความเป็นไปได้ที่อากาศจะเข้าไปปนทำให้การนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ทำได้ยากขึ้นใน กระบวนการอัดและการควบแน่น

2.2.6.2 การอบแห้งแบบพ่นฝอยแบบแนวนอนที่แบ่งเป็น 2 ช่วง (TWO-STAGE HORIZONTAL SPRAY DRYER)

เพื่อลดความยากลำบากในการขยายขนาด การอบแห้งแบบพ่นฝอยในแนวนอน เป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกแนะนำ การอบแห้งแบบพ่นฝอยในแนวนอนมีใช้ใน โรงงานอุตสาหกรรม เพื่อใช้กับสารที่สลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนและเวชภัณฑ์ โดยจะอบแห้งในอุณหภูมิที่ต่ำซึ่ง เหมาะใช้กับเก็บสารให้กลิ่น สารที่ระเหยได้ง่าย สามารถใช้ควบคุมความเป็นรูปทรงและความหนาแน่น และสารที่เกิดการเกาะกันได้ง่าย โดยระบบนี้จะใช้พลังงานน้อยกว่าแบบตั้งฉาก การอบแห้งแบบนี้ใน โรงงานจะมีการติดตั้งถุงกรองไว้เก็บอนุภาคที่จะลอยออกไปพร้อมกับก๊าซร้อนที่ใช้แล้ว โดยอนุภาคจะถูกเก็บที่ด้านล่างของห้องอบแนวนอน โดยในทางอุตสาหกรรมระบบนี้จะใช้

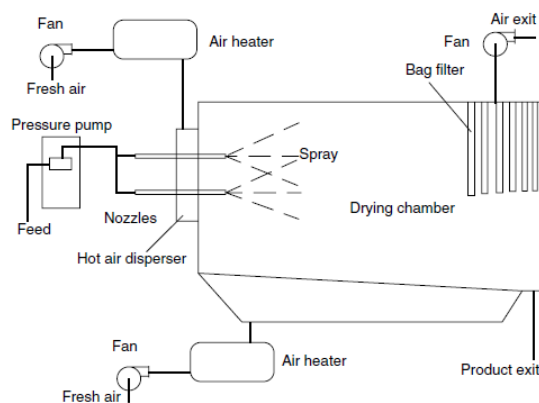
กับการอบแห้งไข่ อัลบูมิน ผงชีส นม เวบีโปรตีน ฯลฯ สารอย่างอื่นที่สามารถใช้ได้ จะมีผลิตภัณฑ์จากนม จากปลา จากเนื้อ และผลิตภัณฑ์จากผัก โดยการออกแบบจะใช้หัวฉีดหลายตัวกับตัวให้ความร้อนทางอ้อม ข้อดีของระบบนี้คือการใช้พื้นที่น้อย โรงงานมีความสูงน้อย ราคาติดตั้งและการบำรุงรักษาต่ำ สามารถควบคุมการอบแห้งแบบพ่นฝอยได้โดยอัตโนมัติ แต่ข้อมูลเกี่ยวกับหัวฉีดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค คุณภาพของผลิตภัณฑ์ยังไม่มีข้อมูลมากพอและต้องการข้อมูลจากการวิจัยอีกมาก

ภาพตัวอย่างจะแสดงในรูปที่ 2.12 สารละลายจะถูกป้อนจากปั๊มความดันสูงไปที่หัวฉีด ซึ่งหัวฉีดจะสามารถปรับได้หลายรูปแบบ ละอองฝอยจากหัวฉีดจะเคลื่อนที่ตามแนวนอนและเคลื่อนที่ลงตามแรงโน้มถ่วงของโลก ผงแห้งที่ได้ จะถูกขนส่งโดยสายพานที่ด้านล่างไปที่ไซโคลนหรือถุงกรอง



รูปที่ 2.12 ระบบการอบแห้งแบบพ่นฝอยในแนวนอน [10]

จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยแบบแนวนอนในขั้นตอนเดียว บางครั้งเวลาที่สารอยู่ในเครื่องจะไม่นานพอที่จะทำให้หยดของเหลวระเหยได้ทั้งหมด ในการแก้ปัญหานี้ได้มีข้อเสนอการอบแห้งแบบพ่นฝอยแนวนอนใน 2 ขั้นตอน ซึ่งจะมีเวลาที่สารอยู่ในเครื่องนานกว่าสำหรับสารที่ไม่สามารถทนความร้อนได้และอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ข้อแตกต่างของแบบ 2 ขั้นตอนกับแบบปกติคือจะมีการอบแห้งแบบฟลูอิด ไคซ์เบดติดไว้ที่ด้านล่างของห้องอบแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ระบบการอบแห้งแบบพ่นฝอยในแนวนอน 2 ขั้นตอน [10]

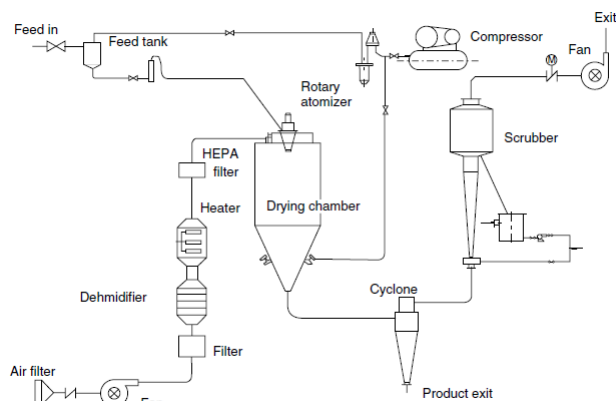
2.6.2.3 การอบแห้งแบบพ่นฝอยด้วยอากาศความชื้นต่ำ LOW HUMIDITY

SPRAY DRYING

เนื่องจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะใช้อุณหภูมิก๊าซที่สูงเป็นตัวกลางในการให้ความร้อน และมีปัญหาการเกาะติดที่ผนังของอนุภาคซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ และบางครั้งผลิตภัณฑ์จะสลายตัวจากการได้รับความร้อนสูง ซึ่งการอบแห้งเยือกแข็งก็เป็นทางเลือกหนึ่ง แต่การอบแห้งแบบเยือกแข็งมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงมาก มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและลงทุนก่อสร้างสูงกว่าการอบแห้งแบบพ่นฝอยมาก ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายมากกว่า 5-10 เท่าเทียบกับการอบแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อลดการสลายตัวของสารในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยจึงได้มีการพัฒนาการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีจุดหยดน้ำต่ำ (low dew point ,LDP) ซึ่งจะใช้อากาศที่มีจุดหยดน้ำต่ำที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมถึง 80 °C แต่มีความชื้นต่ำมาก โดยเครื่องจะแสดงในรูปที่ 2.14 ตัวเครื่องจะประกอบด้วย 4 ส่วน: กระบวนการเตรียมอากาศแห้งซึ่งจะรวมถึงการลดความชื้นในอากาศและการให้ความร้อน ระบบเตรียมสายป้อน ระบบหัวฉีดของสารละลายและระบบการอบแห้งซึ่งประกอบด้วยหัวฉีด ตัวกระจายอากาศ และห้องอบ และระบบเก็บสาร ข้อแตกต่างหลักของการอบแห้งแบบพ่นฝอยด้วยอากาศความชื้นต่ำกับการอบแห้งแบบพ่นฝอยปกติจะอยู่ที่การใช้เครื่องดักความชื้นเพื่อลดความชื้นที่ของอากาศขาเข้า โดยการแลกเปลี่ยนมวลจะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dm_p}{dt} = k_g A (H_w - H_a) \quad (2.8)$$

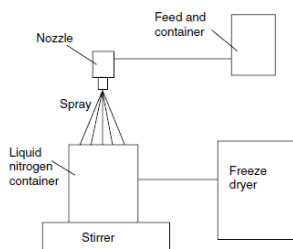
โดย dm_p/dt คืออัตราการถ่ายเทมวลจากผิวของหยดของเหลว(kg/s) k_g คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทของมวล ($kg/m^2 s$) H_w และ H_a แทนความชื้นที่ผิวหยดของเหลวและอากาศที่ให้ความร้อน (kg/kg) โดยการลดความชื้นให้ต่ำสามารถให้อัตราการถ่ายเทมวลที่สูงในอุณหภูมิที่กำหนดได้



รูปที่ 2.14 ระบบการอบแห้งแบบพ่นฝอยด้วยอากาศความชื้นต่ำ [10]

2.6.2.4 การอบแห้งเยือกแข็งแบบพ่นฝอย (SPRAY FREEZE DRYING)

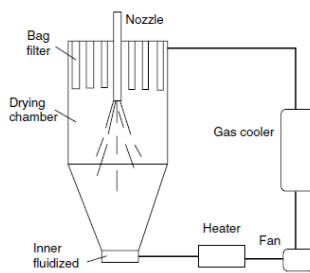
การอบแห้งเยือกแข็งเป็นเทคโนโลยีที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร เวชภัณฑ์ และชีวเคมี โดยกระบวนการนี้จะสามารถรักษาสสมบัติทางชีวภาพ ลดการสลายตัวของสารที่ทนความร้อนไม่ได้ การอบแห้งเยือกแข็งเป็นกระบวนการที่ตัวทำละลายจะถูกทำให้เป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำจากนั้นจะระเหิดกลายเป็นไอจากของแข็งไปเป็นไอภายใต้สภาวะสุญญากาศ การอบแห้งเยือกแข็งแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก แช่แข็งผลิตภัณฑ์ ระเหิดน้ำแข็ง เอาตัวทำละลายที่อยู่ในรูปไอออก ถ้าเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยกับการอบแห้งเยือกแข็งการอบแห้งเยือกแข็งจะยุ่งยากกว่ามากเนื่องจากต้องมีระบบทำความเย็น สุญญากาศ และเวลาที่ใช้ยาวนาน จากนั้นจึงได้มีการรวมกระบวนการทั้งสองเข้าด้วยกันกลายเป็นการอบแห้งเยือกแข็งแบบพ่นฝอย โดยกระบวนการจะทำโดยสารละลายจะถูกฉีดผ่านสารที่มีจุดเดือดต่ำมากเช่น ไนโตรเจนเหลวเพื่อเยือกแข็งหยุดการสลาย การกระจายของหยดของเหลวที่แข็งตัวจะถูกนำออกและอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยกระบวนการจะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.15 เนื่องจากกระบวนการนี้จะใช้เวลานานจึงเหมาะทำเป็นแบบกะมากกว่าแบบต่อเนื่อง และเหมาะใช้กับสารที่มีค่าสูง



รูปที่ 2.15 กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเยือกแข็ง [10]

จากนั้นจึงได้มีนักวิจัยเสนอการรวมการพ่นฝอยที่ความดันบรรยากาศและการอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์เบดเยือกแข็ง atmospheric spray and fluidized-bed freeze drying (ASFBFD) โดยกระบวนการจะเป็นไปดังรูปที่ 2.16 โดยระบบจะประกอบไปด้วยห้องอบแห้งหรือห้องแช่แข็ง ถังกรอง และฟลูอิดไดซ์เบด ไนโตรเจนเหลว พัดลม หัวฉีด บีม วาล์ว ท่อ กระบวนการจะเริ่มจากสารละลายจะถูกส่งจากด้านบนไปที่หัวฉีด และหัวฉีดจะทำให้สารละลายกลายเป็นละอองฝอย ละอองฝอยจะสัมผัสกับอากาศที่เย็นมากหรือไนโตรเจนและจะแข็งทันที โดยตัวกลางที่ใช้ให้ความเย็นจะเป็นอากาศหรือไนโตรเจนที่ -80°C ซึ่งจะให้ความเย็นโดยไนโตรเจนเหลวและถูกเป่าโดยพัดลมผ่านไปฟลูอิดไดซ์เบด โดยฟลูอิดไดซ์เบดจะอยู่ที่ด้านล่างสุดของห้องอบแห้ง เนื่องจากอากาศที่ใช้มีอุณหภูมิต่ำ

มากจนแห้งแข็งละอองฝอยได้ ดังนั้นคุณสมบัติต่างๆของสารจะเหมือนเดิมและตกลงมาที่ด้านล่างหรือฟลูอิดไดซ์เบดด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก อนุภาคบางส่วนจะไหลไปกับอากาศแต่จะถูกแยกจากอากาศด้วยถุงกรอง ละอองแห้งแข็งจะถูกป้อนมาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งหมดไปในกระบวนการแบบกะ



รูปที่ 2.16 กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเยือกแข็งพร้อมกับฟลูอิดไดซ์เบด [20]

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการพ่นฝอยกับการพ่นฝอยเยือกแข็งแบบต่างๆ[10]

Comparison among Four Drying Operations

	SD	FD	SFD	ASFBFD
Drying time	Short	Long	Long	Medium
Powders	Agglomerated or irregular	Cake	Spherical and porous, mono	Spherical and porous
Product quality	Medium	Good	Good	Good
Energy consumption	Low	High	Highest	Medium
Product capacity	High	Medium	Low	Medium
Operation	Continuous	Batch	Batch	Semicontinuous
Invest cost	Low	High	High	High

2.6.2.5 การอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความดันสูญญากาศ [4,5,21]

การอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความดันสูญญากาศจะใช้เพื่อลดอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหยน้ำออกไป โดยการที่ใช้ความดันต่ำลงจะช่วยลดอุณหภูมิระเปาะเปียกที่เกิดระหว่างกระบวนการระเหยน้ำได้[3] ดังตารางที่ 2.2 การลดความดันลงจะทำให้อุณหภูมิระเปาะเปียกลดลง ส่วนการเพิ่มความดันจะทำให้อุณหภูมิระเปาะเปียกเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติต่างๆของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % [3]

p , Pa	101 325	77058	105 263
t , °C	25	25	25
ϕ	50%	50%	50%
ϕ/p , bar ⁻¹	0.4935	0.6489	0.4750
p_w/p , kPa/bar	1.57	2.06	1.51
vp , m ³ bar/kg	0.8695	0.8735	0.8690
h , kJ/kg _a	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 ³ /kg	0.858	1.134	0.8256
t_{wb} , °C	17.8	17.2	18
t_d , °C	13.9	13.9	13.9

ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยในสภาวะปกติจะใช้อากาศเป็นตัวให้ความร้อน แต่ในสภาวะที่ความดันต่ำปริมาณอากาศที่ให้ความร้อนจะมีปริมาณน้อยทำให้ของเหลวไม่สามารถระเหยออกไปได้ ดังนั้นจึงต้องมีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนเพื่อให้ความร้อนเพิ่มเติม ส่วนการทำให้ความดันต่ำลงจะใช้ปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดอากาศออกไปรูปที่ 2.17 เป็นตัวอย่างเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยในสภาวะสุญญากาศของ Yutaka และคณะ [4] โดยจะติดตั้งเครื่องทำความร้อนอินฟราเรดในบริเวณใกล้หัวฉีดสาร โดยเครื่องทำความร้อนอินฟราเรดจะให้พลังงานกับวัสดุโดยตรงโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแทนอากาศร้อนที่มีอยู่น้อย อากาศจะถูกนำออกโดยใช้ปั๊มสุญญากาศซึ่งถูกติดตั้งไว้บริเวณด้านล่างของห้องอบแห้ง โดยจะมีโคแตรป (cold trap) ไว้กั้นไอน้ำก่อนเข้าปั๊ม ความดันจะใช้แมนอมิเตอร์ในการวัดโดยติดตั้งไว้ในบริเวณด้านบนของห้องอบแห้ง อุณหภูมิจะใช้เทอร์มอคัปเปิลในการวัดซึ่งจะติดตั้งไว้ในบริเวณด้านบนบนของห้องอบแห้ง บริเวณหัวฉีดสาร และบริเวณทางออกของห้องอบแห้ง

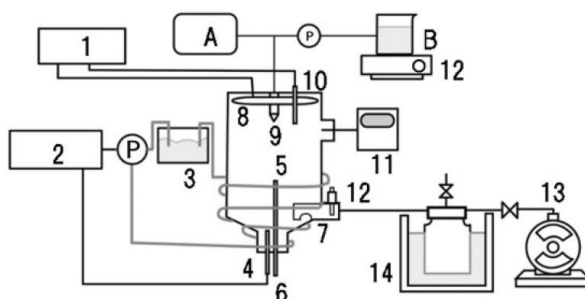


FIG. 1. EXPERIMENTAL VACUUM SPRAY DRYER
 (1 and 2): Temperature controller. (3) Water bath. (4) Temperature sensor. (5) Drying tower.
 (6) Temperature sensor. (7) Baffle plate. (8) Far Infrared Rays heater. (9) Spray nozzle.
 (10) Temperature sensor. (11) Digital manometer. (12) Temperature sensor. (13)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

รูปที่ 2.17 ภาพตัวอย่างเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยในสภาวะสุญญากาศ [4]

โดยงานวิจัยที่กล่าวถึงการอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สุญญากาศ อาทิในปี 2006 Morteza และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาผลของความดัน(760, 400, 250, และ 120 ทอร์)และอุณหภูมิ(100,200 และ 400 องศาเซลเซียส)ที่มีผลต่อรูปร่างของผงอนุภาคที่ได้ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยของแมกนีเซียมซัลเฟตกับโซเดียมคลอไรด์ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้นอัตราการระเหยจะเร็วขึ้นทำให้อนุภาคที่ได้เกิดรอยเว้าขึ้น และเมื่อศึกษาผลของความดันพบว่าขนาดของอนุภาคที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อความดันลดลงเนื่องมาจากเมื่อความดันต่ำการกระจายตัวของละอองจะไม่ค่อยดีทำให้ได้ละอองที่มีขนาดใหญ่กว่าจึงเกิดอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อน้ำระเหยออกไป แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นที่ความดันต่ำผลของการเพิ่มขนาดอนุภาคนี้จะมีน้อยลงซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของอากาศที่มากขึ้นจากแรงลอยตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในปี 2008 Yutaka และคณะ[4] ได้ทดลองการอบแห้งแบบพ่นฝอยในสภาวะสุญญากาศโดยใช้นมหมักในการทดลอง โดยในการทดลองจะใช้เครื่องทำความร้อนแบบแผ่รังสีความร้อนในการให้พลังงานแทนอากาศร้อนที่มีอยู่น้อย โดยพบว่าสามารถอบแห้งได้ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 35 องศาเซลเซียส โดยใช้ความดัน 5-8 กิโลปาสกาล อัตราการป้อนสาร 2 มิลลิตรต่อนาที เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ ATP ที่มีอยู่ในนมหมักก่อนและหลังการอบแห้งพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณค่า ATP ที่ได้จะลดลง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จะได้ค่า ATP ที่ประมาณ 30 % และเมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสขึ้นไปค่า ATP จะเหลือน้อยกว่า 5% จากนั้นในปี 2011 David และคณะ[5]ได้ทำการทดลองการอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้แบคทีเรียที่ชื่อ *Lactobacillus casei* subsp. *Paracasei* LMG P-21380 ใช้ผนังเป็นน้ำตาลทรีฮาโลส (trehalose) ผสมกับแป้งมอลโตเดกซ์ตริน DE 5 ที่อัตราส่วน 1:1 ปริมาณของแข็ง 20% โดยน้ำหนัก ใช้ความดันที่ 2.27 กับ 3.33 กิโลปาสกาล อัตราการป้อนสาร 9 มิลลิตรต่อนาที โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 20-30 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการอยู่รอดของแบคทีเรียสูงสุดที่ 70.6 % และพบว่าความดันที่แตกต่างกันไม่มีผลต่ออัตราการอยู่รอดของแบคทีเรีย

2.3 ผลหม่อน [22]



รูปที่ 2.18 ภาพผลหม่อน [23]

หม่อนเป็นไม้ยืนต้นจำพวกไม้พุ่ม อยู่ในวงศ์Moraceaeตระกูล Morusมีอยู่หลาย มีต้นกำเนิดในเขตร้อนในทวีปเอเชีย แอฟริกา และอเมริกา โดยสปีชีส์ส่วนใหญ่จะมีถิ่นกำเนิดในเอเชีย ชนิดที่พบมากมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Morus alba* Linn. ต้นหม่อนมีลำต้นที่ใหญ่ ตั้งตรง มีกิ่งก้านมาก ใบ จะมี ขนาด ความหนา และลักษณะรูปร่างของขอบใบจะแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ ใบพวกนี้จะนำไปเป็นอาหารเลี้ยงตัวไหม ดอกหม่อนมีลักษณะเป็นกลุ่มเกาะติดกันเป็นช่อ เมื่อดอกตัวเมียได้รับการผสมจะเปลี่ยนเป็นผล ซึ่งมีลักษณะเป็นช่อประกอบด้วยเมล็ดเล็กๆ จำนวนมาก ผลจะโตเป็นกลุ่มมีความยาว 2-3 เซนติเมตร มีสีแดง ถึงม่วงเข้ม สามารถรับประทานได้ มีรสหวานและมีกลิ่นที่ดี ผลไม้ชนิดนี้จะนำมารับประทานสด หรือนำมาแปรรูปใช้ทำ พาย ทาร์ต และไวน์

ประโยชน์ของต้นหม่อน

ใบ สามารถใช้เป็นอาหารของหนอนไหม เมื่อหนอนไหมที่เจริญเติบโตเต็มที่ จะนำโปรตีนในใบหม่อนไปสร้างเป็นโปรตีนผลิตเป็นเส้นไหม ซึ่งเส้นไหมที่ได้จะถูกนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตผ้าไหมที่มีความสวยงามและมีราคาแพง ใบหม่อนมีโปรตีน 18-28.8 % โดยน้ำหนักแห้งสามารถนำไปใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์บางชนิดได้เช่นในในการเป็นอาหารปลากินพืช หรือใช้เป็นส่วนผสมในอาหารสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้องบางชนิด

ผลหม่อน มีการพบว่ามีปริมาณแอนโทไซยานินสูง ในผลหม่อนแห้งจะประกอบด้วยไขมัน 63 % กรดอินทรีย์ 27 % แอลกอฮอล์ 1.6 % และพบว่า สาร cyanidin 3-O-beta-D-glucoside (C3G) ที่สกัดจากแอนโทไซยานินในผลหม่อนมีคุณสมบัติสามารถต่อต้านอาการขาดเลือดในสมองได้

ลำต้นและกิ่ง สามารถใช้เป็นไม้ใช้ในการผลิตถ่านที่ทางกีฬางานชนิดได้ ส่วนเชื้อจากเปลือก ลำต้นหรือกิ่งสามารถนำมาทำเป็นกระดาษที่มีความสวยงามเหมือนกับกระดาษสา

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบทางเคมีของผลหม่อน (ต่อน้ำหนักแห้ง 100 กรัม) [24]

ส่วนประกอบ	ผลห่าม (สีแดง)	ผลสุก (สีม่วง)
โปรตีน (protein)	2.24	1.68
คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate)	4.91	21.35
ไขมัน (fat)	1.35	0.47
แคลเซียม (calcium)	ND	0.21
ฟอสฟอรัส (phosphorus)	ND	0.07
เหล็ก (iron)	ND	43.48
วิตามิน เอ (vitamin A)	ND	25
วิตามิน บี1 (vitamin B1)	ND	50.65
วิตามิน บี2 (vitamin B2)	ND	3.66
วิตามิน บี6 (vitamin B6)	ND	930.1
วิตามินซี (vitamin C)	ND	4.16
กรดโฟลิก (folic acid)	ND	6.87
ไนอะซิน (niacin)	ND	0.72
แทนนิน (tannin)	ND	1.06
กรดมะนาว (citric acid)	4.71	1.51
เส้นใย (fiber)	ND	2.03
เถ้า (ash)	ND	1.52
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	4.05	5.9
ความชื้น (moisture)	ND	72.95

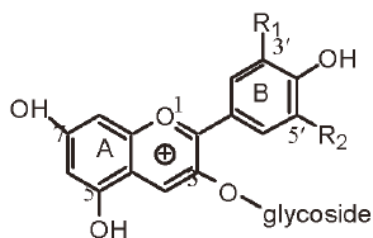
ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบทางเคมีของผลหม่อนสุกสี่คำของพันธุ์ต่างๆ [25]

พันธุ์หม่อน	โปรตีน (%)	โปรตีน เครต (%)	โปรตีน (%)	น้ำตาล (%)	ความเปรี้ยว (%)	pH	ความชื้น (%)
นครราชสีมา 60 1/	1.56	ไม่มีข้อมูล	1.47	26.31	1.39	6.00	90.27
บุรีรัมย์ 60 1/	1.26	ไม่มีข้อมูล	1.31	21.81	1.51	5.90	90.15
สายพันธุ์เชียงใหม่ 2/	11.86	61.19	3.66	11.2	1.19	4.00	16.58

2.4 แอนโทไซยานิน [26,27]

แอนโทไซยานินประกอบไปด้วยกลุ่มของสารที่ให้สีหลายกลุ่ม ซึ่งปกติจะเห็นเป็นสีส้ม สีแดง ม่วง และน้ำเงิน อยู่ในผลไม้หลายชนิด ผัก ดอกไม้ ฯลฯ แอนโทไซยานินเป็นสารที่สามารถละลายน้ำได้ สามารถสกัดออกมาได้ง่าย ซึ่งสะดวกในการนำมาผลิตอาหารที่เป็นของเหลว มีการบริโภคมายาวนานโดยปราศจากผลข้างเคียง นอกจากคุณสมบัติในการให้สีแล้วสารแอนโทไซยานินยังถูกพบว่ามีประโยชน์ต่อสุขภาพ ช่วยในการบำรุงสายตา มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ลดความเสี่ยงที่จะเกิดโรคเกี่ยวกับหลอดเลือดและหัวใจ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เป็นสิ่งที่ทำให้แอนโทไซยานินเป็นสารสีให้ที่น่าสนใจ

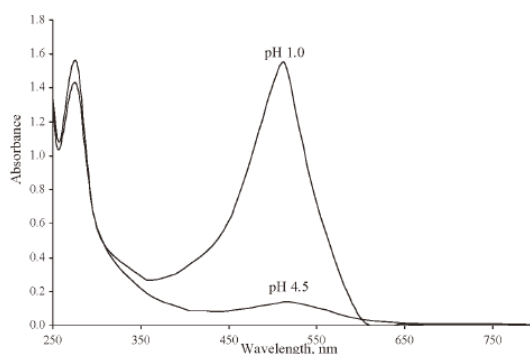
จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าโมเลกุลของแอนโทไซยานินประกอบไปด้วยไกลโคไซด์ (glycosylation) และ เอซิลเลชัน (acylation) ซึ่งความเสถียรของสารจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดค่าความเป็นกรดด่าง ความร้อน แสง แอนโทไซยานินจะมีโครงสร้างพื้นฐานอยู่ 6 แบบฟิลาโรโกนิน (pelargonidin), ไชยานิดิน (cyaniding), พีโอนิดิน (peonidin), เดลฟิริดิน (delphinidin), เพทูนิดีน (petunidin), และมัลวิดิดิน (malvidin) ซึ่งโครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนตำแหน่งไกลโคซิดิก (glycosidic) ที่ตำแหน่ง 3 หรือ 5 และยังสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเอซิลเลชันของหมู่ น้ำตาลกับกรดอินทรีย์



$R_1=R_2=H$	Pelargonidin
$R_1=OH, R_2=H$	Cyanidin
$R_1=OCH_3, R_2=H$	Peonidin
$R_1=R_2=OH$	Delphinidin
$R_1=OCH_3, R_2=OH$	Petunidin
$R_1=R_2=OCH_3$	Malvidin

รูปที่ 2.19 โครงสร้างทั่วไปของแอนโทไซยานิน[26]

การตรวจหาปริมาณแอนโทไซยานินโดยวิธีพีเอชดิฟเฟอเรนเชียล(pH differential)

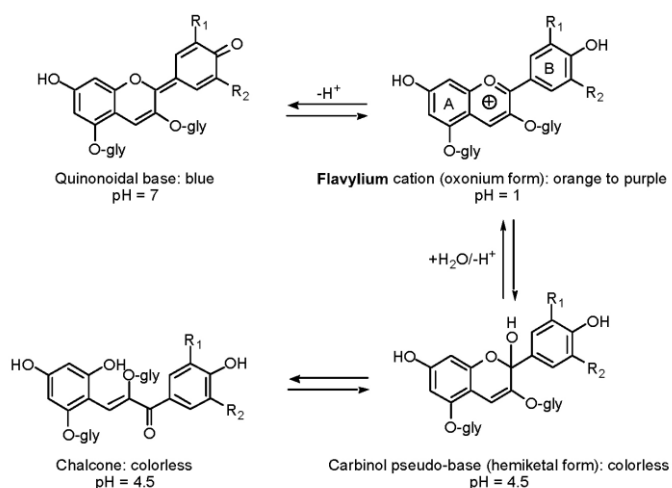


รูปที่ 2.20 ภาพแสดงการดูดกลืนแสงของแอนโทไซยานินด้วยวิธีพีเอชดิฟเฟอเรนเชียล[26]

วิธีพีเอชดิฟเฟอเรนเชียลเป็นวิธีที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อทดสอบคุณภาพของผักและผลไม้สด โดยวิธีการนี้จะเป็นวิธีการคำนวณหาปริมาณ โมโนเมอร์แอนโทไซยานิน (monomeric anthocyanin) ที่มีอยู่โดยจะแอนโทไซยานินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง anthocyanin chromophore ระหว่างค่า pH 1.0 กับ pH 4.5 โดยวิธีการนี้สามารถนำไปหาปริมาณแอนโทไซยานินในน้ำผลไม้ ไวน์ สารให้สีจากธรรมชาติ หรือเครื่องดื่มอื่นได้

โดยหลักการคำนวณหาปริมาณแอนโทไซยานินวิธีนี้จะคำนวณจากการเปลี่ยนค่าการดูดกลืนแสงที่ค่า pH 2 ค่า โดยวิธีการนี้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Sondheimer และ Kertesz โดยในครั้งแรกจะใช้ค่า pH 3.4 และ 2.0 จากนั้นนักวิจัยรุ่นต่อมาจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมและเปลี่ยนค่า pH ที่ใช้เป็น 1.0 และ 4.5 โมโนเมอร์แอนโทไซยานินเป็นโครงสร้างที่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ตามค่า pH (จะมีสีตาม โครงสร้าง ionium ที่ค่า pH 1.0 และไม่มีสีตาม โครงสร้าง

hemiketal ที่ค่า pH 4.5) ดังนั้นจะมีผลต่างในค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแอนโทไซยานินด้วย แอนโทไซยานินที่เกิดการเชื่อมและกลายเป็นโครงสร้างพอลิเมอร์ลิกส์จะไม่เปลี่ยนตามค่า pH ดังนั้นแอนโทไซยานินที่เกิดโครงสร้างพอลิเมอร์ลิกส์ไม่สามารถคำนวณหาโดยใช้วิธีนี้ได้



รูปที่ 2.21 ภาพแสดงการเปลี่ยนโครงสร้างของแอนโทไซยานินที่ค่า pH 1.0 และ 4.5 [26]

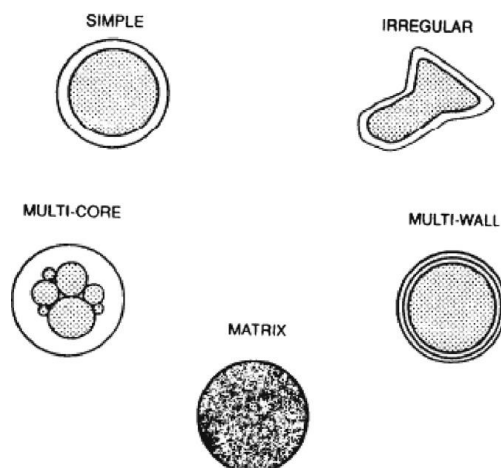
การวัดค่าการดูดกลืนแสงจะวัดที่ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลาย และการคำนวณควรใช้น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) และ molar extinction coefficient ของสารแอนโทไซยานินที่มีมากที่สุด ในจำนวนทั้งหมด เช่น โดยปกติแอนโทไซยานินในไวน์จะคำนวณโดยใช้ malvidin-3-glucoside (MW = 493.2) และใช้ molar extinction coefficient 28000 โดยปกติสารในธรรมชาติจะประกอบด้วยแอนโทไซยานินหลายชนิด และเปลี่ยนไปตามสารแต่ละชนิด การมีแอนโทไซยานินหลากหลายในธรรมชาติทำให้ไม่สามารถจำเพาะเจาะจง extinction coefficients หรือน้ำหนักโมเลกุลได้ โดยแอนโทไซยานินที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็น cyanidin-3-glucoside

2.5 เทคโนโลยีการกักเก็บสารสำคัญ (encapsulation) [7]

การกักเก็บเป็นเทคนิคในการห่อหุ้มของเหลวหรืออนุภาคไว้ด้วยสารประเภทพอลิเมอร์ โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต มีใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา ข้อดีของเทคนิคนี้ช่วยปกป้องสารสำคัญจากการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมทำให้สารสามารถทนต่อแสง ความร้อน ออกซิเจน ได้ดีขึ้น และยังช่วยควบคุมอัตราการปลดปล่อยในกรณีของอุตสาหกรรมยาทำให้สามารถใช้ยาได้โดยมีความปลอดภัยมากขึ้น เทคนิคนี้จะเป็นการนำสารมาห่อหุ้มสารสำคัญที่ต้องการเก็บไว้ โดยสารที่กักเก็บ(core)ส่วนใหญ่จะเป็นสาร วิตามิน แร่ธาตุ เอมไซม์ สารให้กลิ่นรส นำมาห่อหุ้มด้วยสารที่ห่อหุ้ม (Wall) ซึ่งสารพวกนี้ในอุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่จะใช้สิ่งที่มีมาจากธรรมชาติ เช่น พืช สัตว์ ซึ่งสามารถนำมาแบ่งเป็นหมวดใหญ่ได้ 3 หมวด คือ คาร์โบไฮเดรต พอลิเมอร์ โปรตีน ไขมัน โดยคาร์โบไฮเดรตจะเป็นหมวดที่มีคนนิยมใช้กันมากที่สุด

เทคนิคการกักเก็บแบ่งได้เป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือวิธีทางกล เช่น การอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) การอบแห้งแบบหล่อเย็น (spray cooling) การอบแห้งแบบเยือกแข็ง(spray chilling) และเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion)และวิธีทางเคมี เช่น โคแอสอร์เวชัน(coacervation) พอลิเมไรเซชัน (polymerization) โซเจล (sol-gel) การเอนแคปซูลโดยวิธีต่างๆ จะได้ลักษณะของอนุภาคและขนาดของอนุภาคออกมาหลายขนาดตั้งแต่ 0.2 ถึง 5000 ไมโครเมตร จะถูกเรียกว่าไมโครแคปซูล (Microcapsules) ถ้าขนาดใหญ่กว่า 5000 ไมโครเมตรจะเรียกว่า มาโครแคปซูล (macrocapsules) และถ้าขนาดเล็กกว่า 0.2 ไมโครเมตร จะเรียกว่านาโนแคปซูล (nanocapsules)

รูปแบบของอนุภาคที่ได้จากการกักเก็บแบ่งได้เป็นหลายรูปแบบ เช่น อนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลม (Irregular Shape) แบบแกนเดี่ยว (single core) ที่สารที่ต้องการหุ้มอยู่ข้างในล้อมรอบด้วยสารที่เป็นผนัง แบบหลายแกน (multi core) เป็นแบบที่มี สารที่ต้องการกักเก็บอยู่หลายชนิดในอนุภาค 1 เม็ด แบบผนังหลายชั้น (multi wall) เป็นแบบที่มีสารที่ต้องการกักเก็บ 1 ชนิด แล้วหุ้มด้วยผนังหลายชั้น แบบผสมเป็นเนื้อเดียว (matrix type) เป็นแบบที่สารที่ต้องการกักเก็บผสมเป็นเนื้อเดียวกับผนังเป็นเม็ดอนุภาค



รูปที่ 2.22 การกักเก็บรูปแบบต่างๆ [28]

2.6 การกักเก็บสารสกัดแอนโทไซยานินด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย

การกักเก็บสารสกัดแอนโทไซยานินจากผัก ผลไม้มีรายงานไว้มากมาย อาทิงงานวิจัยในปี 2007 ของ Seda และคณะ [2] ได้ทำการกักเก็บสารสกัดแอนโทไซยานินจากแครอทดำ โดยใช้วิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย มีอัตราการป้อนสาร 5 มิลลิลิตร/นาทิจโดยการทดลองจะใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 3 ค่าที่ 160,180,200 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อมีการใช้อุณหภูมิในการอบสูงขึ้นปริมาณแอนโทไซยานินที่กักเก็บได้จะมีปริมาณน้อยลงโดยจะมีปริมาณแอนโทไซยานินมากที่สุดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และได้ทดลองเปลี่ยนสารที่ใช้เป็นผนัง โดยใช้เป็นแป้งมอลโตเดกซ์ตริน ที่มีค่า DE ต่างกันพบว่าแป้งมอลโตเดกซ์ตรินที่มีค่า DE ต่างกันจะมีค่าการกักเก็บที่ต่างกัน โดยแป้งที่มีค่าการกักเก็บสารสูงสุดมีค่า DE 20-23 ต่อมาในปี 2010 Renata และคณะ [29] ได้ทำการกักเก็บสารแอนโทไซยานินที่สกัดมาจาก ผลอาไซ (acai) โดยใช้วิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 15 กรัม/นาทิจ โดยใช้สารที่เป็นผนัง 4 ชนิด คือ แป้งมอลโตเดกซ์ตริน DE 10 และ 20 กัมอะราบิท และแป้งมันสำปะหลัง พบว่า แป้งมอลโตเดกซ์ตรินและกัมอะราบิทจะให้ค่าการกักเก็บสารแอนโทไซยานินที่ใกล้เคียงกันและแป้งมันสำปะหลังจะให้ค่าการกักเก็บน้อยที่สุดเนื่องจากแป้งมอลโตเดกซ์ตรินและกัมอะราบิทเป็นแป้งที่สามารถละลายน้ำได้ทำให้เกิดการกักเก็บในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ส่วนแป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่ละลายน้ำได้ยากเมื่ออยู่ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะไม่เกิดการกักเก็บขึ้นแต่จะแห้งแบบเป็นผงของแป้งแยกกับผลของน้ำผลไม้ ในปี 2011 D.M. Jimenez-Aguilar และคณะ [30] ได้ศึกษาถึงความเสถียรของสารที่สกัดจากบลูเบอร์รี่โดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยมีปริมาณของแข็ง

35% โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นที่มีในเมล็ดอนุภาคจะน้อยลง และเมื่อลดอุณหภูมิลงและเพิ่มอัตราการป้อนสารปริมาณแอนโรไซยานินที่กักเก็บได้จะมีปริมาณมากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิกว้างออกมีค่าต่ำลง โดยที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส อัตราป้อนสาร 9.1 และ 9.6 มิลลิลิตร/นาฬิกา จะมีอัตราการสลายตัวของแอนโรไซยานินที่ประมาณ 4%

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 ผลหม่อนอบแห้งด้วยกระบวนการอบแห้งเยือกแข็งจากไร่กำนันจุล จังหวัดเพชรบูรณ์ พันธุ์เชียงใหม่ (Morusalba)

3.1.2 ผงแป้งมอลโตเดกซ์ตริน DE 10 (Maltodextrin) ระดับ food grade จากบริษัท CT Chemical

3.1.3 โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride, KCl) จากบริษัท Ajax Finechem (Australia)

3.1.4 โซเดียมอะซิเตท (Sodium Acetate, $\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท Ajax Finechem (Australia)

3.1.5 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 (Hydrochloric acid conc.) จากบริษัท J.T Baker

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมสารสกัดแอนโทไซยานินจากผลหม่อน

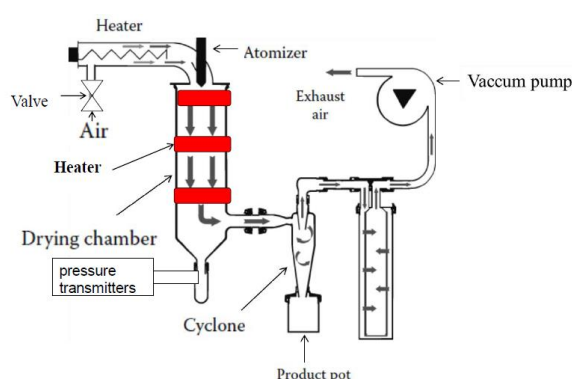
การสกัดสารแอนโทไซยานินจากผลหม่อนจะใช้วิธีการของ รุ่งนภาและคณะ[6] โดยการนำผลหม่อนอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งเยือกแข็ง จากไร่กำนันจุล มาบดให้ละเอียดด้วยครกบดยา นำผงหม่อนที่ผ่านการบดแล้วมาแล้วสกัดสารแอนโทไซยานินด้วยตัวทำละลายเป็นน้ำปราศจากไอออนที่อัตราส่วน ผงหม่อนปริมาณ 10 กรัม ต่อปริมาณน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นกวน 1 ชั่วโมง นำสารที่ได้ไปแยกเอากากตะกอนออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอนที่ความเร็วรอบ 4500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แยกส่วนที่เป็นของเหลวออกมาแล้วนำไปกรองด้วยกรวยกรองบุชเนอร์ โดยใช้กระดาษกรอง whatman No. 4

3.2.2 การเตรียมสารในการอบแห้งแบบพ่นฝอย

การเตรียมสารละลายจะเตรียมโดยนำผลแป้งมอลโตเดกซ์ตรินไปละลายในน้ำสารสกัดแอนโทไซยานิน จากนั้นนำไปปั่นกวนจนสารละลายเข้ากันเป็นเนื้อเดียว

3.2.3 การอบแห้งแบบพ่นฝอย

การปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยจะทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์บางชิ้นเพิ่มจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Buchi B290 , Switzerland) โดยจะติดตั้งปั๊มสุญญากาศแทนเครื่องสูบลม (aspirator) เพื่อดูดเอาอากาศออกเพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศ ความดันในระบบจะปรับลดลงได้ด้วยการปรับวาล์วให้อากาศไหลเข้าน้อยลง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งจะถูกคุมโดยติดตั้งเครื่องทำความร้อนแบบผ้าที่มีกำลัง 1000 วัตต์ ไว้โดยจะพันไว้รอบห้องอบเพื่อให้พลังงานในการระเหยน้ำ และติดตั้ง เครื่องวัดความดัน (pressure transmitter) ไว้ที่บริเวณด้านล่างของห้องอบเพื่อวัดความดันที่มีอยู่ในระบบ โดยห้องอบที่ใช้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.4 เซนติเมตร ปั๊มสุญญากาศของบริษัท P.V.R s.r.l รุ่น PVL 35 ที่ใช้จะมีขนาด 35 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง สามารถทำความดันต่ำสุดได้ 0.5 มิลลิบาร์



รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ติดตั้งเครื่องทำความร้อนกับปั๊มสุญญากาศ

นำสารละลายที่ผสมแป้งมอลโตเดกซ์ทรินจนเป็นเนื้อเดียวแล้ว ไปผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะต่างๆดังนี้

- อุณหภูมิเครื่องทำความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส

- ความดันลดต่ำกว่าบรรยากาศให้มีความดันที่ 0.93 ,0.74, 0.54 และ 0.34 บรรยากาศ (atm)

-ความเข้มข้นแป้งมอลโตเดกซ์ทริน 20,30,40 % โดยน้ำหนัก

-อัตราการป้อนสารที่ 3,4,5,6 และ 7.5 มิลลิลิตรต่อนาที

จากนั้นนำสารตัวอย่างที่ได้ ไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ต่อไป

3.2.4 การหาปริมาณร้อยละผลได้

การหาร้อยละผลได้จะคำนวณจากปริมาณผงแป้งที่เก็บได้เทียบกับปริมาณของแข็งที่มีทั้งหมดในสารละลายที่ทำการปั่นฝอย

3.2.5 การตรวจหาปริมาณสารแอนโทไซยานิน

การตรวจหาปริมาณสารแอนโทไซยานินจะใช้วิธีพีเอชดิฟเฟอเรนเชียล ของ Durst, R.W. และ Wrolsted ด้วยการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์บัฟเฟอร์ที่มีค่า pH 1.0 (เตรียมโดยการผสมโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.86 กรัม ลงในน้ำปราศจากไอออน 980 มิลลิลิตร) จากนั้นปรับค่า pH ด้วยกรดไฮดรอกลอริกเข้มข้นจนมีค่า pH 1.0 และเตรียมสารละลายโซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH 4.5 (เตรียมโดยการผสมโซเดียมอะซิเตท 54.43 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 960 มิลลิลิตร) จากนั้นปรับค่า pH เป็น 4.5 ด้วยกรดไฮดรอกลอริกเข้มข้น นำสารสกัดผลหม้อมาเจือจางด้วยสารละลายทั้ง 2 ด้วยอัตราส่วนสารสกัดผลหม้อมต่อสารละลายบัฟเฟอร์ 1:100 จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (UV-1700, Shimadzu, Japan) แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาว 520 และ 700 นาโนเมตรมาทำการคำนวณหาค่าปริมาณแอนโทไซยานินที่มีอยู่ในน้ำสกัดผลหม้อมตามสมการ 3.2

$$A = (A_{520} - A_{700})_{\text{pH}1.0} - (A_{520} - A_{700})_{\text{pH}4.5} \quad (3.1)$$

$$\text{ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A \times MW \times DF \times 1000)}{\epsilon \times l} \quad (3.2)$$

A_{520} = ค่าการดูดกลืนแสงที่ 520 นาโนเมตร

A_{700} = ค่าการดูดกลืนแสงที่ 700 นาโนเมตร

MW = มวลโมเลกุลของ cyanindin-3-glucoside = 449.2 กรัมต่อโมล

DF = dilution factor = 100

ϵ = molar absorptivity = 26900

l = pathlength (เซนติเมตร)

การหาปริมาณแอนโทไซยานินที่กักเก็บได้จะคำนวณจากอัตราส่วนสารแอนโทไซยานินที่มีอยู่ในผงแป้งเทียบกับแอนโทไซยานินในสารละลายโดยนำผงแป้งหนัก 0.2 กรัม ละลายในน้ำ

ปราศจากไอออน 0.3 มิลลิตร แล้วนำไปละลายในสารละลายบัฟเฟอร์ทั้ง 2 ชนิด ปริมาตร 30 มิลลิตร จากนั้นนำไปตรวจค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณแอนโทไซยานินในสารละลาย



รูปที่ 3.2 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

3.2.6 การวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

การวัดขนาดและการกระจายตัวจะใช้เทคนิคการกระเจิงด้วยแสง (Light scattering technique) ด้วยเครื่อง Laser Diffraction Analyzer (LA-950, HORIBA, Japan) โดยจะนำผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยมากระจายในสาร iso-propanol แล้วทำการวัดขนาดอนุภาคและการกระจายตัว



รูปที่ 3.3 เครื่อง Laser Diffraction Analyzer

3.2.7 การวัดความชื้นในผงแป้ง

การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นในผงแป้งจะทำการวิเคราะห์ โดยนำผงแป้งไปอบในเครื่อง Thermogravimetric Analyzer, TGA (TGA/DSC 1, Mettler Toledo, USA) โดยนำผงแป้งปริมาณ 10 มิลลิกรัมไปอบในเครื่องตั้งแต่อุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นอบทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที โดยใช้ก๊าซออกซิเจนให้ความร้อนที่อัตรา 40 มิลลิตรต่อนาที จากนั้นวัดปริมาณน้ำหนักที่หายไปหลังจากการอบแห้ง โดยในการรายงานผลจะรายงานในรูปของน้ำหนักเปียก



รูปที่ 3.4 เครื่อง Thermogravimetric Analyzer

3.2.8 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาค

วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, JSM-5800LV, JEOL, Japan) โดยการวิเคราะห์จะนำผงแป้งที่สังเคราะห์ได้ไปโรยลงบนแท่งทองเหลืองแล้วนำไปเคลือบผิวหน้าของแท่งทองเหลืองด้วยทอง เพื่อให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น จากนั้นจึงนำไปส่องดูลักษณะสัณฐานของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการวิเคราะห์ 10 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

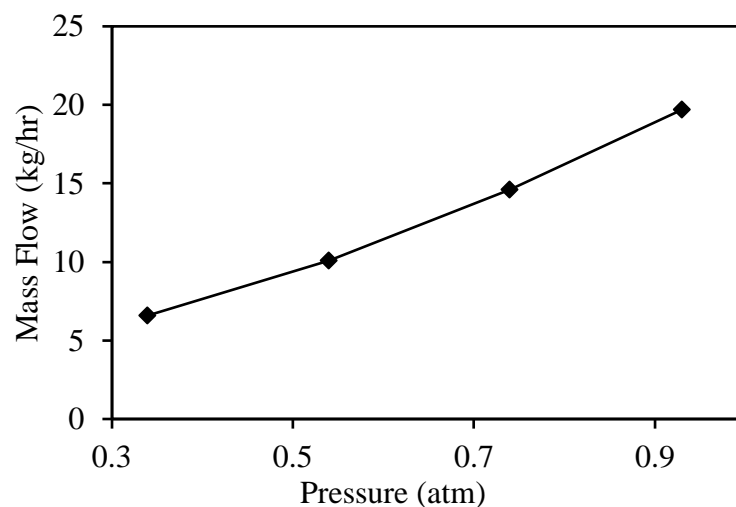
บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้จะแบ่งจากการทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นการคำนวณเพื่อหาพลังงานและเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอย 3 ส่วนที่เหลือจะเป็นผลที่ได้จากการทดลอง การอบแห้งแบบพ่นฝอยภายใต้สภาวะสุญญากาศโดยนำมาเปรียบเทียบกับสภาวะปกติ โดยจะทดลองกับสารสกัดแอนโทไซยานินจากผลหม่อน โดยใช้แป้งมอลโตเร็กตริคเป็นตัวห่อหุ้ม ซึ่งผลการทดลองแต่ละส่วนจะแสดงดังต่อไปนี้

4.1 การคำนวณพลังงานและเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้ง

ในการคำนวณพลังงานที่ต้องใช้และเวลาในการอบแห้งจะใช้ข้อมูลบางส่วนจากค่าที่วัดได้จริงจากการทดลองเช่น อัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิอากาศขาเข้า ความชื้น อุณหภูมิอากาศออกโดยข้อมูลจะแสดงในภาคผนวก ก ในการทดลองที่ความดันบรรยากาศปัมที่ใช้จะเป็นเครื่องสูบอากาศ (aspirator) ที่มากับเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยจะมีอัตราการไหลของอากาศ 42kg/hr ส่วนในสภาวะสุญญากาศจะใช้ปั๊มสุญญากาศแทน โดยปั๊มสุญญากาศเมื่อลดความดันลงปริมาณอากาศที่ไหลในระบบจะน้อยลงด้วยโดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.1 โดยจะสามารถลดความดันในระบบลงไปได้ต่ำสุดที่ 0.34 atm เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องการเก็บสารในระบบ หากลดความดันลงไปที่ปริมาณอากาศจะน้อยลงทำให้ไซโคลนทำงานได้มีประสิทธิภาพน้อยลง ทำให้มีอนุภาคหลุดออกจากไซโคลนไปติดที่ถุงกรองสาร ซึ่งการเก็บอนุภาคที่ถุงกรองจะทำได้ลำบาก



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการไหลในการอบแห้งโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ

4.1.1 การคำนวณพลังงานที่ต้องใช้ในการอบแห้ง

การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง คำนวณโดยคิดจากพลังงานที่อากาศให้มาโดยนำมาเปรียบเทียบกับพลังงานที่จำเป็นต้องใช้ในการระเหยน้ำ โดยพลังงานจากอากาศร้อนจะคำนวณจากผลต่างของเอนทาลปีขาเข้ากับขาออกของของอากาศที่ให้ความร้อน โดยสมการที่ใช้คำนวณเอนทาลปีจากสมการ 4.1

$$Q = C_s(\Delta T) + H\lambda \quad (4.1)$$

Q = เอนทาลปี (kcal/kg)

C_s = ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (kcal/kgK) = (0.24+0.46H)

ΔT = ผลต่างอุณหภูมิของอากาศกับจุดอ้างอิง ($^{\circ}\text{C}$)

H = ความชื้นที่มีในอากาศ (kg/kg dry air)

λ = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ = 597.3 kcal/kg

$$E = M(Q_{in} - Q_{out}) \quad (4.2)$$

E = พลังงานที่ได้

Q_{in} = เอนทาลปีขาเข้า (kcal/kg)

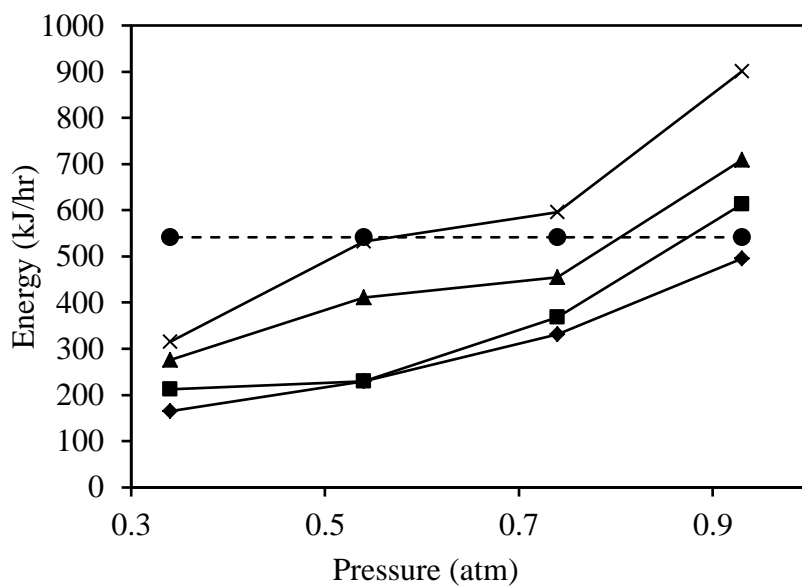
Q_{out} = เอนทาลปีขาออก (kcal/kg)

M = ปริมาณอากาศที่ไหล (kg/hr)

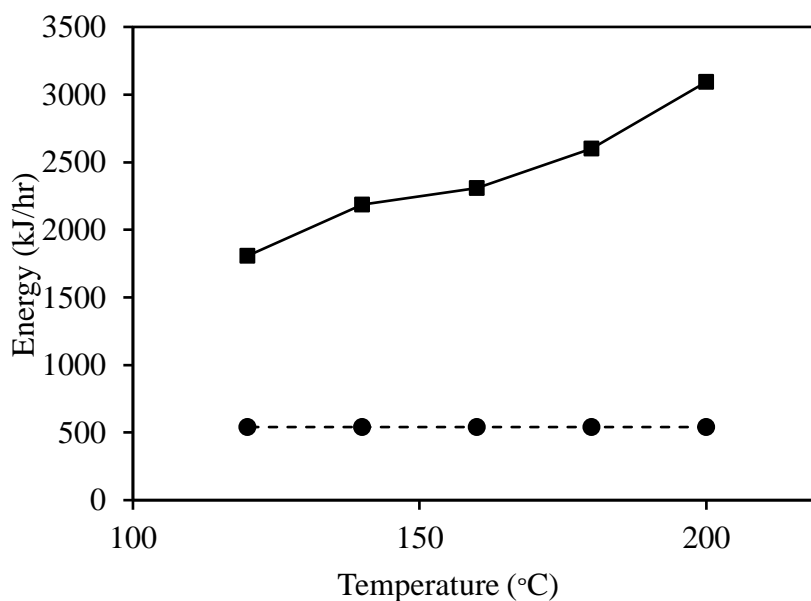
ส่วนพลังงานที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำจะคำนวณจากปริมาณน้ำที่ต้องระเหยคูณกับความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอนั้นนำพลังงานมาเปรียบเทียบกับ

4.1.1.1 การคำนวณที่อุณหภูมิกับความดันต่างๆ

รูปที่ 4.2-4.3 จากการคำนวณจะพบว่าพลังงานที่ถ่ายเทมาจากอากาศร้อนในการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากเอนทาลปีที่อากาศร้อนให้ได้จะมีมากกว่าที่อุณหภูมิสูง และเมื่อลดความดันลงปริมาณความร้อนที่ได้จะลดลงเนื่องจากปริมาณอากาศที่มีจะน้อยลง โดยจากการเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากอากาศร้อนกับที่จำเป็นต้องใช้ในการระเหยพบว่าในระบบสูญญากาศพลังงานจะไม่เพียงพอที่จะทำให้สารละลายแห้งเป็นผงแห้งได้จึงต้องติดตั้งเครื่องทำความร้อนเพื่อให้พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำเพิ่มเติม ซึ่งจะตรงกันข้ามกับที่อุณหภูมิสูงพลังงานที่อากาศร้อนสามารถให้ได้จะมีมากเพียงพอจึงไม่ต้องทำการติดตั้งเครื่องทำความร้อน



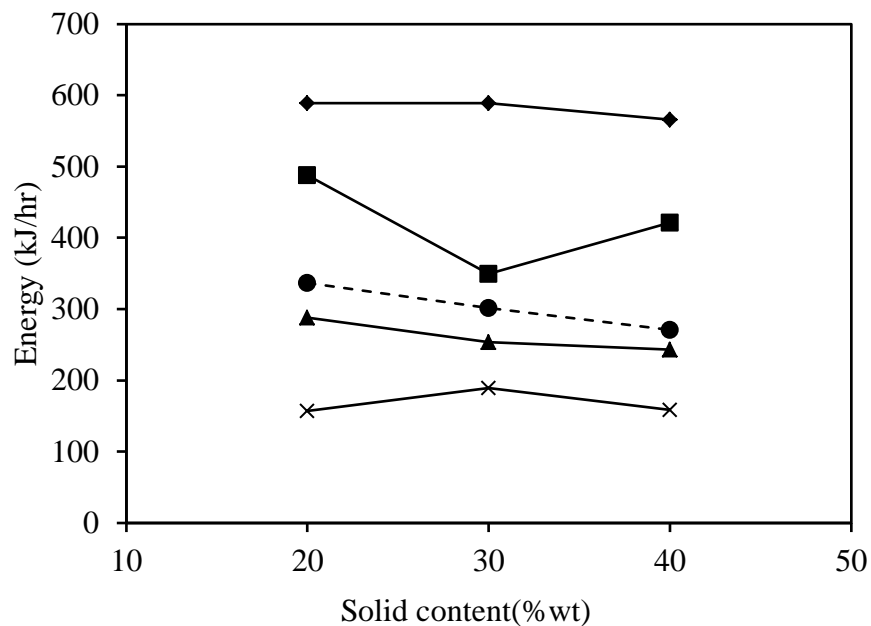
รูปที่ 4.2 พลังงานที่อากาศร้อนให้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน (◆) 40 °C (■) 50 °C (▲) 60 °C (X) 70 °C. (●)พลังงานที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำ



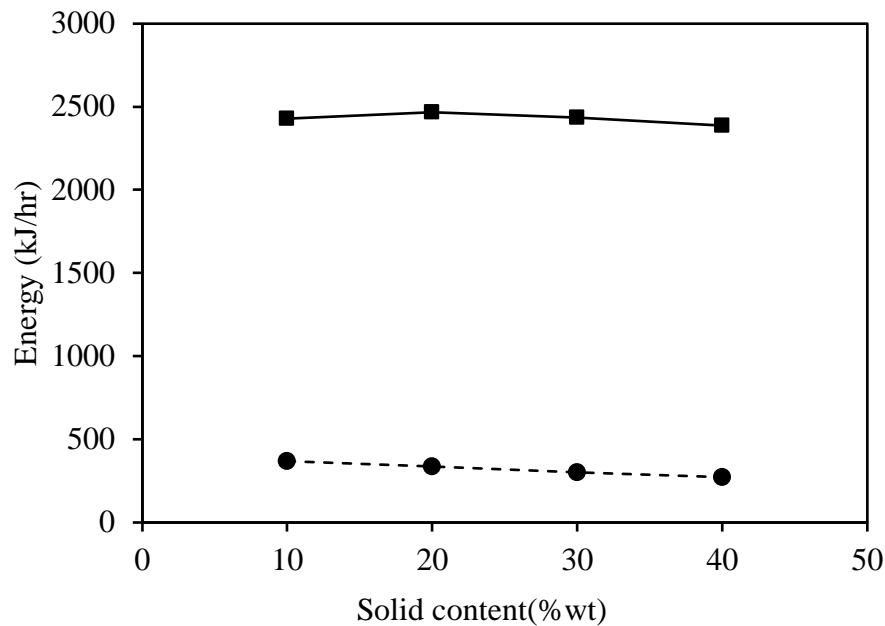
รูปที่ 4.3 พลังงานที่อากาศร้อนให้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ (■) ที่อุณหภูมิอากาศร้อนต่างๆ (●) พลังงานที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำ

4.1.1.2 การคำนวณที่ความเข้มข้นแข่งกับความดันต่างๆ

รูปที่ 4.4-4.5 การคำนวณโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแข่งกับความดันในการอบแห้งแบบพ่นฝอย อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C สำหรับระบบสุญญากาศ อุณหภูมิอากาศร้อน 160 °C สำหรับระบบปกติ จากการคำนวณโดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของแข็งของสารละลายจะพบว่าต้องใช้พลังงานในการระเหยมากขึ้นเมื่อปริมาณของแข็งที่มีในสารละลายน้อยลงเนื่องจากมีน้ำปริมาณมากขึ้นที่จำเป็นต้องระเหยออก โดยพลังงานที่ได้รับจากอากาศร้อนที่ความดัน 0.74 atm ลงมา จะไม่เพียงพอต่อการระเหยจึงต้องมีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนเพื่อให้ความร้อนเพิ่มเติมในระบบสุญญากาศ



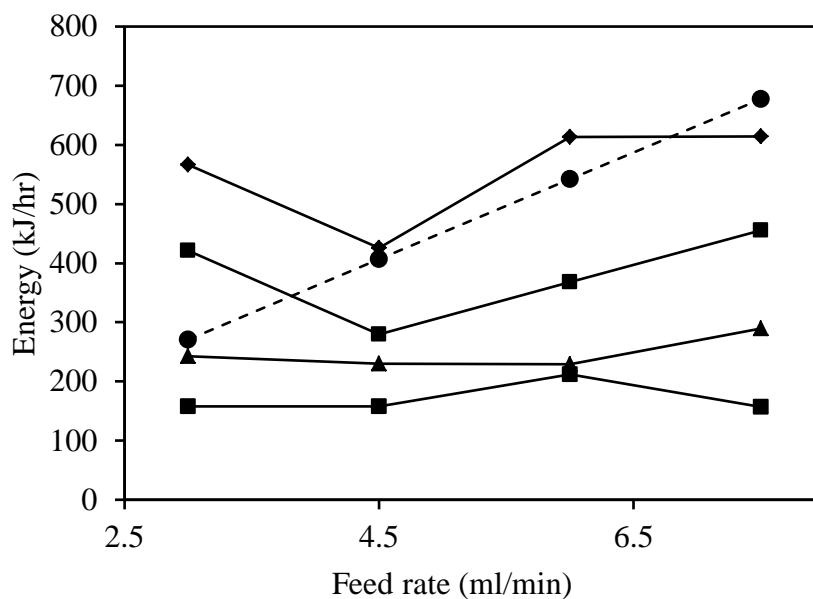
รูปที่ 4.4 พลังงานที่อากาศร้อนให้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแข่งต่างๆ อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 °C ความดัน (◆) 0.93atm (■) 0.74atm (▲) 0.54atm (X)0.34atm. (●)พลังงานที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำ



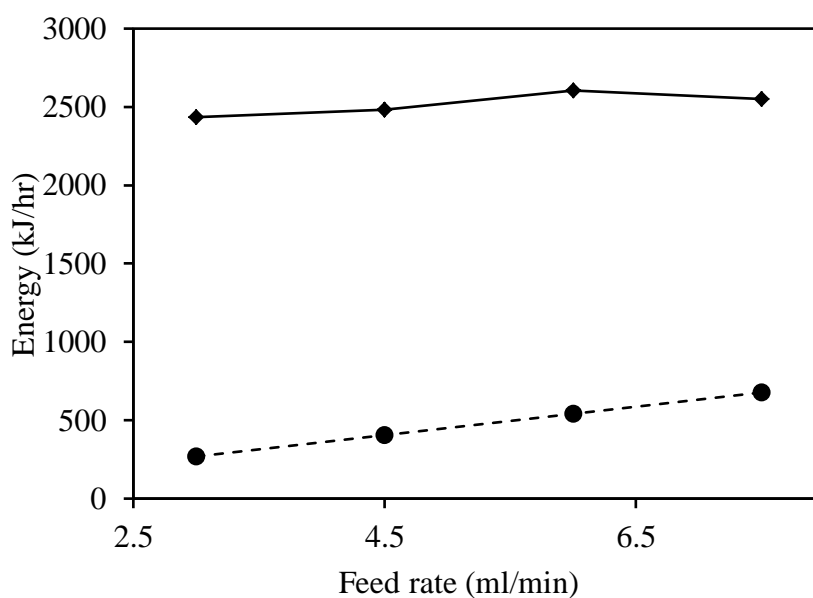
รูปที่ 4.5 พลังงานที่อากาศร้อนให้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอย อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 160 °C ความดันบรรยากาศ (■) ที่ความเข้มข้นแป้งต่างๆ (●) พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ

4.1.1.3 การคำนวณที่อัตราการไหลสายป้อนกับความดันต่างๆ

รูปที่ 4.6-4.7 การคำนวณ โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารกับความดัน ความเข้มข้นแป้ง ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C สำหรับระบบสุญญากาศ อุณหภูมิก๊าซร้อน 160 °C สำหรับระบบปกติ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารจะทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการระเหยมากขึ้นจะต้องใช้พลังงานมากขึ้นทำให้ต้องการพลังงานจากเครื่องทำความร้อนมากขึ้นเพื่อนำมาใช้ในการระเหยน้ำและปริมาณน้ำที่มากขึ้นยังทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับตะกองฝอยเป็นไปได้น้อยลงจะทำให้ความชื้นที่เหลืออยู่ในผงแป้งมากขึ้น และอนุภาคมีการเกาะกันมากขึ้น



รูปที่ 4.6 พลังงานที่อากาศร้อนให้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 50 °C ความดัน (◆) 0.93atm (■) 0.74atm (▲) 0.54atm (X)0.34atm. (●)พลังงานที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำ



รูปที่ 4.7 พลังงานที่อากาศร้อนให้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 50 °C ความดันบรรยากาศ (■) ที่ความเข้มข้นแป้งต่างๆ (●)พลังงานที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำ

4.1.2 การคำนวณเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

ในการระเหยน้ำจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ การระเหย (Evaporation) กับ การกลายเป็นไอ (Vaporization) ซึ่งการกลายเป็นไอจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ ที่จุดเดือดของสารละลาย โดยการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะใช้กระบวนการนี้เป็นหลัก ส่วนใหญ่จะอบแห้งกันที่อุณหภูมิ 120-180 องศาเซลเซียส แต่การอบแห้งที่ภาวะสูญญากาศจะมีข้อจำกัดเรื่องความดันต่ำสุดที่ลดลงไปได้ ซึ่งความดันต่ำสุดที่ลดลงไปได้อยู่ที่ 0.34 atm ซึ่งมีจุดเดือดของน้ำอยู่ที่ 73 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะสูญญากาศจะใช้การอบแห้งด้วยกระบวนการระเหยเป็นหลักซึ่งกระบวนการนี้จะมีอัตราการระเหยช้ากว่าวิธีการกลายเป็นไอทำให้ผึ่งแห้งที่ได้มามีความชื้นอยู่มากกว่าการอบแห้งที่ภาวะปกติ

ในการคำนวณการระเหยของน้ำจะใช้การคำนวณในรูปของการถ่ายเทความร้อน ไปที่หยดน้ำถึงแม้ว่าการระเหยของน้ำจะถูกควบคุมด้วยการถ่ายเทมวลจากปริมาณความชื้นในอากาศแต่ในทางทฤษฎีแล้วค่าการระเหยที่คำนวณได้จากทั้งสองวิธีควรมีค่าเท่ากันเนื่องจากการระเหยของน้ำจำเป็นต้องใช้พลังงานในการระเหยทำให้การถ่ายเทมวลที่มากขึ้นจำเป็นต้องใช้พลังงานในการระเหยที่มากขึ้นซึ่งค่าทั้งสองจะเป็นอัตราส่วนกัน ดังนั้นการคำนวณจะทำในรูปของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากในการคำนวณอัตราการอบแห้งส่วนใหญ่จะใช้การคำนวณในรูปของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากสามารถคำนวณได้ง่ายกว่า

ในการคำนวณการหาเวลาในการอบแห้งจะใช้สมมติฐานว่าเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการพาความร้อนเนื่องจากเครื่องทำความร้อนที่ใช้ให้ความร้อนจะเป็นเครื่องทำความร้อนแบบผ้าไม่ใช้เครื่องทำความร้อนแบบแผ่รังสีและระดับความดันที่ลดลงไปได้ต่ำสุดนั้นจะยังมีอากาศไหลอยู่ ดังนั้นจึงใช้การคำนวณการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน โดยความร้อนจากเครื่องทำความร้อนนั้นจะถ่ายเทความร้อนผ่านผนังห้องอบมาให้ความร้อนกับอากาศร้อนซึ่งอากาศร้อนจะถ่ายเทพลังงานให้กับละอองฝอยอีกที

เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขภายนอกวัสดุ โดยวัสดุที่ได้รับลมร้อนอุณหภูมิของวัสดุจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของสาร t_w ปริมาณความร้อนที่ได้รับต่อพื้นที่จะเท่ากับ $h_c(t-t_w)$ โดยจะสามารถคำนวณอัตราการระเหยได้จากสมการ

$$R_c = \frac{h_c(t-t_w)}{\lambda} \quad (2.1)$$

โดยค่า h_c จะประมาณได้จากสมการสำหรับกรณีลูกวัสดุกลมกับลมร้อนจากสมการ 2.3

$$Nu = \frac{h_c D_p}{k_g} = 2 + 0.65 \left(\frac{D_p u_p g}{\mu_g} \right)^{1/2} (Pr)^{1/3} \quad (2.3)$$

$$\text{เวลาที่ต้องใช้จะหาจาก } \theta = \theta_c + \theta_d = \frac{W}{AR_c} \left\{ (F_1 - F_c) + F_c \ln \left(\frac{F_c}{F_2} \right) \right\} \quad (2.7)$$

โดยจะนำเวลาที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับเวลาที่สารอยู่ในเครื่องอบแห้ง ซึ่งถ้าเวลาที่สารต้องใช้ในการอบแห้งน้อยกว่าเวลาที่สารอยู่ในเครื่องแสดงว่าสารสามารถแห้งเป็นผลิตภัณฑ์ได้ โดยเวลาที่สารอยู่ในห้องอบจะคำนวณจากสมการ 4.2 โดยจะถือว่าละอองฝอยไหลไปพร้อมกับอากาศ

$$\text{Resident time} = \frac{\text{chamber volumn}}{\text{volumn flow}} \quad (4.3)$$

โดยผลการคำนวณเวลาที่สารอยู่ในเครื่องจะแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความดันลดลง อัตราการไหลของอากาศจะลดลงเวลาที่สารอยู่ในห้องอบจะนานขึ้น

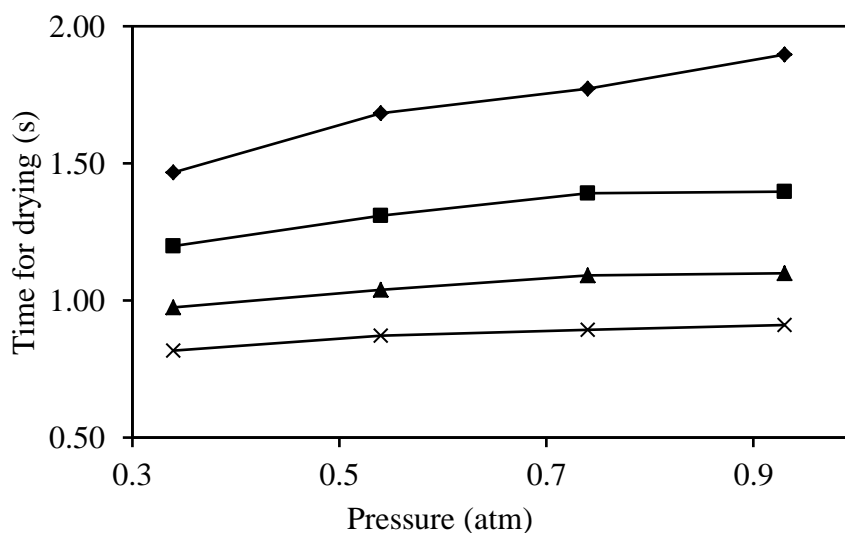
โดยในการคำนวณจะใช้ค่าความชื้นที่วัดได้จากการทดลอง โดยในการคำนวณจะมีสมมติฐานว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งคงที่ตลอดการอบ อุณหภูมิขนาด 100 ไมโครเมตร มีจุดวิกฤตที่ร้อยละ 30 ความชื้นสมมูลร้อยละ 0 มีความชื้นสุดท้ายในผงแป้งร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 อัตราการไหลและเวลาที่สารอยู่ในห้องอบ

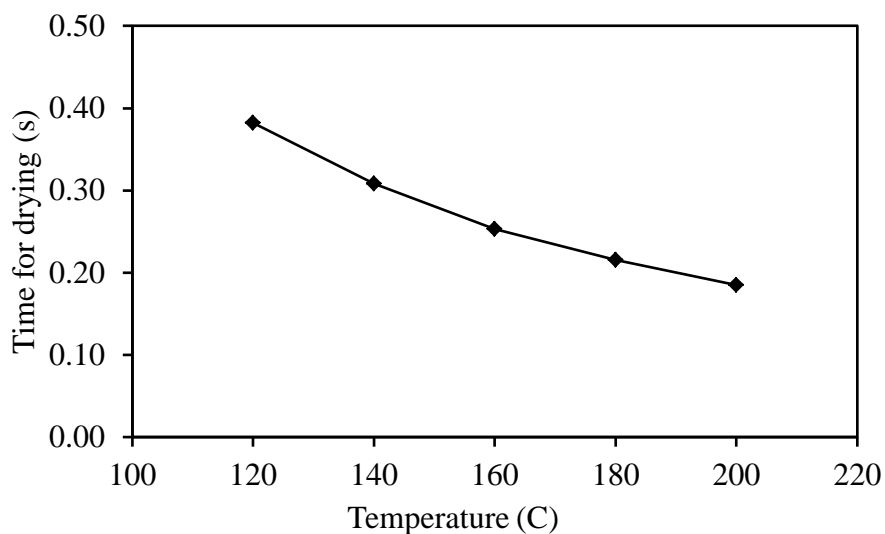
ปั๊มที่ใช้	ความดัน(atm)	อัตราการไหลของอากาศ(kg/hr)	Resident time(s)
ปั๊มสุญญากาศ	0.93	19.7	6.6
ปั๊มสุญญากาศ	0.74	14.6	8.9
ปั๊มสุญญากาศ	0.54	10.1	12.9
ปั๊มสุญญากาศ	0.34	6.6	19.8
เครื่องสูบอากาศ	1	41.3	3.1

4.1.2.1 การคำนวณที่อุณหภูมิกับความดันต่างๆ

จากการคำนวณจะพบว่าเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งละอองของเหลวจะค่อนข้างน้อย เนื่องจากอนุภาคที่ผ่านหัวฉีดมาจะมีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรทำให้มีปริมาณน้ำที่ต้องระเหยในปริมาณน้อยทำให้สามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็วถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งก็จะมากขึ้นตาม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมากขึ้นเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งจะน้อยลงเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าการนำความร้อนของอากาศจะดีขึ้นจึงสามารถถ่ายเทความร้อนมาใช้ในการระเหยได้ดีขึ้น และเมื่อลดความดันลงเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งจะลดลงเนื่องจากอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะลดลงทำให้มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกมากขึ้นน้ำจึงระเหยได้ดีขึ้น



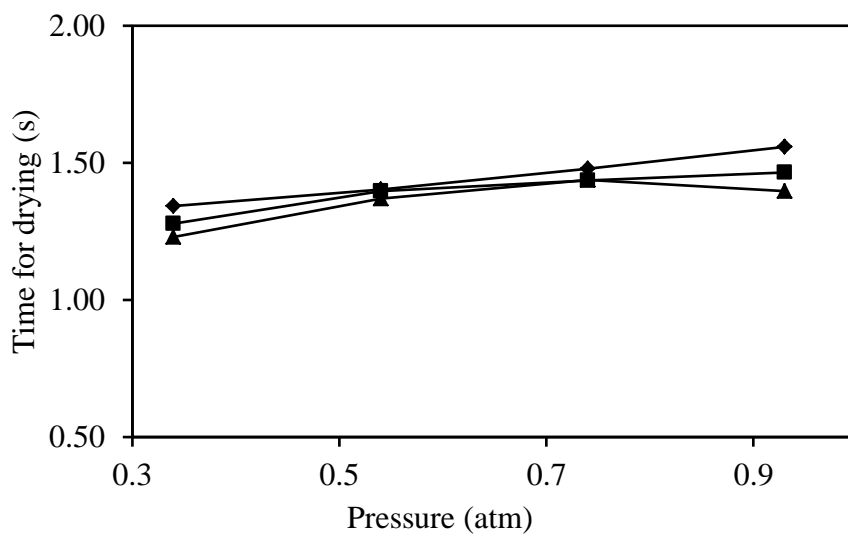
รูปที่ 4.8 เวลาที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน (◆) 40 °C (■) 50 °C (▲) 60 °C (X) 70 °C.



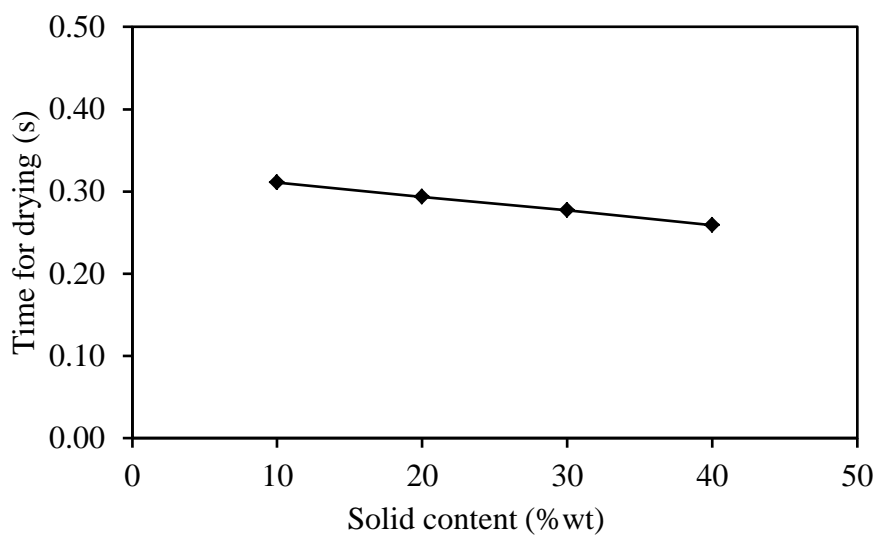
รูปที่ 4.9 เวลาที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งแบบฟุ้งฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.1.2.2 การคำนวณที่ความเข้มข้นแป้งกับความดันต่างๆ

จากการคำนวณจะพบว่าเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งจะลดลงเมื่อมีปริมาณแป้งผสมมากขึ้น เนื่องจากปริมาณแป้งที่มากขึ้นจะทำให้ทำให้ในละอองฝอยมีปริมาณน้ำที่ต้องระเหยลดลงจึงใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลงและเมื่อความดันลดลงเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะลดลงเนื่องจากน้ำสามารถระเหยได้ดีขึ้น เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกับที่อุณหภูมิต่ำจะพบว่าที่อุณหภูมิสูงเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ



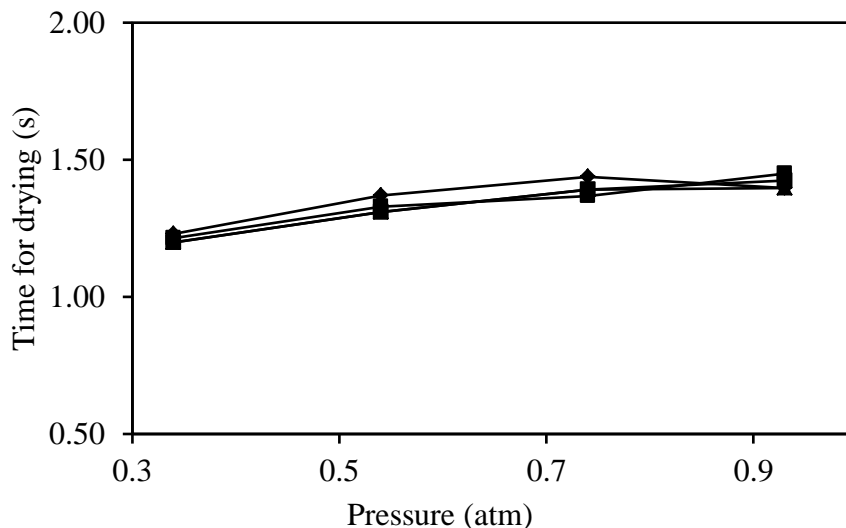
รูปที่ 4.10 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ เครื่องทำความร้อน 50 °C ความเข้มข้นแป้ง (◆) 20%wt (■) 30%wt (▲) 40%wt .



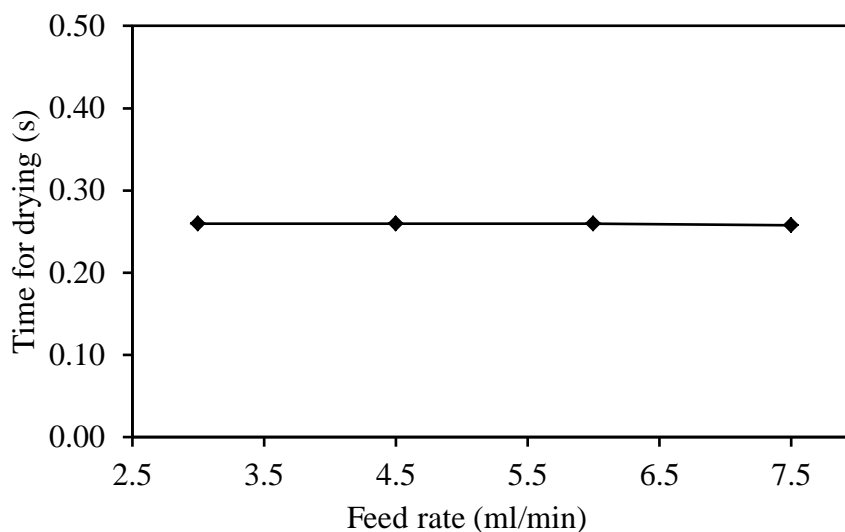
รูปที่ 4.11 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 160 °C ความเข้มข้นแป้งต่างๆ

4.1.2.3 การคำนวณที่อัตราการไหลสายป้อนกับความดันต่างๆ

จากการคำนวณพบว่าเมื่ออัตราการป้อนสารมากขึ้น ไม่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะเป็นสมการที่คำนวณจากหยดของเหลวเป็นหยดไป โดยอัตราการอบแห้งในสมการจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ขนาดของอนุภาค ปริมาณความชื้นที่ต้องระเหยเป็นหลัก ไม่ได้ขึ้นกับอัตราการป้อนสาร ดังนั้นจึงคำนวณค่าออกมาได้ ที่อัตราการป้อนสารต่างๆจึงใกล้เคียงกัน โดยในความเป็นจริงการอบแห้งโดยการเพิ่มอัตราการไหลสารป้อนจะทำให้การอบแห้งเป็นไปได้ช้าลงเนื่องจากเมื่อสายป้อนมากขึ้นต้องใช้พลังงานมากกว่าในการระเหยน้ำทำให้อุณหภูมิอากาศร้อนตกลงไปมากกว่าผลต่างของอุณหภูมิจะน้อยลงทำให้แรงขับของผลต่างอุณหภูมิน้อยลงอัตราการอบแห้งจึงช้ากว่า



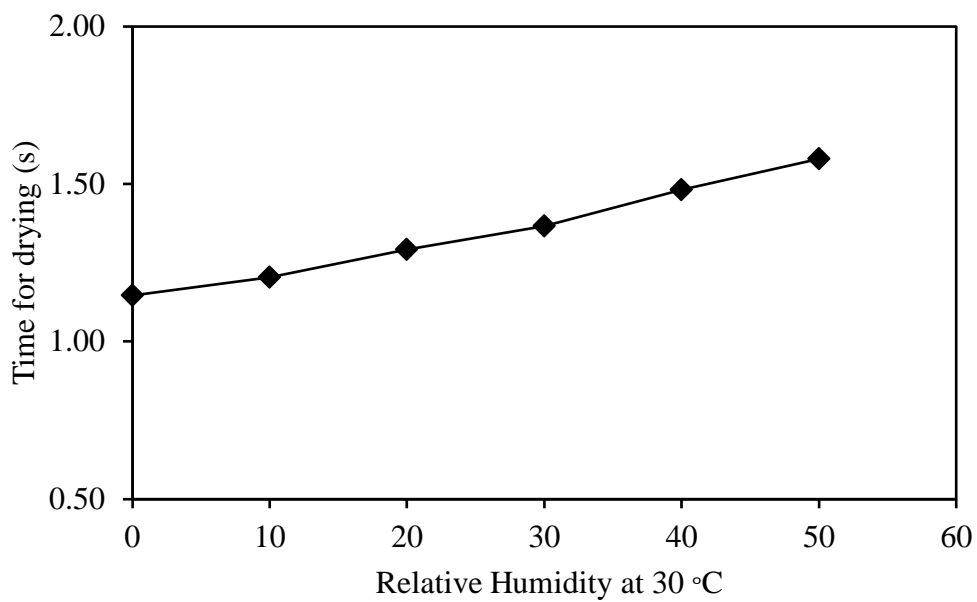
รูปที่ 4.12 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C อัตราการป้อนสาร (◆) 3 มิลลิลิตรต่อนาที (■) 4.5 มิลลิลิตรต่อนาที (▲) 6 มิลลิลิตรต่อนาที (X) 7.5 มิลลิลิตรต่อนาที.



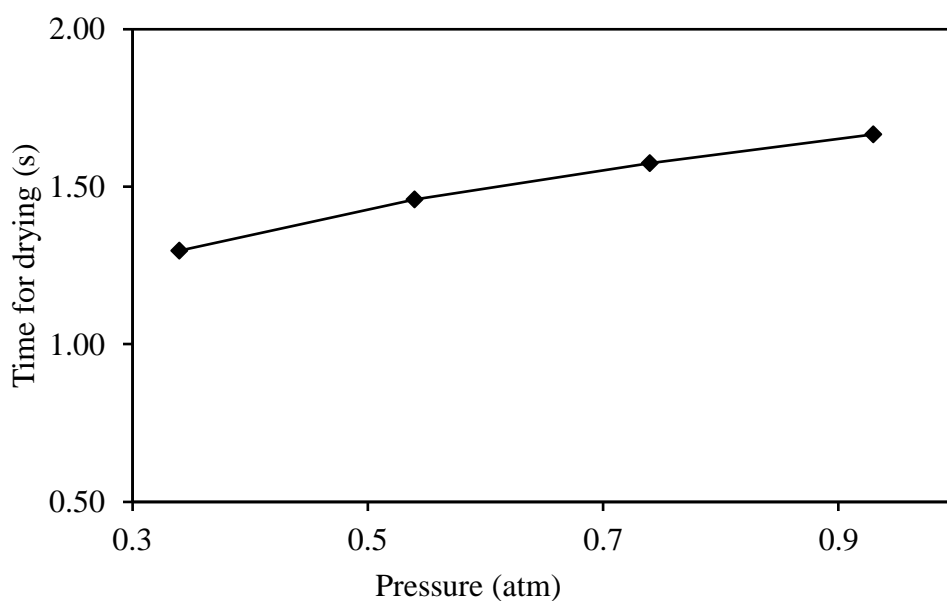
รูปที่ 4.13 ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt ที่อุณหภูมิ 160 °C ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อนสารต่างๆ

2.1.2.4 การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่สถานะสูญญากาศกับที่สถานะอากาศความชื้นต่ำ

ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำอีกวิธีการหนึ่งซึ่งสามารถใช้ในการลดอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งได้ก็คือการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความชื้นต่ำ ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มอัตราการระเหยได้โดยจากรูปจะเป็นการเปรียบเทียบการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สูญญากาศกับที่ความชื้นต่ำ โดยจะทำการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 50 °C อุณหภูมิอากาศเข้า 30 °C ความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 โดยจะพบว่าเวลาเมื่อลดความชื้นที่มีในอากาศลงหรือลดความดันลง เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะลดลง โดยหากเปรียบเทียบทั้งสองวิธีเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะไม่ต่างกันมากนัก แต่การอบแห้งที่ความดันสูญญากาศจะสามารถลดอุณหภูมิกระเปาะเปียกได้มากกว่าและสารใช้เวลาที่อยู่ในเครื่องนานกว่าจึงทำให้ผงแป้งแห้งได้มากกว่า



รูปที่ 4.14 ภาพแสดงเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C อุณหภูมิอากาศขาเข้า 30 °C ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ความดันบรรยากาศ

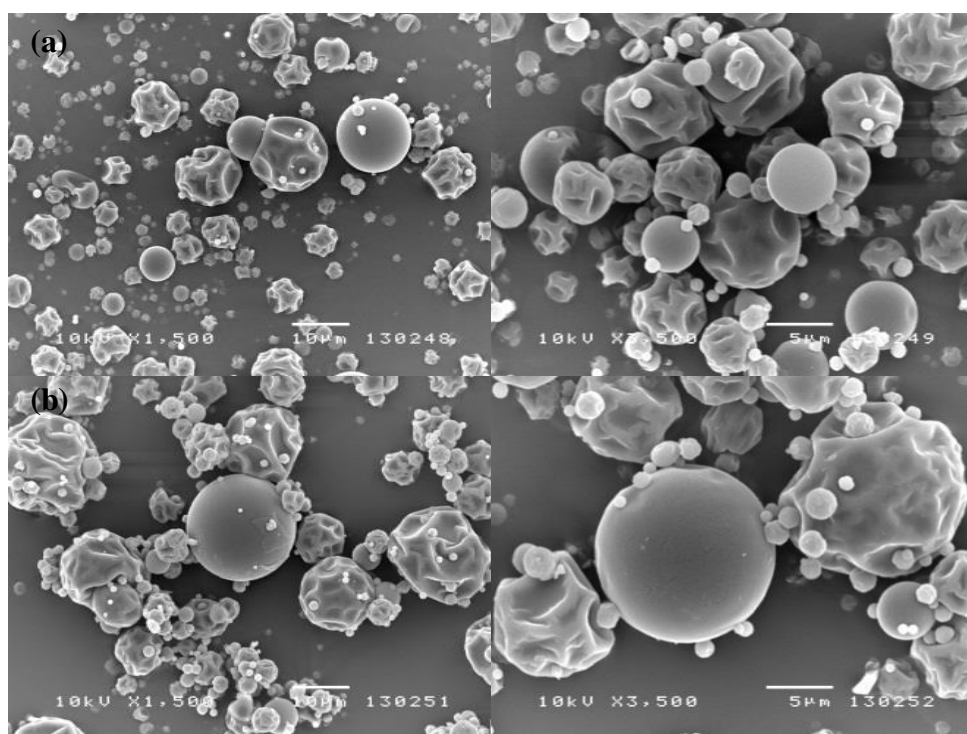


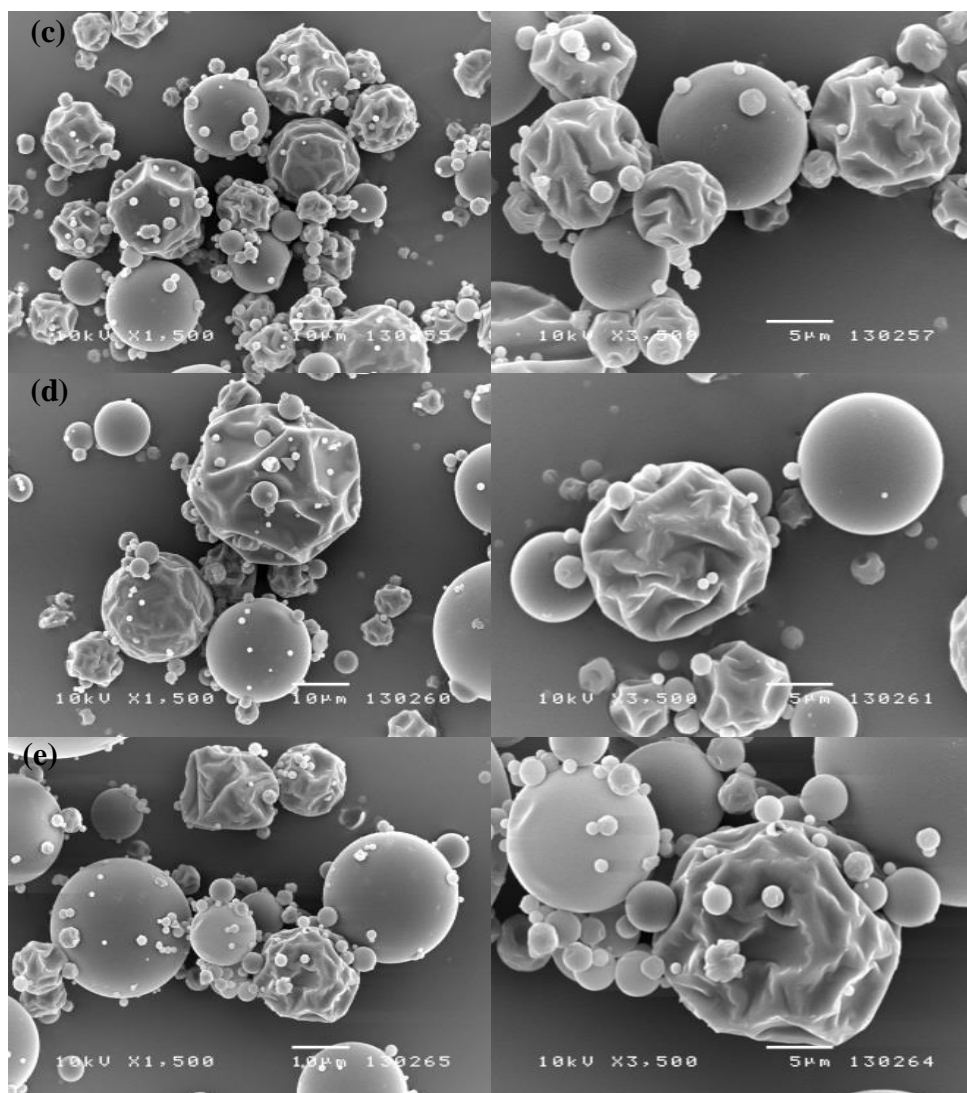
รูปที่ 4.15 ภาพแสดงเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C อุณหภูมิอากาศขาเข้า 30 °C ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ที่ความดันต่างๆ

4.2 ผลของอุณหภูมิและความดันในการอบแห้งแบบพ่นฝอย

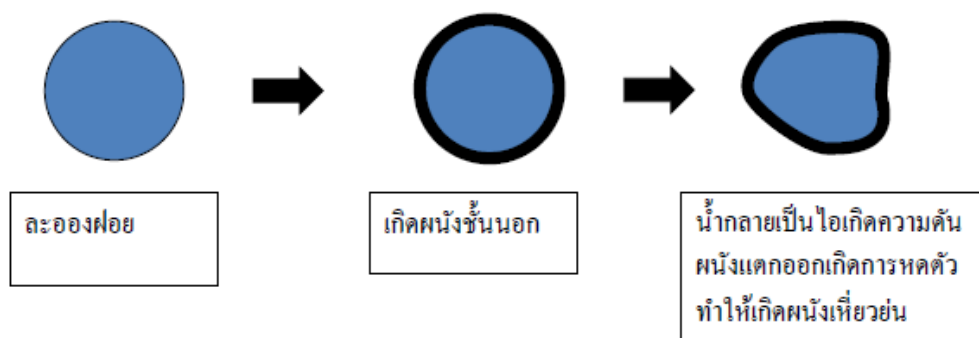
4.2.1 ผลต่อลักษณะรูปร่างพื้นฐานของผงแป้ง

จากรูปที่ 4.16 จะแสดงถึงอนุภาคที่มาจากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 120-200 °C ซึ่งอนุภาคที่ได้จะมีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีรอยเหี่ยวย่นและมีการเกาะติดกันของอนุภาคเล็กน้อยเนื่องมาจากแรงไฟฟ้าสถิตและแรงแวนเดอร์วาลส์ และจากรูปจะเห็นว่าผงที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้อบแห้งสูงขึ้น โดยผงแป้งที่ได้จะมีรอยเหี่ยวย่นมากกว่าการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะความดันสูญญากาศ ซึ่งเกิดมาจากที่อุณหภูมิสูงการถ่ายเทความร้อนมากกว่าทำให้เกิดการก่อตัวของผนังเร็วกว่าซึ่งผนังจะหุ้มละอองฝอยไว้ เมื่อของเหลวด้านในได้รับความร้อนจึงทำให้ของเหลวด้านในระเหยกลายเป็นไอแต่ไม่สามารถแพร่ออกมาจากผนังได้ทันทำให้เกิดความดันขึ้น ซึ่งความดันจะไปดันให้ผนังบางส่วนแตกออกทำให้ไอระเหยออกไป อนุภาคเกิดการหดตัวจึงเกิดรอยเหี่ยวย่นเป็นจำนวนมาก



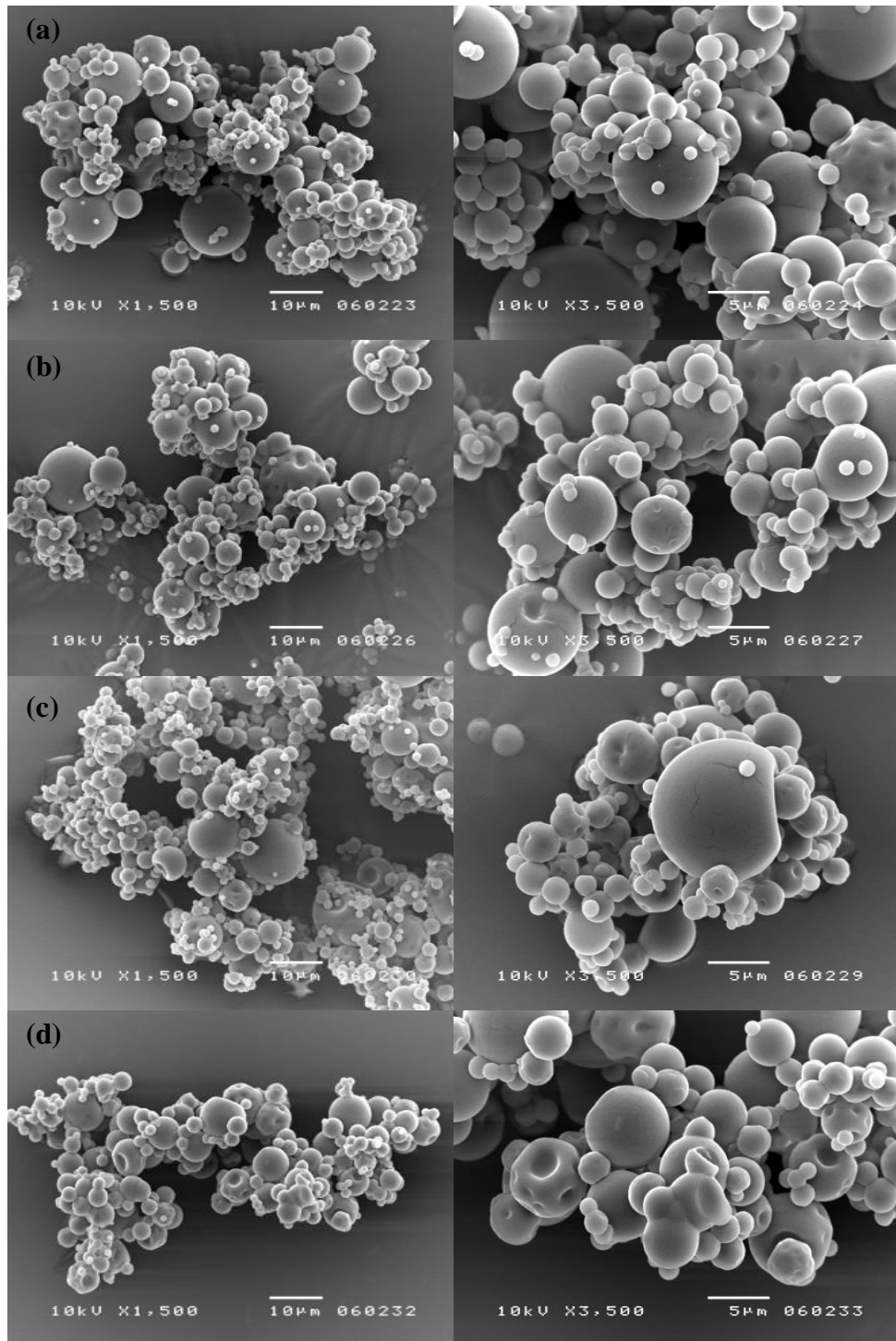


รูปที่ 4.16 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงเป็่งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเป็่ง 40 % โดยน้ำหนัก ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิขาเข้า (a) 120 °C (b) 140 °C (c) 160 °C (d) 180 °C (e) 200 °C

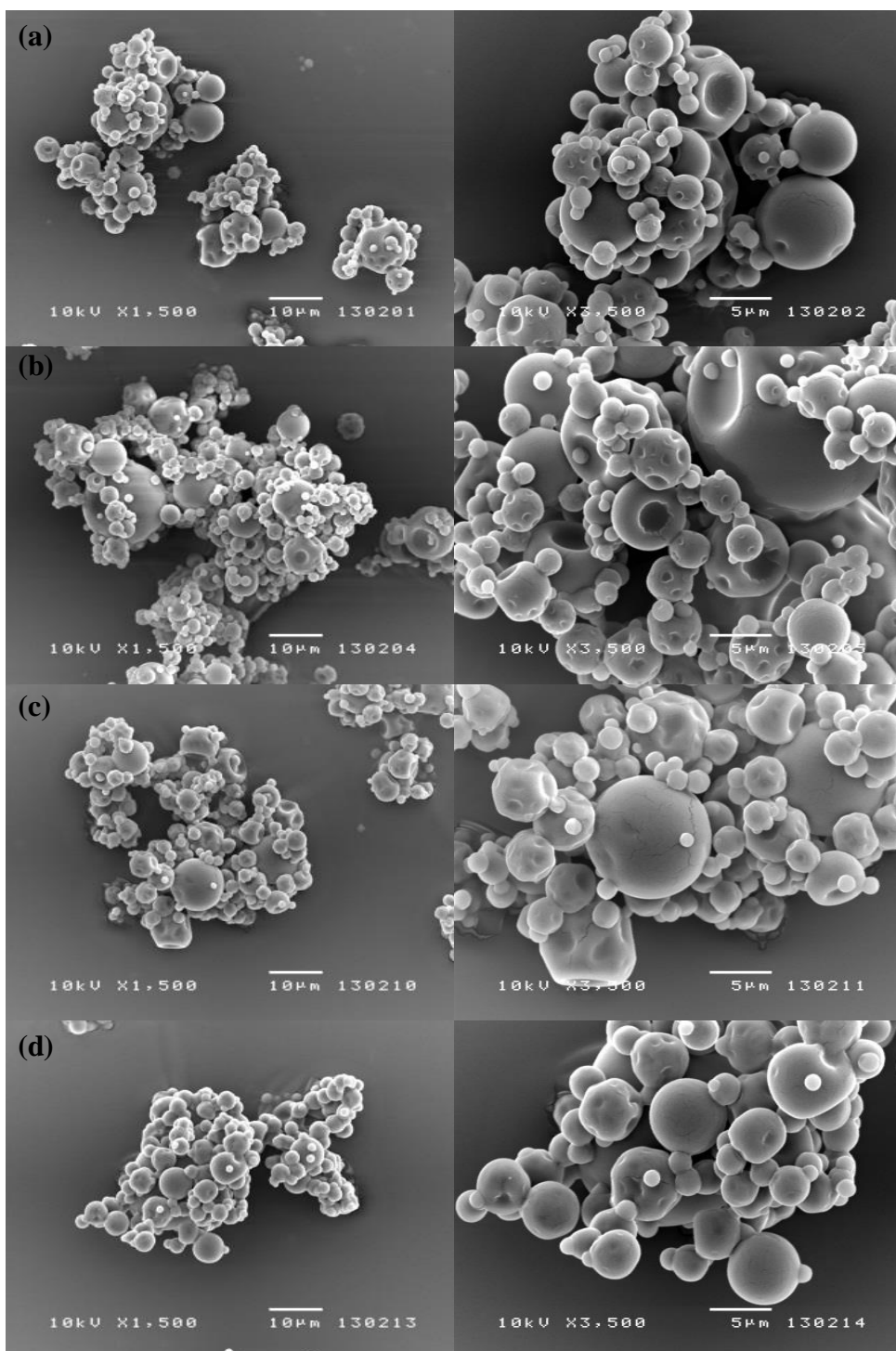


รูปที่ 4.17 การเกิดรอยเยื้องงบนผิวอนุภาค

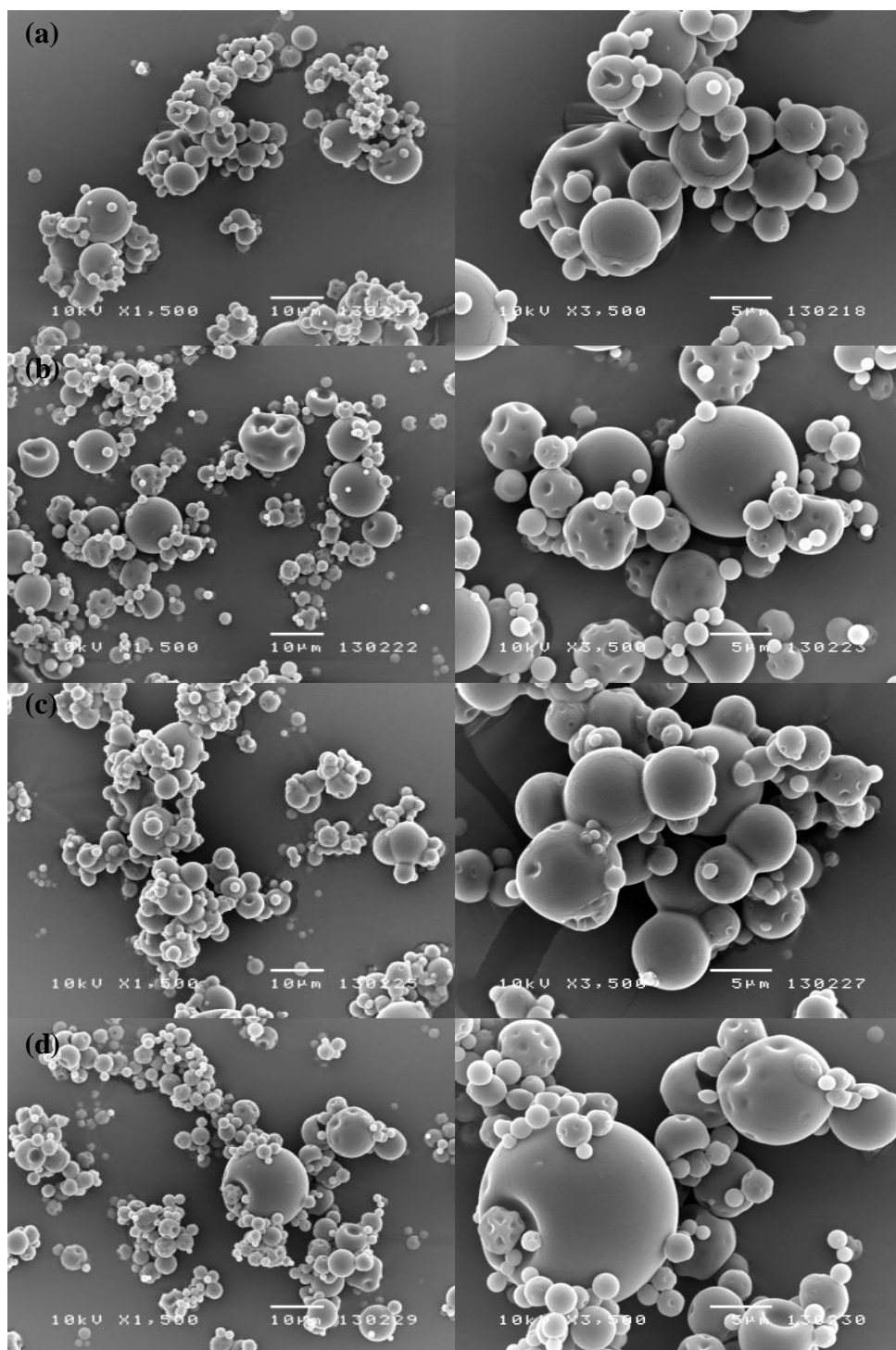
จากรูปที่ 4.18-4.21 แสดงถึงอนุภาคที่มาจากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความดันสุญญากาศ (0.93-0.34 atm) และอุณหภูมิของเครื่องทำความร้อน (40-70 °C) โดยพบว่าอนุภาคที่ได้จะมีลักษณะเป็นทรงกลม (Spherical shape) ผิวเรียบมีการเกาะติดกันของอนุภาคมากกว่าผงแป้งที่ได้จากความดันบรรยากาศ โดยผงแป้งที่ได้จะมีความแตกต่างจากที่ความดันบรรยากาศเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้อบแห้งต่ำกว่าโดยอุณหภูมิที่ใช้จะยังไม่ถึงจุดเดือดของน้ำทำให้เกิดความดันน้อย ผงแป้งจึงยังสามารถคงรูปทรงกลมอยู่ได้ ส่วนเหตุที่อนุภาคเกาะกันมากกว่าจะเกิดจากการที่ผงแป้งมีความชื้นมากกว่าทำให้เกิดการเกาะติดกันมากกว่า



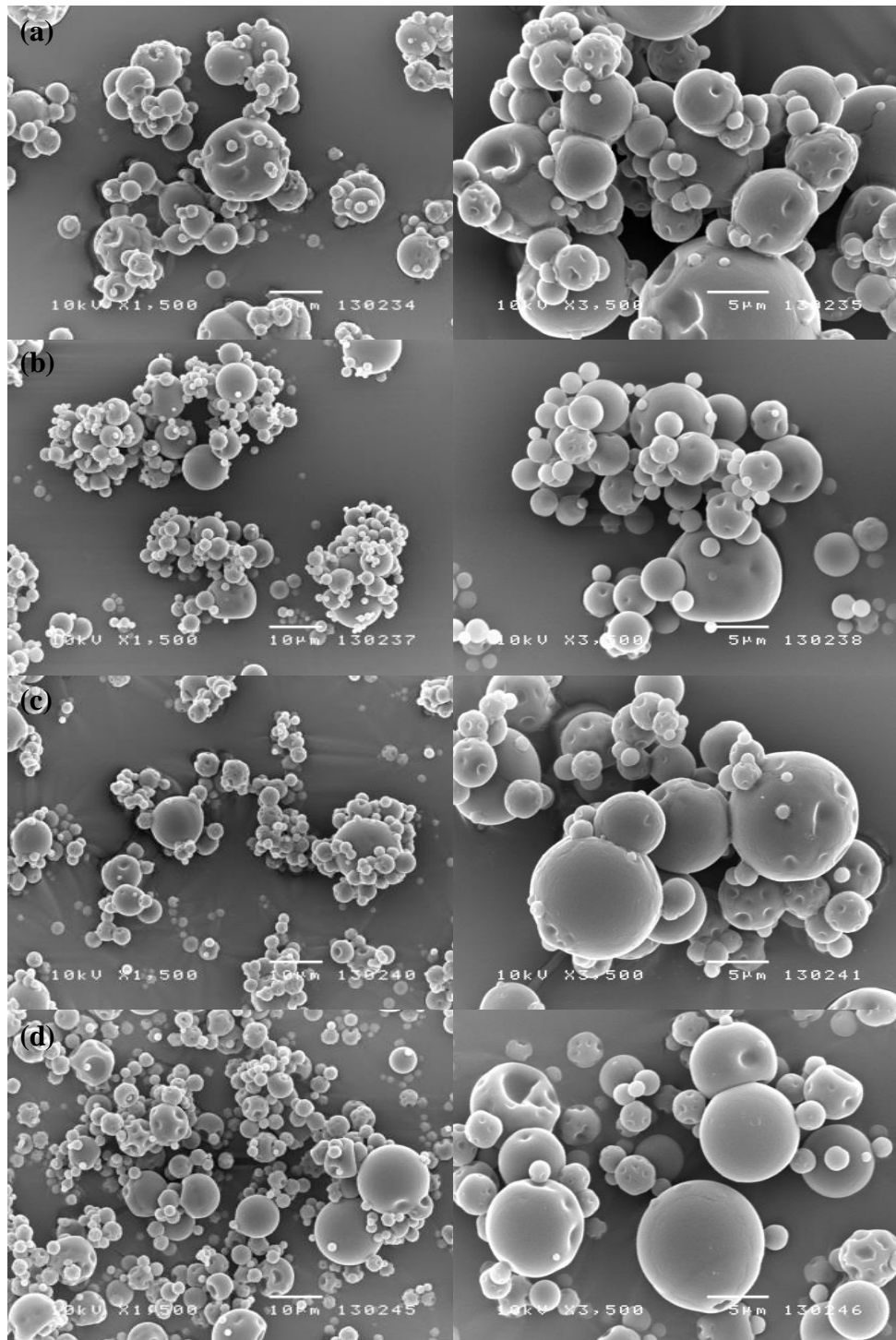
รูปที่ 4.18 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงเป็่งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 40 °C อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน (a) 0.93 atm (b) 0.74 atm (c) 0.54atm (d) 0.34atm



รูปที่ 4.19 ลักษณะพื้นฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน (a) 0.93 atm (b) 0.74 atm (c) 0.54atm (d) 0.34atm



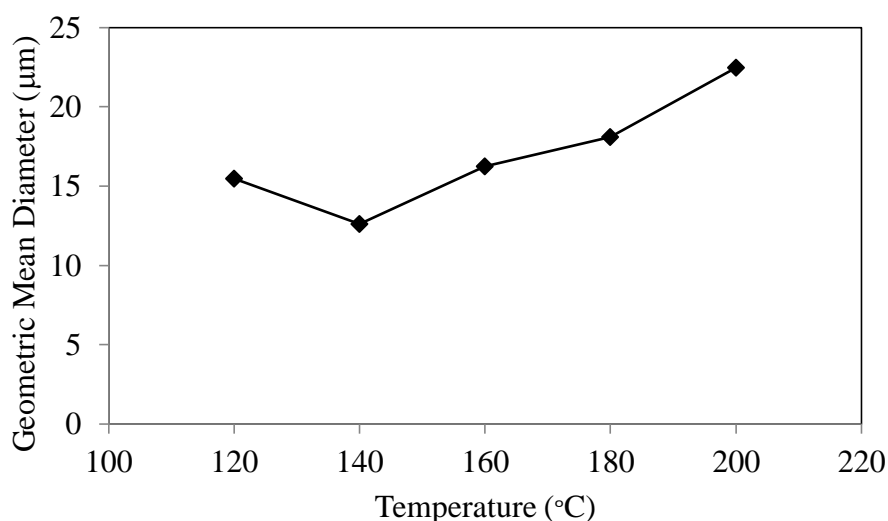
รูปที่ 4.20 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงเป็งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 60 °C อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน (a) 0.93 atm (b) 0.74 atm (c) 0.54atm (d) 0.34atm



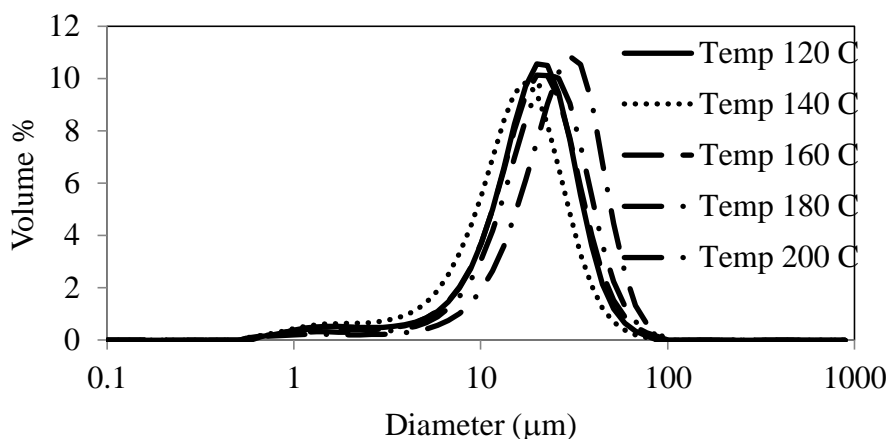
รูปที่ 4.21 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงเป็่งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 70 °C อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน (a) 0.93 atm (b) 0.74 atm (c) 0.54atm (d) 0.34atm

4.2.2 ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

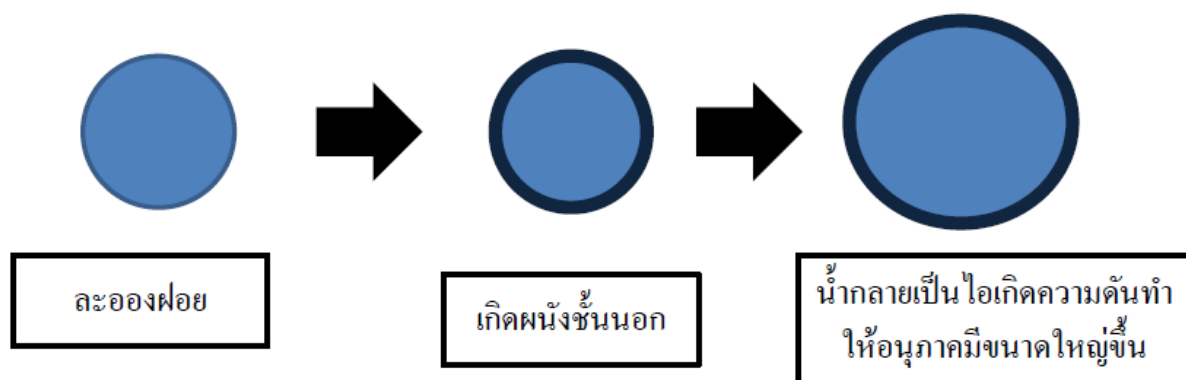
จากรูป 4.22-4.23 จะแสดงขนาดและการกระจายตัวของผงแป้งที่ผ่านการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 120-200 °C โดยจะวัดจากเครื่อง Laser Diffraction Analyzer โดยจะนำผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยมากระจายในสาร iso-propanol เนื่องจากแป้งที่ใช้สามารถละลายน้ำได้ จึงใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายแทน โดยจะพบว่าอนุภาคที่ได้จะมีขนาดในช่วง 10-20 ไมโครเมตร การกระจายตัวของอนุภาคเป็นแบบระฆังคว่ำ(log normal distribution) โดยจากกราฟจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะไม่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาค และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ขนาดของอนุภาคจะใหญ่ขึ้น เกิดมาจากที่อุณหภูมิสูงกว่าอนุภาคจะเกิดการขยายตัวจากความดันมากกว่าขนาดที่วัดได้จึงมีขนาดใหญ่ขึ้น และอุณหภูมิที่ใช้จะไม่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาค



รูปที่ 4.22 ขนาดของผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิอากาศร้อนต่างๆ

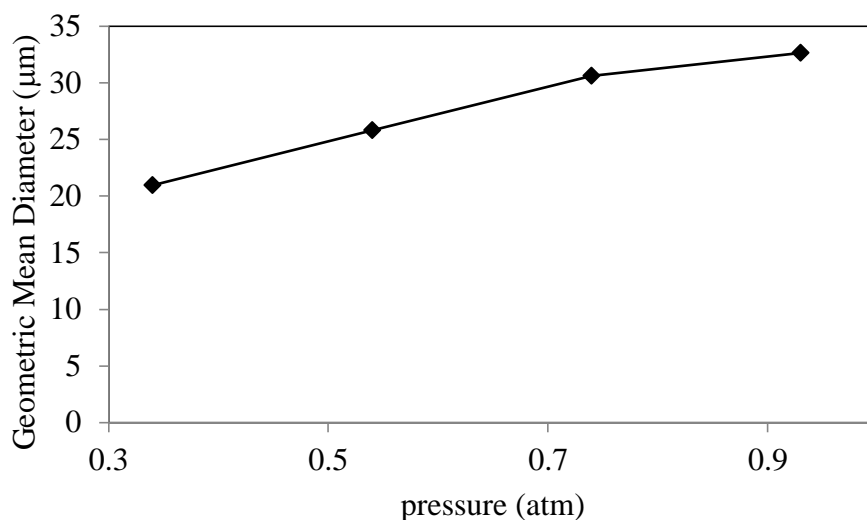


รูปที่ 4.23 การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ

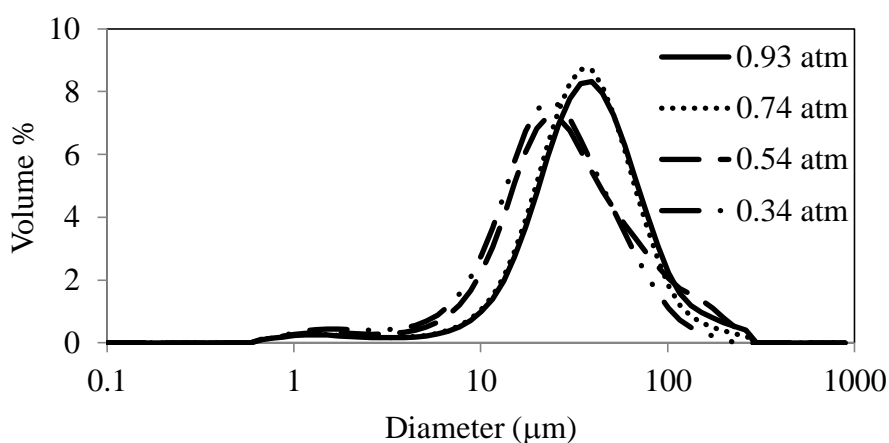


รูปที่ 4.24 การขยายอนุภาคเนื่องจากความดัน

จากรูปที่ 4.25-4.26 จะแสดงขนาดอนุภาคที่ได้โดยการเปลี่ยนความดันที่ค่าต่างๆ โดยจะพบว่าอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเกิดจากการหดตัวที่น้อยกว่าของละอองฝอย ในระหว่างการอบแห้ง โดยความดันภายนอกของระบบสุญญากาศจะน้อยกว่าระบบปกติทำให้อนุภาคเกิดการหดตัวน้อยกว่า ส่วนที่วัดขนาดอนุภาคได้เล็กลงเกิดจากเมื่อความดันลดลงปริมาณอากาศในระบบจะน้อยลงด้วยทำให้ไม่มีอากาศเพียงพอที่จะพาอนุภาคจากห้องอบไปแยกที่ไซโคลนทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ตกลงไปที่ด้านล่างของห้องอบอนุภาคที่วัดได้จึงมีขนาดเล็กลง การกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะเป็นการกระจายตัวแบบระฆังคว่ำ (log normal distribution) ซึ่งค่าการกระจายตัวมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความดันเปลี่ยนไป



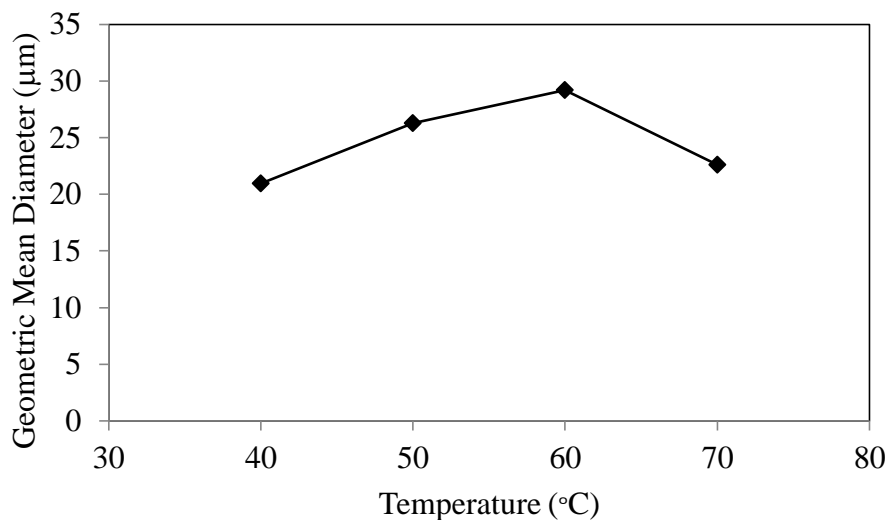
รูปที่ 4.25 ขนาดของผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 40°C ที่ความดันต่างๆ



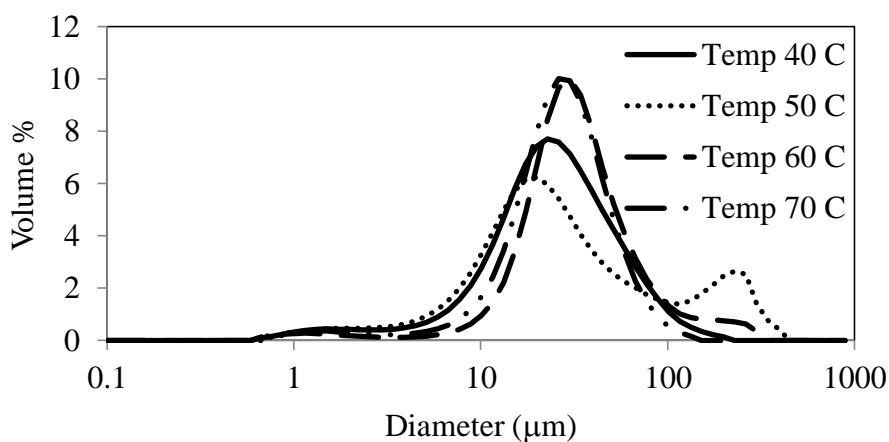
รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 40°C ที่ความดันต่างๆ

จากรูปที่ 4.27 จะแสดงถึงขนาดและการตัวของอนุภาคซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอนุภาคที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้หยดสารละลายก่อตัวเป็นผนังเร็วกว่าได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ จึงเกิดการหดตัวน้อยกว่าในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยหากเปรียบเทียบขนาดอนุภาคที่ได้กับผลแป้งที่ได้จากการอบแห้งที่ความดันปกติจะเห็นว่าอนุภาคที่ได้จากการอบแห้งที่สุญญากาศมีขนาดใหญ่กว่าเนื่องมาจากการอบแห้งที่สุญญากาศผงแป้งจะเกิดการหดตัวน้อยกว่าในระหว่างการอบแห้ง และการกระจายตัวของอนุภาค

จะพบว่าการกระจายตัวเป็นแบบระฆังคว่ำ ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคใกล้เคียงกันเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการกระจายตัวจะมีขนาดกว้างมากกว่าการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ



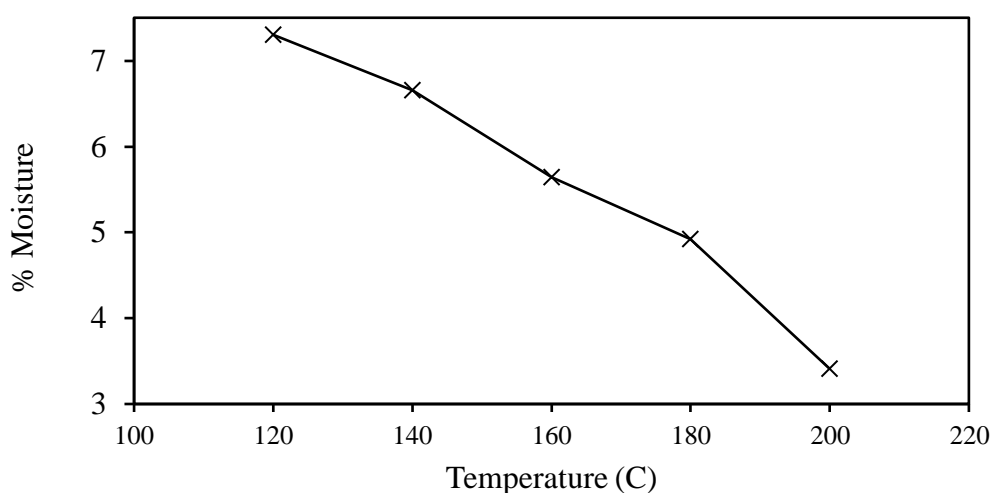
รูปที่ 4.27 ขนาดของผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 0.34 atm ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อนต่างๆ



รูปที่ 4.28 การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 0.34 atm ที่อุณหภูมิต่างๆ

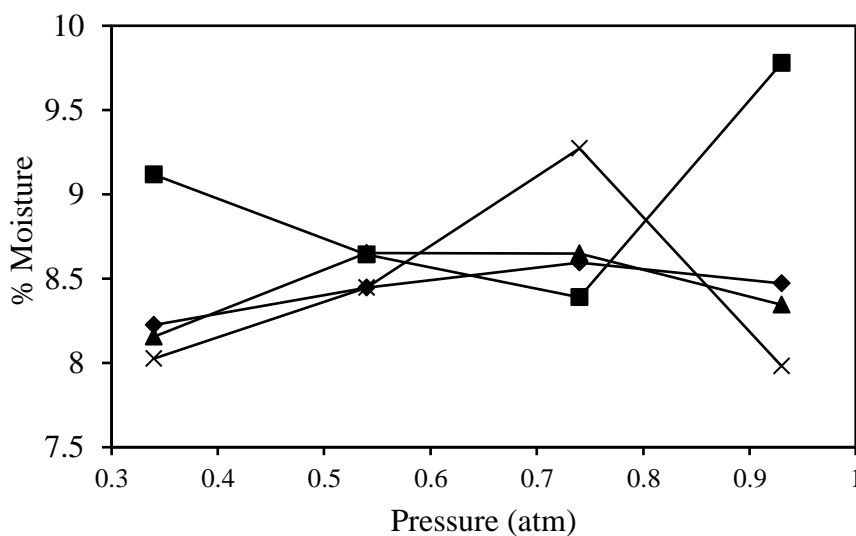
4.2.3 ผลต่อปริมาณความชื้นในผงแป้ง

จากรูปที่ 4.29 จะพบว่าความชื้นที่มีในผงแป้งมีปริมาณน้อยกว่าการอบแห้งที่สูญญากาศ และจะน้อยลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อนกับตะอองฝอยจะดีขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนไปที่ตะอองฝอยได้เร็วกว่าจึงเกิดการระเหยของน้ำเร็วกว่าทำให้ปริมาณความชื้นที่มีเหลืออยู่ในผงแป้งมีปริมาณน้อยลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น และจะลดการเกาะติดกันของผงแป้งที่ได้



รูปที่ 4.29 ปริมาณความชื้นในผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ

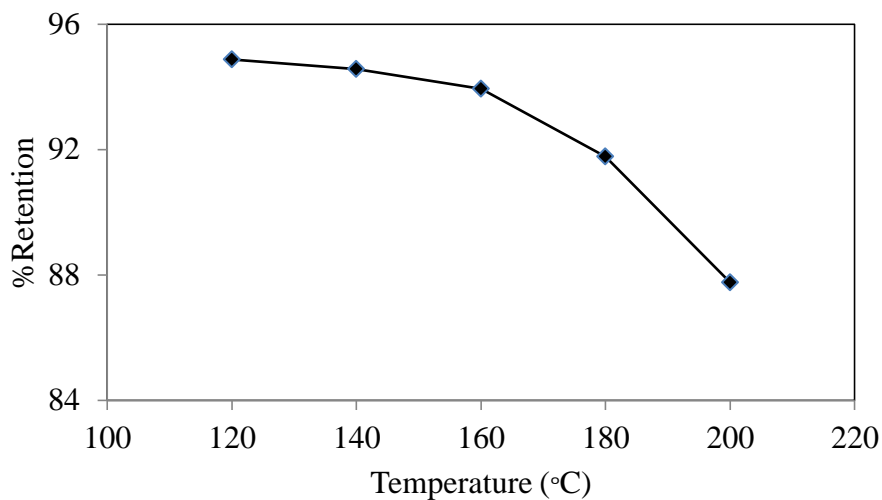
จากรูปที่ 4.30 จะแสดงถึงปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในผงแป้งที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความดันต่างๆ โดยความชื้นในผงแป้งจะอยู่ในช่วงระหว่าง 8-9% ซึ่งจะมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิสูง (120-200 °C) ผงแป้งจะมีความชื้นที่ประมาณ 5-6 % ปริมาณความชื้นที่มากกว่าเนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารละลายและอากาศร้อนจะมีมากทำให้เกิดแรงขับในการระเหยมากกว่า ดังนั้นอนุภาคที่ได้จึงมีความชื้นน้อยกว่า



รูปที่ 4.30 ปริมาณความชื้นที่อยู่ในผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน (◆) 40 °C (■) 50 °C (▲) 60 °C (X) 70 °C.

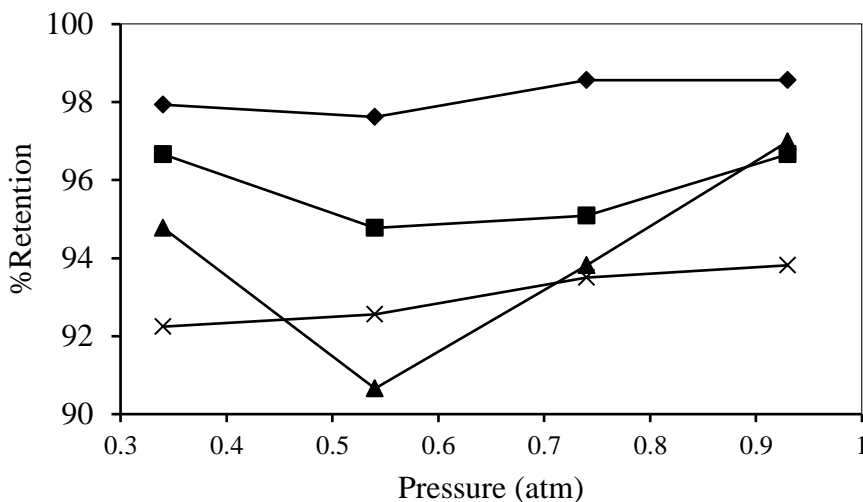
4.2.4 ผลต่อปริมาณแอนโทไซยานินที่เหลืออยู่ในผงแป้ง

จากผลการอบแห้งที่ 120-200 °C ความดันบรรยากาศ จะพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแบบพ่นฝอยเพิ่มขึ้นปริมาณแอนโทไซยานินที่กักเก็บได้จะมีปริมาณน้อยลงเนื่องจากแอนโทไซยานินจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง โดยการสลายตัวของแอนโทไซยานินจะสามารถเกิดได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 40 องศาขึ้นไปแต่จะมีอัตราการสลายตัวที่ช้าที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการสลายตัวจะเร็วยิ่งขึ้น โดยปริมาณแอนโทไซยานินที่กักเก็บได้จะยังมีปริมาณสูงอยู่เนื่องจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะเป็นการอบแห้งแบบพาความร้อนอุณหภูมิที่ละอองฝอยได้รับจะอยู่ที่อุณหภูมิกะเปาะเปียกซึ่งจะต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนมากและเวลาที่สารอยู่ในห้องอบจะสั้นทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินจึงยังมีเหลืออยู่ในปริมาณมาก



รูปที่ 4.31 ปริมาณแอนโรโซยานินที่กักเก็บได้จากการอบแห้งแบบฟุ้งฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราสายป้อน 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ

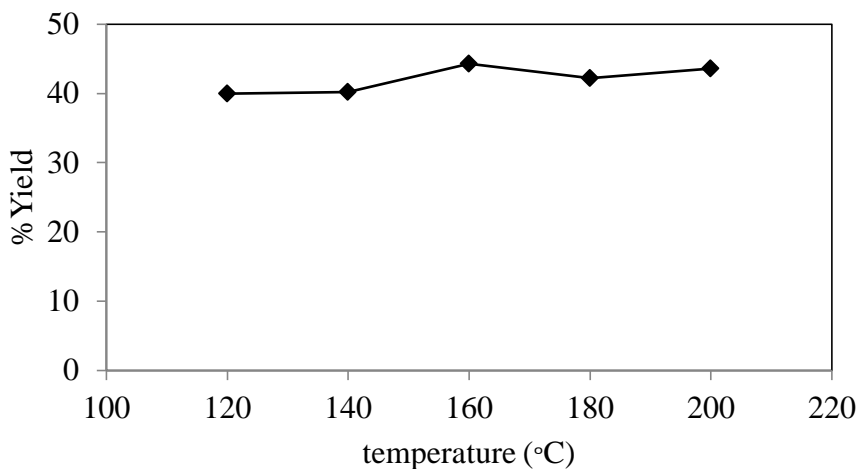
จากการทดลองอบแห้งแบบฟุ้งฝอยที่อุณหภูมิต่ำความดันสุญญากาศจะพบว่าปริมาณแอนโรโซยานินที่กักเก็บได้จะมีปริมาณเกินกว่า 90 % และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้นปริมาณแอนโรโซยานินที่กักเก็บได้จะมีปริมาณน้อยลง โดยปริมาณแอนโรโซยานินที่ลดลงมาจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นการสลายตัวของแอนโรโซยานินจะมีมากขึ้น โดยจะพบว่าความดันที่เปลี่ยนแปลงไปจะไม่มีผลต่อปริมาณแอนโรโซยานินที่กักเก็บได้แสดงว่าความดันไม่มีผลต่อปริมาณการกักเก็บสารแอนโรโซยานิน



รูปที่ 4.32 ปริมาณแอนไฮไซยานินที่กักเก็บได้จากการอบแห้งแบบฟุ้งฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน (◆) 40 °C (■) 50 °C (▲) 60 °C (X) 70 °C.

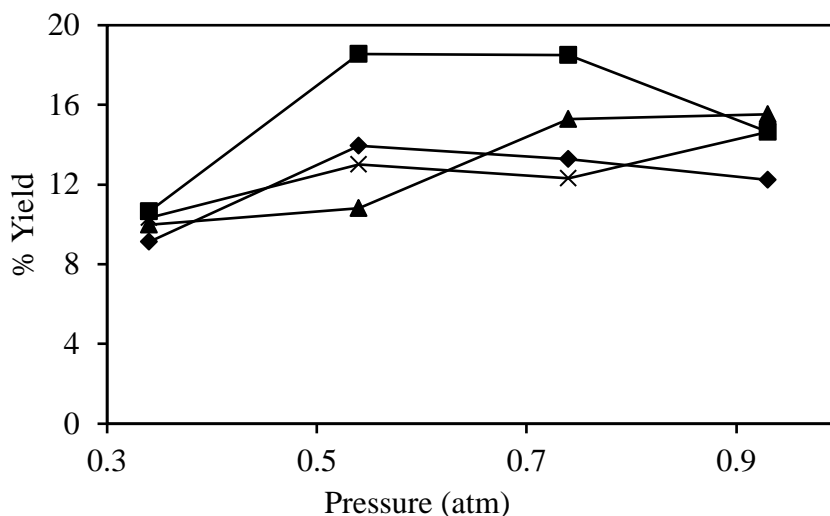
4.2.5 ผลต่อร้อยละผลได้

ในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120-200 °C ความดัน 1 atm ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งจะอยู่ที่ประมาณ 40-50% ซึ่งจะได้ผงแป้งในปริมาณสูงกว่าสถานะสุญญากาศ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นปริมาณความร้อนที่ให้จะมากขึ้นและทำให้การถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างอากาศร้อนและละอองฝอยดีขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณผงแป้งที่ได้มีปริมาณมากขึ้นเล็กน้อย โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ไอน้ำระเหยได้เร็วกว่าจึงมีความชื้นน้อยกว่า ทำให้เมื่ออนุภาคชนกับผนังห้องอบแห้งทำให้ลดโอกาสการติดผนังห้องอบทำให้ปริมาณแป้งที่ได้สูงขึ้น



รูปที่ 4.33 ปริมาณผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลของความดันและอุณหภูมิต่อปริมาณผงแป้งที่ได้มาจากการอบแห้งที่ความดันสุญญากาศ(ใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 40-70 C ความดัน 0.93-0.34 atm) ผลที่ได้พบว่าจะได้ปริมาณผงแป้งประมาณ 10-20% โดยถ้านำไปเปรียบเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 120-200 °C จะได้ผงแป้งปริมาณน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง โดยจะได้ปริมาณผงแป้งประมาณ 40-50 % เนื่องมาจากที่สภาวะความดันสุญญากาศปริมาณอากาศที่ไหลผ่านไซโคลนจะมีน้อยทำให้ไซโคลนทำงานได้มีประสิทธิภาพน้อยลงทำให้มีแป้งบางส่วนไหลออกไปกับอากาศร้อนที่ใช้แล้วของไซโคลนแล้วไปติดที่ถุงกรองสาร ทำให้ปริมาณผงแป้งที่ตกลงมาอยู่ที่เก็บสารมีปริมาณลดน้อยลง

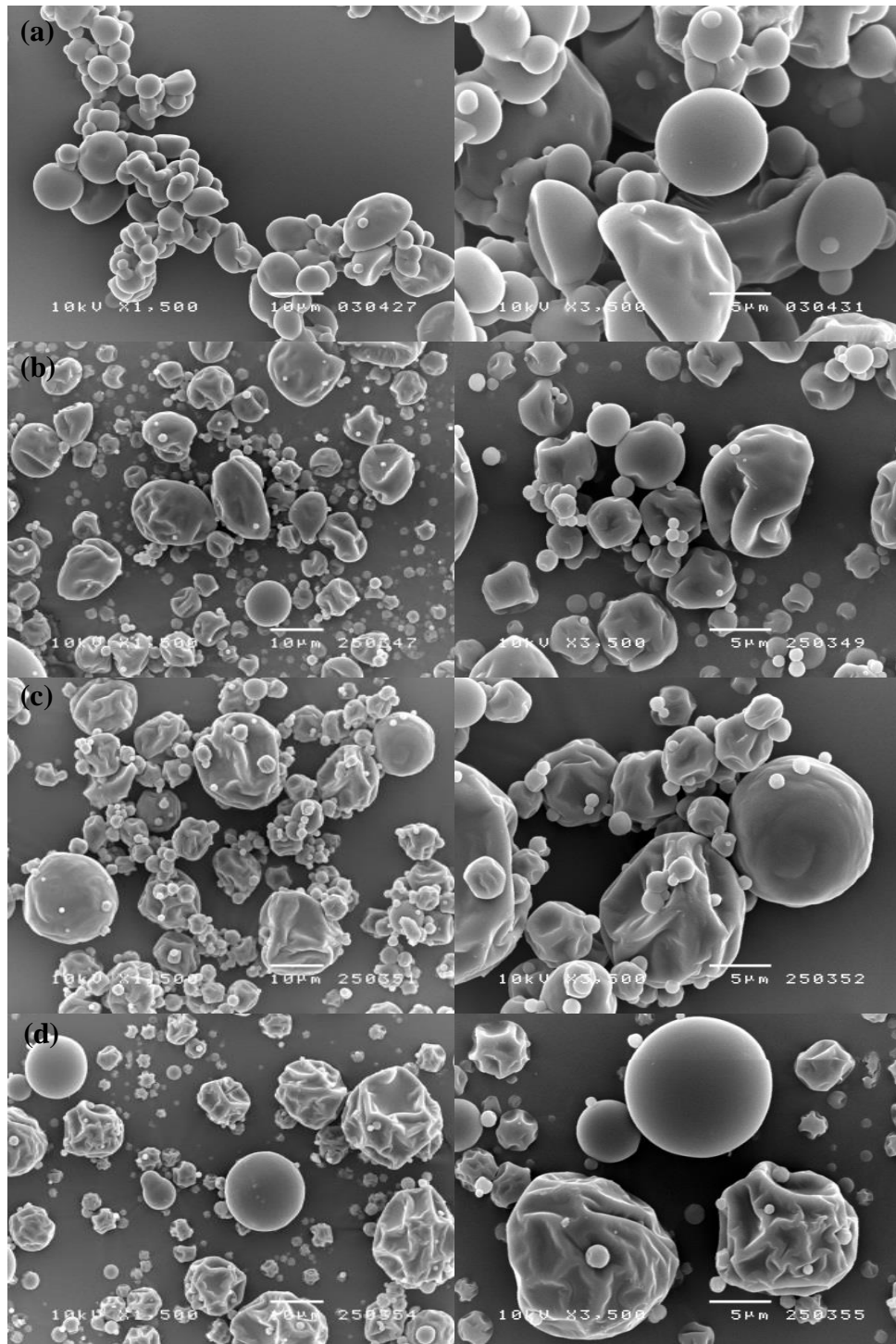


รูปที่ 4.34 ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน (◆) 40 °C (■) 50 °C (▲) 60 °C (X) 70 °C.

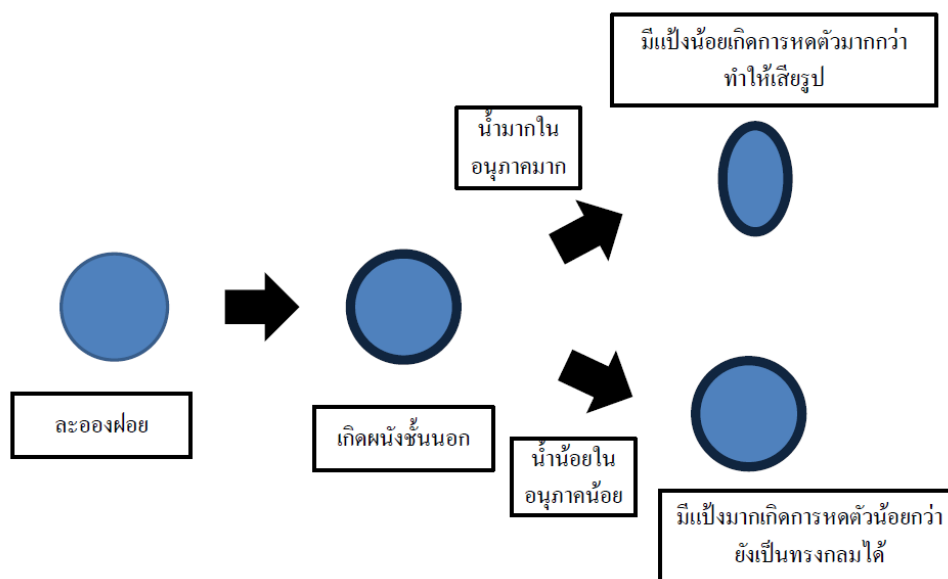
4.3 ผลของปริมาณความเข้มข้นผงแป้งในสารสกัดแอนโธไซยานินและความดันในการอบแห้งแบบพ่นฝอย

4.3.1 ผลต่อลักษณะรูปร่างพื้นฐานของผงแป้ง

รูปที่ 4.36 เป็นอนุภาคที่ได้จากการอบแห้งที่ความเข้มข้นแป้งต่างๆ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 160 °C จะพบว่าที่ความเข้มข้นของแป้งน้อยอนุภาคที่ได้จะมีลักษณะบุดเบี้ยวไม่ค่อยเป็นทรงกลมและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแป้งขึ้นอนุภาคที่ได้จะมีความเป็นทรงกลมมากขึ้น เกิดจากที่ความเข้มข้นของแป้งน้อยหดยอดมวลของสารละลายส่วนใหญ่จะประกอบด้วยตัวทำละลาย ทำให้เมื่อเกิดการอบแห้งน้ำส่วนใหญ่ในหดยอดสารละลายจะระเหยออกไปทำให้อนุภาคเกิดการบิดเบี้ยวและเสียรูป โดยที่ความเข้มข้นแป้งน้อยจะเกิดการบิดเบี้ยวของรูปร่างมากกว่าเนื่องมาจากที่อุณหภูมิในการอบแห้งสูงสารละลายจะเกิดการก่อตัวเป็นผนังอย่างรวดเร็ว ทำให้ความเข้มข้นของน้ำด้านในไม่สามารถแพร่มาที่ผิวได้ทัน จึงเกิดเป็นผนังพอน้ำด้านในระเหยออกไปละอองฝอยจะเกิดการหดตัวในกรณีที่มีความเข้มข้นต่ำสารในละอองฝอยจะเป็นน้ำเป็นส่วนใหญ่พอระเหยไปจะทำให้หยดน้ำเกิดการหดตัวมากกว่า ทำให้แป้งเสียรูปมากกว่า ซึ่งจะไม่พบการหดตัวแบบนี้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าเนื่องเวลาที่ใช้ในการระเหยน้ำจะนานกว่าทำให้ความเข้มข้นน้ำจากด้านในสามารถถ่ายเทมายังผิวด้านนอกได้ทัน ผนังจึงก่อตัวช้ากว่าโดยจะเริ่มก่อตัวเมื่อความชื้นในหดยอดสารละลายเหลือน้อยแล้ว ทำให้เกิดการหดตัวเมื่อก่อนผนังแล้วน้อยกว่าแป้งจึงยังคงรูปทรงกลมได้

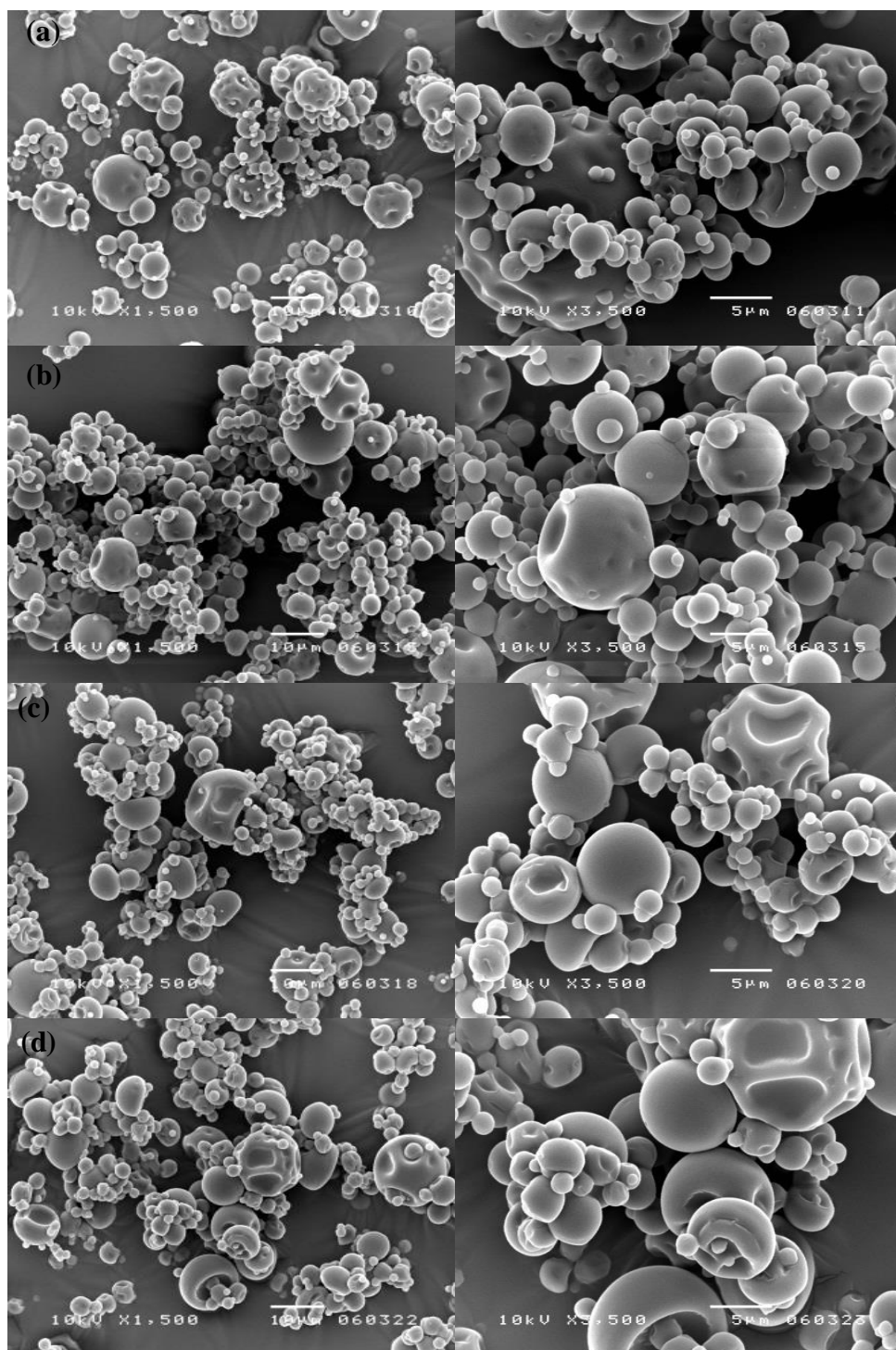


รูปที่ 4.35 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบฟุ้งฝอยที่อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิเข้า 160 °C ความดันบรรยากาศ ความเข้มข้นแป้ง (a) 10 wt% (b) 20 wt% (c) 30 wt% (d) 40 wt%

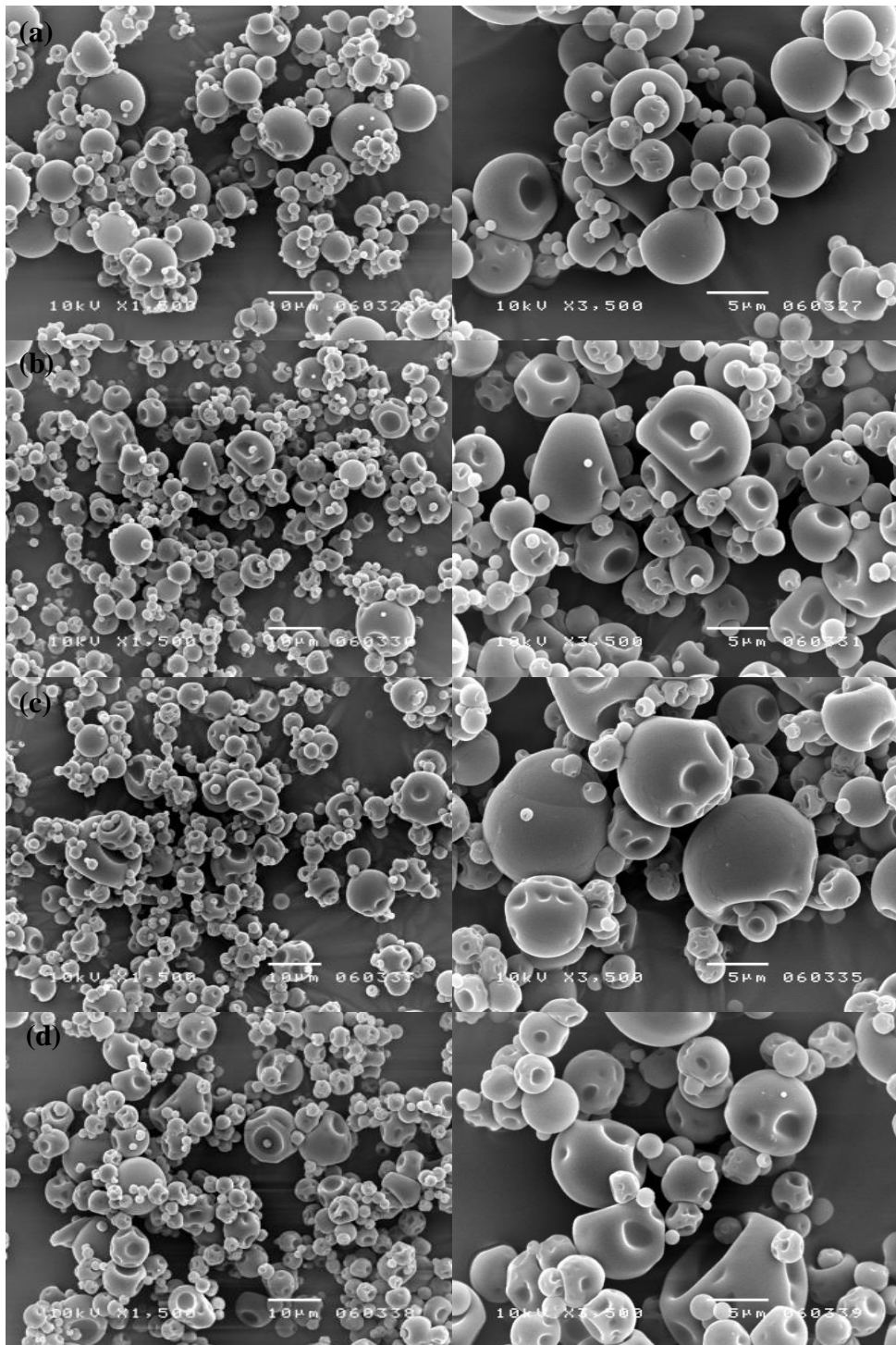


รูปที่ 4.36 การเสียรูปทรงกลมของอนุภาคที่ความเข้มข้นแป้งต่ำ

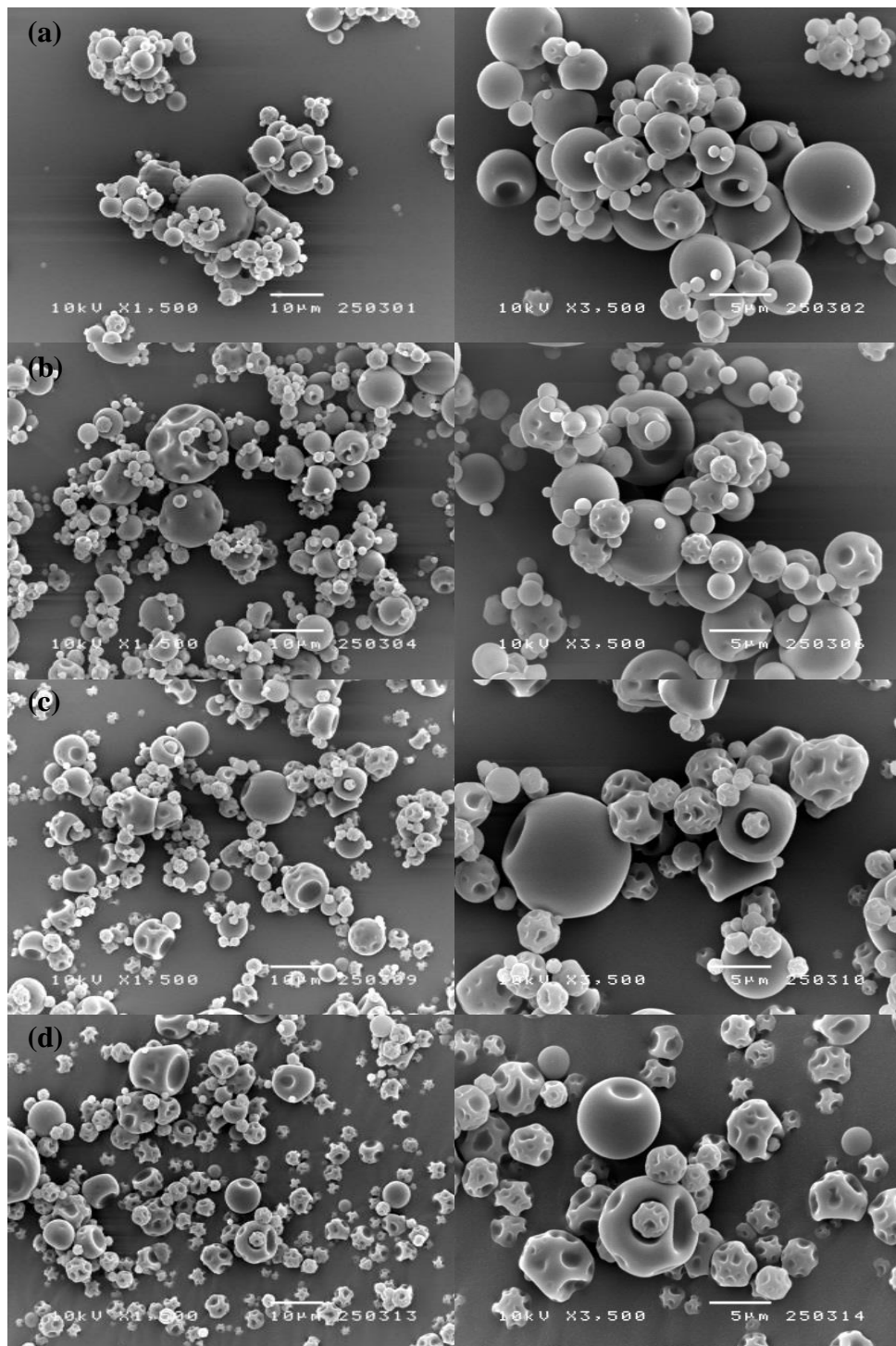
รูปที่ 4.37-4.39 จะแสดงให้เห็นว่าอนุภาคผงแป้งที่ได้จะมีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีเกาะตัวกันของอนุภาค โดยเมื่อความเข้มข้นของแป้งมีปริมาณมากขึ้น อนุภาคของผงแป้งที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเกิดจากเมื่อความเข้มข้นแป้งมากขึ้นความหนืดและแรงตึงผิวจะมากขึ้นทำให้อนุภาคที่ออกจากหัวฉีดจะมีขนาดใหญ่กว่า เมื่อละอองฝอยได้รับความร้อนและตัวทำละลายที่เป็นน้ำระเหยน้ำออกไป ที่ความเข้มข้นแป้งน้อยปริมาณของแป้งจะมีน้อยกว่าทำให้เกิดอนุภาคที่เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายที่มีแป้งละลายอยู่ในปริมาณที่มากกว่าอนุภาคที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่าและไม่มีการบิดเบี้ยวเสียรูปเหมือนที่เกิดที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากการระเหยที่ช้ากว่าทำให้ความเข้มข้นแป้งภายนอกที่สูงขึ้นเนื่องจากการระเหยของน้ำสามารถแพร่ออกข้างนอกได้ทัน ทำให้ในช่วงแรกละอองฝอยจะเกิดการหดตัว และทำให้เริ่มเกิดผนังเมื่อความเข้มข้นของแป้งทั้งหยดสูงทำให้เกิดการหดตัวน้อยกว่า และเมื่อความดันลดลงอนุภาคที่ได้จะมีรอยเว้ามากขึ้นซึ่งเกิดมาจากเมื่อหยดของเหลวเกิดการก่อตัวเป็นผนังน้ำบางส่วนที่ยังอยู่ด้านในของอนุภาคจะเกิดการกลายเป็นไอเมื่อความดันภายนอกต่ำกว่าความดันภายในของอนุภาคจะเกิดแรงดันจากภายในทำให้เกิดอนุภาคที่เป็นรอยเว้าขึ้น และเมื่อใช้ความดันภายนอกที่ต่ำลงผลต่างของแรงดันจะมากขึ้นทำให้เกิดโอกาสที่ความดันจากภายในจะดันผนังออกไปทำให้เกิดรอยเว้ามีมากขึ้น



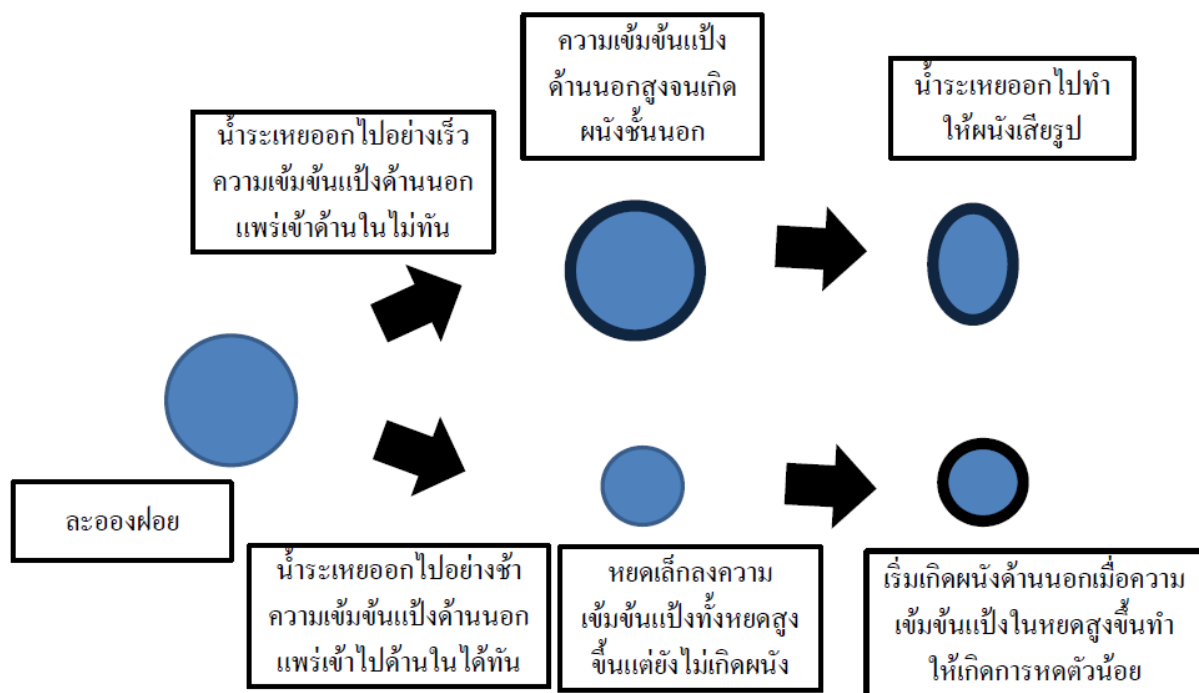
รูปที่ 4.37 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 20 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C ความดัน (a) 0.93 atm (b) 0.74 atm (c) 0.54atm (d)0.34atm



รูปที่ 4.38 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงเป็่งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้น
 แป้ง 30 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C ความดัน (a)
 0.93 atm (b) 0.74 atm (c) 0.54atm (d)0.34atm



รูปที่ 4.39 ลักษณะพื้นฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C ความดัน (a) 0.93 atm (b) 0.74 atm (c) 0.54atm (d)0.34atm



รูปที่ 4.40 การเสียรูปทรงกลมเมื่ออัตราการระเหยสูง

4.3.2 ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

จากรูป 4.41 ที่จะเห็นว่าเมื่อปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในสารละลายน้อยลงขนาดของอนุภาคจะมีขนาดเล็กเกิดจากที่ความเข้มข้นต่ำของแข็งในหยดสารละลายจะมีน้อยทำให้เมื่อน้ำระเหยออกไปจะทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า และที่เมื่อความเข้มข้นแป้งมีมากขึ้นสารละลายจะมีความหนืดและแรงตึงผิวมากขึ้นทำให้ละอองฝอยที่พ่นออกมาจะมีขนาดใหญ่ขึ้นดังสมการ[10]

$$D_{3,2} = \frac{585 \times 10^3 \sqrt{\sigma}}{V_{REL} \sqrt{\rho}} + 597 \left(\frac{\mu}{\sqrt{\sigma \rho}} \right)^{0.45} \left(\frac{1000 V_{FL}}{V_{AIR}} \right)^{1.5} \quad (4.3)$$

โดยเป็นขนาดของละอองฝอยที่เกิดจากหัวฉีดแบบของไหลสองชนิด

σ = แรงตึงผิวของตัวทำละลาย (นิวตันต่อเมตร)

ρ = ความหนาแน่นของตัวทำละลาย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

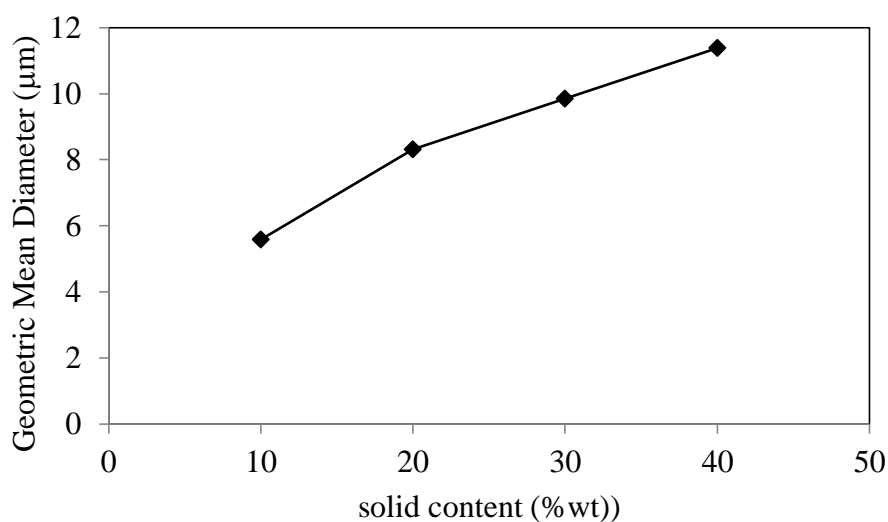
μ = ความหนืดของตัวทำละลาย (เซนติพอยส์)

V_{FL} = อัตราการป้อนสารละลาย (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

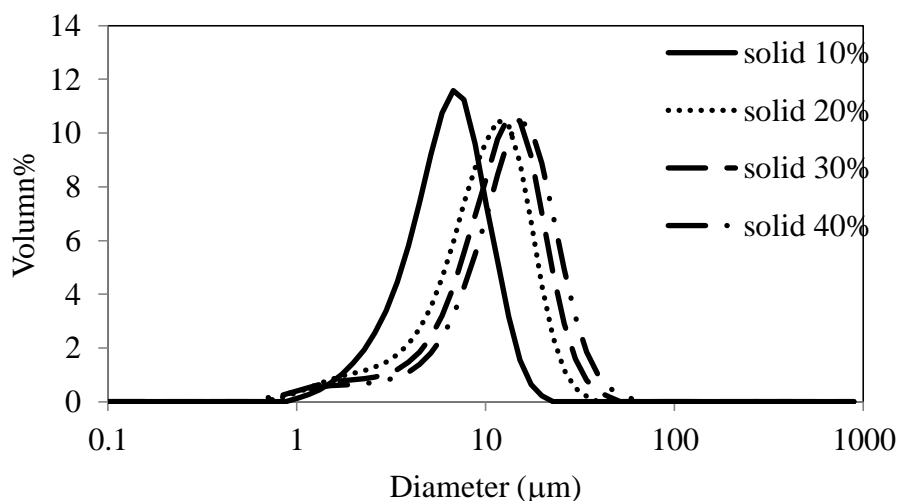
V_{AIR} = อัตราการไหลของอากาศเข้า (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

V_{REL} = อัตราเร็วของอากาศออกจากหัวฉีด (เมตรต่อวินาที)

โดยผงแป้งที่ได้มีขนาดระหว่าง 6-12 ไมโครเมตร มีการกระจายเป็นระฆังคว่ำ โดยจะพบว่า การกระจายตัวของอนุภาคจะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความเข้มข้นของแป้งเปลี่ยนไป แสดงว่าความเข้มข้นของผงแป้งจะไม่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาค

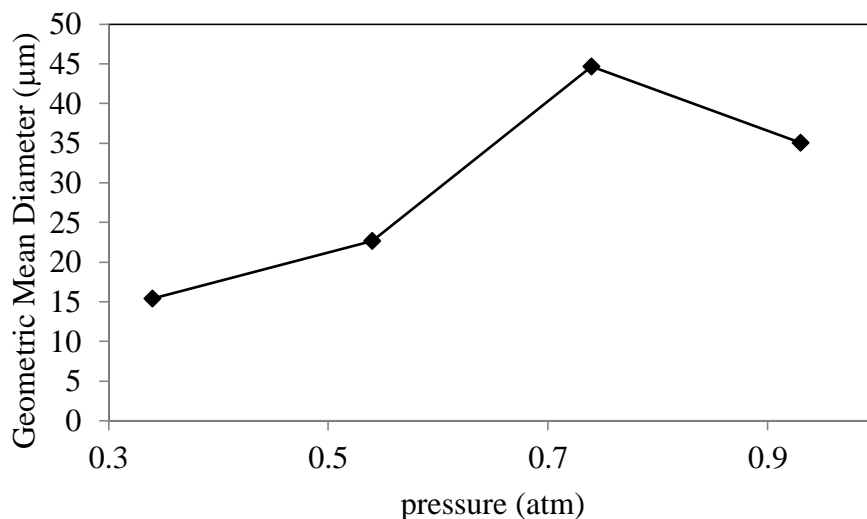


รูปที่ 4.41 ขนาดของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้งค่าต่างๆ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 160 °C

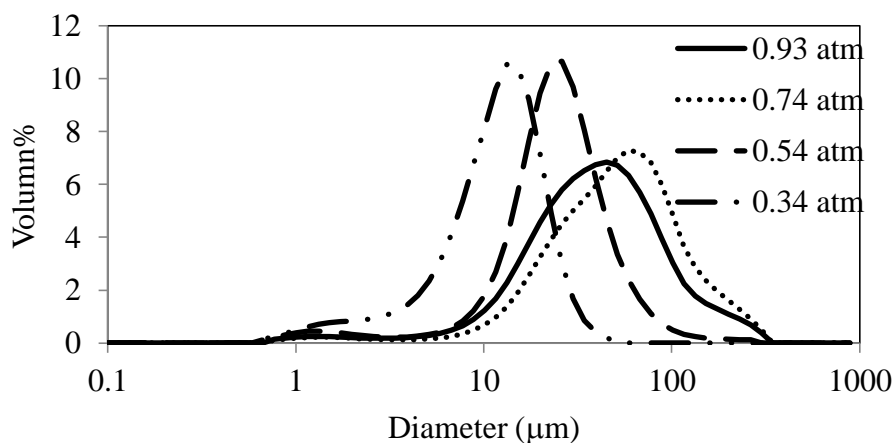


รูปที่ 4.42 การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้งค่าต่างๆ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 160 °C

จากรูปที่ 4.43 จะพบว่าเมื่อความดันลดลงขนาดของอนุภาคจะมีขนาดเล็กลง เกิดจากที่ความดันต่ำปริมาณอากาศในระบบจะน้อยลงทำให้อากาศไม่สามารถพาอนุภาคไปแยกที่ไซโคลอนได้ แล้วตกลงที่ด้านล่างของห้องอบ การกระจายตัวของอนุภาคจะเป็นระฆังคว่ำที่ความดัน 0.93 กับ 0.74 บรรยากาศจะมีการกระจายตัวของอนุภาคมากกว่า

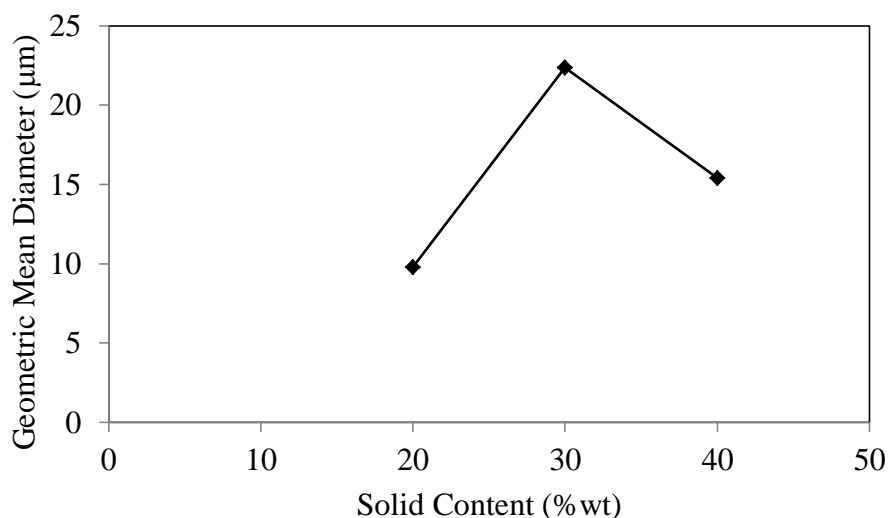


รูปที่ 4.43 ขนาดของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 50 °C ความเข้มข้นแป้ง 20 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันต่างๆ

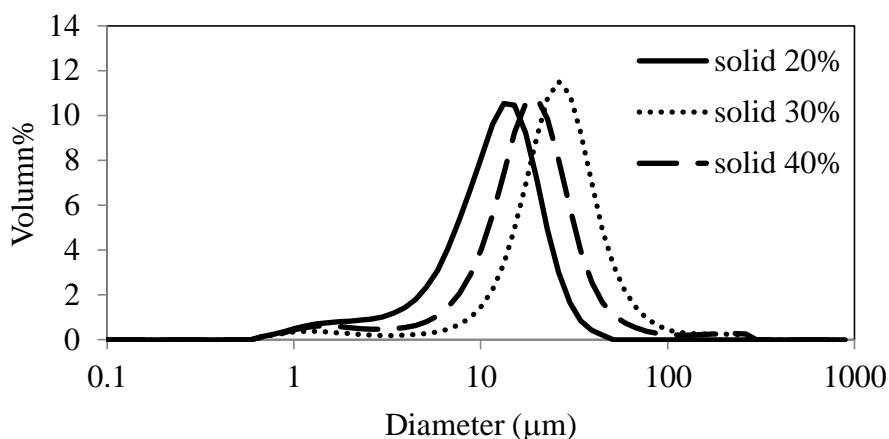


รูปที่ 4.44 การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 50 °C ความเข้มข้นแป้ง 20 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันต่างๆ

จากรูปที่ 4.45 จะเห็นว่าอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแป้งมากขึ้น เนื่องจากปริมาณแป้งที่มากขึ้นในละอองฝอยทำให้เมื่อระเหยน้ำออกไปแล้วจะเหลือปริมาณแป้งมากกว่าอนุภาคที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ขึ้นและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแป้งจะทำให้ความหนืดและแรงตึงผิวของสารละลายมีมากขึ้นทำให้ละอองฝอยที่ออกมามีขนาดใหญ่ขึ้นตามสมการที่ 4.3 ส่วนการกระจายตัวของอนุภาคจะเป็นแบบระฆังคว่ำที่ โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะไม่มีผลต่อการกระจายตัวของผงแป้ง



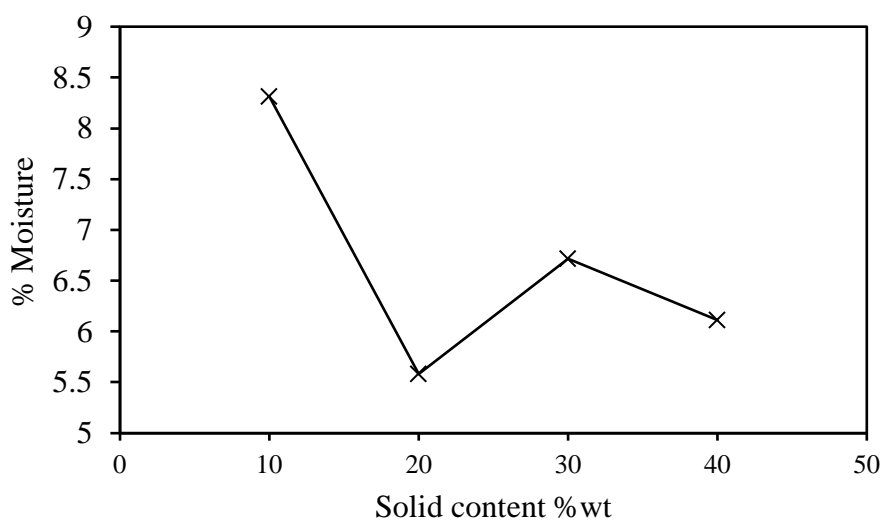
รูปที่ 4.45 ขนาดของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 0.34 atm ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C



รูปที่ 4.46 การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้งค่าต่างๆ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 0.34 atm ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C

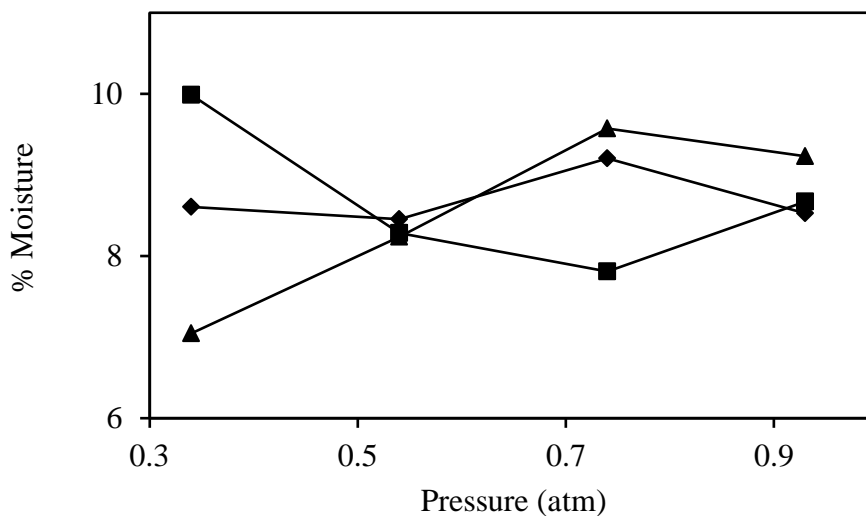
4.3.3 ผลต่อปริมาณความชื้นในผงแป้ง

จากรูปที่ 4.47 ผลที่ได้จะแสดงให้เห็นว่าความชื้นที่มีในผงแป้งที่ได้มาจากระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะลดลงเมื่อมีปริมาณแป้งมอลโทไรด์กตรินมากขึ้น ในการอบแห้งปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสายป้อนจะมีผลต่อปริมาณความชื้นของผงแป้งที่ได้ การเพิ่มปริมาณแป้งจะทำให้ปริมาณของแข็งเพิ่มมากขึ้นและลดปริมาณน้ำที่ต้องระเหย ดังนั้นปริมาณความชื้นที่เหลืออยู่ในผงแป้งจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของแข็งขึ้น



รูปที่ 4.47 ปริมาณความชื้นในผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้งต่างๆ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 160°C

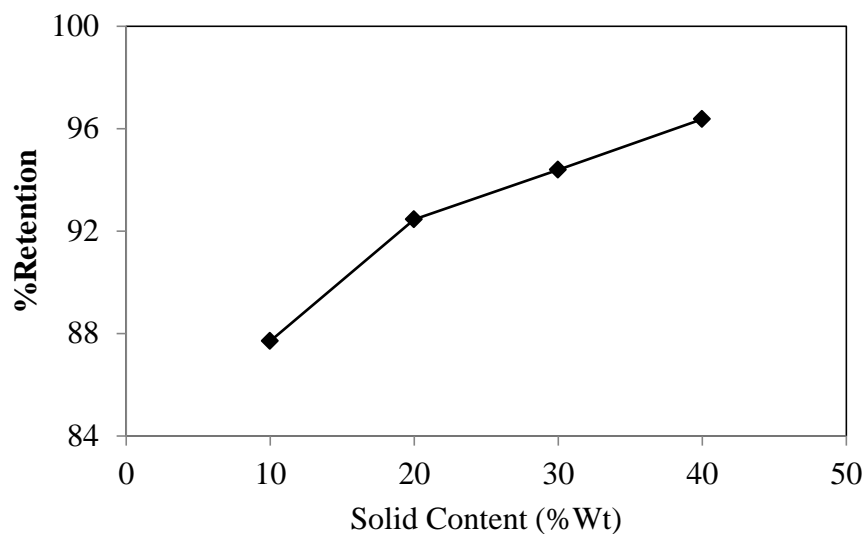
จากรูปที่ 4.48 จะแสดงถึงปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในผงแป้งที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้งค่าต่างๆ โดยความชื้นในผงแป้งจะอยู่ในช่วงระหว่าง 8-10% ปริมาณความชื้นที่สูงในผงแป้งเกิดเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนจะทำได้น้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำทำให้ต้องใช้เวลาในการอบแห้งมากกว่าทำให้ผงแป้งเหลือความชื้นอยู่ในผงในปริมาณมากทำให้เกิดการเกาะติดกันของอนุภาค และการเพิ่มปริมาณแป้งจะทำให้ความชื้นที่เหลืออยู่ในผงแป้งมีน้อยกว่า เนื่องจากปริมาณน้ำที่ต้องระเหยจะมีน้อยกว่า



รูปที่ 4.48 ปริมาณความชื้นที่อยู่ในผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 50 °C อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นแป้ง (◆) 20 wt% (■) 30 wt% (▲) 40wt%

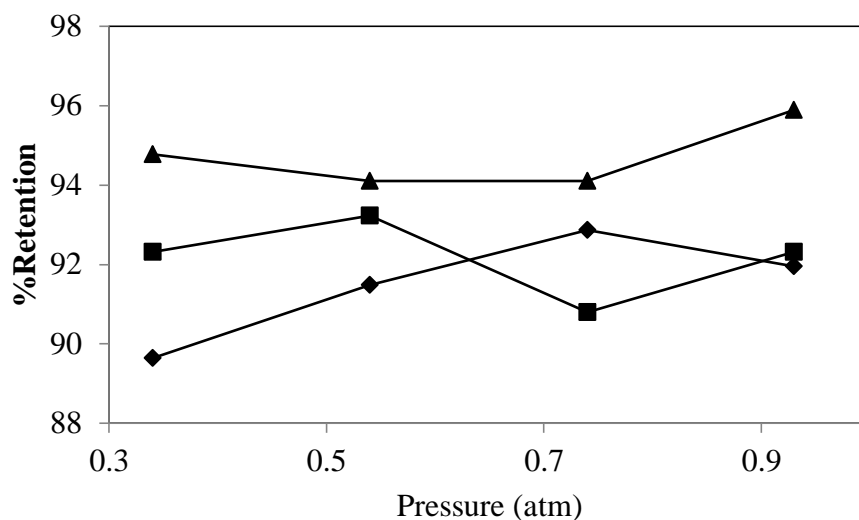
4.3.4 ผลต่อปริมาณแอนโรโซยานินที่เหลืออยู่ในผงแป้ง

จากรูปที่ 4.49 จะพบว่าปริมาณแอนโรโซยานินที่กักเก็บได้จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นแป้งในสารละลายเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแป้งที่มีปริมาณมากขึ้นในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะทำให้เหลือความชื้นที่มีในผงแป้งน้อยลง การที่มีความชื้นมากเป็นเหตุที่ทำให้แอนโรโซยานินสลายตัวมากขึ้นในระหว่างการอบแห้ง ดังนั้นที่ความชื้นมากกว่าปริมาณการสลายตัวของแอนโรโซยานินจึงมากกว่า และที่ความเข้มข้นแป้งน้อยลงอนุภาคที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าทำให้มีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศมากกว่าทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากกว่าปริมาณแอนโรโซยานินที่กักเก็บได้จึงน้อยลง



รูปที่ 4.49 ปริมาณแอนโคโนซานินที่กักเก็บได้จากกระบวนการอบแห้งแบบฟุ้งที่อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 160°C ความดันบรรยากาศ ความเข้มข้นแป้งค่าต่างๆ

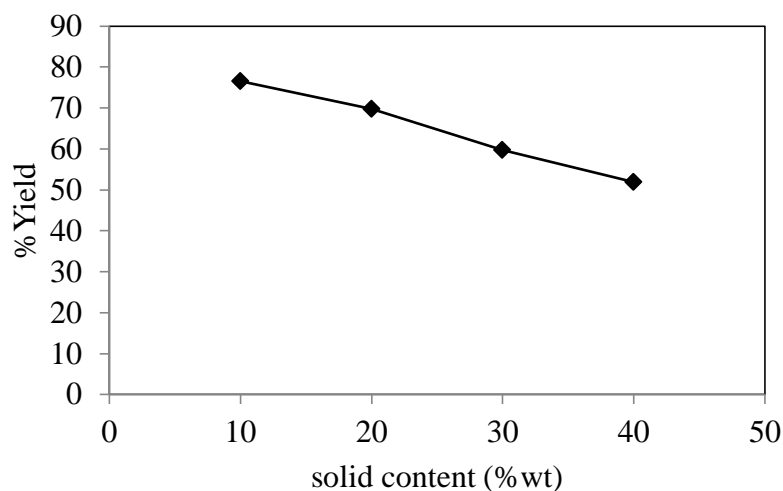
จากรูปที่ 4.50 จะพบว่าแสดงปริมาณแอนโคโนซานินที่กักเก็บได้จะอยู่ที่ประมาณ 90-95 % โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแป้งที่สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณแอนโคโนซานินที่กักเก็บได้สูงขึ้น เนื่องจากที่ความเข้มข้นแป้งต่ำกว่าปริมาณน้ำที่มีในละอองฝอยจะมีมากกว่า เมื่ออบแห้งจะเหลือปริมาณความชื้นที่อยู่ในผงแป้งสูงกว่า จึงเกิดการสลายตัวมากกว่าที่ความเข้มข้นแป้งต่ำ และความดันที่เปลี่ยนไปจะไม่มีผลต่อการสลายตัวของแอนโคโนซานิน



รูปที่ 4.50 ปริมาณแอนโคโนซานินที่กักเก็บได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50°C ที่ความเข้มข้นแป้ง(◆) 20%wt (■) 30%wt (▲) 40%wt.

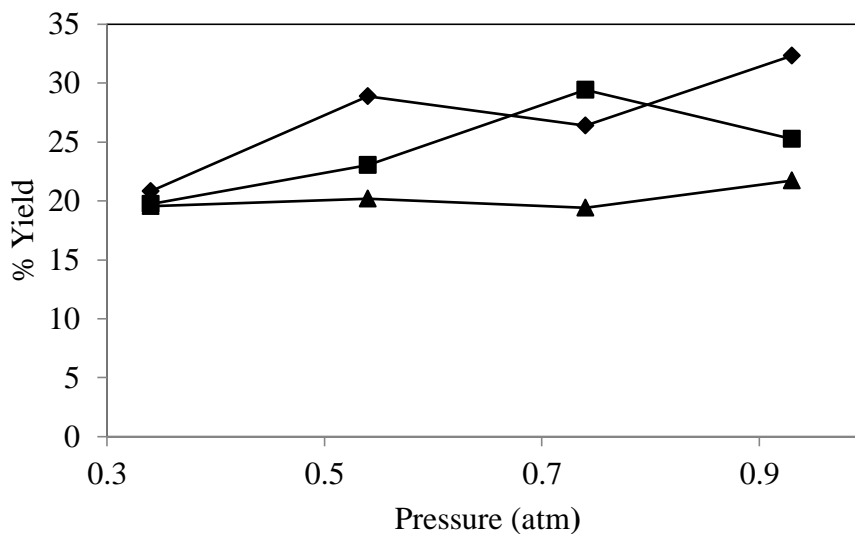
4.3.5 ผลต่อร้อยละผลได้

รูปที่ 4.51 จะแสดงร้อยละผลได้ของแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยการเปลี่ยนปริมาณความเข้มข้นแป้งที่ค่าต่างๆ จะพบว่าปริมาณแป้งที่ได้จะอยู่ระหว่าง 50-80 % ซึ่งผงแป้งที่ได้จะลดลงเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นทำให้สารละลายมีความหนืดมากขึ้นจะมีโอกาสเกาะติดผนังมากขึ้นร้อยละผลได้จึงลดลง แต่ยังคงได้ปริมาณแป้งมากกว่าการอบแห้งที่สูญญากาศ เนื่องจากอากาศความดันต่ำปริมาณอากาศจะน้อยทำให้ไซโคลนทำงานมีประสิทธิภาพน้อยลงการแยกอากาศกับผงแป้งจะยากขึ้นทำให้มีผงแป้งไหลออกไปกับอากาศมากขึ้น



รูป 4.51 ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้งต่างๆ อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 160 °C

ปริมาณผงแป้งที่ได้กระบวนการอบแห้งจะอยู่ที่ประมาณ 20-30 % โดยจากรูปที่ 4.52 จะเห็นว่า การเพิ่มความเข้มข้นของแป้งมอลโตเด็คตรินจะทำให้ปริมาณผงแป้งที่ได้ลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของแป้งมากขึ้นจะทำให้สารละลายมีความหนืดมากขึ้น ทำให้มีแป้งปริมาณมากขึ้นไปเกาะตามผนังห้องอบทำให้ปริมาณผงแป้งที่ได้ลดลง และเมื่อลดความดันในการอบแห้งลง ปริมาณผงแป้งที่ได้จะลดลงเนื่องจากที่สภาวะความดันสูญญากาศ ปริมาณอากาศจะมีน้อยลง ทำให้การทำงานของไซโคลอนมีประสิทธิภาพน้อยลง การกักเก็บสารจึงทำได้น้อยลง และปริมาณความเข้มข้นแป้งที่ 10 % โดยน้ำหนักจะไม่สามารถทำให้แห้งได้เนื่องจากมีปริมาณน้ำค่อนข้างมาก ทำให้ต้องใช้เวลาในการอบแห้งที่นานและพลังงานที่มากขึ้น ผงแป้งจึงไม่แห้งและกลายเป็นละอองน้ำติดกับห้องอบ

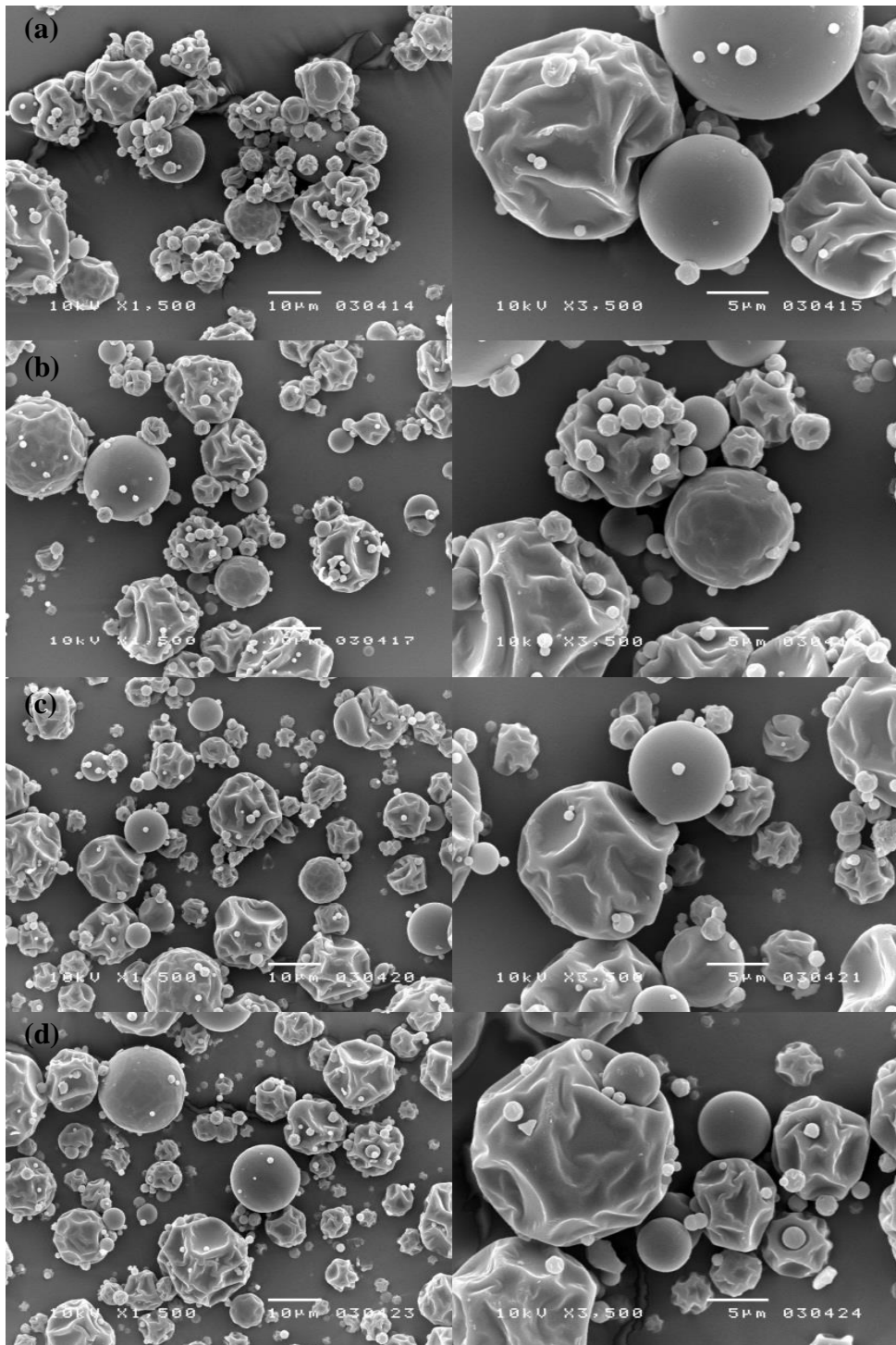


รูปที่ 4.52 ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตร ต่อนาที ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C ความเข้มข้นแป้ง (◆) 20 %wt (■) 30 %wt (▲) 40 %wt

4.4 ผลของอัตราการป้อนสารและความดัน

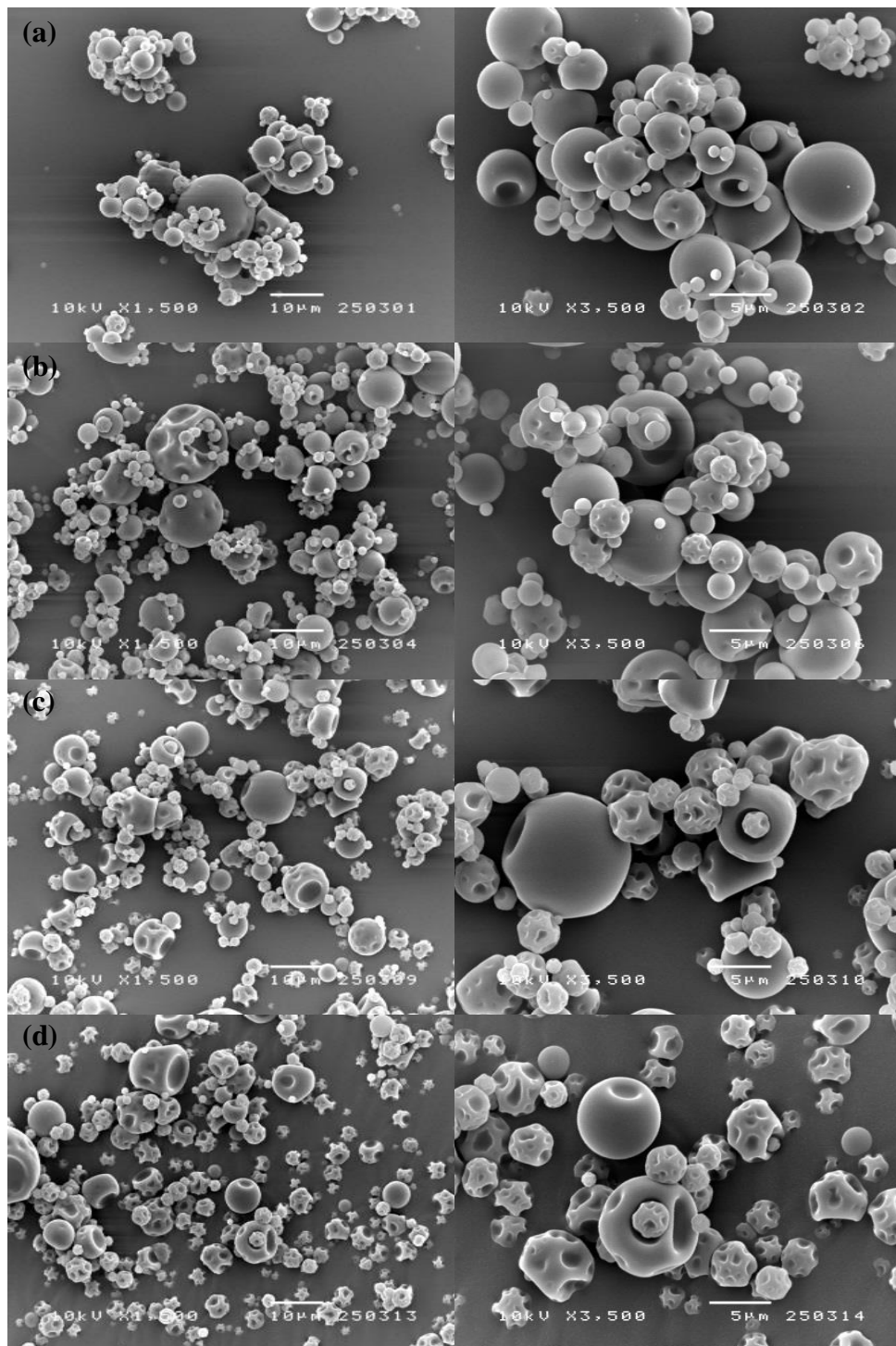
4.4.1 ผลต่อลักษณะรูปร่างพื้นฐานของผงแป้ง

จากรูป 4.53 ที่จะเห็นว่าผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยมีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีรอยเหี่ยวย่น มีการเกาะกันของอนุภาค โดยรอยเหี่ยวย่นจะเกิดมาจากการก่อดัวของผนังอย่างรวดเร็วที่ผิวของเหลวแล้วหุ้มหะของเหลวไว้ โดยที่ด้านในยังมีของเหลวเหลืออยู่เมื่อได้รับความร้อนของเหลวจะกลายเป็นไอทำให้เกิดความดันขึ้นในหะของเหลว จากนั้นความดันไอก็ดันผนังให้แตกออกมาทำให้ปริมาตรลดลงอนุภาคเกิดการหดตัวแล้วเกิดรอยเหี่ยวย่นขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารขนาดอนุภาคที่ได้จะพบว่าขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการเพิ่มอัตราการป้อนสารจะทำให้ละอองฝอยที่ออกมามีขนาดใหญ่ขึ้น

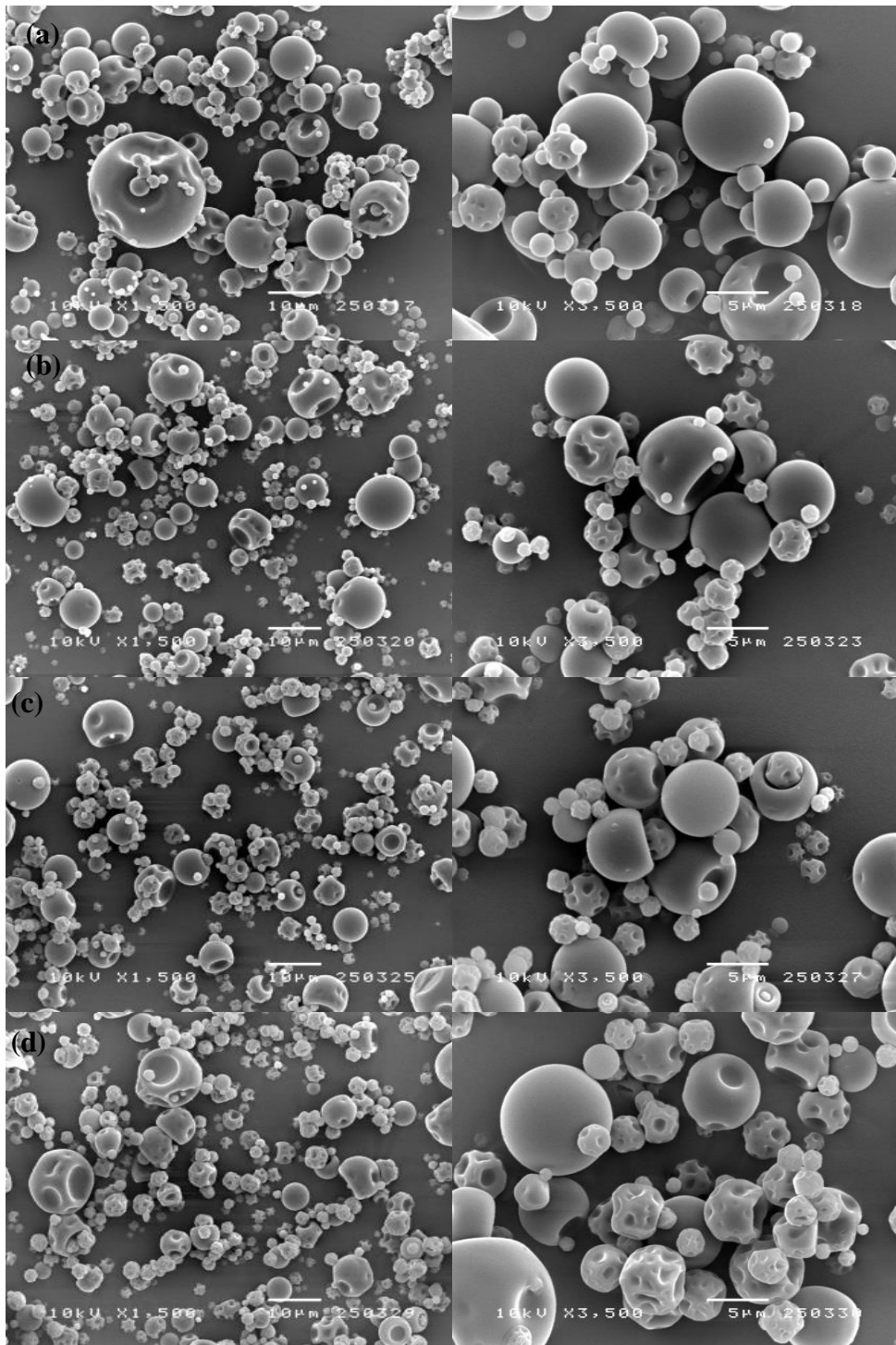


รูปที่ 4.53 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแข็งของที่ได้จากการอบแห้งแบบฟรอสายที่อุณหภูมิอากาศเข้า 160 °C ความเข้มข้นแป้ง 40 wt% อัตราการป้อนสาร (a) 3 มิลลิลิตรต่อนาที (b) 4.5 มิลลิลิตรต่อนาที (c) 6 มิลลิลิตรต่อนาที (d) 7.5 มิลลิลิตรต่อนาที

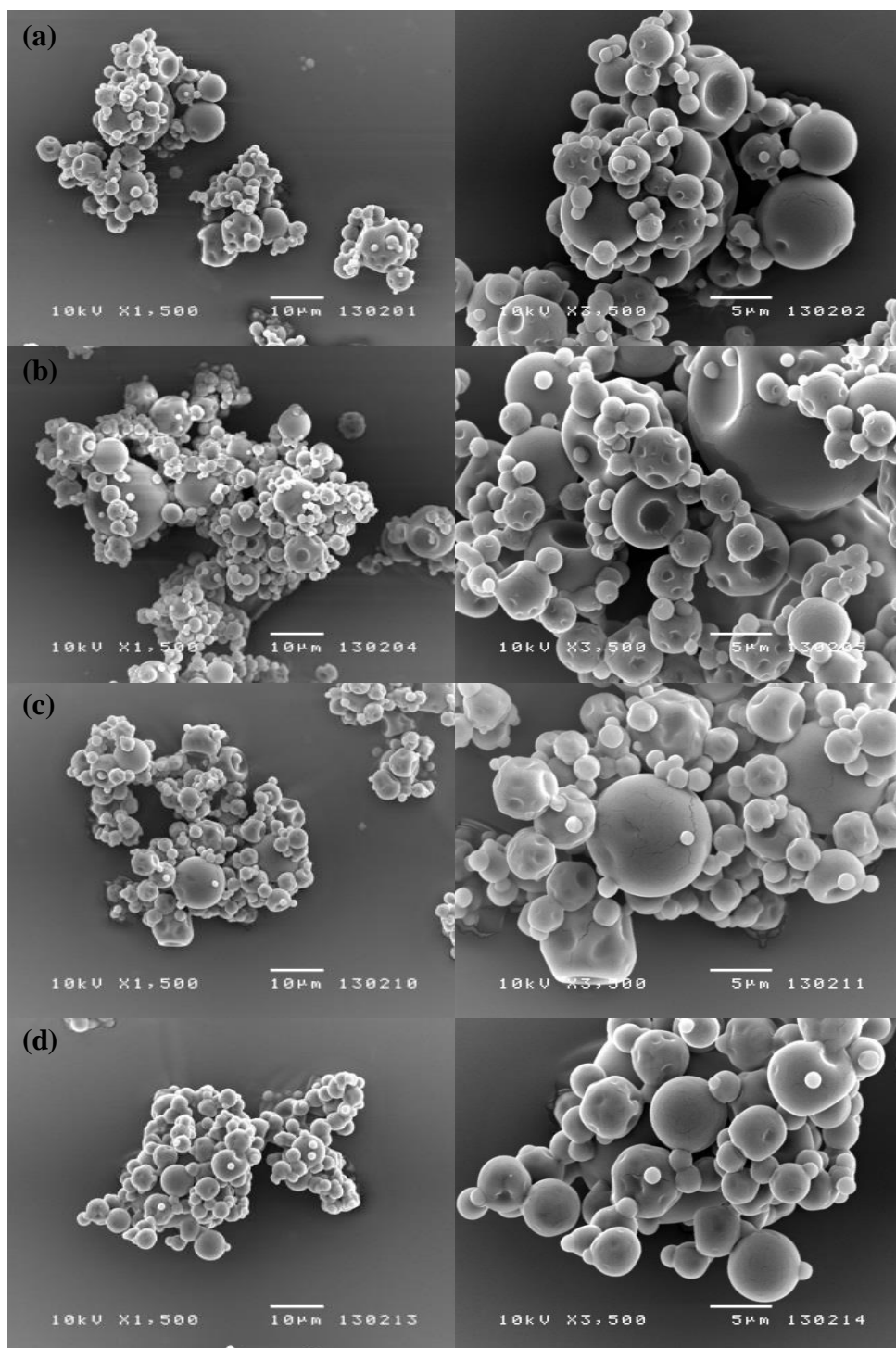
จากรูปที่ 4.54-4.57 จะแสดงลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเร็วของสายป้อนต่างๆ ตั้งแต่ 3, 4.5, 6, 7.5 มิลลิลิตรต่อนาที จะได้อนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลมเกาะกัน โดยเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารขึ้นอนุภาคที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการเกาะกันมากขึ้น โดยอนุภาคทรงกลมที่ได้จะมีผิวเป็นรอบเว้าเล็กน้อย เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารเพิ่มมากขึ้นละอองฝอยที่สร้างมาจากหัวฉีดฝอยจะมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้อนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเมื่อหยดสารละลายมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวที่ใช้ในการระเหยต่อปริมาตรตัวทำละลายที่ต้องระเหยมีน้อยลงทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศร้อนเป็นไปได้น้อยลงทำให้ตัวทำละลายระเหยออกไปได้น้อยกว่า อนุภาคที่แลกเปลี่ยนความร้อนไม่สมบูรณ์จึงเกาะกันได้มากกว่า และเมื่อลดความดันลงรอยเว้าของผงแป้งจะมีมากขึ้นเนื่องจากเมื่อละอองฝอยก่อตัวเป็นผนังแล้วของเหลวด้านในที่ยังไม่แห้งเมื่อได้รับความร้อนจะกลายสภาพเป็นไอและเกิดความดันขึ้นในสูญญากาศความดันด้านนอกจะน้อยกว่าด้านในเกิดผลต่างของความดันมากกว่าทำให้อิอน้ำดันออกไปข้างนอกผงแป้งเกิดเป็นรอยเว้าขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารมากขึ้นรอยเว้าจะลดลงเนื่องจากสารที่ป้อนจำนวนมากขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้น้อยลงปริมาณน้ำด้านในที่สามารถกลายเป็นไอได้จึงมีน้อยกว่าทำให้อากาศที่ไอจะดันผนังออกมามีน้อยลงผิวจึงเรียกว่า



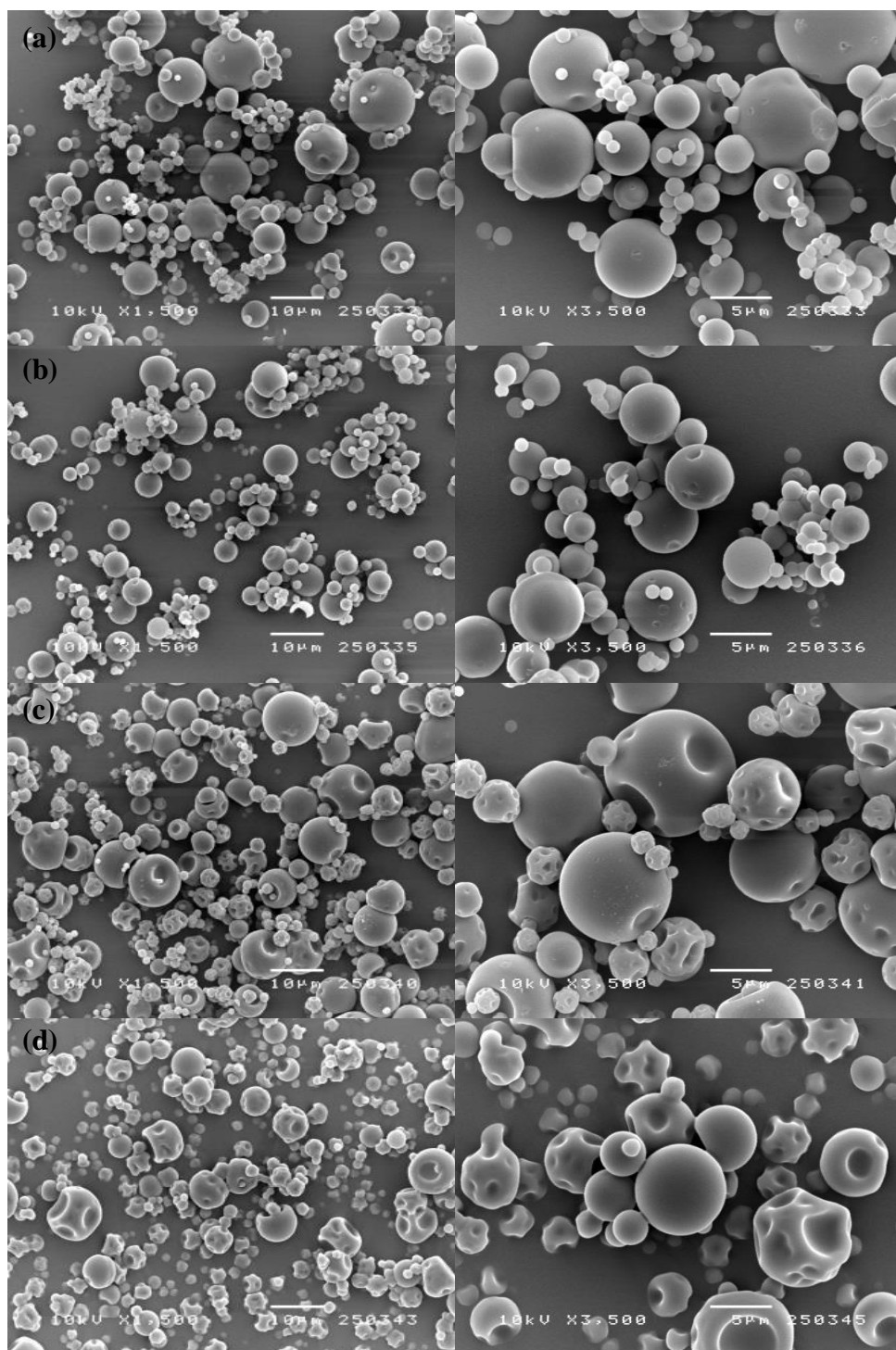
รูปที่ 4.54 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงเป็่งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้น
 แป้ง 40 % อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C ความดัน (a)
 0.93 atm (b) 0.74 atm (c) 0.54atm (d) 0.34atm



รูปที่ 4.55 ลักษณะพื้นฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 % อัตราการป้อนสาร 4.5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C ความดัน (a) 0.93 atm (b) 0.74 atm (c) 0.54atm (d) 0.34atm



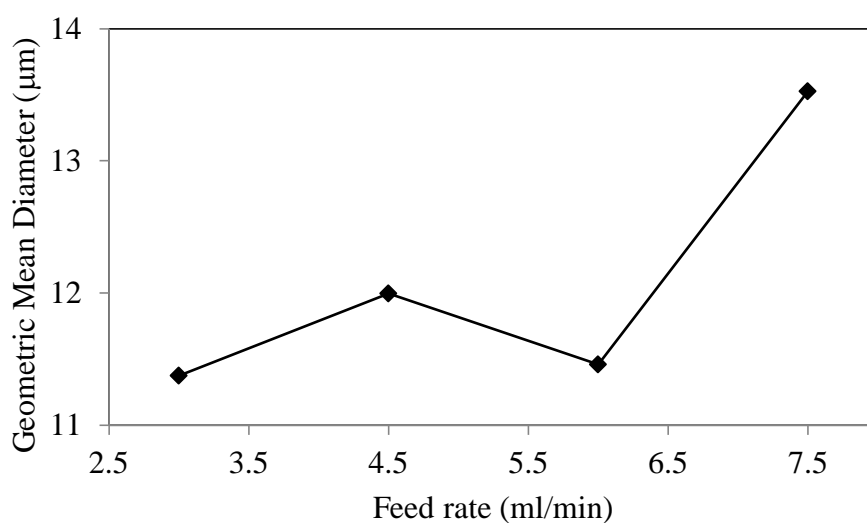
รูปที่ 4.56 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 % อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C ความดัน (a) 0.93 atm (b) 0.74 atm (c) 0.54atm (d) 0.34atm



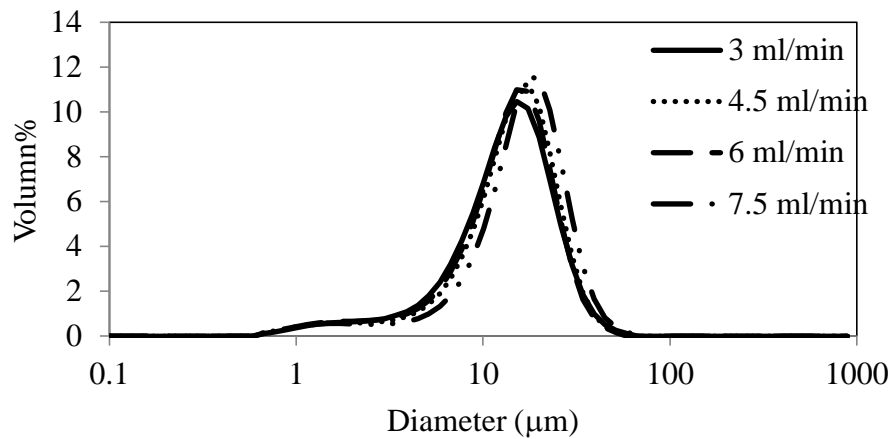
รูปที่ 4.57 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงแป้งของที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 % อัตราการป้อนสาร 7.5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C ความดัน (a) 0.93 atm (b) 0.74 atm (c) 0.54atm (d) 0.34atm

4.4.2 ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

อนุภาคที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความดันปกติอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสพบว่าอนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยเกิดมาจากเมื่อป้อนสารด้วยอัตราเร็วมากขึ้นละอองฝอยที่ผ่านหัวฉีดออกมาจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ตามสมการที่ 4.3 เมื่ออัตราการป้อนสารเพิ่มมากขึ้นละอองฝอยจะมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งพบว่าขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากช่วงที่ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างแคบทำให้เห็นผลได้ไม่ชัดเจนนัก โดยละอองฝอยที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้มีปริมาณแข็งที่เป็นของแข็งในละอองฝอยมากกว่าเมื่อละอองฝอยได้รับความร้อนทำให้น้ำระเหยออกไปเมื่อแห้งเป็นอนุภาคทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การกระจายตัวของอนุภาคจะเป็นแบบระฆังคว่ำที่มีค่าการกระจายตัวของอนุภาคใกล้เคียงกัน การเปลี่ยนอัตราการป้อนสารจะไม่ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคเปลี่ยนไป

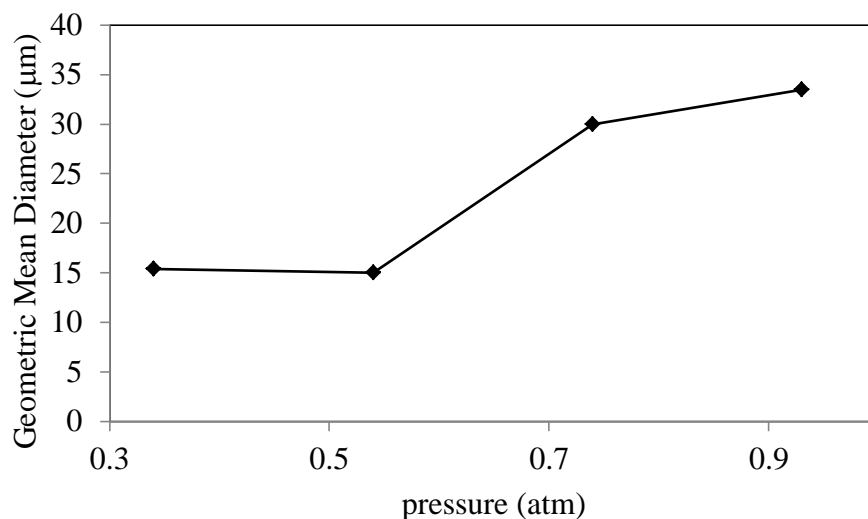


รูปที่ 4.58 ขนาดของผงแข็งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแข็ง 40 %wt ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 160 °C ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อนสารที่อัตราเร็วต่างๆ

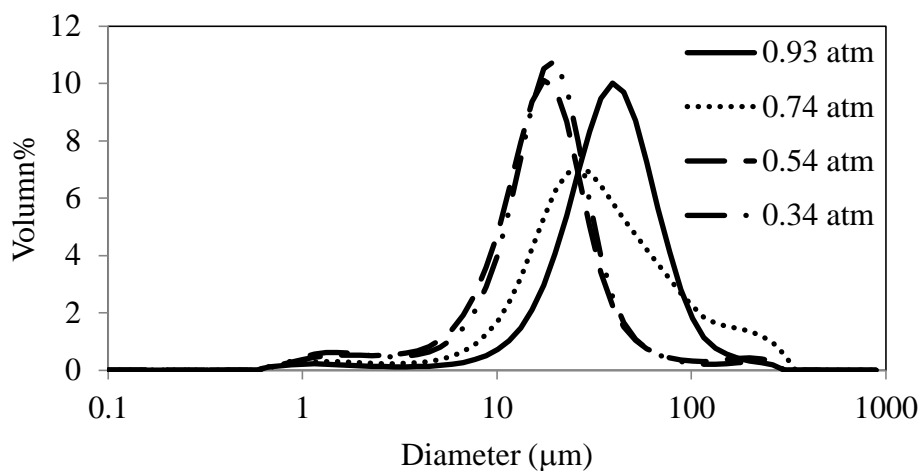


รูปที่ 4.59 การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 160 °C อัตราการป้อนสารที่อัตราเร็วต่างๆ

จากรูปที่ 4.60 จะเห็นว่าเมื่อความดันลดลงขนาดอนุภาคที่วัดได้จะมีขนาดเล็กลงเกิดจากความดันสูญญากาศปริมาณอากาศที่มีจะน้อยลง ทำให้พาอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ไปแยกที่ไซโคลนได้น้อยลงอนุภาคบางส่วนจึงตกลงไปที่ด้านล่างของห้องอบ และการกระจายตัวของอนุภาคจะเป็นระฆังคว่ำมีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกันแสดงว่าความดันไม่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาค นอกจากที่ความดัน 0.74 บรรยากาศ การกระจายตัวจะมากกว่าปกติ

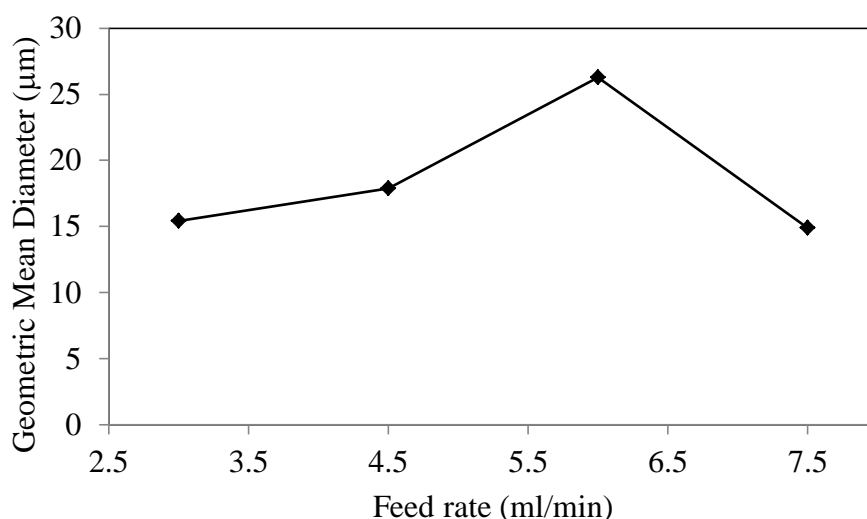


รูปที่ 4.60 ขนาดของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 50 °C ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันต่างๆ

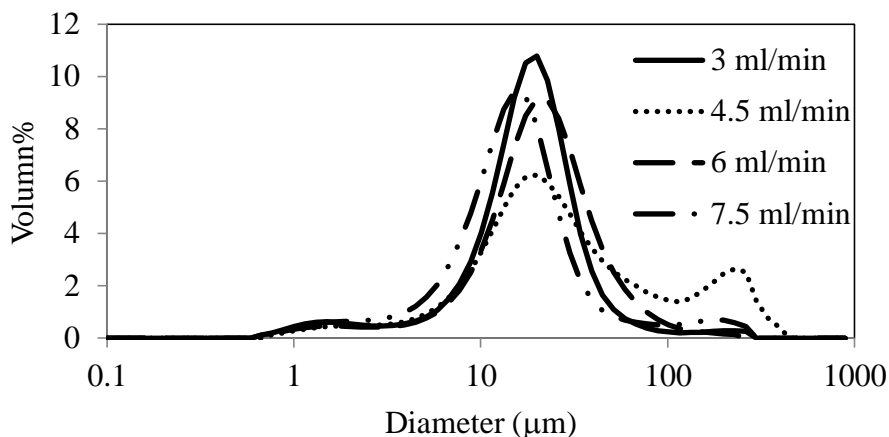


รูปที่ 4.61 การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 50 °C ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันต่างๆ

จากรูปที่ 4.62 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารมากขึ้นขนาดของอนุภาคที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารมากขึ้นละอองฝอยที่ผ่านออกมาจากหัวฉีดจะมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้อนุภาคที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเมื่ออัตราการป้อนสารมากขึ้นการกระจายตัวของอนุภาคจะมีมากขึ้นเนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนจะน้อยลงเมื่ออัตราการป้อนสารมากขึ้น ทำให้ละอองฝอยใช้เวลานานขึ้นในการทำให้แห้งละอองฝอยจึงมีโอกาสมากขึ้นที่ละอองฝอยจะเกิดการชนและรวมตัวกันทำให้อนุภาคมีการกระจายตัวมากกว่า



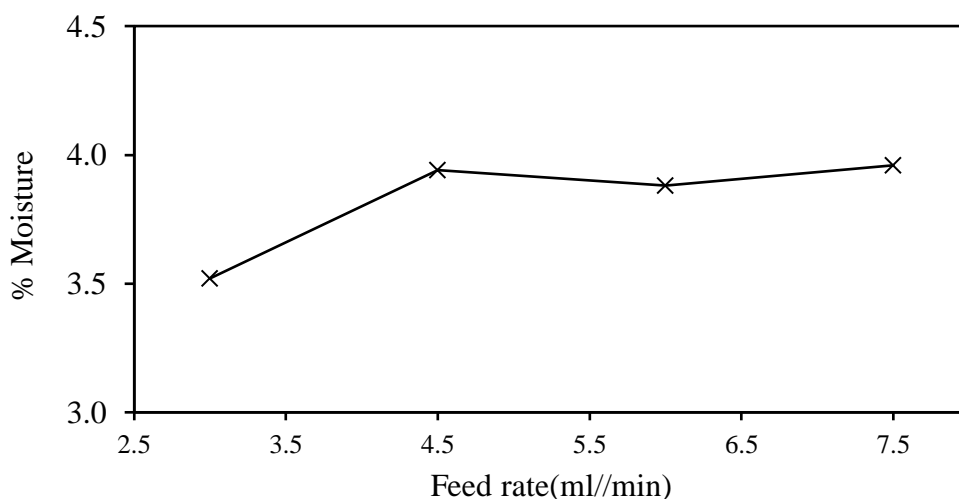
รูปที่ 4.62 ขนาดของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 50 °C ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันต่างๆ



รูปที่ 4.63 การกระจายตัวของผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 50 °C ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt อัตราการป้อนสาร 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันต่างๆ

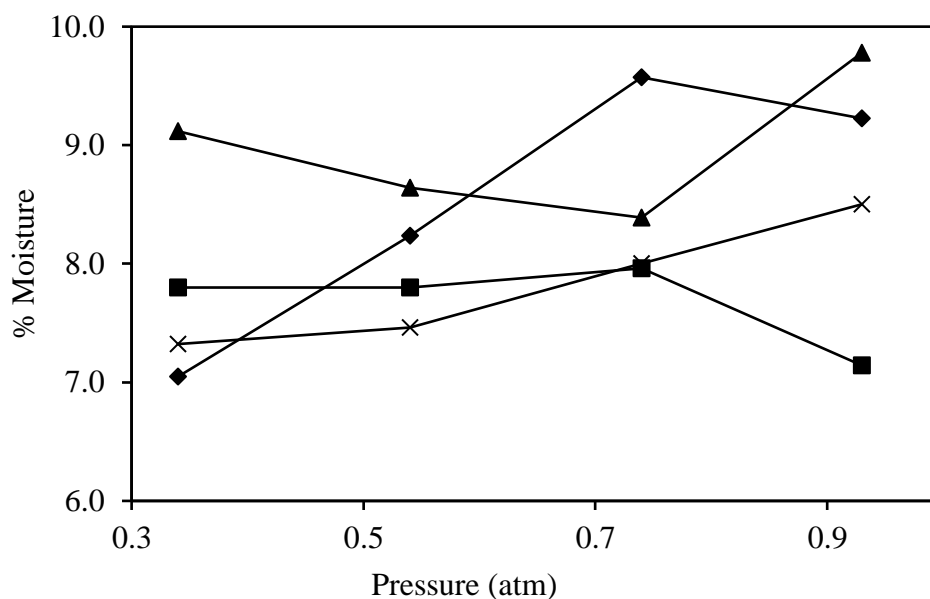
4.4.3 ผลต่อปริมาณความชื้นในผงแป้ง

จากรูปที่ 4.64 จะแสดงปริมาณความชื้นที่มีในผงแป้งโดยจะพบว่าปริมาณความชื้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสาร เนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนสารเพิ่มมากขึ้นการถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคกับอากาศร้อนจะน้อยลงและขนาดของละอองฝอยที่ออกมาจากหัวฉีดจะมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำมากขึ้นที่ต้องระเหย ทำให้ปริมาณความชื้นที่มีในผงแป้งมีมากขึ้น



รูปที่ 4.64 ปริมาณความชื้นที่อยู่ในผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 160 °C ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อนสารต่างๆ

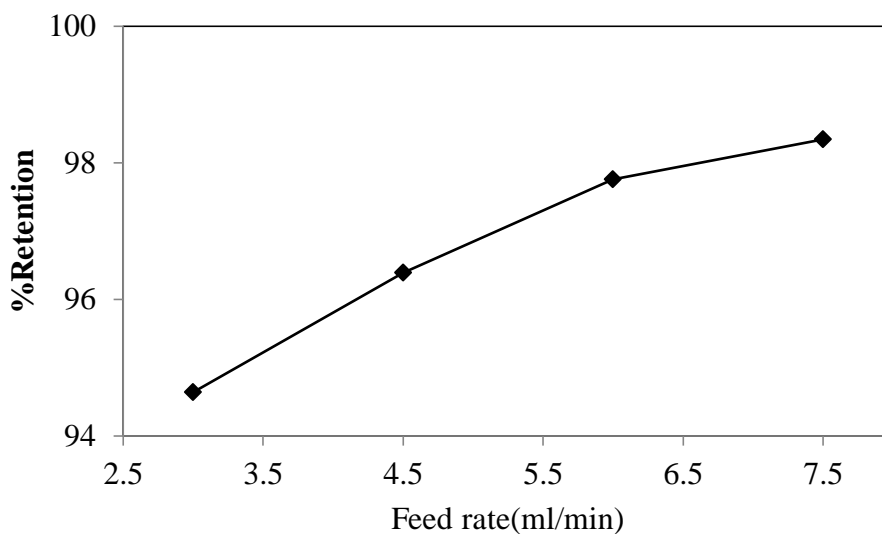
จากรูปที่ 4.65 ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในผงแป้งจะอยู่ระหว่างร้อยละ 7-10 โดยน้ำหนักซึ่งปริมาณความชื้นที่มีในผงแป้งจะสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 160 °C ซึ่งจะมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 3-4 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับละอองฝอยจะถ่ายเทพลังงานน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง ทำให้ปริมาณความชื้นที่เหลืออยู่ในผงแป้งมีมากกว่า



รูปที่ 4.65 ปริมาณความชื้นที่อยู่ในผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C อัตราการป้อนสาร (◆) 3 มิลลิลิตรต่อนาที (■) 4.5 มิลลิลิตรต่อนาที (▲) 6 มิลลิลิตรต่อนาที (X) 7.5 มิลลิลิตรต่อนาที

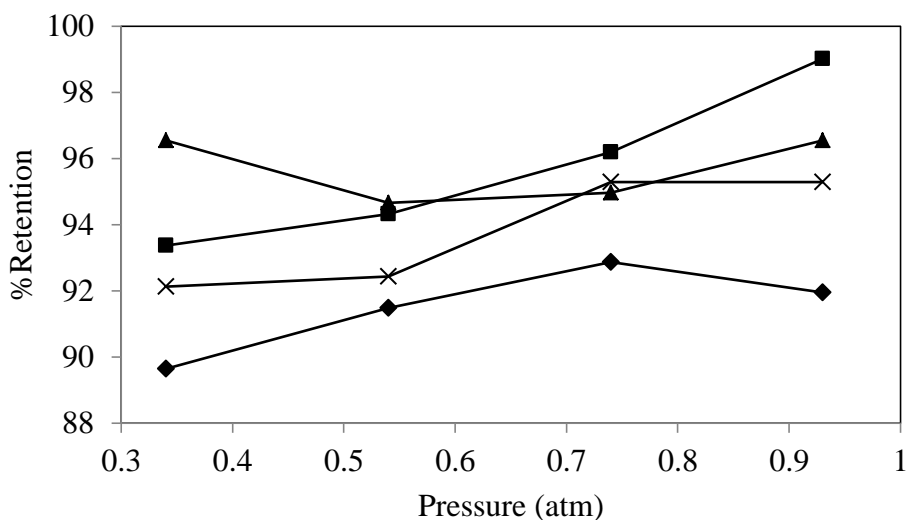
4.4.4 ผลต่อปริมาณแอนโทไซยานินที่เหลืออยู่ในผงแป้ง

จากรูปที่ 4.66 จะแสดงปริมาณแอนโทไซยานินที่ผงแป้งสามารถกักเก็บได้โดยการเปลี่ยนอัตราการป้อนสารค่าต่างๆ จะเห็นว่าเมื่ออัตราการป้อนสารเพิ่มมากขึ้นปริมาณแอนโทไซยานินที่กักเก็บได้จะมีมากขึ้นเนื่องจาก อัตราการป้อนสารที่สูงขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับละอองฝอยน้อยลงความร้อนที่ละอองฝอยได้รับจะต่ำลงทำให้การสลายตัวของสารแอนโทไซยานินจากความร้อนน้อยลง จึงสามารถกักเก็บปริมาณแอนโทไซยานินได้มากขึ้น



รูปที่ 4.66 ปริมาณแอนโรไซยานินที่กักเก็บได้ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบฟุ้งฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 160°C ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อนสารต่างๆ

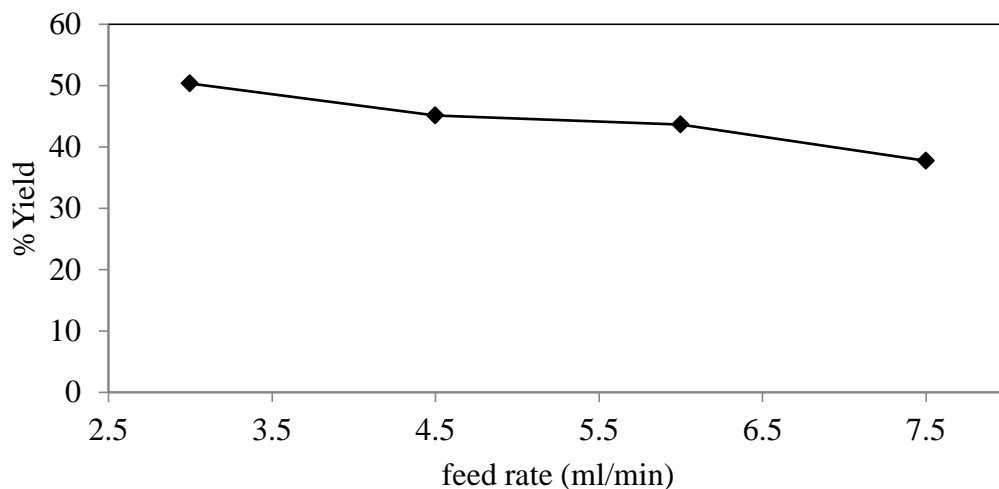
รูปที่ 4.67 จะแสดงปริมาณแอนโรไซยานินที่กักเก็บได้จากการอบแห้งที่สภาวะสุญญากาศ โดยการเปลี่ยนอัตราการป้อนสารค่าต่างๆ โดยพบว่าแอนโรไซยานินที่กักเก็บได้จะมีปริมาณมากกว่า 90 % และพบว่า การเพิ่มอัตราการป้อนสารในสภาวะสุญญากาศจะไม่มีผลต่อปริมาณแอนโรไซยานินที่กักเก็บได้มากนัก ซึ่งจะแตกต่างจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงที่การกักเก็บแอนโรไซยานินจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสาร โดยความดันที่เปลี่ยนไปจะไม่มีผลต่อการสลายตัวของแอนโรไซยานินเช่นกัน



รูปที่ 4.67 ปริมาณแอนโธไซยานินที่กักเก็บได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50°C อัตราการป้อนสาร (◆) 3 มิลลิลิตรต่อนาที (■) 4.5 มิลลิลิตรต่อนาที (▲) 6 มิลลิลิตรต่อนาที (X) 7.5 มิลลิลิตรต่อนาที .

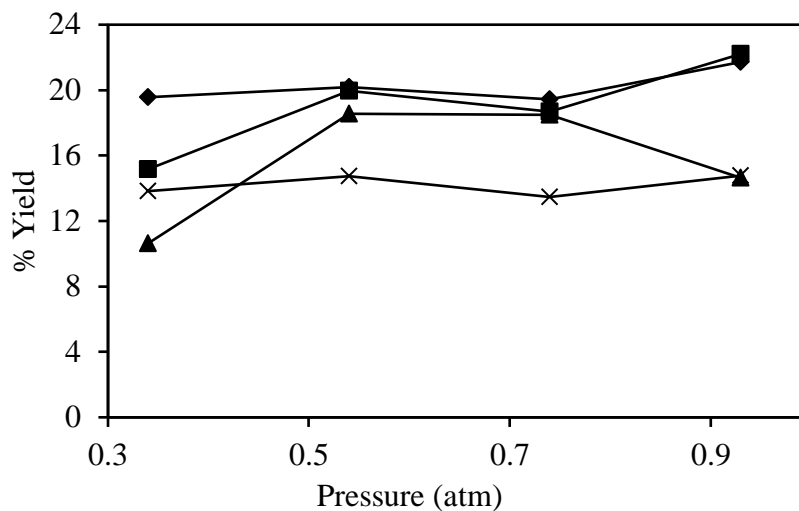
4.4.5 ผลต่อร้อยละผลได้

ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะได้ปริมาณแป้งที่ 40-50% และปริมาณที่ได้จะลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารเพิ่มมากขึ้น การป้อนสารมากขึ้นจะทำให้ละอองฝอยมีขนาดใหญ่ขึ้นการแลกเปลี่ยนความร้อนกับละอองฝอยเป็นไปได้น้อยลงและปริมาณน้ำที่ต้องระเหยมากขึ้น จึงมีแป้งปริมาณที่มากขึ้นไปเกาะติดกับผนังห้องอบ แต่ปริมาณผงแป้งที่ได้ถ้าเปรียบเทียบกับการอบแห้งที่ภาวะสูญญากาศปริมาณผงแป้งที่ได้จะมีปริมาณมากกว่าเนื่องจากการใช้ความร้อนที่สูงกว่าทำให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้มากกว่า ปริมาณแป้งที่เก็บได้จึงมากกว่า



รูปที่ 4.68 ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง % 40wt ที่ อุณหภูมิ 160 °C ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อนสารค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.69 จะพบว่าปริมาณแป้งที่ได้จะอยู่ระหว่าง 10-20% ซึ่งจะมีปริมาณน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและเมื่ออัตราเร็วในการป้อนสารมากขึ้นปริมาณผงแป้งที่ได้จะลดลง เนื่องจาก เมื่ออัตราการป้อนสารเร็วขึ้นจะทำให้การถ่ายเทพลังงานและการถ่ายเทมวลน้อยลง และการเพิ่มอัตราการป้อนสารที่มากขึ้นจะทำให้หัวฉีดที่สร้างละอองฝอยออกมามีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกไปมากขึ้นจึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับละอองฝอยเป็นไปได้น้อยขึ้น ทำให้มีแป้งที่ปริมาณมากขึ้นไปเกาะติดตามผนังห้องอบแห้งปริมาณแป้งที่สามารถเก็บได้จึงน้อยลง



รูปที่ 4.69 ปริมาณผงแป้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ความเข้มข้นแป้ง 40 %wt ที่อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50°C อัตราการป้อนสาร(◆) 3มิลลิลิตรต่อนาที (■) 4.5มิลลิลิตรต่อนาที (▲) 6มิลลิลิตรต่อนาที (X) 7.5มิลลิลิตรต่อนาที .

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองจะสามารถทำการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะสูญญากาศได้โดยอนุภาคที่ได้จากการอบแห้งที่สภาวะสูญญากาศผงแป้งที่ได้จะมีลักษณะกลมผิวเรียบซึ่งแตกต่างจากการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศที่ผงแป้งที่ได้จะมีลักษณะกลมมีผิวที่ปรากฏรอยเหี่ยวย่นให้เห็นได้อย่างชัดเจน โดยปริมาณแอนโทไซยานินที่เก็บได้จากการอบแห้งที่สูญญากาศจะมีปริมาณที่กักเก็บได้ประมาณ 90-98 % และเมื่อพิจารณาตัวแปรอื่นๆจะสามารถสรุปได้ดังนี้

1.เมื่ออุณหภูมิสูงที่ใช้อบแห้งสูงขึ้น ปริมาณผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งจะมีมากขึ้น อนุภาคที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น การสลายตัวของแอนโทไซยานินจะมีมากขึ้น และปริมาณความชื้นที่มีในผงแป้งจะน้อยลง

2.ความเข้มข้นของสารละลายที่มากขึ้น จะทำให้ปริมาณผงแป้งที่ได้น้อยลง อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นมีการสลายตัวของแอนโทไซยานินมากขึ้น ปริมาณความชื้นที่มีในผงแป้งจะน้อยลง

3.เมื่ออัตราการป้อนสารสูงขึ้นไป ปริมาณผงแป้งที่ได้จะมีจำนวนลดลง อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือเล็กลงแล้วแต่ปริมาณความร้อนที่ได้รับ การสลายตัวของแอนโทไซยานินจะน้อยลง และมีความชื้นในผงแป้งมากขึ้น

4.ความดันที่ลดลง จะทำให้ปริมาณผงแป้งที่ได้ลดลง อนุภาคมีขนาดเล็กลง ไม่มีผลต่อการสลายตัวของแอนโทไซยานิน ไม่มีผลต่อปริมาณความชื้นที่เหลือในผงแป้ง

5.เปรียบเทียบการอบแห้งที่สภาวะสูญญากาศและการอบแห้งปกติ การอบแห้งที่สูญญากาศจะทำให้ได้ผงแป้งปริมาณน้อยลง ความชื้นมากขึ้น ขนาดเล็กลงมีการเกาะตัวกันของอนุภาคมากขึ้น และได้อนุภาคเป็นทรงกลมไม่มีรอยเหี่ยวย่นซึ่งแตกต่างจากที่อุณหภูมิสูงอย่างเห็นได้ชัดเจน

5.2 ข้อเสนอแนะ

-อาจนำการอบแห้งแบบฟุ้งหายไปทดลองใช้กับสารที่สลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนชนิดอื่น เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการอบแห้งที่ภาวะสุญญากาศ หาทางเพิ่มปริมาณผงแป้งที่ได้ และทดสอบคุณสมบัติอื่นๆของผงแป้ง

-การอบแห้งที่ภาวะสุญญากาศถ้าต้องการลดความดันให้ต่ำลงมากๆจำเป็นต้องออกแบบระบบในการเก็บผงแป้งใหม่เนื่องจากไซโคลอนไม่สามารถทำงานที่ความดันต่ำมากได้ ทำให้ไม่สามารถแยกผงแป้งกับอากาศได้ และในสภาวะที่ความดันต่ำมากปริมาณอากาศจะน้อยจนไม่สามารถพาความร้อนได้จึงควรเปลี่ยนเครื่องทำความร้อนเป็นแบบแผ่รังสีความร้อน

รายการอ้างอิง

- [1] Masters, K. Spray Dying Handbook, 5^{ed}. New York : Longman Scientific & Technical, 1991.
- [2] Ersus, S., et al., Microencapsulation of anthocyanin pigments of black carrot (*Daucus carota* L.) by spray drier. Journal of Food Engineering 80 (2007) : 805-812.
- [3] Ren, H., Construction of a generalized psychrometric chart for different pressures. International Journal of Mechanical Engineering Education 32 (2004) : 212-222.
- [4] Kitamura, Y., et al., Experiment vacuum spray drying of probiotic foods included with lactic acid bacteria. Journal of Food Processing and Preservation 33 (2009) : 714-726.
- [5] Semyonov, D., et al., Using ultrasonic vacuum spray dryer to produce highly viable dry Probiotics. LWT – Food Science and Technology 44 (2011) : 1844-1852.
- [6] รุ่งนภา เข้มเดช. ผลของการดูดซับสารสกัดผลหมอนบนอนุภาคไมโครอัลจินตต่อความคงตัวของสารแอนโทไซยานินที่อุณหภูมิสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [7] Murugesan, R., et al., Spray Drying for the Production of Nutraceutical Ingredients—A Review. Food Bioprocess Technol 5 (2012) : 3–14.
- [8] Wikipedia. Maltodextrin. [Online]. 2013. Available from : <http://en.wikipedia.org/wiki/Maltodextrin> [2012, April 20]
- [9] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. Maltodextrin / มอลโตเดกซ์ตริน. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา : <http://www.foodnetworksolution.com/vocab/wordcap/maltodextrin> [20 เมษายน 2556]
- [10] Mujumdar, A.S. Handbook of industrial drying, 3^{ed}. New York : CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [11] Robb Wolf. Performance Nutrition In 683 Easy Steps. Part I. [Online]. 2007. Available from : <http://robbwolf.com/2007/10/21/performance-nutrition-in-683-easy-steps-part-i/> [2012, April 20]

- [12] นายอนุสรณ์ ทศศิริ. ระบบอบแห้ง. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา : <http://dryer.siam2web.com/?cid=1012047> [20 เมษายน 2556]
- [13] International rice research institute. The drying process. [Online]. 2009. Available from : <http://www.knowledgebank.irri.org/rkb/drying-basics/the-drying-process.html> [2012, April 20]
- [14] เรียวโซ โทเอ. อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2529.
- [15] Gonul Kaletunc. PSYCHROMETRIC CHART. [Online]. 2010. Available from : <http://hostedweb.cfaes.ohio-state.edu/fabe/chart3.htm> [2012, April 20]
- [16] AIR - DALE ENGINEERING. THE PSYCHROMETRIC CHART. [Online]. 2010. Available from : <http://www.coolbreeze.co.za/psygen.htm> [2012, April 20]
- [17] GEA Proces Engineer. Spray Drying Technology. [Online]. 2013. Available from : <http://www.niroinc.com/technologies/atomizers.asp> [2012, April 20]
- [18] BÜCHI Labortechnik AG. Spray Drying & Encapsulation. [Online]. 2013. Available from : <http://www.buchi.com/Spray-Drying.69.0.html> [2012, April 20]
- [19] Niroinc. Technologies. [Online]. 2013. Available from : http://www.niroinc.com/images/technologies/flow_patterns_spray_drying.jpg [2012, April 20]
- [20] Jakob Sloth. Formation of Enzyme Containing Particles by Spray Drying. Doctoral dissertation, Department of Chemical Engineering, Technical University of Denmark, 2007.
- [21] Eslamian, M., et al., Effect of precursor, ambient pressure, and temperature on the morphology, crystallinity, and decomposition of powders prepared by spray pyrolysis and drying. Powder Technology 167 (2006) : 149–159
- [22] อุไรวรรณ นิลเพ็ชร. หม่อน (Mulberry) : พืชมากประโยชน์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา : http://www.rdi.ku.ac.th/kufair50/plant/67_plant/67_plant.html [20 เมษายน 2556]
- [23] เกษตรกรรม. มัลเบอรี่ (Mulberry). [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา : <http://www.xn--12ca3d5biba7bxo.com/2012/06/mulberry.html> [20 เมษายน 2556]
- [24] วิโรจน์ แก้วเรือง. เกร็ดความรู้ หม่อนใหม่. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา : <http://www.ichat.in.th/lei/topic-readid71446-page1> [20 เมษายน 2556]

- [25] สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร. คลังข้อมูลสารสนเทศใหม่เชิงลึก. [ออนไลน์]. 2556.
แหล่งที่มา : http://www.arda.or.th/kasetinfo/silk/index.php?option=com_content&view=article&id=85&Itemid=90 [20 เมษายน 2556]
- [26] LEE, J., et al., Determination of Total Monomeric Anthocyanin Pigment Content of Fruit Juices, Beverages, Natural Colorants, and Wines by the pH Differential Method: Collaborative Study. JOURNAL OF AOAC INTERNATIONAL 88 (2005) : 1269-1278.
- [27] Giusti, M.M., et al., Review Acylatedanthocyanins from edible sources and their applications in food systems. Biochemical Engineering Journal 14 (2003) : 217–225.
- [28] Gharsallaoui, A., et al., Review Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. Food Research International 40 (2007) : 1107–1121.
- [29] Tonon, R.V., et al., Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray-dried acai (Euterpeoleracea Mart.) juice produced with different carrier agents. Food ResearchInternational 43 (2010) : 907-914.
- [30] Jimenez, D.M., et al., Color and chemical stability of spray-dried blueberry extract using mesquite gum as wall material. Journal of Food Composition and Analysis 24 (2011) : 889–894.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

อุณหภูมิและความชื้นของอากาศขาเข้า

ตารางที่ ก.1 อุณหภูมิและความชื้นอากาศขาเข้าที่อุณหภูมิกับความดันต่างๆ อัตราการป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นแป้งร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

ความดัน (atm)	อุณหภูมิที่ใช้ อบแห้ง(°C)	อุณหภูมิอากาศ ขาเข้า(°C)	ความชื้นสัมพัทธ์	อุณหภูมิอากาศ ขาออก(°C)
0.93	40	25	30	19
0.74	40	25	26	21
0.54	40	24	30	21
0.34	40	24	26	19
0.93	50	25	30	24
0.74	50	25	35	29
0.54	50	25	33	31
0.34	50	24	34	23
0.93	60	25	39	30
0.74	60	24	36	34
0.54	60	24	35	26
0.34	60	25	35	25
0.93	70	26	41	32
0.74	70	25	37	36
0.54	70	26	36	26
0.34	70	24	37	30
1	200	23	23	126
1	180	24	32	118
1	160	25	32	105
1	140	26	32	88
1	120	26	30	77

ตารางที่ ก.2 อุณหภูมิและความชื้นอากาศขาเข้าที่ความเข้มข้นแป็งกับความดันต่างๆ อัตราการ
ป้อนสาร 6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C สำหรับระบบสุญญากาศ อุณหภูมิ
ก๊าซร้อน 160 °C สำหรับระบบปกติ

ความเข้มข้นแป็ง (%wt)	ความดัน(atm)	อุณหภูมิอากาศ ขาเข้า(°C)	ความชื้นสัมพัทธ์	อุณหภูมิอากาศ ขาออก(°C)
20	0.93	26	25	25
20	0.74	23	22	22
20	0.54	23	22	26
20	0.34	23	31	30
30	0.93	25	26	25
30	0.74	23	31	30
30	0.54	23	37	29
30	0.34	23	37	26
40	0.93	24	32	26
40	0.74	23	46	26
40	0.54	24	51	30
40	0.34	23	51	30
10	1	26	23	102
20	1	25	21	101
30	1	25	31	102
40	1	25	23	103

ตารางที่ ก.3 อุณหภูมิและความชื้นอากาศขาเข้าที่อัตราการป้อนสารกับความดันต่างๆ ความเข้มข้น
แป้งร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิเครื่องทำความร้อน 50 °C สำหรับระบบสุญญากาศ อุณหภูมิ
อากาศร้อน 160 °C สำหรับความดันบรรยากาศ

ความดัน(atm)	อัตราการป้อน สาร(มิลลิลิตร ต่อนาที)	อุณหภูมิอากาศ ขาเข้า(°C)	ความชื้นสัมพัทธ์	อุณหภูมิอากาศ ขาออก(°C)
0.93	3	24	32	26
0.74	3	23	46	26
0.54	3	24	51	30
0.34	3	23	51	30
0.93	4.5	24	38	32
0.74	4.5	23	36	34
0.54	4.5	26	38	31
0.34	4.5	24	41	30
0.93	6	25	30	24
0.74	6	25	35	29
0.54	6	25	33	31
0.34	6	24	34	23
0.93	7.5	25	34	24
0.74	7.5	24	36	24
0.54	7.5	25	33	26
0.34	7.5	26	31	30
1	3	24	31	102
1	4.5	25	36	101
1	6	25	31	98
1	7.5	23	22	99

ภาคผนวก ข

การคำนวณ

การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

หาพลังงานในการอบแห้งสารละลายที่มีของแข็งผสมอยู่ความเข้มข้น ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ป้อนสารผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยด้วยอัตราการป้อน 6 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อผลิตผงแห้งที่มีความชื้น 5 % โดยน้ำหนัก โดยใช้อากาศที่มีอุณหภูมิขาเข้า 160 C อากาศมีความชื้น 0.006298 (kg/kg dry air) อุณหภูมิขาออก 105 C อากาศไหลด้วยอัตรา 41.3 kg/hr

การคำนวณเอนทาลปีจะคำนวณจากสมการ $Q = C_s(\Delta T) + H\lambda$

$Q =$ เอนทาลปี (kcal/kg)

$C_s =$ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (kcal/kgK) = $(0.24+0.46H)$

$\Delta T =$ ผลต่างอุณหภูมิของอากาศกับจุดอ้างอิง ($^{\circ}\text{C}$)

$H =$ ความชื้นที่มีในอากาศ (kg/kg dry air)

$\lambda =$ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ = 597.3 kcal/kg

จุดอ้างอิงจะใช้จุดที่อุณหภูมิ 0°C

เอนทาลปีอากาศขาเข้า $Q_{in} = (0.24+0.46 \times 0.006298) \times (160) + 597 \times 0.00628$

$$= 42.61 \text{ kcal/kg} \times 4.186 \text{ kJ/kcal}$$

$$= 178.36 \text{ kcal/kg}$$

เอนทาลปีอากาศขาออก $Q_{out} = (0.24+0.46 \times 0.006298) \times (105) + 597 \times 0.00628$

$$= 29.25 \text{ kcal/kg} \times 4.186 \text{ kJ/kcal}$$

$$= 122.44 \text{ kcal/kg}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จะมีพลังงานที่ให้ในการระเหยน้ำ} &= (Q_{in}-Q_{out}) \times \text{mass air flow} \\
 &= (178.36-122.44) \times 41.3 \\
 &= 2310 \text{ kJ/hr}
 \end{aligned}$$

หาปริมาณสารที่ป้อนเข้ามา

$$= 6 \text{ (มิลลิลิตรต่อนาที)} \times 1.15 \text{ g/ml} \times 1/1000 \text{ (kg/g)} \times 60 \text{ min} = 0.415 \text{ kg/hr}$$

หาปริมาณของแข็งในสารละลาย

$$= 0.4 \times 0.415 = 0.166 \text{ kg/hr}$$

หาปริมาณน้ำที่ต้องระเหยจาก $M = W_s(W_1-W_2)$

M = ปริมาณน้ำที่ต้องระเหย

W_s = ปริมาณของแข็ง (kg)

W_1 = ปริมาณน้ำก่อนเริ่มการอบแห้ง

W_2 = ปริมาณน้ำหลังการอบแห้ง

$$\begin{aligned}
 M &= 0.166 \times (60/40-5/95) \\
 &= 0.240 \text{ kg/hr}
 \end{aligned}$$

ต้องใช้พลังงาน $= M\lambda = 0.240 \times 2256 = 541 \text{ kJ/hr}$

การคำนวณเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

หาเวลาในการอบแห้งสารละลายที่มีของแข็งผสมอยู่ความเข้มข้น ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อผลิตผงแห้งที่มีความชื้น 5 % โดยน้ำหนัก โดยใช้อากาศที่มีอุณหภูมิอากาศเข้า 160 C อุณหภูมิขนาดเฉลี่ย 100 ไมโครเมตร ความชื้นวิกฤตร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ความชื้นสมดุลร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก ความเร็วอากาศ 0.5 m/s

หาอัตราการระเหยในช่วงคงที่จากสมการ

$$R_c = \frac{h_c (t - t_w)}{\lambda}$$

h_c = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์ม (W/m^2K)

t = อุณหภูมิอากาศร้อน ($^{\circ}C$)

t_w = อุณหภูมิกระเปาะเปียก ($^{\circ}C$)

λ = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)

$$Nu = 2 + 0.65Re^{1/2}Pr^{1/3}$$

Nu = ตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) = $\frac{h_c D_p}{k_g}$

Re = ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number) = $\frac{D_p \mu \rho_g}{\mu_g}$

Pr = ตัวเลขพรานด์ทัล (prandtl number) = $\frac{C_p \mu_g}{k_g} = 0.7$ สำหรับก๊าซสองอะตอมและอากาศ

D_p = เส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลม (m)

k_g = ความนำความร้อนของลมร้อน (W/mK)

μ_g = ความหนืด (viscosity) ของลมร้อน (N/m^2)

C_p = ความจุความร้อนที่ความดันคงที่ (kJ/kgK)

$$Nu = 2 + 0.65Re^{1/2}Pr^{1/3}$$

$$Nu = \frac{h_c D_p}{k_g} = 2 + 0.65 \left(\frac{D_p \mu \rho_g}{\mu_g} \right)^{1/2} (0.7)^{1/3}$$

$$h_c = \frac{0.0358}{100 \times 10^{-6}} \left[2 + 0.65 \left(\frac{10 \times 10^{-6} \times 0.5}{29.85 \times 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{2}} (0.7)^{\frac{1}{3}} \right]$$

$$h_c = 983 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$R_c = \frac{h_c (t - t_w)}{\lambda}$$

$$R_c = \frac{983 (160 - 41)}{2256}$$

$$R_c = 0.052 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

หาเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งจากสมการ

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

Θ = เวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด (s)

Θ_c = เวลาที่ใช้ในการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (s)

Θ_d = เวลาที่ใช้ในการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (s)

W = น้ำหนักแห้งของสาร (kg)

A = พื้นที่ผิวของสารละลาย (m²)

$$F_1 = w_1 - w_c$$

$$F_2 = w_2 - w_c$$

$$F_c = w_c - w_c$$

w_1 = อัตราส่วนความชื้นก่อนอบแห้ง

w_2 = อัตราส่วนความชื้นหลังอบแห้ง

w_c = อัตราส่วนความชื้นวิกฤต

w_e = อัตราส่วนความชื้นสมดุล

หาปริมาณน้ำเริ่มต้นในหยดน้ำ

$$0.6 \times \left(\frac{4\pi}{3}\right) \left(\left(\frac{100 \times 10^{-6}}{2}\right)\right)^3 \times 1000 = 3.1416 \times 10^{-12}$$

หาปริมาณของแข็งในหยดสารละลาย

$$0.4 \times \left(\frac{4\pi}{3}\right) \left(\left(\frac{100 \times 10^{-6}}{2}\right)\right)^3 \times 1000 = 2.0944 \times 10^{-12}$$

ประมาณความชื้นวิกฤตเป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

ประมาณความชื้นสมดุลเป็นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

$$\theta = \frac{2.0944 \times 10^{-12}}{\pi \times (10 \times 10^{-6})^2 \times 0.052} \left\{ \left(\frac{60}{40} - \frac{30}{70} \right) + \frac{30}{70} \ln \left(\frac{30}{\frac{5}{95}} \right) \right\}$$

$$\Theta = 0.25 \text{ วินาที}$$

เวลาที่สารอยู่ในห้องอบจะคำนวณจาก Resident time = $\frac{\text{chamber volumn}}{\text{volumn flow}}$

$$= \frac{0.03607}{0.00977}$$

$$= 3.71 \text{ วินาที}$$

จากการคำนวณจะพบว่าเวลาที่หยดสารละลายใช้ในการอบแห้งจะน้อยกว่าเวลาที่ใช้อยู่ในห้องอบ ทำให้สารละลายสามารถแห้งได้

การคำนวณเพื่อหาอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ความดันต่างๆ

ในการหาอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ค่าความดันต่างๆจะใช้ไซโครเมตริกส์ชาร์ทสำหรับที่ค่าความดันต่างๆ ซึ่งสามารถใช้หาคุณสมบัติต่างๆของอากาศชื้นได้

ตัวอย่างเช่นการหาอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50 %ความดัน 77.058 kPa

การหาค่าจะทำโดยอ่านค่า $\frac{\phi}{p}$ จากรูปที่ ข.2 โดยจะใช้ค่าความดันกับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ โดยจะอ่านค่าได้ 0.6489 จากนั้นจะไปอ่านค่าสมบัติที่เหลือจากรูปที่ ข.1 โดยจะหาจุดตัดที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ 25 องศาเซลเซียส ค่า $\frac{\phi}{p} = 0.6489$ ซึ่งจะสามารถอ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกได้ที่ 17.2 องศาเซลเซียส

h = ค่าเอนทาลปีของอากาศชื้น

p = ความดันทั้งหมดของอากาศชื้น

p_a = ความดันย่อยของอากาศแห้ง

p_w = ความดันย่อยของไอน้ำ

P_w/p = ส่วนประกอบย่อยของความดันของไอน้ำ

t = อุณหภูมิกระเปาะแห้ง

t_d = อุณหภูมิจุดน้ำค้าง

t_{wb} = อุณหภูมิกระเปาะเปียก

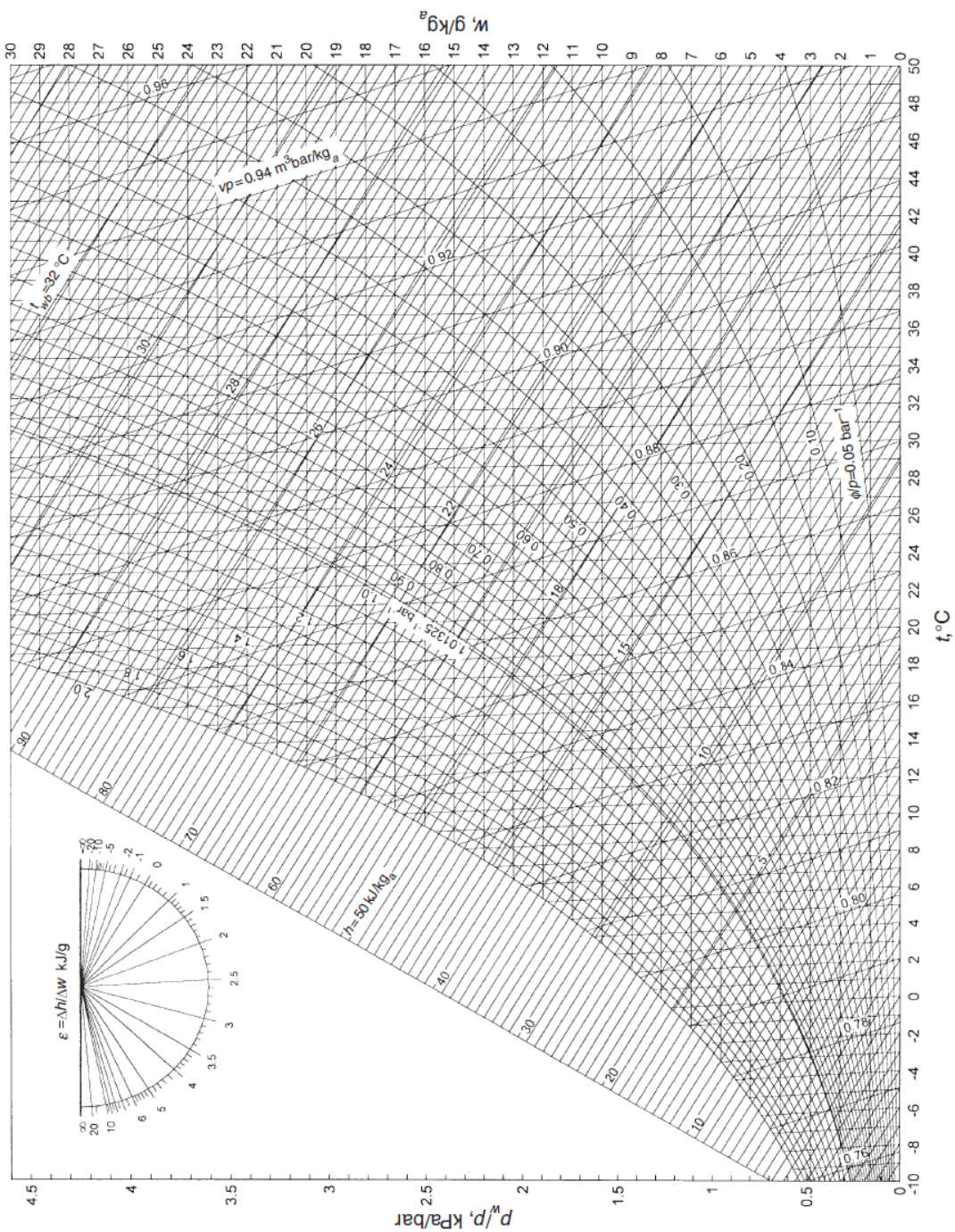
v = ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น

vp = คือส่วนประกอบของปริมาตรจำเพาะ

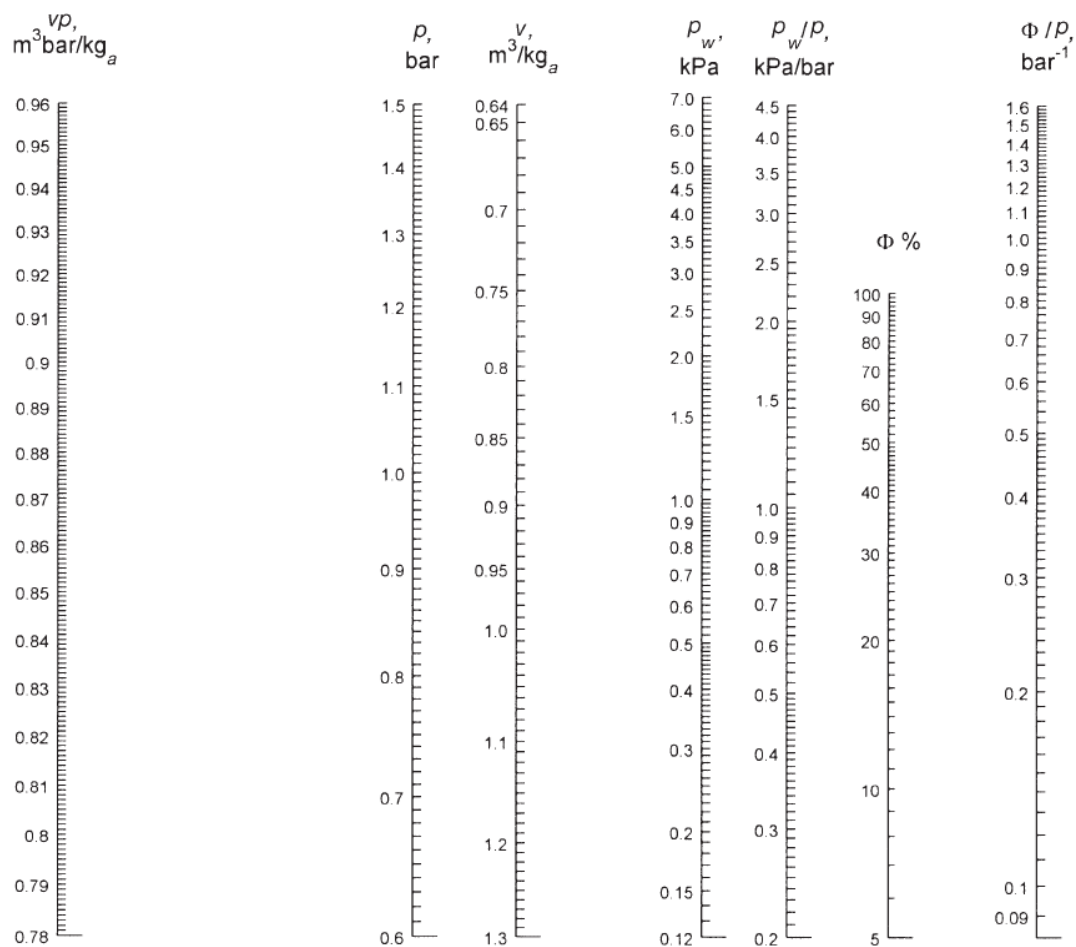
w = อัตราส่วนความชื้น

Φ = ความชื้นสัมพัทธ์

Φ/p คือ ส่วนประกอบความชื้นสัมพัทธ์



รูปที่ ข.1 ไชโครเมทริกส์ชาร์ทสำหรับที่ค่าความดันต่างๆ[3]



รูปที่ ข.2 โมนิกราฟของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ[3]

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชนากร ศรีรัตนธรรม เกิดเมื่อวันที่ 21 กันยายน พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนลาดปลาเค้าพิทยาคม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2554