

ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนด้วยวิธีออร์พิซ



นางสาววรลักษณ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-3152-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FACTORS AFFECTING MICROENCAPSULATION OF β -CAROTENE
BY ORIFICE METHOD



Miss Woralak Sooksawasdi Na Ayutthaya

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Food Technology

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-3152-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนด้วยวิธีออร์พิซ
โดย	นางสาววรลักษณ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. ชิตพงศ์ ประดิษฐสุวรรณ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจริต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. ชิตพงศ์ ประดิษฐสุวรรณ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลหาสงคราม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รมณี สงวนดีกุล)

วรลักษณ์ ศุขสวัสดิ ฌ อยุธยา : ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนด้วยวิธีออร์ฟิช (FACTORS AFFECTING MICROENCAPSULATION OF β -CAROTENE BY ORIFICE METHOD) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. ชิดพงศ์ ประดิษฐ์สุวรรณ, 100 หน้า. ISBN 974-17-3152-3.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะต่าง ๆ ของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนซึ่งผลิตขึ้นจากเครื่องมือสำหรับผลิตไมโครแคปซูลแบบง่าย ๆ ที่สร้างขึ้น ส่วนประกอบหลัก ๆ ของเครื่องมือนี้ประกอบด้วย bi-fluid nozzle needle valve ที่ต่อเข้ากับ flow meter ถังเก็บวัสดุแกน ถังเก็บสารเคลือบ และถังก๊าซไนโตรเจน การผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนทำได้โดยการป้อนสารละลายบีตาแคโรทีนในน้ำมันรำข้าวที่มีความเข้มข้น 0.25 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นวัสดุแกนเข้าสู่ท่อด้านในของ bi-fluid nozzle ที่อัตราการไหล 0.57 และ 0.87 มิลลิลิตร/นาที ในขณะที่ป้อนสารละลายไซเดียมอัลจิเนตที่มีความเข้มข้น 1.50 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสารเคลือบเข้าสู่ท่อด้านนอกของ bi-fluid nozzle ที่อัตราการไหล 7.11 10.03 และ 14.51 มิลลิลิตร/นาที หลังจากนั้นจึงทำให้ไมโครแคปซูล แข็งตัวในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก แล้วนำไมโครแคปซูลไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 °C นาน 5 ชั่วโมง จากการศึกษา ลักษณะต่าง ๆ ของไมโครแคปซูลพบว่าไมโครแคปซูลที่ผลิตได้จากทุกสภาวะมีวัสดุแกนเพียงอนุภาคเดียวอยู่ภายในไมโครแคปซูล (mono-nucleus microcapsule) อัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขนาดอนุภาคของวัสดุแกน ความหนาของผนัง อัตราการผลิต น้ำหนัก ขนาด ปริมาณความชื้น พารามิเตอร์ค่าสี และค่า hardness ของไมโครแคปซูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่ออัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการผลิตทั้งที่แสดงอยู่ในหน่วย “ไมโครแคปซูล/นาที” และ “กรัม/นาที” และพารามิเตอร์ค่าสี “a*” และ “b*” ของไมโครแคปซูลมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออัตราการไหลของวัสดุแกนลดลงในขณะที่อัตราการไหลของสารเคลือบเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคของวัสดุแกน น้ำหนัก และขนาดของไมโครแคปซูลมีค่าลดลง ในขณะที่ผนังของไมโครแคปซูลจะมีความหนามากขึ้น ซึ่งความหนาของผนังที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้ไมโครแคปซูลมีปริมาณความชื้นและค่า hardness เพิ่มขึ้น

ภาควิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร..... ลายมือชื่อผู้ผลิต.....
 สาขาวิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา 2545 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4272385823 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD: MICROENCAPSULATION / β -CAROTENE / SODIUM ALGINATE / ORIFICE

METHODE / BI-FLUID NOZZLE

WORALAK SOOKSAWASDI NA AYUTTHAYA : FACTOR AFFECTING
 MICROENCAPSULATION OF β -CAROTENE BY ORIFICE METHOD. THESIS ADVISOR :
 CHIDPHONG PRADISTSUWANA, Ph.D., 100 pp. ISBN 974-17-3152-3.

In this study, microcapsules of β -carotene produced from a simple microencapsulation apparatus were characterized. The main components of the apparatus include the bi-fluid nozzle, needle valves with flow meter, core and coating material feed tanks and compressed nitrogen tank. In order to produce microcapsules of β -carotene, the solution of 0.25 wt% of β -carotene in rice bran oil (i.e. core material) was fed through an inner channel of the bi-fluid nozzle at the flow rate of 0.57 and 0.87 ml/min, while the solution of 1.50 wt% of sodium alginate (i.e. coating material) was fed through an outer channel of the bi-fluid nozzle at the flow rate of 7.11, 10.03 and 14.51 ml/min. Then microcapsules were hardened in 5.0 wt% of calcium chloride solution and dried in vacuum oven at 50°C for 5 hours. It was found that the mono-nucleus microcapsules of β -carotene were obtained from every conditions. The core and coating material flow rates significantly affected to particle size of core material, wall thickness, moisture content, production rates, weight, size, chromametric parameters and hardness of the microcapsules ($p \leq 0.05$). An increase in flow rates of core and coating materials resulted in increasing the production rates in terms of number and total weight of the microcapsules. The chromametric parameters a^* and b^* were also increased with increasing the flow rates. The results also suggested that when the flow rate of core material was decreased, and the flow rate of coating material was increased, the particle size of core material, weight and size of microcapsules decreased but the wall thickness, moisture content and hardness of microcapsule increased.

Department.....Food Technology..... Student's signature.....

Field of study.....Food Technology..... Advisor's signature.....

Academic year 2002..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พาสวดี ประทีปะเสน ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจและแก้ไขโครงร่างวิทยานิพนธ์ซึ่งส่งเสริมให้งานวิจัยสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และ อาจารย์ ดร. ชิตพงศ์ ประดิษฐ์สุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาออกแบบเครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล ให้คำปรึกษาข้อเสนอแนะต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์กับงานวิจัย และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้กล้องดิจิตอลรวมทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลหาสงคราม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รมณี สงวนดีกุล ที่ได้ร่วมเป็นกรรมการตรวจแก้ไขโครงร่างวิทยานิพนธ์ และช่วยตรวจแก้ไขรวมทั้งเสนอแนะแนวทางแก้ไขโครงร่างวิทยานิพนธ์และวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ คุณธีรชัย ประสมแสง ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ตลอดจนช่วยปรับปรุงแก้ไขเครื่องมือสำหรับผลิตไมโครแคปซูล และคุณรุจิพร ประทีปะเสน ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ลักษณะทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขอกราบขอบพระคุณทบวงมหาวิทยาลัย และคณะกรรมการบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้จัดสรรเงินทุนสนับสนุนงานวิจัยบางส่วนซึ่งมีผลทำให้สร้างเครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

นอกจากนี้ยังต้องขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่านที่ได้กรุณาให้กำลังใจ และความช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา และขอขอบคุณในความช่วยเหลือ และความปรารถนาดีของรุ่นพี่ เพื่อน และ รุ่นน้องทุกท่าน

และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา และมารดา สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ด้วยดีมาตลอด จนทำให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 การผลิตไมโครแคปซูล.....	3
2.2.1 นิยาม.....	3
2.1.2 วัตถุประสงค์ของการผลิตไมโครแคปซูล.....	4
2.1.3 เทคนิคที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล.....	5
2.1.4 การควบคุมการปลดปล่อย.....	26
2.1.5 ประโยชน์ของการผลิตไมโครแคปซูล.....	26
2.2 โขเดียมอัลจินต.....	28
2.3 การผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน.....	29
2.3.1 บีตาแคโรทีน.....	29
2.3.2 การผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน.....	31
3. การทดลอง.....	33
3.1 การสร้างเครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล.....	33
3.2 การผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน.....	40
4. ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	44
4.1 ผลการสร้างเครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล.....	44
4.1.1 ผลการควบคุมอัตราการไหลของเคลือบโดยเครื่องมือต้นแบบ.....	44
4.1.2 ผลการควบคุมอัตราการไหลของสารเคลือบโดยเครื่องมือที่ปรับปรุงขึ้น.....	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบที่มีต่อไมโครแคปซูล ของบีตาแคโรทีน.....	46
4.2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและพื้นผิวของไมโครแคปซูลของ บีตาแคโรทีน.....	46
4.2.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคและขนาดของไมโครแคปซูล ของบีตาแคโรทีนก่อนอบ.....	53
4.2.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคของ วัสดุแกนในไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนก่อนอบ.....	57
4.2.4 การกระจายตัวของความหนาและความหนาของผนัง ไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนก่อนอบ.....	61
4.2.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคและขนาดของไมโครแคปซูล ของบีตาแคโรทีนหลังอบ.....	65
4.2.6 ค่า a^* และ b^* ของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน.....	69
4.2.7 ความชื้นของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน.....	71
4.2.8 อัตราการผลิตของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน.....	72
4.2.9 น้ำหนักของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน.....	75
4.2.10 ค่า hardness ไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน.....	77
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	78
รายการอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก.....	84
ภาคผนวก ข.....	93
ภาคผนวก ค.....	94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	100

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	ข้อดีและข้อเสียของเทคนิคที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล..... 25
2.2	สมบัติของบีตาแคโรทีน.....30
3.1	ค่าที่อ่านได้จาก flow meter และอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบ..... 41
3.2	สัดส่วนของวัสดุแกนในไมโครแคปซูล..... 41
4.1	ขนาดของไมโครแคปซูลก่อนอบ.....56
4.2	ขนาดอนุภาคของวัสดุแกนในไมโครแคปซูลก่อนอบ.....60
4.3	ความหนาของผนังไมโครแคปซูล..... 64
4.4	ขนาดของไมโครแคปซูลหลังอบ..... 68
4.5	ค่า a^* ของไมโครแคปซูลหลังอบ..... 69
4.6	ค่า b^* ของไมโครแคปซูลหลังอบ..... 70
4.7	ความชื้นของไมโครแคปซูลก่อนหลัง..... 71
4.8	จำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้.....72
4.9	น้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ก่อนอบ..... 73
4.10	น้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้หลังอบ..... 74
4.11	น้ำหนักของไมโครแคปซูลก่อนอบ..... 75
4.12	น้ำหนักของไมโครแคปซูลหลังอบ.....76
4.13	ค่า hardness ของไมโครแคปซูลหลังอบ..... 77
ข.1	ความเหนียวของวัสดุแกนและสารเคลือบที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลของ บีตาแคโรทีน เมื่อวัดด้วย Brookfield viscometer..... 93
ค.1	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของเส้นผ่านศูนย์กลางของ ไมโครแคปซูลก่อนอบ..... 94
ค.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค วัสดุแกนในไมโครแคปซูลก่อนอบ.....94
ค.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของความหนาของผนัง ไมโครแคปซูลก่อนอบ..... 95
ค.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของเส้นผ่านศูนย์กลางของ ไมโครแคปซูลหลังอบ..... 95

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ค.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความแดง (a^*) ของ ไม้โครแคปซูลหลังอบ.....	96
ข.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความเหลือง (b^*) ของ ไม้โครแคปซูลหลังอบ.....	96
ข.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของความชื้นของไม้โครแคปซูล หลังอบ.....	97
ข.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของจำนวนไม้โครแคปซูลที่ผลิตได้.....	97
ข.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของน้ำหนักไม้โครแคปซูลที่ผลิตได้ ก่อนอบ.....	98
ข.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของน้ำหนักไม้โครแคปซูลที่ผลิตได้ หลังอบ.....	98
ข.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของน้ำหนักไม้โครแคปซูลก่อนอบ.....	99
ข.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของน้ำหนักไม้โครแคปซูลหลังอบ.....	99
ข.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า hardness ของ ไม้โครแคปซูลหลังอบ.....	99

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ไมโครแคปซูลรูปแบบต่าง ๆ.....	4
2.2 ระบบการอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งประกอบไปด้วยห้องอบแห้งที่เหมาะสมกับระบบการทำละอองเล็ก ๆ เครื่องทำอากาศร้อน พัดลม และไซโคลนสำหรับรวบรวมผลิตภัณฑ์ที่ได้.....	5
2.3 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล.....	6
2.4 โครงสร้างภายใน (ก.) และภายนอก (ข.) ของไมโครแคปซูลของ anhydrous milk fat ที่ผลิตขึ้นด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย (OS = พื้นผิวด้านนอก IS = พื้นผิวด้านใน FD = หยอดไขมัน และ W = ผนังของไมโครแคปซูล).....	6
2.5 เครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในวิธีออริฟิซแบบ one nozzle (ก.) bi-fluid nozzle (ข.) และ concentric double orifice (ค.).....	8
2.6 ไมโครแคปซูลที่ผลิตขึ้นจากวิธีออริฟิซด้วยเครื่องมือแบบ one nozzle.....	9
2.7 ไมโครแคปซูลที่ผลิตขึ้นจากวิธีออริฟิซด้วยเครื่องมือแบบ bi-fluid nozzle.....	9
2.8 การสร้าง compound drop.....	11
2.9 gravity flow microencapsulation nozzle.....	14
2.10 simple extrusion nozzle ที่ใช้ผลิตแคปซูล.....	15
2.11 เครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลด้วยวิธีการอัดรีดร่วมแบบหนีศูนย์กลาง.....	16
2.12 ไมโครแคปซูลที่ผลิตได้โดยใช้การอัดรีดหนีศูนย์กลาง.....	16
2.13 ไมโครแคปซูลที่ได้จากเทคนิคโคอะเซอร์เวชัน.....	17
2.14 เครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลด้วยเทคนิคการเคลือบโดยการแขวนลอยในอากาศ.....	18
2.15 สารแขวนลอยของวัสดุแกนในสารเคลือบ.....	19
2.16 เครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลด้วยเทคนิคการแยกโดยการหมุนสารแขวนลอย.....	19
2.17 โครงสร้างโมเลกุลของบีตาไซโคลเดกซ์ตริน.....	20
2.18 สารประกอบที่เข้าไปอยู่ภายในช่องว่างที่อยู่ตรงกลางโมเลกุลของบีตาไซโคลเดกซ์ตริน.....	21
2.19 ไมโครแคปซูลหรือสารเชิงซ้อนของน้ำมันผิวสัมผัสกับบีตาไซโคลเดกซ์ตริน.....	21
2.20 ไมโครแคปซูลของน้ำมันผิวสัมผัสที่ผลิตโดยใช้เทคนิคการอัดรีด.....	22

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.21	ผลึกของน้ำตาลซูโครสที่เป็นผลึกเดี่ยว.....23
2.22	ผลึกของน้ำตาลที่พบในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตกผลึกร่วม..... 23
2.23	โครงสร้างที่มีรูพรุนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตกผลึกร่วม (กำลังขยาย 1,750 เท่า).....23
2.24	การเชื่อมต่อกันของ divalent cation กับอัลจินเนตซึ่งมีลักษณะคล้ายกล่องไข่.....28
2.25	โครงสร้างโมเลกุลของปีตาแคโรทีน.....29
2.26	การสลายตัวของปีตาแคโรทีน..... 31
3.1	หลักการของ bi-fluid nozzle..... 34
3.2	bi-fluid nozzle ที่สร้างขึ้น.....34
3.3	ส่วนประกอบของ bi-fluid nozzle.....35
3.4	เข็มฉีดยาที่ใช้เป็นท่อด้านในของ bi-fluid nozzle..... 35
3.5	ถังเก็บวัสดุแกน.....36
3.6	ถังก๊าซไนโตรเจนซึ่งต่อเข้ากับ regulator valve..... 36
3.7	needle valve ของวัสดุแกน..... 36
3.8	รูปจำลองของเครื่องมือที่ต้นแบบ..... 37
3.9	flow meter ของวัสดุแกน.....38
3.10	flow meter ของสารเคลือบ..... 38
3.11	รูปจำลองของเครื่องมือที่ปรับปรุงขึ้น..... 39
3.12	เครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน..... 40
3.13	ขั้นตอนการผลิตไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน.....42
4.1	ผลการควบคุมอัตราการไหลของสารเคลือบโดยเครื่องมือต้นแบบ เมื่อใช้สารละลายโซเดียมอัลจินเนต 1.50 % ในปริมาณต่าง ๆ44
4.2	ผลการควบคุมอัตราการไหลของสารเคลือบโดยเครื่องมือที่ปรับปรุงขึ้น เปรียบเทียบกับเครื่องมือต้นแบบ.....45
4.3	ไมโครแคปซูลก่อนอบ.....47
4.4	ไมโครแคปซูลหลังอบ..... 48

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.5 โครงสร้างภายในของไมโครแคปซูลหลังอบ (OS = พื้นผิวด้านนอก IS = พื้นผิวด้านใน และ W = ผนังของไมโครแคปซูล) โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อผ่าไมโครแคปซูลตามขวาง (กำลังขยาย 350 เท่า).....	50
4.6 ลักษณะทางพื้นผิวภายนอกของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนหลังอบเมื่อ ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (กำลังขยาย 1500 เท่า).....	51
4.7 ลักษณะทางพื้นผิวภายในของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนหลังอบเมื่อ ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (กำลังขยาย 1500 เท่า).....	52
4.8 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลก่อนอบ.....	53
4.9 ผลของอัตราการไหลของสารเคลือบต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของ ไมโครแคปซูลก่อนอบ เมื่อวัสดุแกนมีอัตราการไหล 0.57 มิลลิลิตร/นาที่ (ก.) และ 0.87 มิลลิลิตร/นาที่ (ข.).....	50
4.10 ผลของอัตราการไหลของวัสดุแกนต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของ ไมโครแคปซูลก่อนอบ เมื่อสารเคลือบมีอัตราการไหล 7.11 มิลลิลิตร/นาที่ (ก.) 10.03 มิลลิลิตร/นาที่ (ข.) และ 14.51 มิลลิลิตร/นาที่ (ค.).....	51
4.11 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัสดุแกนในไมโครแคปซูลก่อนอบ.....	53
4.12 ผลของอัตราการไหลของสารเคลือบต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของ วัสดุแกนในไมโครแคปซูลเมื่อวัสดุแกนมีอัตราการไหล 0.57 มิลลิลิตร/นาที่ (ก.) และ 0.87 มิลลิลิตร/นาที่ (ข.).....	54
4.13 ผลของอัตราการไหลของวัสดุแกนต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของ วัสดุแกนในไมโครแคปซูลก่อนอบ เมื่อสารเคลือบมีอัตราการไหล 7.11 มิลลิลิตร/นาที่ (ก.) 10.03 มิลลิลิตร/นาที่ (ข.) และ 14.51 มิลลิลิตร/นาที่ (ค.).....	55
4.14 การกระจายตัวของความหนาของผนังไมโครแคปซูลก่อนอบ.....	57
4.15 ผลของอัตราการไหลของสารเคลือบต่อการกระจายตัวของความหนาของผนัง ไมโครแคปซูลก่อนอบ เมื่อวัสดุแกนมีอัตราการไหล 0.57 มิลลิลิตร/นาที่ (ก.) และ 0.87 มิลลิลิตร/นาที่ (ข.).....	58
4.16 ผลของอัตราการไหลของวัสดุแกนต่อการกระจายตัวของความหนาของผนัง ไมโครแคปซูลก่อนอบ เมื่อสารเคลือบมีอัตราการไหล 7.11 มิลลิลิตร/นาที่ (ก.) 10.03 มิลลิลิตร/นาที่ (ข.) และ 14.51 มิลลิลิตร/นาที่ (ค.).....	59

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.17 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลหลังอบ.....	61
4.18 ผลของอัตราการไหลของสารเคลือบต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลหลังอบ เมื่อวัสดุแกนมีอัตราการไหล 0.57 มิลลิลิตร/นาที่ (ก.) และ 0.87 มิลลิลิตร/นาที่ (ข.).....	62
4.19 ผลของอัตราการไหลของวัสดุแกนต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลหลังอบ เมื่อสารเคลือบมีอัตราการไหล 7.11 มิลลิลิตร/นาที่ (ก.) 10.03 มิลลิลิตร/นาที่ (ข.) และ 14.51 มิลลิลิตร/นาที่ (ค.).....	63
ก.1 ค่าที่บันทึกได้จากรูปถ่ายจากกล้องดิจิทัล เพื่อใช้ในการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ.....	84
ก.2 ค่าที่บันทึกได้จากรูปถ่ายจากกล้องดิจิทัล เพื่อใช้ในการคำนวณขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูล อนุภาคของวัสดุแกน และความหนาของผนังไมโครแคปซูล.....	88

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันมนุษย์ได้ตระหนักถึงเรื่องสุขภาพมากขึ้น จึงมีความต้องการบริโภคสารอาหาร โดยเฉพาะวิตามินและเกลือแร่มากยิ่งขึ้น บีตาแคโรทีน (β -carotene) ก็เป็นสารอาหารชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมเนื่องจากสามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอ อีกทั้งยังมีรายงานว่าสามารถป้องกันมะเร็งได้ (Halter, 1989; Ziegler, 1989) แต่เนื่องจากบีตาแคโรทีนเป็นสารที่สลายตัวง่ายระหว่างการเก็บรักษาและแปรรูป (Wagner and Warthesen, 1995) ดังนั้นจึงต้องหาวิธีสำหรับเพิ่มความคงตัวของบีตาแคโรทีน การผลิตไมโครแคปซูล (microencapsulation) เป็นเทคนิคหนึ่งที่นักเทคโนโลยีอาหารใช้เคลือบหุ้มส่วนผสมของอาหารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาไวภายในแคปซูลขนาดเล็ก เพื่อประโยชน์ในการถนอมรักษา ช่วยให้สะดวกในการขนส่ง และควบคุมการปลดปล่อยของส่วนผสมนั้นให้ออกมาภายใต้สภาวะที่กำหนดไว้ (Todd, 1970) ดังนั้นจึงสามารถใช้การผลิตไมโครแคปซูลในการเพิ่มความคงตัวของบีตาแคโรทีน จากการนำน้ำแครอทมาผลิตไมโครแคปซูลด้วยการอบแห้งแบบพ่นฝอยซึ่งใช้ไฮโดรไลซ์สตาร์ช (มอลโตเด็คซ์ตริน) ที่มีค่า dextrose equivalent (DE) แตกต่างกันเป็นสารเคลือบ พบว่าการผลิตไมโครแคปซูลโดยใช้ไฮโดรไลซ์สตาร์ช 36.5 DE เป็นสารเคลือบนั้นสามารถเพิ่มค่าครึ่งชีวิตของบีตาแคโรทีนจาก 2-3 วัน เป็น 450 วัน เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 21 °C (Wagner and Warthesen, 1995) ถึงแม้ว่าการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในการผลิตไมโครแคปซูลแต่ก็เป็นวิธีที่มีข้อเสีย เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำให้มีวัสดุแกนติดอยู่ที่ผิว และมีโพรงอากาศอยู่ภายใน นอกจากนี้เทคนิคการผลิตไมโครแคปซูลวิธีนี้ยังเป็นการขึ้นรูปไมโครแคปซูลไปพร้อม ๆ กับการให้ความร้อนเพื่อระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ จึงสูญเสียบีตาแคโรทีนไปกับขั้นตอนการผลิตและการเก็บรักษาเป็นจำนวนมาก ทำให้บีตาแคโรทีนมีอายุการเก็บรักษาสั้น ดังนั้นจึงเป็นปัญหาในการเติมลงในอาหาร บางบริษัทจึงอาจพัฒนาการผลิตไมโครแคปซูลให้สามารถรักษาความคงตัวของบีตาแคโรทีนได้ดียิ่งขึ้นแต่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงขึ้นด้วย (Desobry, Netto and Labuza, 1997)

วิธีออริฟิชเป็นวิธีที่สามารถสร้างเครื่องมือแบบง่าย ๆ ได้และเป็นวิธีที่ขึ้นรูปไมโครแคปซูลได้อย่างรวดเร็ว ก่อนที่จะนำไปให้ความร้อนเพื่อระเหยเอาตัวทำละลายออกจากไป (Kondo, 1979) ไมโครแคปซูลที่ได้จะไม่มีวัสดุแกนติดที่ผิวและไม่มีโพรงอากาศอยู่ภายใน ดังนั้นวิธีออริฟิชจึงเป็นวิธีที่น่าจะเหมาะสมในการผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน งานวิจัยนี้จึงสร้างเครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนโดยอาศัยหลักการของวิธีออริฟิช แต่เพื่อให้เข้าใจถึงการผลิตไมโครแคปซูลด้วยวิธีนี้มากยิ่งขึ้นจึงศึกษาถึงปัจจัยของการผลิตไมโครแคปซูลที่มีต่อลักษณะต่าง ๆ ของไมโครแคปซูลที่ผลิตขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 การผลิตไมโครแคปซูล

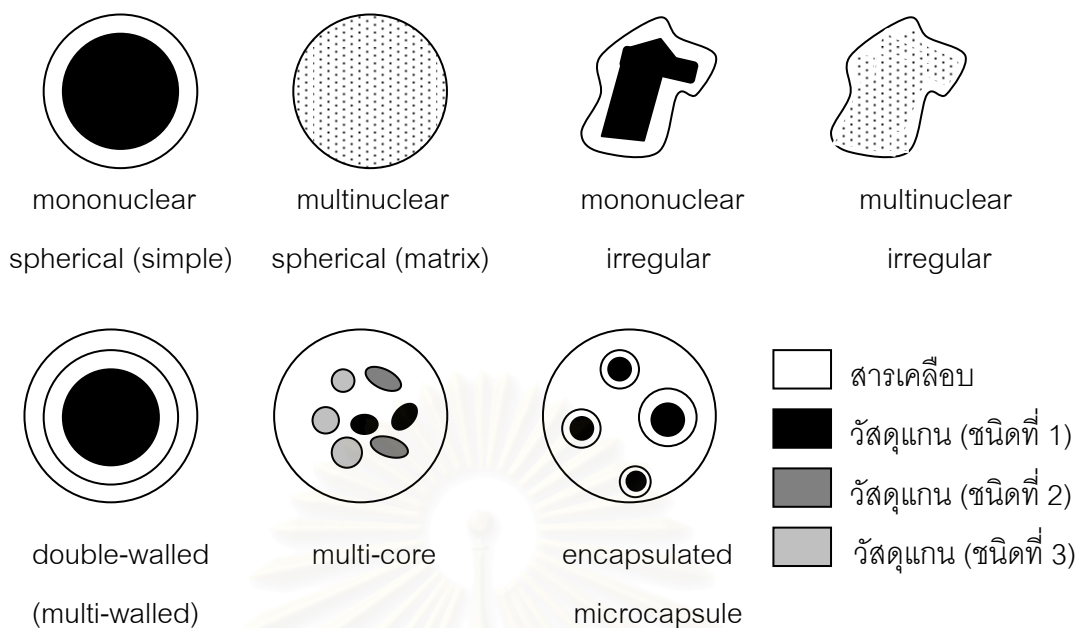
2.1.1 นิยาม

การผลิตไมโครแคปซูล หมายถึง เทคโนโลยีในการบรรจุวัสดุที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซเอาไว้ในแคปซูลขนาดเล็กที่ปิดผนึกซึ่งสามารถปลดปล่อยสารที่อยู่ภายในออกมาในอัตราที่ควบคุมได้ (controlled rate) ภายใต้เงื่อนไขจำเพาะ (Dziezak, 1988; Todd, 1970) แคปซูลขนาดเล็กนี้เรียกว่า ไมโครแคปซูล (microcapsule) ซึ่งประกอบด้วยวัสดุแกน (core material) และ สารเคลือบ (coating)

วัสดุแกน เป็นสารที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงโดยอยู่ในไมโครแคปซูล อาจเรียกว่า วัสดุหลัก หรือ วัฏภาคภายใน (internal phase) หรือ สารออกฤทธิ์ (active agents) เช่น สารให้กลิ่นรส วิตามินและเกลือแร่ สารให้ความหวาน สีธรรมชาติ บีตาแคโรทีน ไขมันและน้ำมัน เป็นต้น

สารเคลือบ เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ป้องกันวัสดุแกนจากการเสื่อมเสียและปลดปล่อย วัสดุแกนออกมาภายใต้สภาวะที่ต้องการ อาจเรียกว่า วัสดุเคลือบ (coating material) หรือ เปลือก (shell) หรือ ผนัง (wall) หรือ พาหะ (carrier) สารเคลือบที่ใช้ได้กับอาหารนั้นมีอยู่จำกัด ซึ่งได้แก่ ไข (wax) คาร์โบไฮเดรต และโปรตีนบางชนิด (Dziezak, 1988) ตัวอย่างเช่น ไขมัน โมลโตเดกซ์ตริน (maltodextrin) ไฮโคลเดกซ์ตริน (cyclodextrin) โซเดียมอัลจิเนต (sodium alginate) เจลาติน (gelatin) และโปรตีนเวย์ (whey protein) เป็นต้น (Finch, 1993)

ไมโครแคปซูล มีขนาดตั้งแต่ 0.2 – 5000 ไมโครเมตร (King, 1995) ตามอุดมคติแล้ว ไมโครแคปซูลมีรูปร่างเป็นทรงกลมแต่ในความเป็นจริงแล้วไมโครแคปซูลมีรูปแบบต่างๆ มากมาย (ภาพที่ 2.1) ขึ้นอยู่กับวัสดุแกนและกระบวนการผลิต (Dziezak, 1988; Arshady, 1993)



ภาพที่ 2.1 ไมโครแคปซูลรูปแบบต่าง ๆ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Arshady (1993); Daesy (1984); Gibbs และคณะ (1999); Kondo (1979)

2.1.2 วัตถุประสงค์ของการผลิตไมโครแคปซูล

วัตถุประสงค์ของการผลิตไมโครแคปซูลในอุตสาหกรรมอาหารมีหลายประการด้วยกัน เช่น ป้องกันส่วนผสมของอาหารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย นำส่วนผสมที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายไปใช้ประโยชน์ ป้องกันการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ ควบคุมการปลดปล่อย กลบหรือรักษากลิ่นรส ช่วยให้เก็บรักษาและขนส่งได้ง่ายขึ้น (Dziezak, 1988; Shahidi and Han, 1993)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

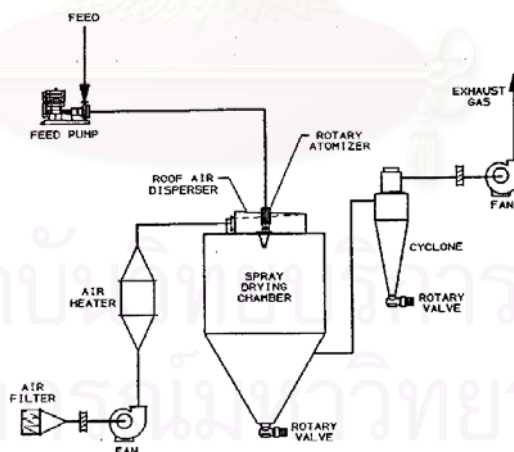
2.1.3 เทคนิคในการผลิตไมโครแคปซูล (microencapsulation technique)

เทคนิคที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลมีอยู่ด้วยกันหลายเทคนิค (Dziezak, 1988; Kondo, 1979; Shahidi and Han, 1993)

1) การอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying)

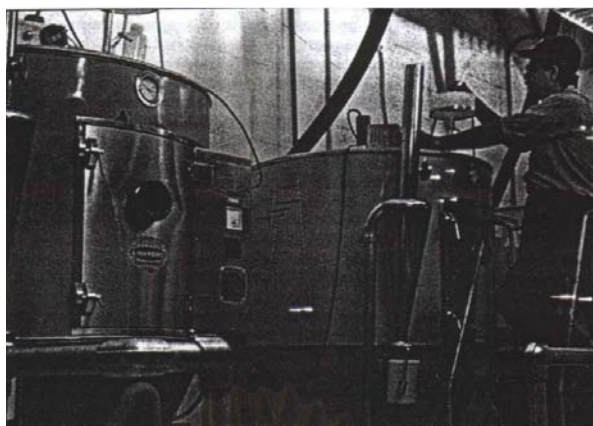
การอบแห้งแบบพ่นฝอย เป็นเทคนิคที่นิยมใช้มากที่สุดในการผลิตไมโครแคปซูล (Dziezak, 1988; Pothakamury and Barbosa-Canovas, 1995) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ประหยัดและมีความยืดหยุ่น ใช้เครื่องมือที่สามารถหาได้ง่าย และอนุภาคที่ผลิตได้มีคุณภาพดี

หลักการที่สำคัญของการอบแห้งแบบพ่นฝอยคือสารที่จะนำมาอบแห้งต้องสามารถทำให้เป็นของเหลว หรืออยู่ในรูปของสารละลาย เจล อิมัลชัน หรือ ของเหลวหนืด (slurry) การอบแห้งจะเกิดขึ้นโดยการทำให้ของเหลวดังกล่าวแตกกระจายเป็นละอองเล็ก ๆ ภายในห้องอบแห้ง (drying chamber) ที่มีอากาศร้อนไหลผ่าน (ภาพที่ 2.2 และ 2.3) ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเร็วมากทำให้น้ำระเหยออกไปได้รวดเร็ว ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาในสภาพเป็นเม็ดเล็ก ๆ หรือผง (Dziezak, 1988) ไมโครแคปซูลที่ได้จากเทคนิคนี้มีรูปร่างทรงกลมมีวัสดุแกนติดอยู่ที่ผิววนอก (Desobry et al., 1997; Wagner and Warthesen, 1995) และมีโพรงอากาศอยู่ภายใน (Rosenberg, Kopelman, and Talmon, 1985; Sheu and Rosenberg, 1995; Young, Sarda and Rosenberg, 1993) ดังภาพที่ 2.4

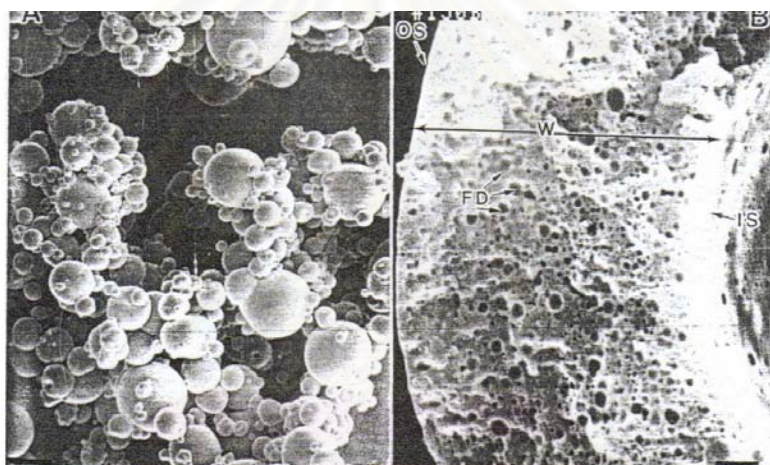


ภาพที่ 2.2 ระบบการอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งประกอบไปด้วยห้องอบแห้งที่เหมาะสม กับระบบการทำละอองเล็ก ๆ เครื่องทำอากาศร้อน พัดลม และไซโคลนสำหรับรวบรวมผลิตภัณฑ์ที่ได้

ที่มา : Dziezak (1988)



ภาพที่ 2.3 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล
ที่มา : Dziezak (1988)



ก.

ข.

ภาพที่ 2.4 โครงสร้างภายใน (ก.) และภายนอก (ข.) ของไมโครแคปซูลของ anhydrous milk fat ที่ผลิตขึ้นด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย (OS = พื้นผิวด้านนอก IS = พื้นผิวด้านใน FD = หยอดไขมัน และ W = ผนังของไมโครแคปซูล)

ที่มา : Young และคณะ (1993)

2) การพ่นฝอยที่อุณหภูมิต่ำ (spray cooling and spray chilling)

การพ่นฝอยที่อุณหภูมิต่ำมีหลักการคล้ายกับการอบแห้งแบบพ่นฝอยเนื่องจากกระบวนการเหล่านี้ทำให้วัสดุแกนกระจายตัวในสารเคลือบซึ่งเป็นของเหลว แล้วพ่นลงมาเป็นฝอยผ่าน heated nozzle ลงในสภาวะที่ควบคุม แต่การพ่นฝอยที่อุณหภูมิต่ำใช้อากาศเย็นเพื่อทำให้สารเคลือบแข็งตัว ในขณะที่การอบแห้งแบบพ่นฝอยใช้อากาศร้อนเพื่อให้ตัวทำละลาย

ระเหยออกมาจากสารเคลือบ นอกจากนี้สารเคลือบที่ใช้ยังแตกต่างกันนั้นคือการพ่นฝอยที่อุณหภูมิทำให้สารเคลือบที่หลอมตัวได้ เช่น ไขมัน หรือ ไช (wax) แต่การอบแห้งแบบพ่นฝอยใช้สารเคลือบที่ละลายในตัวทำละลายได้

สารเคลือบที่ใช้ใน spray cooling และ spray chilling มีความแตกต่างกันเล็กน้อย คือ spray cooling มักจะใช้สารเคลือบที่เป็นน้ำมันพืช หรืออนุพันธ์ของน้ำมันพืช เช่น ไขมัน และ stearine ที่มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 45 – 122 °C ส่วน spray chilling จะใช้สารเคลือบซึ่งเป็นน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการแยกส่วน หรือ ไฮโดรจีเนชันมาแล้ว โดยมีจุดหลอมเหลวก่อนข้างต่ำ คือ 32 – 42 °C (Dziezak, 1988; Shahidi and Han, 1993)

3) วิธีออร์พิช และการอัดรีดร่วม (orifice method and co-extrusion)

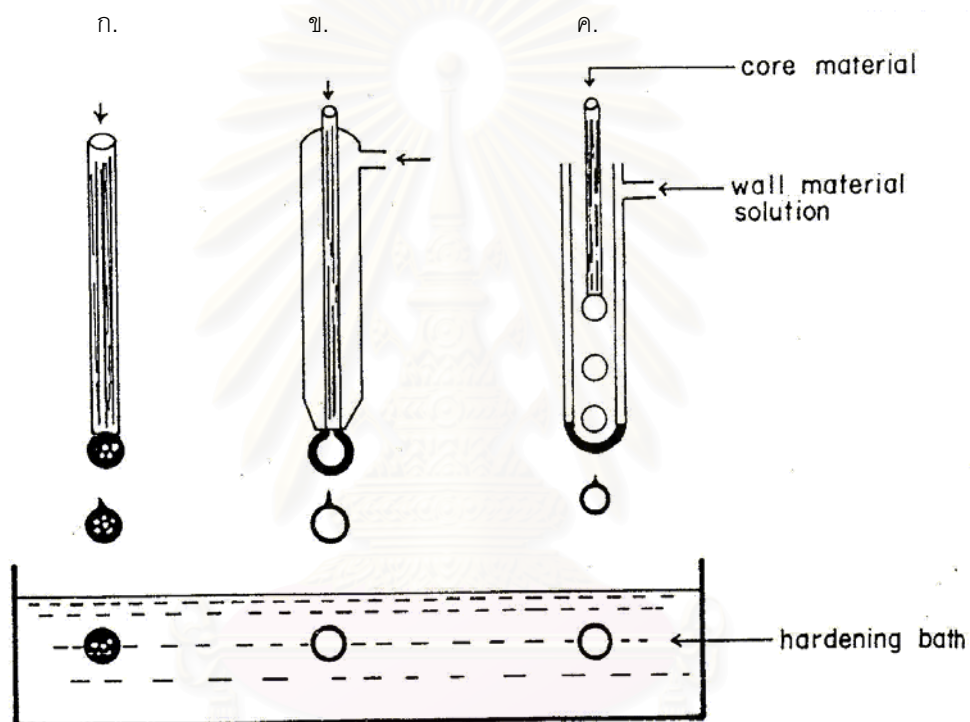
วิธีออร์พิช หรือ in-liquid curing coating process เป็นเทคนิคที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลโดยเคลือบหุ้มวัสดุแกนซึ่งอาจเป็นของแข็งหรือของเหลวด้วยสารละลายพอลิเมอร์ เช่น โซเดียมอัลจิเนต แล้วทำให้อยู่ในสภาพที่เป็นหยด เมื่อไมโครแคปซูลหยดลง curing agent หรือ hardening liquid เช่น สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ สารละลายพอลิเมอร์จะแข็งตัวกลายเป็นฟิล์มที่ไม่ละลาย (insolubilized film) ในตัวทำละลาย เช่น น้ำ ขนาดของไมโครแคปซูลที่ได้จากวิธีนี้ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่ของเหลวไหลผ่าน (Kondo, 1979)

เครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในวิธีออร์พิชมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด คือ

1) one nozzle เป็นเครื่องมือที่ง่ายมากเพราะประกอบด้วย nozzle เพียงอันเดียวดังภาพที่ 2.5 (ก.) เมื่ออิมัลชันหรือสารแขวนลอยของวัสดุแกนในสารละลายของสารเคลือบหยดผ่านปลายของ nozzle นี้จะได้เม็ดกลม ๆ ออกมา แล้วตกลงสู่ hardening bath ทำให้เม็ดกลม ๆ ดังกล่าวแข็งตัวเป็นไมโครแคปซูล (ภาพที่ 2.6) วัสดุแกนที่ใช้ได้กับเครื่องมือนี้อาจเป็นของแข็งหรือของเหลว

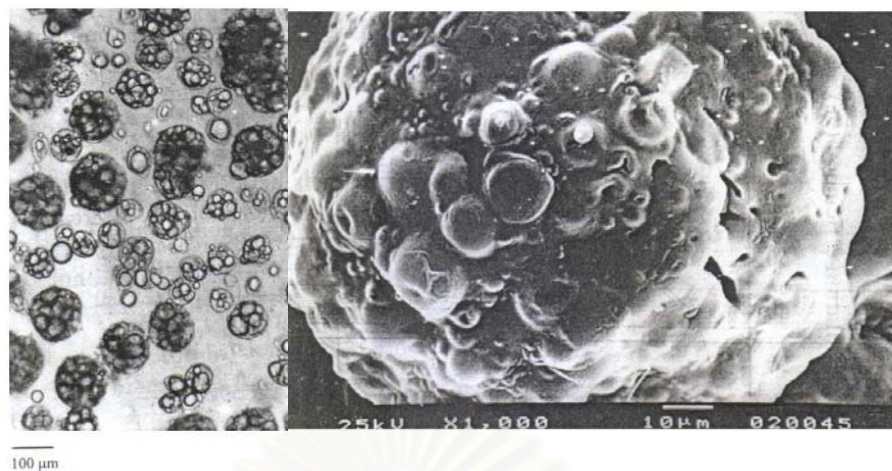
2) bi-fluid nozzle เป็นเครื่องมือที่ประกอบด้วยออร์พิช 2 อันซึ่งเกิดจากท่อขนาดเล็ก 2 ท่อซ้อนกันโดยท่อด้านในและด้านนอกที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันดังภาพที่ 2.5 (ข.) เมื่อวัสดุแกนไหลจากท่อด้านใน ส่วนสารเคลือบไหลจากท่อด้านนอก สารเคลือบที่อยู่ด้านนอกจะห่อหุ้มวัสดุแกนซึ่งอยู่ตรงกลางแล้วกลายเป็นหยดหรือไมโครแคปซูลออกมาจาก bi-fluid nozzle แล้วหยดลงใน hardening bath ทำให้ไมโครแคปซูลดังกล่าวแข็งตัว วัสดุแกนที่ใช้กับเครื่องมือนี้มักเป็นของเหลว เช่น น้ำมัน ไมโครแคปซูลที่ได้มีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดสม่ำเสมอ (ภาพที่ 2.7)

3) concentric double orifice เป็นเครื่องมือที่ประกอบด้วยออร์ฟิช 2 อันซึ่งเกิดจากท่อขนาดเล็ก 2 ท่อซ้อนกันโดยปลายของท่อด้านในอยู่เหนือปลายของท่อด้านนอกดังภาพที่ 2.5 (ค.) วัสดุแกนจะหยดลงมาจากปลายของท่อด้านใน แล้วกระทบกับฟิล์มของสารเคลือบจากปลายของท่อด้านนอก สารเคลือบจึงห่อหุ้มวัสดุแกนออกมาเป็นหยด เมื่อหยดหรือไมโครแคปซูลตกลงสู่ hardening bath จะทำให้ไมโครแคปซูลแข็งตัว วัสดุแกนที่ใช้ได้กับเครื่องมือนี้อาจเป็นของแข็งหรือของเหลว

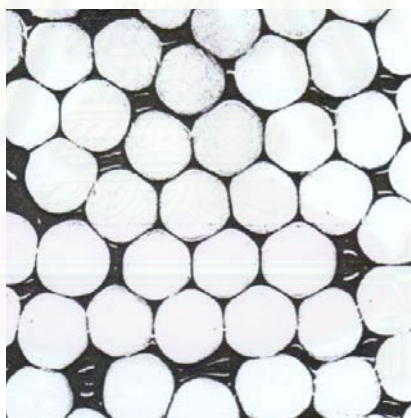


ภาพที่ 2.5 เครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในวิธีออร์ฟิชแบบ one nozzle (ก.) bi-fluid nozzle (ข.) และ concentric double orifice (ค.)

ที่มา : Kondo (1979)



ภาพที่ 2.6 ไมโครแคปซูลที่ผลิตขึ้นจากวิธีออร์ฟิชด้วยเครื่องมือแบบ one nozzle
ที่มา : Chan, Lim และ Heng (2000)



ภาพที่ 2.7 ไมโครแคปซูลที่ผลิตขึ้นจากวิธีออร์ฟิชด้วยเครื่องมือแบบ bi-fluid nozzle
ที่มา : Kondo (1979)

ต่อมาได้มีการดัดแปลงเครื่องมือที่เป็น bi-fluid nozzle และ concentric double orifice อีกมากมาย (Kondo, 1979) อาจเรียกเทคนิคที่อาศัยเครื่องมือเหล่านี้ว่า การอัดรีดร่วม (Franjione and Vasishtha, 1995)

การอัดรีดร่วม เป็นเทคนิคที่ Southwest Research Institute (SwRI) พัฒนาขึ้น และได้นำมาประยุกต์ใช้ในเชิงการค้าแล้ว หลักการของเทคนิคนี้เริ่มจากการบีบวัสดุแกนและสารเคลือบซึ่งเป็นของเหลวผ่านออร์ฟิซที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน โดยที่วัสดุแกนจะไหลผ่านออร์ฟิซที่อยู่ตรงกลาง (central orifice) และสารเคลือบไหลผ่าน วงแหวนที่อยู่ด้านนอก หยดที่ออกมาจะประกอบด้วยหยดของวัสดุแกนที่ห่อหุ้มด้วยชั้นของสารเคลือบในสภาวะที่เป็นของเหลว เรียกหยดนี้ว่า compound drop แล้วนำไปทำให้แข็งตัวด้วยวิธีที่เหมาะสม (Franjione and Vasishtha, 1995)

แบบของการสร้างแคปซูล แคปซูลที่สร้างขึ้นเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ

1) **แบบหยด (drip mode)**

การสร้างแคปซูลแบบนี้วัสดุแกนและสารเคลือบจะไหลออกจากออร์ฟิซที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันอย่างช้า ๆ และจะสร้าง compound drop ขึ้นที่ปลายของ nozzle ในกรณีที่ปล่อยให้หยดไหลอย่างช้า ๆ แรงตึงผิวจะทำให้ compound drop ไม่สามารถแยกออกจากออร์ฟิซโดยทันที แต่เมื่อหยดนั้นมีขนาดใหญ่เพียงพอน้ำหนักของหยดจะเอาชนะ cohesive force ของแรงตึงผิวทำให้หยดตกลงจาก nozzle

ถ้ารักษาอัตราการไหลของของไหลและอุณหภูมิให้คงที่จะทำให้ได้แคปซูลที่มีขนาดสม่ำเสมอ แต่แคปซูลที่ได้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ นอกจากนี้ยังมีอัตราการผลิตต่ำอีกด้วย

2) **แบบเจ็ท (jet mode)**

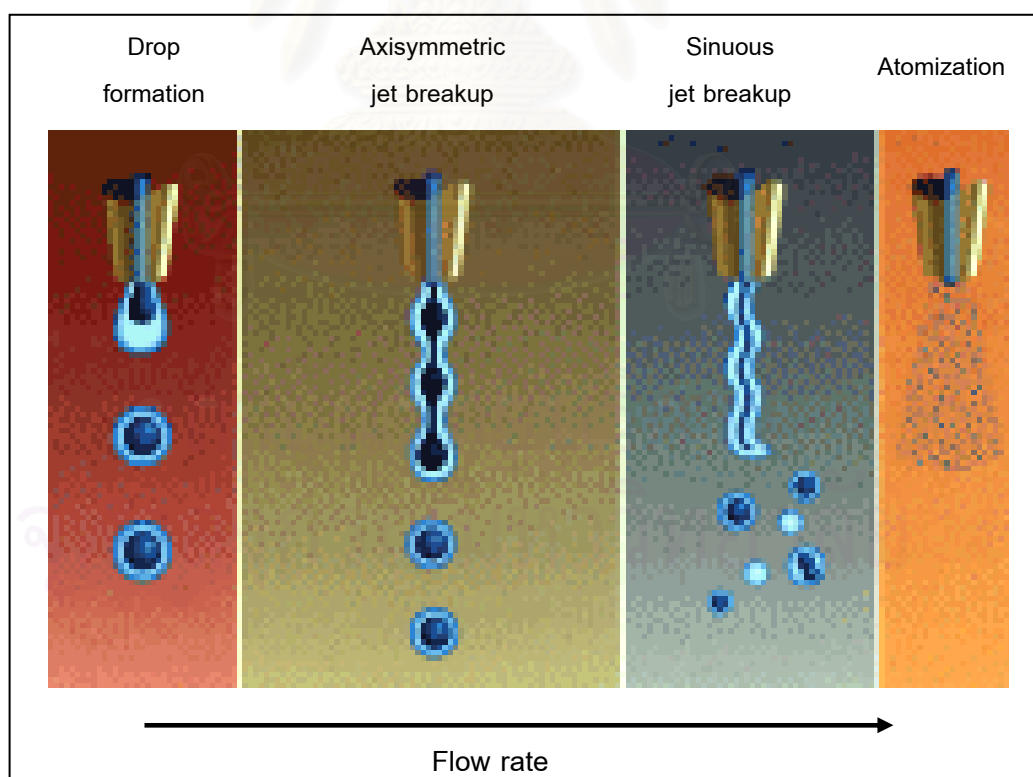
เมื่ออัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบเพิ่มขึ้นจนถึงค่าวิกฤต (critical value) แคปซูลจะไม่ขึ้นรูปที่ปลาย nozzle แต่จะสร้าง compound jet ขึ้น ซึ่ง compound jet นี้ประกอบด้วยเจ็ทของวัสดุแกนอยู่ภายในแผ่นของสารเคลือบ

อัตราการไหลวิกฤต (critical flow rate) คือ อัตราการไหลที่ผลรวมของแรงเฉื่อย (inertial force) กับความเร็วของของไหลมีค่ามากกว่าแรงตึงผิว (surface tension force) เพียงเล็กน้อย จึงทำให้ของไหลยังติดอยู่ที่ปลายของ nozzle

แต่แรงตึงผิวจะส่งผลให้เจ็ทของของไหล (fluid jet) ซึ่งควรจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกเรียบ ๆ นั้นมี geometric configuration ที่ไม่คงตัว นั่นคือมีแนวโน้มที่จะเกิดเป็นหยดเล็กๆ ขึ้น หยดดังกล่าวจะใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ จนมีขนาดใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ทแล้ว compound jet จะแตกตัวกลายเป็น compound drop ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 เท่าของ compound jet (Franjione and Vasishtha, 1995)

ผลของอัตราการไหลต่อการสร้าง compound drop

เมื่ออัตราการไหลทั้งหมด (total flowrate) ของ nozzle เพิ่มขึ้นจากศูนย์จะทำให้แบบของการสร้าง compound drop เปลี่ยนแปลงไป (ภาพที่ 2.8) เมื่ออัตราการไหลต่ำ ๆ แรงตึงผิวซึ่งทำให้ของไหลติดอยู่ที่ปลายของ nozzle จะเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุด และจะสร้าง compound drop ขึ้นครั้งละหยด เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นจนทำให้แรงเฉื่อยมีค่ามากกว่าเนื่องจากแรงตึงผิวและจะสร้าง compound drop ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของเจ็ทตามแนวสมมาตรของแกน (axisymmetric jet breakup) เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นกว่านี้จะทำให้แบบของการแตกตัวของเจ็ทเปลี่ยนแปลงไปจากแบบที่แตกตัวตามแนวสมมาตรของแกนไปเป็นแบบคดเคี้ยว (sinuous) และเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นกว่านี้การแตกตัวซึ่งเกิดขึ้นที่ปลายของ nozzle จะเป็นแบบ atomization ได้ compound drop ที่มีวัสดุแกนหลายอนุภาคอยู่ในหยดเดียวกัน (multinuclear compound drop) แคปซูลที่ได้จะมีขนาดค่อนข้างเล็กแต่จะมีการกระจายของขนาดอนุภาคที่กว้างกว่า สำหรับลักษณะที่นำไปใช้ได้มากที่สุดคือหยดที่สร้างขึ้นจากการแตกตัวแบบสมมาตรตามแนวแกนซึ่งในลักษณะนี้จะทำให้มีอัตราการผลิตสูงกว่าแบบหยด และสามารถควบคุมการกระจายของขนาดอนุภาคได้โดยใช้การสั่นสะเทือน (Franjione and Vasishtha, 1995)



ภาพที่ 2.8 การสร้าง compound drop

ที่มา : Franjione และ Vasishtha (1995)

ขนาดของแคปซูล ที่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุแกน (Franjione and Vasishtha, 1995) ที่อยู่ภายในแคปซูลซึ่งได้รับอิทธิพลจาก

- 1) สมบัติทางกายภาพของของไหล ได้แก่ ความหนาแน่น ความขุ่นหนืด และแรงตึงระหว่างผิว (interfacial tension)
- 2) สภาวะในการผลิต ได้แก่ อัตราการไหล (Schlameus, 1995) และ อุณหภูมิ
- 3) รูปทรงของ *nozzle* ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิซที่อยู่ด้านใน และด้านนอก (Schlameus, 1995)
- 4) แอมพลิจูดและความถี่ของการสั่นสะเทือนซึ่งมีในระบบ

การสั่นสะเทือนที่ใช้ทำให้เจ็ทแตกตัว

ถึงแม้ว่าการสร้างแคปซูลแบบเจ็ทจะทำให้มีอัตราการผลิตสูงกว่าแบบหยดแต่อุณหภูมิที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เนื่องจาก disturbance ตรงบริเวณผิวของเจ็ทจะทำให้เจ็ทของของไหลแตกตัว ดังนั้นการกระจายตัวของขนาดอนุภาคจึงมีความเกี่ยวข้องกับความถี่ของ disturbance ถ้าควบคุมความถี่ของ disturbance นี้ได้จะทำให้มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงแคบ

การให้ disturbance แก่เจ็ททำได้โดยให้แรงกลแก่ nozzle จนมีความถี่ตามต้องการ แต่การทำให้เกิดความถี่ด้วยวิธีง่าย ๆ ยังไม่เพียงพอ เนื่องจากการบังคับให้ compound drop แตกตัวนั้นเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและสัจฐานวิทยา (geometry) ของ compound drop ที่ผลิตขึ้นได้รับอิทธิพลจากความถี่ที่ให้

เมื่อเกิด disturbance ขึ้นที่ผิวของเจ็ทแล้วจะทำให้เจ็ทมีส่วนที่โป่งออก (bulges) และ คอคอด (necks) บางครั้งส่วนที่เป็นคอคอดของของไหลซึ่งต่อกับหยดที่เพิ่งจะแตกตัวนั้นจะไม่สามารถดึงกลับไปยังอีกหยดหนึ่งที่ได้ทำให้เกิดการแตกตัวออกมาจากทั้ง 2 ด้าน กลายเป็นหยดที่มีขนาดเล็กกว่า (satellite droplet) ซึ่งถ้า satellite droplet เกิดขึ้นในของไหลที่เป็นสารเคลือบแล้วจะทำให้การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเป็นแบบ bimodal distribution แต่ถ้าเกิดในของไหลที่เป็นวัสดุแกนแล้วจะทำให้แคปซูลมีแกนหลายอนุภาค (Franjione and Vasishtha, 1995)

วิธีที่ทำให้ผนังแคปซูลแข็งตัว หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นการเก็บรวบรวมแคปซูลนี้
ทำได้หลายวิธี ได้แก่

1) *ปฏิกิริยาเคมี (chemical reaction)*

การทำให้ผนังแคปซูลแข็งตัวด้วยวิธีนี้จะใช้เมื่อสารเคลือบของแคปซูลเป็นโซเดียมอัลจิเนตเพียงอย่างเดียว หรือใช้ร่วมกับพอลิเมอร์อื่น เมื่อแคปซูลตกลงมาในอ่างที่บรรจุสารละลายที่เป็นเกลือของแคลเซียม เช่น แคลเซียมคลอไรด์ แล้วจะทำให้โซเดียมอัลจิเนตเปลี่ยนไปเป็นเกลือของแคลเซียมซึ่งไม่ละลายน้ำ ผนังของแคปซูลจึงแข็งตัวอย่างรวดเร็ว (Franjione and Vasishtha, 1995; Kondo, 1979; Schlameus, 1995)

2) *การทำให้เย็น (cooling)*

วิธีทำให้ผนังแข็งตัวนี้ใช้เมื่อผนังของแคปซูลเป็นสารที่หลอมตัวได้เนื่องจากความร้อน ซึ่งแคปซูลจะต้องลอยอยู่ในอากาศที่เย็นในเวลานานเพียงพอที่จะทำให้แคปซูลแข็งตัวก่อนตกลงสู่ collection area (Franjione and Vasishtha, 1995; Goodwin and Somerville, 1974; Kondo, 1979; Schlameus, 1995)

3) *การเก็บด้วยผง (powder collection)*

วิธีนี้ใช้กับแคปซูลที่มีผนังเป็นสารที่สร้างเจลได้เมื่อได้รับความเย็น เช่น เจลาติน หรือ คาร์ราจีแนน การเก็บรวบรวมแคปซูลด้วยผงนี้จะช่วยป้องกันไม่ให้แคปซูลเกาะติดกัน และช่วยลดความชื้นที่ยังอยู่ในผนังแคปซูล ผงที่ใช้ได้แก่ modified hydrophobic starch (Schlameus, 1995)

4) *การพ่นด้วยละออง (misting)*

วิธีนี้ใช้เมื่อผนังของแคปซูลเป็นสารที่หลอมได้เมื่อได้รับความร้อนการพ่นด้วยละอองทำได้โดยปล่อยแคปซูลให้ตกลงสู่ละอองน้ำเย็นเพื่อทำให้แคปซูลแข็งตัว การทำให้แคปซูลแข็งตัวด้วยวิธีนี้แตกต่างจากการทำให้เย็นตรงที่จะใช้กับแคปซูลที่มีขนาดใหญ่กว่าและใช้พื้นที่น้อยกว่า (Schlameus, 1995)

5) *การระเหยตัวทำละลาย*

วิธีนี้ใช้ได้กับเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยขนาดใหญ่ที่ให้ความร้อนได้เพียงพอที่จะทำให้ผนังแคปซูลแห้ง (Franjione and Vasishtha, 1995; Schlameus, 1995)

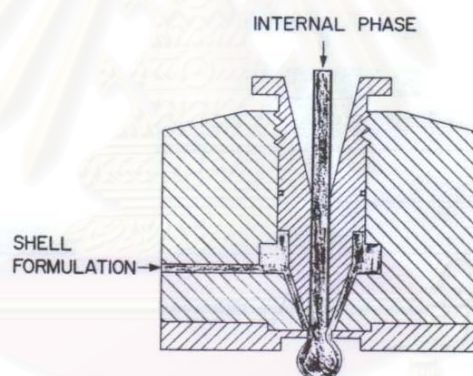
นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีเหล่านี้ร่วมกันได้อีกด้วย (Franjione and Vasishtha, 1995)

เครื่องมือที่นำการอัดรีดรวมไปใช้

1) การอัดรีดรวมแบบอยู่กับที่ (Stationary coextrusion)

1.1) Gravity-flow apparatus

Gravity-flow apparatus เป็นเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นประมาณปีคริสต์ศักราช 1949 ซึ่งเครื่องมือนี้อาศัยการไหลตามแนวโน้มถ่วง แคปซูลที่ผลิตได้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ nozzle ที่ออกแบบขึ้นมาในช่วงแรก ๆ นี้แสดงดังภาพที่ 2.9 วัสดุแกนจะป้อนลงมาทางด้านล่างผ่านท่อตามแนวตั้ง ส่วนสารเคลือบจะไหลเข้ามาทางด้านข้างผ่านช่องว่างวงแหวนที่อยู่ล้อมรอบท่อของวัสดุแกนลงไปสู่ออร์ฟิซตรงบริเวณฐานของ nozzle ทำให้สารเคลือบสร้างเป็นเมมเบรนขึ้น ในขณะที่วัสดุแกนซึ่งไม่รวมตัวกับสารเคลือบจะหยดลงบนเมมเบรนดังกล่าว เมมเบรนจึงห่อหุ้มวัสดุแกนแล้วแตกตัวเป็นหยด แรงตึงผิวจะทำให้แคปซูลที่เป็นของเหลวนี้มีรูปร่างทรงกลม หลังจากนั้นจึงนำแคปซูลดังกล่าวไปทำให้แข็งตัวโดยใช้สารที่ทำให้แข็งตัวที่เหมาะสม ในขณะที่เดียวกันจะมีการสร้างเมมเบรนขึ้นใหม่ซึ่งพร้อมที่จะใช้ผลิตแคปซูลต่อไป (Franjione and Vasishta, 1995; Goodwin and Somerville, 1974)

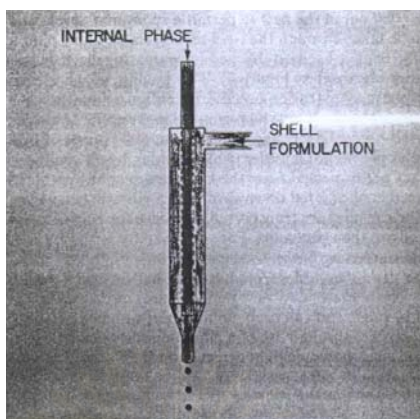


ภาพที่ 2.9 gravity flow microencapsulation nozzle

ที่มา : Goodwin และ Somerville (1974)

1.2) Simple extrusion nozzle

เป็นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มอัตราการผลิตให้สูงขึ้นแต่ขนาดของแคปซูลที่ได้จะไม่สม่ำเสมอ เครื่องมือแบบนี้มีลักษณะการวางตัวของท่อไว้ภายในอีกท่อหนึ่ง โดยที่วัสดุแกนจะไหลผ่านท่อด้านใน ส่วนสารเคลือบจะไหลเข้าสู่ท่อด้านนอก (ภาพที่ 2.10) ทำให้สารเคลือบมีลักษณะเป็นแผ่นของเหลวห่อหุ้มวัสดุแกนซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งของของไหล (fluid rod) ได้เป็น fluid cylinder ที่จะยังคงรักษารูปร่างเอาไว้ที่ปลาย nozzle หลังจากนั้นจึงแตกตัวกลายเป็น compound drop (Goodwin and Somerville, 1974)



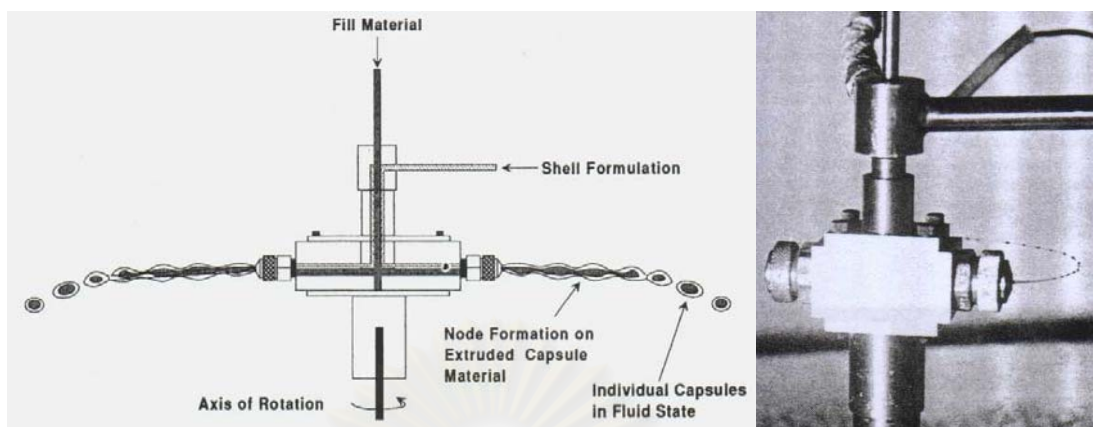
ภาพที่ 2.10 simple extrusion nozzle ที่ใช้ผลิตแคปซูล

ที่มา : Goodwin และ Somerville (1974)

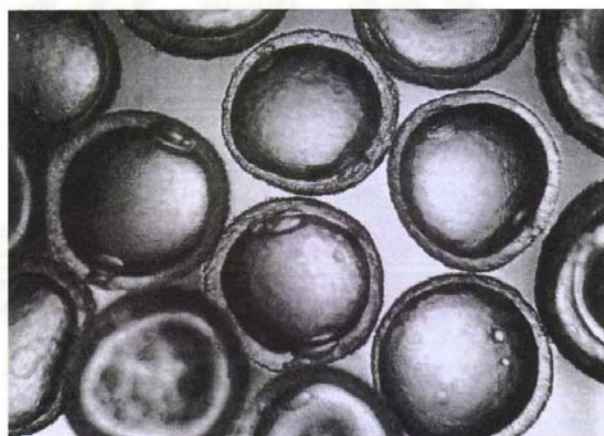
2) การอัดรีดร่วมแบบหนีศูนย์กลาง (Centrifugal coextrusion)

เทคนิคนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การอัดรีดแบบหนีศูนย์กลาง (centrifugal extrusion) ซึ่งพัฒนาขึ้นจากวิธีออริพิชโดยอาศัยเครื่องมือดังภาพที่ 2.11 เครื่องมือนี้ประกอบด้วย concentric feed tube ซึ่งต่อเข้ากับ nozzle หลายอันที่อยู่ตรงบริเวณส่วนหัวของเครื่องมือ เครื่องมือทั้งหมดจะต่อเข้ากับเพลลาที่หมุนได้ (rotating shaft) ทำให้ส่วนหัวของเครื่องมือหมุนได้ตามไปด้วย เทคนิคนี้ทำได้โดยบีบสารเคลือบและวัสดุแกนเข้าสู่ concentric feed tube วัสดุแกนจะไหลผ่านท่อด้านใน ส่วนสารเคลือบจะไหลผ่านท่อด้านนอก เมื่อส่วนหัวของเครื่องมือหมุนแล้ววัสดุแกนและสารเคลือบจะอัดรีดออกมาพร้อมกันผ่าน nozzle โดยมีลักษณะคล้ายแท่งของวัสดุแกนที่หุ้มด้วยสารเคลือบ แรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะผลักดันแท่งนี้ให้ออกไปทางด้านนอกทำให้แท่งดังกล่าวแตกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก แต่เนื่องจากสารเคลือบมีแรงตึงผิว ดังนั้นสารเคลือบจึงหุ้มวัสดุแกนเอาไว้ได้หมดทำให้แท่งดังกล่าวกลายเป็นไมโครแคปซูล หลังจากนั้นไมโครแคปซูลจะตกลงบน moving bed ของสตาร์ชซึ่งมีอนุภาคละเอียด (fine-grained starch) เพื่อช่วยลดแรงกระแทกและดูดซับความชื้นออกจากผนังของไมโครแคปซูล ไมโครแคปซูลที่ได้มีขนาด 150 – 2,000 ไมโครเมตร (Schlameus, 1995) และมีลักษณะเป็นแคปซูลที่แท้จริง (true capsule) ดังภาพที่ 2.12 (Brazel, 1999)

เทคนิคนี้ใช้สำหรับผลิตไมโครแคปซูลเคลือบหุ้มกลิ่นรส เครื่องปรุงรส (seasonings) และวิตามิน เป็นต้น (Brazel, 1999; Dziezak, 1988; Schlameus, 1995; Shahidi and Han, 1993)



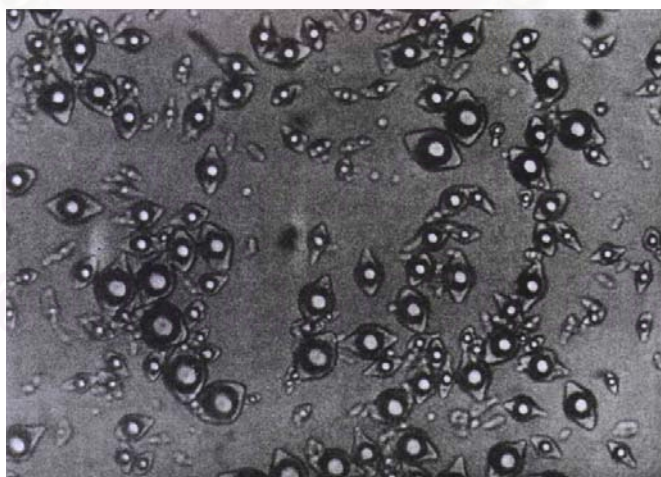
ภาพที่ 2.11 เครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลด้วยวิธีการอัดรีดร่วมแบบหนีศูนย์กลาง
ที่มา : Schlameus (1995); Brazel (1999)



ภาพที่ 2.12 ไมโครแคปซูลที่ผลิตได้โดยใช้การอัดรีดหนีศูนย์กลาง
ที่มา : Brazel (1999)

4) โคอะเซอร์เวชัน (coacervation)

โคอะเซอร์เวชัน หรือ phase separation เป็นเทคนิคดั้งเดิมที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล และยังคงใช้อยู่ในปัจจุบัน (Dziezak, 1988; Kondo, 1979) เทคนิคนี้ได้นำพื้นฐานด้านวิทยาศาสตร์ทางคอลลอยด์ (colloid science) มาใช้ โคอะเซอร์เวชันเป็นการแยกชั้นของของเหลวออกเป็น 2 ชั้น หรือ 2 วัฏภาค วัฏภาคหนึ่งจะประกอบด้วยของเหลวที่มีคอลลอยด์อยู่เป็นจำนวนมาก เรียก colloid rich phase ส่วนอีกวัฏภาคหนึ่งจะมีคอลลอยด์อยู่น้อยมากหรือไม่ มีเลย เรียก equilibrium liquid (Bungenberg de Jong, 1949; Kondo, 1978) เมื่อวัสดุแกนแขวนลอยอยู่ในสารละลายของสารเคลือบแล้ว ทำให้พอลิเมอร์ที่เป็นสารเคลือบแยกออกมาเหมือนกับเป็นวัฏภาคของของเหลวที่ชั้นหนึ่งได้โดยเติมสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลาย (non-solvent) ลดอุณหภูมิ หรือเติมพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง (หรือใช้วิธีเหล่านี้ร่วมกัน) สารแขวนลอยจึงเกิดโคอะเซอร์เวชันขึ้นทำให้สารแขวนลอยดังกล่าวมีลักษณะขุ่น มีการสร้างหยด หรือมีการแยกชั้นของของเหลว (Finch, 1993) หลังจากนั้นจึงทำให้สารเคลือบเป็นของแข็งโดยการให้ความร้อน cross-linking หรือการเอาตัวทำละลายออกไปแล้วแยกไมโครแคปซูลที่เกิดขึ้นโดยการกรอง การใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง หรือ การชะล้างด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม แล้วจึงนำไปทำแห้ง เช่น การอบแห้งแบบพ่นฝอย การอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด ได้เป็นไมโครแคปซูลที่มีการไหลอย่างอิสระ (Dziezak, 1988) และมีรูปร่างคล้ายลูกอมอเมริกันฟุตบอล (Brazel, 1999) ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ไมโครแคปซูลที่ได้จากเทคนิคโคอะเซอร์เวชัน

ที่มา : Brazel (1999)

5) การเคลือบโดยการแขวนลอยในอากาศ (air suspension coating)

การเคลือบโดยการแขวนลอยในอากาศ (air suspension coating) หรือ การเคลือบแบบฟลูอิดิซ์เบด (fluidized bed coating) หรือ การเคลือบแบบพ่นฝอย (spray coating) เป็นการเคลือบวัสดุแกนซึ่งเป็นของแข็งด้วยสารเคลือบที่ละลายได้ในตัวทำละลายที่ระเหยได้ หรืออยู่ในสถานะหลอมเหลว (molten state) หลักการของเทคนิคนี้คือทำให้อนุภาคของวัสดุแกนแขวนลอยอยู่ในอากาศร้อนหรือเย็นที่ไหลขึ้นมาจากด้านล่างของ chamber (ภาพที่ 2.14) ในขณะที่สารเคลือบจะถูกอะตอมไมซ์ผ่าน nozzle ลงสู่ chamber แล้วเคลือบเป็นชั้นบาง ๆ บนผิวของวัสดุแกน อากาศที่ผ่านเข้าสู่ chamber ต้องเป็นอากาศที่ปั่นป่วนเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคที่เคลือบแล้วแขวนลอยอยู่ได้ อนุภาكدังกล่าวจะโยนตัวไปมาทำให้เคลือบอนุภาคได้อย่างสม่ำเสมอ เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ไปถึงด้านบนของกระแสน้ำอากาศแล้วอนุภาคจะเคลื่อนที่ออกไปทางด้านนอกและตกลงสู่ด้านล่าง แต่กระแสน้ำอากาศที่ขึ้นมาจากด้านล่างจะทำให้อนุภาคกลับไปสู่ฟลูอิดิซ์เบดอีกครั้ง และทำให้อนุภาคแห้งและแข็งมากยิ่งขึ้น (Dziezak, 1988; Shahidi and Han, 1993)

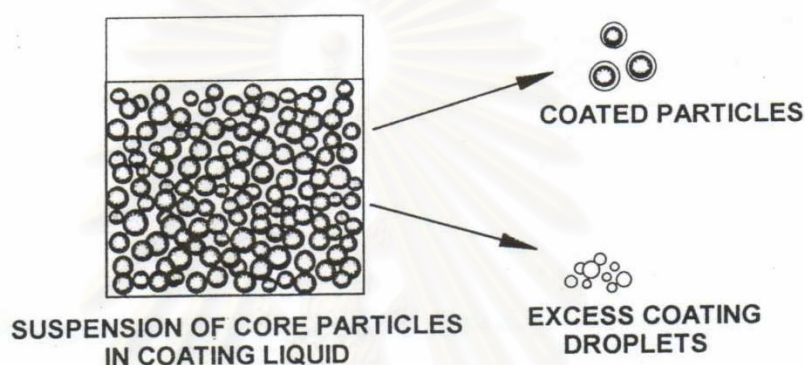


ภาพที่ 2.14 เครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลด้วยเทคนิคการเคลือบโดยการแขวนลอยในอากาศ
ที่มา : Dziezak (1988)

6) การแยกโดยการหมุนสารแขวนลอย (rotational suspension separation)

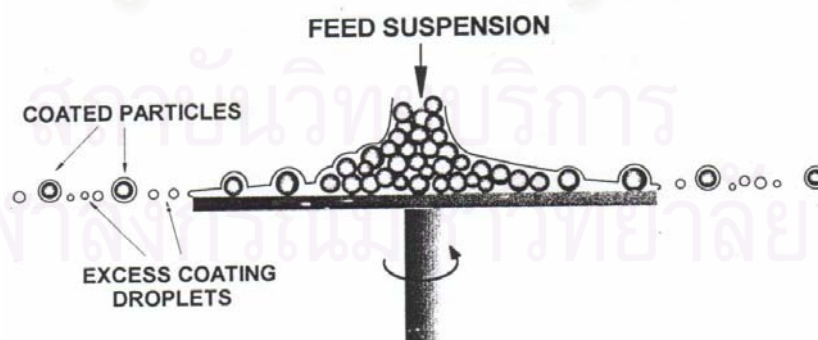
การแยกโดยการหมุนสารแขวนลอยเป็นเทคนิคใหม่ซึ่งพัฒนาขึ้นในปีคริสต์ศักราช 1983 หลักการของเทคนิคนี้เกี่ยวข้องกับการทำให้อุณหภูมิของวัสดุแกนแขวนลอยอยู่ในสารเคลือบที่บริสุทธิ์และอยู่ในสถานะของเหลว (ภาพที่ 2.15) หลังจากนั้นจึงเติมสารแขวนลอยดังกล่าวลงใน rotating disc apparatus ในสภาวะที่ทำให้สารเคลือบส่วนเกิน (excess coating) ที่อยู่ระหว่างอนุภาคของวัสดุแกนนั้นแผ่กระจายเป็นฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ

วัสดุแกน เมื่อ rotating disc apparatus หมุนจะทำให้อนุภาคของวัสดุแกนที่หลุดออกจาก disc มีสารเคลือบอยู่ล้อมรอบอนุภาคนั้น ในขณะที่สารเคลือบส่วนเกินจะถูกอะตอมไมซ์กลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กมากซึ่งสามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย (ภาพที่ 2.16) จากนั้นจึงนำอนุภาคไปทำให้แข็งโดยการแช่เย็นหรือการอบแห้ง เมื่อแยกอนุภาคของสารเคลือบส่วนเกินออกแล้วยังสามารถนำสารเคลือบนี้กลับไปใช้ใหม่ได้อีกด้วย ไมโครแคปซูลหรืออนุภาคที่ได้มีขนาดตั้งแต่ 30 ไมโครเมตร-20 มิลลิเมตร (Dziezak, 1988; Shahidi and Han, 1993; Sparks, Jacobs and Mason, 1993)



ภาพที่ 2.15 สารแขวนลอยของวัสดุแกนในสารเคลือบ

ที่มา : Sparks และคณะ (1993)



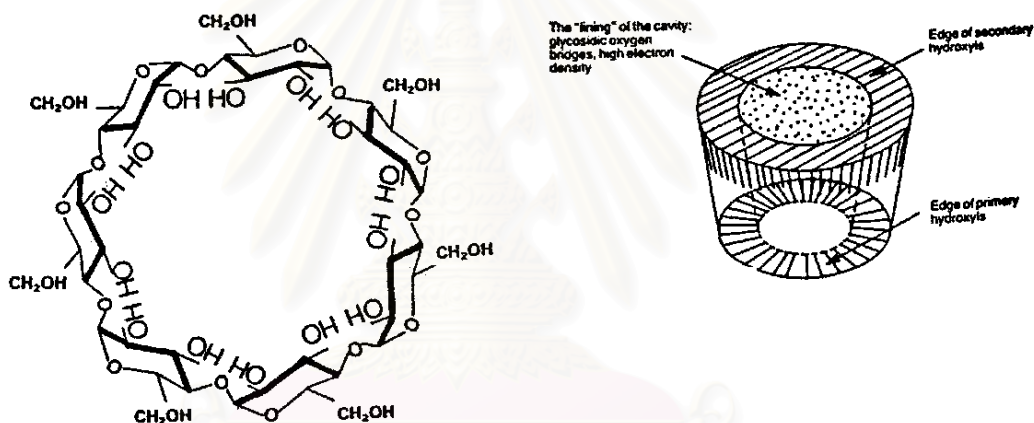
ภาพที่ 2.16 เครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลด้วยเทคนิคการแยกโดยการหมุนสารแขวนลอย

ที่มา : Sparks และคณะ (1993)

7) อินclusionคอมเพล็กซ์ชัน (inclusion complexation)

อินclusionคอมเพล็กซ์ชัน หรืออาจเรียกว่า molecular inclusion เป็นเทคนิคในการผลิตไมโครแคปซูลที่แตกต่างไปจากวิธีอื่น ๆ เพราะเป็นเทคนิคการผลิตไมโครแคปซูลในระดับโมเลกุลและใช้ปีตาไซโคลเดกซ์ตริน (β -cyclodextrin) เป็นสารเคลือบ

โมเลกุลของปีตาไซโคลเดกซ์ตรินเป็นโพลิโกลูโคสที่ต่อกันเป็นวง (cyclic glucose oligomer) ซึ่งประกอบด้วยกลูโคไพแรนโนส (glucopyranose) 7 หน่วย ต่อกันด้วยพันธะ α -1 \rightarrow 4 เนื่องจากปีตาไซโคลเดกซ์ตรินมีโครงสร้างที่ไม่ชอบน้ำอยู่ตรงกลางและมีผิวด้านนอกที่ค่อนข้างจะชอบน้ำ (ภาพที่ 2.17) ดังนั้นปีตาไซโคลเดกซ์ตรินจึงละลายน้ำได้น้อยและสามารถสร้างสารเชิงซ้อน (complex) กับสารประกอบอื่นได้



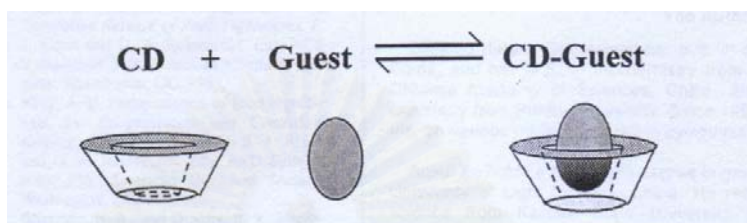
ภาพที่ 2.17 โครงสร้างโมเลกุลของปีตาไซโคลเดกซ์ตริน

ที่มา : Dziezak (1988)

โมเลกุลของปีตาไซโคลเดกซ์ตรินจะสร้างอินclusionคอมเพล็กซ์ (inclusion complex) กับสารประกอบที่เข้าไปอยู่ภายในช่องว่างที่อยู่ตรงกลางโมเลกุลของปีตาไซโคลเดกซ์ตริน (ภาพที่ 2.18) แต่สารเชิงซ้อนนี้เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่มีน้ำอยู่เท่านั้น guest molecule ซึ่งเป็นโมเลกุลที่จะเกิดสารเชิงซ้อนกับปีตาไซโคลเดกซ์ตรินต้องเป็นโมเลกุลที่มีขั้วน้อยกว่าน้ำ (เช่น สารให้กลิ่นรส) และมี molecular dimension ที่เหมาะสมจะเข้าไปอยู่ในโมเลกุลของปีตาไซโคลเดกซ์ตริน ใน aqueous solution น้ำจะเข้าไปอยู่ภายในโมเลกุลของปีตาไซโคลเดกซ์ตรินซึ่งไม่มีขั้วเล็กน้อย (slightly nonpolar) แต่เนื่องจากน้ำไม่ชอบอยู่ในที่ที่ไม่มีขั้วดังนั้น guest molecule ซึ่งมีขั้วน้อยกว่าจึงเข้าไปแทนที่โมเลกุลของน้ำทันทีทำให้เกิดสารเชิงซ้อนขึ้น สารเชิงซ้อนนี้

ค่อนข้างจะคงตัวแต่ละลายใน aqueous solution ได้น้อยกว่าไซโคลเด็กซ์ตริน สารเชิงซ้อนจึงตกตะกอนอยู่ในสารละลาย หลังจากนั้นจะแยกสารเชิงซ้อนออกโดยการกรอง

เทคนิคนี้สามารถใช้ผลิตไมโครแคปซูลของน้ำมันกระเทียมและหัวหอม วิตามินที่ละลายในไขมัน และกลีเซอรอล เป็นต้น (Dziezak, 1988; Shahidi and Han, 1993) ไมโครแคปซูลหรือสารเชิงซ้อนที่ได้มีลักษณะดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.18 สารประกอบที่เข้าไปอยู่ภายในช่องว่างที่อยู่ตรงกลางโมเลกุลของบีตาไซโคลเด็กซ์ตริน ที่มา : Qi และ Xu (1999)



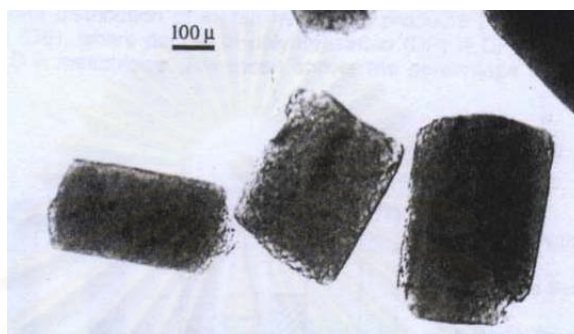
ภาพที่ 2.19 ไมโครแคปซูลหรือสารเชิงซ้อนของน้ำมันผิวส้มกับบีตาไซโคลเด็กซ์ตริน ที่มา : Qi และ Xu (1999)

8) การอัดรีด (extrusion)

การอัดรีดเป็นเทคนิคในการผลิตไมโครแคปซูลที่อุณหภูมิต่ำ หลักการของเทคนิคนี้คือการใช้ก๊าซไนโตรเจนขับเคลื่อน (force) วัสดุแกนที่กระจายตัวอยู่ในสารเคลือบซึ่งมีลักษณะเป็น molten carbohydrate mass ให้ผ่านหน้าแปลน (die) ออกมาในลักษณะที่เป็นเส้นใย (filament) เส้นใยดังกล่าวจะตกสู่ภาชนะซึ่งบรรจุของเหลวที่ดูดน้ำออก (dehydrating liquid) หลังจากนั้นสารเคลือบจะแข็งตัวหุ้มอนุภาคของวัสดุแกนเอาไว้ การคน (stirring) ที่เกิดขึ้นในภาชนะนี้จะทำให้เส้นใยหักเป็นแท่งขนาดเล็ก (ยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร) เมื่อแยกแท่งขนาดเล็กนี้ออกจาก

ภาพนี้จะนำไปบอบแห้งในสภาวะสุญญากาศต่อไป ไมโครแคปซูลที่ได้มีลักษณะดังภาพที่ 2.20

เทคนิคนี้สามารถใช้ผลิตไมโครแคปซูลของสารที่ระเหยง่ายเมื่อได้รับความร้อน เช่น กลิ่นรส วิตามินซี และสี (color) เป็นต้น (Dziezak, 1988; Shahidi and Han, 1993)



ภาพที่ 2.20 ไมโครแคปซูลของน้ำมันผิวส้มที่ผลิตโดยใช้เทคนิคการอัดรีด
ที่มา : Qi และ Xu (1999)

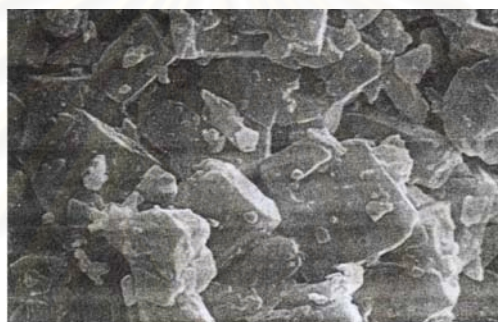
9) การตกผลึกร่วม (cocrystallization)

การตกผลึกร่วม เป็นการนำสารเคลือบที่จับกับสารให้กลิ่นรสไว้ภายในโครงสร้างสารเคลือบที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรม คือ น้ำตาลซูโครส (sucrose) ซึ่งนอกจากจะเป็นสารให้ความหวานแล้วยังใช้เพื่อปรับลักษณะเนื้อสัมผัส และถนอมอาหาร และใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการหมักของอาหาร สาเหตุที่ใช้ซูโครสเป็นสารเคลือบกลิ่นรสนี้เนื่องจากซูโครสมีราคาถูก ละลายได้เร็ว ให้สารละลายใส ทนต่อความร้อน ไม่ดูดความชื้น และมีอายุการเก็บยาวนาน (Chen, Veiga, and Rizzuto, 1988)

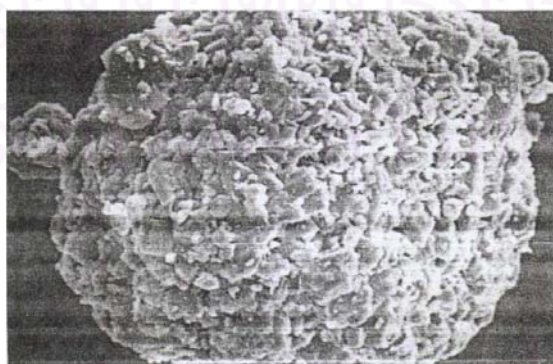
ซูโครสที่เป็นเม็ด (ภาพที่ 2.21) ประกอบด้วยผลึกทรงกลมที่เป็นโมโนคลินิก (monoclinic) ซึ่งแน่นแข็งทำให้มีพื้นที่จำกัดทำให้ซูโครสไม่เหมาะที่จะเป็นสารเคลือบของกลิ่นรส ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนโครงสร้างของซูโครสให้เป็นผลึกขนาดเล็ก (microsize) ที่ไม่สม่ำเสมอ และเกาะตัวรวมกันเป็นก้อน (ดังภาพที่ 2.22) เพื่อเพิ่มช่องว่าง (void space) และพื้นที่ผิว รวมทั้งสร้างรูพรุนเพื่อเก็บกลิ่นรสเอาไว้ภายในดังภาพที่ 2.23 (Chen et al., 1988; Shahidi and Han, 1993)



ภาพที่ 2.21 ผลึกของน้ำตาลซูโครสที่เป็นผลึกเดี่ยว
ที่มา : Chen และคณะ (1988)



ภาพที่ 2.22 ผลึกของน้ำตาลที่พบในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตกผลึกร่วม
ที่มา : Chen และคณะ (1988)



ภาพที่ 2.23 โครงสร้างที่มีรูพรุนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตกผลึกร่วม (กำลังขยาย 1,750 เท่า)
ที่มา : Chen และคณะ (1988)

การตกผลึกร่วมเป็นการตกผลึกด้วยตัวเอง (spontaneous crystallization) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของผลึกที่มีขนาดเล็ก (3-30 ไมโครเมตร) แล้วเก็บกัก (entrapment) สารอื่นเข้าไปอยู่ระหว่างผลึกของซูโครส

การตกผลึกร่วมสามารถใช้กับกลิ่นรสที่มีส่วนผสมชนิดเดียวหรือหลายชนิดรวมกันก็ได้ (Shahidi and Han, 1993)

10) การดักจับด้วยลิโพโซม (liposome entrapment)

การดักจับด้วยลิโพโซมเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถใช้ผลิตไมโครแคปซูล เทคนิคนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง และใช้สภาวะในการผลิตไม่รุนแรงจึงเหมาะที่จะใช้ในการขนส่งเอนไซม์ ยกตัวอย่างเช่นใช้ในการขนส่งเอนไซม์เพื่อใช้ในกระบวนการบ่มเนยแข็ง (Gibbs et al., 1999; Shahidi and Han, 1993)

11) การอบแห้งแบบเยือกแข็ง (freeze drying)

การอบแห้งแบบเยือกแข็ง หรือการอบแห้งแบบระเหิด เป็นเทคนิคที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลของสารที่ไวต่อความร้อน และสารให้กลิ่นรส ขั้นตอนของเทคนิคนี้ทำได้โดยเริ่มจากการเตรียมสารแขวนลอยหรืออิมัลชันของวัสดุแกนในสารละลายของสารเคลือบ แล้วจึงนำไปอบแห้งแบบเยือกแข็ง เทคนิคนี้ใช้ผลิตไมโครแคปซูลของสารให้กลิ่นรสได้เนื่องจากสภาวะในการผลิตไม่รุนแรงนัก (Desobry et al., 1997; Shahidi and Han, 1993)

12) การทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (cold dehydration process)

การทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำเป็นเทคนิคที่ปรับปรุงจากการอบแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อใช้กับสารที่ระเหยได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน (thermolabile substances) โดยให้วัสดุแกนกระจายอยู่ในสารเคลือบที่มีสมบัติเป็นของเหลวที่ดูดนํ้าออก เช่น เอทานอล หรือโพลีไกลคอล ที่อุณหภูมิต่ำ หรือต่ำกว่า หลังจากนั้นจึงกรองและอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำในสภาวะสุญญากาศ (Dziezak, 1988)

13) การอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum drying)

การอบแห้งแบบลูกกลิ้งเป็นเทคนิคที่สามารถใช้ผลิตไมโครแคปซูลได้ เทคนิคนี้ทำได้โดยเตรียมสารแขวนลอยหรืออิมัลชันของวัสดุแกนในสารละลายของสารเคลือบ แล้วจึงนำไปอบแห้ง การอบแห้งแบบระเหิดเป็นเทคนิคที่ใช้ในการผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนได้ (Desobry et al., 1997)

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของเทคนิคที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล

เทคนิค	ข้อดี	ข้อเสีย
การอบแห้งแบบพ่นฝอย	<ol style="list-style-type: none"> 1) เป็นเทคนิคที่รวดเร็ว 2) ต้นทุนการผลิตต่ำมาก 3) เครื่องมือหาง่าย 4) เป็นเทคนิคที่มีความยืดหยุ่น 5) สามารถรักษาวัสดุแกนที่ระเหยง่ายเมื่อได้รับความร้อน 	<ol style="list-style-type: none"> 1) สูญเสียกลิ่นรสที่มีจุดเดือดต่ำ 2) เกิดการแยกชั้นของส่วนผสมแห้งเนื่องจากไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กมาก (100 μm) 3) มีวัสดุแกนติดอยู่ที่ผิว 4) มีโพรงอากาศอยู่ภายในไมโครแคปซูล
การพ่นฝอยที่อุณหภูมิต่ำ (spray chilling)	<ol style="list-style-type: none"> 1) เป็นเทคนิคที่รวดเร็ว 2) ต้นทุนการผลิตต่ำมาก 	<ol style="list-style-type: none"> 1) ต้องรักษาอุณหภูมิของไมโครแคปซูลให้สูงกว่าจุดเดือดของสารเคลือบ
การอัดรีดหนีศูนย์กลาง	<ol style="list-style-type: none"> 1) ต้นทุนการผลิตต่ำ 2) สามารถควบคุมขนาดของไมโครแคปซูล ปริมาณของ วัสดุแกน และ อัตราการผลิตได้ 	<ol style="list-style-type: none"> 1) เกิด jet blockage
โคอะเซอร์เวชัน	<ol style="list-style-type: none"> 1) เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพ 2) ป้องกันการซึมผ่านของโมเลกุลที่ชอบน้ำได้เนื่องจากผนังของ ไมโครแคปซูลไม่ละลายน้ำ 	<ol style="list-style-type: none"> 1) ต้นทุนการผลิตสูง 2) ไมโครแคปซูลเกิดการรวมตัวกัน 3) หาสารเคลือบที่ใช้กับอาหารได้ยากเนื่องจากเทคนิคนี้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ
การเคลือบโดยการแขวนลอยในอากาศ	<ol style="list-style-type: none"> 1) ต้นทุนการผลิตต่ำ 2) เป็นเทคนิคที่มีความยืดหยุ่น 	<ol style="list-style-type: none"> 1) มีปัญหาในการเคลือบอนุภาคที่ละเอียด
การแยกโดยการหมุนสารแขวนลอย	<ol style="list-style-type: none"> 1) ต้นทุนการผลิตต่ำมาก 2) อัตราการผลิตสูง 3) ไมโครแคปซูลมีการกระจายของขนาดอนุภาคเหมือนกับวัสดุแกน 	<ol style="list-style-type: none"> 1) ความหนาของผนังไม่สม่ำเสมอเนื่องจากเทคนิคนี้อาศัยแรงตึงผิวดังนั้นถ้าวัสดุแกนมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม เช่น มีเหลี่ยม หรือมุมจะทำให้ส่วนที่เป็นเหลี่ยมหรือมุมมีผนังบางกว่าส่วนอื่น

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ข้อดีและข้อเสียของเทคนิคที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล

เทคนิค	ข้อดี	ข้อเสีย
อินคลูชันคอมเพล็กซ์	<ol style="list-style-type: none"> 1) เป็นการสร้างสารเชิงซ้อนแบบเลือกจับ (selective trapping) จึงทำให้เลือกจับเฉพาะสารที่ต้องการได้ 2) ทำให้มีผลคงตัว 3) กลบกลิ่นรสที่ไม่ต้องการ เช่น การใช้เทคนิคนี้เพื่อลดความขมของน้ำผลไม้ตระกูลส้ม 4) ควบคุมการปลดปล่อยกลิ่นรส 	<ol style="list-style-type: none"> 1) เป็นการสร้างสารเชิงซ้อนแบบเลือกจับ จึงทำอาจไม่จับกับสารที่ต้องการ 2) ต้นทุนการผลิตสูง 3) วัสดุแกนที่อยู่ในไมโครแคปซูลมีปริมาณต่ำ 4) ไมโครแคปซูลที่ได้จากเทคนิคนี้ละลายน้ำได้น้อยกว่าที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย 5) ขนาด และความมีขี้วของวัสดุแกนเป็นตัวกำหนดการสร้างสารเชิงซ้อน
การอัดรีด	<ol style="list-style-type: none"> 1) ใช้ได้กับวัสดุแกนที่ระเหยง่ายเมื่อได้รับความร้อน 2) ไมโครแคปซูลที่ผลิตขึ้นละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น 3) ไมโครแคปซูลมีอายุการเก็บยาวนาน เนื่องจากแอลกอฮอล์สามารถกำจัดวัสดุแกนซึ่งติดอยู่ที่ผิวของไมโครแคปซูลออกได้ 	
การอบแห้งแบบเยือกแข็ง	<ol style="list-style-type: none"> 1) เป็นเทคนิคที่ง่าย 2) สภาพะในการผลิตไม่รุนแรงจึงเหมาะที่จะใช้ผลิตไมโครแคปซูลของสารที่ระเหยง่าย 	<ol style="list-style-type: none"> 1) ต้นทุนการผลิตสูง 2) ผนังของไมโครแคปซูลมีรูพรุนทำให้ออกซิเจนซึมผ่านผนังได้ง่าย 3) เพื่อให้หน้าไมโครแคปซูลไปใช้ได้ง่ายขึ้นอาจต้องนำของแห้งไปบดซึ่งเป็นการทำลายผนัง 4) ใช้เวลานาน
การอบแห้งแบบลูกกลิ้ง	<ol style="list-style-type: none"> 1) ต้นทุนการผลิตต่ำ 2) ไมโครแคปซูลที่ได้มีผนังหนาแน่นจึงช่วยลดการซึมผ่านของออกซิเจนได้ 	<ol style="list-style-type: none"> 1) ใช้อุณหภูมิสูง 2) เพื่อให้หน้าไมโครแคปซูลไปใช้ได้ง่ายขึ้นอาจต้องนำของแห้งไปบดซึ่งเป็นการทำลายผนัง

ที่มา : ดัดแปลงจาก Desobry และคณะ (1997); Dziezak (1988); Shahidi และ Han (1993); Sparks และ Jacobs (1999); Sparks และคณะ (1993)

2.1.4 การควบคุมการปลดปล่อย

การควบคุมการปลดปล่อย เป็นการทำให้สารออกฤทธิ์ชนิดเดียวหรือมากกว่าหนึ่งชนิดปลดปล่อยออกมาในตำแหน่ง (site) และเวลาที่ต้องการในอัตราที่แน่นอน ทำให้สามารถนำส่วนผสมของอาหารที่มีความไวต่อความร้อน อุณหภูมิ หรือ pH ในรูปของไมโครแคปซูลไปใช้ได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ (Pothakamury and Barbosa-Canovas, 1995)

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการปลดปล่อยวัสดุแกนมีอยู่ด้วยกัน 3 ปัจจัยหลัก ๆ ดังนี้ ปัจจัยแรกคือ สมบัติของสารเคลือบ ได้แก่ ความหนาแน่น crystallinity การละลาย orientation ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ cross-linking และ pretreatments ปัจจัยที่สองคือ สมบัติของแคปซูล ได้แก่ ขนาด configuration ความหนาของผนัง conformity ชั้นในการเคลือบ และ post-treatment และปัจจัยสุดท้ายคือภาวะที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ pH ความชื้น ตัวทำละลาย แรงกระทำทางกล และผลต่างของความดันระหว่างผนังด้านในกับด้านนอกของแคปซูล (Shahidi and Han, 1993)

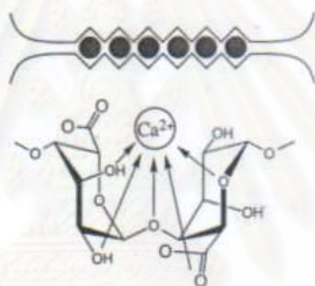
กลไกในการปลดปล่อย (release mechanism) ที่ใช้กับไมโครแคปซูล ได้แก่ การทำให้แตก การสลายตัวทางชีวภาพ การละลาย การหลอม และการแพร่ (Shahidi and Han, 1993)

2.1.5 ประโยชน์ของการผลิตไมโครแคปซูล

การผลิตไมโครแคปซูลเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมอาหารหลายประการ เช่น ป้องกันส่วนผสมที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย เช่น จากออกซิเจน แสง และความชื้น จึงทำให้ส่วนผสมดังกล่าวมีอายุการเก็บยาวนานขึ้น ป้องกันการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ แยกส่วนผสมที่สามารถทำปฏิกิริยากันได้ออกจากกัน จึงช่วยป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาก่อนเวลาที่ต้องการ กลบกลิ่นรสของวัสดุแกน ควบคุมการปลดปล่อย ช่วยให้เก็บรักษาและขนส่งส่วนผสมได้ง่ายขึ้น ช่วยลดขั้นตอนการผลิต (Dziezak, 1988; Shahidi and Han, 1993) ด้วยประโยชน์ต่าง ๆ เหล่านี้เองทำให้ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอาหารนำเทคโนโลยีการผลิตไมโครแคปซูลมาใช้มากขึ้น

2.2 โซเดียมอัลจิเนต

โซเดียมอัลจิเนต หรือ อัลจิน (alginate) เป็นกัมชนิดหนึ่งที่เป็นเกลือโซเดียมของกรดอัลจินิคซึ่งได้มาจากสาหร่ายสีน้ำตาล (BeMiller and Whistler, 1996) มีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_7O_6Na)_n$ ละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน สร้างเจลกับเกลือแคลเซียมซึ่งมีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (egg-box model) ดังรูปที่ 2.24 ใช้เป็นสารที่ให้ความข้นหนืด สารเชื่อม และสารที่ทำให้เกิดเจล ใช้ในอาหารหวานที่เป็นเจล พุดดิ้ง ซอส topping และใช้เป็นฟิล์มที่บริโภคได้ (Igoe, 1989) นอกจากนี้โซเดียมอัลจิเนตยังเป็นสารเคลือบที่ใช้ในการผลิตไมโครแคปซูล (Brazel, 1999; Jackson and Lee, 1991; King, 1995; Kondo, 1979; Shahidi and Han, 1993) ซึ่งนิยมใช้ในการผลิตไมโครแคปซูลโดยวิธีออร์ฟิช หรืออาจใช้โซเดียมอัลจิเนตซึ่งเป็นคอลลอยด์ที่มีประจุลบร่วมกับเจลาตินสำหรับเป็นสารเคลือบในกระบวนการโคอะเซอร์เวชัน (Kondo, 1979)

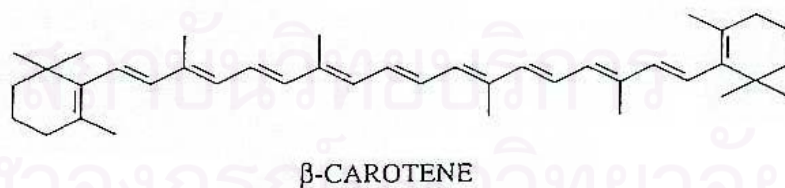


ภาพที่ 2.24 การเชื่อมต่อกันของ divalent cation กับอัลจิเนตซึ่งมีลักษณะคล้ายกล่องไข่
ที่มา : Moe และคณะ (1995); Smidsrød และ Draget (1996)

2.3 บีตาแคโรทีน

2.3.1 บีตาแคโรทีน

บีตาแคโรทีน (ภาพที่ 2.25) เป็นแคโรทีนอยด์ที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอน (Tee, 1992) มีสูตรเคมีเป็น $C_{40}H_{56}$ ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายในไขมัน ให้สีเหลืองอ่อน-ส้มในสารละลายน้ำมัน (Alexander, 1973; Bauernfeind, 1981) ดังตารางที่ 2.2 เป็นโปรวิตามินเอ (provitamin A) และพบได้ทั่วไปในธรรมชาติโดยเฉพาะในผักและผลไม้ (Chen, Peng and Chen, 1995) *all-trans-β-carotene* สามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ถึง 100 % และในผักและผลไม้มีบีตาแคโรทีนสูงถึง 80 % ของวิตามินเอ นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าบีตาแคโรทีนเป็นสารต้านมะเร็ง และเป็นสารกันเหี่ยวธรรมชาติ (Bendich and Olson, 1989; Halter, 1989; Ziegler, 1989) ดังนั้นผู้บริโภคจึงมีความสนใจบีตาแคโรทีนมากขึ้น (Sims, Balaban and Matthews, 1993) แต่เนื่องจากบีตาแคโรทีนเป็นสารที่ไม่คงตัวจึงมักจะมีการเปลี่ยนแปลงไอโซเมอร์จาก *trans-form* เป็น *cis-form* ซึ่งทำให้สามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ลดลงจาก 100% เป็น 38% และเกิดออกซิเดชันได้ง่ายในระหว่างการเก็บรักษาและการแปรรูป (Macrae, Robinson and Sadler, 1993) ดังภาพที่ 2.26 Wagner และ Warthesen (1995) ทดลองนำน้ำแครอทมาอบแห้งแบบพ่นฝอยแล้ว พบว่าบีตาแคโรทีนในน้ำแครอทอบแห้งมีค่าครึ่งชีวิต (half-life) เพียง 2 – 3 วัน (เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 21 °C) ดังนั้นจึงต้องหาวิธีเพิ่มความคงตัวของบีตาแคโรทีน การผลิตไมโครแคปซูลเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้เพิ่มความคงตัวของบีตาแคโรทีนได้ (Desobry et al., 1997; Wagner and Warthesen, 1995)



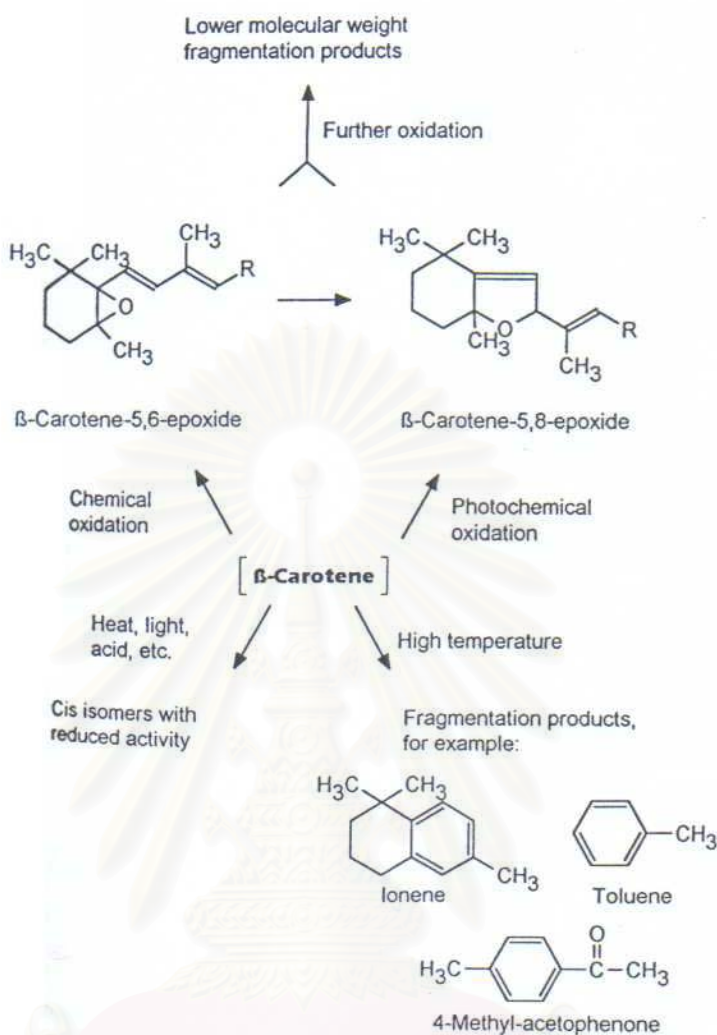
ภาพที่ 2.25 โครงสร้างโมเลกุลของบีตาแคโรทีน

ที่มา : Gregory (1996)

ตารางที่ 2.2 สมบัติของปีตาแคโรทีน

สมบัติ	ปีตาแคโรทีน
1. สูตรเคมี	$C_{40}H_{56}$
2. น้ำหนักโมเลกุล	536.89
3. จุดหลอมเหลว	176 - 182 °C
4. รูปแบบที่นำไปใช้	ผลึกหรือผง ในทางการค้า อาจอยู่ในรูปของสารละลายในน้ำมัน ไขมัน หรือตัวทำละลายอินทรีย์ หรืออยู่ในรูปของผงหรือเม็ด (granule) ที่แขวนลอยในน้ำ
5. สี	
- ผลึก	ม่วง - แดง
- สารละลายน้ำมัน	เหลืองอ่อน - ส้ม
- สารแขวนลอยในน้ำ	เหลือง - ส้ม
6. การละลาย (กรัม/100มิลลิลิตรของสารละลายที่ 20 °C)	
- ไขมัน , น้ำมัน	0.05 – 1.0
- น้ำ	ไม่ละลาย

ที่มา : Alexander (1973); Bauernfeind, (1981)



ภาพที่ 2.26 การสลายตัวของบีตาแคโรทีน

ที่มา : Gregory (1996)

2.3.2 การผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน

การผลิตไมโครแคปซูลเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการเพิ่มความคงตัวของบีตาแคโรทีนได้ โดยนำน้ำแครอทมาผลิตไมโครแคปซูลด้วยการอบแห้งแบบพ่นฝอยซึ่งใช้ไฮโดรไลซ์สตาร์ชที่มีค่า dextrose equivalent (DE) แตกต่างกันเป็นสารเคลือบ พบว่าการผลิตไมโครแคปซูลโดยใช้ไฮโดรไลซ์สตาร์ช 36.5 DE เป็นสารเคลือบนั้นสามารถเพิ่มค่าครึ่งชีวิตของบีตาแคโรทีนจาก 2-3 วัน เป็น 450 วัน เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 21 °C (Wagner and Warthensen, 1995) นอกจากนี้จะสามารถใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยแล้วยังสามารถใช้เทคนิคการอบแห้ง

แบบระเหิดและแบบลูกกลิ้งในการนำบีตาแคโรทีนมาผลิตไมโครแคปซูลได้อีกด้วย เมื่อเปรียบเทียบความคงตัวของบีตาแคโรทีนที่เคลือบหุ้มไว้ในมอลโตเดกซ์ทริน (25 DE) โดยใช้การอบแห้งแบบพ่นฝอย แบบระเหิด และแบบลูกกลิ้งแล้ว พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่อความคงตัวของมีนัยสำคัญ โดยที่ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดตามปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (first order reaction) นอกจากนี้ยังพบอีกว่าถึงแม้การอบแห้งแบบลูกกลิ้งจะเป็นสาเหตุของการสูญเสียบีตาแคโรทีนในระหว่างการอบแห้งมากที่สุดก็ตาม แต่เป็นกระบวนการซึ่งทำให้เกิดการเคลือบหุ้มที่สมบูรณ์ที่สุดและทำให้บีตาแคโรทีนมีความคงตัวมากที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ โดยมีค่าครึ่งชีวิต 24 สัปดาห์ (เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 25°C ความชื้นสัมพัทธ์ 32%) เนื่องจากบีตาแคโรทีนมีอายุการเก็บรักษาสั้น (ถึงแม้จะผลิตเป็นไมโครแคปซูลแล้วก็ตาม) จึงเป็นปัญหาในการเติมลงในอาหาร บางบริษัทจึงอาจพัฒนาการผลิตไมโครแคปซูลให้สามารถรักษาความคงตัวของบีตาแคโรทีนได้ดียิ่งขึ้นแต่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงขึ้นด้วย (Desobry et al., 1997)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การทดลอง

วัตถุประสงค์

น้ำมันรำข้าว ตราคิง (บริษัทน้ำมันบริโภคไทย จำกัด)

สารเคมี

all-*trans*- β -carotene (A.R. grade)

โซเดียมอัลจิเนต (A.R. grade)

แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) (Food grade)

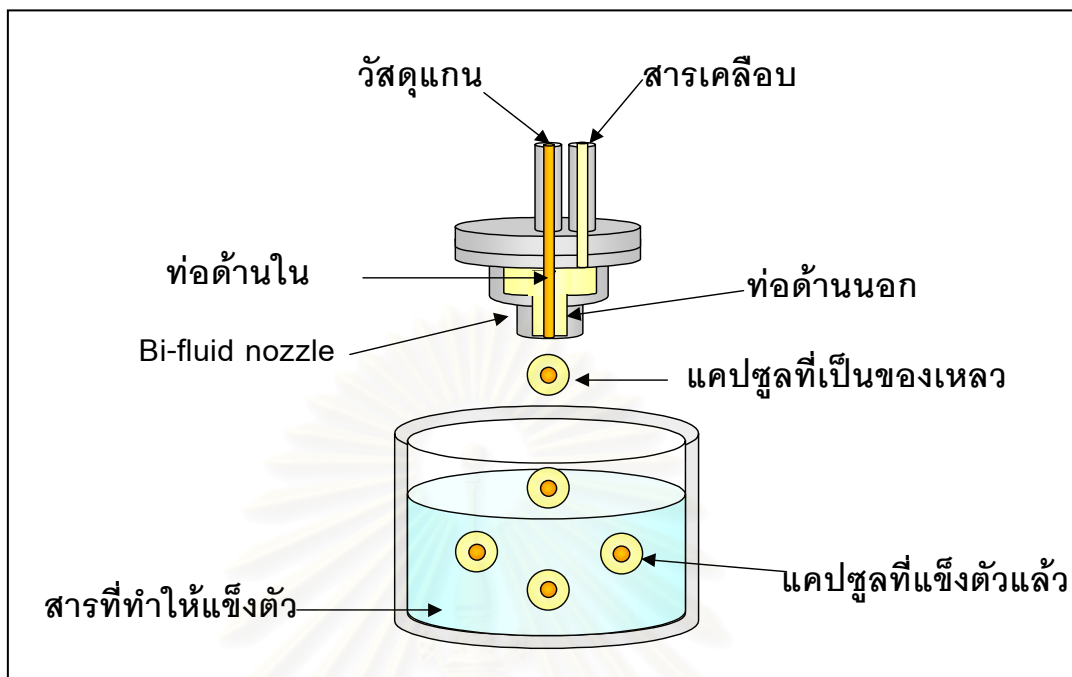
ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การสร้างเครื่องมือสำหรับผลิตไมโครแคปซูล

3.1.1 การสร้างเครื่องมือต้นแบบ

เครื่องมือต้นแบบที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการของ bi-fluid nozzle (ภาพที่ 3.1) ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อสองท่อที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันโดยที่ท่อด้านในจะมีวัสดุแกนไหลผ่าน ในขณะที่ท่อด้านนอก จะมีสารเคลือบ ไหลผ่านแล้วสร้างเป็นไมโครแคปซูลขึ้นที่ปลายของท่อทั้งสองนี้ และเมื่อไมโครแคปซูลตกสู่ภาชนะรองรับที่บรรจุสารที่ทำให้แข็งตัว (hardening agent) ไมโครแคปซูลจะแข็งตัวทันที

bi-fluid nozzle ที่สร้างขึ้น (ภาพที่ 3.2) จะประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนต่าง ๆ ดังภาพที่ 3.3 เพื่อให้ทำความสะอาดได้สะดวก สำหรับท่อด้านในจะใช้เข็มฉีดยา 23Gx1½" ซึ่งนำมาตัดปลายให้ตรง มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.35 มิลลิเมตร (วิธีวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแสดงไว้ในภาคผนวก ก.1) และมีความยาวเท่ากับท่อด้านนอกของ bi-fluid nozzle (ภาพที่ 3.4) โดยที่ท่อด้านนอกของ bi-fluid nozzle มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.10 มิลลิเมตร (วิธีวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแสดงไว้ในภาคผนวก ก.1)



ภาพที่ 3.1 หลักการของ bi-fluid nozzle



ภาพที่ 3.2 bi-fluid nozzle ที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 3.3 ส่วนประกอบของ bi-fluid nozzle



ภาพที่ 3.4 เข็มฉีดยาที่ใช้เป็นท่อด้านในของ bi-fluid nozzle

นอกจาก bi-fluid nozzle แล้วเครื่องมือต้นแบบที่สร้างขึ้นยังประกอบด้วยส่วนประกอบอื่น ๆ อีกได้แก่ ถังเก็บวัสดุแกน ถังเก็บสารเคลือบ ถังก๊าซไนโตรเจนเพื่อทำให้วัสดุแกนและสารเคลือบไหล และ needle valve ซึ่งถังเก็บวัสดุแกนและถังเก็บสารเคลือบมีลักษณะเหมือนกันคือเป็นถังเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกซึ่งมีฝาปิดสนิท (ภาพที่ 3.5) สำหรับถังก๊าซไนโตรเจนนั้นจะใช้เพื่อให้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวที่ให้แรงดันแก่วัสดุแกนและสารเคลือบ (ภาพที่ 3.6) ส่วน needle valve ของวัสดุแกน (ภาพที่ 3.7) และสารเคลือบนั้นก็มีลักษณะเหมือนกันซึ่งใช้เพื่อปรับอัตราการไหลให้เหมาะสมกับการผลิตไมโครแคปซูล โดยต่อเครื่องมือดังภาพที่ 3.8



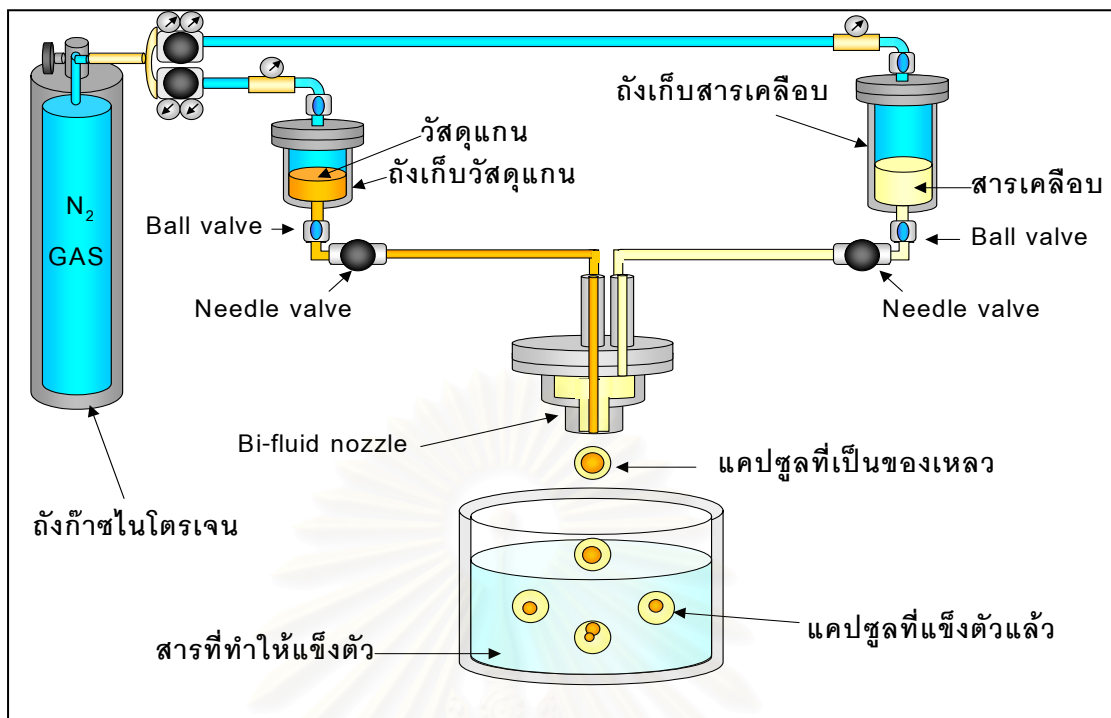
ภาพที่ 3.5 ถังเก็บวัสดุแกน



ภาพที่ 3.6 ถังก๊าซไนโตรเจนซึ่งต่อเข้ากับ regulator valve



ภาพที่ 3.7 needle valve ของวัสดุแกน



ภาพที่ 3.8 รูปจำลองของเครื่องมือต้นแบบ

ทดสอบผลการควบคุมอัตราการไหลของสารเคลือบโดยเครื่องมือต้นแบบ โดยนำสารละลายโซเดียมอัลจิเนตที่มีความเข้มข้น 1.50 % (โดยน้ำหนัก) ในปริมาณ 200, 300 และ 400 กรัม มาใส่ลงในถังเก็บสารเคลือบแล้วต่ออุปกรณ์ดังภาพที่ 3.8 (โดยไม่ต้องใส่วัสดุแกนลงไป) เปิด needle valve 7/80 รอบ และเปิดก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 1.50 บาร์แล้วเปิดวาล์ว (ball valve) ที่อยู่ใต้ถังเก็บสารเคลือบทำให้สารเคลือบไหลออกมาผ่าน needle valve และท่อด้านนอกของ bi-fluid nozzle แล้วหาอัตราการไหลของสารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาที) ที่เวลาต่าง ๆ ซึ่งวิธีการหาอัตราการไหลของสารเคลือบแสดงไว้ในภาคผนวก ก.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.2 การปรับปรุงเครื่องมือ

การสร้างเครื่องมือในขั้นนี้ทำขึ้นเพื่อควบคุมอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบได้ดียิ่งขึ้นจึงเพิ่ม flow meter ของวัสดุแกน (ภาพที่ 3.9) และสารเคลือบ (ภาพที่ 3.10) เข้าไปในเครื่องมือต้นแบบ ดังนั้นเครื่องมือที่ปรับปรุงขึ้น (ภาพที่ 3.11) นี้จะประกอบด้วย bi-fluid nozzle ถังเก็บวัสดุแกน ถังเก็บสารเคลือบ ถังก๊าซไนโตรเจนซึ่งก๊าซไนโตรเจนจะเป็นตัวที่ให้แรงดันเพื่อทำให้วัสดุแกนและสารเคลือบไหล needle valve และ flow meter

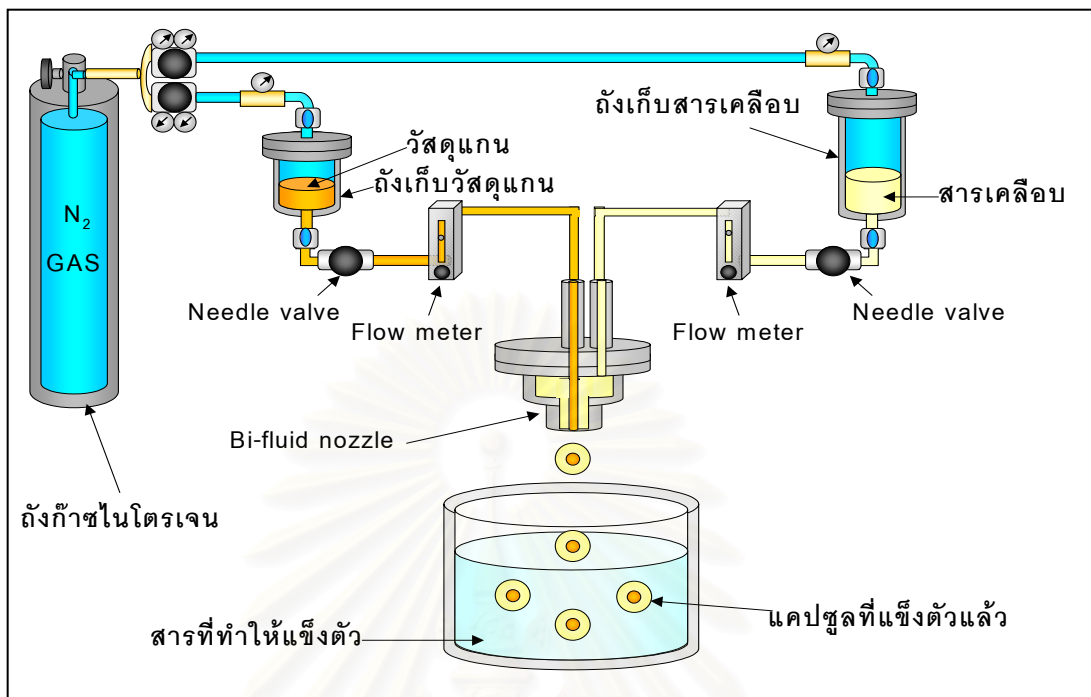
flow meter ของวัสดุแกนและสารเคลือบนี้เป็น flow meter ที่ใช้น้ำซึ่งมีช่วงของอัตราการไหลที่วัดได้เป็น 0 – 5.0 ลิตร/ชั่วโมง และ 0 – 80 ลิตร/ชั่วโมง ตามลำดับ



ภาพที่ 3.9 flow meter ของวัสดุแกน



ภาพที่ 3.10 flow meter ของสารเคลือบ



ภาพที่ 3.11 รูปจำลองของเครื่องมือที่ปรับปรุงขึ้น

ศึกษาผลการควบคุมอัตราการไหลของสารเคลือบโดยเครื่องมือที่ปรับปรุงขึ้น โดยทดสอบผลของเครื่องมือที่ปรับปรุงขึ้นที่มีต่ออัตราการไหลของสารเคลือบ โดยนำสารละลายไซเดียมอัลจิเนตที่มีความเข้มข้น 1.50 % ในปริมาณ 500 กรัมมาใส่ลงในถังเก็บสารเคลือบแล้วต่ออุปกรณ์ดังภาพที่ 3.11 (โดยไม่ต้องใส่วัสดุแกนลงไปถังเก็บวัสดุแกน) และเปิดก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 1.50 บาร์ไว้ 5 นาที จึงเปิดวาล์ว (ball valve) ที่อยู่ใต้ถังเก็บ สารเคลือบทำให้สารเคลือบไหลออกมาผ่าน needle valve และท่อด้านนอกของ bi-fluid nozzle แล้วหาอัตราการไหลของสารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาที) ที่เวลาต่าง ๆ เปรียบเทียบผลกับอัตราการไหลที่เวลาต่าง ๆ ของสารเคลือบผ่านเครื่องมือต้นแบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 การผลิตไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน

ผลิตไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนจากเครื่องมือที่ปรับปรุงขึ้นในข้อ 3.1.2 (ภาพที่ 3.12) โดยใช้สารละลายของปีตาแคโรทีนในน้ำมันรำข้าวซึ่งมีความเข้มข้น 0.25 % (โดยน้ำหนัก) เป็นวัสดุแกน ใช้สารละลายไซเดียมอัลจิเนตที่มีความเข้มข้น 1.5 % (โดยน้ำหนัก) เป็นสารเคลือบ ใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 5.0 % (โดยน้ำหนัก) เป็นสารที่ทำให้แข็งตัว และใช้ขั้นตอนการผลิตไมโครแคปซูลดังภาพที่ 3.13 แปรปัจจัย 2 ปัจจัย คือ อัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบ โดยแปรค่าที่อ่านได้จาก flow meter ของวัสดุแกนเป็น 1.5 และ 2.5 ลิตร/ชั่วโมง และ สารเคลือบเป็น 50, 60 และ 70 ลิตร/ชั่วโมง ซึ่งมีอัตราการไหลดังตารางที่ 3.1 (วิธีการหาอัตราการไหลของสารเคลือบและวัสดุแกนแสดงไว้ในภาคผนวก ก.2 และ ก.3 ตามลำดับ) โดยที่แต่ละสภาวะมีสัดส่วนของวัสดุแกน (core load) ดังตารางที่ 3.2 (วิธีคำนวณสัดส่วนของวัสดุแกนแสดงไว้ในภาคผนวก ก.4)



ภาพที่ 3.12 เครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน

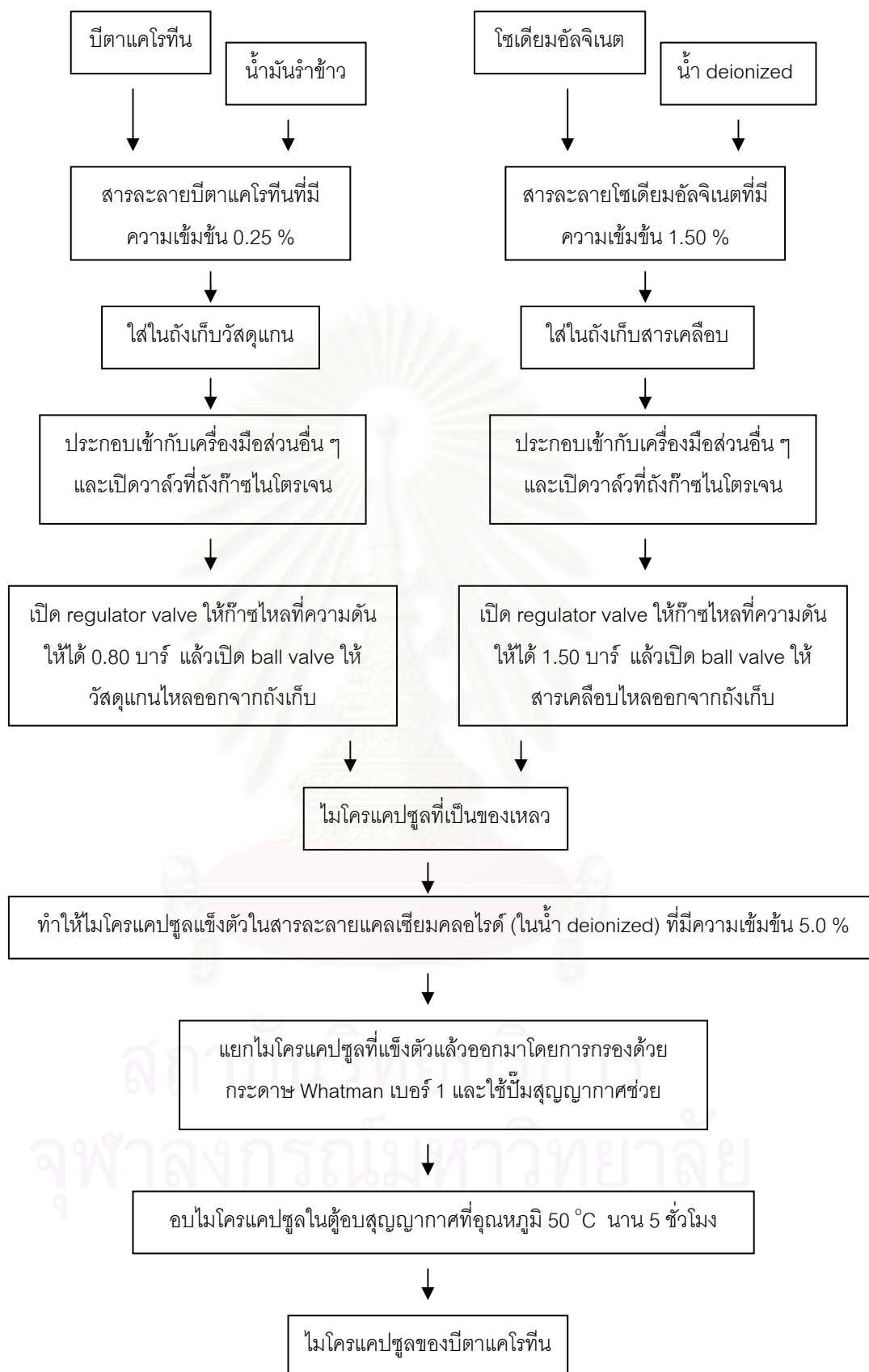
ตารางที่ 3.1 ค่าที่อ่านได้จาก flow meter และอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบ

สาร	ค่าที่อ่านได้จาก flow meter (ลิตร/ชั่วโมง)	อัตราการไหล	
		(กรัม/นาที่)	(มิลลิลิตร/นาที่)
วัสดุแกน	1.5	0.51	0.57
	2.5	0.78	0.87
สารเคลือบ	50	6.82	7.11
	60	9.67	10.03
	70	13.91	14.51

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของวัสดุแกนในไมโครแคปซูล

อัตราการไหล ของสารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาที่)	สัดส่วนของวัสดุแกน (%)	
	ที่อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาที่)	
	0.57	0.87
7.11	6.96	10.26
10.03	5.01	6.95
14.51	3.54	5.31

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 3.13 ขั้นตอนการผลิตไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน

นำไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนก่อนและหลังอบมาวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 3.2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและพื้นผิวของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน ดัดแปลงจาก Rosenberg และคณะ (1985) ดังภาคผนวก ก.5
- 3.2.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคและขนาดของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนก่อนอบ (ภาคผนวก ก.6 และ ก.7)
- 3.2.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคของวัสดุแกนในไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนก่อนอบ (ภาคผนวก ก.6 และ ก.7)
- 3.2.4 การกระจายตัวของความหนาและความหนาของผนังไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนก่อนอบ (ภาคผนวก ก.6 และ ก.7)
- 3.2.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคและขนาดของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนหลังอบ (ภาคผนวก ก.6 และ ก.7)
- 3.2.6 ค่า a^* และ b^* ของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน ดัดแปลงจาก Desobry และคณะ (1997) ดังภาคผนวก ก.8
- 3.2.7 ความชื้นของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน ดัดแปลงจาก AOAC (1995) Method 925.10 ดังภาคผนวก ก.9
- 3.2.8 อัตราการผลิตของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน
 - 3.2.8.1 จำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ ซึ่งหาจากการนับจำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ใน 1 นาที (ภาคผนวก ก.10)
 - 3.2.8.2 ปริมาณไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ ซึ่งหาจากการชั่งน้ำหนักไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ใน 1 นาที (ภาคผนวก ก.10)
- 3.2.9 น้ำหนักของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน (ภาคผนวก ก.11)
- 3.2.10 ค่า hardness ของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน โดยการวัดด้วยเครื่อง Texture analyser (ภาคผนวก ก.12)

วางแผนการทดลองแบบ Asymmetric Factorial Design ขนาด 2 x 3 ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (Cochran and Cox, 1957)

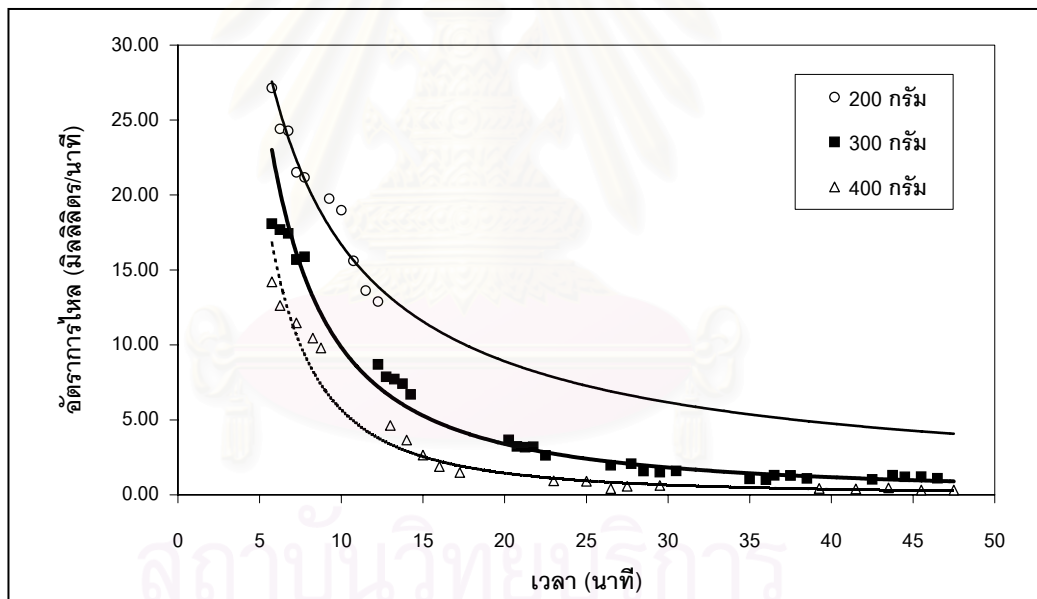
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์

4.1 ผลของการสร้างเครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล

4.1.1 ผลการควบคุมอัตราการไหลของสารเคลือบโดยเครื่องมือต้นแบบ

เครื่องมือต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้ประกอบด้วย bi-fluid nozzle ถังเก็บวัสดุแกน ถังเก็บสารเคลือบ ถังก๊าซไนโตรเจน และ needle valve ของวัสดุแกนและสารเคลือบ เมื่อนำสารละลายไซเตียมอัลจิเนตที่มีความเข้มข้น 1.50 % (โดยน้ำหนัก) ในปริมาณ 200, 300 และ 400 กรัม มาใส่ในเครื่องมือที่สร้างขึ้นและหาอัตราการไหลแล้วพบว่าอัตราการไหลของสารละลายไซเตียมอัลจิเนต 1.50 % ในปริมาณต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กับเวลาดังภาพที่ 4.1

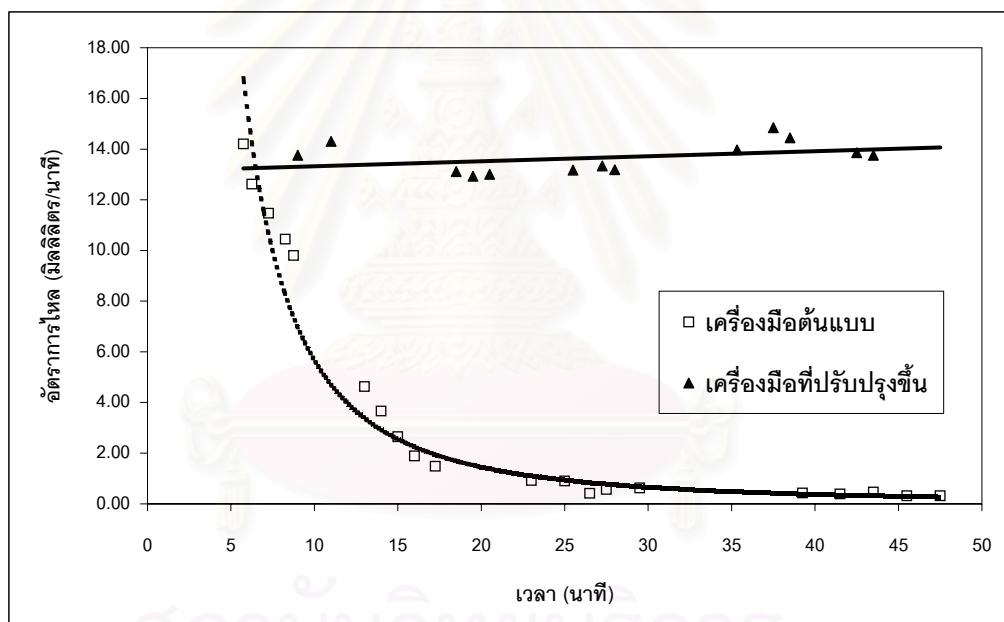


ภาพที่ 4.1 ผลการควบคุมอัตราการไหลของสารเคลือบโดยเครื่องมือต้นแบบ เมื่อใช้สารละลายไซเตียมอัลจิเนต 1.50 % ในปริมาณต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สารละลายไซเตียมอัลจิเนตเพียง 200 กรัมจะทำให้อัตราการไหลไม่คงที่แต่สารละลายจะไหลหมดในเวลาไม่ถึง 10 นาที แต่เมื่อใช้สารละลายในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเป็น 300 และ 400 กรัมจะทำให้อัตราการไหลลดลงต่ำกว่ามากจนไม่ไหลเลยซึ่งส่งผลให้ใช้เวลาในการไหลนานมากซึ่งเป็นปัญหาในการผลิตปริมาณมาก ๆ ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงเครื่องมือต่อไปเพื่อให้ควบคุมอัตราการไหลได้ดีกว่านี้

4.1.2 ผลการควบคุมอัตราการไหลของสารละลายโดยเครื่องมือที่ปรับปรุงขึ้น

ในการผลิตไมโครแคปซูลโดยเทคนิคการอัตริตร่วม หรือวิธีออร์พิชนั้นอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อ อัตราการผลิต ขนาดของไมโครแคปซูล ค่าสัดส่วนของวัสดุแกน และความหนาของผนังซึ่งจะส่งผลถึงการควบคุมการปลดปล่อยด้วย ดังนั้นจึงต้องการควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ (Franjione and Vasishtha, 1995; Schlameus, 1995) แต่เนื่องจากเครื่องมือต้นแบบ ยังไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้คงที่ ดังนั้นจึงปรับปรุงเครื่องมือโดยติดตั้ง flow meter ของวัสดุแกนและสารเคลือบขึ้นมา เพื่อให้ควบคุมอัตราการไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เปรียบเทียบอัตราการไหลของสารละลายไซเดียมอัลจิเนต 1.50 % จากเครื่องมือที่ได้ติดตั้ง flow meter ในขั้นนี้กับเครื่องมือต้นแบบ แล้วพบว่ามีความสัมพันธ์ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ผลการควบคุมอัตราการไหลของสารเคลือบโดยเครื่องมือที่ปรับปรุงขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือต้นแบบ

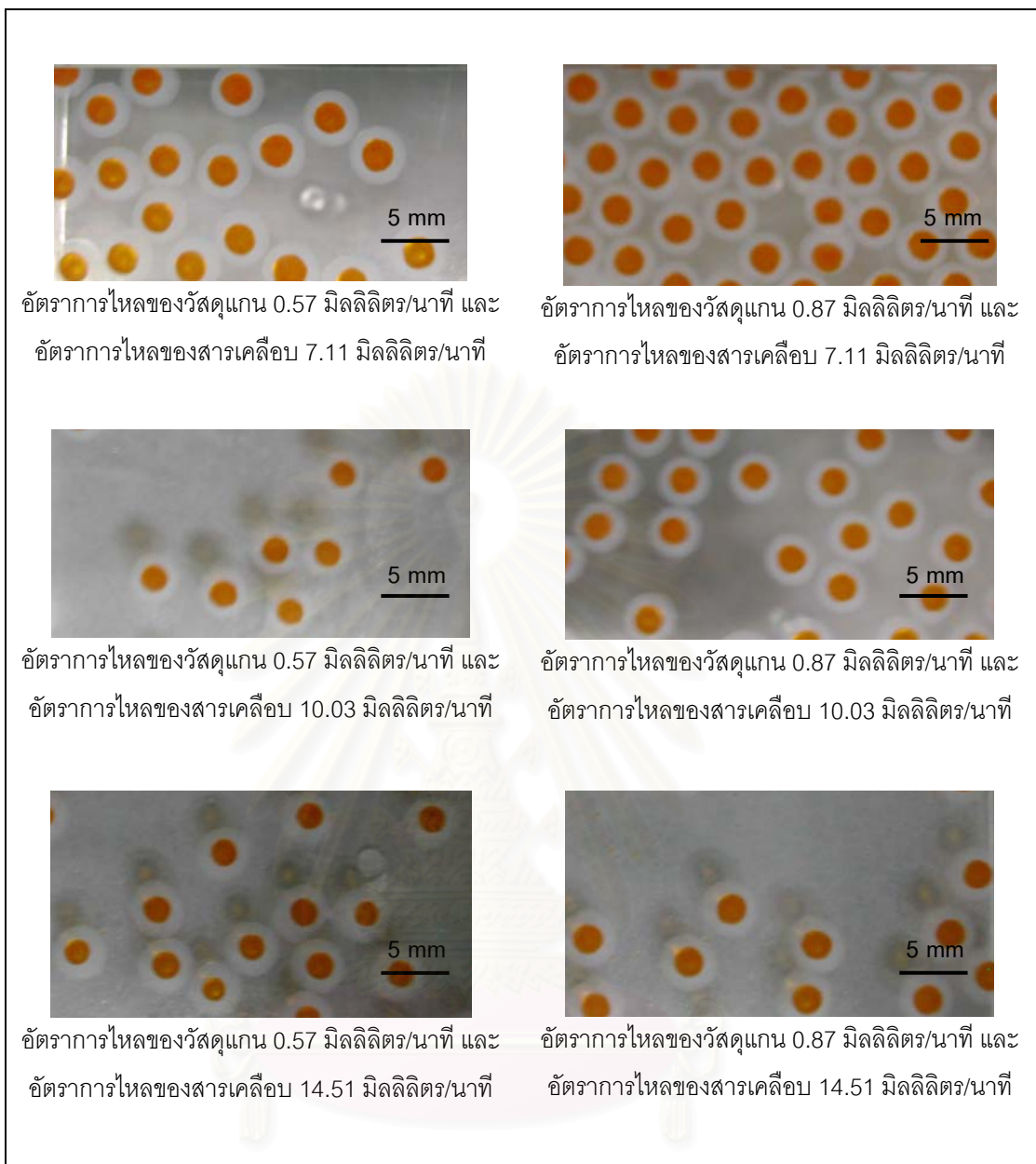
จากภาพที่ 4.2 พบว่าเครื่องมือที่ปรับปรุงขึ้น สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ค่อนข้างคงที่กว่าเครื่องมือต้นแบบ เนื่องมาจากเครื่องมือที่ปรับปรุงขึ้นมี flow meter เพิ่มขึ้นมาซึ่งทำให้ปรับอัตราการไหลให้คงที่ตามที่กำหนดไว้ได้ ดังนั้นจึงใช้เครื่องมือที่ปรับปรุงขึ้นนี้ผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนในขั้นต่อไป

4.2 ผลของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบที่มีต่อไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน

การผลิตไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนด้วยเครื่องมือที่ปรับปรุงขึ้นตามข้อ 4.1.2 ทำได้โดยใช้สารละลายปีตาแคโรทีนในน้ำมันรำข้าวที่มีความเข้มข้น 0.25 % เป็นวัสดุแกน ใช้สารละลายโซเดียมอัลจิเนต 1.50 % เป็นสารเคลือบ และใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 5.0 % เป็นสารที่ทำให้แข็งตัว เมื่อไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนแข็งตัวแล้วจึงนำไปกรองและอบตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 °C นาน 5 ชั่วโมง ศึกษาอิทธิพลของปัจจัย 2 ปัจจัย คือ อัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบที่มีต่อลักษณะต่าง ๆ ของไมโครแคปซูล ดังต่อไปนี้

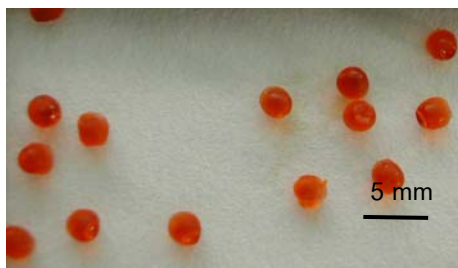
4.2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและพื้นผิวของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน

จากการศึกษาผลของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบที่มีต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่าไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ก่อนอบ (ภาพที่ 4.3) และหลังอบ (ภาพที่ 4.4) ในทุกสภาวะมีลักษณะเป็นทรงกลมเนื่องจากไมโครแคปซูลที่มีวัสดุแกนเป็นของเหลวจะมีรูปร่างทรงกลม (Finch, 1993; Kondo, 1979) นอกจากนี้ยังเห็นได้ชัดเจนว่าไมโครแคปซูลก่อนอบ (ภาพที่ 4.3) มีอนุภาคของวัสดุแกนเพียงหนึ่งอนุภาคอยู่ในฟิล์มของสารเคลือบซึ่งทำหน้าที่เป็นผนังของไมโครแคปซูล ซึ่งเป็นลักษณะของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้จากวิธีอิมัลชันด้วยเครื่องมือที่อาศัยหลักการของ bi-fluid nozzle (Brazel, 1999; Sparks and Jacobs, 1999)



ภาพที่ 4.3 ไมโครแคปซูลก่อนอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



อัตราการไหลของวัสดุแกน 0.57 มิลลิลิตร/นาที่ และ
อัตราการไหลของสารเคลือบ 7.11 มิลลิลิตร/นาที่



อัตราการไหลของวัสดุแกน 0.87 มิลลิลิตร/นาที่ และ
อัตราการไหลของสารเคลือบ 14.51 มิลลิลิตร/นาที่



อัตราการไหลของวัสดุแกน 0.57 มิลลิลิตร/นาที่ และ
อัตราการไหลของสารเคลือบ 10.03 มิลลิลิตร/นาที่



อัตราการไหลของวัสดุแกน 0.87 มิลลิลิตร/นาที่ และ
อัตราการไหลของสารเคลือบ 10.03 มิลลิลิตร/นาที่



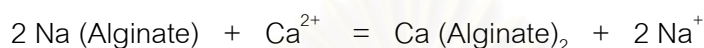
อัตราการไหลของวัสดุแกน 0.57 มิลลิลิตร/นาที่ และ
อัตราการไหลของสารเคลือบ 14.51 มิลลิลิตร/นาที่



อัตราการไหลของวัสดุแกน 0.87 มิลลิลิตร/นาที่ และ
อัตราการไหลของสารเคลือบ 14.51 มิลลิลิตร/นาที่

ภาพที่ 4.4 ไมโครแคปซูลหลังอบ

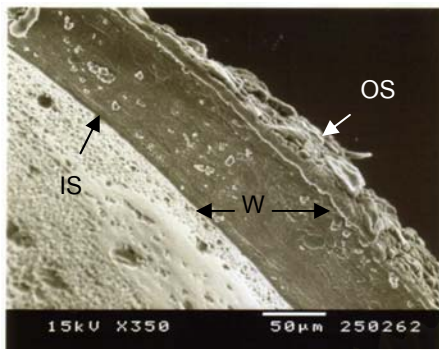
จากผลทางด้านสัณฐานวิทยาพบว่าไมโครแคปซูลมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยมีอนุภาคของวัสดุแกนเพียงอนุภาคเดียวซึ่งห่อหุ้มเอาไว้ด้วยฟิล์มของสารเคลือบ (ภาพที่ 4.3 และ 4.5) ดังนั้นลักษณะพื้นผิวภายนอกและภายในของไมโครแคปซูลจึงเป็นแสดงให้เห็นถึงลักษณะของสารเคลือบ ถึงแม้ว่าสารเคลือบที่ใช้ในการผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนคือโซเดียมอัลจิเนตแต่เมื่อไมโครแคปซูลแตกตัวออกจากเจ็ทแล้วสัมผัสกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ซึ่งเป็นสารที่ทำให้แข็งตัว ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นระหว่างโซเดียมกับแคลเซียมไอออน โซเดียมอัลจิเนตจึงกลายเป็นเกลือของแคลเซียมที่ไม่ละลายในด่างสมการ



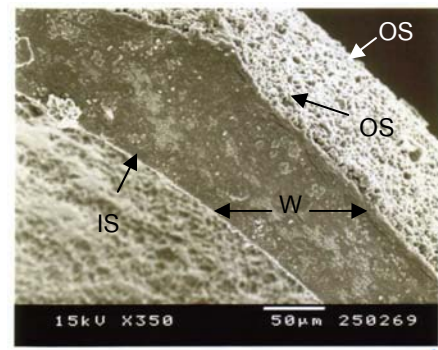
ดังนั้นผนังของไมโครแคปซูลจึงเป็นแคลเซียมอัลจิเนต (Neau et al., 1993)

เมื่อนำไมโครแคปซูลหลังอบมาพิจารณาพื้นผิวด้านนอก (ภาพที่ 4.6) แล้วพบว่าพื้นผิวด้านนอกของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้จากทุกสภาวะมีลักษณะเป็นผลึกของแคลเซียมอัลจิเนต ซึ่งการสักร้างเจดของแคลเซียมจะเริ่มที่พื้นผิวด้านนอกของไมโครแคปซูลก่อนแล้วเกลือของแคลเซียมจะแพร่เข้าไปสู่ด้านในของไมโครแคปซูล (King, 1988) ทำให้พื้นผิวด้านในของไมโครแคปซูลมีลักษณะเป็นผลึกของแคลเซียมอัลจิเนตเช่นเดียวกับพื้นผิวด้านนอก (ภาพที่ 4.7) แม้ว่าในสภาวะที่ไมโครแคปซูลมีผนังหนาที่สุด คือ สภาวะที่อัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบมีค่าเป็น 0.57 และ 14.51 มิลลิลิตร/นาที ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3)

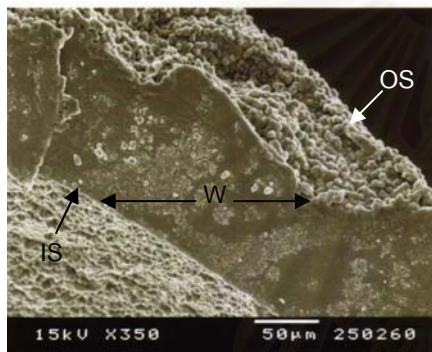
ถึงแม้จะดูเหมือนว่าผนังน่าจะมีรูพรุนแต่ถ้าพิจารณาเฉพาะส่วนที่เป็นความหนาของผนัง (ภาพที่ 4.5) จะพบว่าทุกสภาวะมีผนังที่ค่อนข้างแน่น



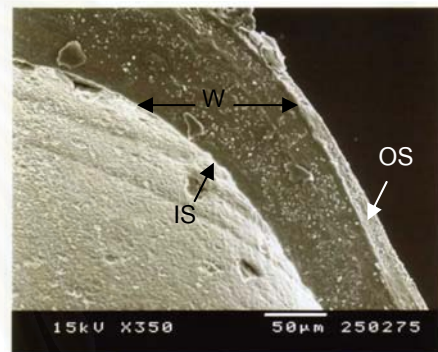
อัตราการไหลของวัสดุแกน 0.57 มิลลิลิตร/นาที และ
อัตราการไหลของสารเคลือบ 7.11 มิลลิลิตร/นาที



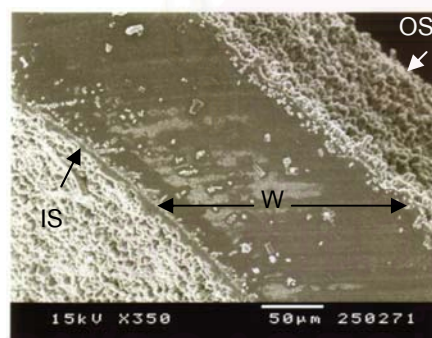
อัตราการไหลของวัสดุแกน 0.87 มิลลิลิตร/นาที และ
อัตราการไหลของสารเคลือบ 7.11 มิลลิลิตร/นาที



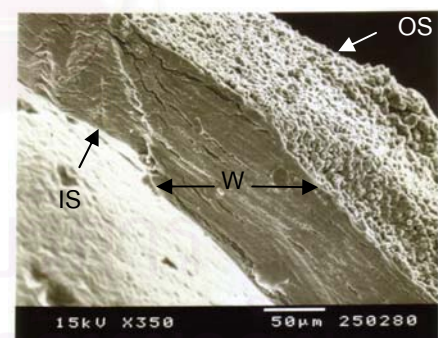
อัตราการไหลของวัสดุแกน 0.57 มิลลิลิตร/นาที และ
อัตราการไหลของสารเคลือบ 10.03 มิลลิลิตร/นาที



อัตราการไหลของวัสดุแกน 0.87 มิลลิลิตร/นาที และ
อัตราการไหลของสารเคลือบ 10.03 มิลลิลิตร/นาที

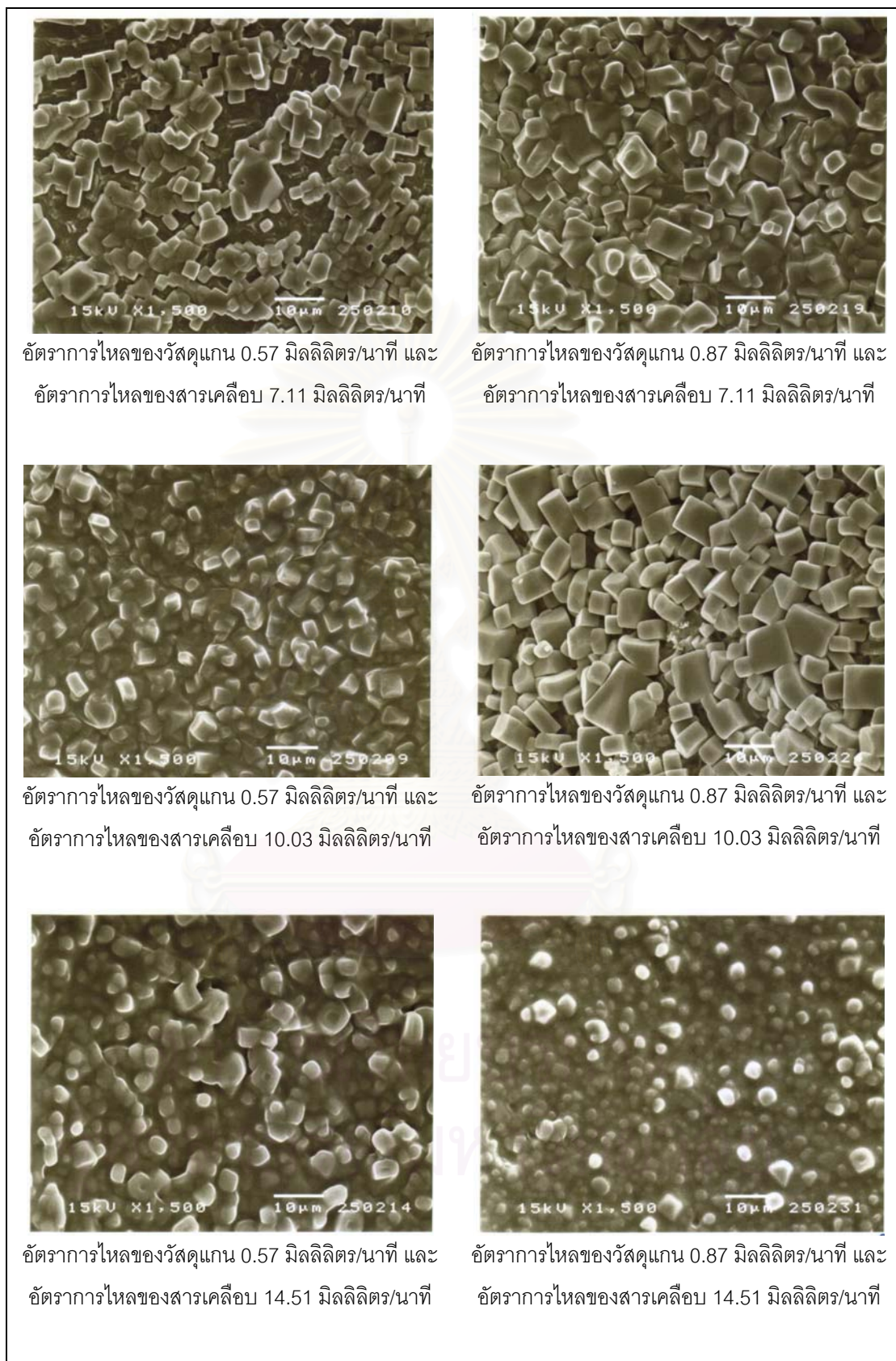


อัตราการไหลของวัสดุแกน 0.57 มิลลิลิตร/นาที และ
อัตราการไหลของสารเคลือบ 14.51 มิลลิลิตร/นาที

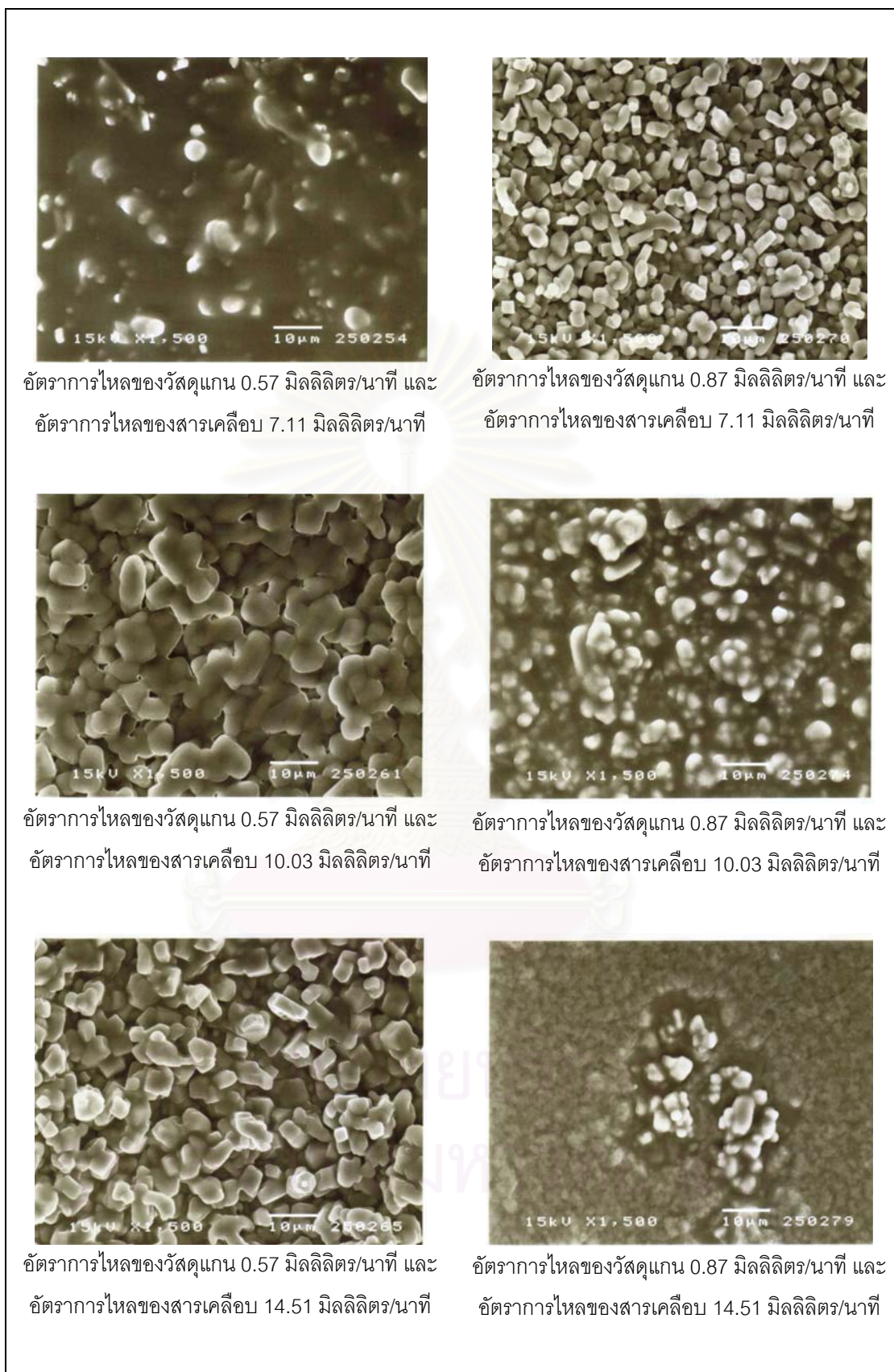


อัตราการไหลของวัสดุแกน 0.87 มิลลิลิตร/นาที และ
อัตราการไหลของสารเคลือบ 14.51 มิลลิลิตร/นาที

ภาพที่ 4.5 โครงสร้างภายในของไมโครแคปซูลหลังอบ (OS = ชั้นผิวด้านนอก IS = ชั้นผิวด้านใน และ W = ผนังของไมโครแคปซูล) โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อผ่าไมโครแคปซูลตามขวาง (กำลังขยาย 350 เท่า)



ภาพที่ 4.6 ลักษณะทางพื้นผิวภายนอกของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนหลังอบ เมื่อส่องด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

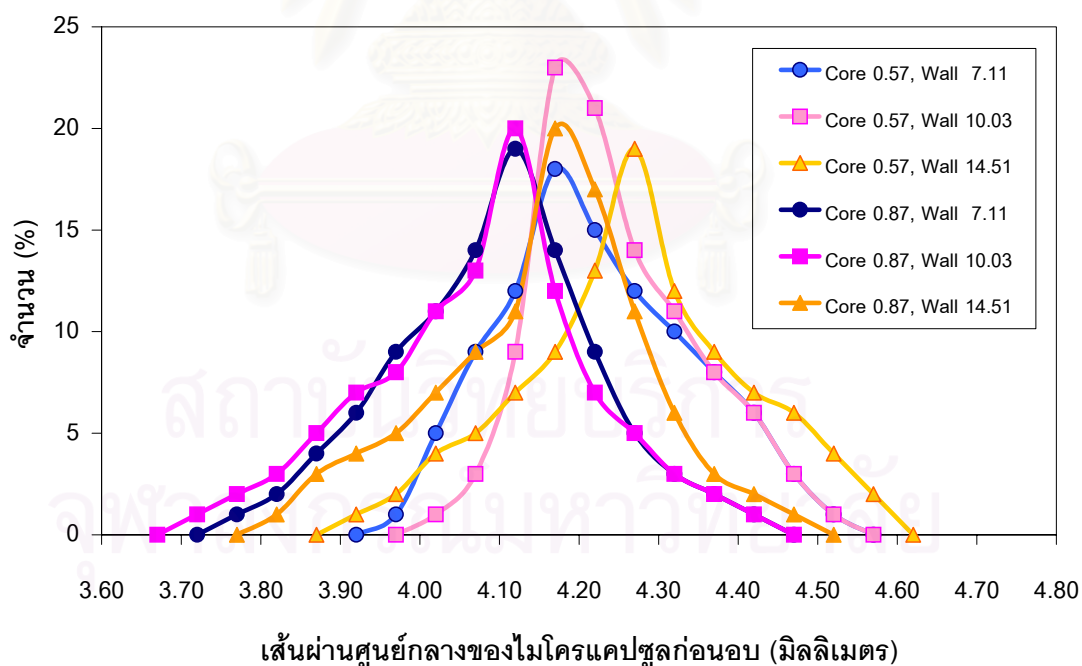


ภาพที่ 4.7 ลักษณะทางพื้นผิวภายในของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนหลังอบ เมื่อส่องด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

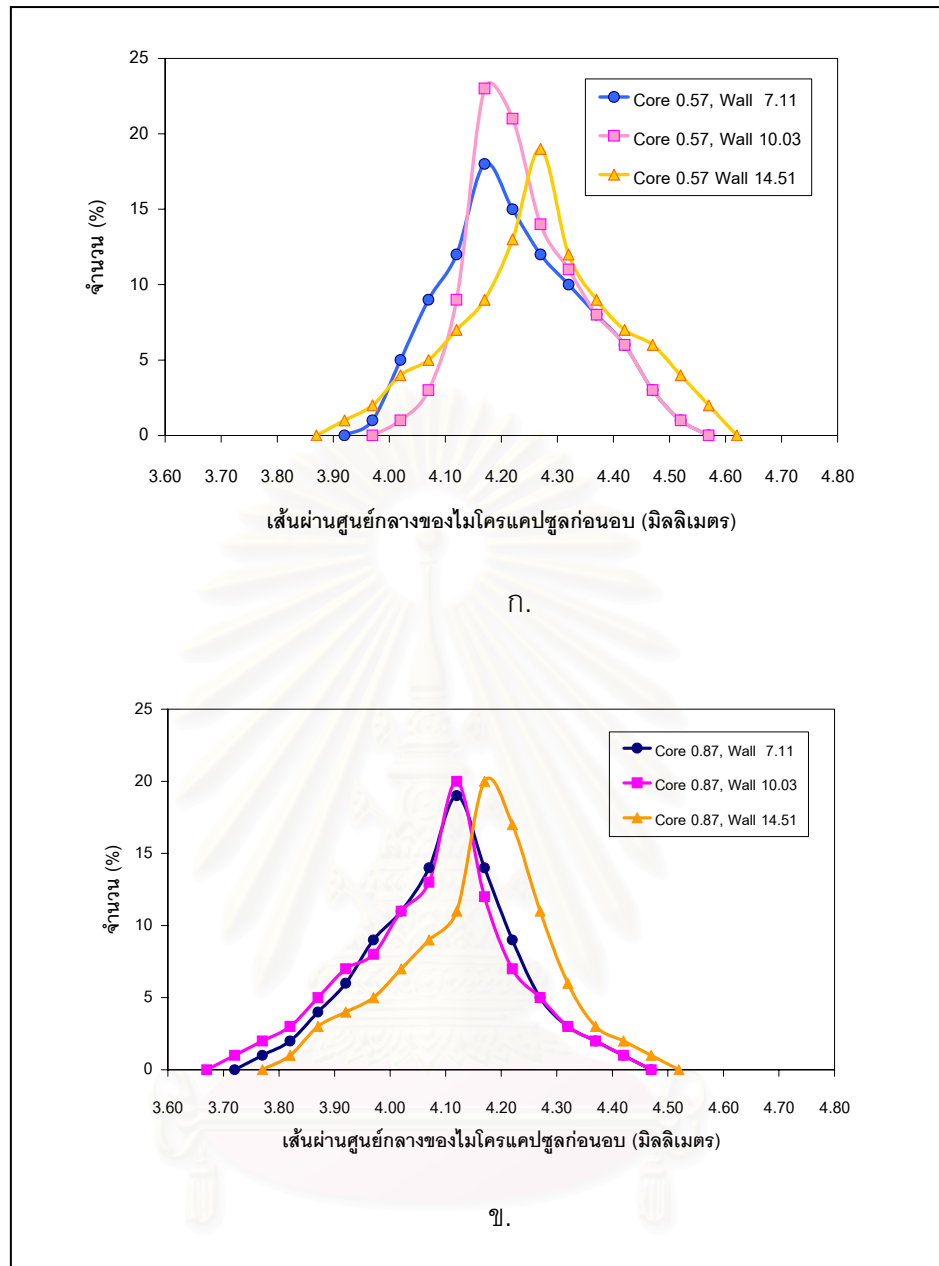
4.2.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคและขนาดของไมโครแคปซูลของ บิตาแคโรทีนก่อนอบ

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคไมโครแคปซูลของบิตาแคโรทีนก่อนอบ (ภาพที่ 4.8 – 4.10) พบว่าไมโครแคปซูลที่ผลิตได้จากทุกสภาวะจะมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเกือบจะเป็นแบบปกติ (normal distribution) ที่ใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 4.8) โดยเฉพาะอัตราการไหลของสารเคลือบจะไม่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลมากนัก (ภาพที่ 4.9) ในขณะที่อัตราการไหลของวัสดุแกนจะมีผลต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลมากกว่า (ภาพที่ 4.10) ที่อัตราการไหลของสารเคลือบเดียวกันการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนจะทำให้ไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กลง

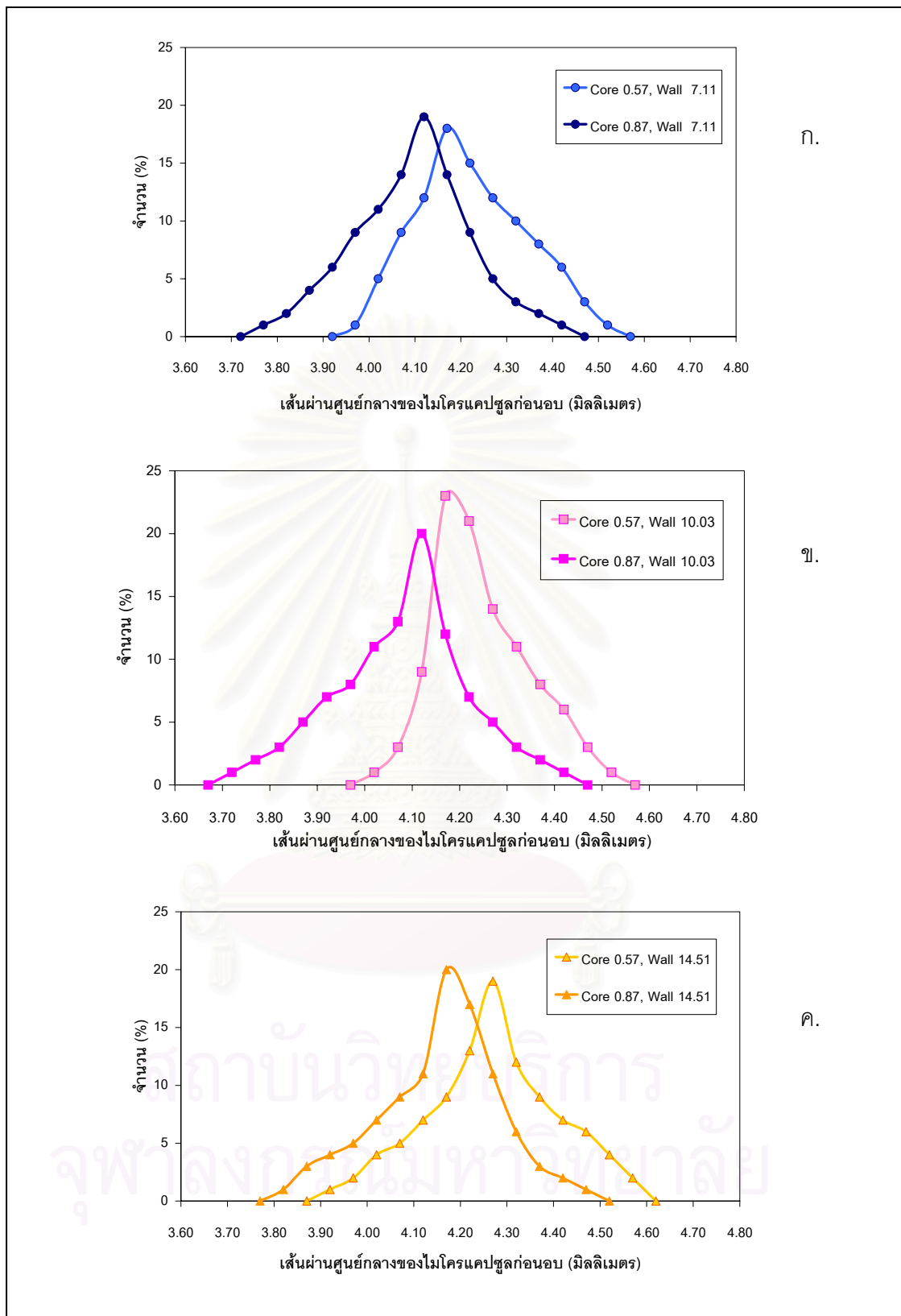
จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ค.1) พบว่ามีเพียงอัตราการไหลของวัสดุแกนที่มีผลต่อขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง) ของไมโครแคปซูลก่อนอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจึงพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของอัตราการไหลของวัสดุแกน ดังแสดงในตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.8 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลก่อนอบ



ภาพที่ 4.9 ผลของอัตราการใช้สารเคลือบต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลก่อนอบ เมื่อวัสดุแกนมีอัตราการใช้ 0.57 มิลลิลิตร/นาที่ (ก.) และ 0.87 มิลลิลิตร/นาที่ (ข.)



ภาพที่ 4.10 ผลของอัตราการใช้ของวัสดุแกนต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลก่อนอบ เมื่อสารเคลือบมีอัตราการใช้ 7.11 มิลลิลิตร/นาที่ (ก.) 10.03 มิลลิลิตร/นาที่ (ข.) และ 14.51 มิลลิลิตร/นาที่ (ค.)

ตารางที่ 4.1 ขนาดของไมโครแคปซูลก่อนอบ

อัตราการไหล ของสารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาที่)	เส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครแคปซูลก่อนอบ (มิลลิเมตร)	
	ที่อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาที่)	
	0.57 ^{ns}	0.87 ^{ns}
7.11	4.23 ^b ± 0.05	4.10 ^a ± 0.05
10.03	4.25 ^b ± 0.02	4.07 ^a ± 0.07
14.51	4.27 ^b ± 0.02	4.16 ^a ± 0.07

a, b ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวนอนเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

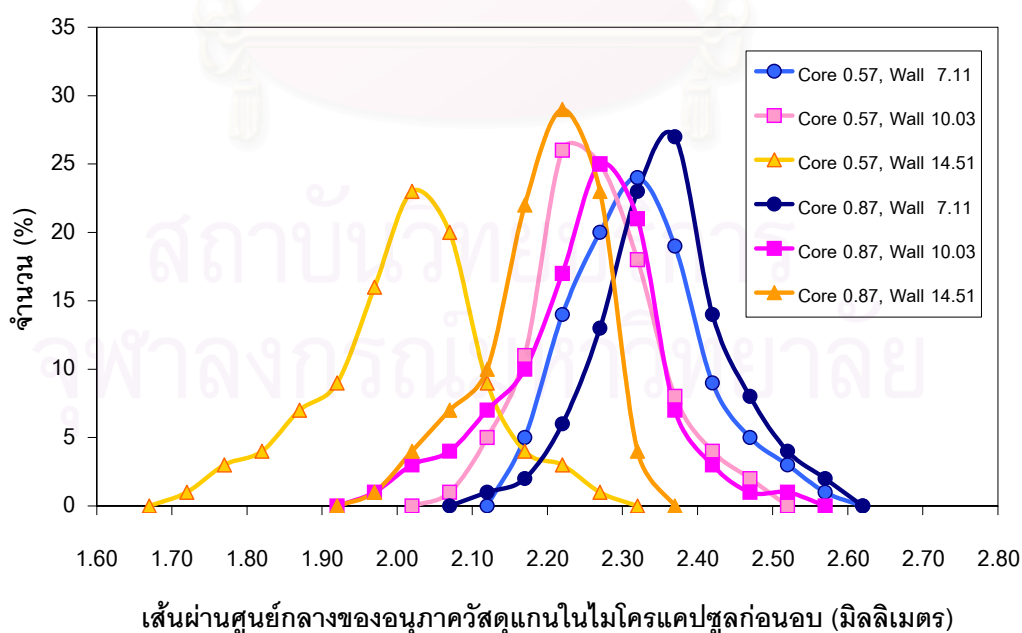
จากผลของขนาดของไมโครแคปซูลก่อนอบ (ตารางที่ 4.1) พบว่าอัตราการไหลของวัสดุแกนมีผลต่อขนาดของไมโครแคปซูลก่อนอบในขณะที่อัตราการไหลของสารเคลือบไม่มีผลต่อขนาดของไมโครแคปซูล การเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนที่อัตราการไหลของสารเคลือบเดียวกันจะทำให้ไมโครแคปซูลก่อนอบมีขนาดเล็กลง แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าขนาดของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้จากทุกสภาวะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก อาจเป็นเพราะขนาดของไมโครแคปซูลก่อนอบได้รับอิทธิพลจากขนาดของเจ็ท โดยที่ไมโครแคปซูลที่ได้จะมีขนาดประมาณ 2 เท่าของขนาดเจ็ท (Franjone and Vasishtha, 1995) ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของออร์บิทัลด้านนอกมีค่าเป็น 2.10 มิลลิเมตร จึงถือได้ว่าขนาดของไมโครแคปซูลก่อนอบขึ้นอยู่กับขนาดของเจ็ทซึ่งได้รับอิทธิพล จากขนาดของออร์บิทัล ดังนั้นปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดขนาดของไมโครแคปซูลก่อนอบคือขนาดของออร์บิทัล (Franjone and Vasishtha, 1995; Schlameus, 1995)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

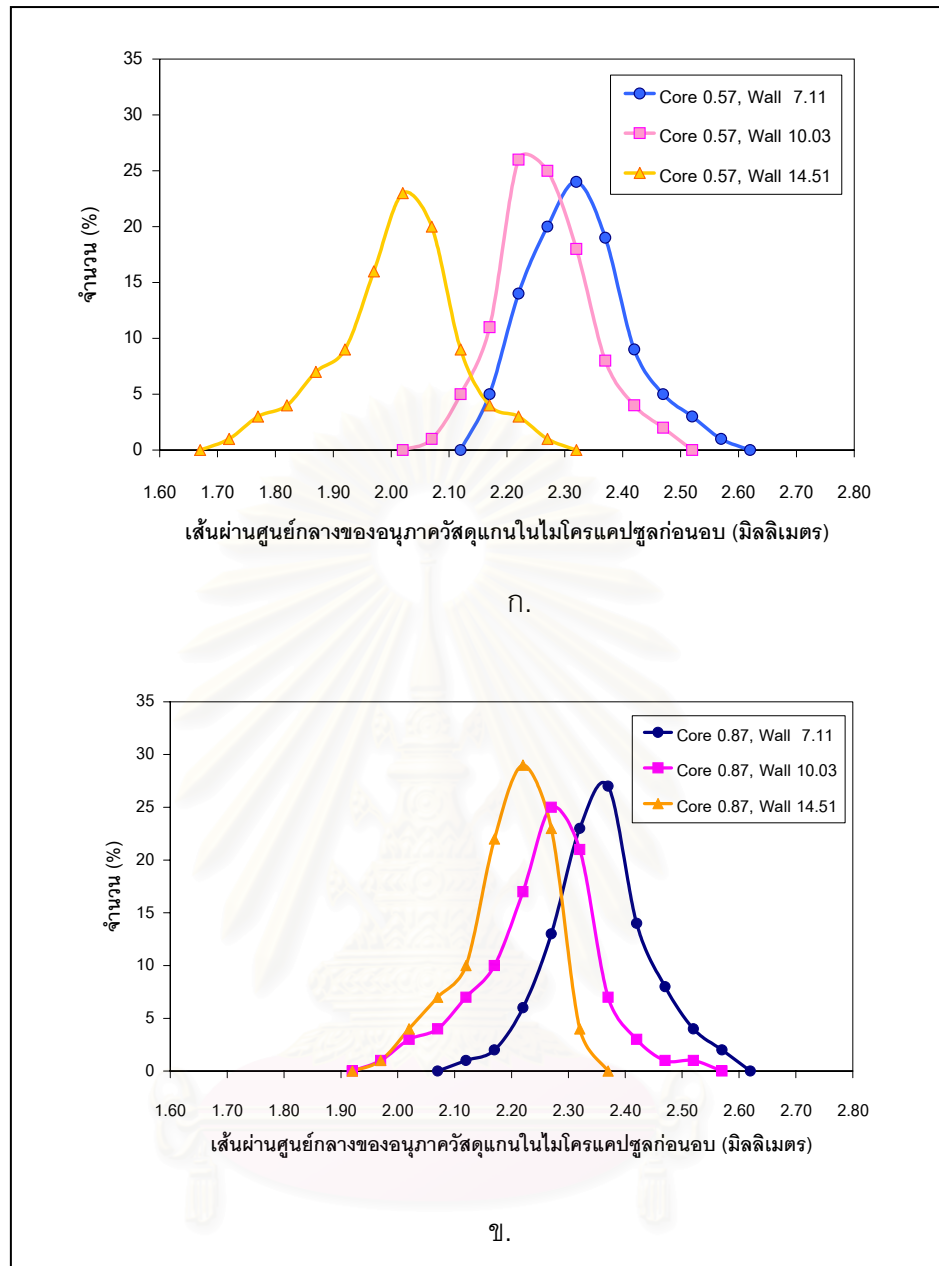
4.2.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคของวัสดุแกนในไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนก่อนอบ

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัสดุแกนในไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนก่อนอบ (ภาพที่ 4.11 – 4.13) แล้วพบว่าไมโครแคปซูลที่ผลิตได้จากทุกสภาวะมีการกระจายตัวเกือบจะเป็นแบบปกติที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ไมโครแคปซูลที่ผลิตได้จากสภาวะที่อัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบเป็น 0.57 และ 14.51 มิลลิลิตร/นาที ตามลำดับ มีขนาดเล็กที่สุดและแตกต่างจากไมโครแคปซูลที่ผลิตได้จากสภาวะอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด (ภาพที่ 4.11) อัตราการไหลของสารเคลือบจะมีผลต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลมากกว่าอัตราการไหลของวัสดุแกน (ภาพที่ 4.12 และ 4.13) โดยการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบจะทำให้อนุภาคของวัสดุแกนมีขนาดเล็กลง ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนจะทำให้วัสดุแกนมีขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น

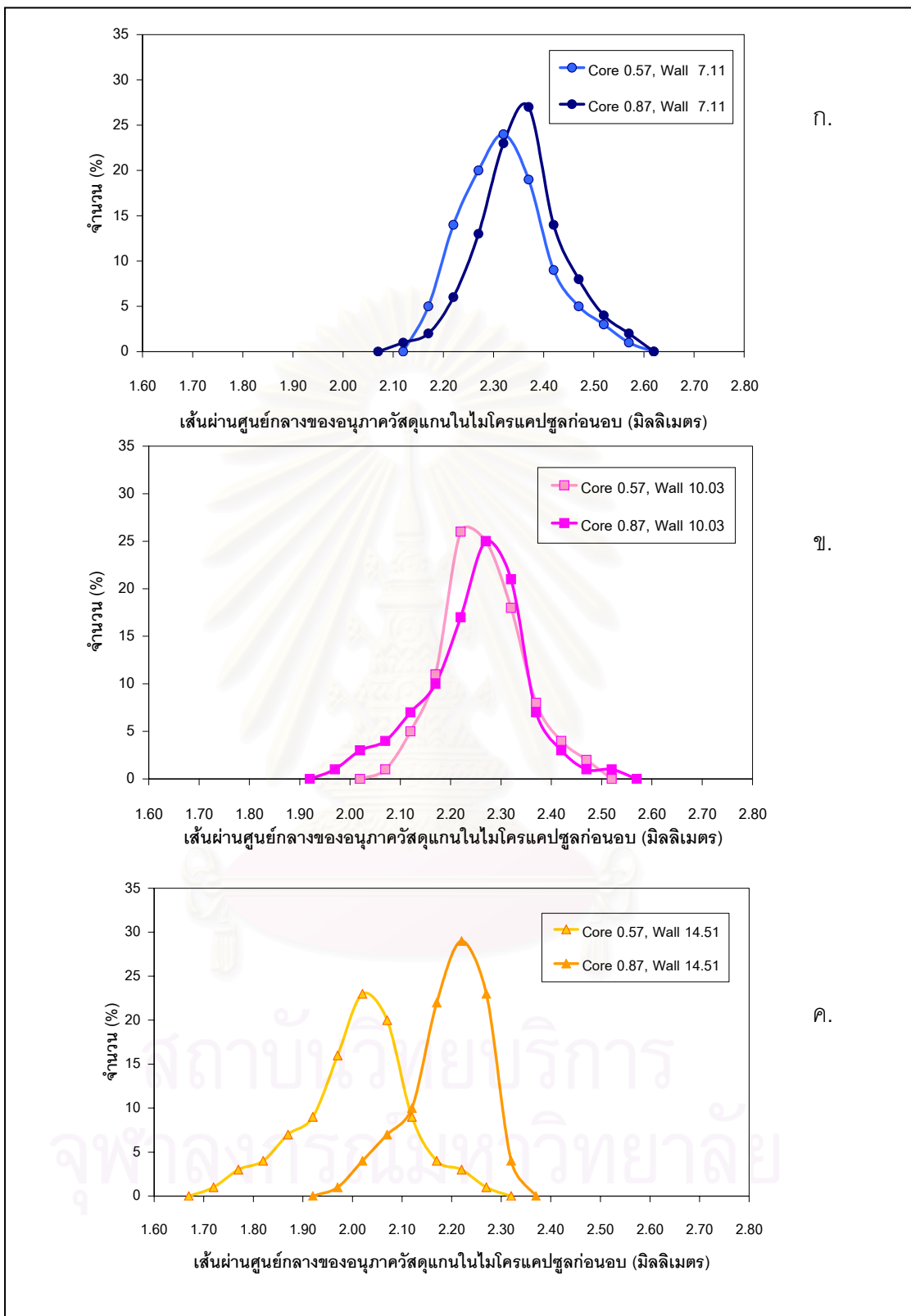
จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ค.2) พบว่าอัตราการไหลของวัสดุแกน อัตราการไหลของสารเคลือบ และอิทธิพลร่วมของอัตราการไหลของวัสดุแกนกับสารเคลือบมีผลต่ออัตราการผลิตที่มีผลต่อขนาดของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนก่อนอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลของอัตราการไหลของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.11 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัสดุแกนในไมโครแคปซูลก่อนอบ



ภาพที่ 4.12 ผลของอัตราการใช้สารเคลือบต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัสดุแกนในไมโครแคปซูลก่อนอบ เมื่อวัสดุแกนมีอัตราการใช้ 0.57 มิลลิลิตร/นาที่ (ก.) และ 0.87 มิลลิลิตร/นาที่ (ข.)



ภาพที่ 4.13 ผลของอัตราการใช้ของวัสดุแกนต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัสดุแกนในไมโครแคปซูลก่อนอบ เมื่อสารเคลือบมีอัตราการใช้ 7.11 มิลลิกรัม/นาที่ (ก.) 10.03 มิลลิกรัม/นาที่ (ข.) และ 14.51 มิลลิกรัม/นาที่ (ค.)

ตารางที่ 4.2 ขนาดของอนุภาควัสดุแกนในไมโครแคปซูลก่อนอบ

อัตราการไหล ของสารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาที่)	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาควัสดุแกนในไมโครแคปซูล ก่อนอบ (มิลลิเมตร)	
	ที่อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาที่)	
	0.57	0.87
7.11	$2.32^{cd} \pm 0.03$	$2.35^d \pm 0.04$
10.03	$2.26^c \pm 0.03$	$2.26^c \pm 0.04$
14.51	$2.01^a \pm 0.04$	$2.18^b \pm 0.04$

a, b, c, d ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวนอนเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

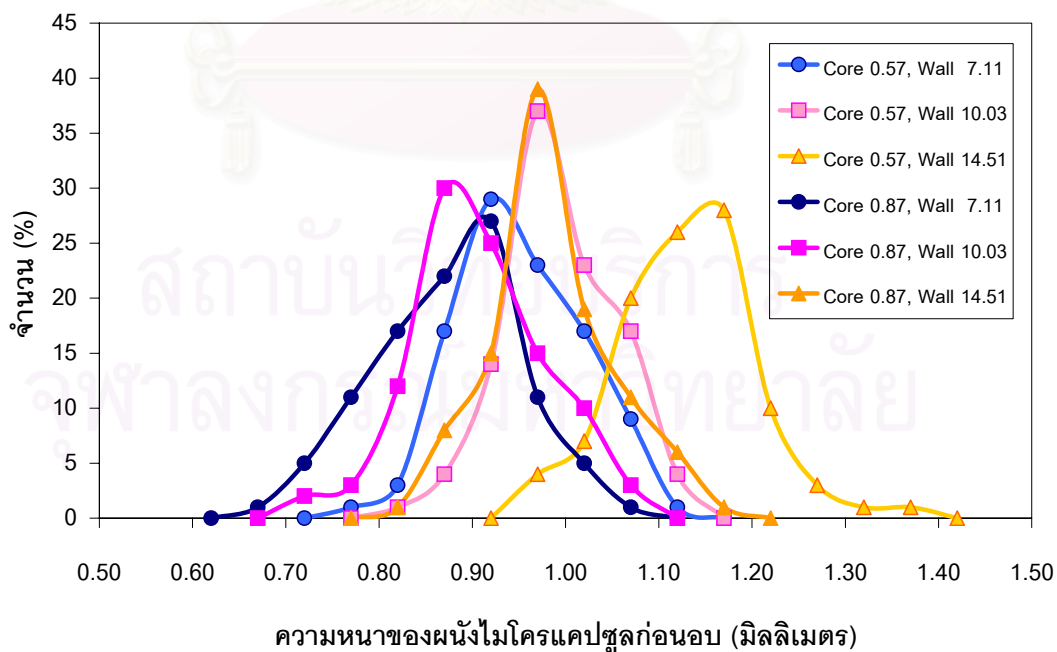
จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารเคลือบเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดอนุภาคของวัสดุแกนลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบจะทำให้เจ็ทมีส่วนที่เป็นสารเคลือบมากขึ้นเมื่อแตกตัวออกมาเป็นแคปซูลแล้วแคปซูลที่ได้จะมีสารเคลือบมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นขนาดของวัสดุแกนจึงลดลง เมื่ออัตราการไหลของวัสดุแกนเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลของสารเคลือบในระดับต่ำ ๆ (7.11 และ 10.03 มิลลิลิตร/นาที่) จะไม่มีผลต่อขนาดของอนุภาควัสดุแกน เนื่องจากอัตราการไหลของวัสดุแกนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจึงทำให้ขนาดอนุภาคของวัสดุแกนเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนที่อัตราการไหลของสารเคลือบ 14.51 มิลลิลิตร/นาที่ จะทำให้ขนาดอนุภาคของวัสดุแกนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากได้รับอิทธิพลของอัตราการไหลของสารเคลือบด้วย สังเกตได้ว่าขนาดอนุภาคของวัสดุแกนมีแนวโน้มเป็นไปตามสัดส่วนของวัสดุแกน (ตารางที่ 3.2) ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนของอัตราการไหลของวัสดุแกนต่ออัตราการไหลของเจ็ท (ผลรวมของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบ) ดังนั้นอิทธิพลร่วมของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบจึงมีผลต่อขนาดอนุภาคของวัสดุแกนในไมโครแคปซูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

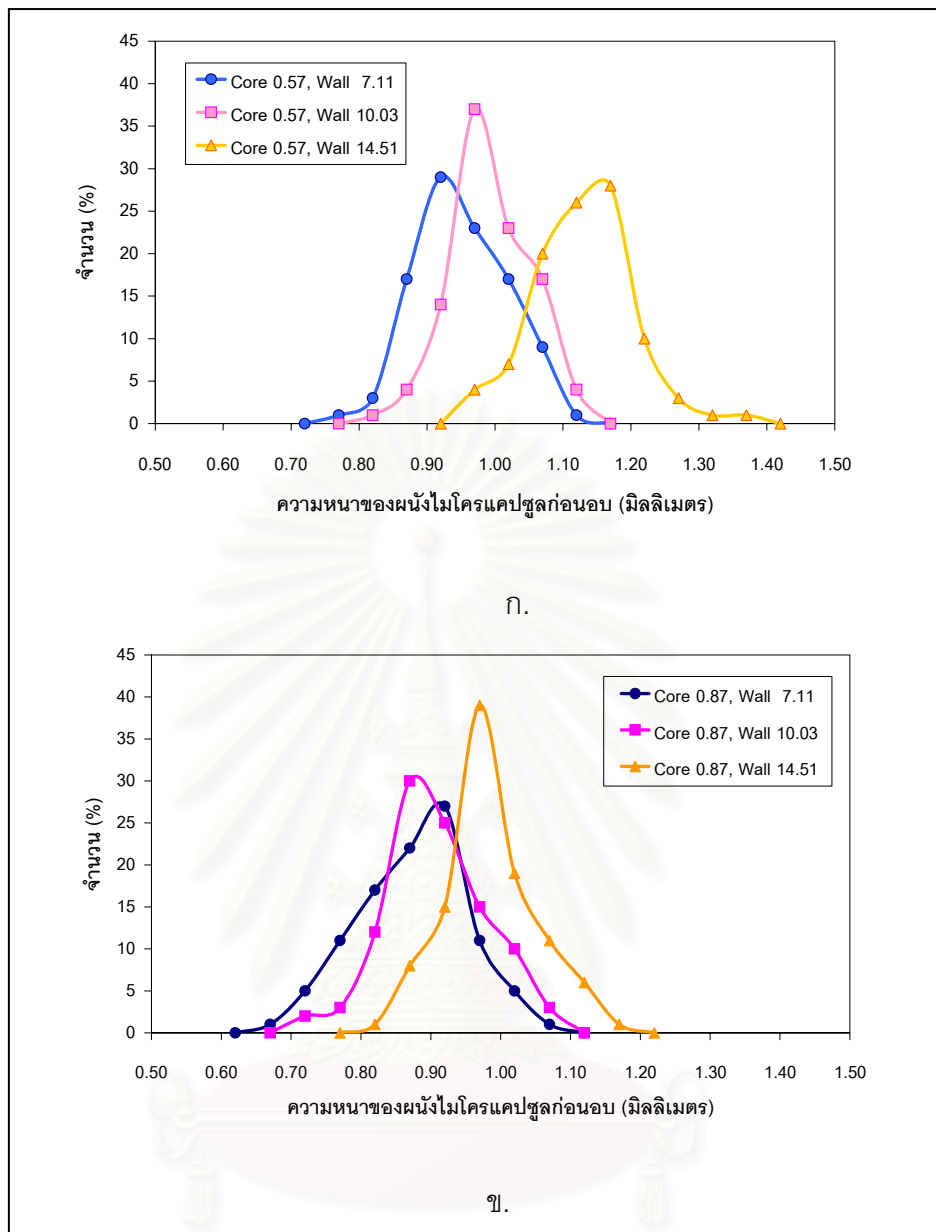
4.2.4 การกระจายตัวของความหนาและความหนาของผนังไมโครแคปซูลของ ปีตาแคโรทีนก่อนอบ

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของความหนาของผนังไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน (ภาพที่ 4.14 – 4.16) แล้วพบว่าผนังไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนก่อนอบที่ผลิตได้จากสภาวะเกือบทุกสภาวะมีการกระจายตัวของความหนาผนังที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นไมโครแคปซูลที่ผลิตจากสภาวะที่อัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบ 0.57 และ 14.51 มิลลิลิตร/นาที ตามลำดับ จะมีความหนาของผนังที่มากกว่าสภาวะอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด (ภาพที่ 4.14) โดยการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบมีผลให้ไมโครแคปซูลมีผนังหนาขึ้น (ภาพที่ 4.15) ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนจะมีทำให้ไมโครแคปซูลมีผนังบางลง (ภาพที่ 4.16)

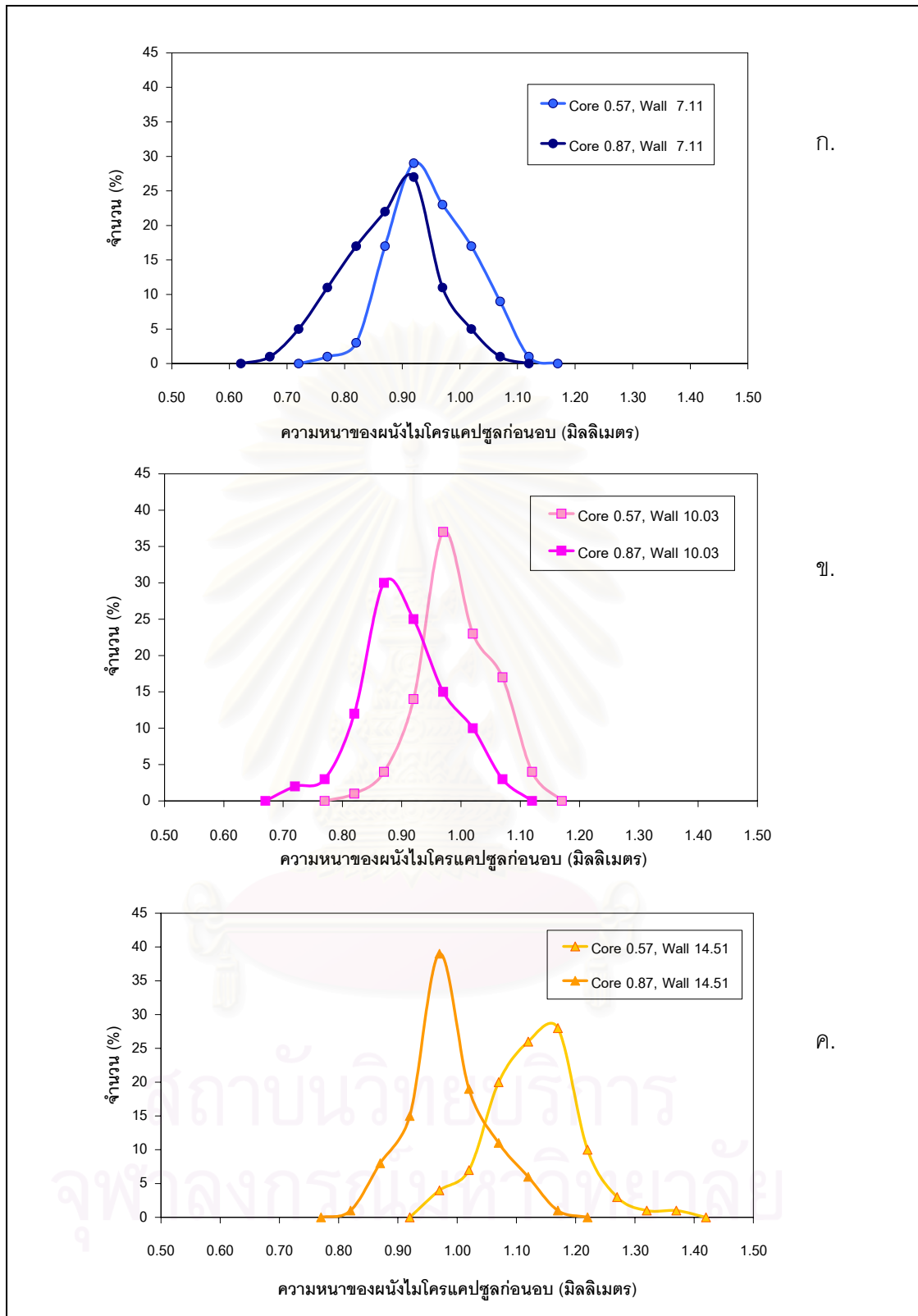
จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ค.3) พบว่าอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบมีผลต่อความหนาของผนังไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนก่อนอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยอิทธิพลร่วมของอัตราการไหลของวัสดุแกนกับสารเคลือบไม่มีผลต่อความหนาของผนังไมโครแคปซูล ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจะพิจารณาแยกอิทธิพลของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบ ดังแสดงในตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.14 การกระจายตัวของความหนาของผนังไมโครแคปซูลก่อนอบ



ภาพที่ 4.15 ผลของอัตราการผลิตของสารเคลือบต่อการกระจายตัวของความหนาของผนังไมโครแคปซูลก่อนอบ เมื่อวัสดุแกนมีอัตราการผลิต 0.57 มิลลิกรัม/นาฬิกา (ก.) และ 0.87 มิลลิกรัม/นาฬิกา (ข.)



ภาพที่ 4.16 ผลของอัตราการไหลของวัสดุแกนต่อการกระจายตัวของความหนาของผนังไมโครแคปซูลก่อนอบ เมื่อสารเคลือบมีอัตราการไหล 7.11 มิลลิลิตร/นาที่ (ก.) 10.03 มิลลิลิตร/นาที่ (ข.) และ 14.51 มิลลิลิตร/นาที่ (ค.)

ตารางที่ 4.3 ความหนาของผนังไมโครแคปซูลก่อนอบ

อัตราการไหล ของสารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาที่)	ความหนาของผนังไมโครแคปซูลก่อนอบ (มิลลิเมตร)	
	ที่อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาที่)	
	0.57	0.87
7.11	$0.95^{bx} \pm 0.01$	$0.87^{ax} \pm 0.04$
10.03	$0.99^{by} \pm 0.01$	$0.91^{ax} \pm 0.03$
14.51	$1.13^{bz} \pm 0.01$	$0.99^{ay} \pm 0.03$

a, b ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวนอนเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p \leq 0.05$)

x, y, z ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p \leq 0.05$)

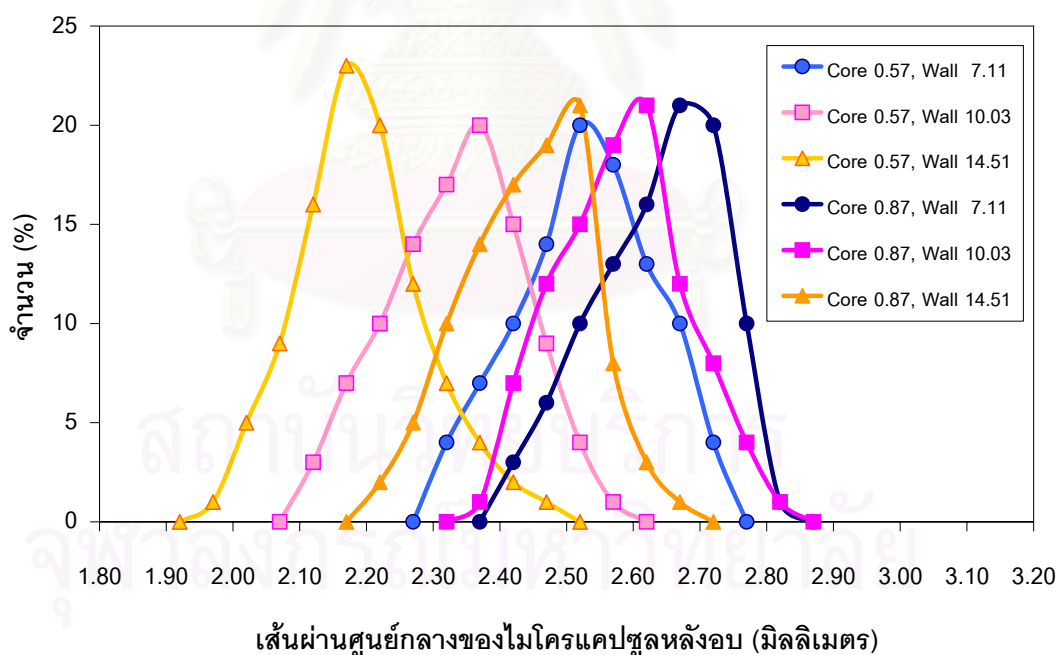
จากตารางที่ 4.3 พบว่าโดยการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบมีผลให้ไมโครแคปซูลมีผนังหนาขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบจะทำให้เจ็ทมีส่วนที่เป็นสารเคลือบมากขึ้นเมื่อแตกตัวออกมาเป็นแคปซูลแล้วแคปซูลที่ได้จะมีสารเคลือบมากขึ้นตามไปด้วยดังนั้นผนังจึงหนาขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนจะทำให้ไมโครแคปซูลมีผนังบางลง เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนจะทำให้เจ็ทมีส่วนที่เป็นวัสดุแกนมากขึ้นเมื่อแตกตัวออกมาเป็นแคปซูลแล้วแคปซูลที่ได้จึงมีผนังบางลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

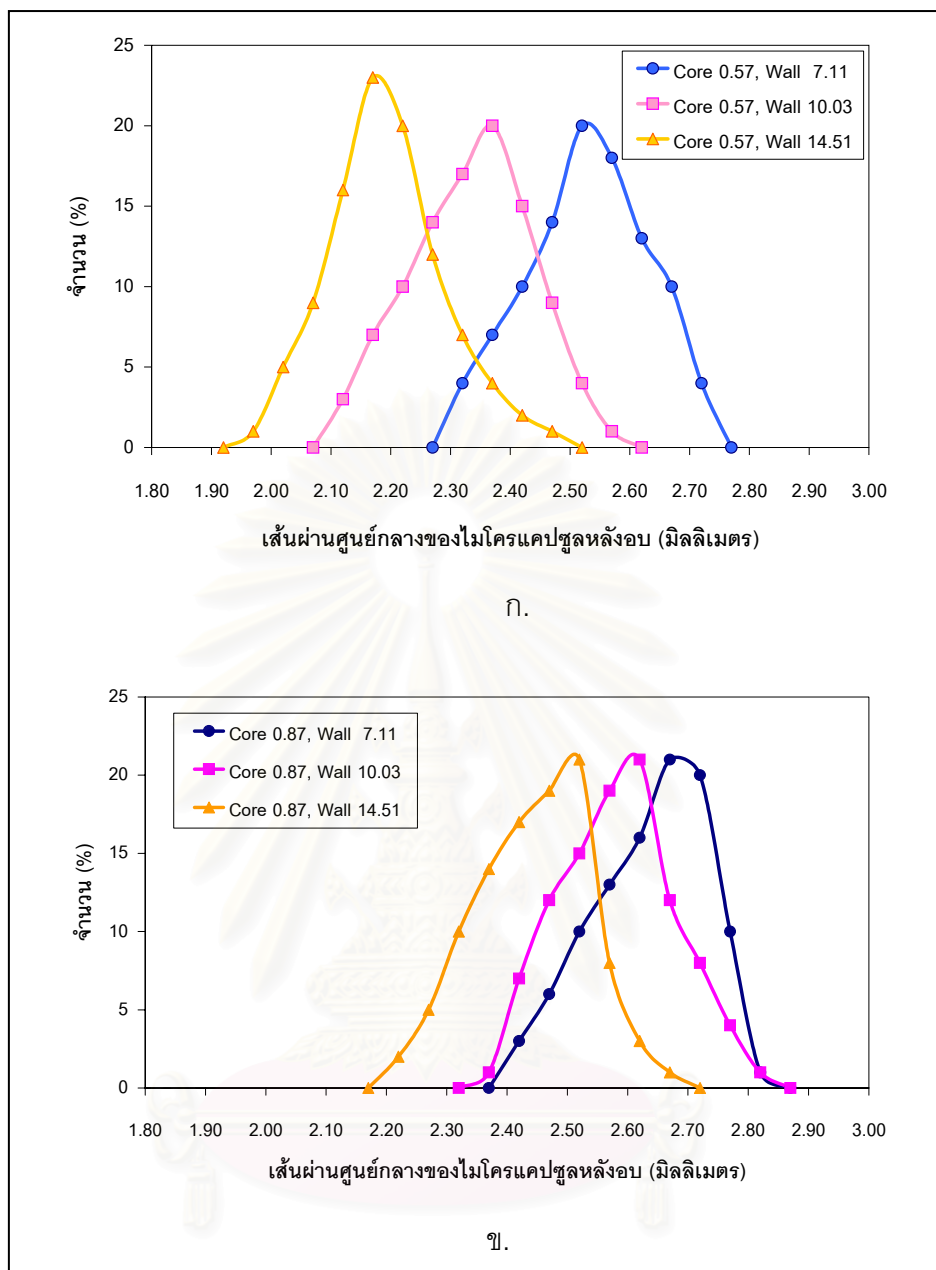
4.2.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคและขนาดของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนหลังอบ

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของขนาดไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนหลังอบ (ภาพที่ 4.17 – 4.19) แล้วพบว่าไมโครแคปซูลหลังอบที่ผลิตได้จากทุกสภาวะจะมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เกือบจะเป็นแบบปกติ (ภาพที่ 4.17) การเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบจะทำให้ไมโครแคปซูลหลังอบมีขนาดลดลง (ภาพที่ 4.18) ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนจะทำให้ไมโครแคปซูลมีขนาดเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.19)

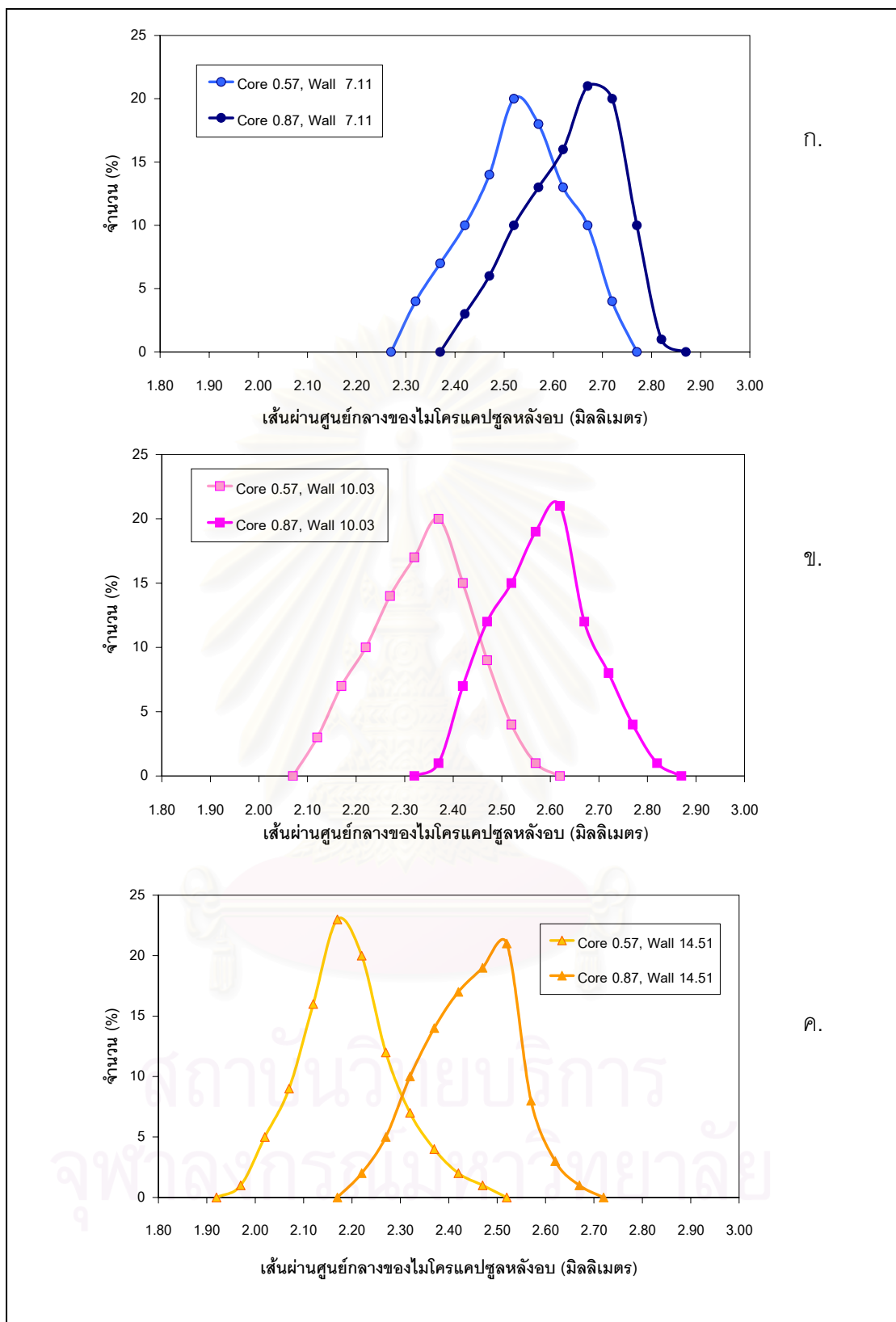
จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ค.4) พบว่าอัตราการไหลของวัสดุแกน อัตราการไหลของสารเคลือบ และอิทธิพลร่วมของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบมีผลต่อขนาดของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนหลังอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.17 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลหลังอบ



ภาพที่ 4.17 ผลของอัตราการใช้ของสารเคลือบต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลหึ่งอบ เมื่อวัสดุแกนมีอัตราการใช้ 0.57 มิลลิเมตร/นาที (ก.) และ 0.87 มิลลิเมตร/นาที (ข.)



ภาพที่ 4.19 ผลของอัตราการใช้ของวัสดุแกนต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลหลังอบ เมื่อสารเคลือบมีอัตราการใช้ 7.11 มิลลิเมตร/นาที่ (ก.) 10.03 มิลลิเมตร/นาที่ (ข.) และ 14.51 มิลลิเมตร/นาที่ (ค.)

ตารางที่ 4.4 ขนาดของไมโครแคปซูลหลังอบ

อัตราการไหล ของสารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาที่)	เส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครแคปซูลหลังอบ (มิลลิเมตร)	
	ที่อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาที่)	
	0.57	0.87
7.11	2.53 ^c ± 0.06	2.63 ^d ± 0.06
10.03	2.34 ^b ± 0.06	2.59 ^{cd} ± 0.06
14.51	2.19 ^a ± 0.05	2.44 ^c ± 0.05

a, b, c, d ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p \leq 0.05$)

จากการหาค่าขนาดของไมโครแคปซูลหลังอบซึ่งแสดงอยู่ในค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ (ตารางที่ 4.4) พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนทำให้ไมโครแคปซูลมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากทำให้ไมโครแคปซูลก่อนอบมีอนุภาคของวัสดุแกนใหญ่ขึ้น (ตารางที่ 4.2) การนำไมโครแคปซูลไปอบเพื่อกำจัดความชื้นออกจึงไม่มีผลต่อขนาดอนุภาคของวัสดุแกนซึ่งเป็นสารละลายของบีตาแคโรทีนในน้ำมันรำข้าว ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบทำให้ไมโครแคปซูลมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบทำให้ไมโครแคปซูลก่อนอบมีผนังที่หนาขึ้น (ตารางที่ 4.3) แต่เมื่อนำไมโครแคปซูลไปอบแล้วจะทำให้ผนังบางลงมากเพราะสารเคลือบมีน้ำอยู่สูงถึง 98.5 % ดังจะเห็นได้จากการที่ขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลก่อนอบ (ตารางที่ 4.2) มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของไมโครแคปซูลหลังอบ (ตารางที่ 4.4) ที่สภาวะการผลิตเดียวกัน ดังนั้นการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบจึงมีผลต่อขนาดของไมโครแคปซูลหลังอบน้อยกว่า นอกจากนี้การเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบยังทำให้ไมโครแคปซูลมีวัสดุแกนน้อยลงขนาดอนุภาคของวัสดุแกนในไมโครแคปซูลก่อนอบจึงเล็กลงซึ่งมีผลให้ไมโครแคปซูลหลังอบมีขนาดเล็กลงตามไปด้วย ดังนั้นขนาดอนุภาคของวัสดุแกนในไมโครแคปซูลก่อนอบจึงมีผลต่อขนาดไมโครแคปซูลหลังอบ (Franjione and Vasishta, 1995) ขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูลก่อนอบยังขึ้นอยู่กับสัดส่วนของวัสดุแกน ดังนั้นอิทธิพลร่วมของอัตราการไหลของวัสดุแกนกับสารเคลือบจึงมีผลต่อขนาดของไมโครแคปซูลหลังอบ ซึ่งให้ผลเหมือนกับการผลิตแคปซูลด้วยวิธีการอัดรีดหนีศูนย์กลางที่สามารถใช้อัตราการป้อนวัสดุแกนและสารเคลือบเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมขนาดของไมโครแคปซูลได้ (Schlameus, 1995)

4.2.6 ค่า a^* และ b^* ของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน

เนื่องจากบีตาแคโรทีนเป็นสารที่ให้สี (Bauernfeind, 1981) ซึ่งปริมาณของบีตาแคโรทีนมีความสัมพันธ์กับค่าสี (Desobry et al., 1997; Sulaeman et al., 2001) ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าสีเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณบีตาแคโรทีนที่เหลือได้ (Desobry et al., 1997)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ค.5) พบว่าอัตราการไหลของวัสดุแกน อัตราการไหลของสารเคลือบ และอิทธิพลร่วมของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบมีผลต่อค่าสี a^* ของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนหลังอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยอัตราการไหลของวัสดุแกนมีผลต่อค่าสี a^* มากที่สุดในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่า a^* ของไมโครแคปซูลหลังอบ

อัตราการไหลของ สารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาทีก)	ค่า a^* ของไมโครแคปซูลหลังอบ	
	ที่อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาทีก)	
	0.57	0.87
7.11	$6.55^a \pm 0.19$	$7.37^b \pm 0.56$
10.03	$6.64^a \pm 0.12$	$10.08^c \pm 0.29$
14.51	$7.12^{ab} \pm 0.09$	$11.52^d \pm 0.51$

a, b, c, d ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการวัดค่าสีความเป็นสีแดง a^* ของไมโครแคปซูลหลังอบ (ตารางที่ 4.5) พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนมีผลทำให้ไมโครแคปซูลมีค่า a^* เพิ่มขึ้นเนื่องจากค่า a^* แสดงถึงความเป็นสีแดงซึ่งสารละลายบีตาแคโรทีนในน้ำมันมีสีส้ม (Bauernfeind, 1981) ซึ่งมีทั้งส่วนที่เป็นสีแดงและเหลือง ดังนั้นการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนซึ่งทำให้ไมโครแคปซูลมีสัดส่วนของวัสดุแกนเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีค่าสี a^* เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าในระหว่างกระบวนการผลิตอาจจะมีการสูญเสียบีตาแคโรทีนไปบ้างแต่ไมโครแคปซูลที่มีปริมาณเริ่มต้นที่สูงกว่า (เมื่ออัตราการไหลของสารเคลือบมีค่าเท่ากัน) ย่อมมีบีตาแคโรทีนเหลือมากกว่า ค่า a^* จึงเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบกลับทำให้ค่า a^* เพิ่มขึ้นเนื่องจากถึงแม้ว่าที่อัตราการไหลของ

วัสดุแกนเดียวกันการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบจะทำให้ไมโครแคปซูลมีวัสดุแกนที่มีขนาดเล็กลง (ตารางที่ 4.2) แต่ก็มีผนังที่หนาขึ้นเช่นเดียวกันซึ่งผนังที่หนาขึ้นจะช่วยลดการสลายตัวของปีตาแคโรทีนเนื่องจากแสงและการซึมผ่านของออกซิเจนได้ ดังนั้นไมโครแคปซูลจึงมีสีแดงมากขึ้น

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ค.6) พบว่าอัตราการไหลของวัสดุแกน อัตราการไหลของสารเคลือบ และอิทธิพลร่วมของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบมีผลต่อค่าสี b^* ของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนหลังอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่า b^* ของไมโครแคปซูลหลังอบ

อัตราการไหลของ สารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาที่)	ค่า b^* ของไมโครแคปซูลหลังอบ	
	ที่อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาที่)	
	0.57	0.87
7.11	$6.60^a \pm 0.40$	$6.76^{ab} \pm 0.20$
10.03	$7.24^b \pm 0.12$	$8.87^c \pm 0.41$
14.51	$7.33^b \pm 0.25$	$10.58^d \pm 0.47$

a, b, c, d ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการวัดค่าสีความเป็นสีเหลือง b^* ของไมโครแคปซูลหลังอบ (ตารางที่ 4.6) พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนมีผลทำให้ไมโครแคปซูลมีค่า b^* เพิ่มขึ้นเนื่องจากค่า b^* แสดงถึงความเป็นสีเหลืองซึ่งสารละลายปีตาแคโรทีนในน้ำมันมีสีส้ม (Bauernfeind, 1981) ซึ่งมีส่วนที่เป็นอยู่ด้วยเหลือง ดังนั้นการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนซึ่งทำให้ไมโครแคปซูลมีสัดส่วนของวัสดุแกนเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีค่าสี b^* เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบยังทำให้ค่า b^* เพิ่มขึ้นเนื่องจากถึงแม้ว่าที่อัตราการไหลของวัสดุแกนเดียวกันการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบจะทำให้ไมโครแคปซูลมีวัสดุแกนน้อยลง แต่ก็มีผนังที่หนาขึ้นซึ่งนอกจากจะช่วยลดการสลายตัวของปีตาแคโรทีนอื่นจะทำให้มีสีเหลืองมากขึ้นแล้ว ผนังของไมโครแคปซูลยังมีสีเหลืองอีกด้วย ดังนั้นการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบจึงทำให้ไมโครแคปซูลมีสีเหลืองมากขึ้น

4.2.7 ความชื้นของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ค.7) พบว่าอัตราการไหลของวัสดุแกน อัตราการไหลของสารเคลือบ และอิทธิพลร่วมของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบมีผลต่อความชื้นของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนหลังอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ความชื้นของไมโครแคปซูลหลังอบ

อัตราการไหลของ สารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาที)	ความชื้นของไมโครแคปซูลหลังอบ (%)	
	ที่อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาที)	
	0.57	0.87
7.11	10.44 ^c ± 0.05	9.74 ^a ± 0.08
10.03	10.49 ^c ± 0.05	10.30 ^b ± 0.05
14.51	11.95 ^d ± 0.07	10.44 ^c ± 0.06

a, b, c, d ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาความชื้นของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ (ตารางที่ 4.7) พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบจะทำให้ไมโครแคปซูลก่อนอบมีสารเคลือบมากขึ้นผนังจึงหนาขึ้น (ตารางที่ 4.3) ที่ระยะเวลาการอบ 5 ชั่วโมงเท่า ๆ กันไมโครแคปซูลที่มีผนังหนาขึ้นจึงมีโอกาสที่จะมีความชื้นเหลืออยู่มาก ดังนั้นความชื้นของไมโครแคปซูลหลังอบจึงสูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนจะทำให้ความชื้นของไมโครแคปซูลลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากถึงแม้ว่าส่วนที่เป็นวัสดุแกนจะไม่มี ความชื้นแต่อัตราการไหลของวัสดุแกนมีผลกระทบต่อความหนาของผนัง นั่นคือการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนจะมีผลทำให้ผนังบางลง (ตารางที่ 4.3) การกำจัดความชื้นออกไปจึงทำได้ดีกว่าจึงทำให้ความชื้นลดลง ความหนาของผนังไมโครแคปซูลจะมีผลต่อสมบัติของไมโครแคปซูล (Finch, 1993) ซึ่งในกรณีนี้ความชื้นก็เป็นสมบัติข้อหนึ่งของไมโครแคปซูลที่ได้รับอิทธิพลจากความหนาของผนัง

4.2.8 อัตราการผลิตของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน

4.2.8.1 จำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ค.8) พบว่ามีอัตราการไหลของวัสดุแกน อัตราการไหลของสารเคลือบ และอิทธิพลร่วมของอัตราการไหลของวัสดุแกนกับสารเคลือบที่มีผลอัตราการผลิตไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนซึ่งแสดงอยู่ในค่าจำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลแสดงไว้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 จำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้

อัตราการไหลของ สารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาที่)	จำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ (ไมโครแคปซูล/นาที่)	
	ที่อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาที่)	
	0.57	0.87
7.11	$79^a \pm 3$	$112^b \pm 2$
10.03	$109^b \pm 5$	$129^c \pm 3$
14.51	$150^d \pm 3$	$158^e \pm 2$

a, b, c, d, e ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.8 พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนทำให้ผลิตไมโครแคปซูลได้ในจำนวนที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนทำให้ในเวลา 1 นาทีมีวัสดุแกนไหลออกมามากขึ้นจึงผลิตไมโครแคปซูลได้ในจำนวนที่มากขึ้น และการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบทำให้สารเคลือบไหลออกมาได้มากขึ้นจึงผลิตไมโครแคปซูลได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้อัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบยังส่งผลต่ออัตราการไหลของเจ็ท (ผลรวมของอัตราการไหลของวัสดุแกนกับสารเคลือบ) สูงขึ้น แต่เนื่องจากการแตกตัวของเจ็ทเป็นไมโครแคปซูลจะแตกตัวในขนาดที่ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4.1) จึงส่งผลให้เจ็ทแตกตัวเป็นแคปซูลได้มากขึ้น ดังนั้นอิทธิพลร่วมระหว่างอัตราการไหลของสารเคลือบกับวัสดุแกนจึงมีผลต่อจำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ โดยสภาวะที่อัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบ 0.87 และ 14.51 มิลลิลิตร/นาที่ ตามลำดับ ทำให้ไมโครแคปซูลได้มากที่สุด คือ 158 ไมโครแคปซูล/นาที่ เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบทำให้

วัสดุแกนและสารเคลือบไหลออกมาได้มากขึ้นจึงผลิตไมโครแคปซูลออกมาได้ในจำนวนที่มากขึ้น ในงานวิจัยนี้สามารถผลิตแคปซูลออกมาได้ 79 – 158 ไมโครแคปซูล/นาที ซึ่งถือว่าสูงกว่าอัตราการผลิตแคปซูลของ osteoprogenitor ที่ใช้สารละลายไซเตียมอัลจินเตเป็นสารเคลือบและผลิตด้วยเทคนิคเดียวกันนี้ซึ่งมีค่าเพียง 20 – 30 แคปซูล/นาที (Franjione and Vasishtha, 1995)

4.2.8.2 น้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ค.9) พบว่าอัตราการไหลของวัสดุแกน อัตราการไหลของสารเคลือบ และอิทธิพลร่วมของอัตราการไหลของวัสดุแกนกับสารเคลือบมีผลต่ออัตราการผลิตของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนซึ่งแสดงอยู่ในค่าน้ำหนักไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ก่อนอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลแสดงไว้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 น้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ก่อนอบ

อัตราการไหลของ สารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาที)	น้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ก่อนอบ (กรัม/นาที)	
	ที่อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาที)	
	0.57	0.87
7.11	7.15 ^a ± 0.35	9.86 ^b ± 0.09
10.03	10.09 ^b ± 0.39	11.40 ^c ± 0.50
14.51	14.36 ^d ± 0.43	14.40 ^d ± 0.10

a, b, c, d ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาน้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ก่อนอบ (ตารางที่ 4.9) พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนทำให้ผลิตไมโครแคปซูลได้ในน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนทำให้วัสดุแกนไหลออกมามากขึ้นน้ำหนักที่ผลิตได้จึงมากขึ้น และการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบทำให้ผลิตไมโครแคปซูลได้ในน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกัน เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบทำให้สารเคลือบไหลออกมามากขึ้น นอกจากนี้ น้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ก่อนอบยังขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของเจ็ทซึ่งเป็นผลรวมของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบ ดังนั้นอิทธิพลร่วมของอัตราการไหลของวัสดุแกนกับสารเคลือบจึงมีผลต่อน้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ค.10) พบว่ามีอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบ มีผลต่ออัตราการผลิตของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนหลังอบซึ่งแสดงอยู่ในค่าน้ำหนักไมโครแคปซูลที่ผลิตได้หลังอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยที่อิทธิพลร่วมของอัตราการไหลของสารเคลือบกับวัสดุแกนไม่มีผลต่อค่าน้ำหนักไมโครแคปซูลที่ผลิตได้หลังอบและอัตราการไหลของวัสดุแกนเป็นปัจจัยที่มีผลมากกว่าอัตราการไหลของสารเคลือบ ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจึงแยกพิจารณาแต่ละปัจจัยแสดงไว้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 น้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้หลังอบ

อัตราการไหลของ สารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาทีก)	น้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้หลังอบ (กรัม/นาทีก)	
	ที่อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาทีก)	
	0.57	0.87
7.11	$0.71^{ax} \pm 0.02$	$1.05^{bx} \pm 0.02$
10.03	$0.81^{ay} \pm 0.01$	$1.19^{by} \pm 0.06$
14.51	$0.92^{az} \pm 0.03$	$1.28^{bz} \pm 0.02$

a, b ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวนอนเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

x, y, z ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการพิจารณาค่าอัตราการผลิตของไมโครแคปซูลซึ่งแสดงอยู่ในค่าของน้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้หลังอบ (ตารางที่ 4.10) พบว่า การเพิ่มของอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบทำให้ใน 1 นาทีมีวัสดุแกนและสารเคลือบไหลออกมามากขึ้น ดังนั้นจึงผลิตไมโครแคปซูลได้ในน้ำหนักที่มากขึ้น (ตารางที่ 4.9) และเมื่อนำไมโครแคปซูลไปอบเพื่อกำจัดความชื้นออกจากไมโครแคปซูลจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุแกน แต่น้ำหนักของสารเคลือบจะลดลงอย่างมากเนื่องจากสารเคลือบมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่สูง อัตราการไหลของวัสดุแกนจึงมีผลต่อค่าน้ำหนักไมโครแคปซูลหลังอบมากกว่าอัตราการไหลของสารเคลือบ โดยสถานะที่อัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบ 0.87 และ 14.51 มิลลิลิตร/นาทีก ตามลำดับ ทำให้ผลิตไมโครแคปซูลก่อนและหลังอบได้ในน้ำหนักที่มากที่สุด คือ 1.28 กรัม/นาทีก

จากการพิจารณาอัตราการผลิตทั้งที่แสดงอยู่ในค่าจำนวนและน้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบทำให้อัตราการผลิตเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลเหมือนกับการผลิตแคปซูลด้วยวิธีการอัดรีดหนึ่งศูนย์กลางที่สามารถใช้อัตราการป้อน (feed rate) วัสดุแกนและสารเคลือบเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมอัตราการผลิตของไมโครแคปซูลได้ (Schlameus, 1995)

4.2.9 น้ำหนักของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ค.11) พบว่ามีเพียงอัตราการไหลของวัสดุแกนเท่านั้นที่มีผลต่อน้ำหนักของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนก่อนอบซึ่งแสดงอยู่ในค่าน้ำหนักไมโครแคปซูลที่ผลิตได้หลังอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจึงพิจารณาเฉพาะผลของอัตราการไหลของวัสดุแกนเท่านั้น ดังแสดงไว้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 น้ำหนักของไมโครแคปซูลก่อนอบ

อัตราการไหลของ สารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาที)	น้ำหนักของไมโครแคปซูลก่อนอบ (กรัม/ไมโครแคปซูล) ที่อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาที)	
	0.57 ^{ns}	0.87 ^{ns}
7.11 ^{ns}	0.0911 ± 0.0017	0.0885 ± 0.0013
10.03 ^{ns}	0.0922 ± 0.0040	0.0881 ± 0.0010
14.51	0.0960 ^b ± 0.0016	0.0912 ^a ± 0.0016

a, b ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวนอนเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลของวัสดุแกนที่มีต่อน้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ก่อนอบ (ตารางที่ 4.11) พบว่าที่อัตราการไหลของสารเคลือบมีค่าเป็น 7.11 และ 10.03 มิลลิลิตร/นาที ทำให้การเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนไม่มีผลต่อน้ำหนักของไมโครแคปซูลแต่ละแคปซูล แต่การเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนที่อัตราการไหลของสารเคลือบ 14.51 มิลลิลิตร/นาทีจะทำให้น้ำหนักต่อเม็ดของไมโครแคปซูลลดลง แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าที่ได้นี้ไม่แตกต่างกันมากนักและมีแนวโน้มเหมือนกับขนาดของไมโครแคปซูลก่อนอบ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ค.12) พบว่ามีอัตราการไหลของวัสดุแกน อัตราการไหลของสารเคลือบ และอิทธิพลร่วมของ อัตราการไหลของวัสดุแกนกับสารเคลือบมีผลต่อน้ำหนักของไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีนหลังอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลแสดงไว้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 น้ำหนักของไมโครแคปซูลหลังอบ

อัตราการไหลของ สารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาที)	น้ำหนักของไมโครแคปซูลหลังอบ (กรัม/ไมโครแคปซูล)	
	ที่อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาที)	
	0.57	0.87
7.11	$0.0091^d \pm 0.0001$	$0.0094^e \pm 0.0001$
10.03	$0.0075^b \pm 0.0003$	$0.0092^d \pm 0.0002$
14.51	$0.0061^a \pm 0.0006$	$0.0081^c \pm 0.0000$

a, b, c, d, e ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการพิจารณาค่าน้ำหนักของไมโครแคปซูลหลังอบ (ตารางที่ 4.12) พบว่าการเพิ่มของอัตราการไหลของวัสดุแกนมีผลทำให้น้ำหนักไมโครแคปซูลหลังอบเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนทำไมโครแคปซูลมีสัดส่วนของวัสดุแกนเพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำหนักของ ส่วนของวัสดุแกนนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำไปอบ ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบกลับทำให้ไมโครแคปซูลมีน้ำหนักลดลงเนื่องจากถึงแม้ว่าการเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบจะทำให้สารเคลือบไหลออกมามากขึ้น จึงผลิตไมโครแคปซูลได้ในจำนวนที่มากขึ้น แต่เมื่อนำไมโครแคปซูลไปอบแล้วน้ำหนักของส่วนที่เป็นผนังจะลดลงมากเพราะสารเคลือบมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่สูงถึง 95 % ดังนั้นน้ำหนักของไมโครแคปซูลแต่ละแคปซูล ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่าง อัตราการไหลของเจ็ทกับจำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้จึงมีค่าลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.10 ค่า hardness ของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Asymmetric Factorial Design (ภาคผนวก ค.12) พบว่ามีอิทธิพลของไหลของวัสดุแกน และสารเคลือบมีอิทธิพลต่อค่า hardness ของไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนหลังอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลแสดงไว้ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ค่า hardness ของไมโครแคปซูลหลังอบ

อัตราการไหล ของสารเคลือบ (มิลลิลิตร/นาที่)	ค่า hardness ของไมโครแคปซูลหลังอบ (g)	
	ที่อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาที่)	
	0.57	0.87 ^{ns}
7.11	840.650 ^{bx} ± 60.056	350.720 ^a ± 41.841
10.03	961.761 ^{bx^y} ± 88.963	356.439 ^a ± 56.030
14.51	1065.136 ^{by} ± 99.393	392.390 ^a ± 45.157

a, b ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวนอนเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

x, y, z ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

เมื่อพิจารณาค่า hardness ของไมโครแคปซูลหลังอบ (ตารางที่ 13) พบว่าการเพิ่มของอัตราการไหลของวัสดุแกนทำให้ไมโครแคปซูลมีส่วนที่เป็นสารเคลือบอยู่น้อยลงผนังจึงบางลง (ตารางที่ 4.3) นอกจากนี้วัสดุแกนของไมโครแคปซูลยังมีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งการเพิ่มอัตราการไหลของวัสดุแกนยังทำให้อนุภาคของวัสดุแกนในไมโครแคปซูลมีขนาดใหญ่ขึ้น (ตารางที่ 4.2) ดังนั้นไมโครแคปซูลจึงมีความแข็งแรงน้อยกว่า ค่า hardness จึงน้อยลง ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลของสารเคลือบมีผลทำให้ไมโครแคปซูลมีส่วนที่เป็นสารเคลือบอยู่มากขึ้นผนังของไมโครแคปซูลจึงหนาขึ้นทำให้ค่า hardness สูงขึ้น ทำให้การปลดปล่อยเนื่องจากแรงกดทำได้ยากขึ้น เพราะความหนาของผนังเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีผลกระทบต่ออัตราการปลดปล่อยของวัสดุแกน (Pothakamury and Barbosa-Canavas, 1995; Shahidi and Han, 1993) โดยที่ถ้าไมโครแคปซูลมีความหนาของผนังมากเกินไปจะทำให้การปลดปล่อยทำได้ยากขึ้น (Kondo, 1979)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

เครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ผลิตไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนประกอบด้วย bi-fluid nozzle ถึงเก็บวัสดุแกน ถึงเก็บสารเคลือบ ถึงก๊าซไนโตรเจนซึ่งก๊าซไนโตรเจนจะเป็นตัวที่ให้แรงดันเพื่อทำให้วัสดุแกนและสารเคลือบไหล needle valve และ flow meter

จากการศึกษาการผลิตไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีนนี้ทำได้โดยใช้สารละลายโซเดียมอัลจิเนตที่มีความเข้มข้น 1.50 % เป็นสารเคลือบ ใช้สารละลายของปีตาแคโรทีนในน้ำมันรำข้าวที่มีความเข้มข้น 0.25 % เป็นวัสดุแกน และใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 5.0 % เป็นสารที่ทำให้แข็งตัว โดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นที่อัตราการไหลของวัสดุแกนเป็น 0.57 และ 0.87 มิลลิลิตร/นาที่ และอัตราการไหลของสารเคลือบเป็น 7.11, 10.03 และ 14.51 มิลลิลิตร/นาที่ พบว่าไมโครแคปซูลที่ผลิตได้เป็นไมโครแคปซูลแบบนิวเคลียสเดี่ยว (mono-nucleus microcapsules) อัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการผลิต น้ำหนัก ขนาดและพารามิเตอร์ค่าสีของไมโครแคปซูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่ออัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการผลิตทั้งหมดแสดงอยู่ในหน่วย “ไมโครแคปซูล/นาที่” และ “กรัม/นาที่” และพารามิเตอร์ค่าสี “a*” และ “b*” ของไมโครแคปซูลมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของวัสดุแกนลดลงในขณะที่อัตราการไหลของสารเคลือบเพิ่มขึ้นทำให้น้ำหนักและขนาดของไมโครแคปซูลมีค่าลดลง วัสดุแกนมีขนาดอนุภาคเล็กลง ในขณะที่ผนังของไมโครแคปซูลจะมีความหนามากขึ้น ซึ่งความหนาของผนังที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้ไมโครแคปซูลมีความชื้นและค่า hardness เพิ่มขึ้น แต่ค่า hardness ยังได้รับอิทธิพลของอัตราการไหลของวัสดุแกนด้วย

ข้อเสนอแนะ

- ศึกษาผลของการผลิตที่มีต่อปริมาณปีตาแคโรทีนที่เหลือ
- ศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยของไมโครแคปซูลเนื่องจากการแพรว
- ศึกษาการเก็บรักษาไมโครแคปซูล

รายการอ้างอิง

- Alexander, E. 1973. Carotenoid properties and application. Food Technol. 4: 38-42.
- Arshady, R. 1993. Microcapsules for food. J. Microencapsulation 10(4): 413-435.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 1995. Official Methods of Analysis of AOAC International. 16th ed. Virginia: AOAC International.
- Bauernfeind, J. C. 1981. Carotenoids as colorants and vitamin A precursors. New York: Academic Press.
- BeMiller, J. N., and Whistler, R. L. 1996. Carbohydrates. In O. R. Fennema (ed.), Food chemistry, pp. 157-223. New York: Marcel Dekker.
- Bendich, R. J., and Olson, J. A. 1989. Biological actions of carotenoids. FASEB J. 3: 1927-1932.
- Brazel, C. S. 1999. Microencapsulation: Offering solutions for the food industry. Cereal Foods World 44(6): 388-393.
- Bungenberg de Jong, H. G. 1949. Reverse system. In H. G. Kruyt (ed.), Colloid Science. Vol. 2. pp. 835-432. New York: Elsevier.
- Chan, L. W., Lim, L. T., and Heng, P. W. S. 2000. Microencapsulation of oils using sodium alginate. J. Microencapsulation 17(6): 757-766.
- Chen, A. C., Veiga, M. F., and Rizzuto, A. B. 1988. Cocrystallization: An encapsulation process. Food Technol. 42(11): 87-90.
- Chen, B. H., Peng, H. Y., and Chen, H. E. 1995. Changes of carotenoids color, and vitamins during processing of carrot juice. J. Agric. Food Chem. 43: 1912-1918.
- Cochran, W. G., and Cox, G. M. 1957. Experimental designs. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Daesy, P. B. 1984. Microencapsulation and related drug processes. Drugs and the pharmaceuticals: A handbook for pharmacists. 2nd ed. pp. 1-95. New York: John Wiley & Sons.
- Desobry, S. A., Netto, F. M., and Labuza, T. P. 1997. Comparison of spray-drying, drum-drying and freeze-drying for β -carotene encapsulation and preservation. J. Food Sci. 62(6): 1158-1162.

- Dziezak, J. D. 1988. Microencapsulation and encapsulated ingredients. Food Technol. 42(4): 136-151.
- Finch, C. A. 1993. Industrial microencapsulation: Polymers for microcapsule walls. In D. R. Karsa and R. A. Stephenson (eds.), Encapsulation and controlled release, pp. 1-12. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- Franjione, J., and Vasishtha, N. 1995. The art and science of microencapsulation. Tech. Today 16(2): 14-19.
- Gibbs, B. F., Kermasha, S., Alli, I., and Mulligan, C. N. 1999. Encapsulation in the food industry: A review. Int. J. Food Sci. Nutr. 50(3): 213-224.
- Goodwin, J. T., and Somerville, G. R. 1974. Microencapsulation by physical methods. ChemTech 4(10): 623-626.
- Gregory, J. F. 1996. Vitamins. In O. R. Fennema (ed.), Food chemistry. 3rd ed. pp. 531-616. New York: Marcel Dekker.
- Halter, S. 1989. Vitamin A: Its role and chemoprevention and chemotherapy of cancer. Human Pathol. 20: 205-209.
- Igoe, R. S. 1989. Dictionary of food ingredients. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Jackson, L. S., and Lee, K. 1991. Microencapsulation and the food industry. Lebensm.-Wiss. u.-Technol. 24(4): 289-297.
- King, A. H. 1988. Flavor encapsulation with alginates. In S. J. Risch and G. A. Reineccius (eds.), Flavor encapsulation, pp. 26-39. Washington, DC: American Chemical Society.
- King, A. H. 1995. Encapsulation of food ingredients: A review of available technology, focusing on hydrocolloids. In S. J. Risch and G. A. Reineccius (eds.), Encapsulation and controlled release of food ingredients, pp. 26-39. Washington, DC: American Chemical Society.
- Kondo, A. 1979. Microcapsule processing and technology. New York: Marcel Dekker.
- Kondo, T. 1978. Microcapsules: Their preparation and properties. In E. Matijevic (ed.), Surface and colloid science. Vol. 10. pp. 1-42. New York: Plenum Press.
- Luzzi, L. A. 1970. Microencapsulation. J. Pharm. Sci. 59(10): 1367-1376.
- Macrae, R., Robinson, R. K., and Sadler, M. J. 1993. Carotenoids. Encyclopedia of Food Science, Food Technology, and Nutrition 1: 707-718.

- Moe, S. T., Draget, K. I., Skjåk-Bræk, G., and Smidsrød, O. 1995. Aginates. In A. M. Stephen (ed.), Food polysaccharides and their applications, pp. 245-286. New York: Marcel Dekker.
- Neau, S. H., Goskonda, S. R., Upadrashta, S. M., Thies, C. A., and Tripp, S. A. 1993. Encapsulation of volatile oil by ionic gelation of aginate. Am. J. Pharm. Educ. 57(2): 126-129.
- Pothakamury, U. R., and Barbosa-Canovas, G. V. 1995. Fundamental aspects of controlled release in foods. Trends in Food Sci. & Tech. 6(12): 397-406.
- Qi, Z. H., and Xu, A. 1999. Starch-based ingredients for flavor encapsulation. Cereal Foods World 44(7): 460-465.
- Rosenberg, M., Kopelman, I. J., and Talmon, Y. 1985. A scanning electron microscopy study of microencapsulation. J. Food Sci. 50(1): 139-144.
- Schlameus, W. 1995. Centrifugal extrusion encapsulation. In S. J. Risch and G. A. Reineccius (eds.), Encapsulation and controlled release of food ingredients, pp. 96-103. Washington, DC: American Chemical Society.
- Shahdi, F., and Han, X. Q. 1993. Encapsulation of food ingredients. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 33(6): 501-547.
- Shue, T-Y., and Rosenberg, M. 1995. Microencapsulation by spray drying ethyl caprylate in whey protein and carbohydrate wall systems. J. Food Sci. 60(1): 98-103.
- Sims, C. A., Balaban, M. O., and Matthews, R. F. 1993. Optimization of carrot juice color and cloud stability. J. Food Sci. 58(5): 1129-1131.
- Smidsrød, O., and Draget, K. I. 1996. Chemistry and physical properties of alginates. Carbohydrate in Europe 14: 6-13.
- Smith, R. E. 1993. Food demands of the emerging consumer: The role of modern food technology in meeting that challenge. Am. J. Clin. Nutr. 58(2): 307S-312S.

- Sparks, R. E., Jacobs, I. C., and Mason, N. S. 1993. Centrifugal suspension-separation coating of particles and droplets. In M. S. El-Nokaly, D. M. Piatt, and B. A. Charpentier (eds.), Polymeric delivery systems: Properties and applications, pp. 144-151. Washington, DC: American Chemical Society.
- Sparks, R. E., and Jacobs, I. C. 1999. Selection of coating and microencapsulation processes. In H. B. Scher (ed.), Controlled-release delivery systems for pesticides, pp. 3-29. New York: Marcel Dekker.
- Sulaeman, A., Keeler, L., Giraud, D. W., Taylor, S. L., Wehling, R. L., and Driskell, J. A. 2001. Carotenoid content and physicochemical and sensory characteristics of carrot chips deep-fried in different oils at several temperatures. J. Food Sci. 66(9): 1257-1264.
- Tee, E. S. 1992. Carotenoids and retinoid in human nutrition. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 31(1/2): 103-163.
- Todd, R. D. 1970. Microencapsulation and flavour industry. Flavour Ind. 1: 768.
- Wagner, L. A., and Warthesen, J. J. 1995. Stability of spray-dried encapsulated carrot carotenes. J. Food Sci. 60(5): 1048-1053.
- Young, S. L., Sarda, X., and Rosenberg, M. 1993. Microencapsulating properties of whey proteins. 1. Microencapsulation of anhydrous milk fat. J. Dairy Sci. 76(10): 2868-2877.
- Ziegler, R. G. 1989. A review of epidemiologic evidence that carotenoids reduce the risk of cancer. J. Nutr. 119(1): 116-122.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์และวิธีคำนวณ

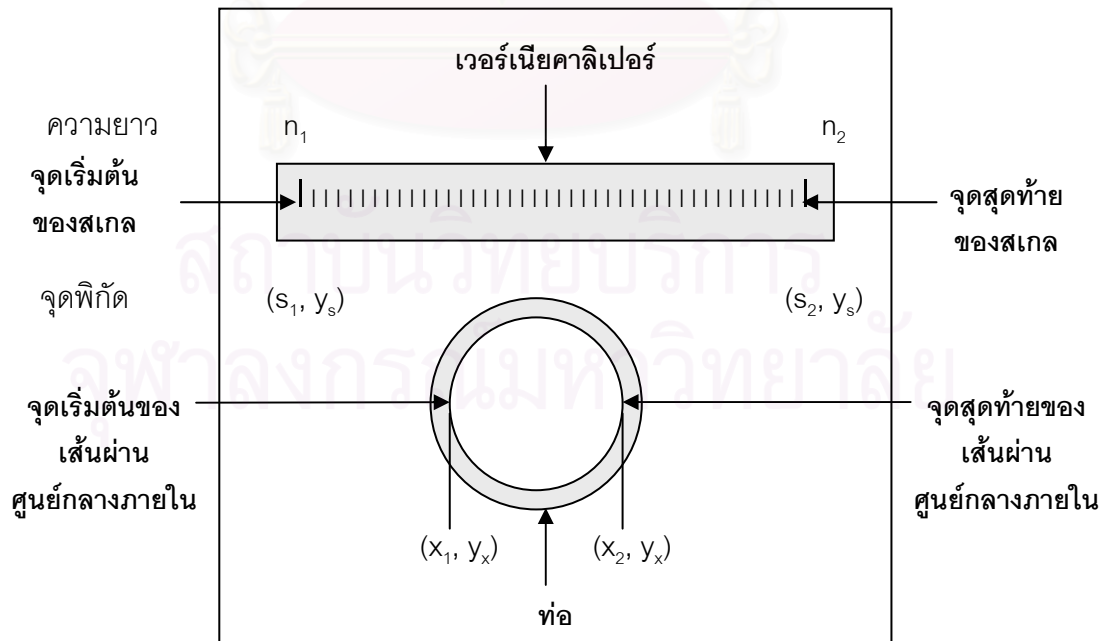
ก.1 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ

อุปกรณ์

1. เเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Mitutoyo)
2. กล้องดิจิทัล (Nikon รุ่น COOLPIX 775)

วิธีการ

1. นำส่วนปลายของ bi-fluid nozzle มาถ่ายรูปพร้อมกับเวอร์เนียคาลิเปอร์ ด้วยกล้องดิจิทัล โดยให้เห็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ
2. เปิดรูปถ่ายจากกล้องดิจิทัลด้วยโปรแกรม Microsoft Photo Editor
3. บันทึกจุดพิกัดของสเกลเวอร์เนียคาลิเปอร์ที่จุดเริ่มต้น (s_1, y_s) และจุดสุดท้าย (s_2, y_s) ที่ต้องการวัด โดยบันทึกความยาวเป็นมิลลิเมตรจากสเกลของเวอร์เนียคาลิเปอร์ที่จุดเริ่มต้น (n_1) และจุดสุดท้าย (n_2) เอาไว้ด้วย ดังรูปที่ ก.1
4. บันทึกจุดพิกัดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อที่จุดเริ่มต้น (x_1, y_x) และจุดสุดท้าย (x_2, y_x) ดังรูปที่ ก.1
5. คำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในซึ่งมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร



ภาพที่ ก.1 ค่าที่บันทึกได้จากรูปถ่ายจากกล้องดิจิทัล เพื่อใช้ในการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ

การคำนวณ

$$\frac{\text{จำนวนหน่วยต่อมิลลิเมตร}}{\text{(หน่วย/มิลลิเมตร)}} = \frac{s_2 - s_1}{n_2 - n_1}$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (หน่วย)} = x_2 - x_1$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (มิลลิเมตร)} = \frac{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน}}{\text{จำนวนหน่วยต่อมิลลิเมตร}}$$

ก.2 การหาอัตราการไหลของสารเคลือบ

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งละเอียด (AND, HR-200)
2. เครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล

สารเคมี

1. โซเดียมอัลจิเนต (A.R. grade) เตรียมเป็นสารละลายในน้ำ deionized ให้มีความเข้มข้น 1.50 % (โดยน้ำหนัก)

วิธีการ

1. นำสารละลายโซเดียมอัลจิเนตใส่ในถังเก็บสารเคลือบซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของเครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล
2. นำถังเก็บสารเคลือบไปต่อเข้ากับส่วนอื่น ๆ ของเครื่องมือให้เรียบร้อย
3. เปิดก๊าซไนโตรเจนให้มีความดัน 1.5 บาร์ แล้วเปิดวาล์วที่อยู่ใต้ถังเก็บสารเคลือบให้สารละลายโซเดียมอัลจิเนตไหลออกจากถังเก็บ
4. นำปีกเกอร์ที่รูปร่างหนักแน่นแล้วมาเก็บสารละลายโซเดียมอัลจิเนตที่ไหลออกมาจากท่อด้านนอกของ bi-fluid nozzle ในเวลา 1 นาที
5. ชั่งน้ำหนักปีกเกอร์ดังกล่าวโดยใช้เครื่องชั่งละเอียด

การคำนวณ

$$\frac{\text{อัตราการไหลของสารเคลือบ}}{\text{(กรัม/นาที)}} = \frac{\text{น้ำหนักปีกเกอร์และสารละลาย} - \text{น้ำหนักปีกเกอร์}}{\text{เวลา}}$$

$$\frac{\text{อัตราการไหลของสารเคลือบ}}{\text{(มิลลิลิตร/นาที)}} = \frac{\text{อัตราการไหล (กรัม/นาที)}}{\text{ความหนาแน่นของสารละลาย (กรัม/มิลลิลิตร)}}$$

ก.3 การหาอัตราการไหลของวัสดุแกน

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งละเอียด (AND, HR-200)
2. เครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล

สารเคมี

1. all-trans β -carotene (A.R. grade) เตรียมเป็นสารละลายในน้ำมันรำข้าวให้มีความเข้มข้น 0.25 % (โดยน้ำหนัก)

วิธีการ

1. นำสารละลายบีตาแคโรทีนใส่ในถังเก็บวัสดุแกนซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของเครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล
2. นำถังเก็บวัสดุแกนไปต่อเข้ากับส่วนอื่น ๆ ของเครื่องมือให้เรียบร้อย
3. เปิดก๊าซไนโตรเจนให้มีความดัน 0.8 บาร์ แล้วเปิดวาล์วที่อยู่ใต้ถังเก็บวัสดุแกนให้สารละลายไซโตเคียมอัลจินเตไหลออกจากถังเก็บ
4. นำปีกเกอร์ที่รูน้หนักแน่นมาแล้วมาเก็บสารละลายบีตาแคโรทีนที่ไหลออกมาจากท่อด้านในของ bi-fluid nozzle ในเวลา 1 นาที
5. ชั่งน้ำหนักปีกเกอร์และสารละลายโดยใช้เครื่องชั่งละเอียด

การคำนวณ

$$\text{อัตราการไหลของวัสดุแกน (กรัม/นาที)} = \frac{\text{น้ำหนักปีกเกอร์และสารละลาย} - \text{น้ำหนักปีกเกอร์}}{\text{เวลา}}$$

$$\text{อัตราการไหลของวัสดุแกน (มิลลิลิตร/นาที)} = \frac{\text{อัตราการไหล (กรัม/นาที)}}{\text{ความหนาแน่นของสารละลาย (กรัม/มิลลิลิตร)}}$$

ก.4 การคำนวณสัดส่วนของวัสดุแกนในไมโครแคปซูล

การคำนวณ

$$\text{สัดส่วนของวัสดุแกนในไมโครแคปซูล (\%)} = \frac{\text{อัตราการไหลของวัสดุแกน} \times 100}{\text{อัตราการไหลของวัสดุแกน} + \text{อัตราการไหลของสารเคลือบ}}$$

ก.5 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูลก่อนอบและหลังอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ดัดแปลงตามวิธีของ Rosenberg และคณะ (1985)

อุปกรณ์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL รุ่น JSM-5410LV)
ปริ้นท์รูปด้วย SONY , video graphic printer UP-880

วิธีการ

1. เตรียมตัวอย่างของผนังไมโครแคปซูลสำหรับใช้ส่องลักษณะทางสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวภายใน โดยนำไมโครแคปซูลมาผ่าครึ่งด้วยมีดโกน แล้วปล่อยให้วัสดุแกนไหลออกจากผนังของไมโครแคปซูลจนหมด
2. ติดตัวอย่างผนังไมโครแคปซูล และไมโครแคปซูลทั้งเม็ด (เพื่อใช้ส่องดูพื้นผิวภายนอก) ลงบนฐานรองตัวอย่าง (stub) ด้วยเทป 2 หน้าหรือน้ำยาทาเล็บ
3. นำตัวอย่างไปฉาบด้วยเครื่องฉาบทอง (ion sputter)
4. นำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

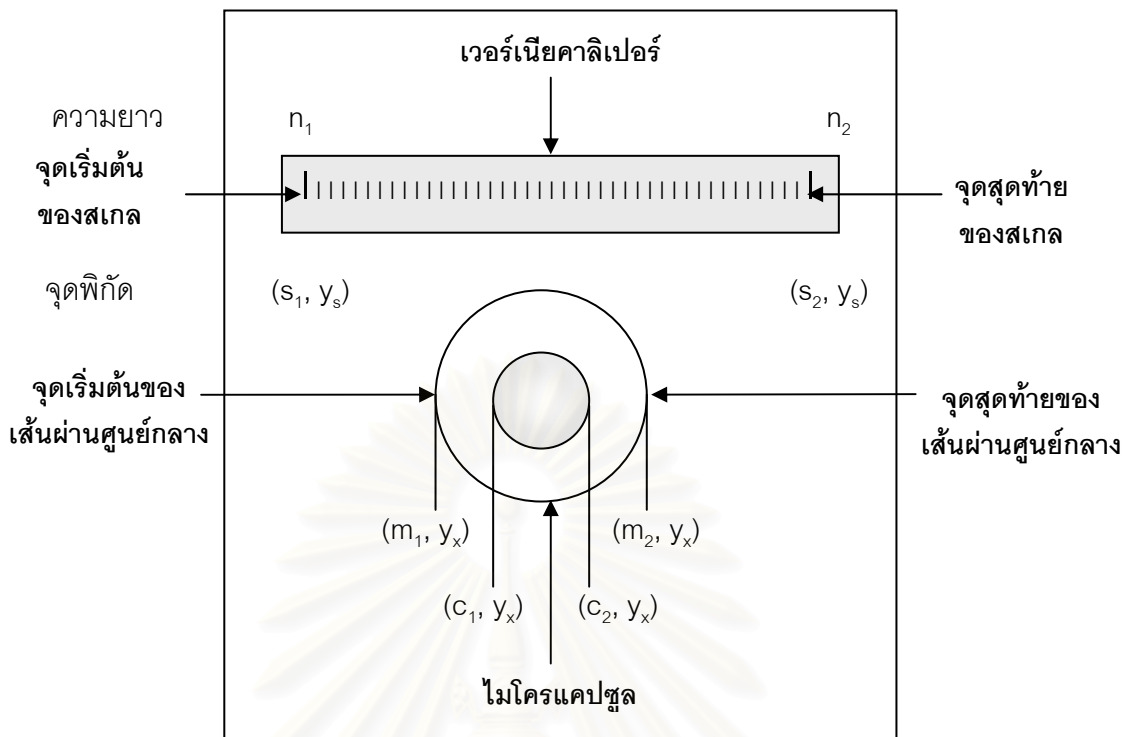
ก.6 การหาขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูล อนุภาคของวัสดุแกน และความหนาของผนังไมโครแคปซูล

อุปกรณ์

1. เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Mitutoyo)
2. กล้องดิจิทัล (Nikon รุ่น COOLPIX 775)

วิธีการ

1. ถ่ายรูปไมโครแคปซูลพร้อมกับเวอร์เนียคาลิเปอร์ด้วยกล้องดิจิทัล
2. เปิดรูปถ่ายจากกล้องดิจิทัลด้วยโปรแกรม Microsoft Photo Editor
3. บันทึกจุดพิกัดของสเกลเวอร์เนียคาลิเปอร์ที่จุดเริ่มต้น (s_1, y_s) และจุดสุดท้าย (s_2, y_s) ที่ต้องการวัด โดยบันทึกความยาวเป็นมิลลิเมตรจากสเกลของเวอร์เนียคาลิเปอร์ที่จุดเริ่มต้น (n_1) และจุดสุดท้าย (n_2) เอาไว้ด้วย ดังรูปที่ ก.2
4. บันทึกจุดพิกัดของเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครแคปซูลที่จุดเริ่มต้น (m_1, y_x) และจุดสุดท้าย (m_2, y_x) และจุดพิกัดของเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครแคปซูลที่จุดเริ่มต้น (c, y_x) และจุดสุดท้าย (c_2, y_x) ดังรูปที่ ก.2
5. คำนวณหาขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูล อนุภาคของวัสดุแกน และความหนาของผนังไมโครแคปซูล ซึ่งมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร



ภาพที่ ก.2 ค่าที่บันทึกได้จากรูปถ่ายจากกล้องดิจิทัล เพื่อใช้ในการคำนวณขนาดอนุภาคของ ไมโครแคปซูล อนุภาคของวัสดุแกน และความหนาของผนังไมโครแคปซูล

การคำนวณ

$$\frac{\text{จำนวนหน่วยต่อมิลลิเมตร}}{(\text{หน่วย/มิลลิเมตร})} = \frac{s_2 - s_1}{n_2 - n_1}$$

$$\text{ขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูล (มิลลิเมตร)} = \frac{m_2 - m_1}{\text{จำนวนหน่วยต่อมิลลิเมตร}}$$

$$\text{ขนาดอนุภาคของวัสดุแกน (มิลลิเมตร)} = \frac{c_2 - c_1}{\text{จำนวนหน่วยต่อมิลลิเมตร}}$$

$$\text{ความหนาของผนังไมโครแคปซูล (มิลลิเมตร)} = \frac{\text{ขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูล} - \text{ขนาดอนุภาคของวัสดุแกน}}{2}$$

ก.7 การหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูล อนุภาคของวัสดุแกน และความหนาของผนังไมโครแคปซูล

วิธีการ

1. นำรูปถ่ายของไมโครแคปซูล 100 ไมโครแคปซูลมาหาขนาดอนุภาคของไมโครแคปซูล อนุภาคของวัสดุแกน และความหนาของผนังไมโครแคปซูล
2. นำข้อมูลมาเขียนตารางแจกแจงความถี่ โดยแต่ละช่วงของความถี่มีค่า 0.05 มิลลิเมตร นับจำนวนไมโครแคปซูล (n) ที่อยู่ในช่วงที่กำหนด แล้วคำนวณเป็น จำนวน (%) ไมโครแคปซูลที่มีขนาดเท่ากับค่ากลางของช่วงความถี่
3. เขียนกราฟการกระจายของขนาด

การคำนวณ

$$\text{ค่ากลางของช่วงความถี่ (มิลลิเมตร)} = \frac{\text{ขอบเขตบน} - \text{ขอบเขตล่าง}}{2}$$

$$\begin{aligned} \text{จำนวน (\%)} &= \frac{n \times 100}{\text{จำนวนไมโครแคปซูลทั้งหมดที่นำมาวัดขนาด}} \\ &= \frac{n \times 100}{100} \\ &= n \end{aligned}$$

ก.8 การวัดค่าสี (ดัดแปลงจาก Desobry และคณะ (1997))

อุปกรณ์

1. เครื่องวัดสี Chroma meter (Minolta Chroma Meter, CR 300 series)
2. ภาชนะพลาสติก HDPE สีดำทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เซนติเมตร สูง 1.0 เซนติเมตร
3. Petridish

วิธีการ

1. นำตัวอย่างใส่ลงในภาชนะพลาสติก HDPE สีดำจนเต็ม แล้วปิดด้วย Petridish
2. วัดค่าสีในระบบ CIE คือ ค่า a^* และ b^*

ก.9 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ดัดแปลงจาก AOAC (1995) Method 925.10

อุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน (hot air oven, WTB Binder รุ่น E53)
2. ถ้วยอะลูมิเนียม
3. เครื่องชั่งละเอียดตศนิยม 4 ตำแหน่ง (AND, HR-200)
4. โถดูดความชื้น

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอน 2-3 กรัม ลงในถ้วยอะลูมิเนียม (อบในตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนักถ้วยเปล่าไว้)
2. นำตัวอย่างไปอบในตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยเปิดฝาด้วยอะลูมิเนียมไว้
3. นำถ้วยอะลูมิเนียมออกจากตู้อบ ปิดฝาด้วยและทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนักถ้วยพร้อมตัวอย่าง
4. นำไปอบต่ออีก 1 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่ โดยให้มีความชื้นเปลี่ยนแปลงได้ ร้อยละ 0.2
5. ชั่งน้ำหนักถ้วยอะลูมิเนียมพร้อมตัวอย่าง แล้วลบด้วยน้ำหนักถ้วยเปล่าจะได้น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ
6. คำนวณปริมาณความชื้น โดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{[\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)}] \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)}}$$

ก.10 การหาอัตราการผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งละเอียด (AND, HR-200)
2. เครื่องมือที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูล

สารเคมี

1. โซเดียมอัลจีเนต (A.R. grade) เตรียมเป็นสารละลายในน้ำ deionized ให้มีความเข้มข้น 1.50 % (โดยน้ำหนัก)
2. all-trans β -carotene (A.R. grade) เตรียมเป็นสารละลายในน้ำมันรำข้าวให้มีความเข้มข้น 0.25 % (โดยน้ำหนัก)

3. แคลเซียมคลอไรด์ เตรียมเป็นสารละลายในน้ำ deionized ให้มีความเข้มข้น 1.50 % (โดยน้ำหนัก)

วิธีการ

1. ผลิตไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน โดยมีอัตราการไหลของวัสดุแกนและสารเคลือบตามที่กำหนดไว้
2. นำบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่รู้น้ำหนักแน่นอนแล้วมาเก็บไมโครแคปซูลที่ผลิตออกมาจาก bi-fluid nozzle ในเวลา 1 นาที
3. ชั่งน้ำหนักบีกเกอร์ดังกล่าวโดยใช้เครื่องชั่งละเอียด
4. นับจำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ใน 1 นาที
5. นำไมโครแคปซูลไปกรอง แล้วอบในตู้อบสุญญากาศ ชั่งน้ำหนักไมโครแคปซูลที่ผลิตได้หลังอบ
6. คำนวณอัตราการผลิตของไมโครแคปซูล ซึ่งอยู่ในหน่วย ไมโครแคปซูล/นาที และ กรัม/นาที

การคำนวณ

$$\text{จำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ (ไมโครแคปซูล/นาที)} = \frac{\text{จำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้}}{\text{เวลาที่ใช้ในการผลิตไมโครแคปซูล}}$$

$$\text{ปริมาณไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ก่อนอบ (กรัม/นาที)} = \frac{\text{น้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ก่อนอบ}}{\text{เวลาที่ใช้ในการผลิตไมโครแคปซูล}}$$

$$\text{ปริมาณไมโครแคปซูลที่ผลิตได้หลังอบ (กรัม/นาที)} = \frac{\text{น้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้หลังอบ}}{\text{เวลาที่ใช้ในการผลิตไมโครแคปซูล}}$$

ก.11 การคำนวณไมโครแคปซูลของปีตาแคโรทีน

การคำนวณ

$$\text{น้ำหนักของไมโครแคปซูลก่อนอบ (กรัม/ไมโครแคปซูล)} = \frac{\text{ปริมาณไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ก่อนอบ}}{\text{จำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้}}$$

$$\text{น้ำหนักของไมโครแคปซูลหลังอบ (กรัม/ไมโครแคปซูล)} = \frac{\text{ปริมาณไมโครแคปซูลที่ผลิตได้หลังอบ}}{\text{จำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้}}$$

ก.12 การค่า hardness ของไมโครแคปซูล

อุปกรณ์

1. เครื่อง Texture analyzer (Model TA:XT2I)
2. หัวกด (T100)

วิธีทดลอง

1. calibrate force ด้วยตุ้มน้ำหนัก 5 กิโลกรัม
2. ปรับความเร็วการเคลื่อนที่ของ load cell ดังนี้
 - Pre test speed : 1 มิลลิเมตรต่อวินาที
 - Test speed : 1 มิลลิเมตรต่อวินาที
 - Post test speed : 1 มิลลิเมตรต่อวินาที
 - Distance : 25 มิลลิเมตร
3. วางตัวอย่างบนแป้นวาง โดยให้ตัวอย่างอยู่ตรงกลางแท่น
4. กดปุ่ม run a test เพื่อให้หัวกดเคลื่อนลงมาที่ตัวอย่าง จนกระทั่งตัวอย่างแตกออกจากกัน โดยค่าแรงที่สูงที่สุดค่าแรก (maximum force) ที่อ่านได้จากกราฟ คือค่าความแข็ง (hardness) ของตัวอย่าง

ภาคผนวก ข

ความหนืดของวัสดุแกนและสารเคลือบที่ใช้ผลิต ไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน

ข.1 ความหนืดของวัสดุแกนและสารเคลือบที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน

ตารางที่ ข.1 ความหนืดของวัสดุแกนและสารเคลือบที่ใช้ผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน
เมื่อวัดด้วย Brookfield viscometer

สารละลาย	ความเข้มข้น (% โดยน้ำหนัก)	สภาวะที่ใช้วัดความหนืด		ความหนืด (เซนติพอยส์)
		เบอร์เข็ม	ความเร็วรอบ (rpm)	
บีตาแคโรทีน	0.25	1	50	65.0
โซเดียมอัลจิเนต	1.50	3	50	976

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ค.1 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครแคปซูลก่อนอบ

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครแคปซูลก่อนอบ

SOV	df	MS	F
อัตราการไหลของวัสดุแกน (A)	1	0.086*	36.179*
อัตราการไหลของสารเคลือบ (B)	2	0.005	2.289
AxB	2	0.002	0.807
Error	12	0.002	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค.2 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาควัสดุแกนในไมโครแคปซูลก่อนอบ

ตารางที่ ค.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาควัสดุแกนในไมโครแคปซูลก่อนอบ

SOV	df	MS	F
อัตราการไหลของวัสดุแกน (A)	1	0.020*	16.000*
อัตราการไหลของสารเคลือบ (B)	2	0.090*	72.360*
AxB	2	0.012*	9.880*
Error	12	0.001	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค.3 การหาความหนาของผนังไมโครแคปซูลก่อนอบ

ตารางที่ ค.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของความหนาของผนังไมโครแคปซูลก่อนอบ

SOV	df	MS	F
อัตราการไหลของวัสดุแกน (A)	1	0.046*	79.625*
อัตราการไหลของสารเคลือบ (B)	2	0.034*	57.990*
AxB	2	0.002	2.952
Error	12	0.001	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค.4 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครแคปซูลหลังอบ

ตารางที่ ค.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครแคปซูลหลังอบ

SOV	df	MS	F
อัตราการไหลของวัสดุแกน (A)	1	0.186*	65.536*
อัตราการไหลของสารเคลือบ (B)	2	0.111*	39.137*
AxB	2	0.011*	3.963*
Error	12	0.003	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.5 การหาค่าความแดง (a^*) ของไมโครแคปซูลหลังอบ

ตารางที่ ค.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความแดง (a^*) ของไมโครแคปซูลหลังอบ

SOV	df	MS	F
อัตราการไหลของวัสดุแกน (A)	1	37.382*	313.071*
อัตราการไหลของสารเคลือบ (B)	2	7.419*	62.135*
AxB	2	6.198*	51.905*
Error	12	0.119	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค.6 การหาค่าความเหลือง (b^*) ของไมโครแคปซูลหลังอบ

ตารางที่ ค.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าความเหลือง (b^*) ของไมโครแคปซูลหลังอบ

SOV	df	MS	F
อัตราการไหลของวัสดุแกน (A)	1	12.701*	114.399*
อัตราการไหลของสารเคลือบ (B)	2	7.872*	70.901*
AxB	2	3.599*	32.415*
Error	12	0.111	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค.7 การหาความชื้นของไมโครแคปซูลแห้งอบ

ตารางที่ ค.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของความชื้นของไมโครแคปซูลแห้งอบ

SOV	df	MS	F
อัตราการใช้ของวัสดุแกน (A)	1	2.859*	835.486*
อัตราการใช้ของสารเคลือบ (B)	2	1.936*	565.783*
AxB	2	0.671*	196.086*
Error	12	0.003	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค.8 การหาจำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้

ตารางที่ ค.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของจำนวนไมโครแคปซูลที่ผลิตได้

SOV	df	MS	F
อัตราการใช้ของวัสดุแกน (A)	1	1936.701*	188.642*
อัตราการใช้ของสารเคลือบ (B)	2	5229.288*	509.351*
AxB	2	230.024*	22.405*
Error	12	10.267	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.9 การหาน้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ก่อนอบ

ตารางที่ ค.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของน้ำหนักไมโครแคปซูลที่ผลิตได้ก่อนอบ

SOV	df	MS	F
อัตราการใช้ของวัสดุแกน (A)	1	8.296*	68.932*
อัตราการใช้ของสารเคลือบ (B)	2	52.756*	438.353*
AxB	2	2.689*	22.340*
Error	12	0.120	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค.10 การหาน้ำหนักของไมโครแคปซูลที่ผลิตได้หลังอบ

ตารางที่ ค.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของน้ำหนักไมโครแคปซูลที่ผลิตได้หลังอบ

SOV	df	MS	F
อัตราการใช้ของวัสดุแกน (A)	1	0.577*	1736.739*
อัตราการใช้ของสารเคลือบ (B)	2	0.071*	214.709*
AxB	2	0.001	2.051
Error	12	3.325E-04	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.11 การหาน้ำหนักของไมโครแคปซูลก่อนอบ

ตารางที่ ค.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของน้ำหนักไมโครแคปซูลก่อนอบ

SOV	df	MS	F
อัตราการใช้ของวัสดุแกน (A)	1	6.689E-05*	15.064*
อัตราการใช้ของสารเคลือบ (B)	2	2.695E-05*	6.069*
AxB	2	1.774E-06	.399
Error	12	4.441E-06	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค.12 การหาน้ำหนักของไมโครแคปซูลหลังอบ

ตารางที่ ค.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของน้ำหนักไมโครแคปซูลหลังอบ

SOV	df	MS	F
อัตราการใช้ของวัสดุแกน (A)	1	8.000E-06*	464.516*
อัตราการใช้ของสารเคลือบ (B)	2	6.965E-06*	404.419*
AxB	2	1.152E-06*	66.871*
Error	12	1.722E-08	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค.13 การหาค่า hardness ของไมโครแคปซูลหลังอบ

ตารางที่ ค.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่า hardness ของไมโครแคปซูลหลังอบ

SOV	df	MS	F
อัตราการใช้ของวัสดุแกน (A)	1	1562908.464*	334.600*
อัตราการใช้ของสารเคลือบ (B)	2	26584.154*	5.691*
AxB	2	12820.750	2.745
Error	12	4670.978	

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรลักษณ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา เกิดเมื่อวันที่ 12 กันยายน 2520 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2542

ผลงานทางวิชาการ

- วรลักษณ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา, พาสวดี ประทีปะเสน และชิตพงศ์ ประดิษฐสุวรรณ. การผลิตไมโครแคปซูลของบีตาแคโรทีน. การเสนอผลงานวิชาการแบบบรรยาย. การประชุมวิชาการครั้งที่ 11 ประจำปี 2546, 18-19 มีนาคม. กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย