# การกักเก็บเมนทอลในแป้งข้าวเจ้าโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย

นางสาวพิชญ์วิภา พรหมมาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

# ENCAPSULATION OF MENTHOL IN RICE STARCH BY SPRAY DRYING

Miss Pitchvipa Prommas

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2013
Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การกักเก็บเมนทอลในแป้งข้าวเจ้าโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย |
| โดย | นางสาวพิชญ์วิภา พรหมมาศ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเคมี |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภินันท์ สุทธิธารธวัช |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ดร.อุรชา รักษ์ตานนท์ชัย |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…………………………………………..….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………….……………... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อาทิวรรณ โชติพฤกษ์)

…………………………………………..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภินันท์ สุทธิธารธวัช)

…………………………………………..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร.อุรชา รักษ์ตานนท์ชัย)

…………………………………………… กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โศรดา กนกพานนท์)

…………………………………………… กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต พุทธิพิพัฒน์ขจร)

พิชญ์วิภา พรหมมาศ : การกักเก็บเมนทอลในแป้งข้าวเจ้าโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย (ENCAPSULATION OF MENTHOL IN RICE STARCH BY SPRAY DRYING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.อภินันท์ สุทธิธารธวัช, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.อุรชา รักษ์ตานนท์ชัย,167 หน้า.

การกักเก็บเมนทอลโดยใช้เฉพาะแป้งข้าวเจ้านั้น จะให้ค่าร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งประมาณ 1.8% ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีการที่จะเพิ่มค่าการกักเก็บ เช่น การหาปริมาณของแข็งในสายป้อนที่เหมาะสม เพื่อให้อนุภาคสามารถเกิดเป็นโครงสร้างที่กักเก็บเมนทอลได้ การเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ การเติมสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม รวมถึงปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำ เช่น อุณหภูมิอากาศขาเข้า ความเร็วรอบของหัวฉีดแบบจากหมุน และความเร็วในการป้อนสารเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย อย่างไรก็ตามจากการเพิ่มค่าการกักเก็บด้วยวิธีที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งมีค่าสูงถึง 73.7% จากนั้นนำแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บนี้มาเปรียบเทียบคุณสมบัติกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ที่อุณหภูมิ 35 37 และ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิของร่างกาย จากการทดลองนั้นพบว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บเมื่อผ่านไป 8 ชั่วโมง จะยังมีปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งมากถึง 90% นั่นหมายถึงเมนทอลจะสามารถปลดปล่อยออกมาได้เป็นระยะเวลานานขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาดที่มีปริมาณเมนทอลคงเหลือเพียง 70% 60% และ 40% ที่อุณหภูมิ 35 37 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการนำแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บไปใช้งานจริงนั้น มีราคาต้นทุนที่ค่อนข้างแพงเมื่อเทียบกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ดังนั้นแนวทางหนึ่งคือการนำแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บไปผสมกับทัลคัม เพื่อลดต้นทุนโดยสามารถคำนวณอัตราส่วนของการผสมจากค่าคงที่การปลดปล่อยเมนทอล ซึ่งพบว่าต้องใช้แป้งที่ผ่านการกักเก็บผสมกับทัลคัมในอัตราส่วนโดยมวล 1: 0.4 และ 1:1 เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านดัดแปลงมากักเก็บเมนทอลตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณระยะเวลาการออกฤทธิ์เย็นของแป้ง ซึ่งพบว่าแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านดัดแปลงจะออกฤทธิ์เย็นยาวนานถึง 125 ชั่วโมงและ 100 ชั่วโมงตามลำดับ ขณะที่แป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาดออกฤทธิ์เย็นเพียงแค่ 13.5 ชั่วโมง

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต.................................................

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก........................

ปีการศึกษา 2556 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม........................

# # 5470301121: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MENTHOL/ SPRAY DRYING / RICE STARCH/ ENCAPSULATION/ CONTROL RELEASE

PITCHVIPA PROMMAS: ENCAPSULATION OF MENTHOL IN RICE STARCH BY SPRAY DRYING, ADVISOR: APINAN SOOTTITANTAWAT, D.Eng., CO-ADVISOR: URACHA RUKTANOONCHAI, Ph.D., 167 pp.

Encapsulation of menthol by using only rice flour resulted in low retention at 1.8%. To obtain higher retention an addition of solid content, emulsifier, film forming material, an increase in drying rate from spay drying parameters such as inlet temperature, feed flow rate and atomizer speed could be employed to enhance retention to 73.7%. A comparison on the properties of encapsulated powder and commercial powder were made. Encapsulated powder could retain the menthol 90% at 35°C, 37°C and 40°C. On the other hand, the commercial powder could retain the menthol only 70%, 60% and 40% at 35°C, 37°C and 40°C, respectively. The results showed that the encapsulated powder could slowly release menthol from the particle, suggesting its long lasting efficiency and cooling time. The encapsulated powder could be mixed with talcum to reduce operative cost. The mixing formula and the cooling time could be calculated from rate constant. The results found that mass ratio between encapsulated powder and talcum were 1:0.4 and 1:1 when using rice flour and modified starch. The cooling time of these particles were 125 hours and 100 hours, while, the cooling time of commercial powder was 13.5 hours.

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

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

Academic Year: 2013 Co-advisor's Signature…………………..

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ได้ เนื่องจากได้รับคำปรึกษาและคำแนะนำในการทำงานวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นต่างๆ จากบุคคลหลายท่าน

ท่านแรกขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำปรึกษาตลอดงานวิจัยและให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ ดร.อุรชา รักษ์ตานนท์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของงานวิจัย ที่ช่วยแนะนำและเปิดมุมมองในการนำงานวิจัยนี้ไปพัฒนาในการใช้งานจริง ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.Yoshii Hidefumi ที่ให้โอกาสไปทำงานวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่นตลอดจนคำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ขอขอบพระคุณ Noriko Okamori ที่คอยช่วยเหลือและสอนการใช้เครื่องมือต่างๆ ตลอดช่วงเวลาในการไปทำงานวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่น ตลอดจนรองศาสตราจารย์ ดร.อาทิวรรณ โชติพฤกษ์ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต พุทธิพิพัฒน์ขจร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โศรดา กนกพานนท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการสอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี สำหรับค่าเล่าเรียน ตลอดจนศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีอนุภาคไทย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติสำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่คอยเป็นกำลังใจ และคอยดูแลในทุกๆ ด้านมาโดยตลอด และขอขอบคุณทุกท่านทั้งที่เอ่ยนามและไม่ได้เอ่ยนามที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....................................................................................................ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .......................................................................................... จ
กิตติกรรมประกาศ .................................................................................................. ฉ
สารบัญ .................................................................................................................. ช
สารบัญตาราง….......................................................................................................ฎ
สารบัญภาพ.............................................................................................................ฒ
บทที่ 1 บทนำ.......................................................................................................... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.............................................................. 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.................................................................................... 3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .......................................................................................... 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ................................................................................... 4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ....................................................................... 5
2.1 เมนทอล ............................................................................................................. 5
2.2 แป้ง .................................................................................................................... 6
2.3 แป้งข้าวเจ้า.......................................................................................................... 8
2.3.1 กระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้า ........................................................................... 9
2.3.2 ชนิดของแป้งข้าวเจ้า ..................................................................................... 10
2.3.3 โปรตีนในแป้งข้าวเจ้า..................................................................................... 11
2.3.4 การนำแป้งข้าวเจ้าไปผลิตเป็นแป้งทาตัว ........................................................ 11
2.4 แป้งเย็น ............................................................................................................ 12
2.4.1 ส่วนประกอบสำคัญของแป้งเย็น..................................................................... 12
2.5 กระบวนการกักเก็บสาร...................................................................................... 13
2.6 กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย......................................................................... 15
2.6.1 การทำให้ของเหลวกระจายตัวเป็นละอองฝอย.................................................. 16
2.6.2 การสัมผัสระหว่างละอองหยดของเหลวกับอากาศร้อน ...................................... 18

หน้า

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการกักเก็บสารสำคัญในกระบวนการ
อบแห้งแบบพ่นฝอย ........ 20
2.7.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของวัสดุห่อหุ้ม ........ 21
2.7.2 อัตราส่วนของสารสำคัญและวัสดุห่อหุ้ม ........ 26
2.7.3 ขนาดของอิมัลชัน ........ 27
2.7.4 ปริมาณของแข็ง (solid content) ที่อยู่ในสายป้อน ........ 31
2.7.5 ตัวแปรของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ........ 32
2.8 การใช้เมนทอลเป็นสารสำคัญในกระบวนการกักเก็บ ........ 36
2.9 การใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นวัสดุห่อหุ้มในกระบวนการกักเก็บ ........ 37
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย ........ 39
3.1 การกักเก็บเมนทอลในแป้งข้าวเจ้าด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ........ 40
3.2 การวัดปริมาณเมนทอลในผงแห้งด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ........ 45
3.3 การวัดขนาดของอิมัลชันในสายป้อน ........ 47
3.4 การวัดปริมาณน้ำในผงแห้ง ........ 48
3.5 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างสัณฐานของผงแห้งที่กักเก็บเมนทอล ........ 49
3.6 การวัดขนาดของผงแห้ง ........ 50
3.7 ศึกษาการปลดปล่อยของเมนทอลที่ได้จากกระบวนการกักเก็บ ........ 51
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล ........ 53
4.1 การกักเก็บเมนทอลด้วยแป้งข้าวเจ้า ........ 49
4.2 ผลของปริมาณของแข็งในสายป้อน ........ 55
4.3 ผลของการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ ........ 56
4.4 ผลของชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์ ........ 58
4.5 ผลของปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน ........ 59
4.6 ผลของค่าสมมูลเด็กซ์โตรสของมอลโตเด็กซ์ตริน ........ 62
4.7 ผลของชนิดของสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม (film forming material) ........ 65
4.8 ผลของปริมาณสารอิมัลซิไฟเออร์ ........ 66
4.9 ผลของการเติมเจลาติน ........ 68
4.10 ผลของปริมาณเมนทอล ........ 69
4.11 ผลของตัวแปรในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ........ 72
4.11.1 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า ........ 72

หน้า


4.11.2 อิทธิพลของความเร็วในการป้อนสาร ........ 75

4.11.3 อิทธิพลของความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน ........ 76

4.12 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ........ 78

4.13 ผลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อการปลดปล่อยของผงแห้ง ........ 80

4.13.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการปลดปล่อย ........ 80

4.13.2 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีผลต่อการปลดปล่อย ........ 82

4.13.3 การปลดปล่อยระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ........ 84

4.14 การกักเก็บเมนทอลด้วยแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง ........ 90

4.15 การนำแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บไปผสมกับทัลคัม ........ 98

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ........ 106

5.1 สรุปผลการวิจัย ........ 106

5.2 ข้อเสนอแนะ ........ 111

รายการอ้างอิง ........ 112

ภาคผนวก ........ 113

ภาคผนวก ก ........ 118

1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานของเมนทอล ........ 118
2. ตัวอย่างการคำนวณร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้ง ........ 119
3. ตัวอย่างการคำนวณขนาดของอนุภาคโดยใช้ sieve ........ 121
4. ตัวอย่างการคำนวณปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้ง ........ 123
5. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าคงที่การปลดปล่อย ........ 125
6. ตัวอย่างการคำนวณหาสูตรการผสมระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บกับทัลคัม ........ 127

ภาคผนวก ข ........ 132

1. ส่วนประกอบและปริมาณของสารที่ใช้ในงานวิจัย ........ 132
2. ข้อมูลแสดงน้ำหนักของอนุภาคที่ได้จากการ sieve ........ 135
3. ข้อมูลแสดงขนาดของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง Horiba ........ 137
4. อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของมอลโตเด็กซ์ตรินที่ใช้ในงานวิจัย ........ 138
5. ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100 ........ 139

หน้า

6. ปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆที่อุณหภูมิ 35 37 และ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% ........................................................ 152
7. ร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆที่อุณหภูมิ 35 37 และ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% ........................................................ 155
8. ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่างๆที่อุณหภูมิ 35 37 และ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% ........................................................ 158
9. ปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้งที่เวลาต่างๆที่อุณหภูมิ 35 37 และ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% ........................................... 161
10. ร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่างๆที่อุณหภูมิ 35 37 และ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% ........................................... 164
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ........................................................................... 167

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ ........................................................ 7
ตารางที่ 2.2 ขนาดและรูปร่างของแป้งชนิดต่างๆ................................................................ 7
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้า ............................................................................... 9
ตารางที่ 2.4 ขนาดของอนุภาคจากการกักเก็บด้วยเทคนิคต่างๆ......................................... 14
ตารางที่ 2.5 ผลของมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีต่อขนาดอิมัลชันและปริมาณน้ำในอนุภาค ............ 22
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของวัสดุห่อหุ้มชนิดต่างๆ ............................................................ 25
ตารางที่ 2.7 ปริมาณเมนทอลที่มีผลต่อการกักเก็บ .......................................................... 26
ตารางที่ 2.8 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่มีต่อตัวแปรต่างๆ..................................... 34
ตารางที่ 2.9 อัตราการป้อนสารที่มีผลต่อตัวแปรต่างๆ ...................................................... 35
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบและปริมาณของสารที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งมีปริมาณของแข็ง
ทั้งหมด (total solid content) 40% โดยน้ำหนักในน้ำกลั่น.............................. 42
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของผงแห้ง โดยมีอัตราส่วนของเมนทอลต่อแป้งข้าวเจ้า 1:4
ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 180 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน
30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที ................... 54
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของผงแห้งจากการเติมอิมัลซิไฟเออร์ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า
180 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาที
และอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที................................................. 57
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของผงแห้งจากการใช้เคซีนและกัมอะราบิกเป็นอิมัลซิไฟเออร์
ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน
30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที .................... 58
ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของผงแห้งจากปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่เติมลงไป เพื่อใช้เป็นสารช่วย
เกิดชั้นฟิล์ม ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบ
จานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที ..... 60
ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติของผงแห้งจากผลของค่าสมมูลเด็กซ์โตรสของมอลโตเด็กซ์ตริน
ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจาน
หมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที ............ 63

หน้า

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติของผงแห้งจากชนิดของสารช่วยเกิดชั้นฟิล์มที่เติมลงไป ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที .............................. 65
ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติของผงแห้งจากปริมาณเคซีนที่เติมลงไปเพื่อใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที .................. 67
ตารางที่ 4.8 คุณสมบัติของผงแห้งจากปริมาณเจลาตินที่เติมลงไป ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที............................................. 68
ตารางที่ 4.9 คุณสมบัติของผงแห้งจากปริมาณเมนทอลที่เติมลงไป ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที................................................ 70
ตารางที่ 4.10 คุณสมบัติของผงแห้งที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120-180 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 10,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที............................................................................ 73
ตารางที่ 4.11 คุณสมบัติของผงแห้งที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 และ 35 มิลลิลิตรต่อนาที................................................................ 75
ตารางที่ 4.12 คุณสมบัติของผงแห้งที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 10,000 และ 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที....................................................................... 77
ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บและแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด............................................................................ 78
ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างผงแห้งที่ได้จากการใช้แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงและไม่ผ่านการดัดแปลงในการกักเก็บเมนทอลที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที................. 91
ตารางที่ 4.15 ค่าคงที่การปลดปล่อยที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80%......................................... 104

หน้า

ตารางที่ 4.16 การคำนวณระยะเวลาการออกฤทธิ์เย็นของแป้งจากค่าคงที่การปลดปล่อยเมื่อเทียบกับปริมาณเมนทอลเริ่มต้น ($K_{normalized}$) .................................. 105
ตารางที่ 5.1 สูตรจากการคำนวณการผสมระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บกับทัลคัมตามอัตราส่วนโดยมวล .................................. 110
ตารางที่ ก-1 ข้อมูลของการเตรียมสารละลายมาตรฐาน .................................. 118
ตารางที่ ก-2 ข้อมูลสำหรับการคำนวณร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือของสาร control ที่มีอัตราส่วนโดยมวลของเมนทอลต่อแป้งข้าวเจ้า 1:1และมีอุณหภูมิอากาศขาเข้า 180°C .................................. 120
ตารางที่ ก-3 ข้อมูลสำหรับการคำนวณขนาดของอนุภาคของมอลโตเด็กซ์ตริน 10% .......... 121
ตารางที่ ก-4 พลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดและหลอมเหลว .................................. 123
ตารางที่ ก-5 การคำนวณหาพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดของมอลโตเด็กซ์ตริน 10% (T= 40°C, RH = 80%) .................................. 124
ตารางที่ ก-6 การคำนวณหาปริมาณทัลคัมที่ต้องผสมลงในแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บของมอลโตเด็กซ์ตริน 10% (modified starch, T= 40°C, RH = 80%) .......... 128
ตารางที่ ก-7 การคำนวณหาสูตรการผสมระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บกับทัลคัมของมอลโตเด็กซ์ตริน 10% (modified starch, T= 40°C, RH = 80%) .......... 130
ตารางที่ ข-1 ส่วนประกอบและปริมาณของสารที่ใช้ในงานวิจัย .................................. 132
ตารางที่ ข-2 น้ำหนักของอนุภาคที่ได้จาก sieve .................................. 135
ตารางที่ ข-3 ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100 .................................. 139
ตารางที่ ข-4 ปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% .................................. 152
ตารางที่ ข-5 ปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% .................................. 153
ตารางที่ ข-6 ปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% .................................. 154
ตารางที่ ข-7 ร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% .................................. 155
ตารางที่ ข-8 ร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% .................................. 156

หน้า

ตารางที่ ข-9 ร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆ
ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% ............................ 157
ตารางที่ ข-10 ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ
ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% ........................... 158
ตารางที่ ข-11 ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ
ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%........................... 159
ตารางที่ ข-12 ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ
ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%........................... 160
ตารางที่ ข-13 ปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ
ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% ........................... 161
ตารางที่ ข-14 ปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ
ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% ........................... 162
ตารางที่ ข-15 ปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ
ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% ........................... 163
ตารางที่ ข-16 ร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ
ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% ........................... 164
ตารางที่ ข-17 ร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ
ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80% ........................... 165
ตารางที่ ข-18 ร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ
ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%........................... 166

# สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของเมนทอล ..... 5
ภาพที่ 2.2 กลไกการสังเคราะห์เมนทอล ..... 6
ภาพที่ 2.3 รูปร่างของแป้งข้าวเจ้า ..... 8
ภาพที่ 2.4 วิธีการโม่แห้ง ..... 9
ภาพที่ 2.5 วิธีการโม่เปียก ..... 10
ภาพที่ 2.6 ขั้นตอนของกระบวนการกักเก็บสาร ..... 13
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของอนุภาค (ก) Reservoir type (ข) Matrix type (ค) Coated matrix type ..... 15
ภาพที่ 2.8 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ..... 15
ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของหัวฉีดแบบจานหมุน ..... 16
ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของหัวฉีดแบบแรงดัน ..... 17
ภาพที่ 2.11 โครงสร้างของหัวฉีดแบบสองของไหล ..... 17
ภาพที่ 2.12 การไหลของอากาศร้อนและสารในทิศทางเดียวกัน ..... 18
ภาพที่ 2.13 การไหลของอากาศร้อนและสารแบบสวนทางกัน ..... 19
ภาพที่ 2.14 การไหลของอากาศร้อนและสารแบบผสมกัน ..... 19
ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินและปริมาณน้ำในอนุภาค ..... 23
ภาพที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและปริมาณน้ำในอนุภาค ..... 23
ภาพที่ 2.17 ขนาดอิมัลชันของสารผสม d-limonene และกัมอะราบิกและมอลโตเด็กซ์ตริน ..... 28
ภาพที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมัลชันกับปริมาณสารสำคัญที่ผิวของอนุภาค ..... 29
ภาพที่ 2.19 กระบวนการเกิดอิมัลชัน ..... 29
ภาพที่ 2.20 หลักการทำงานของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ความดันสูง ..... 30
ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบของการใช้โฮโมจีไนเซอร์และขนาดของอิมัลชัน ..... 31
ภาพที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งในสายป้อนและค่าการกักเก็บ ..... 32
ภาพที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่มีต่อขนาดและความหนาแน่นของอนุภาค ..... 33

หน้า

ภาพที่ 2.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับความดันที่ใช้ในหัวฉีดของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ........ 35
ภาพที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกักเก็บเมนทอลและปริมาณวัสดุห่อหุ้ม ........ 36
ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย ........ 39
ภาพที่ 3.2 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย Ohkawara type L-8 ........ 41
ภาพที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี GC-2014 ........ 45
ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการวัดปริมาณเมนทอลในผงแห้ง ........ 46
ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดขนาดอิมัลชั่น SALD-7100 ........ 47
ภาพที่ 3.6 ตู้อบสุญญากาศ ........ 48
ภาพที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JSM-6060 ........ 49
ภาพที่ 3.8 เครื่อง sieve (M100) ........ 50
ภาพที่ 3.9 ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น LHU-113 ........ 51
ภาพที่ 4.1 กลไกการยึดเกาะของแป้ง ........ 53
ภาพที่ 4.2 ลักษณะของผงแห้ง โดยมีอัตราส่วนของเมนทอลต่อแป้งข้าวเจ้า 1:4 ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 180 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที ........ 55
ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งในสายป้อนกับค่าการกักเก็บโดยมีอัตราส่วนของเมนทอลต่อแป้งข้าวเจ้า 1:1 ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 180 องศาเซลเซียส ........ 56
ภาพที่ 4.4 ลักษณะของอนุภาคจากการเติมอิมัลซิไฟเออร์ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 180 องศาเซลเซียส ........ 57
ภาพที่ 4.5 ลักษณะของอนุภาคจากการใช้เคซีนและกัมอะราบิกเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ........ 59
ภาพที่ 4.6 ลักษณะของอนุภาคจากปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่เติมลงไป เพื่อใช้เป็นสารช่วยเกิดชั้นฟิล์มที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ........ 61
ภาพที่ 4.7 ลักษณะของอนุภาคจากผลของค่าสมมูลเด็กซ์โตรสของมอลโตเด็กซ์ตรินที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ........ 64
ภาพที่ 4.8 ลักษณะของอนุภาคจากชนิดของสารช่วยเกิดชั้นฟิล์มที่เติมลงไปที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ........ 66

หน้า

ภาพที่ 4.9 ลักษณะของอนุภาคจากปริมาณเคซีนที่เติมลงไปเพื่อใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส .................................................. 67
ภาพที่ 4.10 ลักษณะของอนุภาคจากปริมาณเจลาตินที่เติมลงไป ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ................................................ 69
ภาพที่ 4.11 ลักษณะของอนุภาคจากปริมาณเมนทอลที่เติมลงไป ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ................................................ 71
ภาพที่ 4.12 ลักษณะของอนุภาคที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าอยู่ในช่วง 120-180 องศาเซลเซียส. 74
ภาพที่ 4.13 ลักษณะของอนุภาคจากอัตราการป้อนสารที่ 25 และ 35 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ................................................ 76
ภาพที่ 4.14 ลักษณะของอนุภาคที่ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนที่ 10,000 และ 30,000 รอบต่อนาที ........................................................................................... 77
ภาพที่ 4.15 ลักษณะการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บและแป้งเย็น ที่มีขายตามท้องตลาด.................................................................................. 79
ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้ง และเวลา ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) มอลโตเด็กซ์ตริน 0% (ข) มอลโตเด็กซ์ตริน 10% (ค) แป้งเย็นที่ขายตามท้องตลาด......................................................... 81
ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้ง และเวลา ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ก) มอลโตเด็กซ์ตริน 0% (ข) มอลโตเด็กซ์ตริน 10% (ค) แป้งเย็นที่ขายตาท้องตลาด................................. 83
ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้ง และเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 0% และ10% ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.......................................... 86
ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้ง และเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 0% และ10% ที่ความชื้น สัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ............................................. 87

หน้า

ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้งและเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 0% และ10% ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ............................................ 88

ภาพที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งและเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 0% และ10% ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส......................................... 89

ภาพที่ 4.22 การเปรียบเทียบรูปร่างของอนุภาคระหว่างแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง ............................................................ 91

ภาพที่ 4.23 การเปรียบเทียบลักษณะอนุภาคระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บโดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง.............. 92

ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งและเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% โดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.................................................................. 94

ภาพที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งและเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% โดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.................................................................. 95

ภาพที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้งและเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% โดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ........................................... 96

หน้า

ภาพที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งและเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% โดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ............................................... 97

ภาพที่ 4.28 ค่าคงที่การปลดปล่อย ($K_{apparent}$) ของการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% โดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ....... 101

ภาพที่ 4.29 ค่าคงที่การปลดปล่อย ($K_{apparent}$) ของการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% โดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส...... 102

ภาพที่ 4.30 ค่าคงที่การปลดปล่อยเมื่อเทียบกับปริมาณเมนทอลเริ่มต้น ($K_{normalized}$) ของการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% โดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลง รวมถึงแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บเมื่อผสมกับทัลคัม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค)อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.......................... 103

ภาพที่ ก-1 กราฟสารละลายมาตรฐานเมนทอล ............................................................ 119

ภาพที่ ก-2 การหาขนาดของอนุภาคจาก sieve............................................................. 122

ภาพที่ ก-3 การหาค่าคงที่การปลดปล่อย ($K_{apparent}$) ..................................................... 126

ภาพที่ ก-4 การหาค่าคงที่การปลดปล่อย ($K_{normalized}$)................................................... 127

ภาพที่ ก-5 ค่าคงที่ของการผสมระหว่างแป้งที่ผ่านการกักเก็บและทัลคัมของมอลโตเด็กซ์ตริน 10% (modified starch).............................................. 131

ภาพที่ ข-1 ขนาดอนุภาคของแป้งที่ผ่านการกักเก็บโดยใช้มอลโตเด็กซ์ตริน 10% และแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงเป็นตัวกักเก็บเมนทอล (MD 10%, modified starch) จากเครื่อง Horiba ......................................................................... 137

ภาพที่ ข-2 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอลโตเด็กซ์ตริน (DE11)................. 138

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์นั้น มีความเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ที่มีสารเคมีเป็นองค์ประกอบ นับตั้งแต่ อาหารสำเร็จรูป สารปรุงรส เครื่องดื่ม ยารักษาโรค เครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคล ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดห้องน้ำหรือแม้แต่ยาฆ่าแมลง สารเคมีหลายประเภทได้ถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เหล่านี้รวมถึงผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่ออกสู่ผู้บริโภคอย่างต่อเนื่อง โดยผู้ผลิตได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อคิดค้นผลิตภัณฑ์ที่สามารถช่วยให้มนุษย์มีความสะดวกมากขึ้นและสามารถใช้ประโยชน์ในการดำเนินชีวิตมากที่สุด สารเคมีจึงเป็นสิ่งที่มนุษย์ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้

เมนทอลเป็นสารเคมีประเภทหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งถูกนำมาผสมเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มความเย็นให้แก่ผลิตภัณฑ์ ดังเช่น ใช้ในทางเภสัชกรรม ได้แก่ ยาหม่อง ยาแก้ไอ น้ำมันทานวด ยาทาแก้คัน ยาแก้หวัด ยาประเภทสูดดม ใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เช่น ครีมบำรุงผิว แป้งทาตัว สบู่อาบน้ำ ยาสระผม ตลอดจนใช้เป็นสารปรุงรสและกลิ่น เช่น ลูกอม ยาสีฟัน หมากฝรั่ง บุหรี่ (มีการเติมเมนทอลลงไปประมาณ 2-6 มิลลิกรัมต่อมวน, บุญธิดา แสนบรรดิษฐ์ 2551) เมนทอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สกัดได้จากเปปเปอร์มินท์ (peppermint) มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวและเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง โดยมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 41-43 องศาเซลเซียส นอกจากนี้เมนทอลยังมีคุณสมบัติในการดูดเอาพลังงานจากสิ่งแวดล้อม เพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นแก๊ส ซึ่งเรียกว่า latent heat ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำเมนทอลมาทำให้เกิดความเย็นในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ประเภทแป้งเย็นทาตัว

แป้งเย็นทาตัวเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้รับความนิยมอย่างมากในประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยอยู่ในเขตภูมิอากาศร้อนชื้น ประกอบกับสภาพอากาศที่มีแนวโน้มอุณหภูมิสูงขึ้นทุกปี จึงทำให้มีผู้บริโภคจำนวนมากที่หันมานิยมใช้แป้งเย็นทาตัวมากขึ้น โดยทั่วไปแป้งเย็นทาตัวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเป้าหมายในการตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในเรื่องของการให้ความเย็น เกิดความสดชื่น ช่วยคลายร้อน ทำให้ผู้ใช้รู้สึกสบายตัว ผู้ผลิตแป้งเย็นทาตัวจึงต่างพยายามพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มความพึงพอใจให้กับผู้บริโภคมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้การตลาดในภาพรวมของแป้งเย็นทาตัวมีมูลค่าประมาณ 1,500 ล้านบาท ในปี 2555 และมีการคาดการณ์ว่าจะเติบโต

เพิ่มขึ้นประมาณ 4-5 % (หนังสือพิมพ์ฐานเศรษฐกิจ ฉบับวันที่ 5 มีนาคม 2555) ผลิตภัณฑ์แป้งเย็นทาตัวที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปตามท้องตลาดมีเมนทอลและทัลคัมเป็นส่วนผสมหลัก แต่จากสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูง ทำให้เมนทอลที่เป็นส่วนผสมในแป้งเย็นทาตัวนั้น เกิดการระเหิดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้แป้งเย็นมีประสิทธิภาพการออกฤทธิ์เย็นเป็นระยะเวลาสั้นลง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผู้บริโภคมีความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์แป้งเย็นลดลง นอกจากนี้แป้งทาตัวที่ผลิตอยู่ในปัจจุบัน มีการใช้ทัลคัมเป็นส่วนผสมพื้นฐาน ซึ่งทัลคัมเป็นสารอนินทรีย์ที่ได้จากการนำแร่หินชนิดหนึ่งมาบดให้ละเอียด อบแห้ง และแยกสารแปลกปลอมออก อย่างไรก็ดีทัลคัมยังคงมีอันตรายต่อมนุษย์เนื่องจากในทัลคัมมีสารแปลกปลอมหลงเหลืออยู่ ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติคล้ายแอสเบสตอส (Asbestos) องค์การอนามัยโลก (WHO) และU.S. Environmental Protection Agency จึงจัดให้เป็นสารก่อมะเร็งที่ไม่สามารถจัดจำพวกได้ (Unclassifiable Carcinogen) ด้วยเหตุนี้จากความสำคัญของปัญหาดังกล่าว จึงทำให้สนใจที่จะนำเทคนิคการกักเก็บ (encapsulation) มาใช้ในการผลิตแป้งเย็นทาตัว เพื่อให้เมนทอลคงคุณสมบัติในระยะเวลานานขึ้น โดยเป็นการป้องกันเมนทอลจากความร้อนและความชื้น ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เมนทอลเกิดการระเหิดอย่างรวดเร็ว

เทคนิคการกักเก็บ (encapsulation) ได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องโดยเป็นเทคนิคที่ใช้กักเก็บสารสำคัญ (core material) ไว้ภายในวัสดุห่อหุ้ม (wall material) เพื่อควบคุมการปลดปล่อยและป้องกันการสูญเสียคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารสำคัญ ทำให้สารสำคัญมีโอกาสสัมผัสสภาวะแวดล้อมภายนอกได้น้อยลง ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิที่สูง ความชื้นหรือออกซิเจน ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นปัจจัยที่ทำให้สารสำคัญเกิดการสลายตัวได้ง่ายยิ่งขึ้น ดังนั้นเทคนิคการกักเก็บสารจึงน่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บเมนทอลได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้สามารถผลิตแป้งเย็นที่มีประสิทธิภาพสามารถออกฤทธิ์เย็นได้ยาวนานยิ่งขึ้น

การนำเทคนิคการกักเก็บสารมาใช้ในการผลิตนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น เทคนิคโคเซอร์เวชัน (coacervation) การเคลือบโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดส์เบด (fluidized bed coating) หรือเทคนิคการอบแห้งแบบเยือกแข็ง (freeze drying) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีขั้นตอนซึ่งสามารถดำเนินการได้ง่าย ค่าใช้จ่ายไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ รวมถึงง่ายต่อการขยายขนาดในระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยยังเป็นเทคนิควิธีที่สารสำคัญถูกความร้อนในระยะเวลาที่สั้น ซึ่งช่วยให้ลดการสูญเสียสารสำคัญในระหว่างการกักเก็บอีกด้วยและเนื่องจากทัลคัมเป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ดังกล่าวข้างต้น การวิจัยครั้งนี้จึงได้นำแป้งข้าวเจ้าซึ่งเป็นสารอินทรีย์มาใช้เป็นวัสดุห่อหุ้ม โดยข้าวเจ้าเป็นสารจากธรรมชาติที่มีคุณสมบัติในการดูด

ซับความชื้นได้ดี อีกทั้งไม่มีผลต่อร่างกายมนุษย์ ประกอบกับประเทศไทยถือได้ว่าเป็นแหล่งผลิตข้าวเจ้า ซึ่งมีปริมาณมากเพียงพอตลอดปี หาได้ง่าย และราคาไม่สูง แป้งข้าวเจ้าจึงเป็นส่วนผสมที่สามารถหาได้ง่ายตลอดปี นอกจากนี้จากการศึกษางานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศพบว่าที่ผ่านมายังไม่มีงานวิจัยที่นำแป้งข้าวเจ้ามาทำเป็นแป้งเย็นสำหรับทาตัว ดังนั้นการกักเก็บเมนทอลในแป้งข้าวเจ้าโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอยจึงน่าจะเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แป้งเย็นทาตัวที่มีคุณสมบัติในการกักเก็บความเย็นได้ยาวนานขึ้น ซึ่งมีความคุ้มค่าและมีมูลค่าเพิ่มสำหรับผู้บริโภคโดยมีต้นทุนในการผลิตไม่สูงมากและมีคุณภาพสูงขึ้น เหมาะสำหรับผู้ใช้ในเขตภูมิอากาศร้อนชื้น เช่นประเทศในกลุ่มอาเซียนอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการกักเก็บเมนทอลด้วยแป้งข้าวเจ้าด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

1.2.2 ศึกษาการปลดปล่อยเมนทอลหลังผ่านการกักเก็บด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การวัดปริมาณเมนทอลที่อยู่ในผงแห้งหลังผ่านการกักเก็บด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยและการปลดปล่อยเมนทอลโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-2014, Shimadzu, Japan)

1.3.2 การผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเมนทอลอิมัลชันโดยใช้เครื่องโฮโมจีไนซ์เซอร์ (Polytron PT 6100) ที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที ระยะเวลา 1 นาที

1.3.3 การผลิตผงอนุภาคที่กักเก็บเมนทอลด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Ohkawara L8, Ohkawara Kakouki, Japan) ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content) 40% โดยน้ำหนักในน้ำกลั่น โดยดำเนินการศึกษาอิทธิพลของ

1) อุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 120-180 องศาเซลเซียส

2) อัตราการไหลเข้าของสารที่ 25 และ 35 มิลลิลิตรต่อนาที

3) ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน (atomizer) ที่ 10,000 และ 30,000 รอบต่อนาที

4) ชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์ ได้แก่ เคซีน (casein) และ กัมอะราบิก (gum arabic)

5) ปริมาณสารอิมัลซิไฟเออร์ที่ 5 และ 10 % โดยน้ำหนักของปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำกลั่น

6) ชนิดของสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม (film forming agent) ได้แก่ มอลโตเด็กซ์ตริน (maltodextrin) และแคปซูล (Capsule™)

7) ปริมาณของสารช่วยเกิดชั้นฟิล์มที่ 0-20% โดยน้ำหนักของปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำกลั่น

8) ค่าสมมูลเด็กซ์โตรส (dextrose equivalent, DE) ของมอลโตเดกซ์ตรินที่ 2 11 และ 25

9) ปริมาณเจลาตินที่ 0-2% โดยน้ำหนักของปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำกลั่น

10) ปริมาณเมนทอลที่ 5 10 และ 20% โดยน้ำหนักของปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำกลั่น

1.3.4 ศึกษาการปลดปล่อยเมนทอลที่อุณหภูมิ 35 37 และ 40 องศาเซลเซียสและที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50 และ 80%

1.3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของผงแห้ง

1) รูปร่างสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope JSM-6060 จากบริษัท JEOL Co., Ltd ประเทศญี่ปุ่น)

2) ขนาดอิมัลชันด้วยเครื่องวัดขนาดอิมัลชัน (SALD-7100 จากบริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น)

3) ปริมาณน้ำในผงแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศ (vacuum dryer ADP-21, ประเทศญี่ปุ่น)

4) ขนาดของผงแห้งด้วยเครื่อง sieve (M 100 จากบริษัท Tsutsui scientific instruments CO., Ltd ประเทศญี่ปุ่น)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ได้แป้งเย็นทาตัวที่สามารถรักษาความเย็นในระยะเวลายาวนานยิ่งขึ้น

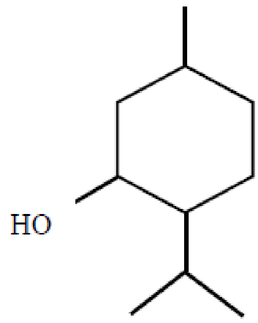
1.4.2 เป็นแนวทางในการนำเทคนิคการกักเก็บไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร ยา หรือเครื่องสำอาง

# บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 เมนทอล

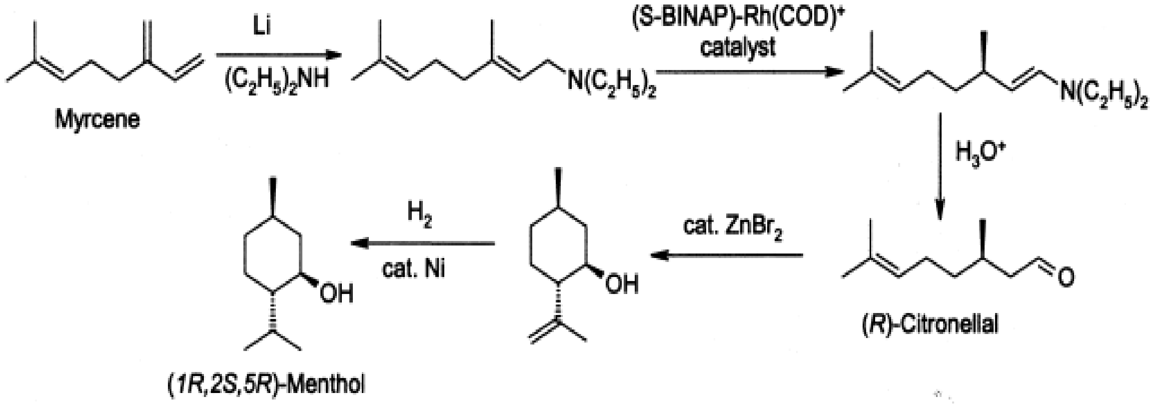
เมนทอล เป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่มีพันธะโควาเลนซ์ เกิดจากการสังเคราะห์หรือสกัดได้จากพืชจำพวกมินท์ (Mint) เช่น เปปเปอร์มินท์ (Peppermint) เมนทอลมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีสูตรโมเลกุล $C_{10}H_{20}O$ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 เมนทอลสามารถหลอมละลายที่อุณหภูมิ 41-43 องศาเซลเซียส สำหรับการทำให้เย็นของเมนทอลนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากบริเวณปลายเส้นประสาทตามผิวหนังจะมีตัวรับความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอยู่ ซึ่งเรียกว่า TRPM8 receptor โดยมีหน้าที่ช่วยให้ร่างกายรับรู้อุณหภูมิ (Voets et al. 2004, Macpherson et al. 2006, Bautista et al. 2006) นอกจากนี้สารเคมีที่มีคุณสมบัติคล้ายเมนทอลรวมถึงสารเคมีที่ให้ความเย็นจัดอย่าง icilin สามารถช่วยกระตุ้น TRPM8 ได้ การกระตุ้นตัวรับรู้ความเย็นจะส่งสัญญาณไปที่ปลายประสาทในไขสันหลังซึ่งเหมือนกับเวลาที่ร่างกายมนุษย์เกิดความรู้สึกหนาว ดังนั้นร่างกายจึงรู้สึกเย็นเมื่อสัมผัสกับเมนทอล ส่วนระดับความเย็นที่ร่างกายรู้สึกได้นั้น จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 8-28 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเมื่อสัมผัสเมนทอลในปริมาณมากเกินไป เมนทอลจะไปลดระดับความเจ็บปวดขั้นต่ำ (pain thresholds) ให้มีค่าน้อยลง ร่างกายจึงรู้สึกเจ็บปวดได้ง่ายเมื่อสัมผัสเมนทอลที่ปริมาณมาก




ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของเมนทอล

(http://en.wikipedia.org/wiki/Menthol)

ปัจจุบันความต้องการใช้เมนทอลทั่วโลกมีประมาณ 3,000 ตันต่อปี โดยบราซิลเป็นประเทศที่ผลิตและค้าน้ำมันมินท์และเมนทอลรายใหญ่ที่สุดของโลก ตามด้วยญี่ปุ่นและไต้หวัน สำหรับผู้ใช้เมนทอลรายใหญ่ของโลก คือสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีการนำเข้าเมนทอลปีละกว่า 1,200 ตัน และเนื่องจากความต้องการในการใช้เมนทอลในปริมาณที่มากขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นเมนทอลสังเคราะห์ขึ้นโดย Ryoji Noyori (2001) โดยใช้ไมซีน (Myrcene) เป็นสารเริ่มต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.2 เมนทอลสังเคราะห์สามารถตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography Mass Spectrometer, GC-MS) ซึ่งตามธรรมชาติเมนทอลจะมีสารอื่น ๆ ปน อยู่เช่น เมนโทน (Menthone) และ เอสเทอร์เมทิลอะซิเตต (Ester Menthyl Acetate) เป็นต้น แต่เมนทอลสังเคราะห์จะมีเฉพาะเมนทอลเท่านั้น




ภาพที่ 2.2 กลไกการสังเคราะห์เมนทอล

(http://en.wikipedia.org/wiki/Menthol)

## 2.2 แป้ง

แป้ง หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้แป้งยังมีสิ่งเจือปนอื่นๆ อีกเช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ โดยแป้งที่มีสิ่งเจือปนผสมอยู่มาก จะเรียกว่า ฟลาว (flour) ส่วนแป้งที่กำจัดสิ่งเจือปนออกไปแล้ว เหลือแต่แป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จะเรียกว่า สตาร์ช (starch) โดยแป้งแต่ละชนิดจะมีลักษณะทางเคมีและกายภาพเฉพาะตัว เช่น ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง อุณหภูมิในการเกิดเจล (gelatinization temperature) การพองตัว (swelling) การคืนตัว (retrogradation) ซึ่งเป็นเหตุให้แป้งแต่ละชนิดมีความเหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกัน สำหรับองค์ประกอบทางเคมีและขนาดของแป้งชนิดต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ (Richard R.M. 1968)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ (Swinkels et al.1985)

| **ชนิดแป้ง** | **ความชื้น** (%) | **ไขมัน** (%) | **โปรตีน**(%) | **เถ้า**(%) | **ฟอสฟอรัส**(%) |
|---|---|---|---|---|---|
| แป้งข้าวโพด | 13 | 0.60 | 0.35 | 0.10 | 0.015 |
| แป้งมันฝรั่ง | 19 | 0.05 | 0.06 | 0.40 | 0.08 |
| แป้งสาลี | 14 | 0.80 | 0.40 | 0.15 | 0.06 |
| แป้งมันสำปะหลัง | 13 | 0.10 | 0.10 | 0.20 | 0.01 |
| แป้งข้าวฟ่าง | 13 | 0.70 | 0.30 | 0.08 | - |
| แป้งข้าวเจ้า | - | 0.80 | 0.45 | 0.50 | 0.10 |
| แป้งสาคู | - | 0.10 | 0.10 | 0.20 | 0.02 |
| แป้งมันเทศ | 13 | 0.40 | - | 0.20 | 0.07 |
| แป้ง amylomaize | 13 | - | - | 0.10 | - |
| แป้งข้าวโพด | 13 | 0.20 | 0.25 | 0.07 | 0.007 |

ตารางที่ 2.2 ขนาดและรูปร่างของแป้งชนิดต่างๆ (Magningat et al. 1992)

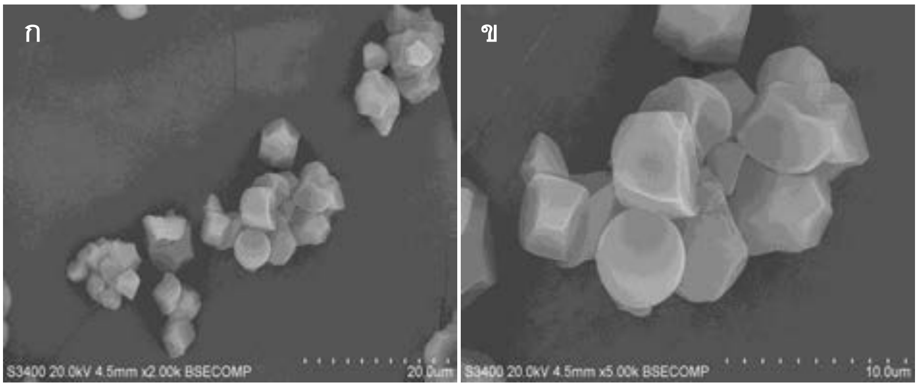
| **แหล่งแป้ง** | **ขนาด (ไมครอน)** | **รูปร่าง** |
|---|---|---|
| ข้าวสาลี | 2-35 | กลม ค่อนข้างรี |
| ข้าวโพด | 5-25 | กลม แบน มีหลายเหลี่ยม รูปร่างคล้ายแท่ง |
| ข้าวเจ้า | 3-5 | แบน มีหลายเหลี่ยม |
| ข้าวบาร์เลย์ | 2-35 | กลม คล้ายไข่ |
| ข้าวฟ่าง | 15-35 | กลม แบน มีหลายเหลี่ยม |
| ข้าวโอต | 5-8 | กลม แบน มีหลายเหลี่ยม |
| ข้าวไรน์ | 10-50 | กลม ค่อนข้างรี |
| ลูกเดือย | 8-10 | กลม แบน มีหลายเหลี่ยม |
| Triticale | 2-35 | กลม ค่อนข้างรี |
| มันฝรั่ง | 15-121 | กลม รูปไข่มีวงคล้ายเปลือกหอย |
| มันสำปะหลัง | 5-35 | กลม คล้ายไข่ที่มีรอยตัด |
| สาคู | 15-65 | รูปไข่ |
| เท้ายายม่อม | 13-70 | รูปไข่ที่มีรอยตัด |

## 2.3 แป้งข้าวเจ้า

ข้าวเจ้าหรือ *Oryza sativa L.* มีต้นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งมีหลากหลายสายพันธุ์ เช่น พันธุ์อินดิคา (*O. sativaindica*) ซึ่งปลูกมากในแถบมรสุม ที่มีฝนตกชุกและแสงแดดที่เพียงพอ และพันธุ์จาปอนิคา (*O.sativa japonica*) ซึ่งปลูกในพื้นที่เขตอบอุ่น

แป้งข้าวเจ้ามีการใช้ในอุตสาหกรรม ต่างๆมากมาย ไม่ว่าจะเป็นส่วนประกอบของแป้งฝุ่นในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งฝุ่นสำหรับเด็ก เนื่องจากแป้งข้าวเจ้าไม่เป็นพิษและไม่มีสารระคายเคือง นอกจากนี้ยังมีการใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นสารทำให้แข็ง (Laundry stiffening agent) ในการซักรีดอีกด้วย

แป้งข้าวเจ้ามีลักษณะเป็นผงสีขาว เนื้อละเอียด ไม่จับตัวกันเป็นก้อน เมื่อนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงจะพบเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กที่มีรูปทรงเป็นเหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 2.3 แต่ละเม็ดสตาร์ชจะมีโครงสร้างทางเคมีที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสมาเกาะกันเป็นสายโซ่ยาว เรียกว่า อะไมโลส (amylase) และน้ำตาลกลูโคสที่มาเกาะกันในลักษณะกิ่งก้าน เรียกว่า อะไมโลเพกติน (amylopectin) ซึ่งทั้งสองพอลิเมอร์นี้จะเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน




ภาพที่ 2.3 รูปร่างของแป้งข้าวเจ้า (ก) กำลังขยาย 2,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า

แป้งข้าวเจ้าจะมีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกันไปตามชนิดของพันธุ์ข้าว ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้ง นอกจากนี้ในแป้งข้าวเจ้ายังมีคุณสมบัติที่พิเศษกว่าแป้งชนิดอื่นคือมี SPF 7 (วราทัศน์ วงศ์สุรไกร 2551) ซึ่งเป็นสารป้องกันรังสี UV อยู่ในตัว และคุณสมบัติเหล่านี้เมื่อนำมาผ่านกระบวนการผลิตแล้วก็จะได้แป้งที่มีสีขาวนวล เนื้อละเอียด ป้องกันความชื้นได้ดี ติดทนนาน ดูดซับความมันและฟุ้งกระจายน้อย ซึ่งนับว่าเป็นคุณสมบัติของแป้งเด็กที่ดี สำหรับคุณสมบัติอื่นๆของแป้งข้าวเจ้าได้แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้า (Tejashree et al. 2003)

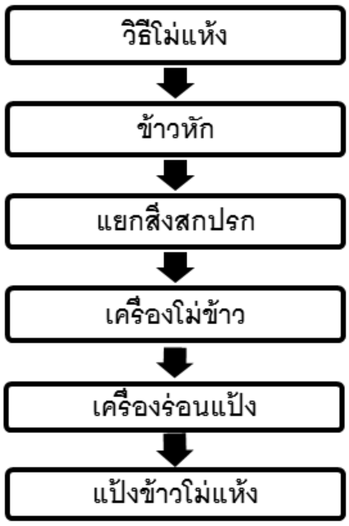
| ลักษณะ | คุณสมบัติ |
|---|---|
| ขนาดเม็ดแป้ง(ไมครอน) | 3-10 |
| ปริมาณอะไมโลส(%) | 39 |
| ลักษณะรูปร่าง | รูปหลายเหลี่ยม |
| ปริมาณอะมิโลเพกทิน(%) | 61 |

**2.3.1 กระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้า**

ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าจะมีด้วยกันทั้งหมด 2 วิธี คือ วิธีโม่แห้งและวิธีโม่เปียก

**1) การผลิตแป้งข้าวเจ้าด้วยการโม่แห้ง**

ได้จากการนำข้าวมาทำความสะอาด (cleaning) เพื่อแยกสิ่งสกปรกออก แล้วจึงนำไปบดดังแสดงในภาพที่ 2.4 แป้งที่ได้จะมีคุณภาพต่ำ เพราะเม็ดแป้งค่อนข้างหยาบและมีสิ่งเจือปนสูง อายุการเก็บรักษาสั้น เกิดกลิ่นหืนได้ง่ายเพราะมีปริมาณไขมันสูง และถูกทำลายจากแมลงได้ง่าย

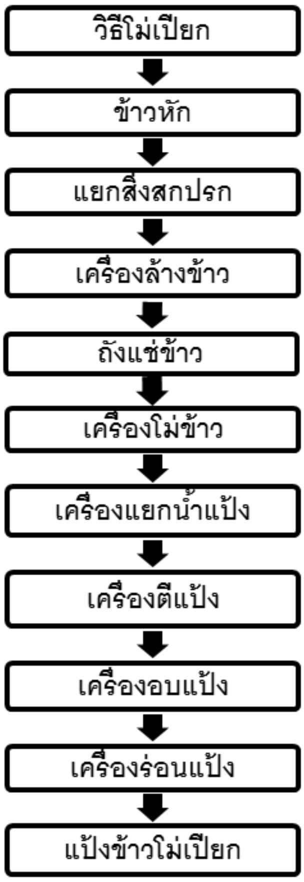



ภาพที่ 2.4 วิธีการโม่แห้ง

(http://www.brrd.in.th/rkb2/product/index.php-file=content.php%26id=4.htm)

**2) การผลิตแป้งข้าวเจ้าด้วยวิธีการโม่เปียก**

วิธีการโม่เปียกเป็นวิธีการผลิตแป้งข้าวเจ้าในปัจจุบัน ดังแสดงขั้นตอนการผลิตในภาพที่ 2.5 โดยแป้งที่ได้จะมีคุณภาพดี มีความละเอียดและสิ่งเจือปนน้อย สำหรับเทคโนโลยีการผลิตแป้งโดยวิธีการโม่เปียกนั้นได้รับการพัฒนาเพื่อมุ่งเน้นให้แป้งข้าวเจ้าที่ได้มีอะไมโลส (amylose) สูง




ภาพที่ 2.5 วิธีการโม่เปียก

(http://www.brrd.in.th/rkb2/product/index.php-file=content.php%26id=4.htm)

**2.3.2 ชนิดของแป้งข้าวเจ้า**

แป้งข้าวเจ้าสามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด ดังนี้

**1) แบบ Non-waxy** เป็นแป้งข้าวเจ้าที่มีอะไมโลสมาก มีอะไมโลเพคตินน้อย โดยแป้งชนิดนี้มีการใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร หรือผสมในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเนื้อสัมผัสที่คงทน ไม่แตกง่าย นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวเพิ่มความแข็งแรงสำหรับไฟเบอร์กลาส (glass fiber) หรือใช้เป็นสารเคลือบเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวของวัสดุ

2) **แบบ** Waxy เป็นแป้งข้าวเจ้าที่มีอะไมโลสน้อย มีอะไมโลเพคตินมาก จึงทำให้เกิดคุณสมบัติการคืนตัวเพียงเล็กน้อยและมีความมันเงาสูง

3) **แบบ** Modified เป็นการนำแป้งมาผ่านกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้มีสมบัติเปลี่ยนไปตามที่ต้องการ เช่น การผลิตแป้งข้าวเจ้าดัดแปลงประเภทพรีเจลาติไนซ์ (Pregelatinized) เพื่อให้รูปทรงของเม็ดแป้งมีรูปทรงกลม ทำให้แป้งมีคุณสมบัติการไหลที่ดี แป้งประเภทนี้สามารถใช้ในทางเภสัชกรรม เช่น เป็นส่วนประกอบในการผลิตยาเม็ดและใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การทำให้อาหารข้นขึ้น (food thickening) หรือใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier)

### 2.3.3 โปรตีนในแป้งข้าวเจ้า

แป้งข้าวเจ้าจะมีโปรตีนประมาณ 7-8% โดยสามารถจำแนกโปรตีนตามความสามารถในการละลายได้ 4 ชนิด คือ อัลบูมิ (albumin) โกลบูลิน(globulin) โพรลามิน(prolamin) และกลูเตลิน (glutelin) ตามงานวิจัยของ Landers et al (1994) โปรตีนเหล่านี้มีบทบาทในการขัดขวางการพองตัวของสตาร์ชแกรนูล การสกัดโปรตีนออกจึงทำให้คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากพันธะไดซัลไฟด์ถูกทำลาย ในแป้งข้าวนั้นโปรตีนกลูเตลินเป็นโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายด่างและมีสัดส่วนมากกว่าโปรตีนชนิดอื่นๆ ทำให้ในระดับอุตสาหกรรมมีการใช้สารละลายด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)ในการสกัดสตาร์ชเพื่อให้ได้สตาร์ชที่มีความบริสุทธิ์สูง คือ แยกเอาโปรตีนออกจนเหลืออยู่น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากโปรตีนซึ่งมีคุณสมบัติในการจับตัวกับน้ำ (binding water) ถูกแยกออกไป ทำให้โครงสร้างของแกรนูลบางส่วนถูกทำลายและความเป็นผลึกลดลง ส่งผลให้สตาร์ชมีค่าความหนืดลดลง ดังในงานวิจัยของ Dorglamud et al. (2010) จากการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งและสตาร์ช ซึ่งมีปริมาณโปรตีนต่างกันพบว่าค่าเนื้อสัมผัสของสตาร์ชมีค่าความแข็ง (hardness) สมบัติการสัมผัสยึดเกาะกับสารอื่น (adhesiveness) และความแข็งแรงของพันธะภายใน (cohesiveness) แตกต่างจากแป้งข้าวเจ้า

### 2.3.4 การนำแป้งข้าวเจ้าไปผลิตเป็นแป้งทาตัว

ไสยวิชญ์ วรวินิต (2549) ได้ทำการวิจัยผลิตแป้งข้าวเจ้าบริสุทธิ์เพื่อใช้เป็นแป้งเด็ก แป้งฝุ่นและแป้งเครื่องสำอาง โดยใช้แทนแป้งทัลคัมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากแป้งข้าวเจ้าจะให้ผลดีด้านความปลอดภัยต่อสุขภาพในการใช้งาน งานวิจัยนี้ต้องการผลิตแป้งดัดแปลงทางเคมีโดยให้แป้งทำปฏิกริยากับอ๊อกทีนิลซัคซินิคแอนไฮด์ไดรด์ (Octenyl Succinic Anhydride) ได้เป็นสตาร์ชอ๊อกทินิลซัคซิเนตซึ่งเป็นแป้งที่มีคุณสมบัติในการดูดซับความมัน (oil absorbency) ป้องกัน

ความชื้นและไล่น้ำ (water repellant) จึงทำให้ผู้ใช้รู้สึกสบายตัว นอกจากนี้ยังช่วยลดอันตรายจากรังสียูวีของแสงแดดได้อีกด้วย โดยแป้งข้าวเจ้ามีค่า SPF เท่ากับ 7 แป้งชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้เป็นแป้งทาตัวเด็กและผู้ใหญ่ นอกจากนี้แป้งข้าวเจ้ายังไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพเมื่อสูดดมเข้าไปในปอดอีกด้วย เนื่องจากแป้งข้าวเจ้าเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์(biodegradable)ทั้งในร่างกายและในธรรมชาติ อย่างไรก็ตามแป้งทาตัวเด็กหรือแป้งฝุ่นที่ทำจากแป้งข้าวเจ้านี้ได้มีการอบฆ่าเชื้อด้วยความร้อนทำให้ไม่มีปัญหาในเรื่องของการขยายตัวของจุลินทรีย์บนร่างกายแต่อย่างใด

## 2.4 แป้งเย็น

แป้งเย็น (cooling powder) คือแป้งที่มีเมนทอลเป็นส่วนประกอบ มีสรรพคุณใช้ทาที่ผิวเพื่อให้ความรู้สึกเย็น สดชื่น และช่วยลดผื่นคัน ในอดีตแป้งเย็นถูกใช้และวางจำหน่ายในฐานะของยารักษาโรค แป้งเย็นถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรกในประเทศไทยโดยนายแพทย์ล้วน ว่องวานิช ในปี พ.ศ. 2490 โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้ในการรักษาชาวต่างชาติที่มีปัญหาผด ผื่น คัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากอากาศที่ร้อนอบอ้าวของประเทศไทย ทำให้แป้งเย็นได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในสมัยนั้น แต่ในปัจจุบันบทบาทของแป้งเย็นถูกเปลี่ยนไป แป้งเย็นถูกใช้ในฐานะของเครื่องสำอาง ซึ่งสามารถหาซื้อได้ทั่วไป มีราคาถูก ประกอบกับปัญหาอุณหภูมิที่ร้อนอบอ้าวทวีความรุนแรง ทำให้แป้งเย็นยิ่งเป็นที่ต้องการมากขึ้นสำหรับในประเทศเขตร้อน จึงทำให้เกิดการแข่งขันและพัฒนาผลิตภัณฑ์แป้งเย็นกันอย่างต่อเนื่อง

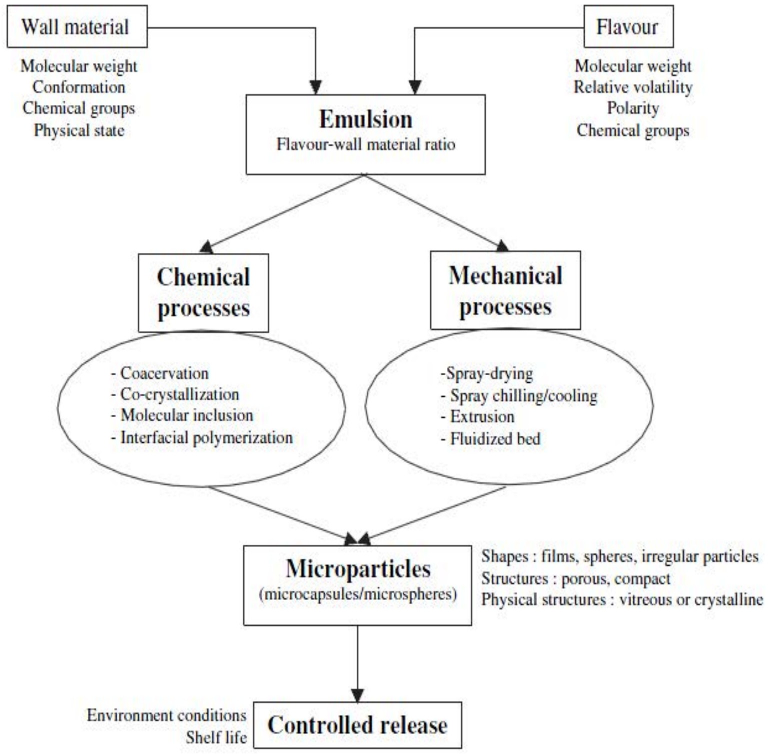
### 2.4.1 ส่วนประกอบสำคัญของแป้งเย็น

แป้งเย็นมีหลายสูตร จากหลายผู้ผลิต แต่ส่วนประกอบสำคัญสำหรับแป้งเย็นยังคงเหมือนกัน คือประกอบด้วยทัลคัม ซึ่งมีชื่อทางเคมีว่าแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (Magnesium Silicate Hydroxide ,$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$) โดยทัลคัม มีส่วนประกอบบางอย่างที่มีสมบัติคล้ายแอสเบสตอส (Asbestos) ซึ่งองค์การอนามัยโลก (WHO) และ US Environmental Protection Agency จัดให้เป็น Unclassifiable Carcinogen นอกจากนั้นทัลคัมเป็นสารประกอบอนินทรีย์ซึ่งร่างกายไม่สามารถย่อยสลายและขับออกจากร่างกายได้ ในบางประเทศเช่น สหรัฐอเมริกา ได้ห้ามใช้ทัลคัมในการผลิตแป้งฝุ่นสำหรับเด็ก นอกจากนี้ละอองของทัลคัมมีขนาดของอนุภาคเล็กมากจนสามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจและปอด ส่งผลเสียต่อระบบการหายใจในระยะยาว เช่น โรคภูมิแพ้ อย่างไรก็ดีมีการนำทัลคัมมาผสมในแป้งเย็นนั้น เนื่องจากทัลคัมเป็นตัวช่วยผสมผสานและดูดซับความชื้นทำให้ผิวสัมผัสเนียนลื่น นอกจากนี้ส่วนประกอบของแป้งเย็นยังประกอบด้วย

เมนทอลเพื่อให้ความรู้สึกเย็นสดชื่นเมื่อสัมผัสกับผิวหนัง โดยแป้งเย็นบางสูตรยังมีการใส่การบูรหรือน้ำหอมอีกด้วย

**2.5 กระบวนการกักเก็บสาร** (Encapsulation)

กระบวนการกักเก็บสารคือ กระบวนการที่สารสำคัญ (core) ที่มีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลวหรือแก๊ส ถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุห่อหุ้ม (wall) เพื่อควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญให้ออกมาในสภาวะที่ต้องการ เนื่องจากสารบางชนิดมีความไวต่อสภาวะแวดล้อมภายนอก เช่น แสงแดด ออกซิเจน น้ำ เป็นต้น ทำให้สารมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนไป หรือสารบางชนิดระเหยได้ง่าย โดยสารที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มนั้นจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารสำคัญที่อยู่ภายใน รวมถึงสารเคมีหรือวัสดุอื่นๆที่มีอยู่ในระบบ โดยทั่วไปกระบวนการกักเก็บสารที่ให้กลิ่นรสประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินการ 2 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 2.6 โดยขั้นตอนแรกจะเป็นการทำให้เกิดอิมัลชันของสารสำคัญและวัสดุห่อหุ้ม จากนั้นเป็นการอบแห้งหรือทำให้อิมัลชันเย็นตัวลง




ภาพที่ 2.6 ขั้นตอนของกระบวนการกักเก็บสาร

(http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY463%2850%29/FY463-4.pdf)

กระบวนการกักเก็บสารสามารถทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) และเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion) นอกจากนี้ยังสามารถใช้เทคนิคอื่นๆ เช่น สเปรย์ชิลลิงและคูลลิง (spray chilling and cooling) โคเซอร์เวชัน (coacervation) การเคลือบโดยใช้เทคนิคฟูลอิดไดส์เบด (fluidized bed coating) การใช้ไลโปโซมในการหุ้ม (liposome entrapment) และเทคนิคการอบแห้งแบบเยือกแข็ง (freeze drying) โดยแต่ละเทคนิคจะให้ขนาดและอนุภาคที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ขนาดของอนุภาคจากการกักเก็บด้วยเทคนิคต่างๆ (Madene et al. 2006)

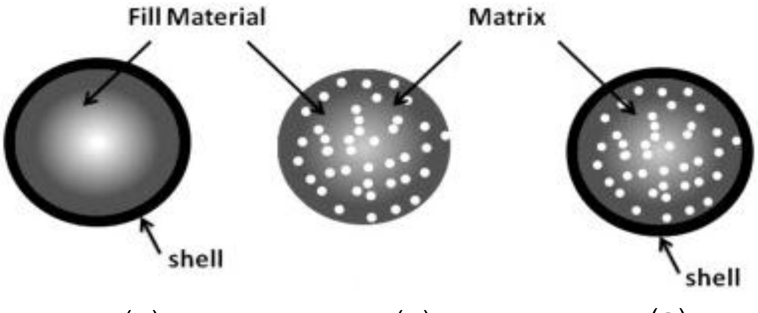
| | กระบวนการการกักเก็บ | ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร) | สารสำคัญที่กักเก็บได้ (%ต่อน้ำหนักอนุภาค) |
|---|---|---|---|
| เทคนิคทางเคมี | กระบวนการโควเซอร์เวชัน | 5-200 | 70-90 |
| | การกักเก็บในระดับโมเลกุล | 5-50 | 5-10 |
| เทคนิคทางกล | การอบแห้งแบบพ่นฝอย | 1–50 | <40 |
| | การทำให้เย็นแบบพ่นฝอย | 20-200 | 10-20 |
| | การอัดรีด | 200-2,000 | 6-20 |
| | การอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชัน | >100 | 60-90 |

สำหรับโครงสร้างของอนุภาคที่ได้จากกระบวนการกักเก็บ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1) ชนิด Reservoir เป็นรูปแบบของไมโครแคปซูลที่ได้จากการกักเก็บโดยใช้เทคนิค โคเซอร์เวชัน (coacervation) ดังแสดงในภาพที่ 2.7 (ก)

2) ชนิด Matrix เป็นรูปแบบของไมโครแคปซูลของสารที่ให้กลิ่นรสส่วนใหญ่ที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรม ดังแสดงในภาพที่ 2.7 (ข) โดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย สเปรย์ชิลลิง สเปรย์คูลลิง และเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion)

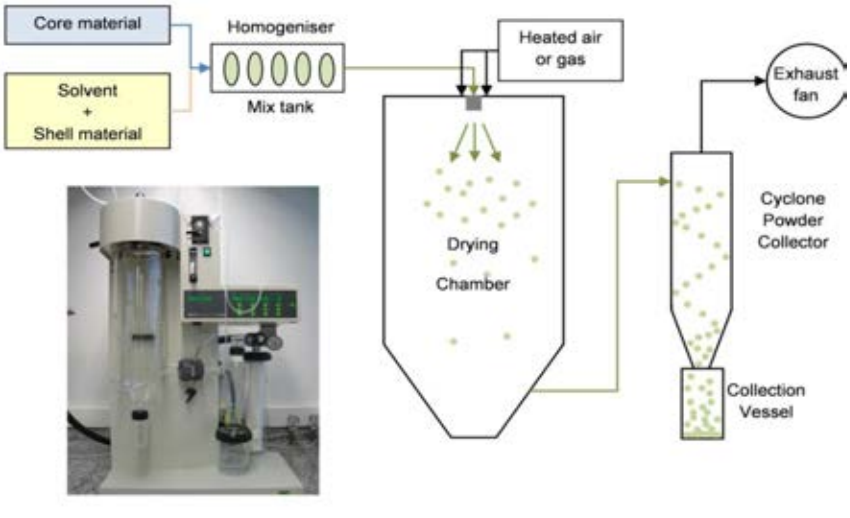
3) ชนิด Coated matrix เป็นรูปแบบของไมโครแคปซูลของสารที่ให้กลิ่นรสที่มีการเคลือบผิวครั้งที่สองโดยใช้เทคนิคฟูลอิดไดส์เบด (fluidized bed) ดังแสดงในภาพที่ 2.7 (ค) ทำให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยสารให้กลิ่นรสในสภาวะที่ต้องการได้




ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของอนุภาค (ก) Reservoir type (ข) Matrix type (ค) Coated matrix type (Burgain et al. 2011)

**2.6 กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying)**

กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตสารให้กลิ่นรส ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อระเหยน้ำออกจากของเหลวอย่างรวดเร็วด้วยอากาศร้อน สำหรับตัวอย่างของเหลวที่นำมาผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สามารถใช้ได้ทั้งสารประเภทอิมัลชัน (Emulsion) หรือสารแขวนลอย กระบวนการนี้ประกอบด้วยการพ่นของเหลวให้ออกมาเป็นละอองขนาดเล็ก ผสมเข้ากับอากาศร้อนที่ไหลผ่านอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำที่อยู่ในละอองของเหลวระเหยไปและได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของผงแห้ง ส่วนเครื่องมือที่ใช้สำหรับกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย คือเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) ดังแสดงในภาพที่ 2.8




ภาพที่ 2.8 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (http://www.intechopen.com/books/probiotics/encapsulation-technology-to-protect-probiotic-bacteria)

2.6.1 **การทำให้ของเหลวกระจายตัวเป็นละอองฝอย** (Atomization)

การทำของเหลวให้มีอนุภาคขนาดเล็ก เป็นหัวใจหลักของการอบแห้งแบบพ่นฝอยเพราะเป็นตัวทำให้เกิดพื้นที่ผิวในการระเหยเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อของเหลวมีขนาดเล็กลงจะเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายโอนความร้อนได้มาก ทำให้การถ่ายโอนมวลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพเฉพาะของอนุภาคทั้งในเรื่องขนาด รูปร่าง ตลอดจนความหนาแน่น สำหรับการทำให้ของเหลวกระจายตัวเป็นละอองนั้น สามารถทำได้โดยใช้หัวฉีดซึ่งถือว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) ซึ่งมี 3 ชนิด คือ

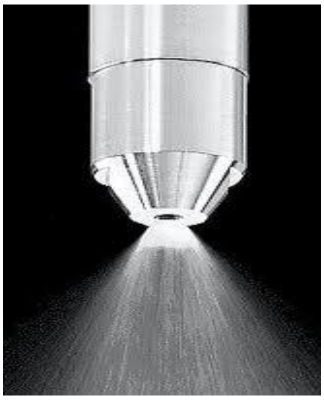
1) **หัวฉีดแบบจานหมุน** (Rotary Atomizer)

อุปกรณ์พ่นฝอยชนิดนี้จะให้ของเหลวไหลลงบนจานหมุนใกล้กับจุดศูนย์กลาง โดยจานหมุนจะมีความเร็วรอบประมาณ 5,000-30,000 รอบต่อนาที ของเหลวที่ตกลงบนจานหมุนจะถูกเหวี่ยงออกด้านข้างกระจายเป็นละอองฝอย ดังแสดงในภาพที่ 2.9 โดยหัวฉีดแบบจานหมุนนั้นจะให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 30-120 ไมครอน

ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของหัวฉีดแบบจานหมุน
(http://www.niroinc.com/pdfs/GEA_Pharma_Systems/gea_niro_pharmaceutical_spray_drying.pdf)

2) **หัวฉีดแบบแรงดัน** (Pressure Nozzles Atomizer)

อุปกรณ์พ่นฝอยชนิดนี้ของเหลวจะไหลผ่านช่องของหัวฉีดภายใต้ความดันสูง ทำให้ของเหลวที่ออกมาจากหัวฉีดกระจายเป็นละอองฝอยได้โดยที่ไม่ต้องใช้อากาศ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 อนุภาคที่ได้จะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 120-250 ไมครอน



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของหัวฉีดแบบแรงดัน

(http://www.geaprocess.co.uk/gpuk/cmsdoc.nsf/webdoc/webb7q4gmn)

3) **หัวฉีดแบบสองของไหล** (Two-fluid Nozzle Atomizer, Pneumatic Nozzle Atomizer)

อุปกรณ์พ่นฝอยชนิดนี้ของเหลวและอากาศจะไหลผ่านท่อ ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ซึ่งจะทำให้ของเหลวแตกเป็นละอองฝอยเนื่องจากการไหลผ่านของอากาศด้วยความเร็วสูงภายในหัวฉีด นอกจากนี้การปรับอัตราการไหลของอากาศจะช่วยในการกระจายเป็นละอองของของเหลวอีกด้วย วิธีนี้นิยมใช้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง

ภาพที่ 2.11 โครงสร้างของหัวฉีดแบบสองของไหล

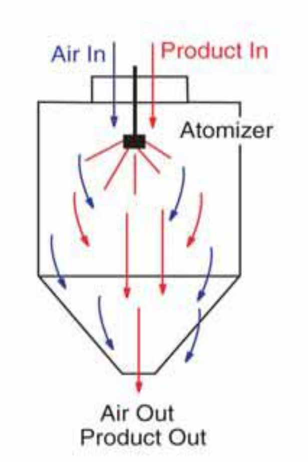
(http://www.niroinc.com/pdfs/GEA_Pharma_Systems/gea_niro_pharmaceutical_spray_drying.pdf)

**2.6.2 การสัมผัสระหว่างละอองหยดของเหลวกับอากาศร้อน**

ในขั้นตอนนี้ละอองของของของเหลวจะสัมผัสกับอากาศร้อนเพื่อให้น้ำรับความร้อนจากอากาศร้อนมาทำให้เกิดการระเหยน้ำออกไป เกิดเป็นผงผลิตภัณฑ์แห้ง การกำหนดทิศทางของการเคลื่อนที่ของอากาศร้อนเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงมาก โดยถ้าทิศทางการไหลของอากาศเหมาะสมก็จะทำให้การถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ก็ต้องขึ้นกับจุดประสงค์ของการอบแห้งรวมถึงคุณภาพและลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ การสัมผัสระหว่างละอองหยดของเหลวกับอากาศร้อนแบ่งได้ 3 แบบ คือ

1) **การไหลไปในทิศทางเดียวกัน** (Co-current flow)

ละอองของของเหลวจะถูกพ่นออกไปในทิศทางเดียวกันกับอากาศร้อนที่ไหลเข้า ดังแสดงในภาพที่ 2.12 วิธีดังกล่าวเหมาะสำหรับสารที่ไม่ทนต่อความร้อนเนื่องจากมีการระเหยของน้ำเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนขาออกและผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำ

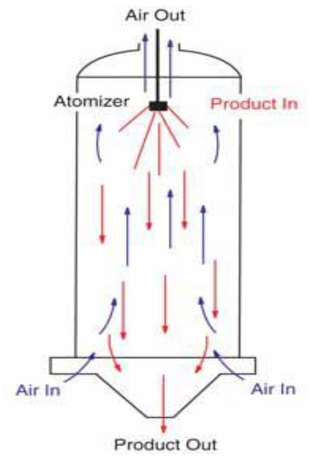



ภาพที่ 2.12 การไหลของอากาศร้อนและสารในทิศทางเดียวกัน

(http:// www.bete.com/pdfs/BETE_SprayDryManual.pdf )

2) **การไหลสวนทางกัน** (Counter-current flow)

ละอองของเหลวที่ถูกพ่นและอากาศร้อนจะไหลในทิศทางตรงกันข้าม ดังแสดงในภาพที่ 2.13 เริ่มจากละอองของเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำเมื่อได้รับความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิของอากาศร้อน ดังนั้นการไหลลักษณะนี้จะมีการถ่ายโอนความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพจึงเหมาะกับสารที่ทนต่อความร้อนสูง

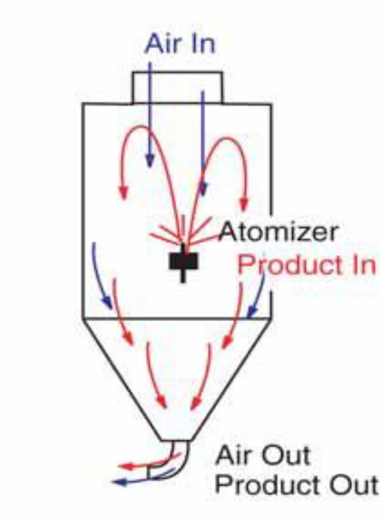



ภาพที่ 2.13 การไหลของอากาศร้อนและสารแบบสวนทางกัน

(http:// www.bete.com/pdfs/BETE_SprayDryManual.pdf )

3) **การไหลแบบผสมกัน** (Mixed-flow)

ละอองของเหลวและอากาศร้อนจะไหลไปในทางเดียวกันและสวนทางพร้อมกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.14 วิธีนี้เหมาะสำหรับกรณีที่มีพื้นที่จำกัดในการติดตั้งหออบแห้ง




ภาพที่ 2.14 การไหลของอากาศร้อนและสารแบบผสมกัน

(http:// www.bete.com/pdfs/BETE_SprayDryManual.pdf )

### 2.6.3 การแยกผลิตภัณฑ์ผงแห้งออกจากอากาศ

การแยกผลิตภัณฑ์ผงแห้งนั้น โดยทั่วไปนิยมใช้ไซโคลน (cyclone) เป็นตัวเก็บผลิตภัณฑ์ที่ตกลงสู่ด้านล่าง ส่วนลมที่ออกจากด้านบนของไซโคลน จะผ่านไปยังตัวเก็บขั้นสุดท้ายทั้งนี้อาจเป็น wet scrubber หรือ bag filter หรือ electrostatic precipitator ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณผงที่มีและประสิทธิภาพการนำกลับมา

**ข้อดีของการกักเก็บโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย**

1) ต้นทุนการผลิตต่ำ

2) เครื่องมือที่ใช้สามารถหาได้ง่าย

3) สามารถปกป้องสารสำคัญได้เป็นอย่างดีและสามารถเลือกใช้วัสดุห่อหุ้มได้หลายชนิด

**ข้อจำกัดของการกักเก็บโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย**

1) อาจเกิดการสูญเสียสารสำคัญที่มีจุดเดือดต่ำระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

2) อาจมีสารสำคัญติดที่ผิวของไมโครแคปซูลซึ่งอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในผลิตภัณฑ์

3) การกักเก็บโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผงที่ละเอียดมาก โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคอยู่ในช่วง 10-100 ไมครอน ซึ่งอาจจะต้องนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการฟูลอิดไดส์เบดเพื่อทำให้อนุภาคที่ผ่านการกักเก็บสามารถละลายได้ทันที หรือละลายได้ง่ายขึ้นเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารที่อยู่ในรูปของเหลว

## 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการกักเก็บสารสำคัญในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

การกักเก็บสารสำคัญให้มีประสิทธิภาพนั้นขึ้นกับหลายปัจจัย เนื่องจากสารสำคัญแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน รวมถึงวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน ดังนั้นแนวทางหนึ่งที่จะทำให้การกักเก็บมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น จำเป็นที่จะต้องเลือกหาวัสดุห่อหุ้มที่เหมาะสม รวมถึงการเติมปริมาณของแข็งในสายป้อนให้พอเหมาะ เนื่องจากปริมาณของแข็งที่พอดีจะทำให้เกิดเป็นเปลือกหุ้มได้เหมาะสมซึ่งสามารถป้องกันเมนทอลไม่ให้เกิดการสูญเสียไปได้ อย่างไรก็ดีการเพิ่มค่าการกักเก็บนั้นยังคงทำได้โดยการเติมอิมัลซิไฟเออร์ และการเติมสารจำพวกสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม นอกจากนี้อัตราการระเหยของน้ำภายในอนุภาคก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อค่าการกักเก็บ โดยถ้าอนุภาคมีอัตราการระเหยของน้ำที่สูง จะสามารถเกิดเป็นเปลือกหุ้มได้อย่างรวดเร็วจึงช่วย

ป้องกันเมนทอลจากอากาศร้อนได้ดี ค่าการกักเก็บจึงสูง ซึ่งอัตราการระเหยของน้ำสามารถควบคุมได้จากอุณหภูมิอากาศขาเข้า อัตราการป้อนสารเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย รวมถึงความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยอีกด้วย

### 2.7.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของวัสดุห่อหุ้ม

การเลือกวัสดุห่อหุ้มนั้นมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการกักเก็บ ไม่ว่าจะเป็นสมบัติการละลาย มวลโมเลกุล หรือแม้แต่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition, Tg) ต่างส่งผลต่อคุณสมบัติของอนุภาคและวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งานทั้งสิ้น อย่างไรก็ตามวัสดุห่อหุ้มที่นิยมใช้มีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการกักเก็บที่แตกต่างกัน เช่น

**1) สตาร์ซ** (starch)

แป้งเป็นสารอีกชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเหมาะสำหรับการใช้เป็นวัสดุห่อหุ้ม เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ มีคุณสมบัติแข็ง เหนียว ยืดหยุ่น มีคุณสมบัติทางกลที่ดี สามารถป้องกันการแพร่ผ่านของออกซิเจน ให้ลักษณะผิวที่เรียบ และยังเป็นตัวป้องกันการระเหยของสารสำคัญ หรือป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญต่อการเก็บกักสารสำคัญไว้ได้นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณอะไมโลส หากมีปริมาณอะไมโลสที่มากขึ้น การกักเก็บสารสำคัญก็จะดีขึ้น แป้งสามารถเกิดพันธะกับสารสำคัญสองลักษณะ ได้แก่ การเกิดพันธะไฮโดรโฟรบิค (hydrophobic bonding) ของสารสำคัญกับอะไมโลสเฮลิค (amylose helix) และการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) กับสารสำคัญ อย่างไรก็ดียังมีการนำแป้งมาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการโดยเฉพาะความสามารถในการสร้างอิมัลชัน โดยการนำพอลิเมอร์ไปล้อมรอบไฮโดรโฟบิคให้มีความคงตัวมากขึ้น ซึ่งการดัดแปลงแบบนี้ทำได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับ 1-octenyl succinic anhydride เพื่อให้ได้สารทดแทนแป้ง (substituted starch) ที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิคและไอโดรฟิลิค เรียกว่า n-OSA สำหรับแป้งดัดแปลงที่มีชื่อทางการค้า เช่น ไฮแคป 100 (Hicap-100) และแคปซูล (capsule) เป็นต้น

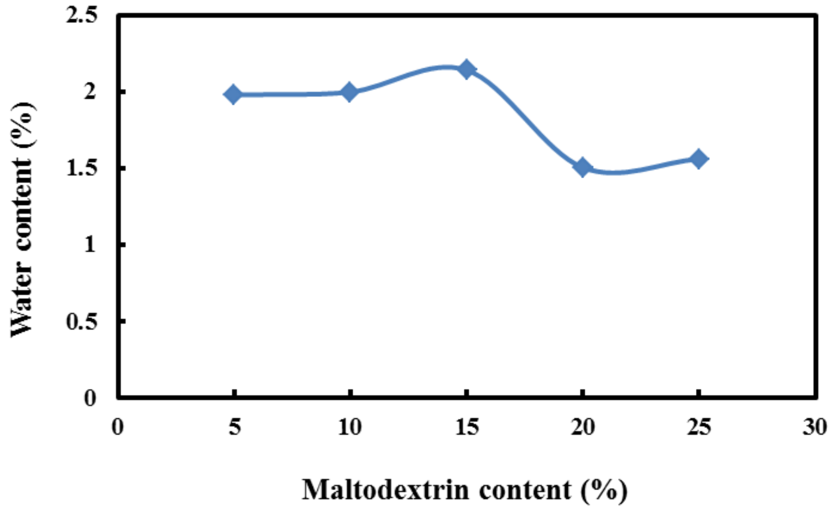
**2) มอลโตเด็กซ์ตริน** (maltodextrin)

เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่เชื่อมต่อด้วยพันธะ (-1,4) มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ประมาณ 900-9,000 ผลิตได้จากการย่อยสลายแป้งข้าวโพดหรือแป้งมันฝรั่ง โดยการใช้กรดหรือเอนไซม์ โดยดูได้จากค่าสมมูลเด็กซ์โตรส (dextrose equivalents, DE) ค่าสมมูลเด็กซ์

โตรสจะวัดได้จากระดับการไฮโดรไลซีสพอลิเมอร์ของแป้ง (degree of starch polymer hydrolysis) และมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสแตกต่างกันจะมีสมบัติทางเคมี กายภาพแตกต่างกัน เช่น ความสามารถในการละลาย อุณหภูมิเยือกแข็ง ความหนืด เป็นต้น อย่างไรก็ตาม มอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเหมือนกัน อาจจะมีสมบัติต่างกันได้ขึ้นอยู่กับวิธีการไฮโดรไลซิสแหล่งของสตาร์ช และอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน มอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสสูงกว่า จะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ต่ำกว่า เช่น มอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรส 10 และค่าสมมูลเด็กซ์โตรส 20 มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 1,800 และ 900 ตามลำดับ และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว เท่ากับ 160 และ 141 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีผลต่อความชื้นในอนุภาค ดังในงานวิจัยของ Vanzo et al. (2011) ที่ศึกษาการทำกาแฟผงแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าเมื่อเติมมอลโตเด็กซ์ตรินในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้มีความชื้นในอนุภาคน้อยลงและอิมัลชันมีขนาดเล็กลง ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohd (2009) ที่พบว่าปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินมีผลต่อความชื้นในอนุภาค ในการทำแก้วมังกรผงแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 2.15 เนื่องจากการเติมมอลโตเด็กซ์ตรินนั้นจะทำให้อนุภาคมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูงขึ้น ดังนั้นมอลโตเด็กซ์ตรินจึงเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายยาง (rubbery state) ได้ยาก จึงทำให้น้ำระเหยออกไปได้เป็นผลให้มีปริมาณน้ำในอนุภาคน้อยลง

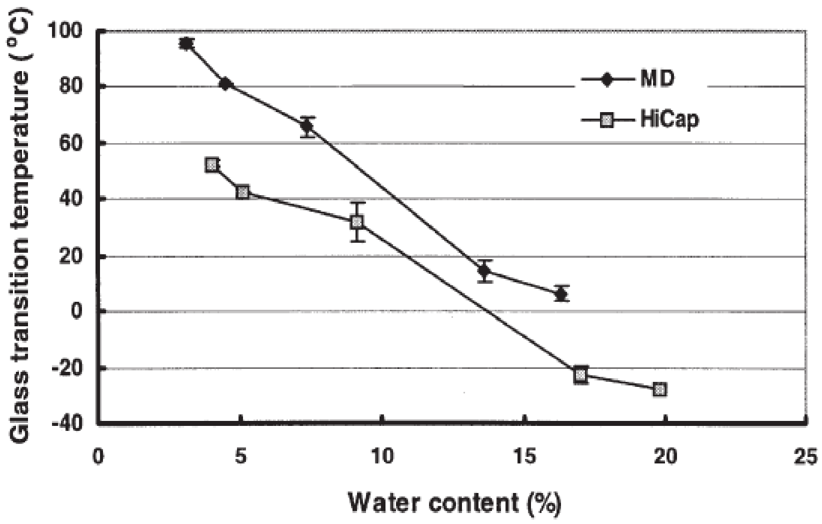
ตารางที่ 2.5 ผลของมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีต่อขนาดอิมัลชันและปริมาณน้ำในอนุภาค (Vanzo et al. 2011)

| Maltodextrin (%) | Emulsion size (μm) | Water content (%) | Retention (%) |
|---|---|---|---|
| 25 | 4.02 | 5.3 | 86.33 |
| 50 | 4.05 | 4.3 | 82.72 |
| 75 | 3.85 | 1.89 | 79.87 |




ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินและปริมาณน้ำในอนุภาค (Mohd 2009)

นอกจากนี้ Partanen et al. (2002) ได้ทำการวิจัยโดยทำการกักเก็บ sea buckthorn oil ในมอลโตเด็กซ์ตรินและไฮแคป ยังให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน คือปริมาณน้ำที่มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2.16 อย่างไรก็ตามมอลโตเด็กซ์ตรินอาจอยู่ในรูปผงสีขาวหรือของเหลวข้นไม่มี กลิ่นรส ละลายน้ำได้ดี มีความหนืดต่ำ แต่ไม่มีคุณสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์จึงนิยมใช้ร่วมกับสตาร์ชอ๊อกทินิลซัคซิเนตหรือกัมอะราบิกเพื่อลดต้นทุนการผลิต




ภาพที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและปริมาณน้ำในอนุภาค (Partanen et al. 2002)

**3) กัมอะราบิก** (gum arbic)

กัมอะราบิกเป็นไฮโดรคอลลอยด์ ที่ถูกนำมาใช้ในรูปของสารเคลือบ เนื่องจากสามารถละลายได้ดี มีความหนืดต่ำ มีคุณสมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ และสามารถกักเก็บสารที่ให้กลิ่นรสได้ดี เนื่องจากส่วนอะราบิโนกาแลคแทน (arabinogalactan) และส่วนไกลโคโปรตีน (glycoprotein) มีปริมาณโปรตีนมาก โดยโปรตีนจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างน้ำและน้ำมัน เนื่องจากโปรตีนประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิค (hydrophobic) และไฮโดรฟิลิค (hydrophilic) อย่างไรก็ดีไมโครแคปซูลที่ได้จากการกักเก็บสารที่ให้กลิ่นรสโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้ส่วนผสมของมอลโตเดกซ์ตรินและกัมอะราบิกเป็นสารเคลือบ จะมีขนาดตั้งแต่ 10-200 ไมครอน และสามารถกักเก็บสารที่ให้กลิ่นรสได้มากกว่า 80% ยังขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ใช้ระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ได้แก่ อุณหภูมิขาเข้าของอากาศร้อน ความเข้มข้นของอิมัลชัน ความหนืด และสัดส่วนของกัมอะราบิกและมอลโตเด็กซ์ตริน

**4) โปรตีน** (Protein)

โปรตีนเป็นสารจำพวกไฮโดรคอลลอยด์มักถูกใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มสำหรับกักเก็บสารให้กลิ่นรส เนื่องจากโปรตีนจัดเป็นสารที่มีคุณสมบัติของสารเคลือบ ไม่ว่าจะเป็นค่าการละลาย (solubility) ความหนืด (viscosity) และคุณสมบัติของการทำให้เกิดฟิล์ม ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้ดีในกระบวนการกักเก็บระหว่างการเกิดอิมัลชัน โดยโมเลกุลของโปรตีนจะดูดซับที่บริเวณผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ (oil-water interface) อย่างรวดเร็วทำให้เกิด steric stabilizing layer ขึ้นทันที จึงสามารถปกป้องหยดน้ำมัน (oil droplet) จากการกลับมารวมตัวอีกครั้ง (recoalescence) ทำให้เกิดความเสถียรทางกายภาพของอิมัลชันระหว่างกระบวนการผลิตและการเก็บรักษา สำหรับตัวอย่างโปรตีนที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุห่อหุ้ม เช่น โซเดียมเคซีเนต (sodium caseinate) เวย์โปรตีน (whey protein) โปรตีนถั่วเหลือง (soy protein isolate) และเจลาติน (gelatin) อย่างไรก็ดีสามารถสรุปคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุห่อหุ้มในแต่ละชนิดตามลักษณะการใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของวัสดุห่อหุ้มชนิดต่างๆ (Madene et al. 2006)

| **ชนิดของวัสดุห่อหุ้ม** | **คุณลักษณะเฉพาะ** |
|---|---|
| Maltodextrin (DE<20) | Film forming |
| Corn syrup solid (DE>20) | Film forming |
| Modified starch | Very good emulsifier |
| Gum Arabic | Emulsifier, Film forming |
| Modified cellulose | Film forming |
| Gelatin | Emulsifier, Film forming |
| Cyclodextrin | Emulsifier |
| Lecithin | Emulsifier |
| Whey protein | Good emulsifier |

นอกจากการเลือกชนิดวัสดุห่อหุ้มให้เหมาะสมแล้วนั้น วัสดุห่อหุ้มที่ดี ควรมีคุณสมบัติดังนี้ (เอกลักษณ์ ทวีโรจนกุล 2552)

1) มีความสามารถในการสร้างฟิล์มได้

2) มีความยืดหยุ่นและมีความแข็งแรงเพียงพอ

3) มีคุณสมบัติในการทำให้เกิดอิมัลชัน

4) ยึดติดกับสารสำคัญได้ดี โดยไม่มีการทำปฏิกิริยา

5) มีความหนืดต่ำเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นของแข็ง และไม่ชื้นง่าย

6) มีความคงตัวสูง เพื่อป้องกันสารสำคัญจากสภาพแวดล้อมภายนอก

7) ปลดปล่อยสารสำคัญได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน ในบางครั้งพบว่ามีการใช้วัสดุห่อหุ้มถึงสองชั้น โดยชั้นในเพื่อปกป้องสารสำคัญ และชั้นนอกเพื่อให้เกิดการทำงานตามวัตถุประสงค์

### 2.7.2 อัตราส่วนของสารสำคัญและวัสดุห่อหุ้ม

ปริมาณสารสำคัญที่เติมลงไปต่างส่งผลต่อค่าการกักเก็บ ดังนั้นการศึกษาวิจัย จึงต้องหาปริมาณสารสำคัญที่เหมาะสมกับวัสดุห่อหุ้มชนิดต่างๆ เพื่อให้ได้ค่าการกักเก็บมากที่สุดและคุ้มทุนมากที่สุด เนื่องจากการเติมสารสำคัญที่มากเกินไป ทำให้วัสดุห่อหุ้มไม่สามารถกักเก็บได้หมด ดังนั้นการหาปริมาณที่เหมาะสมของสารสำคัญจึงเป็นสิ่งสำคัญ ดังในงานวิจัยของ Soottitantawat et al. (2005) ที่ได้ทำการกักเก็บเมนทอลด้วยกัมอะราบิก แคปซูล (capsule) และไฮแคป (Hicap-100) พบว่าปริมาณเมนทอลที่เติมลงไปมีผลต่อการกักเก็บ ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ปริมาณเมนทอลที่มีผลต่อการกักเก็บ (Soottitantawat et al. 2005)

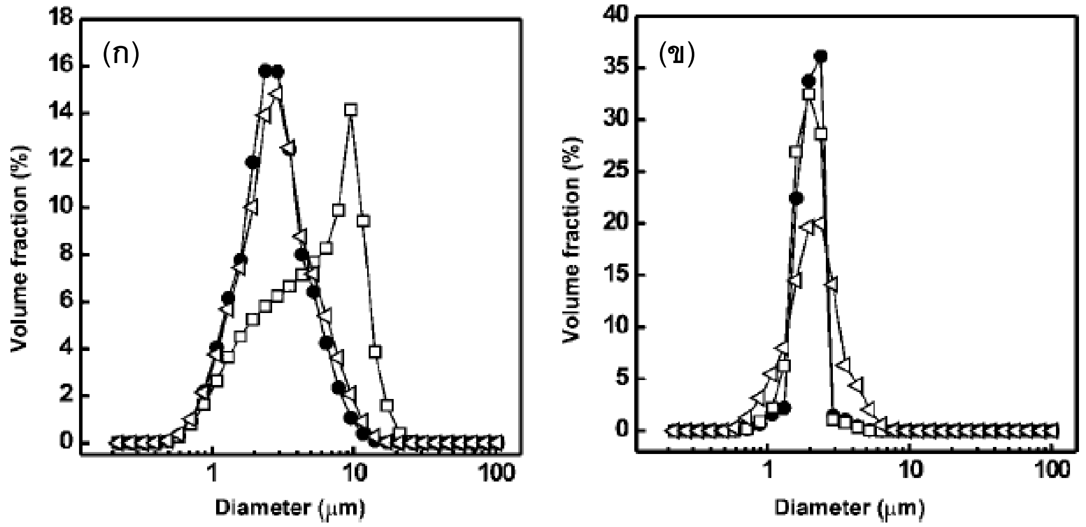
| l-Menthol concentration (mass ratio of l-menthol: wall materials) | Retention of l-menthol (%) | | |
|---|---|---|---|
| | GA | CAPSUL | HI-CAP 100 |
| 1:9 | 72 | 85 | 87 |
| 2:8 | 72 | 85 | 85 |
| 3:7 | 68 | 79 | 85 |

งานวิจัยของวีระพงศ์ วิรุฬห์ธนกฤษณ์ (2553) ที่ได้ศึกษาการกักเก็บกลิ่นควันเทียนในมอลโตเด็กซ์ตริน โดยศึกษาปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินในช่วง 25-40% พบว่าการเติมมอลโตเด็กซ์ตรินที่ 30% จะให้ค่าการกักเก็บมากที่สุด เนื่องจากที่ความเข้มข้นของมอลโตเดกซ์ตรินที่ 30% สามารถทำให้สารละลายควันเทียนก่อนการทำแห้งเสถียร ซึ่งสารละลายที่เสถียรจะช่วยลดการแตกตัวด้วยแรงเฉือนที่เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ทำให้สามารถลดการสูญเสียสารระเหยขณะทำแห้งได้ นอกจากนี้ในงานวิจัยของสุเทพ สิงห์ไข่มุก (2553) ที่ได้ศึกษาการกักเก็บน้ำมันตะไคร้หอมในแป้งข้าวเจ้า โดยทำการศึกษาอัตราส่วนน้ำมันตะไคร้หอมต่อแป้งข้าวเจ้าระหว่าง 1:4 และ 1:2 และยังศึกษาปริมาณแป้งข้าวเจ้าเริ่มต้น 10% - 40% ในน้ำ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบร้อยละการกักเก็บระหว่างอัตราส่วนน้ำมันต่อแป้ง 1 ต่อ 4 กับอัตราส่วนน้ำมันต่อแป้ง 1 ต่อ 2 พบว่า ร้อยละการกักเก็บระหว่างอัตราส่วนน้ำมันต่อแป้ง 1 ต่อ 4 มีค่ามากกว่าที่อัตราส่วนน้ำมันต่อแป้ง 1 ต่อ 2 เนื่องจากการใช้น้ำมันตะไคร้หอมที่มากเกินไป ทำให้ชั้นของเหลวรอบอนุภาคเม็ดแป้งหนาขึ้น

ส่งผลให้แป้งข้าวเจ้าซึ่งยึดติดกันด้วยแรง liquid bride ยึดติดกันยากขึ้น แป้งข้าวเจ้าที่เกาะยึดกันไม่สามารถกักเก็บน้ำมันตะไคร้หอมได้ทั้งหมด ทำให้น้ำมันตะไคร้หอมส่วนที่เกินระเหยไป ส่งผลให้ร้อยละการกักเก็บของน้ำมันตะไคร้หอมที่ได้มีค่าต่ำ และเมื่อพิจารณาปริมาณแป้งที่เติมลงไปพบว่า การกักเก็บของน้ำมันตะไคร้หอมมากที่สุดที่ปริมาณแป้ง 40 % เนื่องจากการใช้ปริมาณแป้งจำนวนน้อยในสายป้อน น้ำมันตะไคร้หอมจึงมีวัสดุมาห่อหุ้มไม่เพียงพอ เป็นผลให้น้ำมันส่วนใหญ่ระเหยหายไป ซึ่งทำให้ปริมาณน้ำมันมีเหลืออยู่จำนวนน้อย ในทางกลับกันเมื่อแป้งในสายป้อนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทำให้การกักเก็บน้ำมันเหลืออยู่มาก เนื่องจากมีปริมาณแป้งเพียงพอที่จะกักเก็บน้ำมันตะไคร้หอม ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปริมาณวัสดุห่อหุ้มและสารสำคัญที่เติมลงไป นับได้ว่ามีความสำคัญต่อการกักเก็บ ซึ่งปริมาณที่จะเติมลงไปนั้นจึงแตกต่างกัน และมีความเหมาะสมเฉพาะแต่ละวัสดุไป

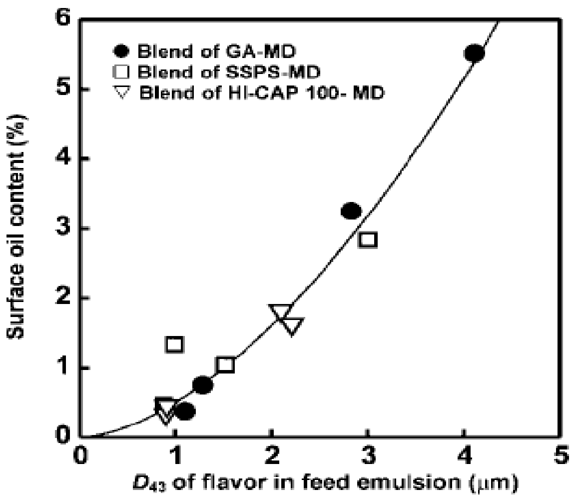
### 2.7.3 **ขนาดของอิมัลชัน**

ขนาดของอิมัลชันส่งผลต่อการกักเก็บของอนุภาค โดยขนาดอิมัลชันที่เหมาะสมจะทำให้มีความเสถียรและไม่เกิดการสูญเสียไปในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่น ดังในงานวิจัยของ Soottitantawat et al. (2003) ที่ได้ศึกษาอิทธิพลของขนาดอิมัลชัน d-limonene แล้วพบว่าการที่อิมัลชันมีขนาดใหญ่นั้นจะส่งผลให้การกักเก็บของ d-limonene ลดลง เนื่องจากอิมัลชันที่มีขนาดใหญ่จะถูกแรงเฉือนจากหัวฉีดแบบจานหมุน ทำให้หยดอิมัลชันแตกออกและมีขนาดเล็กลง ดังแสดงในภาพที่ 2.17 (ก) จึงทำให้ d-limonene เกิดการระเหย ส่วนอิมัลชันที่ขนาดเหมาะสมนั้นดังแสดงในภาพ (ข) จะทำให้หยดอิมัลชันมีความเสถียรมากกว่า ดังนั้นแรงจากหัวฉีดแบบจานหมุนจะไม่ทำให้อิมัลชันแตกออกได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Risch et al.(1988) ที่พบว่าการที่อิมัลชันมีขนาดเล็ก ทำให้ค่าการกักเก็บน้ำมันจากเปลือกส้มในกัมอะราบิก และสตาร์ชมากกว่าอิมัลชันขนาดใหญ่




ภาพที่ 2.17 ขนาดอิมัลชันของสารผสม d-limonene และกัมอะราบิกและมอลโตเด็กซ์ตริน (ก) อิมัลชันขนาดใหญ่ (ข) อิมัลชันขนาดเหมาะสม : □ อิมัลชันของสายป้อน ● อิมัลชันหลังผ่านหัวฉีดแบบจานหมุน △ อิมัลชันของอนุภาคหลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

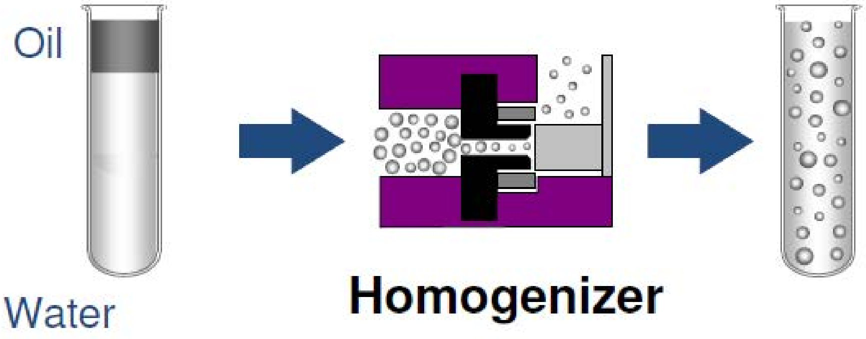
นอกจากนี้งานวิจัยของ Minemoto et al. (2002) ที่ได้ศึกษาการกักเก็บกรด linoleic ด้วยกัมอะราบิกและมอลโตเด็กซ์ตริน พบว่าขนาดอิมัลชันที่เล็กนั้นทำให้อนุภาคเกิดการออกซิไดซ์ของกรด linoleic น้อยกว่าอนุภาคที่มีอิมัลชันขนาดใหญ่ เพราะอิมัลชันที่เล็กนั้น จะทำให้มีกรด linoleic ที่บริเวณผิวของอนุภาคน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Soottitantawat et al. (2003) ที่พบว่าเมื่อขนาดอิมัลชันเพิ่มขึ้น จะทำให้บริเวณผิวของอนุภาคมีปริมาณสารสำคัญเพิ่มขึ้นตาม ดังภาพที่ 2.18




ภาพที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอิมัลชันกับปริมาณสารสำคัญที่ผิวของอนุภาค

(Soottitantawat et al. 2003)

อย่างไรก็ตาม การทำให้เกิดอิมัลชันสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ความดันสูง (High pressure homogenizer) หรือเครื่องอัลตราโซนิค (ultrasonic) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้ของเหลวต่างชนิดกันซึ่งไม่ละลายซึ่งกันและกัน เกิดการแตกกระจายผสมกันเป็นอิมัลชันขึ้น ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.19

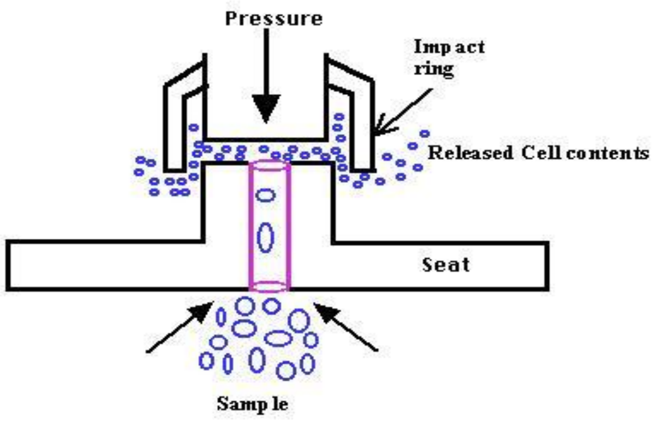



ภาพที่ 2.19 กระบวนการเกิดอิมัลชัน

(Weiss 2008)

ระบบอิมัลชัน เป็นระบบที่ไม่คงตัวหรืออาจคงตัวในช่วงเวลาหนึ่งแล้วเกิดการแยกชั้น เช่น น้ำกับน้ำมัน เป็นต้น ความไม่คงตัวของอิมัลชันในเชิงเทอร์โมไดนามิค มีสาเหตุจากการที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันและโมเลกุลของน้ำมีแรงตึงผิว (Interfacial tension) ที่ทำให้ไม่สามารถละลายรวมกันได้ ดังนั้นจึงต้องลดผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันกับน้ำให้น้อยลง โดยการเติมอิมัลซิไฟเออร์ นอกจากนี้ยังมีสาเหตุอื่นที่มีผลต่อความคงตัวของอิมัลชัน เช่น ขนาดของหยดน้ำมัน ซึ่งเป็นผลมาจากแรงที่ใช้ในการผสม (Homogenizer) และธรรมชาติของสารอิมัลซิไฟเออร์อีกด้วย

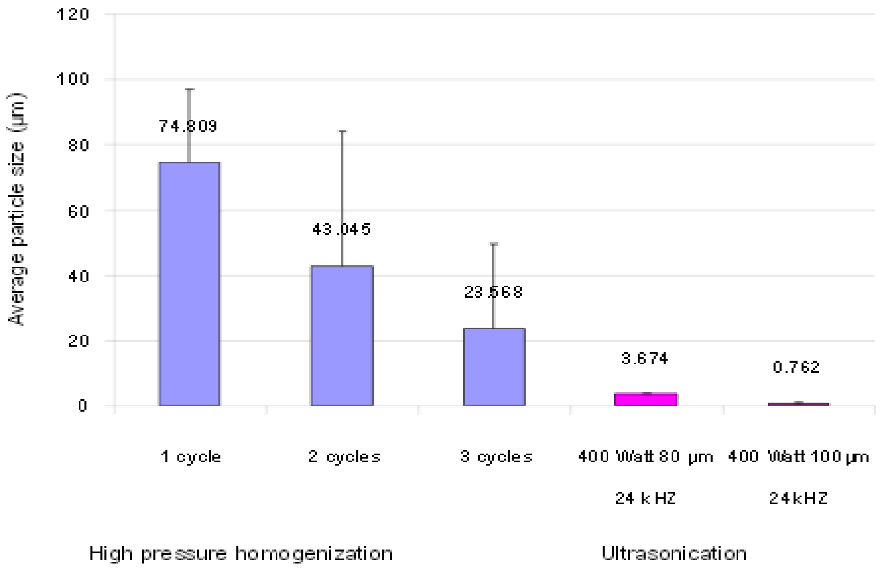
สำหรับการทำอิมัลชันด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ความดันสูงนั้น เป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันมานานในกระบวนการผลิตอิมัลชันและสารแขวนลอย(suspension) เช่น อุตสาหกรรมการผลิตนม อาหาร และอุตสาหกรรมยา โดยของเหลวจะถูกอัดผ่านช่องเล็กๆ ที่มีความกว้างประมาณ 5-20 ไมครอน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้อัดและความหนืดของของเหลว ซึ่งวิธีนี้ใช้การลดขนาดอนุภาคซึ่งเกิดจากแรงเฉือนเป็นหลัก นอกจากนี้การทำให้สารไหลผ่านช่องแคบเล็กๆ (cavitation) ยังเป็นการเพิ่มแรงกระแทกอีกด้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการ Bernouli เมื่อความเร็วในการไหลและความดันแบบไดนามิค (dynamic pressure) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความดันแบบ static ในช่องเล็กๆ (gap) ลดต่ำลงกว่าความดันไอของน้ำที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งของเหลวจะเดือดเมื่อความดันไอมีค่าเท่ากับ static pressure นั่นคือของเหลวจะเดือดอยู่ในช่องว่างเล็กๆนั้นที่อุณหภูมิห้อง ทำให้เกิดฟองอากาศ ซึ่งส่งผลให้เกิดคลื่นความดันไปรบกวนหยดอนุภาคของน้ำมันในของเหลวนั้น และเมื่อของเหลวผ่านออกมาจากช่องเล็กๆแล้ว static pressure จึงเพิ่มขึ้นสู่ระดับปกติ คือเท่ากับความดันอากาศทั่วไปทำให้ของเหลวไม่เกิดการเดือดอีกต่อไป ฟองอากาศจึงยุบตัว (implosion) ทำให้เกิดคลื่น (shock waves) ที่สามารถช่วยลดขนาดของหยดอนุภาคได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.20




ภาพที่ 2.20 หลักการทำงานของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ความดันสูง

(http://www.desmech.com/wp-content/disruption/4.JPG)

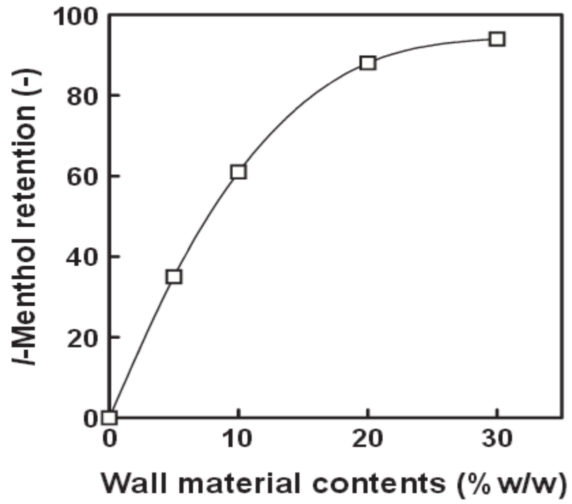
นอกจากนั้นปริมาณความดันที่ใช้ในการทำให้เกิดอิมัลชันและจำนวนรอบของอิมัลชันที่ผ่านเข้าออกเครื่องนั้น ย่อมส่งผลต่อขนาดอนุภาค โดยในงานวิจัยของ Moktong et al. (2010) ที่ศึกษาความเสถียรของอิมัลชันน้ำมันกานพลู โดยใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ความดันสูง พบว่าการเพิ่มจำนวนรอบของการใช้โฮโมจีไนเซอร์ความดันสูง ทำให้อิมัลชันมีขนาดเล็กลง ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.21




ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบของการใช้โฮโมจีไนเซอร์และขนาดของอิมัลชัน (Moktong et al. 2010)

### 2.7.4 **ปริมาณของแข็ง** (solid content) **ที่อยู่ในสายป้อน**

ปริมาณของแข็งที่อยู่ในสายป้อนนั้นเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการกักเก็บ เนื่องจากเมื่อปริมาณของแข็งมากขึ้นนั้น จะทำให้เกิดเป็นโครงสร้างห่อหุ้มได้เร็วยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงช่วยลดการสูญเสียสารสำคัญได้ ดังงานวิจัยของ Soottitantawat et al. (2005) ที่ศึกษาการกักเก็บ l-menthol โดยการอบแห้งแบบพ่นฝอยในวัสดุห่อหุ้มสามชนิดคือ กัมอะราบิค (gum arabic) แคปซูล (capsule) และไฮแคป 100 (Hicap-100) โดยพบว่าการมีของแข็งในสายป้อนในปริมาณมากจะช่วยลดการสูญเสียของสารสำคัญระหว่างการอบแห้งได้ เพราะจะไปช่วยให้เกิดฟิล์มเร็วขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.22



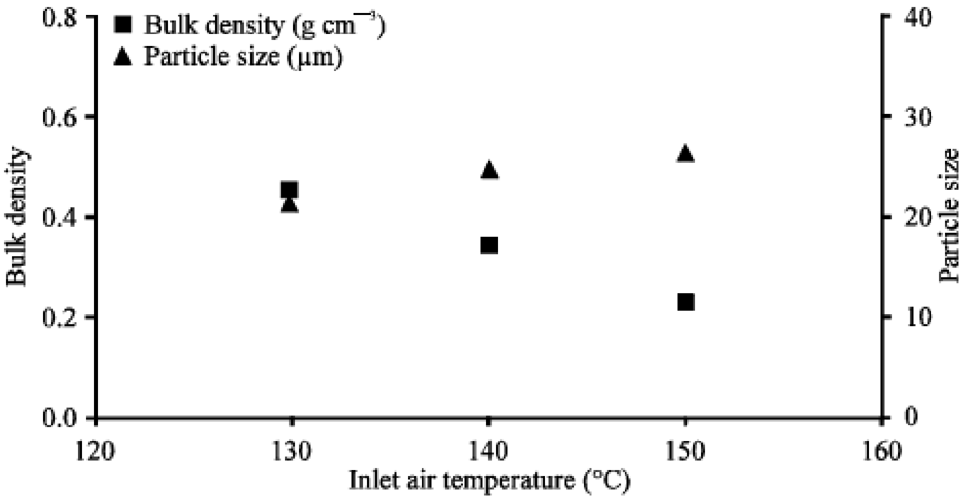

ภาพที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งในสายป้อนและค่าการกักเก็บ (Soottitantawat et al. 2005)

### 2.7.5 **ตัวแปรของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย**

ตัวแปรของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ย่อมส่งผลต่ออัตราการระเหยของน้ำในอนุภาค โดยถ้าทำให้อนุภาคมีอัตราการระเหยของน้ำที่สูง จะส่งผลให้อนุภาคเกิดเป็นโครงสร้างที่สามารถกักเก็บและปกป้องสารสำคัญได้เร็ว ดังนั้นค่าการกักเก็บจึงมากตามไปด้วย โดยตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการระเหยแห้ง เช่น อุณหภูมิอากาศขาเข้า อัตราการป้อนของสารเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย และความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน

#### 1) **อุณหภูมิอากาศขาเข้า**

อุณหภูมิอากาศขาเข้าเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บของอนุภาค เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปสามารถทำให้สารสำคัญระเหยหรือสูญเสียไปได้ นอกจากนี้อุณหภูมิขาเข้ายังส่งผลต่อคุณสมบัติของอนุภาค ดังงานวิจัยของ Chegini et al. (2007) ที่ได้ศึกษาการทำน้ำส้มผงโดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าส่งผลต่อขนาดของอนุภาคและความหนาแน่นของอนุภาค โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่จะทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคลดน้อยลง ดังแสดงในภาพที่ 2.23 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cai et al. (2000) ที่ได้ทำการกักเก็บเม็ดสี Amaranthus pigments ในมอลโตเด็กซ์ตรินโดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยและงานวิจัยของ Phoungchandang et al. (2010) ที่ได้ศึกษาการทำขิงผงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย




ภาพที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่มีต่อขนาดและความหนาแน่นของอนุภาค (Chegini et al., 2007)

Mortaza et al. (2012) ศึกษาการทำผงน้ำมันปลาด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้ามีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงจะเพิ่มอัตราการระเหยของน้ำ ส่งผลให้มีปริมาณน้ำในผงแห้งน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Goula et al. (2004) และ Kadam et al.(2011) ที่ได้ศึกษาการทำผงน้ำมันที่สกัดได้จากขิง ทั้งยังพบว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าส่งผลต่อความหนาแน่นของอนุภาค รวมถึงประสิทธิภาพในการกักเก็บและขนาดของอนุภาคดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่มีต่อตัวแปรต่างๆ (Kadam et al. 2011)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Inlet temperature (°C) | 150 | 160 | 170 | 180 |
| Outlet temperature (°C) | 99 | 108 | 112 | 126 |
| Moisture content (%) | 5.90 | 4.01 | 3.67 | 2.21 |
| Bulk density (g/ml) | 0.76 | 0.74 | 0.71 | 0.69 |
| Microencapsulation efficiency | 92% | 91% | 87 | 82 |
| Average particle size (μm) | 55.9 | 41.2 | 37.8 | 32.1 |
| Overall Acceptability | 7.9 | 8.5 | 8.1 | 7.8 |

**2) อัตราการป้อนสาร**

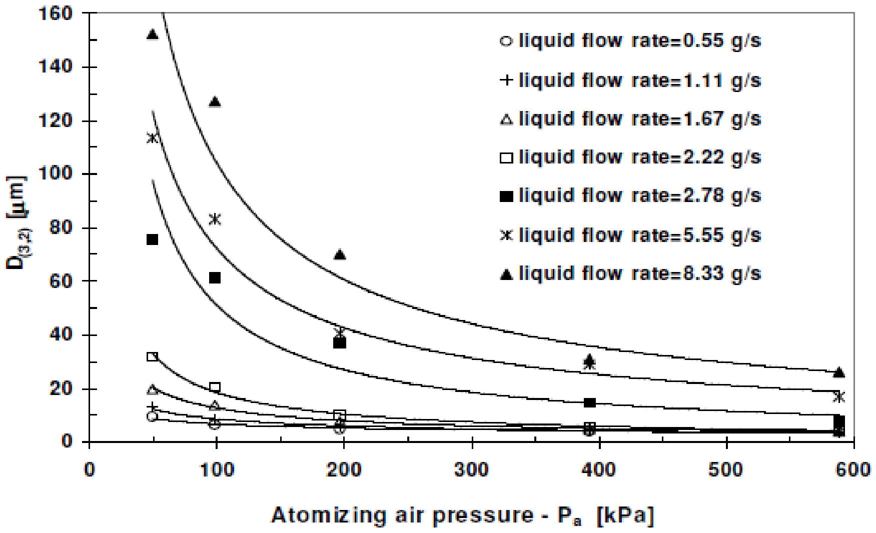
Petiraksakul et al. (2011) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำผงน้ำนมข้าวแห้ง พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารจะทำให้ผลิตภัณฑ์ผงแห้งที่ได้มีปริมาณความชื้นอยู่มากซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tantratian et al. (2005) ที่ได้ทำผงรสไก่จากน้ำนึ่งไก่โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย และงานวิจัยของ Tonon et al.(2008) ที่พบว่าการที่อัตราการป้อนสารสูงจะทำให้มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารกับอากาศได้ไม่ดี ทำให้ยังคงมีน้ำอยู่ในอนุภาคมาก นอกจากนี้การเพิ่มอัตราการป้อนสารยังทำให้การกักเก็บมีค่าลดลง ตามงานวิจัยของ Chegini et al. (2007) นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Erdinc (2007) ที่ได้ศึกษาการกักเก็บโปรตีนในอัลจิเนตยังพบว่าอัตราการป้อนสารส่งผลต่อขนาดอนุภาคและอุณหภูมิของอากาศขาออกด้วย โดยเมื่ออัตราการป้อนสารมากจะทำให้ขนาดของอนุภาคผงแห้งใหญ่ขึ้นตามลำดับ แต่จะทำให้อุณหภูมิอากาศขาออกมีอุณหภูมิต่ำลงดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 อัตราการป้อนสารที่มีผลต่อตัวแปรต่างๆ (Erdinc 2007)

| Q (ml/min) | T outlet [°C] | D[0.1] | D[0.5] | D[0.9] | Water Content | Product Recovery [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 58 | 3.12 | 6.69 | 30.1 | 8.1 ±1 | 21 ±2 |
| 7 | 61 | 2.32 | 6.31 | 22.2 | 7.2 ±2 | 21 ±2 |
| 5 | 59 | 1.91 | 4.91 | 13.5 | 5.6 ±2 | 33 ±2 |

3) **ความดันที่ใช้ในหัวฉีดของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย** (Atomizing air pressure)

ความดันที่ใช้ในหัวฉีดของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยมีผลต่อขนาดของอนุภาค ดังในงานวิจัยของ Re et al. (2004) ที่ได้ศึกษาตัวแปรของหัวฉีดในระบบที่อบแห้งแบบพ่นฝอยแล้ว พบว่าการเพิ่มความดันที่ใช้ในหัวฉีดจะทำให้อนุภาคที่ได้มีขนาดเล็กลง ดังแสดงในภาพที่ 2.24



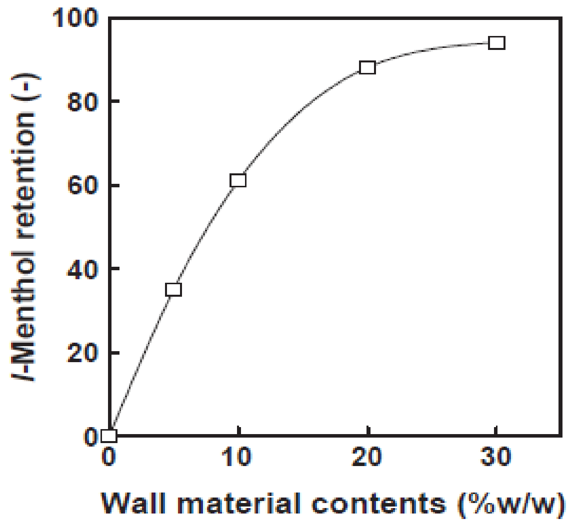

ภาพที่ 2.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับความดันที่ใช้ในหัวฉีดของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Re et al. 2004)

**5) ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน**

ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการกักเก็บ ดังในงานวิจัยของ Chegini et al. (2005) ที่พบว่าปริมาณน้ำในอนุภาคจะน้อยลง เมื่อเพิ่มความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนในการทำน้ำส้มผง ซึ่งใช้ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนระหว่าง 10,000-25,000 รอบต่อนาที นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนนั้นจะทำให้การกักเก็บมีประสิทธิภาพมากขึ้น

## 2.8 การใช้เมนทอลเป็นสารสำคัญในกระบวนการกักเก็บ

เนื่องจากเมนทอลเป็นสารที่สลายตัวได้ง่ายเมื่อสัมผัสอุณหภูมิสูง ดังนั้นวิธีการหนึ่งที่ช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว ก็คือการนำกระบวนการกักเก็บมาประยุกต์ใช้ ดัง Xiang-Dong et al. (2000) ที่ได้ทำการศึกษาการกักเก็บเมนทอลด้วยไซโคลเด็กซ์ตรินโดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งพบว่าการใช้เบต้าไซโคลเด็กซ์ตรินจะช่วยกักเก็บเมนทอลได้ดีกว่าการใช้แอลฟาไซโคลเด็กซ์ตรินและแกมมาไซโคลเด็กซ์ตริน นอกจากนี้ปริมาณของแข็งในสายป้อน (solid content) ยังส่งผลต่อปริมาณเมนทอลที่กักเก็บได้ ดังในงานวิจัยของ Soottitantawat et al. (2005) ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของของแข็งในสายป้อนมากจะทำให้ผงอนุภาคมีปริมาณเมนทอลมากขึ้นตาม ดังแสดงในภาพที่ 2.25 เนื่องจากปริมาณของแข็งที่มากจะประพฤติตัวเสมือนเยื่อเลือกผ่าน (semi-permeable membrane) ที่คอยกั้นไม่ให้เมนทอลระเหิดออกไป ทำให้อนุภาคสามารถกักเก็บเมนทอลได้มากขึ้น




ภาพที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกักเก็บเมนทอลและปริมาณวัสดุห่อหุ้ม

(Soottitantawat et al. 2005)

นอกจากนี้มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุห่อหุ้มชนิดอื่นมาห่อหุ้มเมนทอล ดังงานวิจัยของ Mortensonet et al. (2008) ที่ศึกษาการกักเก็บเมนทอลด้วยเด็กซ์ตริน แคปซูลและกัมอะราบิกโดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยมีการวิเคราะห์ปริมาณเมนทอลที่เหลืออยู่ในอนุภาคด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพบว่าการใช้กัมอะราบิกเป็นวัสดุห่อหุ้มเมนทอลนั้นจะกักเก็บเมนทอลได้ดีกว่าการใช้แคปซูลและเด็กซ์ตรินเป็นวัสดุห่อหุ้มตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยเครื่อง Mastersizer พบว่า การใช้เด็กซ์ตรินเป็นวัสดุห่อหุ้มนั้นจะทำให้อนุภาคที่ได้มีขนาดเล็กกว่าการใช้กัมอะราบิก และแคปซูลเป็นวัสดุห่อหุ้ม งานวิจัยนี้ยังพบว่าปริมาณของแข็งในสายป้อนส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกักเก็บเมนทอลด้วย โดยเมื่อของแข็งในสายป้อนมีปริมาณมากขึ้นก็ช่วยกักเก็บเมนทอลได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Soottitantawat et al (2005) อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยของ Linjinget al (2010) ที่เห็นว่าเมนทอลสามารถระเหิดได้ง่าย จึงส่งผลต่อการนำเมนทอลไปใช้ในอุตสาหกรรมบุหรี่ โดยระหว่างที่สูบบุหรี่ ความร้อนจะทำให้เมนทอลระเหิดจึงทำให้รสเมนทอลในบุหรี่หมดไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงได้นำกระบวนการกักเก็บมาใช้เพื่อแก้ปัญหานี้ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการกักเก็บเมนทอลด้วยขี้ผึ้งโดยใช้ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical Fluid) พบว่าปริมาณเมนทอลเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อขนาดของอนุภาคและประสิทธิภาพการกักเก็บเมนทอล โดยเมื่อปริมาณเมนทอลมีค่า 10% 20% และ 30% โดยน้ำหนัก อนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ จากนั้นที่ปริมาณเมนทอล 40% ขนาดของอนุภาคจะเริ่มเล็กลง อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกักเก็บเมนทอลพบว่าเมื่อมีปริมาณเมนทอลเพิ่มมากขึ้น กลับทำให้ประสิทธิภาพการกักเก็บเมนทอลลดน้อยลงเนื่องจากเมนทอลจะไปอยู่รวมกันที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาค ทำให้ประสิทธิภาพการกักเก็บน้อยลง

## 2.9 การใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นวัสดุห่อหุ้มในกระบวนการกักเก็บ

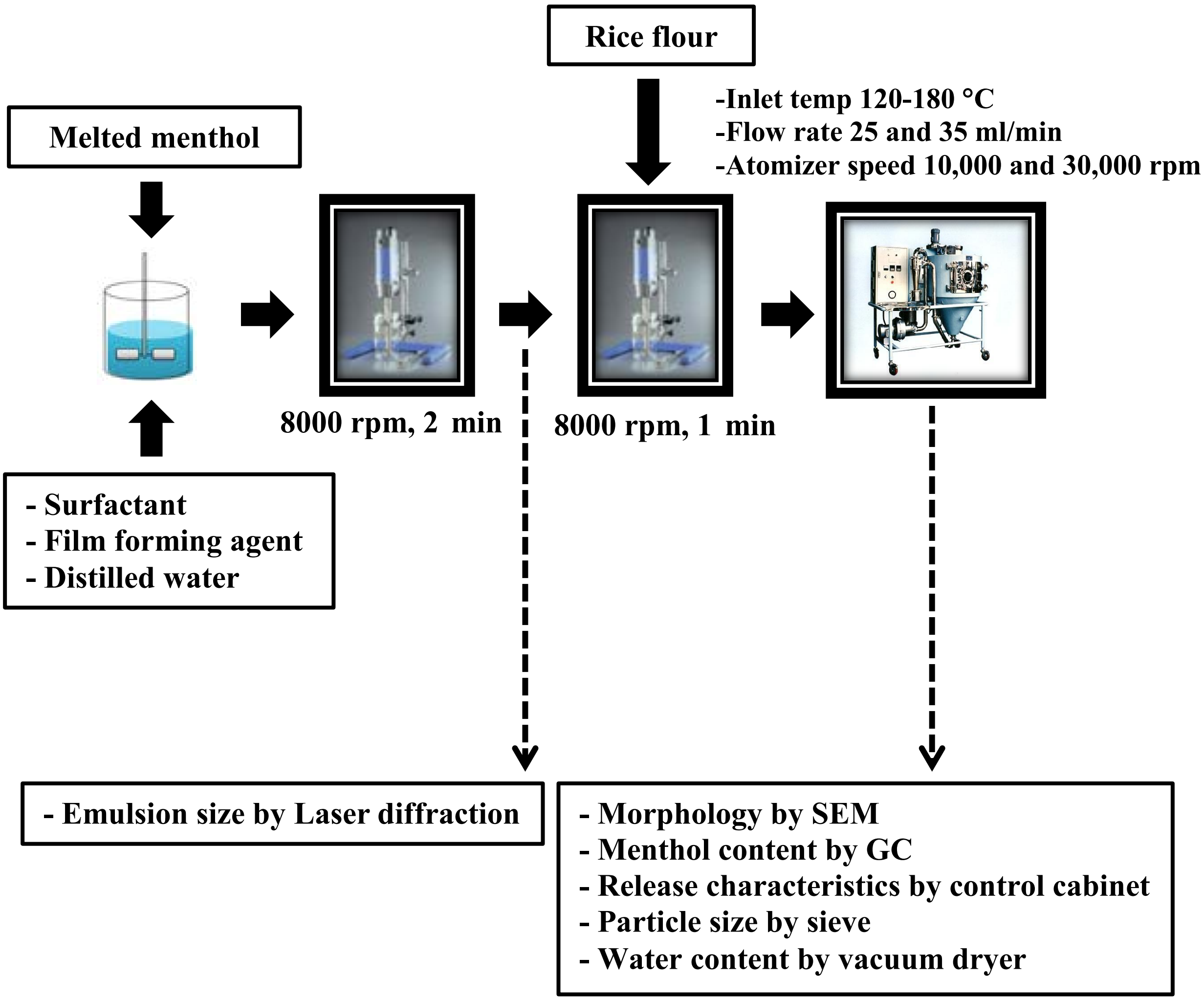
เนื่องจากแป้งข้าวเจ้ามีผลผลิตมากในประเทศไทย ทำให้เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายตลอดทั้งปี ประกอบกับมีอนุภาคขนาดเล็กจึงเหมาะแก่การนำไปเป็นวัสดุห่อหุ้ม ดังงานวิจัยของCMM et al. (2005) ได้ทำการศึกษารูปร่างและทำการเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคจากการกักเก็บ Origanumvirens L. โดยใช้แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเจ้าที่ผสมกับเจลาตินซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์ในอัตราส่วน 0.2% และ 0.3% ด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าการใส่อิมัลซิไฟเออร์นั้น จะทำให้อนุภาคผงแห้งที่ได้มีขนาดเล็กลง อย่างไรก็ตามเมื่อมีการผสมอิมัลซิไฟเออร์ ที่มากเกินไป จะไม่ช่วยทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง ดังจะเห็นจากการใส่เจลาตินที่ 0.3% กลับทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าการใส่เจลาตินที่ 0.2% นอกจากคุณสมบัติดังกล่าวแป้งข้าวเจ้ายังเป็นแป้ง

ที่มีขนาดอนุภาคเล็กจึงทำให้มีเนื้อที่ละเอียดเหมาะแก่การนำไปใช้ทำแป้งทาตัว ดังนั้นในงานวิจัยของสุเทพ สิงห์ไข่มุกข์ (2553) จึงได้นำแป้งข้าวเจ้าไปประยุกต์ทำเป็นแป้งไล่ยุง โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการกักเก็บน้ำมันตะไคร้หอมในแป้งข้าวเจ้าโดยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งพบว่าการใช้อุณหภูมิต่ำในอากาศขาเข้านั้นทำให้การกักเก็บมีประสิทธิภาพเพราะที่อุณหภูมิสูงทำให้น้ำมันตะไคร้หอมระเหยไปอย่างรวดเร็ว โดยร้อยละการกักเก็บและปริมาณที่ถูกกักเก็บของน้ำมันตะไคร้หอมมากที่สุดในช่วงอุณหภูมิอากาศขาเข้า 120-180 องศาเซลเซียส คือ ที่อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า 120 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มปริมาณแป้งในสายป้อน ทำให้การกักเก็บมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยสามารถกักเก็บน้ำมันตะไคร้ได้เกือบถึง 40% เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าในสายป้อนที่ 40 % เพราะปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างเร็ว จึงมีโครงสร้างมาป้องกันการสูญเสียน้ำมัน

# บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยจะเริ่มจากการเตรียมผงแห้งด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย จากนั้นจะทำการวัดปริมาณเมนทอลที่กักเก็บได้โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการปลดปล่อยของผงเมนทอลที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ประกอบกับวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงแห้ง ขนาดของผงแห้ง ขนาดของอิมัลชัน รวมถึงปริมาณน้ำในผงแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 3.1




ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

**3.1 การกักเก็บเมนทอลในแป้งข้าวเจ้าด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย**

**3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง**

3.1.1.1 สารสำคัญ ได้แก่ เมนทอล (บริษัท Soda Aromatic Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น)

3.1.1.2 วัสดุห่อหุ้ม

1) แป้งข้าวเจ้า (บริษัท Bangkok Inter Food Co., Ltd. ประเทศไทย)

2) แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง (บริษัท Siam Modified Starch Co., Ltd. ประเทศไทย)

3.1.1.3 สารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม

1) มอลโตเด็กซ์ตริน (บริษัท Soda Aromatic Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น)

2) แป้งที่ผ่านการดัดแปลง Capsule™ (บริษัท Nippon NSC Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น)

3.1.1.4 สารอิมัลซิไฟเออร์

1) เคซีน CAS Number 9005-46-3 (บริษัท Mitsubishi Kagaku Foods Corporation ประเทศญี่ปุ่น)

2) กัมอะราบิก (บริษัท Soda Aromatic Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น)

3) เจลาติน (บริษัท Junsei Chemical Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น)

**3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง**

3.1.2.1 เครื่องโฮโมจีไนซ์เซอร์ Polytron PT 6100

3.1.2.2 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย Ohkawara type L-8 จากบริษัท Ohkawara Kakouki Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น ดังแสดงในภาพที่ 3.2

Specifications:

| | |
|---|---|
| Model | : Ohkawara L-8 |
| Water evaporation rate | : 3 kg/hr |
| Atomizer | : Rotating disk |
| Chamber | : 800 mm I.D., 560 mm high and conical chamber of 60°angle |
| Application | : Preparation the encapsulated flavor |

ภาพที่ 3.2 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย Ohkawara type L-8
(http://www.ktpc.or.jp/kp/101930/shoukai_e-1.html)

### 3.1.3 **วิธีการทดลอง**

เตรียมสารละลายซึ่งประกอบด้วยสารอิมัลซิไฟเออร์ สารช่วยเกิดชั้นฟิล์มและน้ำกลั่น ในขั้นตอนนี้จะยังไม่มีการเติมแป้งข้าวเจ้าเนื่องจากแป้งข้าวเจ้าเมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานานจะกลายเป็นเจล ทำให้เกาะติดบริเวณภาชนะและท่อนำสารเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปผสมกับเมนทอลที่ผ่านการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส ทำสารให้อยู่ในรูปอิมัลชันโดยใช้เครื่องโฮโมจีไนซ์เซอร์ (Polytron PT 6100) ที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมแป้งข้าวเจ้าและทำการผสมสารให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้เครื่องโฮโมจีไนซ์เซอร์ (Polytron PT 6100) ที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที ในขั้นตอนนี้ควรนำสารที่ได้เข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยทันที ที่สภาวะดังนี้ เพื่อป้องกันการเกิดเจลาตินไนซ์

1) อุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 120-180 องศาเซลเซียส
2) อัตราการป้อนสาร 25 และ 35 มิลลิลิตรต่อนาที
3) อัตราการไหลของอากาศ 110 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
4) ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 10,000 และ 30,000 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบและปริมาณของสารที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content) 40% โดยน้ำหนักในน้ำกลั่น

| | sample | Weight (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Menthol | Casein | Gum arabic | Maltodextrin | Rice flour |
| ผลของการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ | Control | 20 | - | - | - | 80 |
| | Casein 5% | 20 | 5 | - | - | 75 |
| ผลของชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์ | Gum arabic | 10 | - | 5 | - | 85 |
| | Casein | 10 | 5 | - | - | 85 |
| ผลของปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน (DE 11) | Maltodextrin 0% | 10 | 5 | - | - | 85 |
| | Maltodextrin 5% | 10 | 5 | - | 5 | 80 |
| | Maltodextrin 10% | 10 | 5 | - | 10 | 75 |
| | Maltodextrin 20% | 10 | 5 | - | 20 | 65 |
| ผลของค่าสมมูลเด็กซ์โตรสของมอลโตเด็กซ์ตริน | DE 2 | 10 | 5 | - | 10 | 75 |
| | DE 11 | 10 | 5 | - | 10 | 75 |
| | DE 25 | 10 | 5 | - | 10 | 75 |

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบและปริมาณของสารที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content) 40% โดยน้ำหนักในน้ำกลั่น (ต่อ)

| | sample | Weight (%) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Menthol | Casein | Gelatin | Capsule | Maltodextrin | Rice flour |
| ผลของชนิดของสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม (film forming agent) | Maltodextrin | 10 | 5 | - | - | 10 | 75 |
| | Capsule | 10 | 5 | - | 10 | - | 75 |
| ผลของปริมาณสารอิมัลซิไฟเออร์ | Casein 5% | 10 | 5 | - | - | 10 | 75 |
| | Casein 10% | 10 | 10 | - | - | 10 | 70 |
| ผลของการเติมเจลาติน | Gelatin 0% | 10 | 5 | - | - | 10 | 75 |
| | Gelatin 1% | 10 | 5 | 1 | - | 10 | 74 |
| | Gelatin 2% | 10 | 5 | 2 | - | 10 | 73 |
| ผลของปริมาณเมนทอล | Menthol 5% | 5 | 5 | - | - | 10 | 80 |
| | Menthol 10% | 10 | 5 | - | - | 10 | 75 |
| | Menthol 20% | 20 | 5 | - | - | 10 | 65 |

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบและปริมาณของสารที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content) 40% โดยน้ำหนักในน้ำกลั่น (ต่อ)

| | sample | Weight (%) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Menthol | Casein | Maltodextrin | Rice flour |
| อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า | Inlet T 120°C | 10 | 5 | 10 | 75 |
| | Inlet T 140°C | 10 | 5 | 10 | 75 |
| | Inlet T 160°C | 10 | 5 | 10 | 75 |
| | Inlet T 180°C | 10 | 5 | 10 | 75 |
| อิทธิพลของความเร็วในการป้อนสาร | Flow 25 ml/min | 10 | 5 | 10 | 75 |
| | Flow 35 ml/min | 10 | 5 | 10 | 75 |
| อิทธิพลของความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน | 10000 rpm | 10 | 5 | 10 | 75 |
| | 30000 rpm | 10 | 5 | 10 | 75 |
| การกักเก็บเมนทอลด้วยแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง | MD 10% (rice flour) | 10 | 5 | 10 | 75 |
| | MD 10% (Modified starch) | 10 | 5 | 10[*] | 75 |

**3.2 การวัดปริมาณเมนทอลในผงแห้งด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี**

**3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง**

3.2.1.1 เฮกเซน (hexane)

3.2.1.2 ไซโคลเฮกซาโนน (cyclohexanone)

**3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง**

3.2.2.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี GC-2014 จากบริษัท Shimadzu Corporation ประเทศญี่ปุ่น ดังแสดงในภาพที่ 3.3

ภาพที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี GC-2014

(http://www.ssi.shimadzu.com/products/product.cfm?product=sysgc)

**3.2.3 วิธีการทดลอง**

ชั่งผงแห้งที่ผ่านการกักเก็บ 0.1 กรัมใส่ในขวดแก้ว ดังแสดงในภาพที่ 3.4 จากนั้นเติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร นำไปผสมกันด้วยเครื่องเขย่าสารแบบวอร์เทกซ์เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นใส่สารละลายเฮกเซนที่มีไซโคลเฮกซาโนนผสมอยู่ปริมาณ 4 มิลลิลิตร โดยไซโคลเฮกซาโนนจะทำหน้าที่เป็น internal standard (ไซโคลเฮกซาโนน 1 ไมโครลิตร ต่อเฮกเซน 1 มิลลิลิตร) และนำไปผสมกันด้วยเครื่องเขย่าสารแบบวอร์เทกซ์เป็นเวลา 1 นาที นำสารดังกล่าวไปให้ความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียสใน water bath เป็นเวลา 30 นาที โดยทุก 10 นาที ให้นำสารไปวอร์เทกซ์เป็นเวลา 1 นาที เมื่อครบ 30 นาทีแล้ว ให้ตั้งสารทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที ที่อุณหภูมิห้องจนกว่าสารจะเย็นตัวลง ในขั้นตอนนี้ควรทำใน fume hood เพื่อป้องกันอันตรายจากขวดแก้วที่อาจแตกได้ ฉีดสารดังกล่าวปริมาณ 2 ไมโครลิตร เข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-2014 จากบริษัท SHIMADZU) ซึ่งมีสภาวะดังนี้

1) อุณหภูมิของ detector 200 องศาเซลเซียส

2) อุณหภูมิของ injection 180 องศาเซลเซียส

3) อุณหภูมิของ column 150 องศาเซลเซียส

4) แก๊สไนโตรเจนเป็น carrier gas ที่ 120 กิโลปาสคาล

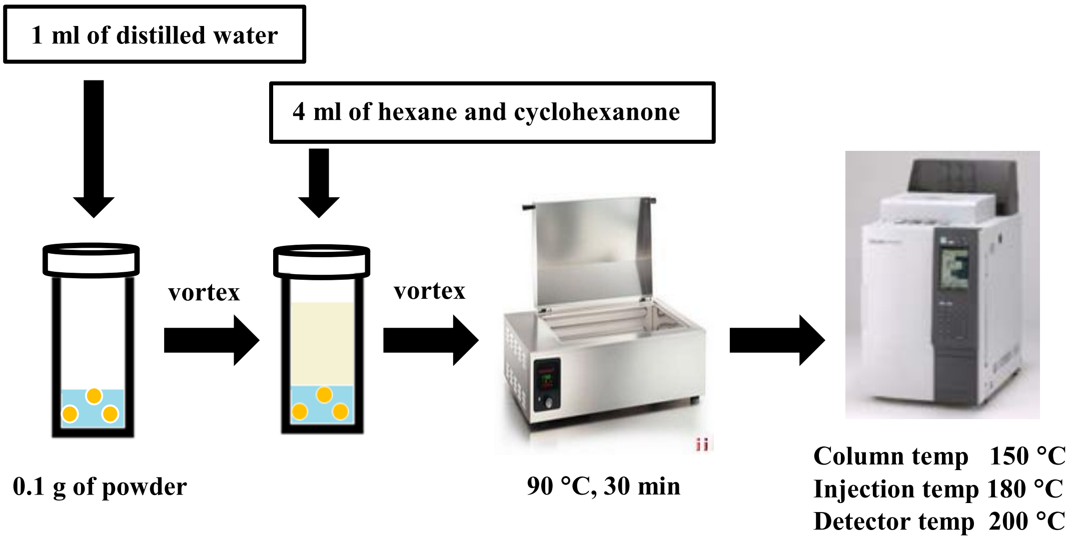
5) ความดันของอากาศ 50 กิโลปาสคาล

6) ความดันของแก๊สไฮโดรเจน 70 กิโลปาสคาล

7) อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 60 มิลลิลิตรต่อนาที

-การคำนวณร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้ง (Retention) ดังสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้ง} = \frac{\text{ปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้ง} \times 100}{\text{ปริมาณเมนทอลในสายป้อน}} \qquad 3.1$$




ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการวัดปริมาณเมนทอลในผงแห้ง

## 3.3 การวัดขนาดของอิมัลชันในสายป้อน

### 3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1.1 เครื่องวัดขนาดอิมัลชันด้วยการเลี้ยวเบนของเลเซอร์ (Laser diffraction) SALD-7100 จากบริษัท Shimadzu Corporation ประเทศญี่ปุ่น ดังแสดงในภาพที่ 3.5

ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดขนาดอิมัลชัน SALD-7100
(http://www.an.shimadzu.co.jp/powder/products/01s7100/index.htm)

### 3.3.2 วิธีการทดลอง

นำสารละลายอิมัลชันจากภาพที่ 3.1 ประมาณ 5 ไมโครลิตร มาใส่ในน้ำกลั่นประมาณ 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารดังกล่าวไปวัดขนาดอิมัลชันโดยเครื่อง S ALD-7100

## 3.4 การวัดปริมาณน้ำในผงแห้ง

### 3.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.4.1.1 ตู้อบสุญญากาศ (vacuum dryer ADP-21 จากบริษัท Yamato Scientific America Inc.) ดังแสดงในภาพที่ 3.6

ภาพที่ 3.6 ตู้อบสุญญากาศ

(http://www.pchemlabs.com/product.asp?pid=3301)

### 3.4.2 วิธีการทดลอง

ชั่งผงแห้งประมาณ 1 กรัมในถ้วยอะลูมิเนียม และนำมาวางในตู้อบสุญญากาศ ที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักสารที่เหลืออยู่เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณน้ำในผงแห้ง (water content) ดังสมการที่ 3.2

$$\text{ปริมาณน้ำในผงแห้ง (\%)} = W1-W2-[M1-M2] \qquad 3.2$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักของผงแห้งก่อนอบ

W2 คือ น้ำหนักของผงแห้งหลังอบ 20 ชั่วโมง

M1 คือ น้ำหนักของเมนทอลในผงแห้งก่อนอบ ได้จากการนำผงแห้งก่อนอบไปวัดปริมาณเมนทอลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตามหัวข้อ 3.2

M2 คือ น้ำหนักของเมนทอลในผงแห้งหลังอบ 20 ชั่วโมง ได้จากการการนำผงแห้งหลังอบไปวัดปริมาณเมนทอลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตามหัวข้อ 3.2

## 3.5 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างสัณฐานของผงแห้งที่กักเก็บเมนทอล

### 3.5.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.5.1.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JSM-6060 จากบริษัท JEOL Co., Ltd ดังแสดงในภาพที่ 3.7

ภาพที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JSM-6060
(http://www.speciation.net/Database/Instruments/JEOL/JSM6060-;i19)

### 3.5.2 วิธีการทดลอง

นำผงแห้งมาใส่ลงบนกระดาษกาวที่ติดอยู่กับ stub จากนั้นจึงนำไปเคลือบด้วยทองและนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-6060) ด้วยอัตราการเร่งอิเล็กตรอน 10 กิโลโวลต์

**3.6 การวัดขนาดของผงแห้ง**

**3.6.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง** ได้แก่ silysia

**3.6.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง**

3.6.2.1 sieve (M 100 จากบริษัท Tsutsui scientific instruments CO., Ltd ประเทศญี่ปุ่น) โดยมีขนาด aperture size 150, 106, 75, 53, 32 and 20 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.8

ภาพที่ 3.8 เครื่อง sieve (M 100)
(Penbunditkul 2011)

**3.6.3 วิธีการทดลอง**

ชั่งผงแห้งประมาณ 2 กรัม มาผสมกับ silysia 3% โดยน้ำหนักเพื่อป้องกันการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค และนำสารมาเข้าเครื่อง sieve เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักสารในแต่ละ mesh เพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสะสม (weight cumulative percentage) ในแต่ละขนาดของ mesh และที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสะสมที่ 50% คือขนาดของผงแห้ง ดังแสดงตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ก

**3.7 ศึกษาการปลดปล่อยของเมนทอลที่ได้จากกระบวนการกักเก็บ**

**3.7.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง**

3.7.1.1 ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น LHU-113 ดังแสดงในภาพที่ 3.9

ภาพที่ 3.9 ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น LHU-113
(http://www.labwrench.com/?equipment.view/equipmentNo/3021/ESPEC/Temp-Humidity-LHU-113-Chamber/)

**3.7.2 วิธีการทดลอง**

ชั่งผงแห้งประมาณ 0.1 กรัมในภาชนะขวดแก้ว จากนั้นนำขวดแก้วเข้าตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยทุกๆ 1 ชั่วโมงให้นำขวดแก้วออกจากตู้อบและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อควบคุมให้สารอยู่ในสภาวะเดียวกัน ก่อนนำมาวัดปริมาณเมนทอลคงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆ ดังขั้นตอนที่ 3.2

-การคำนวณปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้ง (Menthol release) ดังสมการที่ 3.3

ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อย (mg released menthol / g powder) = $M_0 - M_X$ 3.3

เมื่อ $M_0$ คือ ปริมาณเมนทอลเริ่มต้นที่มีอยู่ในผงแห้ง (mg retained menthol / g powder)

$M_X$ คือ ปริมาณเมนทอลที่เหลืออยู่ในผงแห้ง ณ เวลาต่างๆ (mg retained menthol / g powder)

-การคำนวณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้ง (Endothermic energy) ดังสมการที่ 3.4

พลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้ง (J / g powder) = $R_x \times \triangle H_{sub}$ 3.4

เมื่อ $R_x$ คือ ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อย (mg released menthol / g powder) ซึ่งได้จากสมการที่ 3.3

$\triangle H_{sub}$ คือ พลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 506 J/ g menthol

-การคำนวณร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้ง (Relative menthol release) ดังสมการที่ 3.5

ร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้ง = $R_x / M_0$ 3.5

เมื่อ $R_x$ คือ ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อย (mg released menthol / g powder) ซึ่งได้จากสมการที่ 3.3

$M_0$ คือ ปริมาณเมนทอลเริ่มต้นที่มีอยู่ในผงแห้ง (mg retained menthol / g powder)

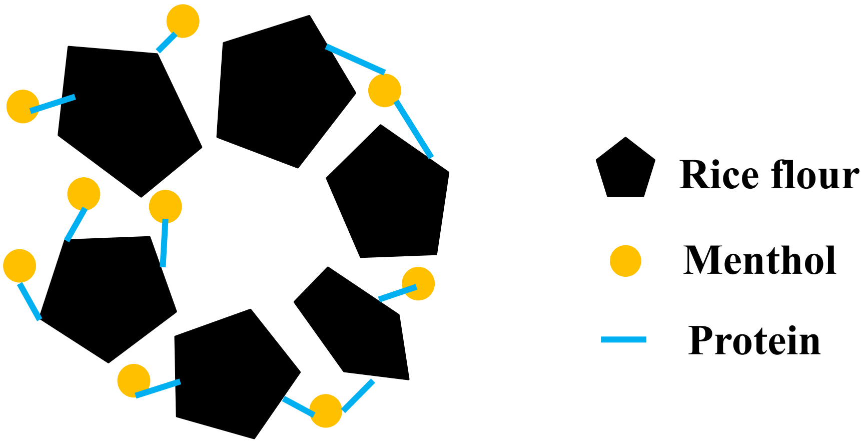
# บทที่ 4

## ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล

ในส่วนของผลการศึกษานั้นจะเริ่มจากการกักเก็บเมนทอลในแป้งข้าวเจ้า และการเพิ่มค่าการกักเก็บโดยการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์และสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม รวมถึงการหาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ทำให้ผงแห้งมีค่าการกักเก็บเมนทอลได้มากที่สุด จากนั้นจะผลิตผงแห้งเพื่อนำไปเปรียบเทียบปริมาณเมนทอลที่กักเก็บได้กับผลิตภัณฑ์แป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด รวมถึงศึกษาการปลดปล่อยของผงแห้งที่อุณหภูมิ 35 37 และ 40 องศาเซลเซียสและมีความชื้นสัมพัทธ์ 50 และ 80%

### 4.1 การกักเก็บเมนทอลด้วยแป้งข้าวเจ้า

ในขั้นตอนนี้จะนำเฉพาะแป้งข้าวเจ้ามากักเก็บเมนทอล โดยมีอัตราส่วนโดยมวลของเมนทอลต่อแป้งข้าวเจ้า คือ 1:4 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมด 40% โดยน้ำหนักในน้ำกลั่นและไม่มีการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์เพิ่ม เนื่องจากภายในแป้งข้าวเจ้านั้นจะมีโปรตีนอยู่ 7.52% (สุเทพ สิงห์ไข่มุกข์ 2553) ซึ่งโปรตีนสามารถเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ช่วยให้เมนทอลยึดติดกับแป้งข้าวเจ้าได้ ดังแสดงกลไกการยึดเกาะในภาพที่ 4.1

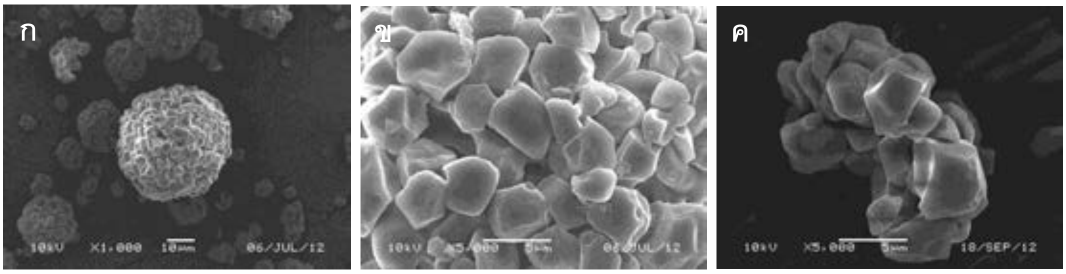



ภาพที่ 4.1 กลไกการยึดเกาะของแป้ง

หลังจากทำการอบแห้งแบบพ่นฝอย นำผงแห้งที่ได้มาวัดปริมาณเมนทอลด้วยเครื่องแก๊ส โครมาโทกราฟี ดังแสดงผลในตารางที่ 4.1 ค่าร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้ง มีค่าเท่ากับ 1.8 ซึ่งทำให้สูญเสียเมนทอลไปถึงร้อยละ 98.2 เนื่องจากไม่มีการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์เพิ่ม ทำให้โปรตีนที่มีอยู่อย่างจำกัดในแป้งข้าวเจ้ายึดเกาะกับเมนทอลได้ไม่เพียงพอ เป็นผลให้ค่าการกักเก็บเมนทอลที่ได้มีค่าน้อย นอกจากนี้อิมัลซิไฟเออร์ที่มีอยู่อย่างจำกัดยังไม่สามารถทำให้อิมัลชันของเมนทอลเสถียร ทำให้เกิดการรวมตัวกัน เป็นผลให้อิมัลชันมีขนาดใหญ่ เมื่อนำไปผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย สายป้อนจะถูกหัวฉีดแบบจานหมุนเหวี่ยงเพื่อทำให้เกิดละอองฝอย เป็นผลให้เกิดแรงเฉือนทำให้อิมัลชันที่มีขนาดใหญ่ของเมนทอลแตกออก จึงส่งผลให้เมนทอลเกิดการสูญเสียไปในขั้นนี้ และเมื่อพิจารณาลักษณะของผงแห้งในภาพที่ 4.2 พบว่าอนุภาคที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลม โดยมีเม็ดของแป้งข้าวเจ้ามารวมกันเป็นกลุ่มอนุภาคโดยเชื่อมต่อกันด้วยแรงที่ยึดติดกันด้วยของแข็ง (solid bridge) และมีเมนทอลแทรกตัวอยู่ระหว่างเม็ดของแป้งข้าวเจ้า เช่นเดียวกับงานวิจัยของสุเทพ สิงห์ไข่มุก (2553) ที่ได้อธิบายการเชื่อมติดกันของอนุภาคแบบ liquid bridge ระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับน้ำมันตะไคร้ จะเห็นได้ว่าการกักเก็บเมนทอลด้วยแป้งข้าวเจ้าเพียงอย่างเดียวนั้น ได้ค่าการกักเก็บที่น้อยมาก หากนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจะไม่คุ้มค่า และยังเป็นการเพิ่มต้นทุนสำหรับการผลิตแป้งเย็นอีกด้วย ดังนั้นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มค่าการกักเก็บของเมนทอลได้ คือการหาปริมาณของแข็งที่เติมลงไปในสายป้อน (solid content) ให้เหมาะสม เพื่อที่จะทำให้เกิดเป็นเปลือกหุ้มที่กักเก็บและป้องกันเมนทอลจากอากาศร้อนได้

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของผงแห้ง โดยมีอัตราส่วนของเมนทอลต่อแป้งข้าวเจ้า 1:4 ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 180 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

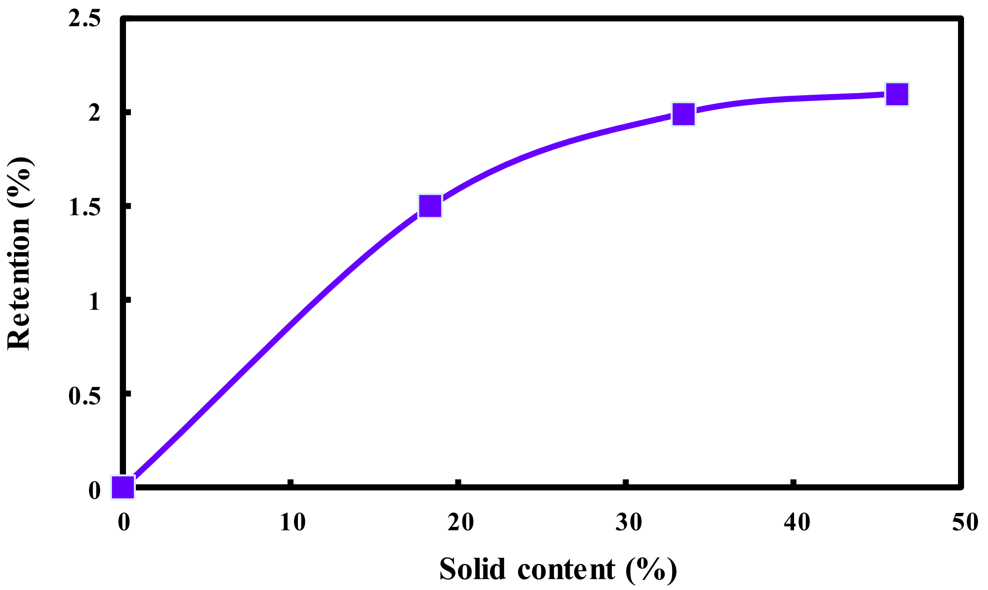
| | Retention (%) | Retained menthol in powder (mg menthol/ g powder) | Emulsion size (μm) |
|---|---|---|---|
| control | 1.8 ± 0.12 | 3.5 ± 0.24 | 11.85 ± 0.51 |




ภาพที่ 4.2 ลักษณะของผงแห้ง โดยมีอัตราส่วนของเมนทอลต่อแป้งข้าวเจ้า 1:4 ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 180 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที โครงสร้างภายนอก (ก) กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5000 เท่า โครงสร้างภายใน (ค) กำลังขยาย 5000 เท่า

**4.2 ผลของปริมาณของแข็งในสายป้อน**

เนื่องจากปริมาณของแข็งที่อยู่ในสารป้อน มีผลต่อการกักเก็บของอนุภาค เมื่อสารที่อยู่ในสายป้อนถูกทำให้เป็นละอองฝอย ซึ่งละอองฝอยเหล่านี้จะสัมผัสกับอากาศร้อน ทำให้น้ำเกิดการระเหยเป็นผลให้สารนั้นเกิดเป็นเปลือกโครงสร้างที่ห่อหุ้มสารสำคัญ ดังนั้นถ้ามีปริมาณของแข็งในปริมาณที่พอเหมาะที่จะเกิดเป็นเปลือกหุ้มกักเก็บสารสำคัญได้ จะทำให้ค่าการกักเก็บมากยิ่งขึ้น ซึ่งในขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณของแข็งในช่วง 0-45% โดยน้ำหนักในน้ำกลั่น โดยมีอัตราส่วนของเมนทอลต่อแป้งข้าวเจ้า 1:1 และทำการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงผลการทดลองในภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของแข็งในสายป้อนมากขึ้น ทำให้สามารถกักเก็บเมนทอลได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณของแข็งที่มากจะช่วยให้เกิดเป็นเปลือกเพื่อห่อหุ้มเมนทอลได้อย่างเพียงพอ ดังนั้นจึงช่วยลดการสูญเสียเมนทอลจากการสัมผัสอากาศร้อน จึงทำให้ได้ค่าการกักเก็บเมนทอลที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Renata et al. (2010) ที่พบว่าการใช้ของแข็งในปริมาณที่มากจะช่วยให้ประสิทธิภาพของการกักเก็บดีขึ้น เนื่องจากการใช้วัสดุห่อหุ้มในปริมาณมากจะช่วยทำให้เกิดโครงสร้างผิวอนุภาคเร็วขึ้น นอกจากนี้การเติมปริมาณของแข็งที่มากขึ้น จะส่งผลให้สายป้อนมีความหนืดเพิ่มขึ้นด้วย เป็นผลให้เมนทอลติดค้างตามท่อและเกิดการอุดตันขึ้น ดังนั้นในการดำเนินการตลอดการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกใช้ปริมาณของแข็งที่ 40%



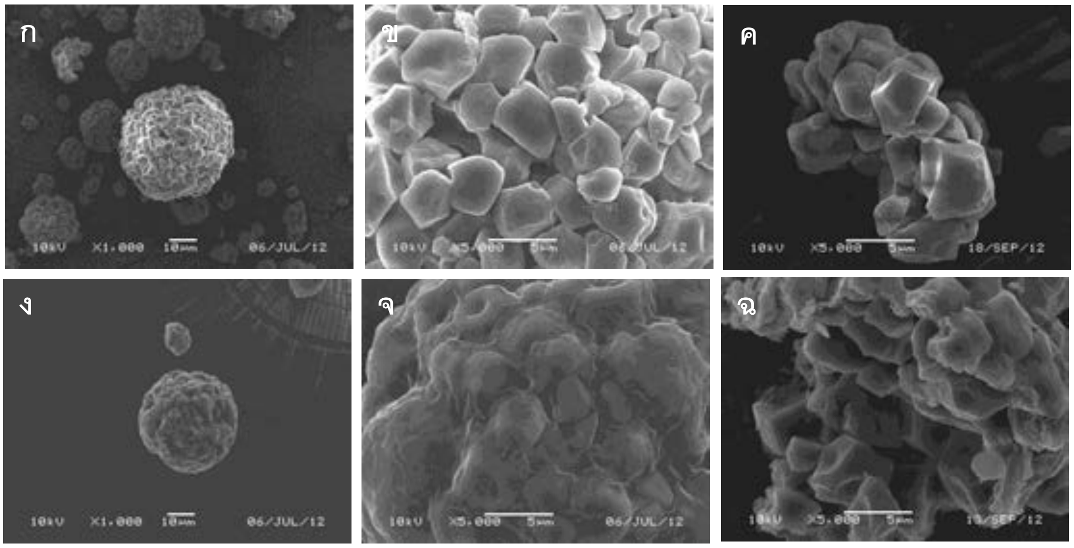

ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งในสายป้อนกับค่าการกักเก็บ โดยมีอัตราส่วนของเมนทอลต่อแป้งข้าวเจ้า 1:1 ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 180 องศาเซลเซียส

### 4.3 ผลของการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์

การเลือกปริมาณของแข็งที่เหมาะสมในการกักเก็บเมนทอลด้วยแป้งข้าวเจ้านั้น ยังคงทำให้ค่าการกักเก็บไม่สูงมาก ซึ่งมีค่าประมาณ 2% ดังนั้นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มค่าการกักเก็บนั่นคือการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ เนื่องจากโปรตีนที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในแป้งข้าวเจ้านั้น ไม่เพียงพอที่จะทำให้เมนทอลยึดเกาะกับแป้งข้าวเจ้า และทำให้อนุภาคอิมัลชันของเมนทอลเสถียร ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมเคซีนลงไปจะทำให้ขนาดของอิมัลชันเล็กลง เนื่องจากเคซีนจะไปช่วยทำให้อิมัลชันของเมนทอลเสถียร ไม่เกิดการรวมตัวกัน ทำให้เวลาป้อนสารเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย อนุภาคของเมนทอลที่มีขนาดพอดี จึงไม่ถูกแรงเหวี่ยงของหัวฉีดแบบจานหมุนทำให้อนุภาคแตกออก และเกิดการสูญเสียของเมนทอลไป เมื่อเทียบกับอนุภาคของเมนทอลที่มีขนาดใหญ่ และจากภาพที่ 4.4 จะเห็นว่า เมื่อมีการเติมเคซีนเข้าไปนั้น เคซีนจะไปช่วยทำให้เม็ดแป้งข้าวเจ้าเชื่อมติดเข้ากันแน่นมากขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติของอิมัลซิไฟเออร์ และยังเกิดเป็นฟิล์มเคลือบบนผิวของเม็ดแป้งข้าวเจ้า ซึ่งช่วยป้องกันการระเหิดของเมนทอลขณะสัมผัสกับอากาศร้อน จึงเป็นผลให้มีค่าการกักเก็บมากขึ้นเมื่อมีการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของผงแห้งจากการเติมอิมัลซิไฟเออร์ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 180 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

| | Retention (%) | Retained menthol in powder (mg menthol/ g powder) | Emulsion size (µm) |
|---|---|---|---|
| control | 1.8 ± 0.12 | 3.5 ± 0.24 | 11.85 ± 0.51 |
| with 5% casein | 4.0 ± 0.71 | 9.4 ± 1.70 | 4.09 ± 0.14 |



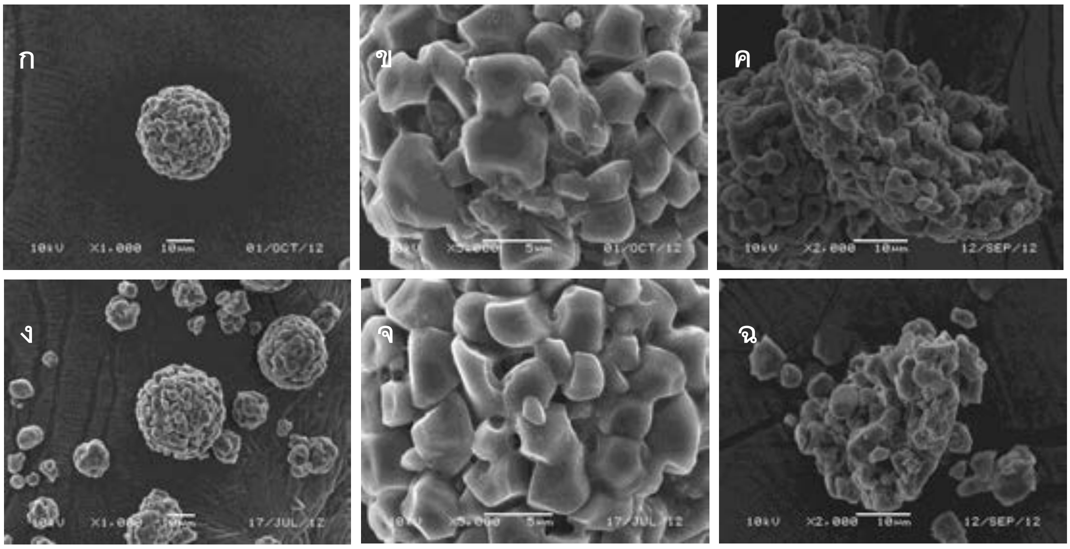

ภาพที่ 4.4 ลักษณะของอนุภาคจากการเติมอิมัลซิไฟเออร์ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 180 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายนอกของสาร control (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของสาร control (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภาย นอกของอนุภาคที่เติมเคซีน (ง) กำลังขยาย 1,000 เท่า (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมเคซีน (ฉ) กำลังขยาย 5,000 เท่า

**4.4 ผลของชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์**

เนื่องจากการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ลงไปเพิ่มนั้น จะช่วยให้กักเก็บเมนทอลได้มากขึ้น ดังนั้นชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ย่อมส่งผลต่อค่าการกักเก็บด้วย ในขั้นตอนนี้จึงได้ศึกษาชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ที่เติมลงไป โดยมีอัตราส่วนของอิมัลซิไฟเออร์ต่อเมนทอล 1:2 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าการใช้เคซีนเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ให้ค่าการกักเก็บเมนทอลมากกว่ากัมอะราบิก เนื่องจากเคซีนเป็นตัวประสานระหว่างเม็ดแป้งข้าวเจ้าได้ดีกว่า และเคซีนยังทำให้อิมัลชันของเมนทอลเสถียรกว่า ซึ่งจะเห็นจากขนาดอิมัลชันที่เล็กกว่าการใช้กัมอะราบิกเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เคซีนเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ นอกจากนี้ปริมาณน้ำในผงแห้งที่ใช้เคซีนเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ยังมีปริมาณมากกว่าการใช้กัมอะราบิก ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์มเคซีนที่เคลือบผิว ทำให้น้ำภายในอนุภาคระเหยผ่านออกมาได้ยากเมื่อเทียบกับกัมอะราบิก อย่างไรก็ดีทั้งการเติมเคซีนหรือกัมอะราบิกนั้น ยังคงทำให้ผงแห้งที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลม ดังภาพที่ 4.5 โดยลักษณะผิวภายนอกจะเห็นเป็นเม็ดแป้งข้าวเจ้ามาเกาะกลุ่มรวมกัน โดยมีเคซีนหรือกัมอะราบิกเป็นตัวเชื่อมระหว่างเม็ดแป้งข้าวเจ้าและเมนทอล

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของผงแห้งจากการใช้เคซีนและกัมอะราบิกเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

| Emulsifier | Retention (%) | Emulsion size (μm) | Particle size (μm) | Water content (%) |
|---|---|---|---|---|
| Gum arabic | 10.07 ± 0.07 | 5.85 ± 0.16 | 36 | 7.76 |
| Casein | 13.49 ± 0.22 | 4.01 ± 0.20 | 42 | 8.56 |




ภาพที่ 4.5 ลักษณะของอนุภาคจากการใช้เคซีนและกัมอะราบิกเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมกัมอะราบิก (ก) กำลัง ขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมกัมอะราบิก (ค) กำลังขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมเคซีน (ง) กำลังขยาย 1,000 เท่า (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมเคซีน (ฉ) กำลัง ขยาย 2,000 เท่า

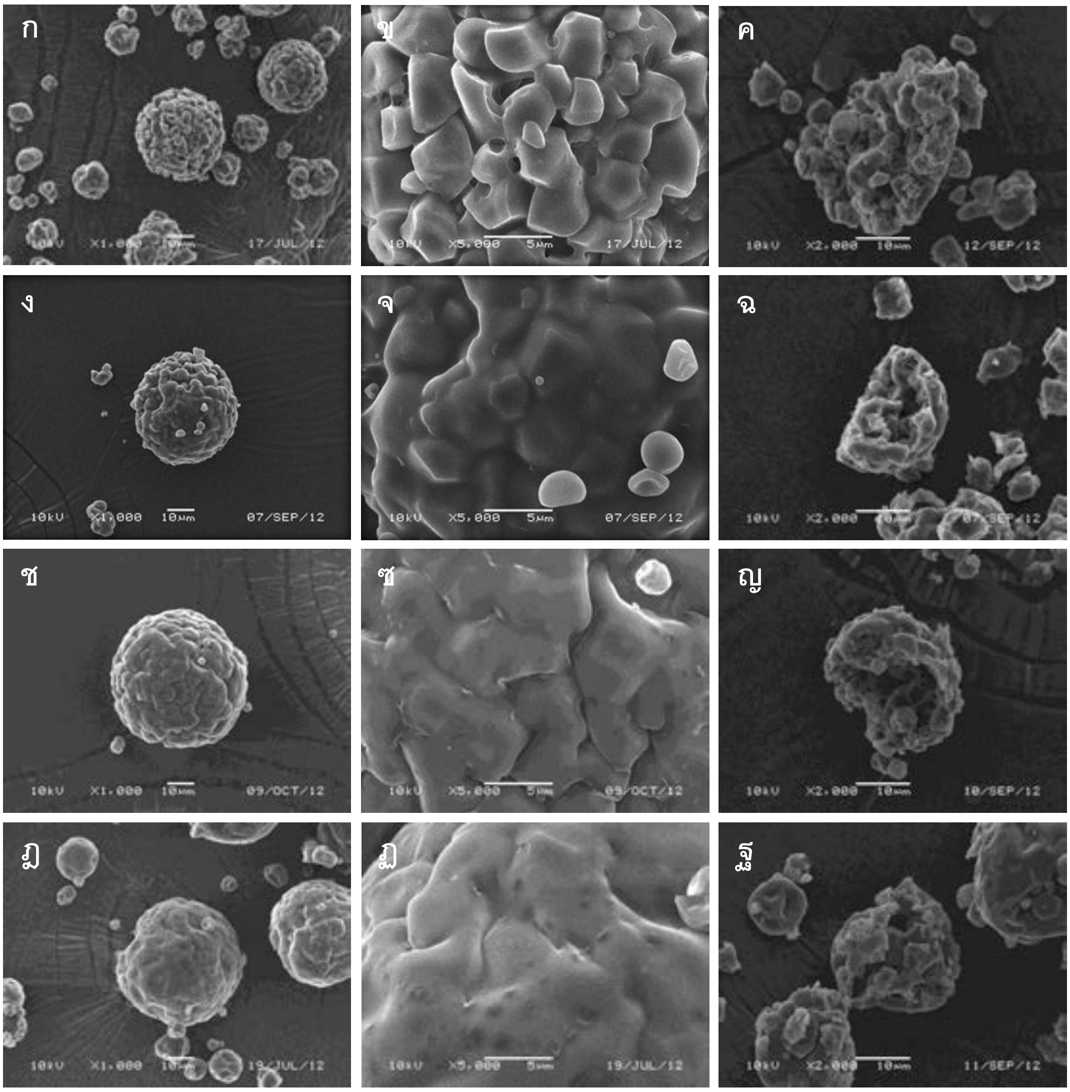
**4.5 ผลของปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน**

การใช้เคซีนเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ สามารถช่วยเพิ่มค่าการกักเก็บได้ถึง 13.49% เมื่อพิจารณาถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอนุภาค พบว่า มีปริมาณน้ำอยู่ถึง 8.56% ดังนั้นการเพิ่มค่าการกักเก็บเมนทอลและลดปริมาณน้ำในอนุภาค สามารถทำได้โดยการเติมมอลโตเด็กซ์ตรินซึ่งเป็นสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม ในขั้นตอนนี้จึงต้องหาปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่เหมาะสมโดยจะเติมระหว่าง 0-20% ในปริมาณของแข็งทั้งหมด และมีอัตราส่วนของเคซีนต่อเมนทอล 1:2 ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าการเติมมอลโตเด็กซ์ตริน ช่วยเพิ่มค่าการกักเก็บเมนทอล เนื่องจากมอลโตเด็กซ์ตรินจะไปเคลือบเม็ดแป้งข้าวเจ้า ทำให้เกิดเป็นเยื่อเลือกผ่าน(semi-permeable membrane) ป้องกันไม่ให้เมนทอลระเหิดออกไปได้ ค่าการกักเก็บเมนทอลจึงมากขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าการเติมมอลโตเด็กซ์ตรินที่ 20% กลับทำให้ค่าการกักเก็บน้อยลง เป็นผลมากจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นของสายป้อน ทำให้เมนทอลติดค้างในท่อนำส่งก่อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ค่าการกักเก็บจึงน้อยลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกเติมมอลโตเด็กซ์ตรินที่ 10% นอกจากนี้ค่าการกักเก็บ

ยังส่งผลต่อขนาดของอนุภาคอีกด้วย โดยถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ หมายถึงสามารถกักเก็บเมนทอลในปริมาณที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมมอลโตเด็กซ์ตรินลงไป ยังช่วยเพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของอนุภาค ดังผลการวิจัยของ Silva et al. (2006) ที่พบว่าเมื่ออนุภาคมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูง จะทำให้อนุภาคแห้งได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Onwulata (2005) ดังนั้นการเติมมอลโตเด็กซ์ตริน จึงทำให้มีปริมาณน้ำในอนุภาคน้อยลง ซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของชนิตา ศิริรัตน์ (2552) ที่พบว่าปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำผึ้งผงมีปริมาณความชื้นลดลง และงานวิจัยของ Mohd (2009) ที่ทำการผลิตแก้วมังกรผงโดยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งพบว่าการเมื่อเติมมอลโตเด็กซ์ตรินในสายป้อนปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้ปริมาณน้ำในอนุภาคน้อยลง เนื่องจากอนุภาคมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูงขึ้น นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างของอนุภาคได้แสดงในภาพที่ 4.6 จะเห็นว่าเมื่อใส่มอลโตเด็กซ์ตรินปริมาณมากขึ้น จะทำให้เม็ดแป้งเชื่อมติดกันแน่นขึ้น

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของผงแห้งจากปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่เติมลงไป เพื่อใช้เป็นสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

| Maltodextrin Content (%) | Retention (%) | Emulsion size (µm) | Particle size (µm) | Water content (%) |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 13.5 ± 0.22 | 4.0 ± 0.20 | 42 | 8.6 |
| 5 | 36.7 ± 0.53 | 4.2 ± 0.02 | 44 | 5.5 |
| 10 | 73.7 ± 1.96 | 4.8 ± 0.72 | 54 | 6.2 |
| 20 | 57.1 ± 1.21 | 2.3 ± 0.13 | 48 | 4.1 |



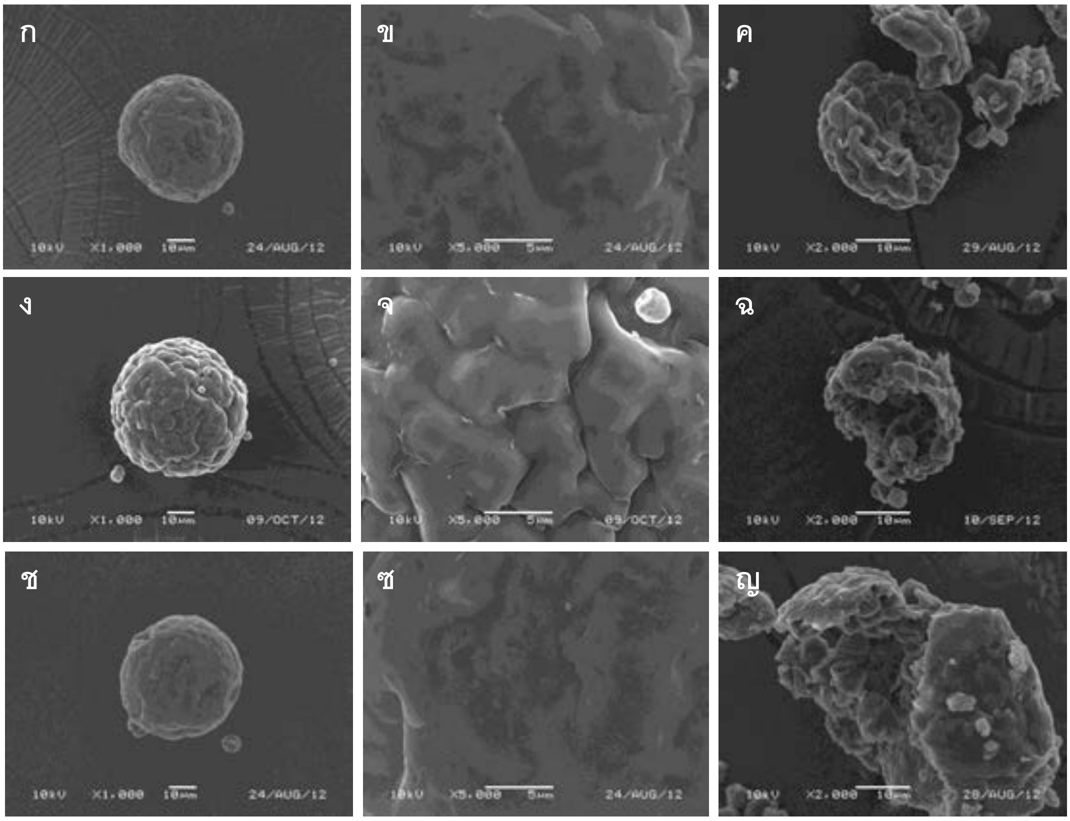

ภาพที่ 4.6 ลักษณะของอนุภาคจากปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่เติมลงไป เพื่อใช้เป็นสารช่วยเกิดชั้นฟิล์มที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่ไม่เติมมอลโตเด็กซ์ตริน (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่ ไม่เติมมอลโตเด็กซ์ตริน (ค) กำลังขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตริน 5% (ง) กำลังขยาย 1,000 เท่า (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตริน 5% (ฉ) กำลังขยาย 2,000 โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตริน 10% (ช) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ซ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตริน 10% (ญ) กำลังขยาย 2,000 เท่า โครง สร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตริน 20% (ฎ) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ฏ) กำลัง ขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตริน 20% (ฐ) กำลัง ขยาย 2,000 เท่า

**4.6 ผลของค่าสมมูลเด็กซ์โตรสของมอลโตเด็กซ์ตริน**

นอกจากปริมาณของมอลโตเด็กซ์ตรินที่เติมลงไป ค่าสมมูลเด็กซ์โตรส (dextrose equivalent, DE) ของมอลโตเด็กซ์ตรินก็ย่อมมีผลต่อค่าการกักเก็บอีกด้วย ในขั้นตอนนี้จึงได้ศึกษาค่าสมมูลเด็กซ์โตรสที่มีผลต่อการกักเก็บเมนทอล ในช่วง 2-25 โดยมีอัตราส่วนโดยมวลของเคซีนต่อเมนทอลต่อมอลโตเด็กซ์ตรินที่ 1:2:2 ดังแสดงผลในตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้มอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 11 จะให้ค่าการกักเก็บเมนทอลมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bang et al. (1981) ที่พบว่าความสามารถในการกักเก็บสารที่ให้กลิ่นรสของมอลโตเด็กซ์ตริน ขึ้นกับค่าสมมูลเด็กซ์โตรส โดยมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 10 จะมีความสามารถในการกักเก็บดีที่สุดและถ้าค่าสมมูลเด็กซ์โตรสมากขึ้นจะทำให้การกักเก็บสารที่ให้กลิ่นรสลดน้อยลงและยังมีงานวิจัยของอรุษา เชาวนลิขิต (2553) ที่ได้ศึกษาการกักเก็บสารแอนโธไซยานินจากเปลือกมังคุดด้วยมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 10 และ18 พบว่ามอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 10 สามารถกักเก็บแอนโธไซยานินได้มากถึง 82.34% และในงานวิจัยของ Rodriguesz et al (2005) ยังแสดงให้เห็นว่ามอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 10 สามารถกักเก็บวิตามินซีได้มากที่สุด เนื่องจากมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสสูงจะมีความว่องไวต่ออุณหภูมิมาก เนื่องจากมีมวลโมเลกุลต่ำ ทำให้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นสายสั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของแอลดีไฮด์ (aldehydes) ในโมเลกุลได้ง่าย ส่งผลให้โครงสร้างเกิดการสูญเสียเมื่อสัมผัสกับอากาศร้อนภายในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ดังนั้นการเลือกใช้มอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสสูงจึงไม่ช่วยให้การกักเก็บดีขึ้น นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างของอนุภาคที่แสดงในภาพที่ 4.7 ยังแสดงให้เห็นว่าค่าสมมูลเด็กซ์โตรสของมอลโตเด็กซ์ตรินไม่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างของอนุภาค โดยมอลโตเด็กซ์ตรินยังคงเกิดเป็นฟิล์มเคลือบที่ผิวของเม็ดแป้งข้าวเจ้าเหมือนเดิม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shamekh et al.(2002) ที่พบว่ามอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 10 15 และ 20 จะไม่ส่งผลต่อการเกิดเป็นชั้นฟิล์ม แต่จะส่งผลกับคุณสมบัติของฟิล์มที่ได้ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้น้ำภายในอนุภาคมีปริมาณแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติของผงแห้งจากผลของค่าสมมูลเด็กซ์โตรสของมอลโตเด็กซ์ตรินที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

| DE of maltodextrin | Retention (%) | Emulsion size (μm) | Particle size (μm) | Water content (%) |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 42.6 ± 0.56 | 3.9 ± 0.39 | 48 | 5.8 |
| 11 | 73.7 ± 1.96 | 4.8 ± 0.72 | 54 | 6.2 |
| 25 | 55.8 ± 0.32 | 3.2 ± 0.30 | 52 | 2.9 |



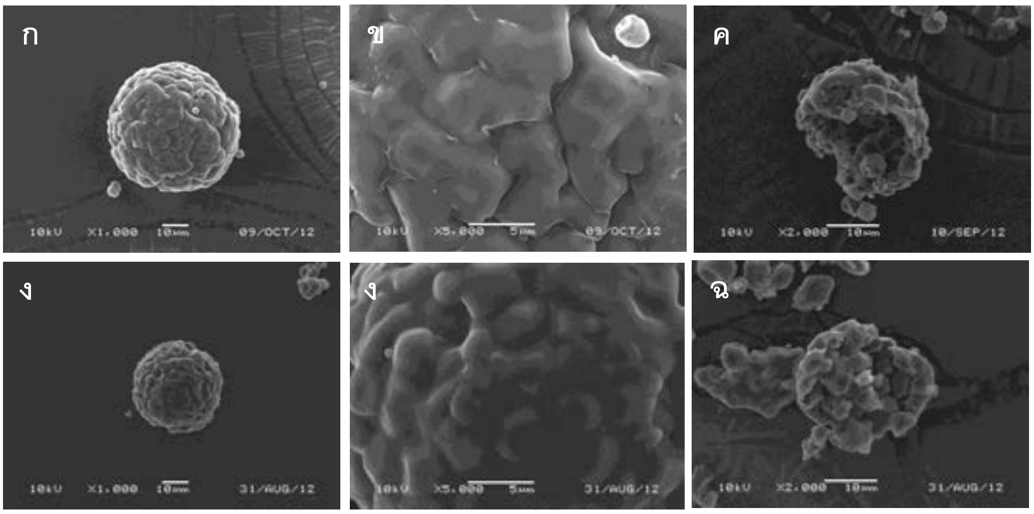

ภาพที่ 4.7 ลักษณะของอนุภาคจากผลของค่าสมมูลเด็กซ์โตรสของมอลโตเด็กซ์ตริน ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตริน ที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 2 (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 2 (ค) กำลังขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 11 (ง) กำลังขยาย 1,000 เท่า (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 11 (ฉ) กำลังขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 25 (ช) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ซ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 25 (ญ) กำลังขยาย 2,000 เท่า

**4.7 ผลของชนิดของสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม** (film forming agent)

เนื่องจากการเติมสารช่วยเกิดชั้นฟิล์มนั้นช่วยเพิ่มค่าการกักเก็บและยังทำให้ปริมาณน้ำในอนุภาคลดลง ดังนั้นชนิดของสารช่วยเกิดชั้นฟิล์มน่าจะส่งผลต่อการกักเก็บ รวมถึงปริมาณน้ำในอนุภาคด้วย ในขั้นตอนนี้จึงทำการเปรียบเทียบสารช่วยเกิดชั้นฟิล์มสองชนิดที่มีต่อประสิทธิภาพการกักเก็บเมนทอล คือ มอลโตเด็กซ์ตรินและแคปซูล โดยมีอัตราส่วนเคซีนต่อเมนทอลต่อสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม 1:2:2 โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าการใช้มอลโตเด็กซ์ตริน เป็นสารช่วยเกิดชั้นฟิล์มจะให้ค่าการกักเก็บมากกว่าแคปซูล ซึ่งอาจเป็นผลมาจากฟิล์มของมอลโตเด็กซ์ตรินกักเก็บสารได้ดีกว่า จึงทำให้เมนทอลผ่านฟิล์มมอลโตเด็กซ์ตรินออกมาได้ยากกว่าฟิล์มของแคปซูล ส่วนลักษณะโครงสร้างของอนุภาคที่แสดงในภาพที่ 4.8 พบว่าการใช้ทั้งมอลโตเด็กซ์ตรินและแคปซูลเป็นสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม ยังคงทำให้อนุภาคเป็นทรงกลมและเกิดเป็นฟิล์มเคลือบบริเวณผิวของแป้งข้าวเจ้าแบบเดียวกัน เพียงแต่ทำให้ฟิล์มที่ได้มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้มอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารช่วยเกิดชั้นฟิล์มในการเพิ่มค่าการกักเก็บเมนทอล

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติของผงแห้งจากชนิดของสารช่วยเกิดชั้นฟิล์มที่เติมลงไป ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

| Type of film forming agent | Retention (%) | Emulsion size (μm) | Particle size (μm) | Water content (%) |
|---|---|---|---|---|
| Maltodextrin | 73.7 ± 1.96 | 4.8 ± 0.72 | 54 | 6.2 |
| Capsule | 32.4 ± 0.65 | 3.7 ± 0.10 | 42 | 3.0 |



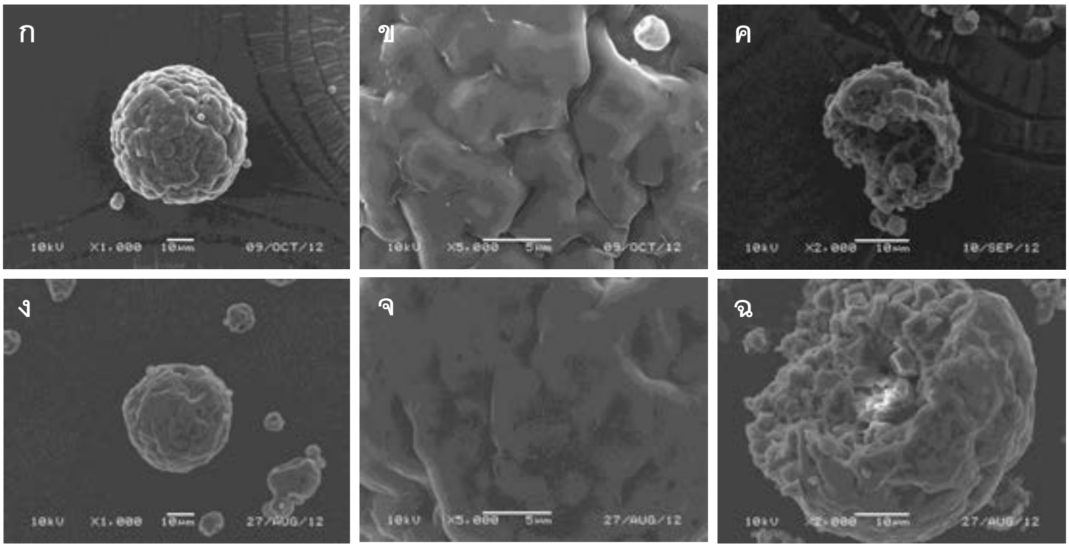
ภาพที่ 4.8 ลักษณะของอนุภาคจากชนิดของสารช่วยเกิดชั้นฟิล์มที่เติมลงไป ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตริน (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตริน (ค) กำลังขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมแคปซูล (ง) กำลังขยาย 1,000 เท่า (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมแคปซูล (ฉ) กำลังขยาย 2,000 เท่า

### 4.8 ผลของปริมาณสารอิมัลซิไฟเออร์

จากการทดลองข้างต้นพบว่า เคซีนเหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับเมนทอล ในขั้นตอนนี้จึงต้องหาปริมาณเคซีนที่เหมาะสม เพื่อทำให้การกักเก็บเมนทอลมีค่ามากที่สุด โดยมีอัตราส่วนของเคซีนต่อเมนทอลต่อมอลโตเด็กซ์ตริน 1:2:2 และ 1:1:1 ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าการเติมเคซีนที่ 5% จะให้ค่าการกักเก็บเมนทอลมากที่สุด เนื่องจากปริมาณเมนทอลที่มีอยู่มีจำกัด ดังนั้นการเติมเคซีนในปริมาณมากเกินพอ จึงไม่สามารถช่วยกักเก็บเมนทอลได้มากขึ้น นอกจากนี้ปริมาณเคซีนที่มากขึ้นยังคงทำให้ขนาดอิมัลชันเท่าเดิม ส่วนขนาดของอนุภาคยังคงมีความสัมพันธ์กับค่าการกักเก็บ หากอนุภาคมีขนาดใหญ่แสดงว่ามีปริมาณเมนทอลภายในที่มาก นอกจากนี้การเติมเคซีนในปริมาณมากยังทำให้น้ำภายในอนุภาค ระเหยออกไปได้มาก ซึ่งทำให้คงเหลือน้ำในอนุภาคน้อย และเมื่อพิจารณาโครงสร้างของอนุภาค ดังภาพที่ 4.9 พบว่าปริมาณเคซีนไม่ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาค โดยอนุภาคยังคงมีลักษณะเป็นทรงกลมที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของเม็ดแป้งข้าวเจ้า โดยมีเคซีนเคลือบเป็นฟิล์มบนเม็ดแป้งข้าวเจ้า

ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติของผงแห้งจากปริมาณเคซีนที่เติมลงไปเพื่อใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

| Casein content (%) | Retention (%) | Emulsion size (μm) | Particle size (μm) | Water content (%) |
|---|---|---|---|---|
| 5 | 73.7 ± 1.96 | 4.8 ± 0.72 | 54 | 6.2 |
| 10 | 59.2 ± 1.43 | 4.1 ± 0.63 | 50 | 2.4 |



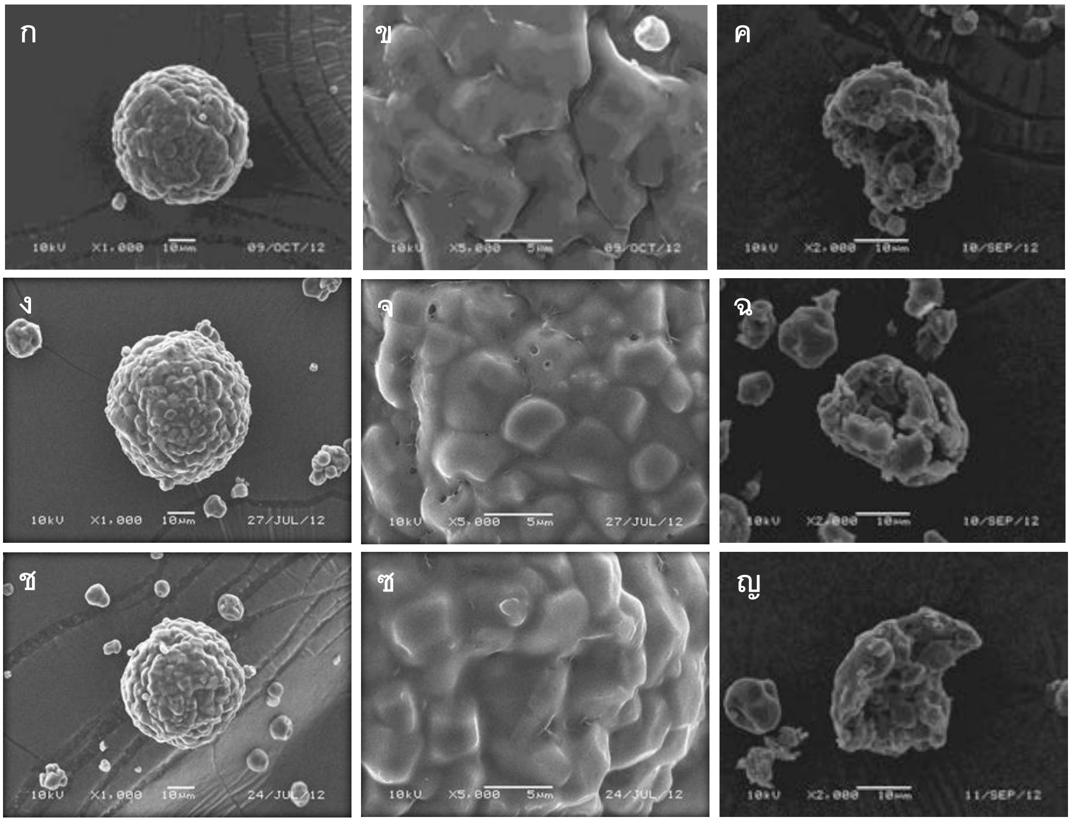

ภาพที่ 4.9 ลักษณะของอนุภาคจากปริมาณเคซีนที่เติมลงไปเพื่อใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมเคซีน 5% (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมเคซีน 5% (ค) กำลังขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมเคซีน 10% (ง) กำลังขยาย 1,000เท่า (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมเคซีน 10% (ฉ) กำลังขยาย 2,000 เท่า

### 4.9 **ผลของการเติมเจลาติน**

เนื่องจากเจลาตินเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ที่นิยมนำมาใช้ในการกักเก็บสาร ดังในงานวิจัยของ CMM et al. (2005) ดังนั้นการเติมเจลาตินซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์อีกชนิดหนึ่งร่วมกับการใช้เคซีน จึงน่าจะทำให้ค่าการกักเก็บมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงได้ทดลองเติมเจลาตินที่ 0-2% ลงในสายป้อน โดยมีอัตราส่วนเคซีนต่อเมนทอลต่อมอลโตเด็กซ์ตรินที่ 1:2:2 ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าการเติมเจลาตินลงไปเพิ่มนั้น กลับทำให้การกักเก็บเมนทอลมีค่าน้อยลง เนื่องจากเจลาตินอาจไปรวมตัวกับเคซีน ทำให้ประสิทธิภาพการเข้าจับกับเมนทอนลดน้อยลง รวมถึงอาจทำให้สายป้อนมีความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมนทอลตกค้างภายในท่อก่อนที่จะเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย นอกจากนี้การใส่เจลาตินเข้าไปนั้นจะไม่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างของอนุภาค ดังแสดงในภาพที่ 4.10 โดยยังคงทำให้อนุภาคเป็นทรงกลม ที่มีฟิล์มของเจลาตินและเคซีนเคลือบบนผิวของเม็ดแป้งข้าวเจ้า ส่งผลให้ฟิล์มที่เคลือบมีคุณสมบัติการกักเก็บแตกต่างกันออกไปตามปริมาณเจลาตินที่เติม

ตารางที่ 4.8 คุณสมบัติของผงแห้งจากปริมาณเจลาตินที่เติมลงไป ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

| Gelatin content (%) | Retention (%) | Emulsion size (μm) | Particle size (μm) | Water content (%) |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 73.7 ± 1.96 | 4.8 ± 0.72 | 54 | 6.2 |
| 1 | 60.2 ± 0.87 | 2.7 ± 0.30 | 52 | 4.7 |
| 2 | 54.0 ± 0.23 | 3.5 ± 0.03 | 50 | 4.4 |




ภาพที่ 4.10 ลักษณะของอนุภาคจากปริมาณเจลาตินที่เติมลงไป ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่ไม่เติมเจลาติน (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่ไม่เติมเจลาติน (ค) กำลังขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมเจลาติน 1% (ง) กำลังขยาย 1,000 เท่า (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมเจลาติน 1% (ฉ) กำลังขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมเจลาติน 2% (ช) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ซ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมเจลาติน 2% (ญ) กำลังขยาย 2,000 เท่า

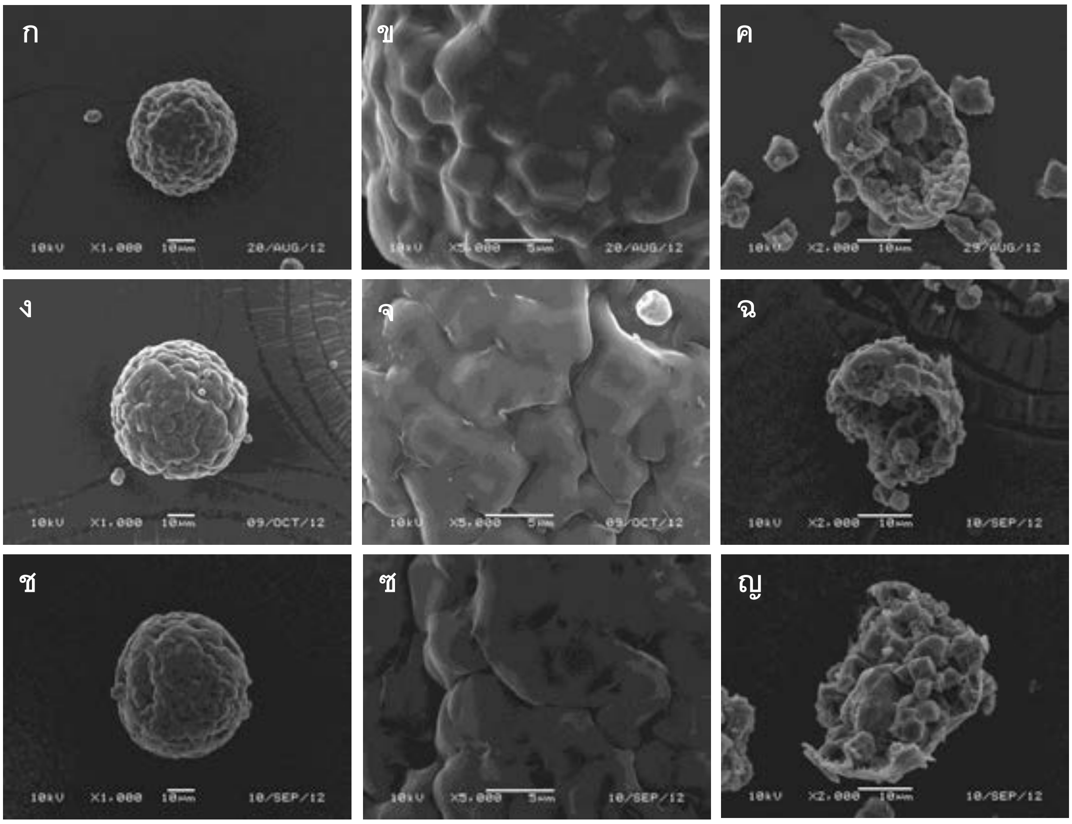
### 4.10 ผลของปริมาณเมนทอล

นอกจากการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ สารช่วยเกิดชั้นฟิล์มรวมถึงการเติมปริมาณของแข็งที่เพียงพอแล้ว ปริมาณสารสำคัญย่อมส่งผลต่อค่าการกักเก็บด้วย ดังนั้นจึงต้องหาปริมาณเมนทอลที่น้อยที่สุดที่จะทำให้ได้ค่าการกักเก็บที่มากที่สุด เพื่อลดต้นทุนการผลิต รวมถึงลดการสูญเสีย

เมนทอลอีกด้วย โดยจะศึกษาผลของปริมาณเมนทอลในช่วง 5-20% ที่มีอัตราส่วนเคซีนต่อมอลโตเด็กตรินซ์ 1:2 ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าเมื่อเติมเมนทอลในสายป้อนมากขึ้น ทำให้แป้งข้าวเจ้าสามารถกักเก็บเมนทอลได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมเมนทอลในปริมาณที่มากเกินไปกลับทำให้ค่าการกักเก็บเมนทอลที่ได้น้อยลง เนื่องจากแป้งข้าวเจ้ามีความสามารถในการกักเก็บเมนทอลได้จำกัด รวมถึงการเติมเมนทอลในปริมาณที่มากจะทำให้เกิดการสูญเสียที่มากด้วยในระหว่างการเตรียมสาร ประกอบกับในการทดลองนี้จำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณของแข็งในสายป้อนให้เป็น 40% ดังนั้นการเติมปริมาณเมนทอลในสายป้อนเพิ่มขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องลดปริมาณแป้งข้าวเจ้าให้น้อยลง ซึ่งอาจส่งผลทำให้เกิดเป็นโครงสร้างกักเก็บเมนทอลได้ไม่เพียงพอ เมนทอลจึงเกิดการระเหิดสูญเสียไป และเมื่อพิจารณาขนาดของอนุภาคพบว่าเมื่ออนุภาคมีโครงสร้างที่หนาขึ้นจะส่งผลให้ค่าการกักเก็บมากขึ้น จึงเป็นผลให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ปริมาณเมนทอลยังส่งผลต่อปริมาณน้ำในอนุภาคด้วย โดยเมื่อเติมเมนทอลในปริมาณที่มาก จะทำให้น้ำระเหยออกไปได้ยากขึ้น เนื่องจากเมนทอลจะแทรกตัวขวางอยู่ระหว่างเม็ดแป้งข้าวเจ้า และเมื่อพิจารณาโครงสร้างของอนุภาค พบว่าปริมาณเมนทอลไม่ได้ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาค เพียงแค่มีเมนทอลจะแทรกตัวระหว่างเม็ดแป้งข้าวเจ้ามากขึ้นเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 4.11

ตารางที่ 4.9 คุณสมบัติของผงแห้งจากปริมาณเมนทอลที่เติมลงไป ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

| Menthol content (%) | Retention (%) | Emulsion size (μm) | Particle size (μm) | Water content (%) |
|---|---|---|---|---|
| 5 | 41.9 ± 1.06 | 5.5 ± 0.71 | 40 | 3.2 |
| 10 | 73.7 ± 1.96 | 4.8 ± 0.72 | 54 | 6.2 |
| 20 | 51.7 ± 2.56 | 4.1 ± 0.09 | 52 | 6.2 |




ภาพที่ 4.11 ลักษณะของอนุภาคจากปริมาณเมนทอลที่เติมลงไป ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมเมนทอล 5% (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมเมนทอล 5% (ค)กำลังขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมเมนทอล 10% (ง) กำลังขยาย 1,000 เท่า (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมที่เติมเมนทอล 10% (ฉ) กำลัง ขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่เติมเมนทอล 20% (ช) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ซ) กำลัง ขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมเมนทอล 20% (ญ) กำลังขยาย 2,000 เท่า

## 4.11 ผลของตัวแปรในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

จากการทดลองข้างต้นเป็นการหาองค์ประกอบทางเคมีที่จะช่วยเพิ่มค่าการกักเก็บเมนทอลในแป้งข้าวเจ้า โดยพบว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% ที่มีอัตราส่วนโดยมวลของสารอิมัลซิไฟเออร์ต่อเมนทอลต่อมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 11 ในอัตราส่วน 1:2:2 จะให้ค่าการกักเก็บมากที่สุด อย่างไรก็ดีอัตราการระเหยของน้ำก็ย่อมส่งผลต่อค่าการกักเก็บอีกด้วย จึงเป็นที่มาของการศึกษาตัวแปรจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำ ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิอากาศขาเข้า ความเร็วในการป้อนสาร รวมถึงความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน โดยถ้าอนุภาคมีอัตราการระเหยของน้ำที่เร็ว จะส่งผลให้เกิดเป็นเปลือกโครงสร้างห่อหุ้มสารสำคัญได้เร็ว จึงปกป้องสารสำคัญจากอากาศร้อนได้ ส่งผลให้ค่าการกักเก็บมากขึ้น

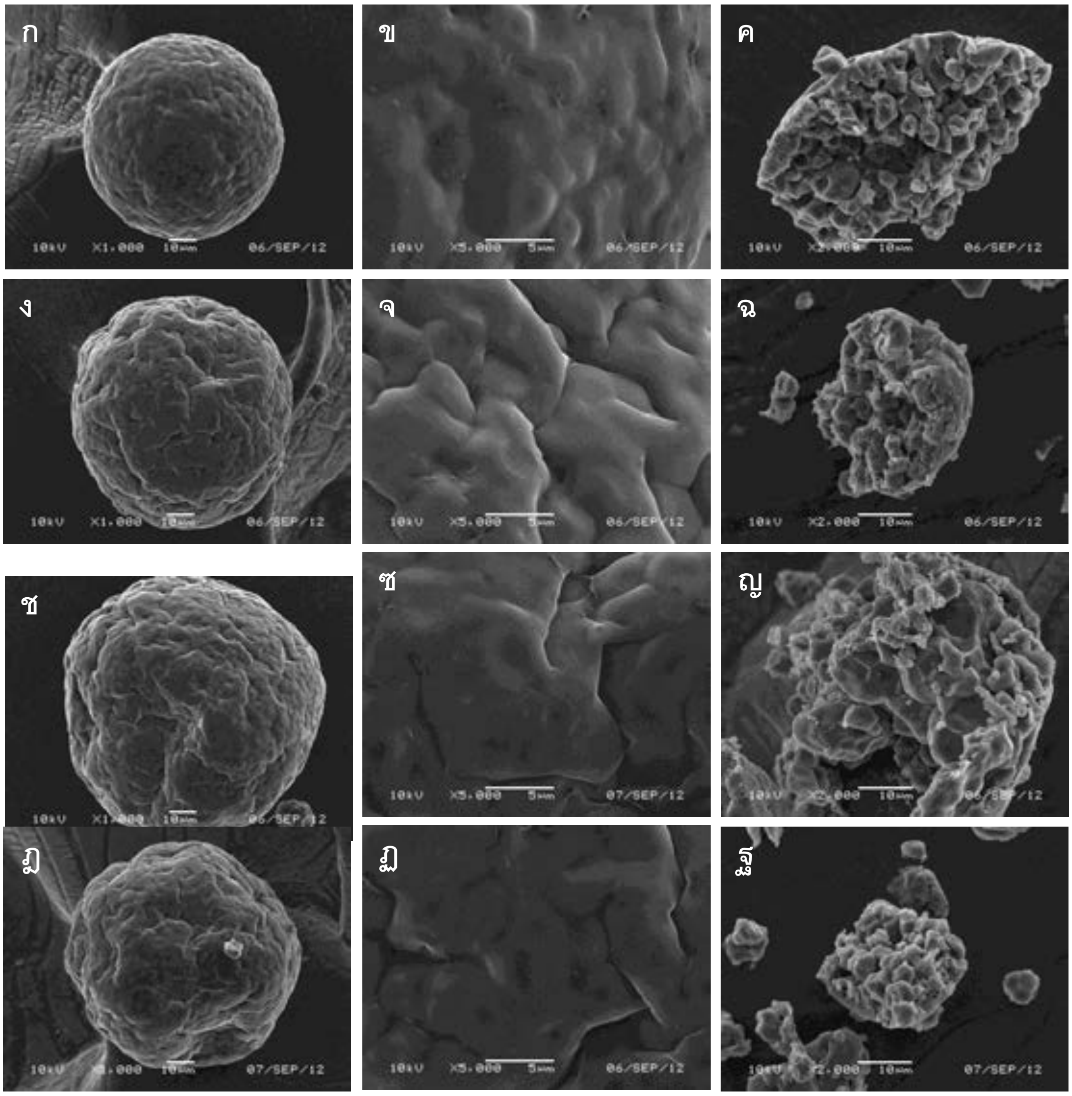
### 4.11.1 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า

อุณหภูมิอากาศขาเข้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการกักเก็บเมนทอล โดยเป็นตัวแปรที่จะเปลี่ยนสารจากของเหลวเป็นผงแห้ง รวมถึงส่งผลต่อระยะเวลาการทำผงให้แห้งอีกด้วย ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาอุณหภูมิอากาศขาเข้าในช่วง 120-180 องศาเซลเซียส โดยใช้เคซีนเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ต่อเมนทอลต่อมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 11 ในอัตราส่วน 1:2:2 หลังจากนั้นจะทำการวัดปริมาณเมนทอลที่กักเก็บได้โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งแสดงผลในตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการกักเก็บเมนทอลที่ได้น้อยลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงนั้นจะทำให้เมนทอลเกิดการระเหิดได้มากขึ้น ถึงแม้ว่าจะมีอัตราการระเหยของน้ำที่สูงก็ตาม และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสนั้นกลับมีค่าการกักเก็บเมนทอลที่มากกว่าอุณหภูมิที่ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลมากจากการที่ใช้อุณหภูมิอากาศขาเข้าที่สูงจะช่วยให้สารเปลี่ยนเป็นโครงสร้างกักเก็บได้เร็วยิ่งขึ้น ทำให้แป้งข้าวเจ้าและมอลโตเด็กซ์ตรินที่เปลี่ยนเป็นวัสดุห่อหุ้มช่วยป้องกันเมนทอลให้สัมผัสกับอากาศร้อนได้น้อยลง จึงส่งผลให้กักเก็บเมนทอลได้มากกว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 160 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาขนาดของผงแห้งนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าการกักเก็บมากขึ้น จะทำให้ผงแห้งมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากอนุภาคเกิดเป็นเปลือกห่อหุ้มที่หนาขึ้น ทำให้มีแป้งข้าวเจ้ากักเก็บเมนทอลได้มากขึ้น ส่วนปริมาณน้ำในผงแห้งนั้น เป็นผลมาจากอุณหภูมิอากาศขาเข้า ถ้าอุณหภูมิอากาศขาเข้าสูงจะทำให้น้ำที่อยู่ในสารอิมัลชันระเหยออกไปมาก เป็นผลให้มีปริมาณน้ำในผงแห้งน้อย นอกจากนี้ถ้าพิจารณาโครงสร้างของผงแห้งจากภาพที่ 4.12 จะพบว่าอุณหภูมิขาเข้ายังคงทำให้อนุภาคมีลักษณะทรงกลม แต่อุณหภูมิขาเข้าจะทำให้ผิวของอนุภาคไม่เรียบ ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อ

อุณหภูมิสูงขึ้น อนุภาคจะเกิดเป็นเปลือกหุ้มได้เร็ว จึงเป็นผลให้ไอน้ำมีการถ่ายเถมวลได้น้อยลง ไอน้ำบางส่วนจึงรวมตัวกันและเกิดเป็นแรงดัน ทำให้โครงสร้างของอนุภาคบิดเบี้ยว หรือแตกออกได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุเทพ สิงห์ไข่มุกข์ (2553)

ตารางที่ 4.10 คุณสมบัติของผงแห้งที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120-180 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 10,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

| Inlet temperature (°C) | Retention (%) | Emulsion size (μm) | Particle size (μm) | Water content (%) |
|---|---|---|---|---|
| 120 | 63.1 ± 0.27 | 4.3 ± 0.04 | 52 | 7.9 |
| 140 | 54.4 ± 0.73 | 4.1 ± 0.49 | 56 | 6.4 |
| 160 | 48.2 ± 1.13 | 4.3 ± 0.22 | 58 | 5.3 |
| 180 | 48.8 ± 0.23 | 4.0 ± 0.03 | 54 | 2.9 |



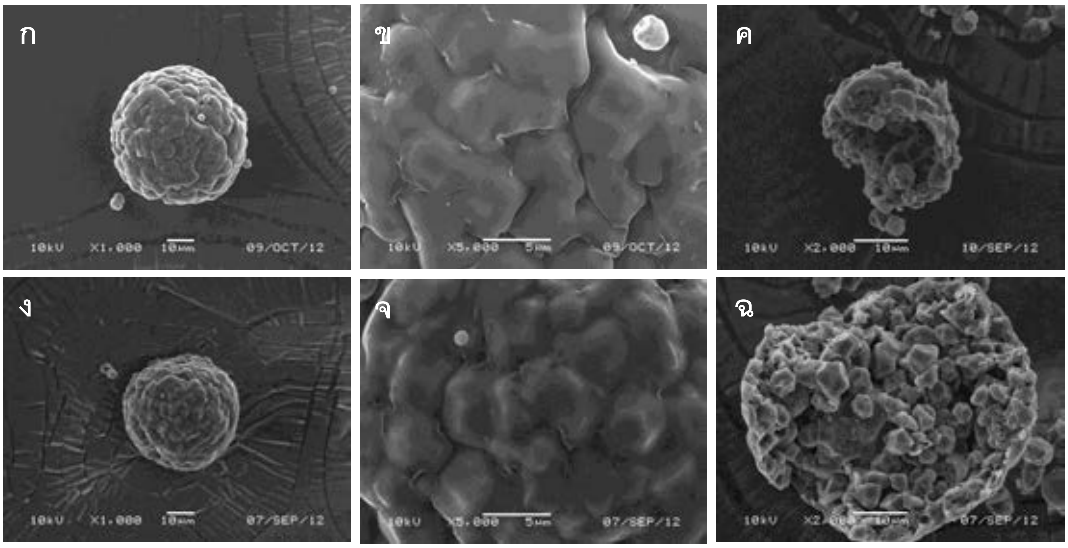

ภาพที่ 4.12 ลักษณะของอนุภาคที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าอยู่ในช่วง 120-180 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายนอกที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120องศาเซลเซียส (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาค (ค) กำลังขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 140 องศาเซลเซียส (ง) กำลังขยาย 1,000 เท่า (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายใน (ฉ) กำลังขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160 องศาเซลเซียส (ช) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ซ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาค (ญ) กำลังขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 180 องศาเซลเซียส (ฎ) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ฏ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาค (ฐ) กำลังขยาย 2,000 เท่า

**4.11.2 อิทธิพลของความเร็วในการป้อนสาร**

ความเร็วของสายป้อนเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าการกักเก็บ ซึ่งในขั้นตอนนี้ได้ศึกษาความเร็วในสายป้อน 25 และ 35 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้เคซีนเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ต่อเมนทอลต่อมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 11 ในอัตราส่วน 1:2:2 จากตารางที่ 4.11 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในสายป้อน ค่าการกักเก็บจะน้อยลง เนื่องจากเมื่อความเร็วในสายป้อนมากขึ้น หมายถึงปริมาณสารที่เข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยมากขึ้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นเมื่อปริมาณสารที่มากขึ้นสัมผัสกับอากาศร้อนที่ไหลมาในปริมาณเท่าเดิม ซึ่งทำให้สารเกิดเป็นเปลือกของแข็งได้ช้าลง ดังนั้นระหว่างนี้เมนทอลจึงมีโอกาสสูญเสียได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณน้ำในอนุภาคนั้น พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในสายป้อนทำให้มีน้ำในอนุภาคมากขึ้นน่าจะเป็นผลมากจากปริมาณสายป้อนที่เข้ามามาก จึงทำให้สัมผัสกับอากาศร้อนได้น้อย น้ำจึงระเหยออกไปได้น้อย และเมื่อพิจารณาโครงสร้างของอนุภาค ดังภาพที่ 4.13 พบว่าความเร็วของสายป้อนไม่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาค อนุภาคยังมีลักษณะเป็นทรงกลม มีเมนทอลแทรกอยู่ระหว่างเม็ดของแป้งข้าวเจ้า

ตารางที่ 4.11 คุณสมบัติของผงแห้งที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 และ 35 มิลลิลิตรต่อนาที

| Feed flow rate (ml/min) | Retention (%) | Emulsion size (μm) | Particle size (μm) | Water content (%) |
|---|---|---|---|---|
| 25 | 73.7 ± 1.96 | 4.8 ± 0.72 | 54 | 6.2 |
| 35 | 40.8 ± 0.88 | 4.0 ± 0.16 | 42 | 8.5 |



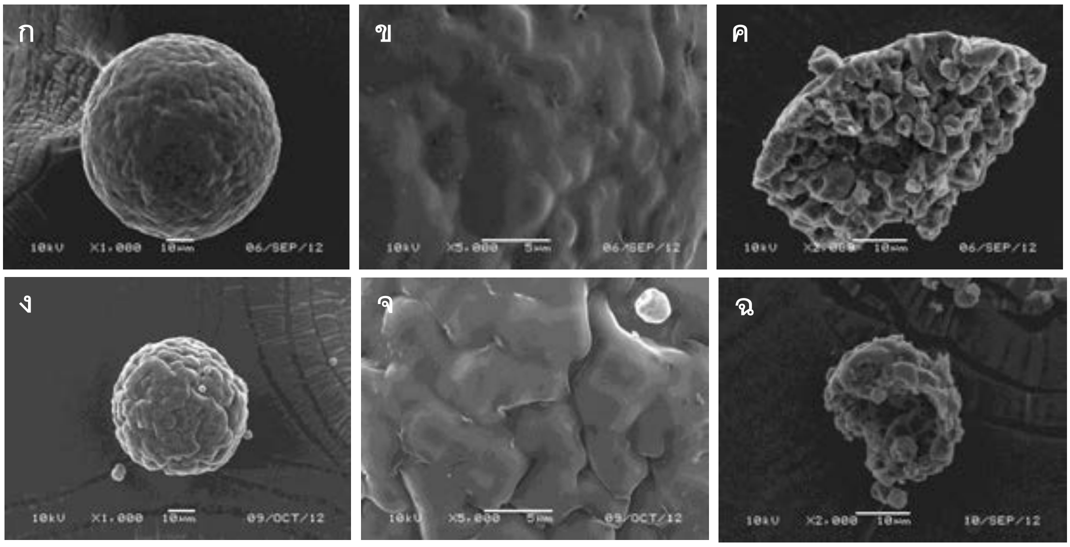

ภาพที่ 4.13 ลักษณะของอนุภาคจากอัตราการป้อนสารที่ 25 และ 35 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่ความเร็ว 25 มิลลิลิตรต่อนาที (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่เติมมอลโตเด็กซ์ตริน (ค) กำลังขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่ความเร็ว 35 มิลลิลิตรต่อนาที (ง) กำลังขยาย 1,000 เท่า (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่ความเร็ว 35 มิลลิลิตรต่อนาที (ฉ) กำลังขยาย 2,000 เท่า

### 4.11.3 **อิทธิพลของความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน**

เนื่องจากความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนมีผลต่อค่าการกักเก็บเมนทอล ดังแสดงในตารางที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าการกักเก็บมากขึ้น เนื่องจากเมื่อความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนเพิ่มขึ้น จะทำให้ละอองฝอยมีขนาดเล็ก เมื่อสัมผัสกับอากาศร้อน ละอองฝอยจึงเปลี่ยนเป็นเปลือกโครงสร้างได้เร็ว ดังนั้นจึงลดการสูญเสียของเมนทอลได้มากกว่า และจากสาเหตุดังกล่าวการที่ละอองฝอยมีขนาดเล็ก จึงทำให้มีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนมาก จึงเป็นผลให้มีปริมาณน้ำในอนุภาคน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Knipschildt (1986) ที่เมื่อความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนมากขึ้นจะทำให้ปริมาณน้ำในอนุภาคน้อยลง และเมื่อพิจารณารูปร่างของอนุภาค ดังภาพที่ 4.14 พบว่าอนุภาคมีลักษณะแบบเดียวกัน คือยังคงเป็นทรงกลม และความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนยังทำให้อนุภาคมีขนาดที่แตกต่างกันไม่มากอีกด้วย

ตารางที่ 4.12 คุณสมบัติของผงแห้งที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 10,000 และ 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

| Atomizer speed (rpm) | Retention (%) | Emulsion size (μm) | Particle size (μm) | Water content (%) |
|---|---|---|---|---|
| 10,000 | 63.1 ± 0.27 | 4.3 ± 0.04 | 52 | 7.9 |
| 30,000 | 73.7 ± 1.96 | 4.8 ± 0.72 | 54 | 6.2 |



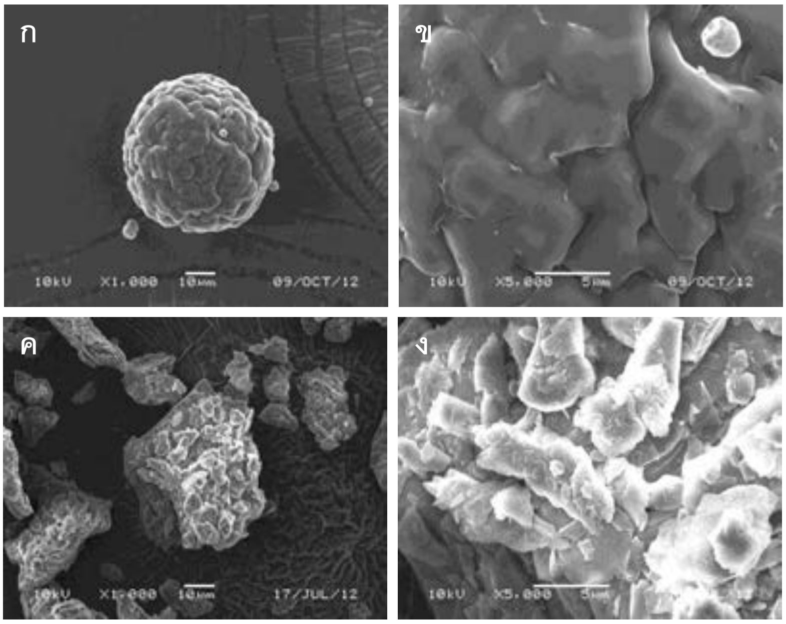

ภาพที่ 4.14 ลักษณะของอนุภาคที่ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนที่ 10,000 และ 30,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่ความเร็ว 10000 รอบต่อนาที (ค) กำลังขยาย 2,000 เท่า โครงสร้างภายนอกของอนุภาคที่ความเร็ว 30,000 รอบต่อนาที (ง) กำลังขยาย 1,000 เท่า (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายในของอนุภาคที่ความเร็ว 30,000 รอบต่อนาที (ฉ) กำลังขยาย 2,000 เท่า

**4.12 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด**

ในการทดลองก่อนหน้านี้ทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าการกักเก็บเมนทอลมากที่สุด โดยใช้เคซีนเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ต่อเมนทอลต่อมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 11 ในอัตราส่วน 1:2:2 และใช้อุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของสายป้อนที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที และความเร็วของของหัวฉีดแบบจานหมุนที่ 30,000 รอบต่อนาที จากนั้นทำการวัดปริมาณเมนทอลโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีและทำการเปรียบเทียบกับแป้งเย็นทาตัวที่มีขายตามท้องตลาด ดังแสดงผลในตารางที่ 4.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บนั้น มีปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งมากถึง 73.7% ซึ่งมากกว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ซึ่งจะเป็นผลดีในด้านการปลดปล่อย ทำให้ประสิทธิภาพการออกฤทธิ์เย็นนานยิ่งขึ้น และเมื่อพิจารณาขนาดของอนุภาคยังพบว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ซึ่งน่าจะเป็นผลดีในด้านของเนื้อสัมผัสในการใช้งาน

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บและแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด

| Sample | Retained menthol in powder (mg menthol/g powder) | Powder size (μm) |
|---|---|---|
| Encapsulated powder | 80.2 ± 2.14 | 54 |
| Commercial powder | 6.0 ± 0.08 | 66 |



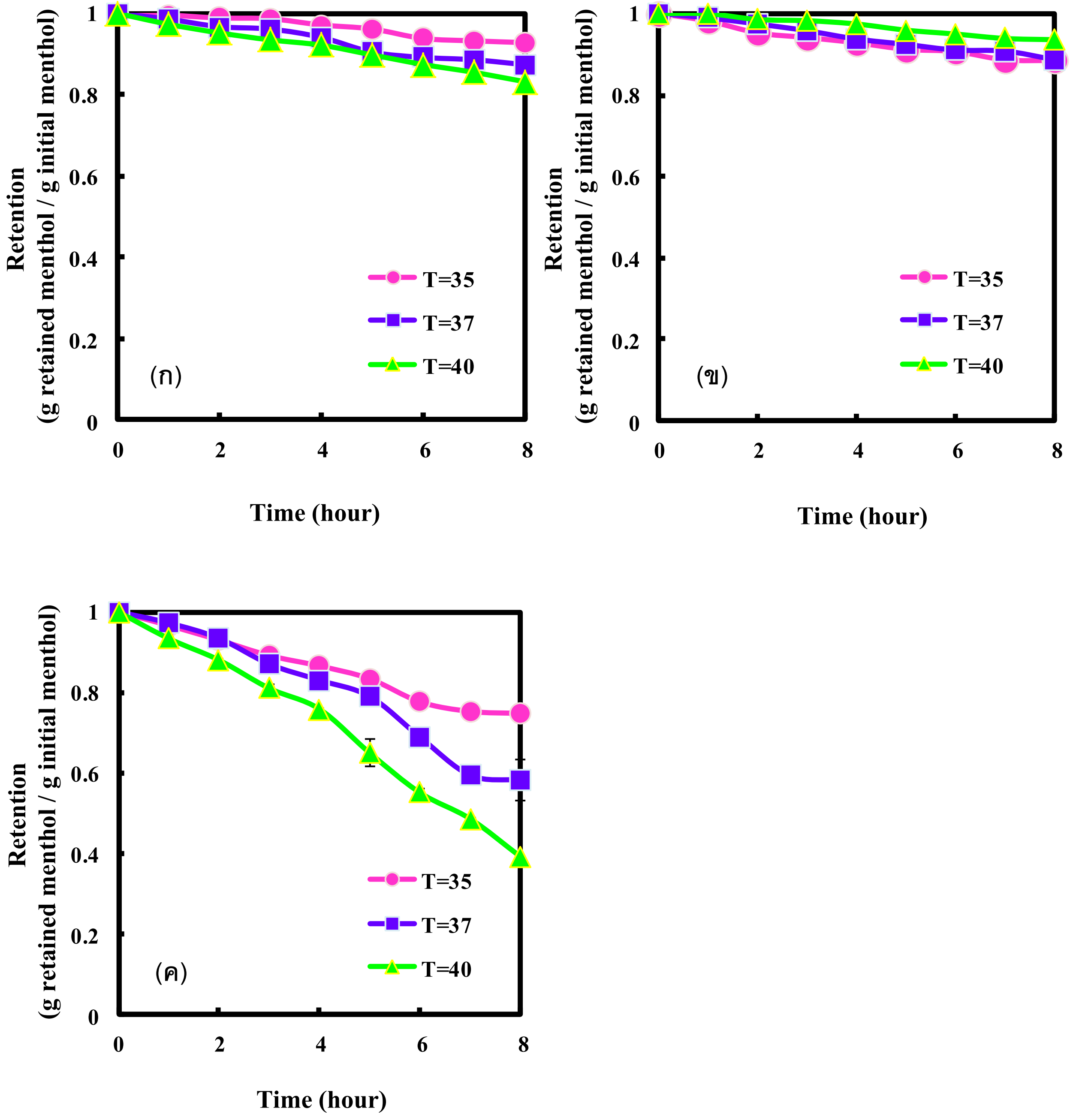

ภาพที่ 4.15 ลักษณะการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บและแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด โครงสร้างภายนอกของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บ (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า โครงสร้างภายนอกของอนุภาคแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด (ค) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ง) กำลังขยาย 5,000 เท่า

### 4.13 ผลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อการปลดปล่อยของผงแห้ง

หลังจากที่สามารถผลิตแป้งเย็นที่สามารถกักเก็บเมนทอลได้ในปริมาณมากแล้ว ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาประสิทธิภาพการปลดปล่อยเมนทอลในแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บเทียบกับแป้งเย็นทีมีขายตามท้องตลาด โดยจะศึกษาที่อุณหภูมิ 35, 37 และ 40 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50 และ 80% ซึ่งเป็นการจำลองอุณหภูมิและความชื้นบริเวณผิวหนังของร่างกาย

#### 4.13.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการปลดปล่อย

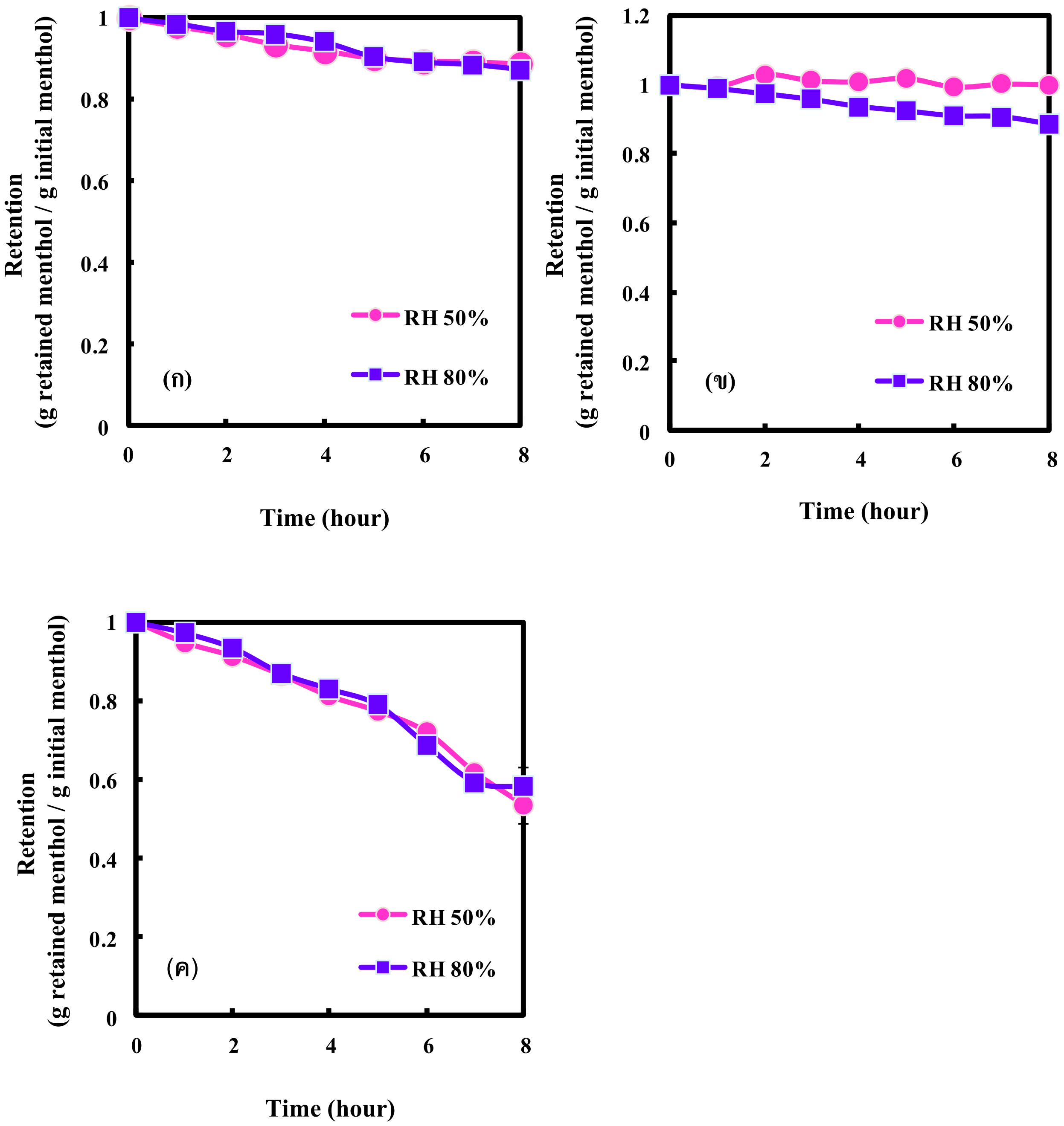
ในขั้นตอนนี้ได้ศึกษาการปลดปล่อยของผงแห้ง 3 ชนิดคือ มอลโตเด็กซ์ตริน 0%, มอลโตเด็กซ์ตริน 10% และแป้งเย็นที่ขายตามท้องตลาด โดยสองชนิดแรกจะมีเคซีนเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ต่อเมนทอลต่อมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ 11 ในอัตราส่วน 1:2:2 และใช้อุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของสายป้อนที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที และความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนที่ 30,000 รอบต่อนาที จากนั้นนำสารดังกล่าวเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ซึ่งจะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 80% และอุณหภูมิที่ 35, 37 และ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นทุกๆ 1 ชั่วโมง นำผงแห้งที่ได้มาตรวจวัดปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้ง โดยเครื่องแก๊สโคมาโทกราฟี ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.16 พบว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาดนั้น เมื่อผ่านไป 8 ชั่วโมง มีปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บ แสดงให้เห็นว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาดจะมีอัตราการปลดปล่อยเมนทอลที่มากเนื่องจากแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาดเป็นการผสมเมนทอลทางกายภาพ ทำให้เวลาทาที่ผิวเมนทอลจะสัมผัสกับร่างกายโดยตรง ทำให้เกิดการปลดปล่อยที่รวดเร็ว ซึ่งจะทำให้แป้งเย็นรักษาความเย็นได้ในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากเมนทอลจะหมดไปในผงแห้งเมื่อเทียบกับแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บนั้น เมนทอลจะถูกกักเก็บไว้ภายในแป้งข้าวเจ้า เป็นผลให้เมนทอลที่อยู่บริเวณผิวรอบนอกและภายในค่อยๆปลดปล่อยออกมา ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการเย็นยาวนานยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้อัตราการปลดปล่อยเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมนทอลเกิดการระเหิดได้ง่ายกว่า แต่เมื่อพิจารณาที่มอลโตเด็กซ์ตริน 10% ในภาพ (ข) นั้นจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การปลดปล่อยกลับเกิดได้น้อยลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงเกินอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) จะทำให้มอลโตเด็กซ์ตรินเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) เป็นสถานะคล้ายยาง (rubbery state) ทำให้เมนทอลปลดปล่อยออกมายากขึ้น




ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งและเวลา ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) มอลโตเด็กซ์ตริน 0% (ข) มอลโตเด็กซ์ตริน 10% (ค) แป้งเย็นที่ขายตามท้องตลาด

**4.13.2 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีผลต่อการปลดปล่อย**

ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาการปลดปล่อยของผงแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50% และ 80% ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยยังคงใช้ผงแห้งจากมอลโตเด็กซ์ตริน 0%, มอลโตเด็กซ์ตริน 10% และแป้งเย็นที่ขายตามท้องตลาด ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.17 จะเห็นว่าในกรณีของมอลโตเด็กตริน 0% นั้น ความชื้นสัมพัทธ์ไม่ค่อยมีผลต่ออัตราการปลดปล่อย เนื่องจากความชื้นไม่ได้ไปทำลายโครงสร้างของแป้งข้าวเจ้า ทำให้เมนทอลยังคงสามารถปลดปล่อยออกมาทางช่องระหว่างเม็ดแป้งข้าวเจ้าได้ และปริมาณเมนทอลยังคงลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ส่วนกรณีของมอลโตเด็กตริน 10% นั้น ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50% เมนทอลมีอัตราการปลดปล่อยได้น้อยเมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ 80% เนื่องจากความชื้นที่มากขึ้นน่าจะไปทำลายฟิล์มของมอลโตเด็กซ์ตริน ทำให้เมนทอลที่อยู่ภายในปลดปล่อยออกมา อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50% นั้น ค่าการกักเก็บมีค่าเกินหนึ่ง เนื่องจากแต่ละจุดของตัวอย่างผงแป้ง มีปริมาณเมนทอลไม่เท่ากัน ทำให้เวลาหาค่าเฉลี่ยของร้อยละการกักเก็บจึงอาจมีค่าเกินหนึ่ง ส่วนแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาดนั้น ความชื้นสัมพัทธ์ไม่ค่อยมีผลต่อการปลดปล่อยเมนทอล เมื่อเทียบกับอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามการปลดปล่อยของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บนั้น ยังคงค่อยๆปลดปล่อยเมื่อเทียบกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพการออกฤทธิ์เย็นนานยิ่งขึ้น




ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือและเวลาที่อุณหภูมิ37 องศาเซลเซียส (ก) มอลโตเด็กซ์ตริน 0% (ข) มอลโตเด็กซ์ตริน 10% (ค) แป้งเย็นที่ขายตามท้องตลาด

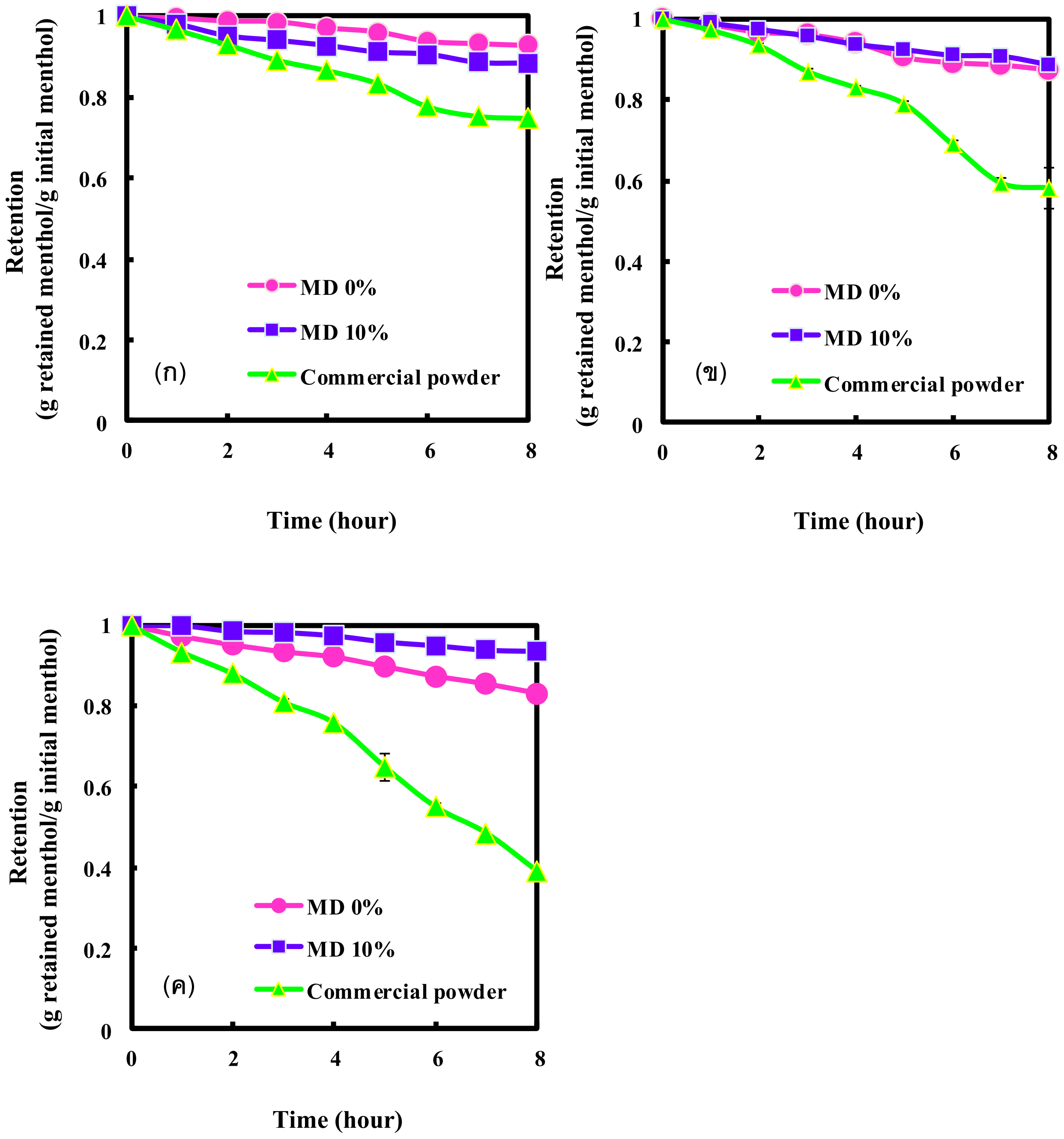
**4.13.3 การปลดปล่อยระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด**

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์นั้น เมื่อนำมารวบรวมและจำแนกตามชนิดของผงแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4.18 พบว่าอัตราการปลดปล่อยของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บนั้น เมื่อเวลาผ่านไป 8 ชั่วโมง ยังคงมีปริมาณเมนทอลเหลืออยู่ในผงแป้งเป็นปริมาณมาก ซึ่งกล่าวได้ว่าเมนทอลค่อยๆ ปลดปล่อยออกมา เมื่อเทียบกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ซึ่งจะเป็นผลดีในด้านการรักษาความเย็นให้ยาวนานยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 4.18 คือ ปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆ สามารถนำมาคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ ก-5 (คอลัมภ์ 4) เพื่อหาปริมาณเมนทอลที่ปล่อยออกไปจากผงแห้งในเวลาต่างๆ ได้ ดังแสดงผลในภาพที่ 4.19 พบว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลเด็กตรินซ์ที่ 10% มีปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกมาจากผงแห้งมากที่สุด เมื่อเทียบกับแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลเด็กตรินซ์ที่ 0% และแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นยังคงทำให้ผงแห้งมีการปลดปล่อยเมนทอลออกมาได้มากขึ้น ดังภาพ (ข) และ (ค) อย่างไรก็ดีหากพิจารณาเฉพาะแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลเด็กตรินซ์ที่ 10% นั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกลับเป็นผลทำให้มีการปลดปล่อยเมนทอลจากผงแห้งลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วนั้น จะทำให้มอลโตเด็กตรินซ์เปลี่ยนไปเป็นสถานะคล้ายยาง ทำให้มีคุณสมบัติที่ต่างออกไป ดังนั้นจึงส่งผลให้เมนทอลที่อยู่ในผงแห้งถูกปล่อยออกมาได้ยากขึ้น

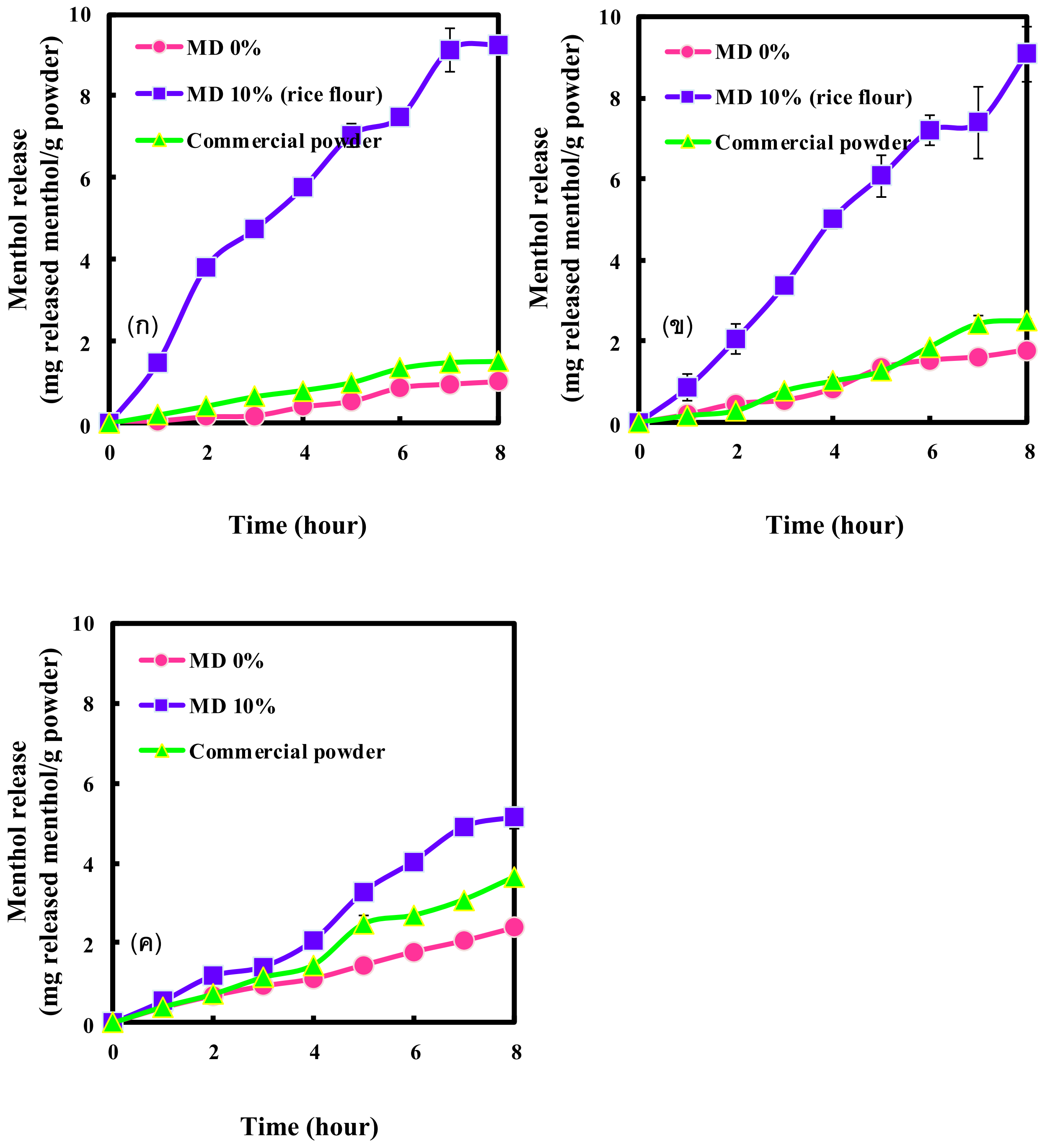
นอกจากนี้หากพิจารณาปริมาณเมนทอลที่ปล่อยออกมาเป็นค่าพลังงานนั้น ดังแสดงการคำนวณในตารางที่ ก-5 (คอลัมภ์ 5) จะทำให้สามารถบอกได้ว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บนั้น มีการดูดพลังงานที่เพียงพอที่จะทำให้รู้สึกเย็นหรือไม่ ซึ่งจากกราฟภาพที่ 4.20 พบว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% มีการดูดพลังงานเพื่อนำไปทำให้เมนทอลระเหิดมากกว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาดในทุกช่วงเวลา ส่งผลให้แป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บมีประสิทธิภาพของการออกฤทธิ์เย็นที่สูงกว่าและถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะสูงเกินอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอลโตเด็กซ์ตริน แป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บโดยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% ยังคงมีการดูดพลังงานไปใช้ในการระเหิดที่มากกว่าอีกด้วย เมื่อพิจารณาแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 0% กลับพบว่าพลังงานที่ใช้ในการทำให้เมนทอลระเหิดนั้นน้อยกว่าพลังงานของแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด แสดงว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 0% มีการปล่อยเมนทอลออกจากผงแห้ง แต่ไม่มากเพียงพอที่จะทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกเย็นเมื่อเทียบกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด เนื่องจากเมนทอลถูกกักเก็บไว้ภายในแป้งข้าวเจ้า ทำให้เจอสภาวะแวดล้อมภายนอกได้ยากกว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ซึ่งเมนทอลมีโอกาสสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมภายนอกได้มากกว่า จึงเกิดการปลดปล่อยที่มากกว่า นอกจากนี้การที่แป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโต

เด็กซ์ตริน 10% มีการปล่อยเมนทอลที่มากกว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 0% ถึงแม้ว่าจะมีการกักเก็บเมนทอลไว้ภายในแป้งข้าวเจ้าเหมือนกัน อาจเป็นเพราะว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% มีปริมาณเมนทอลที่คงเหลือเริ่มต้นมากกว่า ซึ่งเมื่อคิดเป็นร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้ง พบว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% สามารถกักเก็บเมนทอลได้ถึง 73.7% เมื่อเทียบกับแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 0% ที่กักเก็บเมนทอลได้เพียง 13.5% ซึ่งแสดงข้อมูลในตารางที่ 4.4 ดังนั้นถึงแม้ว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% จะมีเมนทอลที่ถูกกักเก็บไว้ในแป้งข้าวเจ้า และทำให้เมนทอลค่อยๆ ปล่อยออกมาเหมือนกับแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 0% แต่เนื่องจากการมีปริมาณเมนทอลเริ่มต้นในผงแห้งที่มาก ดังนั้นถึงจะปลดปล่อยออกมาเพียงเล็กน้อย แต่ก็เป็นปริมาณที่มาก เมื่อเทียบกับปริมาณเมนทอลเริ่มต้นที่มีอยู่ในผงแห้งของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 0% จากกราฟที่กล่าวมาข้างต้นจะทำให้ทราบว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บนั้น น่าจะทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกเย็นได้มากกว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด

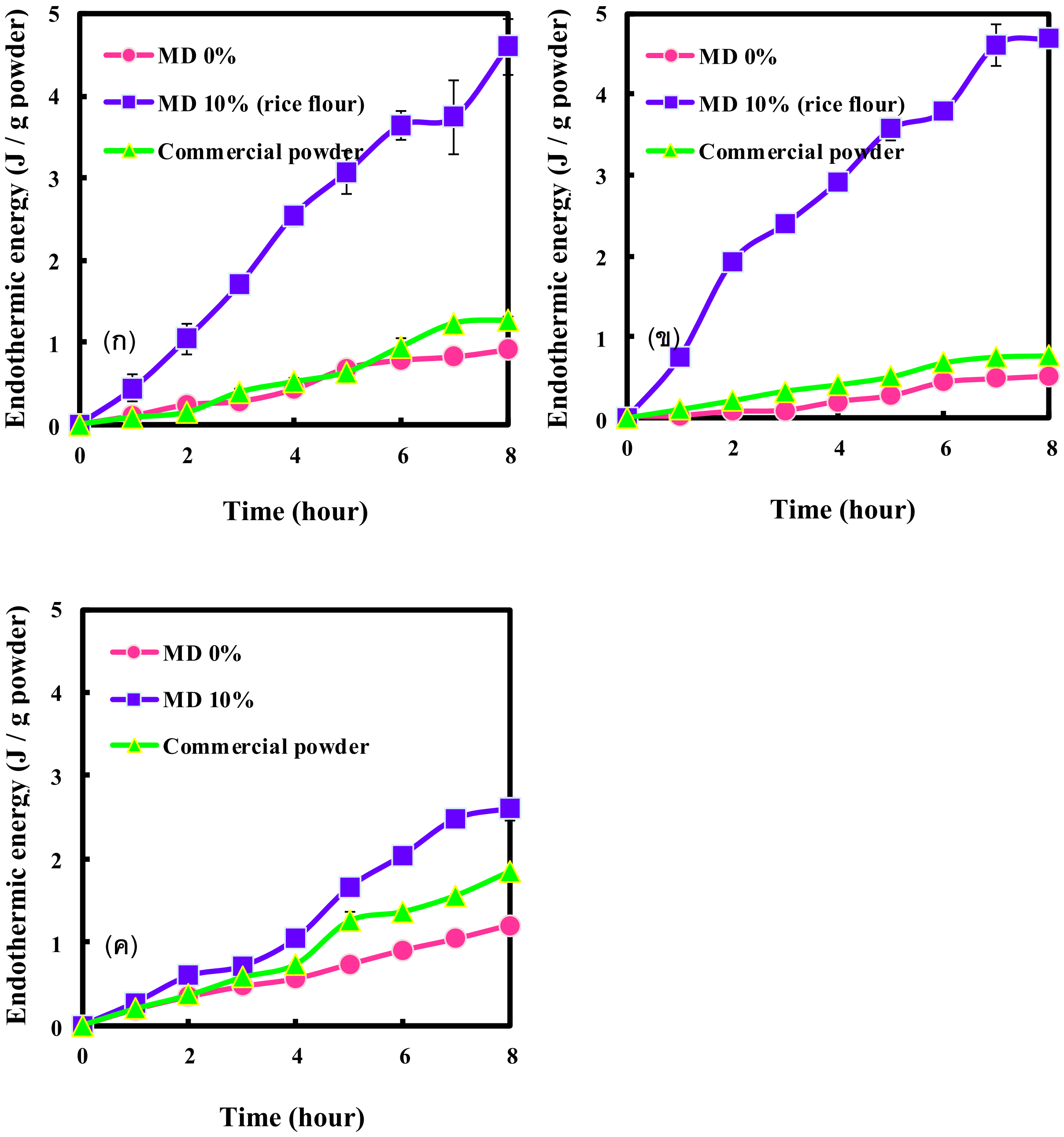
นอกจากนี้ยังมีปัญหาที่ต้องศึกษาคือ แป้งเย็นดังกล่าวสามารถทำให้ผู้ใช้รู้สึกเย็นได้ยาวนานมากขึ้นหรือไม่ ดังนั้นจึงต้องนำกราฟภาพที่ 4.19 ซึ่งเป็นปริมาณเมนทอลที่ปล่อยออกจากผงแห้งที่ช่วงเวลาต่างๆ ไปคิดเป็นร้อยละการปลดปล่อยเมื่อเทียบกับเมนทอลที่มีอยู่ในผงแห้งเริ่มต้น ดังแสดงในภาคผนวก ก เพื่อจะได้รู้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป 8 ชั่วโมง เมนทอลมีร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งเทียบกับเริ่มต้นยังไง เพื่อจะได้ประเมินได้ว่าเมนทอลจะหมดไปจากแป้งเย็นที่เวลาใด ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.21 พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปผ่านไป 8 ชั่วโมง แป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาดมีอัตราการปลดปล่อยเมนทอลมากกว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บอย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะช่วยเพิ่มอัตราการปลดปล่อย ดังจะเห็นได้จากที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แป้งเย็นที่ขายตามท้องตลาดมีการปลดปล่อยเมนทอลไปแล้วประมาณ 20% ของเมนทอลเริ่มต้นในผงแห้ง ส่วนที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีการปลดปล่อยเมนทอลไปแล้วประมาณ 40% และ 60% ของเมนทอลเริ่มต้นในผงแห้ง อย่างไรก็ตามแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บโดยใช้มอลเด็กตรินซ์ที่ 10% นั้น ให้ค่าการกักเก็บเมนทอลที่มากและมีการปลดปล่อยเมนทอลเป็นระยะเวลายาวนาน นอกจากนี้ในแต่ละครั้งที่ปลดปล่อยเมนทอลออกมายังมีการดูดพลังงานเพื่อให้เมนทอลใช้ในการระเหิดมากกว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ดังนั้นแป้งเย็นที่ผลิตจากมอลเด็กตรินซ์ที่ 10% จึงเหมาะแก่การนำไปทำเป็นแป้งเย็นเพื่อการค้าที่จะทำให้ผู้ใช้รู้สึกเย็นเป็นเวลายาวนานขึ้นอีกด้วย



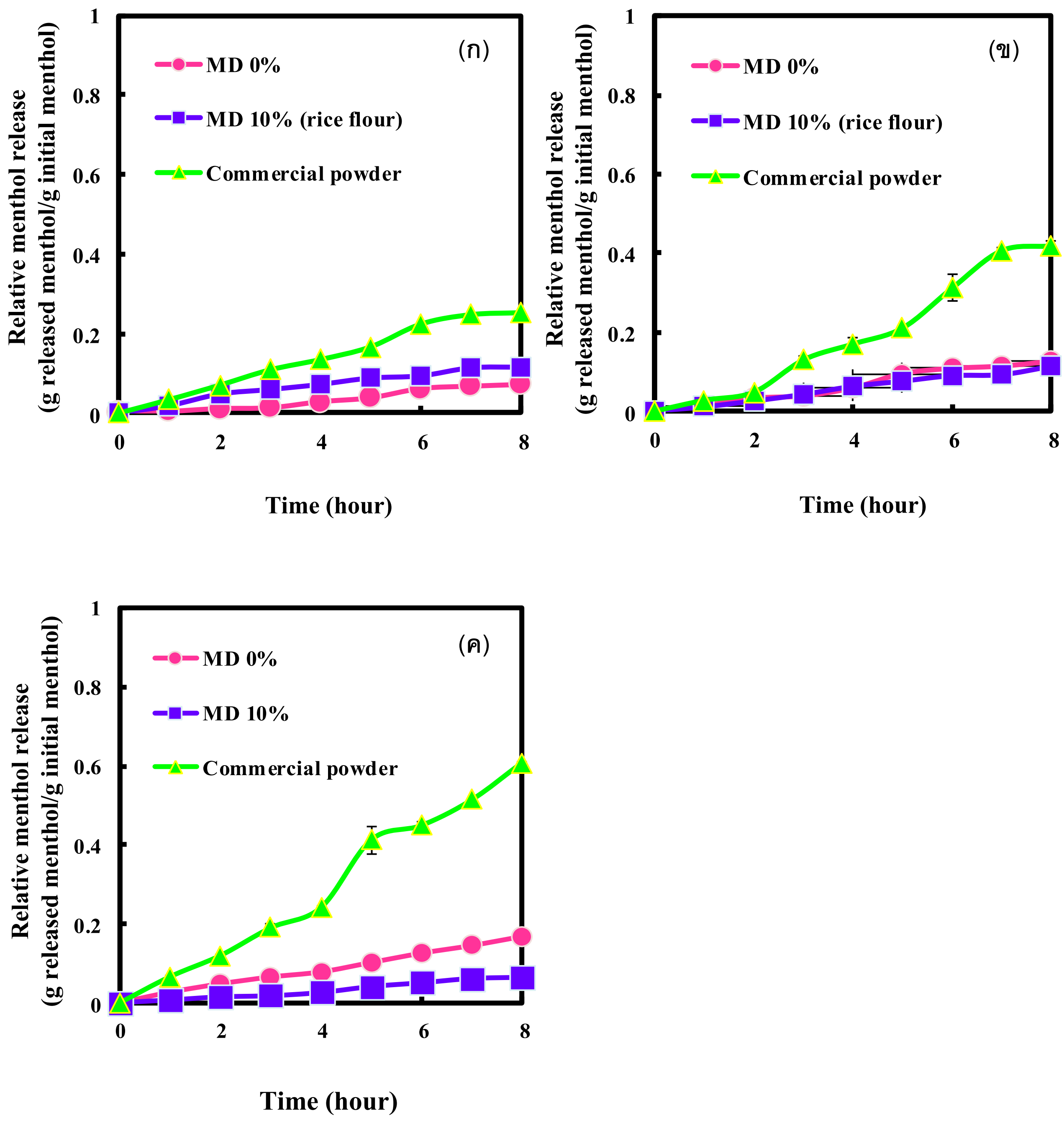

ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งและเวลา ของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 0% และ10% ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส




ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งและเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 0% และ10% ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



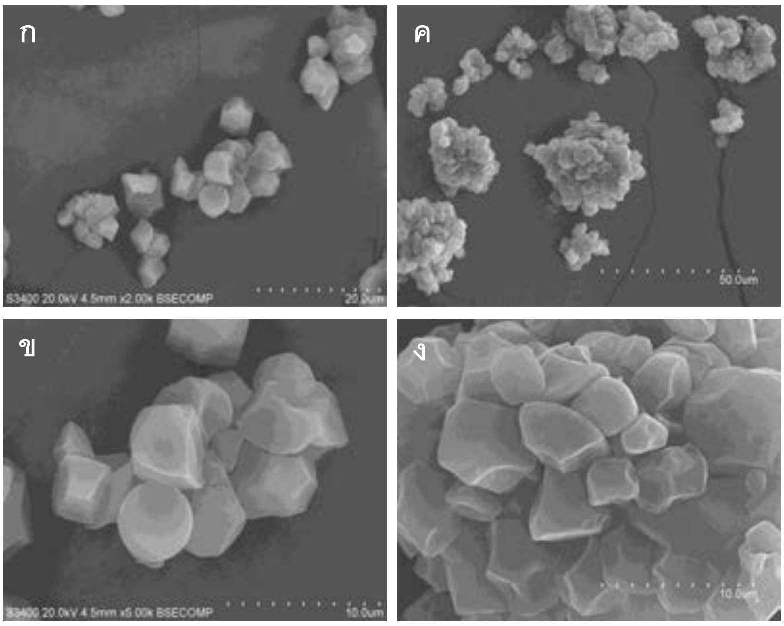

ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้งและเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 0% และ10% ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส




ภาพที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งและเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 0% และ10% ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

**4.14 การกักเก็บเมนทอลด้วยแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง**

เมื่อนำแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บโดยใช้มอลเด็กตรินซ์ที่ 10% นั้น ไปใช้งานจริงพบว่า เกิดความเหนอะขึ้นเวลาใช้งาน ทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกไม่สบายตัว ซึ่งเป็นผลมาจากโปรตีนที่มีอยู่ในแป้งข้าวเจ้า ดังนั้นการนำแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงที่มีการสกัดเอาโปรตีนออกจากแป้งมาทำการกักเก็บเมนทอล อาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะทำให้ผู้ใช้แป้งเย็นรู้สึกเหนอะน้อยลง ซึ่งการสกัดโปรตีนออกนั้นจะทำให้ได้แป้งข้าวเจ้าที่มีขนาดเล็กลง เป็นผลให้เม็ดแป้งข้าวเจ้าเกาะเป็นกลุ่มรวมตัวกันมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.22 ซึ่งจะส่งผลให้การกักเก็บดียิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของไสยวิชญ์ วรวินิต (2548) ที่พบว่าผงแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านกระบวนการสกัดโปรตีนออกไปนั้น จะทำให้เม็ดแป้งมีขนาดที่เล็กลง และงานวิจัยของ Dorglamud et al. (2010) ที่พบว่าการสกัดเอาโปรตีนออกจากแป้งเข้าเจ้านั้นทำให้แป้งที่ได้มีความหนืดน้อยลง ดังแสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบระหว่างการนำแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงมาทำการกักเก็บเมนทอลในตารางที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าการใช้แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงมีค่าการกักเก็บเมนทอลใกล้เคียงกับแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลง ดังนั้นโปรตีนที่มีอยู่ในธรรมชาติของแป้งข้าวเจ้านั้นจึงส่งผลต่อค่าการกักเก็บน้อยมากเมื่อเทียบกับการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์และการเติมสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม เนื่องจากโดยธรรมชาติแป้งข้าวเจ้ามีโปรตีนอยู่ประมาณร้อยละ 7% ดังการวิจัยของสุเทพ สิงห์ไข่มุกข์ (2553) อย่างไรก็ตามเมื่อนำผงแป้งเย็นที่ผ่านการดัดแปลงไปใช้งานนั้น พบว่ายังมีความเหนอะเหลือบ้างอยู่ ซึ่งน่าจะเป็นผลจากธรรมชาติของเม็ดแป้งข้าวเจ้าเอง

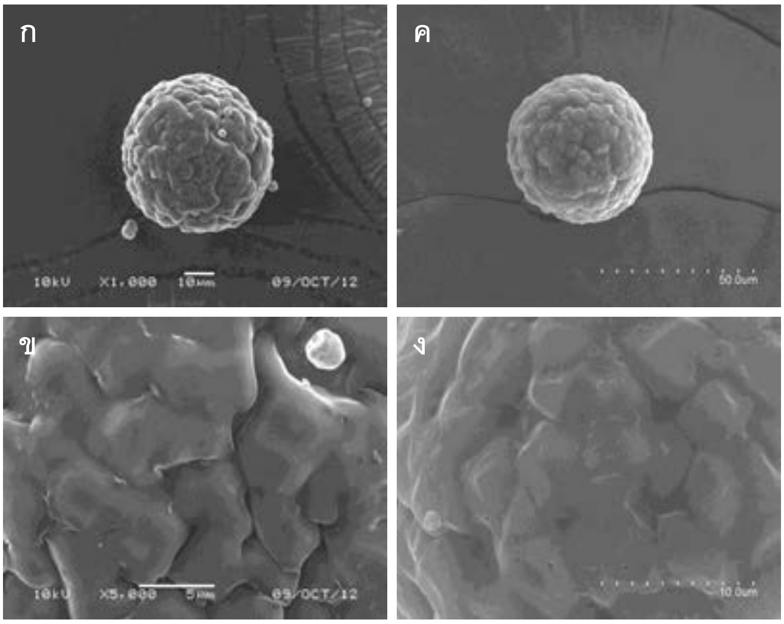



ภาพที่ 4.22 การเปรียบเทียบรูปร่างของอนุภาคระหว่างแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลง (ก) 2,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง (ค) 1,000 เท่า (ง) กำลังขยาย 5,000 เท่า

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างผงแห้งที่ได้จากการใช้แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงและไม่ผ่านการดัดแปลงในการกักเก็บเมนทอล ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 120 องศาเซลเซียส ความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน 30,000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนสารที่ 25 มิลลิลิตรต่อนาที

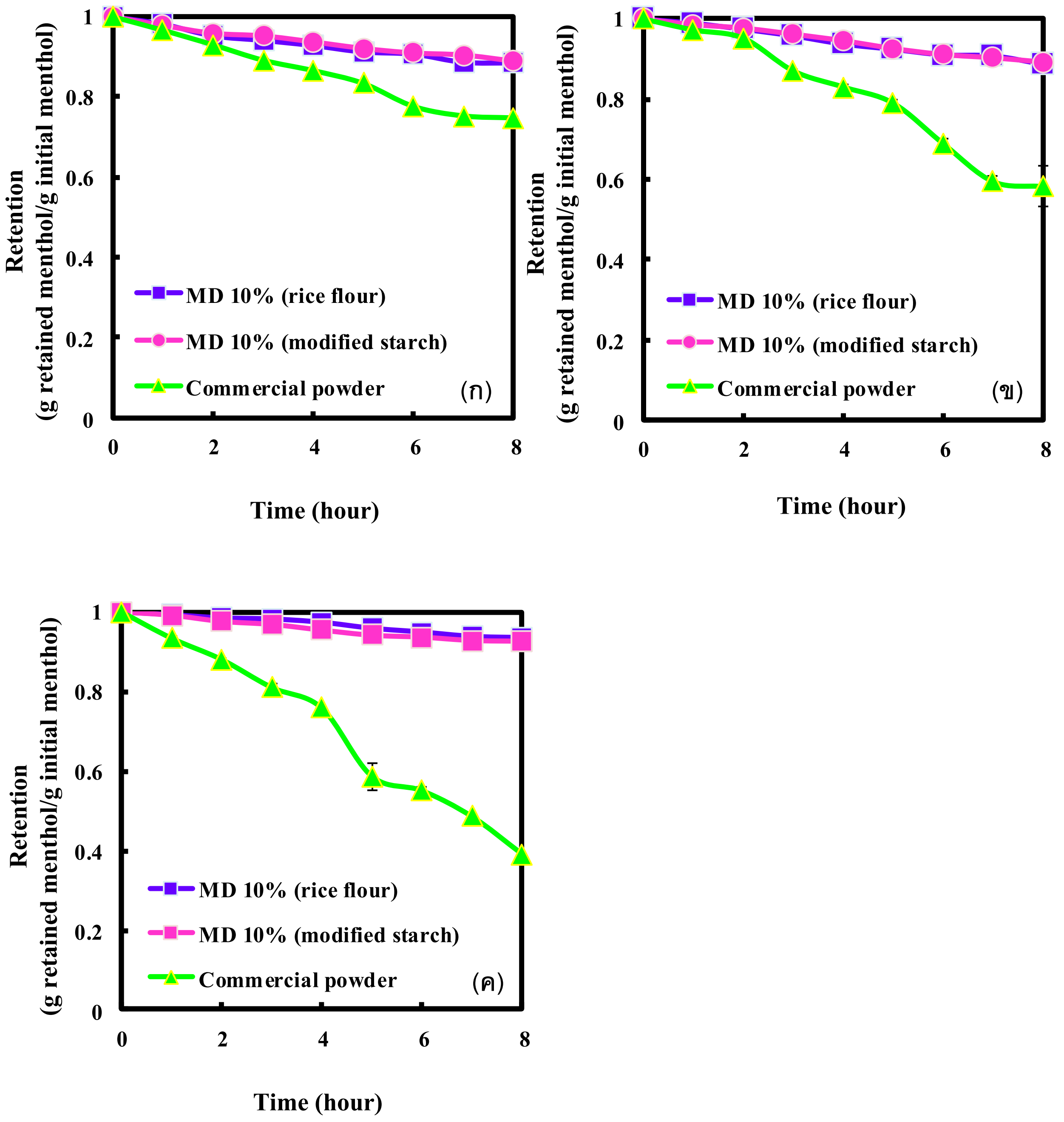
| Sample | Retained menthol in powder (mg retained menthol/g powder) | Particle size (µm) |
|---|---|---|
| Rice flour | 80.2 ± 2.1 | 54 |
| Modified rice starch | 83.3 ± 2.8 | 43 |

สำหรับรูปร่างของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บแสดงในภาพที่ 4.23 จะเห็นว่าชนิดของแป้งไม่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาค โดยยังเห็นเป็นเม็ดแป้งข้าวเจ้าถูกเคลือบด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน แต่ชนิดของแป้งจะมีผลในแง่การใช้งาน คือให้ผิวสัมผัสที่ต่างกัน โดยแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงแล้วนั้นจะทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกเหนอะน้อยกว่า

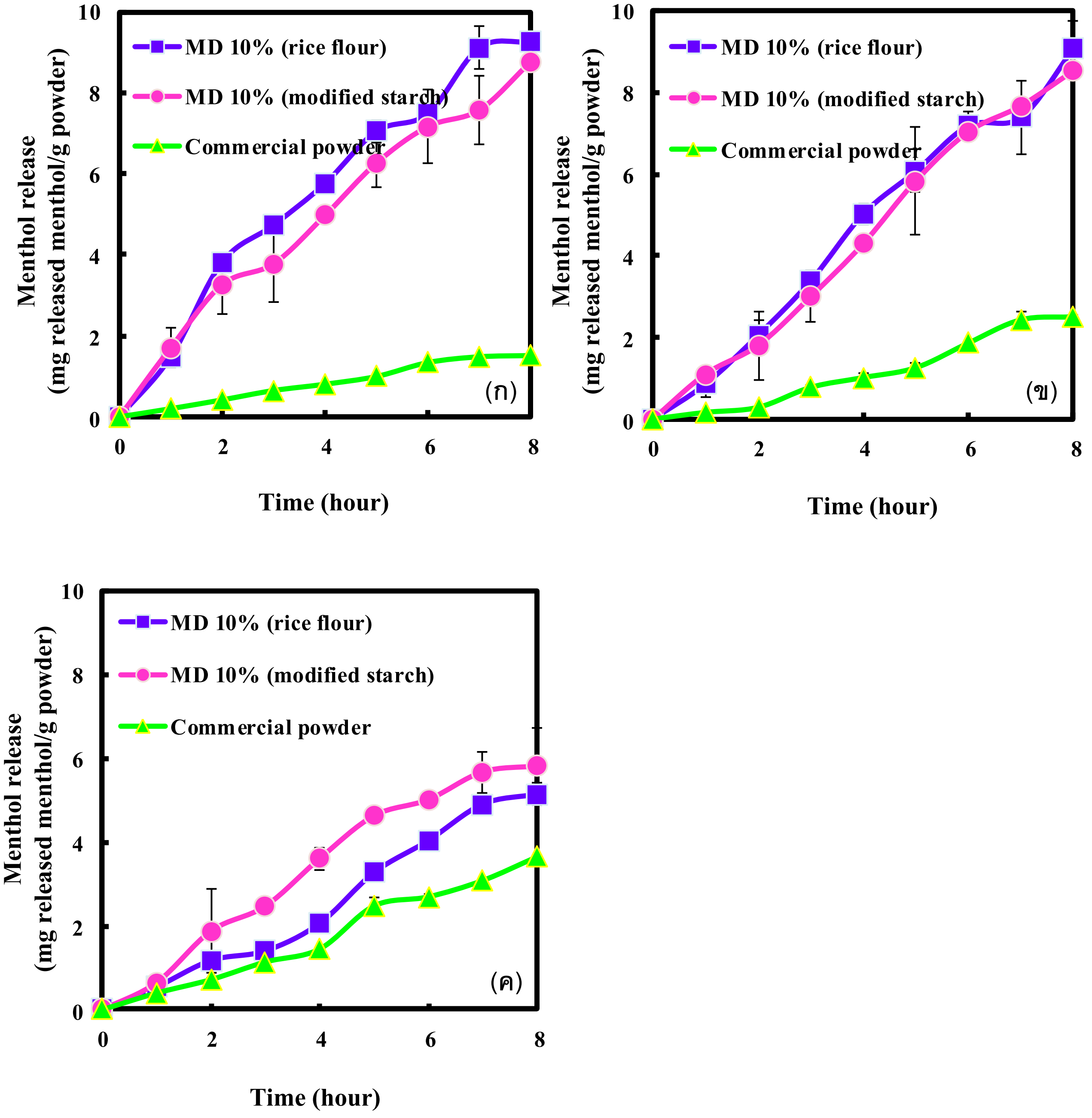



ภาพที่ 4.23 การเปรียบเทียบระหว่างลักษณะอนุภาคแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บโดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลง (ก) 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง (ค) 1,000 เท่า (ง) กำลังขยาย 5,000 เท่า

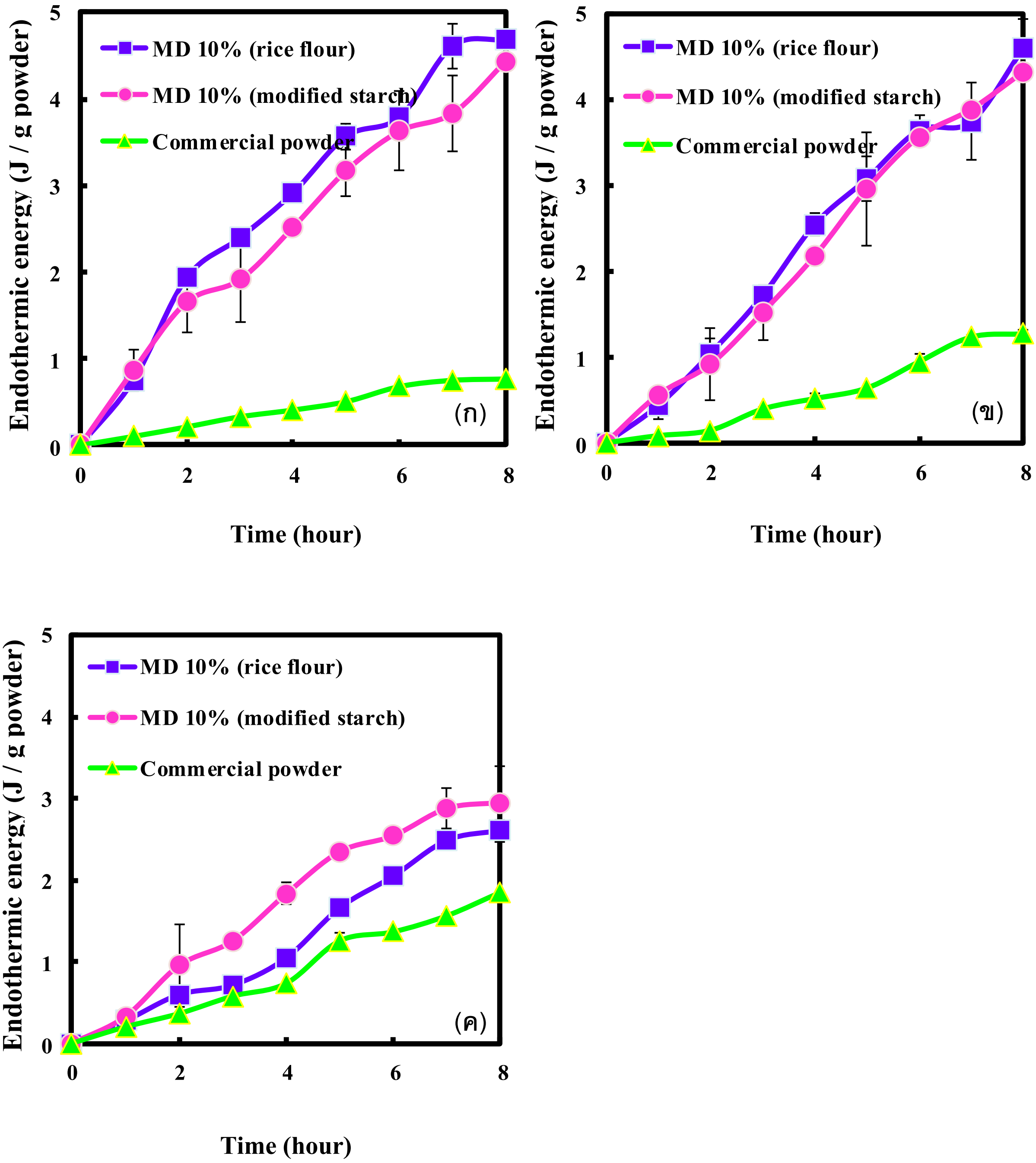
เมื่อพิจารณาร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งดังแสดงในภาพที่ 4.24 พบว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% ทั้งการใช้แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงมากักเก็บเมนทอลจะมีค่าการกักเก็บที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ดีหากพิจารณาปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งในแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงในภาพที่ 4.25 พบว่าที่อุณหภูมิ 35 และ 37 องศาเซลเซียสนั้น แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงมีการปลดปล่อยเมนทอลออกมาใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส การใช้แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงจะมีการปลดปล่อยเมนทอลออกมามากกว่า ซึ่งน่าจะเป็นผลจากมาจากคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงค่าพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิด ดังแสดงในภาพที่ 4.26 พบว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลง มีการดูดพลังงานเพื่อให้เมนทอลนำไปใช้ในการระเหิดที่มากกว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพของการให้ความเย็นที่สูงกว่า และจากภาพที่ 4.27 พบว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงและไม่ผ่านการดัดแปลง มีร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่น้อยกว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ซึ่งหมายถึงแป้งเย็นนี้สามารถปลดปล่อยเมนทอลออกมาได้เป็นระยะเวลายาวนานกว่าแป้งที่มีขายตามท้องตลาด ดังนั้นการใช้แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงมากักเก็บเมนทอลนั้น จะมีการดูดพลังงานเพื่อใช้ในการระเหิดมากกว่าแป้งที่มีขายตามท้องตลาด รวมถึงประสิทธิภาพการออกฤทธิ์เย็นยาวนานยิ่งกว่า



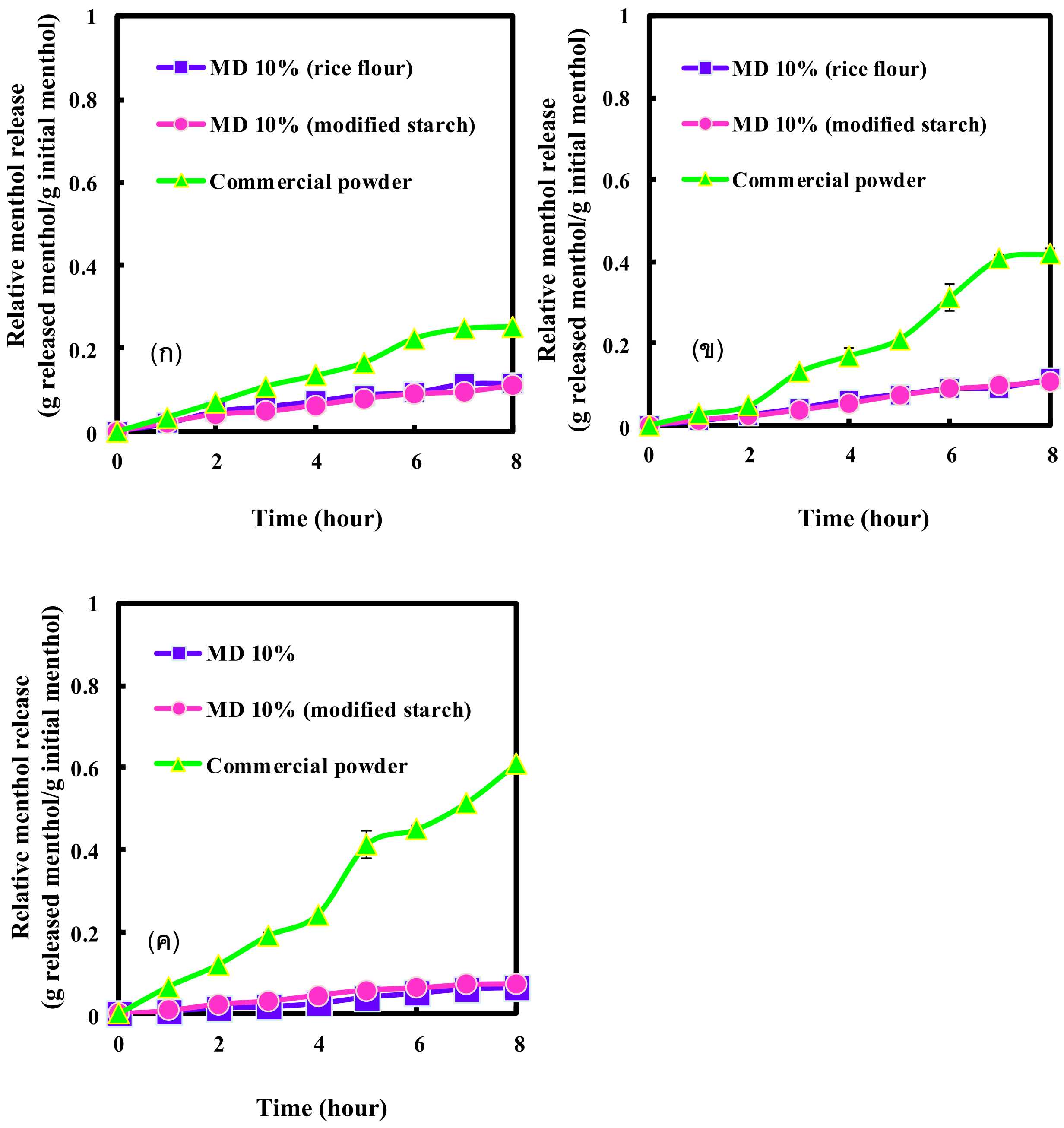

ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งและเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% โดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส




ภาพที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งและเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% โดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส




ภาพที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้งและเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% โดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส




ภาพที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งและเวลาของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% โดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

**4.15 การนำแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บไปผสมกับทัลคัม**

จากผลการทดลองข้างต้นทำให้ทราบว่าการใช้แป้งข้าวเจ้าทั้งที่ผ่านการดัดแปลงและไม่ผ่านการดัดแปลงมากักเก็บเมนทอลนั้น จะทำให้เมื่อนำผงแป้งไปใช้ เมนทอลจะมีการดูดพลังงานเพื่อนำไปใช้ในการระเหิดมากกว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ซึ่งเป็นผลทำให้มีประสิทธิภาพการออกฤทธิ์เย็นที่มากขึ้น รวมถึงมีอัตราการปลดปล่อยเมนทอลที่ยาวนานกว่า อย่างไรก็ตามการนำแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บมาใช้งานจริงนั้น ถึงแม้ว่าจะมีการสกัดเอาโปรตีนออกจากแป้งข้าวเจ้าแล้ว ยังคงทำให้เนื้อสัมผัสของแป้งสาก ไม่เรียบเวลาใช้งาน รวมถึงค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงจากการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์และสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม ดังนั้นเพื่อจะลดต้นทุน แต่ยังคงทำให้ผงแป้งมีการปลดปล่อยเมนทอลเพื่อให้มีประสิทธิภาพการออกฤทธิ์เย็นเทียบเท่ากับแป้งที่มีขายตามท้องตลาด สามารถทำได้โดยนำแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บไปเป็นตัวผสมกับทัลคัม จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาลักษณะการปลดปล่อยเพื่อให้เข้าใจกลไกการปลดปล่อยของเมนทอลออกจากผงแห้ง รวมถึงศึกษาอัตราการปลดปล่อยของเมนทอลเพื่อนำไปคำนวณหาสูตรผสมระหว่างแป้งที่ผ่านการกักเก็บและทัลคัม โดยจะพิจารณาจากลักษณะการปลดปล่อยเป็นอันดับแรก ดังสมการ Convective Mass Transfer ที่ 4.1-4.5

$$N = k\,(C_S - C_b)^n \tag{4.1}$$

$$\frac{1}{A}\frac{dC}{dt} = k\,(C_S - C_b)^n \tag{4.2}$$

$$\frac{dC}{dt} = kA\,(C_S - C_b)^n \tag{4.3}$$

$$\frac{dC}{dt} = K_{apparent}\,(C_S - C_b)^n \tag{4.4}$$

เมื่อพิจารณาการปลดปล่อยของสารเมื่อเทียบกับปริมาณสารเริ่มต้นที่มีอยู่ในผงแห้งนั้น จะได้ว่า

$$\frac{d\,(C/C_0)}{dt} = K_{normalized}\,(C_S - C_b)^n \tag{4.5}$$

เมื่อ

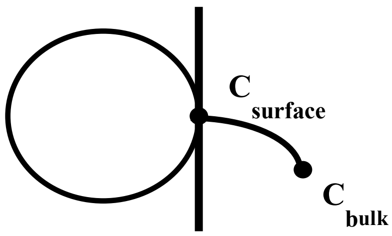
N คือ ปริมาณสารที่ปลดปล่อยออกมาต่อหน่วยพื้นที่และเวลา

K คือ ค่าคงที่การปลดปล่อย

$C_S$ คือ อัตราการปลดปล่อยของสารบริเวณผิวอนุภาค

$C_b$ คือ อัตราการปลดปล่อยของสารบริเวณภายนอกอนุภาค

n คือ ลักษณะการปลดปล่อย




เมื่อค่า

n = 1 หมายถึงอัตราการปลดปล่อยของสาร (dC/dt) จะถูกควบคุมด้วยการ Convection ($C_S$ – $C_b$) ซึ่งหมายถึงสารที่อยู่ภายในอนุภาคจะแพร่ (diffuse) มารออยู่บริเวณผิวของอนุภาคอย่างรวดเร็ว แต่อัตราการปลดปล่อยของสารจากบริเวณผิวของอนุภาคออกสู่สิ่งแวดล้อมนั้นจะถูกควบคุมการปลดปล่อยด้วยการ Convection ซึ่งจะเห็นได้จากสมการที่ 4.6

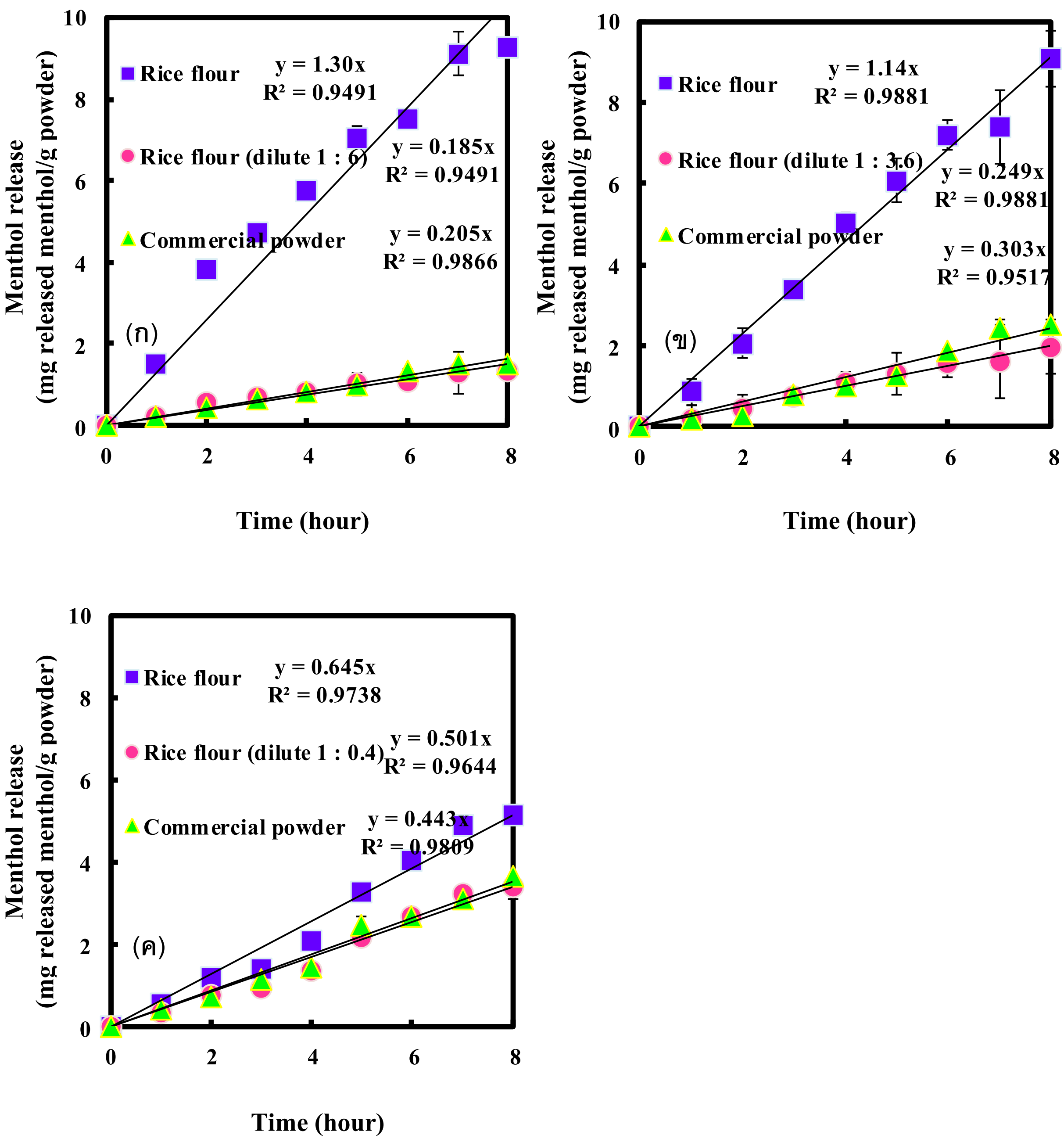
$$\frac{dC}{dt} = K_{apparent} (C_S - C_b) \qquad 4.6$$

n = 0 หมายถึงอัตราการปลดปล่อยของสาร (dC/dt) จะถูกควบคุมด้วยการระเหิด ($K_{apparent}$) ซึ่งหมายถึงสารที่อยู่ภายในอนุภาคจะแพร่ (diffuse) มารออยู่บริเวณผิวของอนุภาคอย่างรวดเร็ว แต่อัตราการปลดปล่อยของสารจากบริเวณผิวของอนุภาคออกสู่สิ่งแวดล้อมนั้นจะถูกควบคุมการปลดปล่อยด้วยการระเหิด ซึ่งจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสาร ซึ่งจะเห็นได้จากสมการที่ 4.7

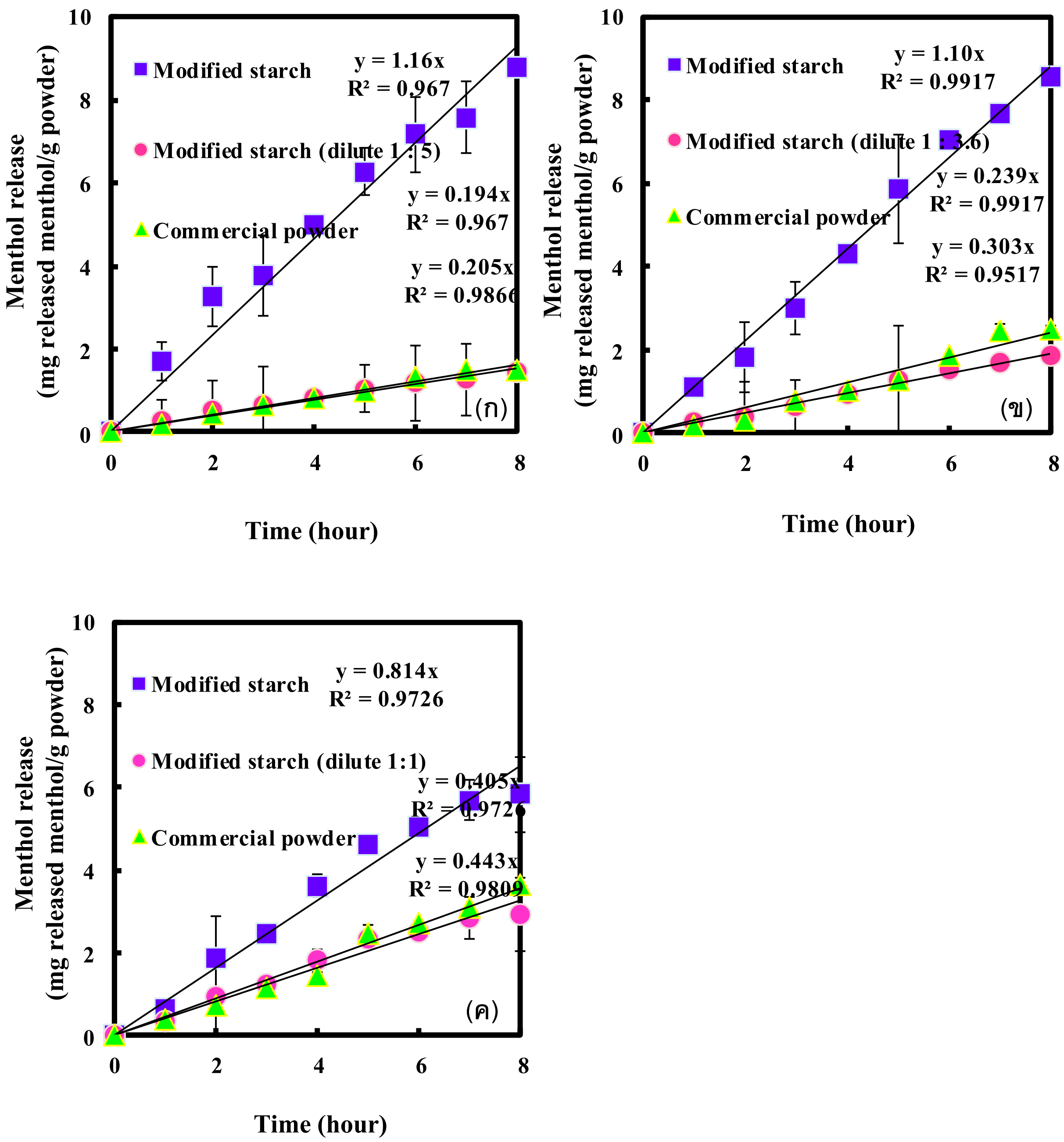
$$\frac{dC}{dt} = K_{apparent} \qquad 4.7$$

$0 < n < 1$ หมายถึงอัตราการปลดปล่อยของสาร (dC/dt) จะถูกควบคุมด้วยการแพร่ของสารจากภายในอนุภาค ($C_{in}$) ซึ่งหมายถึงสารที่อยู่ภายในอนุภาคจะค่อยๆแพร่ (diffuse) มาอยู่บริเวณผิวของอนุภาค โดยเมื่อสารมาถึงที่บริเวณผิวของอนุภาคจะถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมอย่างรวดเร็วด้วยการ Convection หรือการระเหิด

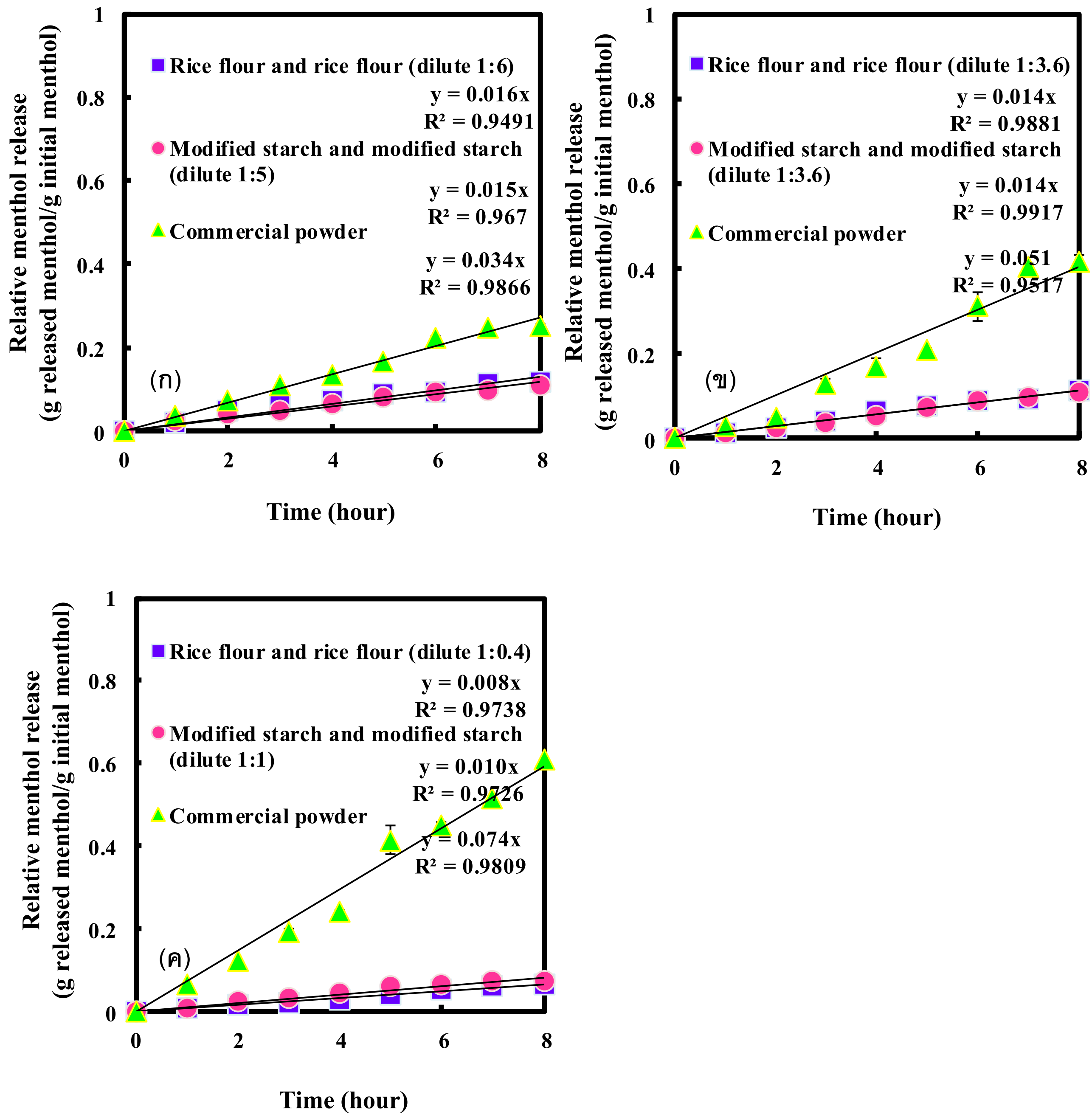
จากภาพที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่าการปลดปล่อยของเมนทอลมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกไป (dC) กับเวลา (dt) ดังนั้นลักษณะการปลดปล่อยของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บจึงเป็นแบบ zero order (n = 0) คือ การระเหิดของเมนทอลจะเป็นตัวควบคุมอัตราการปลดปล่อย โดยความชันของกราฟ คือค่าคงที่การปลดปล่อย ($K_{apparent}$) ซึ่งจะบอกถึงปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกไปด้วยการระเหิดต่อหนึ่งหน่วยเวลา ผลจากการคำนวณแสดงในภาพที่ 4.28 และ 4.29 พบว่าการจะทำให้แป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บโดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงไปผสมกับทัลคัมนั้นต้องใช้การผสมในอัตราส่วนโดยมวล 1:6, 1:3.6 และ 1:0.4 และการจะทำให้แป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บที่ใช้แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงไปผสมกับทัลคัมนั้นต้องใช้ในอัตราส่วนโดยมวล 1:5, 1:3.6 และ 1:1 ที่อุณหภูมิ 35, 37 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้จากกราฟต้องมีค่าคงที่การปลดปล่อย ($K_{apparent}$) เท่ากับหรือใกล้เคียงกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ถึงจะทำให้แป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บที่ผสมกับทัลคัม มีคุณสมบัติในการออกฤทธิ์เย็นเทียบเท่ากับแป้งที่มีขายตามท้องตลาด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าคงที่การปลดปล่อยเมื่อเทียบกับปริมาณเมนทอลเริ่มต้นในผงแห้ง ($K_{normalized}$) ดังในภาพที่ 4.30 ซึ่งค่าคงที่นี้จะเป็นตัวบอกปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกไปเมื่อเทียบกับปริมาณเมนทอลเริ่มต้นในผงแห้งต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยถ้าค่าคงที่ $K_{normalized}$ มีค่ามากจะหมายถึงอนุภาคมีประสิทธิภาพการกักเก็บเมนทอลที่ต่ำ ส่งผลให้มีระยะเวลาการออกฤทธิ์เย็นที่สั้นลง ซึ่งสามารถสรุปค่าคงที่การปลดปล่อยในตารางที่ 4.15 อย่างไรก็ตามการนำแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บมาผสมกับทัลคัมนั้นจะไม่ทำให้ค่าคงที่ของการปลดปล่อยโดยรวมเปลี่ยนแปลง ($K_{normalized}$) เนื่องจากการคำนวณสูตรการผสมทัลคัมนี้มีสมมุติฐานว่าอนุภาคเมนทอลจากแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บยังคงมีปริมาณการปลดปล่อยเท่าเดิมและเป็นระยะเวลาเท่าเดิมถึงแม้ว่าจะผสมกับทัลคัม ซึ่งจะเห็นได้จากตารางที่ ก-6 คอลัมภ์ 4 และตารางที่ ก-7 คอลัมภ์ 5 ดังนั้นแป้งผสมนี้จะมีประสิทธิภาพการออกฤทธิ์เย็นเทียบเท่ากับแป้งที่มีขายตามท้องตลาด แต่จะยังคงมีระยะเวลาการออกฤทธิ์เย็นยาวนานเท่ากับแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บที่ไม่ผสมกับทัลคัม นอกจากนี้ค่าคงที่ ($K_{normalized}$) ยังสามารถใช้นำมาคำนวณหาระยะเวลาในการออกฤทธิ์เย็นได้ เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.30 สามารถคำนวณระยะเวลาที่เมนทอลจะระเหิดหมดไปได้โดยการนำ $1/(K_{normalized})$ ดังแสดงในตารางที่ 4.16 ที่พบว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บจะทำให้มีระยะเวลาการออกฤทธิ์เย็นยาวนานมากกว่าแป้งที่มีขายตามท้องตลาด




ภาพที่ 4.28 ค่าคงที่การปลดปล่อย ($K_{apparent}$) ของการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% โดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส




ภาพที่ 4.29 ค่าคงที่การปลดปล่อย ($K_{apparent}$) ของการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% โดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส




ภาพที่ 4.30 ค่าคงที่การปลดปล่อยเมื่อเทียบกับปริมาณเมนทอลเริ่มต้น ($K_{normalized}$) ของการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% โดยใช้แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงและแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลง รวมถึงแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บเมื่อผสมกับทัลคัม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% (ก) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ข) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ค)อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.15 ค่าคงที่การปลดปล่อยที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Sample | Rate constant | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Temperature 35° C | | Temperature 37° C | | Temperature 40° C | |
| | $K_{apparent}$ * | $K_{normalized}$ ** | $K_{apparent}$ | $K_{normalized}$ | $K_{apparent}$ | $K_{normalized}$ |
| MD 0% | 0.124 | 0.009 | 0.234 | 0.017 | 0.295 | 0.021 |
| MD 10% (rice flour) | 1.300 | 0.016 | 1.143 | 0.014 | 0.645 | 0.008 |
| MD 10% (modified starch) | 1.162 | 0.015 | 1.108 | 0.014 | 0.814 | 0.010 |
| Commercial powder | 0.205 | 0.034 | 0.303 | 0.051 | 0.443 | 0.074 |

* (mg released menthol / g powder) x $hour^{-1}$

** (g released menthol / g initial menthol) x $hour^{-1}$

ตารางที่ 4.16 การคำนวณระยะเวลาการออกฤทธิ์เย็นของแป้งจากค่าคงที่การปลดปล่อยเมื่อเทียบกับปริมาณเมนทอลเริ่มต้น ($K_{normalized}$)

| **อุณหภูมิ** (° C) | **ตัวอย่าง** | **ระยะเวลาการออกฤทธิ์เย็น (ชั่วโมง)** | **สัดส่วนระยะเวลาการออกฤทธิ์เย็นเมื่อเทียบกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด** | **สัดส่วนพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดเมื่อเทียบกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด** |
|---|---|---|---|---|
| 35 | Commercial powder | 29.4 | 1.0 | 1.0 |
| | Maltodextrin 10% (rice flour) | 62.5 | 2.1 | 6.3 |
| | Maltodextrin 10% (rice flour, dilute 1:6) | 62.5 | 2.1 | 1.0 |
| | Maltodextrin 10% (modified starch) | 66.7 | 2.3 | 5.7 |
| | Maltodextrin 10% (modified starch, dilute 1:5) | 66.7 | 2.3 | 1.0 |
| 37 | Commercial powder | 19.6 | 1.0 | 1.0 |
| | Maltodextrin 10% (rice flour) | 71.4 | 3.6 | 3.8 |
| | Maltodextrin 10% (rice flour, dilute 1:3.6) | 71.4 | 3.6 | 1.0 |
| | Maltodextrin 10% (modified starch) | 71.4 | 3.6 | 3.6 |
| | Maltodextrin 10% (modified starch, dilute 1:3.6) | 71.4 | 3.6 | 1.0 |
| 40 | Commercial powder | 13.5 | 1.0 | 1.0 |
| | Maltodextrin 10% (rice flour) | 125 | 9.3 | 1.5 |
| | Maltodextrin 10% (rice flour, dilute 1:0.4) | 125 | 9.3 | 1.0 |
| | Maltodextrin 10% (modified starch) | 100 | 7.4 | 1.8 |
| | Maltodextrin 10% (modified starch, dilute 1:1) | 100 | 7.4 | 1.0 |

# บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการกักเก็บเมนทอลในแป้งข้าวเจ้าด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อนำไปผลิตเป็นแป้งเย็นทาตัวที่มีคุณสมบัติในการให้ความเย็นยาวนานยิ่งขึ้น โดยจากการศึกษาพบว่าการเพิ่มค่าการกักเก็บนั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณของแข็งในสายป้อน การเติมอิมัลซิไฟเออร์ และการเติมสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม นอกจากองค์ประกอบทางเคมีแล้ว อัตราการระเหยของน้ำในส่วนที่จะทำให้ผงแห้งก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่ง ที่จะทำให้ค่าการกักเก็บเมนทอลมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องศึกษาตัวแปรของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่จะส่งผลต่ออัตราการแห้ง เช่น อุณหภูมิอากาศขาเข้า ความเร็วในการป้อนสารเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย รวมถึงความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนอีกด้วย ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อดังนี้

### 5.1.1 การกักเก็บเมนทอลด้วยแป้งข้าวเจ้า

การนำแป้งข้าวเจ้ามากักเก็บเมนทอลนั้นสามารถทำได้ แต่จะให้ค่าการกักเก็บที่ต่ำประมาณ 1.8% เนื่องจากแป้งข้าวเจ้ามีโปรตีนซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์ประมาณ 7.52 % ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำให้เมนทอลยึดเกาะกับแป้งข้าวเจ้า ดังนั้นทางเลือกหนึ่งของการเพิ่มค่าการกักเก็บนั่นก็คือการเพิ่มปริมาณของแข็งในสายป้อน

### 5.1.2 ผลของปริมาณของแข็งในสายป้อน

เมื่อปริมาณของแข็งในสายป้อนมากขึ้น จะทำให้ค่าการกักเก็บมากขึ้นตาม เนื่องจากมีวัสดุห่อหุ้มที่เพียงพอที่ก่อตัวเป็นโครงสร้างเพื่อกักเก็บสารสำคัญ อย่างไรก็ตามการเติมของแข็งในปริมาณที่มากเกินไปนอกจากจะทำให้สารในสายป้อนหนืดแล้ว ยังทำให้สารสำคัญอย่างเมนทอลสูญเสียไปอีกด้วย ดังนั้นตลอดงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ปริมาณของแข็งในสายป้อน 40% โดยน้ำหนักในน้ำกลั่น

**5.1.3 ผลของการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์**

นอกจากการเพิ่มปริมาณของแข็งในสายป้อนแล้ว อีกวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยเพิ่มค่าการกักเก็บนั่นก็คือ การเติมสารจำพวกอิมัลซิไฟเออร์ เนื่องจากอิมัลซิไฟเออร์จะช่วยทำให้เมนทอลยึดเกาะกับแป้งข้าวเจ้าได้ดีขึ้น อีกทั้งยังทำให้เม็ดแป้งข้าวเจ้าเชื่อมต่อกันแน่นมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นผลดีในด้านการกักเก็บ

**5.1.4 ผลของชนิดของสารสารอิมัลซิไฟเออร์**

งานวิจัยนี้ได้พบว่าเคซีนเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีกว่ากัมอะราบิก เนื่องจากให้ค่าการกักเก็บเมนทอลได้มากกว่า

**5.1.5 ผลของปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน**

นอกจากการเติมอิมัลซิไฟเออร์แล้ว การเติมสารที่ช่วยให้เกิดชั้นฟิล์มก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะเพิ่มค่าการกักเก็บและลดปริมาณน้ำในอนุภาค จากการศึกษาปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่ได้เติมลงไป พบว่าการเติมมอลโตเด็กซ์ตรินที่ 10% จะให้ค่าการกักเก็บมากที่สุด เนื่องจากการเติมมอลโตเด็กซ์ตรินในปริมาณมากจะทำให้เวลาใช้งานเกิดความเหนอะขึ้น เนื่องจากมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสารที่ละลายน้ำ อีกทั้งยังทำให้สายป้อนมีความหนืดมากยิ่งขึ้น ซึ่งยากต่อการอบแห้งแบบพ่นฝอยอีกด้วย

**5.1.6 ผลของค่าสมมูลเด็กซ์โตรสของมอลโตเด็กซ์ตริน**

นอกจากปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่เติมลงไปแล้วค่าสมมูลเด็กซ์โตรสก็ย่อมส่งผลต่อค่าการกักเก็บด้วย โดยจะพบว่าค่าสมมูลเด็กซ์โตรสเท่ากับ11 จะให้ค่าการกักเก็บมากที่สุดและถ้ามอลโตเด็กซ์ตรินมีค่าสมมูลเด็กซ์โตรสที่สูงเกินไป เมื่อสัมผัสกับอากาศร้อน โครงสร้างของมอลโตเด็กซ์ตรินจะถูกทำลายไป ทำให้มีผลต่อคุณภาพของฟิล์ม ส่งผลให้การกักเก็บเมนทอลได้ไม่ดี

**5.1.7 ผลของชนิดของสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม** (film forming agent)

การเติมสารช่วยเกิดชั้นฟิล์มจะทำให้ค่าการกักเก็บมากขึ้น เนื่องจากจะเกิดฟิล์มไปเคลือบบนเม็ดแป้งข้าวเจ้า ซึ่งฟิล์มนี้มีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน จึงให้เฉพาะน้ำผ่านออกไปได้ ดังนั้นจึงสามารถกักเก็บเมนทอลได้ดี ดังในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้มอลโตเด็กซ์ตรินแทนแคปซูล เนื่องจากให้ค่าการกักเก็บเมนทอลมากกว่า

**5.1.8 ผลของปริมาณสารอิมัลซิไฟเออร์**

จากการศึกษาปริมาณเคซีนที่เติมลงไปนั้น พบว่าการเติมเคซีนที่ 5 % จะให้ค่าการกักเก็บมากที่สุด เนื่องจากปริมาณเมนทอลที่มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นการใช้เคซีนที่มากเกินไปจะไม่ทำให้เมนทอลยึดเกาะกับแป้งข้าวเจ้าได้มากกว่านี้

**5.1.9 ผลของการเติมเจลาติน**

เจลาติน ซึ่งเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งอาจช่วยเพิ่มค่าการกักเก็บได้ เนื่องจากเจลาตินเป็นทั้งอิมัลซิไฟเออร์และสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม แต่อย่างไรก็ตามการเติมเจลาตินในเมนทอลอิมัลชันนั้นกลับทำให้สายป้อนมีความหนืดมากขึ้น ดังนั้นในกรณีนี้การเติมเจลาตินไม่ช่วยทำให้การกักเก็บมากยิ่งขึ้น

**5.1.10 ผลของปริมาณเมนทอล**

จากการทดลองพบว่าการเติมเมนทอลที่ 10 % จะให้ค่าการกักเก็บมากที่สุด เนื่องจากการเติมเมนทอลที่มากเกินไป จะทำให้เมนทอลสูญเสียไปมากระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอย และยังเป็นการเพิ่มต้นทุนอีกด้วย

**5.1.11 ผลของตัวแปรในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย**

อัตราการระเหยแห้งก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อค่าการกักเก็บ โดยตัวแปรของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีผลต่ออัตราการระเหยแห้งนั้น มีดังนี้

**1) อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า**

อุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ต่ำนั้น จะทำให้ค่าการกักเก็บมากขึ้น เนื่องจากเมนทอลจะสูญเสียได้น้อย นอกจากนี้การใช้อุณหภูมิขาเข้าที่สูงยังทำให้ปริมาณน้ำในอนุภาคน้อยอีกด้วย

**2) อิทธิพลของความเร็วในการป้อนสาร**

ความเร็วในสายป้อนที่ต่ำจะทำให้สายป้อนสัมผัสกับอากาศร้อนที่มีปริมาณจำกัดได้เพียงพอ จึงทำให้เกิดเป็นโครงสร้างวัสดุห่อหุ้มที่เร็ว จึงช่วยป้องกันเมนทอลจากอากาศร้อนได้เป็นผลให้ค่าการกักเก็บสูง

**3) อิทธิพลของความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน**

เมื่อความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุนเพิ่มขึ้น จะทำให้ละอองฝอยมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมาก เมื่อสัมผัสกับอากาศร้อนจึงเปลี่ยนเป็นเปลือกที่ห่อหุ้มเมนทอลได้เร็ว ทำให้สามารถกักเก็บเมนทอลได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าการกักเก็บด้วยองค์ประกอบทางเคมี ไม่ว่าจะเป็นการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ การเติมสารช่วยเกิดชั้นฟิล์มจะช่วยเพิ่มค่าการกักเก็บของเมนทอลได้มากกว่าเมื่อเทียบกับตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

### 5.1.12 การเปรียบเทียบระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บกับแป้งที่มีขายตามท้องตลาด

แป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บนั้นมีค่าการกักเก็บเมนทอลมากกว่าแป้งที่มีขายตามท้องตลาด ซึ่งจะเป็นผลดีในด้านการปลดปล่อย รวมถึงความคุ้มค่าในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากเมนทอลสูญเสียไปเพียง 30% นอกจากนี้แป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บยังมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า ทำให้เนื้อแป้งละเอียดยิ่งขึ้น

### 5.1.13 ผลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อการปลดปล่อยของผงแห้ง

อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงส่งผลให้เมนทอลระเหิดออกไปมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าพิจาณาในด้านการปลดปล่อย พบว่าแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บจะค่อยๆปลดปล่อยเมนทอลออกมาเมื่อเทียบกับแป้งที่มีขายตามท้องตลาด นอกจากนี้แป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บยังมีการดูดพลังงานเพื่อให้เมนทอลใช้ในการระเหิดมากกว่าแป้งเย็นที่ขายตามท้องตลาด นั่นหมายถึงประสิทธิภาพการออกฤทธิ์เย็นที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามการที่แป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บในกรณีของมอลโตเด็กซ์ตริน 0 % มีการดูดพลังงานที่น้อยกว่า เป็นผลมาจากปริมาณเมนทอลส่วนมากถูกกักเก็บภายใน ทำให้สัมผัสกับสภาวะภายนอกได้น้อยลง จึงมีการปลดปล่อยที่น้อยกว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด

### 5.1.14 การกักเก็บเมนทอลด้วยแป้งที่ผ่านการดัดแปลง

เนื่องจากการนำแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงมาใช้งานนั้น จะทำให้เกิดความเหนอะขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากโปรตีนที่มีอยู่ในแป้งข้าวเจ้า ดังนั้นการใช้แป้งที่ผ่านการสกัดเอาโปรตีนออกแล้วมาผลิตเป็นแป้งเย็น จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะทำให้ผู้ใช้รู้สึกเหนอะน้อยลงเวลาใช้งาน นอกจากนี้การใช้แป้งที่ผ่านการดัดแปลงมากักเก็บนั้น ทำให้มีปริมาณเมนทอลคงเหลืออยู่ในผงแห้งและมีการดูดพลังงานเพื่อใช้ในการระเหิดมากกว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาดอีกด้วย จึง

ทำให้มีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยและระยะเวลาการออกฤทธิ์เย็นมากกว่าและยาวนานกว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด

### 5.1.15 การนำแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บไปผสมกับทัลคัม

การนำแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บไปผสมกับทัลคัมนั้นเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะลดต้นทุนการผลิต แต่ยังคงทำให้แป้งเย็นมีประสิทธิภาพการให้ความเย็นเทียบเท่ากับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด และคงมีระยะเวลาในในการออกฤทธิ์เย็นยาวนานมากกว่าแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด โดยสามารถสรุปเป็นตารางดังนี้

ตารางที่ 5.1 สูตรจากการคำนวณการผสมระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บกับทัลคัมตามอัตราส่วนโดยมวล

| Temperature (°C) | Maltodextrin 10% (rice flour) | Maltodextrin 10% (modified starch) | Talcum |
|---|---|---|---|
| 35 | 1 | - | 6 |
| | - | 1 | 5 |
| 37 | 1 | - | 3.6 |
| | - | 1 | 3.6 |
| 40 | 1 | - | 0.4 |
| | - | 1 | 1 |

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปใช้

-ควรมีการควบคุมอุณหภูมิในการเก็บรักษาแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอลโตเด็กซ์ตริน จะส่งผลให้แป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บมีการปลดปล่อยเมนทอลออกมาได้ลดลง

-ควรมีการเติมสารป้องกันการจับตัวเป็นก้อน ในกรณีของแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บด้วยมอลโตเด็กซ์ตริน 10% ที่ใช้แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลงมากักเก็บเมนทอล

### 5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

-ควรมีการศึกษาผลของการกักเก็บเมนทอลโดยใช้แต่แป้งข้าวเจ้าเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย จากนั้นนำอนุภาคไปแช่ในเมนทอล เพื่อให้แป้งข้าวเจ้าดูดซับเมนทอลเข้าไปในช่องระหว่างเม็ดแป้งข้าวเจ้าและทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกักเก็บกับการที่ผสมเมนทอลเป็นอิมัลชันในสายป้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

-ควรมีการศึกษาการทำอิมัลชันด้วย Micro-channels แทนการใช้โฮโมจีไนเซอร์ เนื่องจากไม่มีความร้อนเกิดขึ้น เมนทอลจึงน่าจะสูญเสียไปนั้นขั้นตอนนี้น้อยลง

-ควรมีการใช้แป้งข้าวเจ้าจากแหล่งอื่นๆ มาทดลองใช้ในการกักเก็บเมนทอลเพิ่มเติม

-ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปริมาณน้ำในอนุภาค ซึ่งอาจส่งผลต่อการปลดปล่อยของเมนทอล

# รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ชนิตา ศิริรัตน์. การผลิตน้ำผึ้งผงจากน้ำผึ้งดอกทานตะวันโดยการอบแห้งแบบสุญญากาศและแบบแช่เยือกแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2552

บุญธิดา แสนบรรดิษฐ์. ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลของเมนทอลในบุหรี่รสเมนทอล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2551

วราทัศน์ วงศ์สุรไกร. Productivity World. 13, 2551

สุเทพ สิงห์ไข่มุกข์.การกักเก็บน้ำมันตะไคร้หอมในแป้งที่เกาะยึดกันโดยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553

วีระพงศ์ วิรุฬห์ธนกฤษณ์ และ กิตติพงษ์ ห่วงรักษ์. ผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าและปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินต่อการทำแห้งควันเทียนผงแบบพ่นฝอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553

ไสยวิชญ์ วรวินิต. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: http://www.mahidol.ac.th/th/reward/13.htm

ไสยวิชญ์ วรวินิต. [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา: http://www.thaitechnoaward.com/award.php

หนังสือพิมพ์ฐานเศรษฐกิจ. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: http://www .thanonline.com /index. php?option=com_content &view= arti cle &id= 110385:2012-03-02-02-53-10& catid= 107:2009-02-08-11-34-25&Itemid=456

อรุษา เชาวนลิขิต. รายงานการวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. สีธรรมชาติจากเปลือกมังคุด, 2553

เอกลักษณ์ ทวีโรจนกุล. Technology Promotion Mag. 36, 2552

ภาษาอังกฤษ

Bautista D., Jordt S., Nikai T., Tsuruda P., Read A., Poblete J., Yamoah E., Basbaum A. and Julius D. TRPA1 mediates the inflammatory actions of environmental Irritants and proalgesic agents. Cell 124(2006) : 1269–1282

Burgain J., Gaiani C., Linder M. and Scher J. Encapsulation of probiotic living cells: From laboratory scale to industrial applications. Journal of Food Engineering 104(2011) : 467-483

CAI Y. and CORKE H. Production and Properties of Spray-dried *Amaranthus* Betacyanin Pigments. JOURNAL OF FOOD SCIENCE 6(2000)

Chegini G. and Ghobadian B. Effect of spray-drying conditions on physical properties of orange juice powder. Drying Technology 23(2005) : 657-668.

Chegini G.and Ghobadian B. Spray Dryer Parameters for Fruit Juice Drying. World Journal of Agricultural Sciences 3(2007) : 230-236

Chickos J., Garin D., Hitt M. and Schilling G. Tetrahedron [Online], 1981.Source http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C89781&Mask=4#ref-5

CMM R., M.L Beirao-da-Costa and M. Moldao-Martins.*Origanumvirens* L. Flavor Encapsulation in A Spray Dried Starch Matrix.2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering and 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering (2005)

Dorglamud S. and Suwanaporn P. Textural Improvement of Rice flour Gel by Protease. ICAAI2010 Conference (2010)

Erdinc B. Micro/Nanoencapsulation of proteins within alginate/chitosan matrix by spray drying.Thesis submitted to the Department of Chemical Engineering, Queen's University (2007)

Goula A. and Adamopoulos K. Spray drying of tomato pulp in dehumi- dified air:II. The effect on powder properties.Journal of Food Engineering 66(2005) : 35–42

Kadam M., Syed H. and Kale R. Study on Extraction of Ginger Oil and its Microencapsulation. EJEAFChe (2011) : 1579-4377

Knipschildt M. Recent Developments in Spray Drying of Milk. APV, Denmark (1986)

Landers P. and Hamaker B. Antigenic Properties of Albumin, Globulin, and Protein Concentrate Fractions from Rice Bran. J. Cereal Chem 71(1994) : 409-411

Linjing Z. et al. Encapsulation of Menthol in Beeswax by a Supercritical Fluid Technique. International Journal of Chemical Engineering (2010)

Macpherson L., Hwang S., Miyamoto T.,Dubin A. and Patapoutian A. More than cool: promiscuous relationships of menthol and other sensory compounds. Mol. Cell. Neurosci 32(2006) : 335–343

Madene A., Jacquot M., Scher J., and Desobry S. Flavour encapsulation and controlled release – a review. International Journal of Food Science and Technology 41(2006) : 1–21.

Magningat C.C and Seib P.A. Starch : Occurrence, isolation, and properties of starch granules. In AACC Short Course,Starch : Structure,properties and food use (1992) : 3-4

Minemoto Y., Hakamata K., Adachi S., Matsuno R., Oxidation of linoleic acid encapsu lated with gum arabic or maltodextrin by spray-drying. Journal of Microencapsulation 19(2002) : 181-189

Mohd D. Production of dragon fruit using spray drying menthod. Thesis submitted to Faculty of Chemical Engineering and Natural Resources, Universiti Malaysia Pahang (2009)

Moktong P., Pradipasena P., Tantratian S. and Suknaisilp S. Effect of emulsifiers on stability and anti-bacterial efficiency of clove oil in water emulsion. Kasetsart University Conference 48(2010)

Mortaza A., Hossien M., Ashkan M. and Shahin R. Influence of Wall Material and Inlet Drying Air Temperature on the Microencapsulation of Fish Oil by Spray Drying.Food Bioprocess Technol (2012)

Mortenson M. and Reineccius G. Encapsulation and release of menthol. Part 1: the influence of OSAn modification of carriers on the encapsulation of L-menthol by spray drying. Flavour and Fragrance Journal 23(2008) : 392–397

Onwulata C. Encapsulated and Powdered Foods (2005)

Partanen R., Yoshii H., Kallio H., Yang B. and Forssell P. Encapsulation of Sea Buckthorn Kernel Oil in Modified Starches. Journal of the American Oil Chemists' Society 79(2002)

Petiraksakul P., Jenjaithong K. and Petiraksakul A. Influence of spray drying conditions on the physical properties of rice-milk powders.37th Congress on Science and Technology of Thailand (2011)

Phoungchandang S. and Sertwasana A. Spray-drying of ginger juice and physicchemical properties of ginger powders. Science Asia 36 (2010) : 40–45

Re M., Messias L. and Schettini H.. The influence of the liquid properties and the atomizing conditions on the physical characteristics of the spray-dried ferrous sulfate micro- particles. Proceedings of the 14th International Drying Symposium (2004) : 1174-1181

Renata T., Carlos G., and Hubinger M. Influence of emulsion composition and inlet air temperature on the microencapsulation of flaxseed oil by spray drying. Food Research International (2010)

Richard R.M. Tailoring starchs for the baking industry.The Baker Digest 64(1968) :48-53

Risch S. and Reineccius G. Spray-dried orange oil – effect of emulsion size on flavor retention and shelf stability. ACS Symposium Series 370(1988) : 67–77.

Rodríguez G., González R., Grajales A., Ruiz M. and Abud M. Spray-Drying of Cactus Pear Juice (*Opuntia streptacantha*): Effect on the Physicochemical Properties of Powder and Reconstituted Product. Drying Technology: An International Journal 23(2005) : 955-973

Seid M., Elham A., Yinghe H. and Bhesh B. Encapsulation Efficiency of Food Flavours and Oils during Spray Drying. Drying Technology 26(2008) : 816-835

Silva M., Sobral P. and Kieckbusch T. State diagrams of freeze-dried camu–camu (Myrciaria dubia (HBK) Mc Vaugh) pulp with and without maltodextrin addition. Journal of Food Engineering 77(2006) : 426–432.

Soottitantawat A., Takayama K., Okamura K., Muranaka D., Hidefumi Y., Furuta T., Ohkawara M. and Pekka L. Microencapsulation of l-menthol by spray drying and its release characteristics. Innovative Food Science and Emerging Technologies 6(2005) : 163–170

Soottitantawat A., Yoshii H., Furuta T., Ohkawara M. and Linko P. Microencap- sulation by Spray Drying: Influence of Emulsion Size on the Retention of Volatile Compounds (2003)

Swinkels J.J.M. Source of starch, its chemistry and physics. Starch conversion technology. New York (1985)

Tantratian S., Jirakitticharoen P., Tumviriyanont R. and Thammasare S. Production of Chicken Flavor Powder from Chicken Cooking Drip by Spray Drying. Section T 3(2005) : 203-210

Tejashree A., Uday S., Rekha S., and Pushpa R.. Starch-based spherical aggregates: Screening of small granule sized starches for entrapment of a model flavouring compound, vanillin. Carbohydrate Polymers 53(2003) : 45-51

Tonon V., Brabet C. and Hubinger, M. Influence of process conditions on the physicochemical properties of acai powder produced by spray drying. Journal of Food Engineering 88(2008) : 411-418.

Vanzo A., Garcia L., and Hubingera M. Coffee oil microencapsulation using spray dryer. The 11th International Congress on Engineering and Food (2011)

Voets T, Droogmans G, Wissenbach U, Janssens A, Flockerzi V and Nilius B. The principle of temperature-dependent gating in cold- and heat sensitive TRP channels. Nature 430(2004) : 748–754

Weiss J. Emulsion Processing (Homogenization) Emulsion Workshop (2008)

Xiang-Dong L., Takeshi F., Hidefumi Y., Pekka L. and W. J. Cyclodextrin Encapsulation to prevent the Loss of l-Menthol and its Retention during Drying. Biosci.Biotechnol.Biochem 64(2000) : 1608-1613

# ภาคผนวก

# ภาคผนวก ก

## 1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานของเมนทอล

นำเมนทอลบริสุทธิ์มาผสมกับสารละลายเฮกเซนที่มีไซโคลเฮกซาโนนผสมอยู่ ปริมาณ 4 มิลลิลิตร (ไซโคลเฮกซาโนน 1 ไมโครลิตรต่อเฮกเซน 1 มิลลิลิตร) ทำให้ได้สารละลายมาตรฐานของเมนทอลที่มีความเข้มข้นในหน่วย mg menthol/ g hexane+cyclohexanone จากนั้นนำสารดังกล่าวไปหาพื้นที่ของเมนทอลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีซึ่งทำให้ได้ข้อมูลดังนี้

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลของการเตรียมสารละลายมาตรฐาน

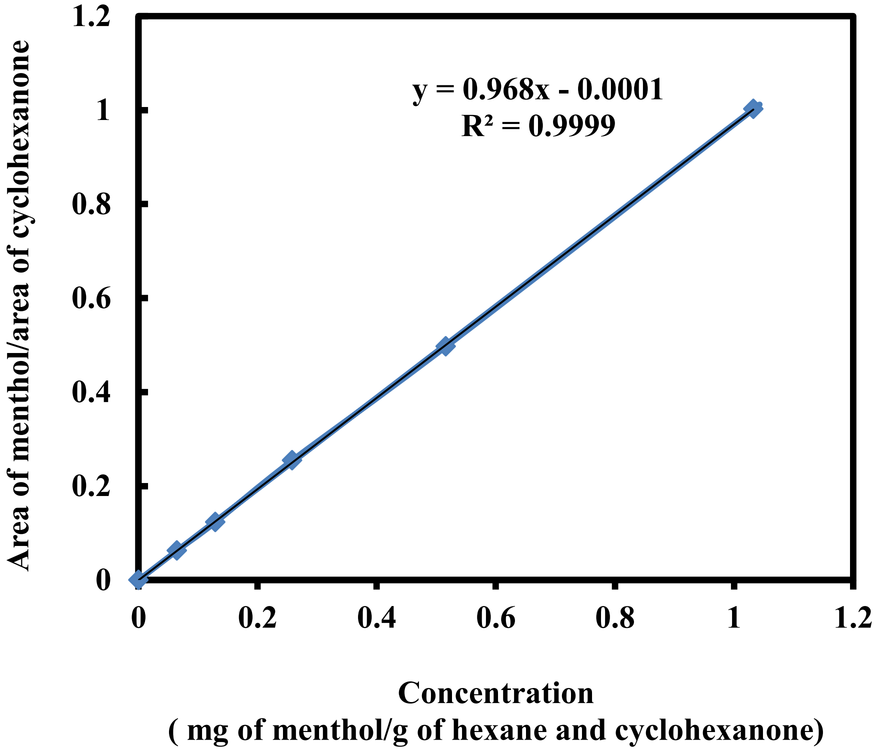
| (1) | (2) | (3) | (4) |
|---|---|---|---|
| Concentration (mg menthol/g hexane and cyclohexanone) | Menthol area ( x$10^5$) | Cyclohexanone area ( x$10^5$) | |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.03 | 2.67 | 2.67 | 1.00 |
| 0.52 | 1.33 | 2.68 | 0.50 |
| 0.26 | 0.69 | 2.71 | 0.25 |
| 0.13 | 0.33 | 2.67 | 0.12 |
| 0.06 | 0.16 | 2.62 | 0.06 |

(1) ได้จากการเตรียมสาร

(2) และ (3) ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

(4) ได้จาก (2) / (3)

นำข้อมูลจากตารางที่ ก-1 ในคอลัมภ์ที่ 1 และ 4 ไปเขียนกราฟ ทำให้ได้กราฟสารละลายมาตรฐานเมนทอล ดังภาพที่ ก-1




ภาพที่ ก-1 กราฟสารละลายมาตรฐานเมนทอล

2. **ตัวอย่างการคำนวณร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้ง**

เตรียมสารละลายที่ประกอบด้วยเมนทอล 30.05 กรัม น้ำกลั่น 180.44 กรัมและแป้งข้าวเจ้า 120.09 กรัม จากนั้นนำสารอิมัลชันดังกล่าวเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อจะผลิตเป็นผงแห้ง หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ผงแห้งที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยประมาณ 0.10 กรัม ไปผสมกับสารละลายเฮกเซนที่มีไซโคลเฮกซาโนนผสมอยู่เป็นปริมาณ 4 มิลลิลิตร (ไซโคลเฮกซาโนน 1 ไมโครลิตรต่อเฮกเซน 1 มิลลิลิตร) จากนั้นทำการสกัดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และนำสารละลายใสที่ได้ไปหาพื้นที่ของเมนทอลด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี ทำให้ได้ข้อมูลดังนี้

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลสำหรับการคำนวณร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือของสาร control ที่มีอัตราส่วนโดยมวลของเมนทอลต่อแป้งข้าวเจ้า 1:1 และมีอุณหภูมิอากาศขาเข้า 180°C

| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Menthol area ($x10^4$) | Cyclohexanone area ($x10^5$) | | Weight of menthol (mg) per 1 g of hexane solution | Weight of menthol (mg) per 4 g of hexane solution | Retained menthol in powder (mg menthol/g powder) | Retention (%) |
| 3.17 | 2.26 | 0.14 | 0.15 | 0.38 | 3.8 | 1.8 |

(1), (2) ได้จากเครื่องแก๊สโคมาโทกราฟี

(3) ได้จาก (1) / (2)

(4) คือ ปริมาณเมนทอลทั้งหมดในสารละลายเฮกเซนที่มีไซโคลเฮกซาโนนผสมอยู่ 1 กรัม ได้จากการนำ (3) ไปหาความเข้มข้นของเมนทอล (mg menthol/g hexane and cyclohexanone) จากกราฟสารละลายเมนทอลมาตรฐาน (ภาพ ก-1)

(5) คือ ปริมาณเมนทอลทั้งหมด (มิลลิกรัม) ในสารละลายเฮกเซนที่มีไซโคลเฮกซาโนนผสมอยู่ได้จาก (4) x 2.16 เนื่องจากสารละลายเฮกเซนที่มีไซโคลเฮกซาโนนผสมอยู่ 4 มิลลิลิตร หนัก 2.16 กรัม

(6) คือ ปริมาณเมนทอล (กรัม) ต่อปริมาณผงแห้งที่นำมาสกัด ซึ่งได้จาก (5) / 0.10

(7) คือ ร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือซึ่งหาได้จาก [((6) $x10^{-3}$) / (30.05/30.05+120.09)] x 100

**3. ตัวอย่างการคำนวณขนาดของอนุภาคโดยใช้** sieve

ชั่งผงแห้งประมาณ 2 กรัม จากนั้นนำสารมาเข้าเครื่อง sieve ที่มี aperture size 150, 106, 75, 53, 32 and 20 ไมโครเมตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักสารในแต่ละชั้นบน sieve ซึ่งจะได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ ก-3

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลสำหรับการคำนวณขนาดของอนุภาคของมอลโตเด็กซ์ตริน 10%

| (1) | (2) | (3) | (4) |
|---|---|---|---|
| Aperture size (μm) | Weight on sieve (g) | % Weight on seive | Accumulative |
| 150 | 0.35 | 14.46 | 100 |
| 106 | 0.40 | 16.53 | 85.54 |
| 75 | 0.50 | 20.66 | 69.00 |
| 53 | 0.74 | 30.58 | 48.35 |
| 32 | 0.35 | 14.46 | 17.77 |
| 20 | 0.08 | 3.31 | 3.32 |
| Total | 2.42 | | |

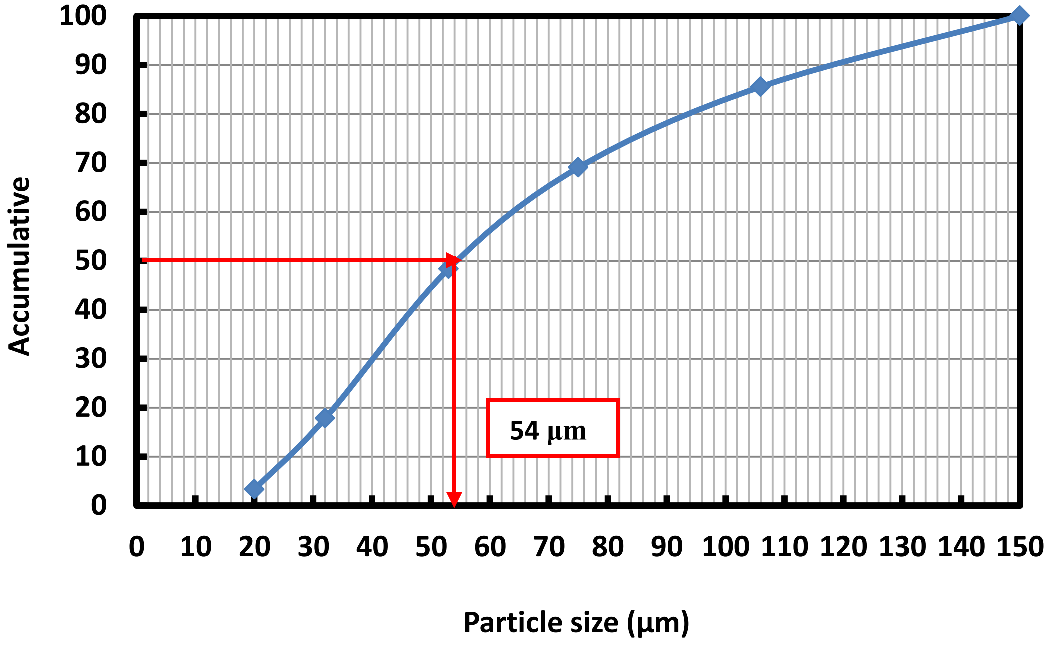
(1) คือ ขนาดของ seive

(2) คือ น้ำหนักของสารในแต่ละชั้นของ sieve เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง

(3) คือ ร้อยละของน้ำหนักของสารในแต่ละชั้นของ sieve คำนวณได้จาก (2) / 2.42

(4) คือ ร้อยละของน้ำหนักสะสมของสารในแต่ละชั้นของ sieve

นำข้อมูลจากคอลัมภ์ที่ 1 และคอลัมภ์ที่ 4 ไปเขียนกราฟน้ำหนักสะสมของอนุภาคในแต่ละชั้นของ sieve ดังภาพที่ ก-2 โดยขนาดของอนุภาคนั้นได้จากการลากเส้นที่จุด 50% ของร้อยละของน้ำหนักสะสมของสารในแต่ละชั้นของ sieve




ภาพที่ ก-2 การหาขนาดของอนุภาคจาก sieve

**4. ตัวอย่างการคำนวณปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้ง**

การวัดปริมาณเมนทอลโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีนั้นจะทำให้ทราบปริมาณเมนทอลที่เหลืออยู่ในผงแห้งที่เวลาต่างๆ และสามารถคำนวณหาปริมาณเมนทอลที่ปล่อยออกไปจากผงแห้งได้ โดยนำปริมาณเมนทอลเริ่มต้นที่มีอยู่ในผงแห้งไปลบด้วยปริมาณเมนทอลที่เหลืออยู่ในผงแห้งที่เวลาต่างๆ จากนั้นสามารถนำปริมาณเมนทอลที่ปล่อยออกมาจากผงแห้งมาคำนวณหาปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิด โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ ก-4 ซึ่งพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิด คือ 79 กิโลจูลต่อโมล หรือ 506 จูลต่อกรัมเมนทอล เนื่องจากเมนทอลมีน้ำหนักโมเลกุล 156 ซึ่งแสดงข้อมูลในตารางที่ ก-5

ตารางที่ ก-4 พลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดและหลอมเหลว (Chickos et al. 1981)

| Enthalpy of sublimation (kJ / mol) | Temperature (K) |
|---|---|
| 79 ± 4 | 279 - 299 |
| Enthalpy of fusion (kJ / mol) | Temperature (K) |
| 11.88 | 316.2 |

ตารางที่ ก-5 การคำนวณหาพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดของมอลโตเด็กซ์ตริน 10% (T=40°C, RH =80%)

| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|---|---|---|---|---|---|
| Time (hour) | Retained menthol in powder (mg retained menthol / g powder) | Retention (g retained menthol / g initial menthol in feed solution) | Menthol release (mg released menthol / g powder) | Energy release (J / g powder) | Relative menthol release (mg released menthol/ g initial menthol in powder) x $10^{-2}$ |
| 0 | 80.25 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 79.70 | 0.99 | 0.54 | 0.28 | 0.68 |
| 2 | 79.09 | 0.99 | 1.18 | 0.60 | 1.47 |
| 3 | 78.84 | 0.98 | 1.40 | 0.71 | 1.75 |
| 4 | 78.19 | 0.97 | 2.06 | 1.04 | 2.57 |
| 5 | 76.97 | 0.96 | 3.27 | 1.66 | 4.08 |
| 6 | 76.21 | 0.95 | 4.04 | 2.04 | 5.03 |
| 7 | 75.34 | 0.94 | 4.91 | 2.48 | 6.12 |
| 8 | 75.10 | 0.94 | 5.15 | 2.60 | 6.42 |

(1) คือ Release time

(2) คือ ปริมาณเมนทอลคงเหลือในผงแห้ง ซึ่งหาได้จากเครื่องแก๊สโคมาโทกราฟี

(3) คือ ร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้ง ซึ่งหาได้ได้จาก (2) /ปริมาณเมนทอลเริ่มต้นที่มีอยู่ในผงแห้ง ซึ่งในที่นี้คือ 80.25

(4) คือ ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้ง ซึ่งหาได้จากปริมาณเมนทอลเริ่มต้นที่มีอยู่ในผงแห้ง-ปริมาณเมนทอลที่เหลืออยู่ในผงแห้ง

(5) คือ ปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้ง ซึ่งหาได้จาก [(4) x 506 ] / 1000

(6) คือ ร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้ง ซึ่งหาได้จาก (4) / 80.2

## 5. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าคงที่การปลดปล่อย

จากกราฟปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยจากผงแห้ง ทำให้ทราบว่าอัตราการปลดปล่อยของเมนทอลเป็นแบบ zero order (n=0) คือ การปลดปล่อยถูกควบคุมด้วยการระเหิด

$$\frac{dC}{dt} = K(C_s - C_b)^n$$

$$\frac{dC}{dt} = K_{apparent}$$

$$\frac{d\,(C/C_0)}{dt} = K_{normalized}$$

เมื่อ

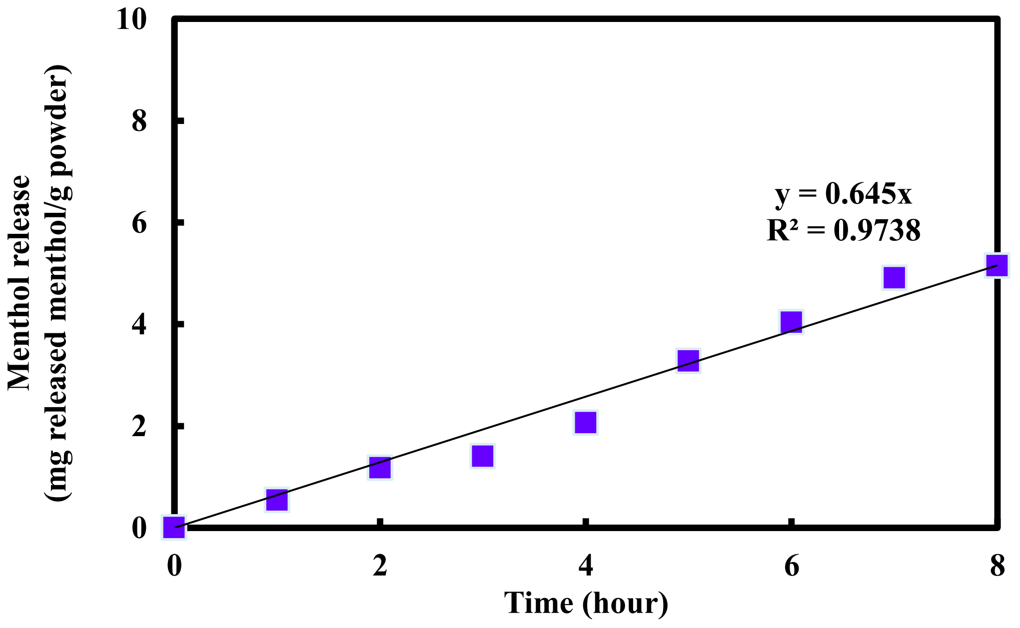
$C_s$ คือ อัตราการปลดปล่อยของสารบริเวณผิวอนุภาค

$C_b$ คือ อัตราการปลดปล่อยของสารบริเวณภายนอกอนุภาค

K คือ ค่าคงที่การปลดปล่อย

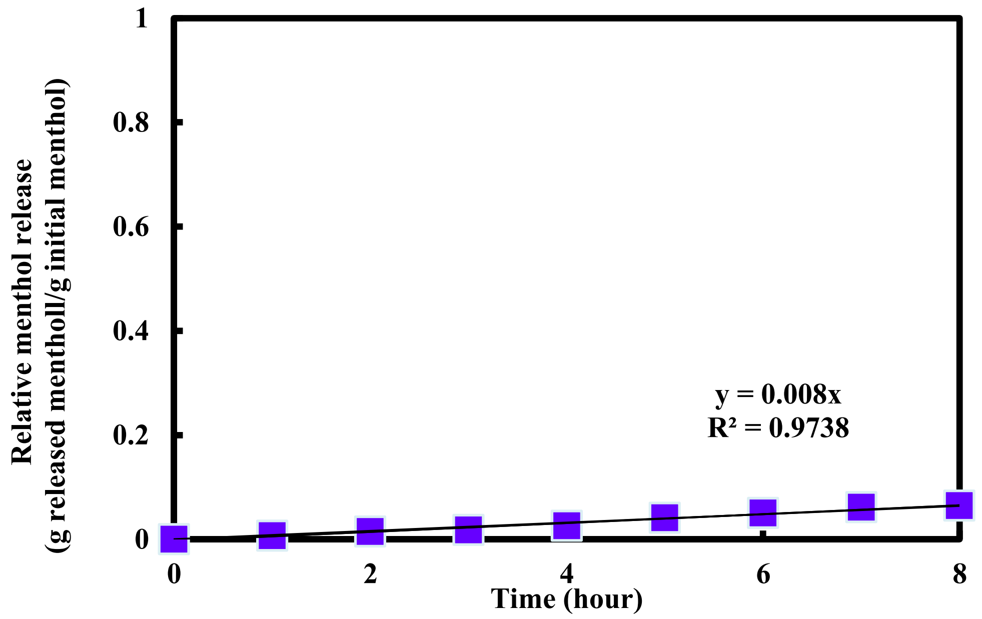
dC/dt คือ ปริมาณสารที่ปลดปล่อยออกไปจากผงแห้งต่อหน่วยเวลา

ดังนั้นเมื่อเขียนกราฟระหว่างปริมาณเมนทอลที่ปล่อยออกจากผงแห้ง (dC) กับเวลา (dt) จะทำให้สามารถคำนวณหาค่าคงที่การปลดปล่อย ($K_{apparent}$) ได้ นั่นคือความชันของกราฟ โดยใช้ข้อมูลจากตาราง ก-5 ในคอลัมภ์ที่ (4) และ (1) โดยแสดงผลในภาพที่ ก-3 พบว่าค่าคงที่การปลดปล่อยของมอลโตเด็กซ์ตริน 10% (T=40°C, RH =80%) มีค่าเท่ากับ 0.645 (mg released menthol/g powder) x $hour^{-1}$




ภาพที่ ก-3 การหาค่าคงที่การปลดปล่อย ($K_{apparent}$)

เมื่อพิจารณาค่าคงที่การปลดปล่อย ($K_{apparent}$) นั้นจะหมายถึงปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกมาจากผงแห้งในช่วงเวลาต่างๆ ดังนั้นการจะทราบว่าปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกมานั้นเป็นปริมาณเท่าไรเมื่อเทียบกับปริมาณเมนทอลเริ่มต้นในผงแห้ง สามารถทำได้โดยการเขียนกราฟระหว่างร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปล่อยออกจากผงแห้ง ($dC/C_0$) จากตารางที่ ก-5 คอลัมภ์ที่ 6 และเวลา (dt) จากตารางที่ ก-5 คอลัมภ์ที่ 1 ซึ่งทำให้ได้ว่าค่าความชันของกราฟ คือ ($K_{normalized}$) ซึ่งแสดงในภาพที่ ก-4




ภาพที่ ก-4 การหาค่าคงที่การปลดปล่อย ($K_{normalized}$)

6. **ตัวอย่างการคำนวณหาสูตรการผสมระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บกับทัลคัม**

จากกราฟภาพที่ ก-3 ถ้าสามารถทำให้ความชันของแป้งเย็นที่ได้จากการผสมระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บกับทัลคัมมีค่าเท่ากับความชันของแป้งที่มีขายตามท้องตลาด นั่นหมายถึงแป้งเย็นจากการผสมด้วยทัลคัมนั้นจะมีคุณสมบัติเหมือนกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ไม่ว่าจะเป็นปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกมาทุกช่วงเวลา หรือการออกฤทธิ์เย็น รวมถึงประสิทธิภาพระยะเวลาการทำให้เย็นอีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ ก-6

ตารางที่ ก-6 การคำนวณหาปริมาณทัลคัมที่ต้องผสมลงในแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บของมอลโตเด็กซ์ตริน 10% (modified starch, T= 40°C, RH= 80%)

| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|---|---|---|---|---|---|
| Time (hour) | Retained menthol in powder (mg retained menthol / g powder) | Menthol release from encapsulated powder (mg released menthol / g powder) | Relative menthol release (mg released menthol /g initial menthol in powder) | Menthol release from commercial powder (mg released menthol / g powder) | Weight of added talcum (g) |
| 0 | 79.36 | 0.00 | 0 | 0.00 | - |
| 1 | 78.71 | 0.65 | 0.01 | 0.40 | 0.64 |
| 2 | 77.48 | 1.88 | 0.02 | 0.72 | 1.62 |
| 3 | 76.88 | 2.48 | 0.03 | 1.14 | 1.17 |
| 4 | 77.48 | 1.88 | 0.05 | 0.72 | 1.49 |
| 5 | 74.72 | 4.64 | 0.06 | 2.48 | 0.87 |
| 6 | 74.34 | 5.02 | 0.06 | 2.69 | 0.86 |
| 7 | 73.67 | 5.68 | 0.07 | 3.08 | 0.84 |
| 8 | 73.53 | 5.83 | 0.07 | 3.65 | 0.59 |
| | | | | AVG | 1.01 |

(1) คือ Release time

(2) คือ ปริมาณเมนทอลคงเหลือในผงแห้ง ซึ่งหาได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

(3) คือ ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บ ซึ่งหาได้จากปริมาณเมนทอลเริ่มต้นที่มีอยู่ในผงแห้ง-ปริมาณเมนทอลที่เหลืออยู่ในผงแห้ง

(4) คือ ร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้ง ซึ่งหาได้จาก (3) / 79.36

(5) คือ ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด (ตาราง ข-12) ซึ่งหาได้จากปริมาณเมนทอลเริ่มต้นที่มีอยู่ในผงแห้ง-ปริมาณเมนทอลที่เหลืออยู่ในผงแห้ง

(6) คือ ปริมาณทัลคัมที่ต้องผสมลงในแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บ 1 กรัม เพื่อให้ปริมาณเมนทอลที่ถูกปลดปล่อยออกจากแป้งผสมนี้ มีค่าเท่ากับปริมาณเมนทอลที่ถูกปลดปล่อยออกจากแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด เช่น

$$\frac{0.65}{(1+x)} = 0.40$$

$$x = 0.64 \text{ กรัม}$$

จากสมมติฐานที่ว่าเมนทอลในผงแป้งที่ผ่านการกักเก็บมีการปลดปล่อยในรูปแบบลักษณะที่เหมือนเดิม ดังนั้นการเติมทัลคัมลงไปจึงเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มมวลของผงแห้ง ดังนั้นจึงส่งผงให้เฉพาะปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกไป (mg released menthol / g mixed powder) เปลี่ยนแปลง และจากตารางที่ ก-6 ทำให้ทราบว่าจะต้องเติมทัลคัมผสมลงไปเพิ่มอีกประมาณ 1 กรัม (จากค่าเฉลี่ยปริมาณทัลคัมที่จะต้องผสม) ดังแสดงผลการผสมทัลคัมในตารางที่ ก-7

ตารางที่ ก-7 การคำนวณหาสูตรการผสมระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บกับทัลคัมของมอลโตเด็กซ์ตริน 10% (modified starch, T= 40°C, RH= 80%)

| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
|---|---|---|---|---|
| Time (hour) | Retained menthol in encapsulated powder (mg retained menthol/ g powder) | Retained menthol in powder when mixed with talcum 1:1 (mg retained menthol/ g mixed powder) | Menthol release (mg released menthol / g mixed powder) | Relative menthol release (mg released menthol /g initial menthol in mixed powder) |
| 0 | 79.36 | 39.68 | 0.00 | 0 |
| 1 | 78.71 | 39.35 | 0.33 | 0.01 |
| 2 | 77.48 | 38.74 | 0.94 | 0.02 |
| 3 | 76.88 | 38.44 | 1.24 | 0.03 |
| 4 | 75.74 | 37.87 | 1.81 | 0.05 |
| 5 | 74.72 | 37.36 | 2.32 | 0.06 |
| 6 | 74.34 | 37.17 | 2.51 | 0.06 |
| 7 | 73.67 | 36.84 | 2.84 | 0.07 |
| 8 | 73.53 | 36.77 | 2.91 | 0.07 |

(1) คือ Release time

(2) คือ ปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บก่อนผสมกับทัลคัม ซึ่งหาได้จากเครื่องแก๊สโคมาโทกราฟี

(3) คือ ปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในแป้งผสมระหว่างแป้งที่ผ่านการกักเก็บกับทัลคัม

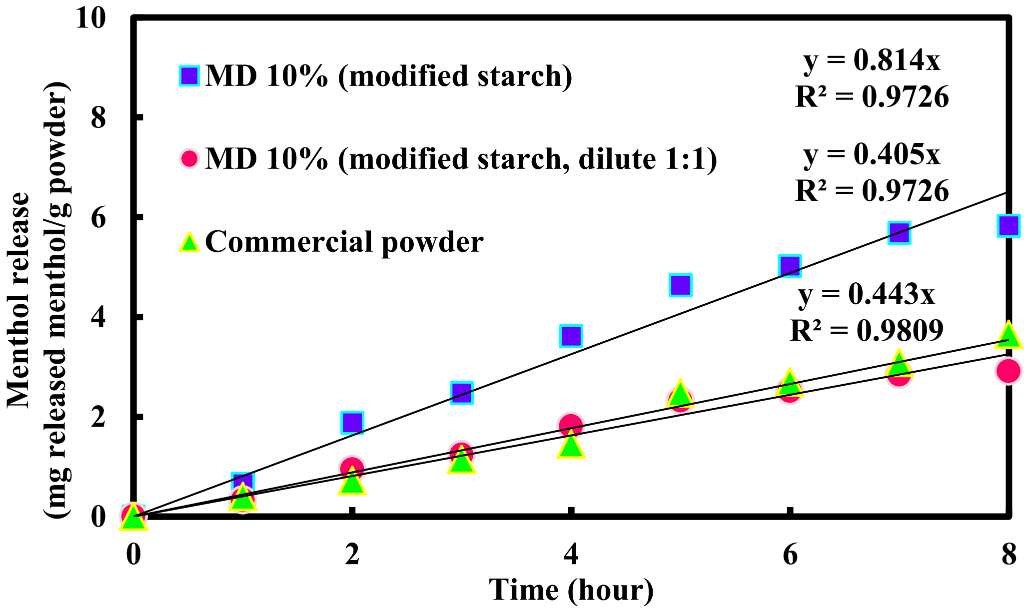
เช่น นำแป้งที่ผ่านการกักเก็บมา 1 กรัม จะมีเมนทอล 79.36 มิลลิกรัม (จากคอลัมภ์ 2) มาผสมกับทัลคัม 1 กรัม จะได้ว่ามีปริมาณเมนทอล $\frac{79.36}{(1+1)}$ $\frac{\text{mg menthol}}{\text{g mix powder}}$

ดังนั้นหลังการผสมผงแป้งนี้จะมีเมนทอล 39.68 mg menthol / g mixed powder

(4) คือ ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้ง ซึ่งหาได้จากปริมาณเมนทอลเริ่มต้นที่มีอยู่ในผงแห้ง-ปริมาณเมนทอลที่เหลืออยู่ในผงแห้ง ซึ่งในที่นี้คือ 39.68 – (3)

(5) คือ ร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่ผสมทัลคัม ซึ่งหาได้จาก (4) / 39.68

เมื่อเขียนกราฟระหว่างปริมาณเมนทอลที่ถูกปลดปล่อยจากตารางที่ ก-7 คอลัมภ์ที่ 5 และเวลาจากตารางที่ ก-7 คอลัมภ์ที่ 1 ทำให้ได้กราฟที่มีความชันใกล้เคียงกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด ดังแสดงในภาพที่ ก-5




ภาพที่ ก-5 ค่าคงที่ของการผสมระหว่างแป้งที่ผ่านการกักเก็บและทัลคัมของมอลโตเด็กซ์ตริน 10% (modified starch)

# ภาคผนวก ข

# ข้อมูลดิบ

## 1. ส่วนประกอบและปริมาณของสารที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ ข-1 ส่วนประกอบและปริมาณของสารที่ใช้ในงานวิจัย

| | sample | Weight (g) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Menthol | Casein | Gum arabic | Maltodextrin | Rice flour | Distilled water |
| ผลของการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ | Control | 30.05 | - | - | - | 120.09 | 180.44 |
| | With 5% Casein | 30.02 | 9.00 | - | - | 112.62 | 180.44 |
| ผลของชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์ | Gum arabic | 14.03 | - | 7.52 | - | 112.61 | 180.5 |
| | Casein | 14.11 | 7.56 | - | - | 112.50 | 180.36 |
| ผลของปริมาณมอลโต-เด็กซ์ตริน (DE 11) | Maltodextrin 0% | 14.11 | 7.54 | - | - | 112.50 | 180.36 |
| | Maltodextrin 5% | 14.5 | 7.56 | - | 6.75 | 104.27 | 180.06 |
| | Maltodextrin 10% | 14.5 | 7.56 | - | 13.50 | 97.52 | 180.06 |
| | Maltodextrin 20% | 14.18 | 7.55 | - | 27.03 | 85.09 | 180.36 |

ตารางที่ ข-1 ส่วนประกอบและปริมาณของสารที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

| | sample | Weight (g) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Menthol | Casein | Gelatin | Capsule | Maltodextrin | Rice flour | Distilled water |
| ผลของค่าสมมูลเด็กซ์โตรสของมอลโตเด็กซ์ตริน | DE 2 | 14.50 | 7.56 | - | - | 13.50 | 97.52 | 180.06 |
| | DE 11 | 14.50 | 7.56 | - | - | 13.50 | 97.52 | 180.06 |
| | DE 25 | 14.50 | 7.56 | - | - | 13.50 | 97.52 | 180.06 |
| ผลของชนิดของสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม | Maltodextrin | 14.50 | 7.56 | - | - | 13.50 | 97.52 | 180.06 |
| | Capsule | 14.50 | 7.56 | - | 13.50 | - | 97.52 | 180.06 |
| ผลของปริมาณสารอิมัลซิไฟเออร์ | Casein 5% | 14.50 | 7.56 | - | - | 13.50 | 97.52 | 180.06 |
| | Casein 10% | 14.50 | 13.35 | - | - | 13.50 | 91.73 | 180.06 |
| ผลของการเติมเจลาติน | Gelatin 0% | 14.50 | 7.56 | - | - | 14.50 | 97.52 | 180.06 |
| | Gelatin 1% | 14.50 | 7.56 | 1.52 | - | 14.50 | 96.00 | 180.06 |
| | Gelatin 2% | 14.50 | 7.56 | 3.05 | - | 14.50 | 96.51 | 180.03 |

ตารางที่ ข-1 ส่วนประกอบและปริมาณของสารที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

| | | Weight (g) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | sample | Menthol | Casein | Maltodextrin | Rice flour | Distilled water |
| ผลของปริมาณเมนทอล | Menthol 5% | 6.65 | 7.56 | 13.50 | 105.37 | 180.06 |
| | Menthol 10% | 14.50 | 7.56 | 13.50 | 97.52 | 180.06 |
| | Menthol 20% | 26.70 | 7.56 | 13.50 | 85.32 | 180.06 |
| อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า | Inlet T 120°C | 14.50 | 7.56 | 14.50 | 97.52 | 180.06 |
| | Inlet T 140°C | 14.50 | 7.56 | 14.50 | 97.52 | 180.06 |
| | Inlet T 160°C | 14.50 | 7.56 | 14.50 | 97.52 | 180.06 |
| | Inlet T 180°C | 14.50 | 7.56 | 14.50 | 97.52 | 180.06 |
| อิทธิพลของความเร็วในการป้อนสาร | Flow 25 ml/min | 14.50 | 7.56 | 14.50 | 97.52 | 180.06 |
| | Flow 35 ml/min | 14.50 | 7.56 | 14.50 | 97.52 | 180.06 |
| อิทธิพลของความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน | 10000 rpm | 14.50 | 7.56 | 14.50 | 97.52 | 180.06 |
| | 30000 rpm | 14.50 | 7.56 | 14.50 | 97.52 | 180.06 |
| การกักเก็บเมนทอลด้วยแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลง | MD 10% (rice flour) | 14.50 | 7.56 | 14.50 | 97.52 | 180.06 |
| | MD 10% (Modified starch) | 14.50 | 7.56 | 14.50 | 97.52* | 180.06 |

*ใช้แป้งที่ผ่านการดัดแปลง (rice starch) ในการกักเก็บ

## 2. **ข้อมูลแสดงน้ำหนักของอนุภาคที่ได้จากการ** sieve

ตารางที่ ข-2 น้ำหนักของอนุภาคที่ได้จาก sieve

1

1

2

| | sample | Weight on aperture size (g) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 µm | 32 µm | 53 µm | 75 µm | 106 µm | 150 µm |
| ผลของชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์ | Gum arabic | 0.17 | 0.27 | 0.21 | 0.15 | 0.07 | 0.10 |
| | With 5% Casein | 0.26 | 0.58 | 0.36 | 0.22 | 0.31 | 0.34 |
| ผลของปริมาณมอลโต-เด็กซ์ตริน (DE 11) | Maltodextrin 0% | 0.26 | 0.58 | 0.36 | 0.22 | 0.31 | 0.34 |
| | Maltodextrin 5% | 0.06 | 0.61 | 0.77 | 0.51 | 0.15 | 0.19 |
| | Maltodextrin 10% | 0.13 | 0.34 | 0.60 | 0.99 | 0.09 | 0.09 |
| | Maltodextrin 20% | 0.00 | 0.18 | 0.48 | 0.23 | 0.06 | 0.15 |
| ผลของค่าสมมูลเด็กซ์โตรสของมอลโตเด็กซ์ตริน | DE 2 | 0.06 | 0.26 | 0.95 | 0.35 | 0.24 | 0.29 |
| | DE 11 | 0.13 | 0.34 | 0.60 | 0.99 | 0.09 | 0.09 |
| | DE 25 | 0.00 | 0.18 | 0.85 | 0.46 | 0.32 | 0.20 |
| ผลของชนิดของสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม | Maltodextrin | 0.08 | 0.35 | 0.74 | 0.50 | 0.40 | 0.35 |
| | Capsule | 0.50 | 0.24 | 0.26 | 0.23 | 0.22 | 0.28 |
| ผลของปริมาณสารอิมัลซิไฟเออร์ | Casein 5% | 0.08 | 0.35 | 0.74 | 0.50 | 0.40 | 0.35 |
| | Casein 10% | 0 | 0.25 | 0.80 | 0.32 | 0.34 | 0.20 |
| ผลของการเติมเจลาติน | Gelatin 0% | 0.13 | 0.34 | 0.60 | 0.99 | 0.09 | 0.09 |
| | Gelatin 1% | 0.09 | 0.29 | 0.24 | 0.33 | 0.15 | 0.17 |
| | Gelatin 2% | 0.08 | 0.45 | 0.78 | 0.54 | 0.29 | 0.37 |
| ผลของปริมาณเมนทอล | Menthol 5% | 0.37 | 0.40 | 0.50 | 0.29 | 0.12 | 0.31 |
| | Menthol 10% | 0.13 | 0.34 | 0.60 | 0.99 | 0.09 | 0.09 |
| | Menthol 20% | 0.07 | 0.31 | 0.67 | 0.40 | 0.25 | 0.30 |

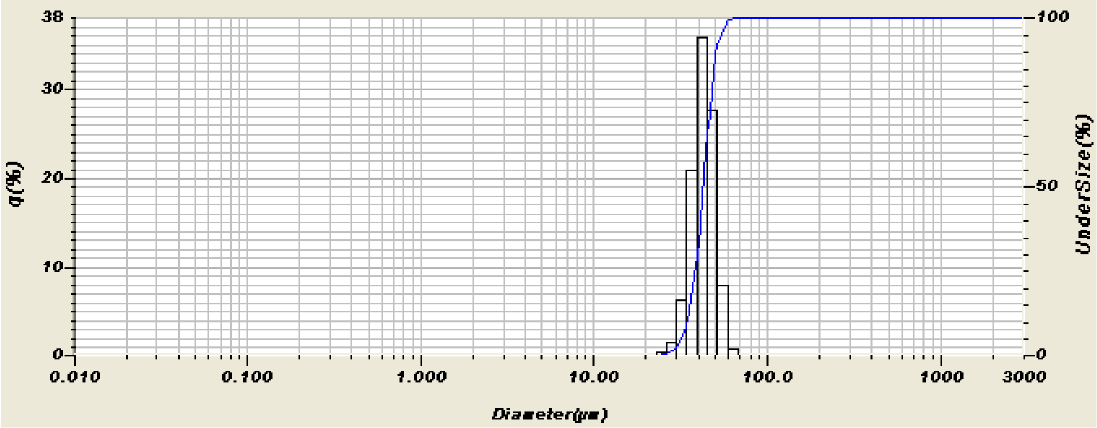
ตารางที่ ข-2 แสดงน้ำหนักของอนุภาคที่ได้จาก sieve (ต่อ)

| | sample | Weight on aperture size (g) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 µm | 32 µm | 53 µm | 75 µm | 106 µm | 150 µm |
| อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า | Inlet T 120°C | 0.10 | 0.43 | 0.62 | 0.86 | 0.09 | 0.13 |
| | Inlet T 140°C | 0.13 | 0.21 | 0.62 | 0.88 | 0.14 | 0.12 |
| | Inlet T 160°C | 0.15 | 0.19 | 0.33 | 0.85 | 0.10 | 0.05 |
| | Inlet T 180°C | 0.13 | 0.34 | 0.60 | 0.99 | 0.09 | 0.09 |
| อิทธิพลของความเร็วในการป้อนสาร | Flow 25 ml/min | 0.08 | 0.35 | 0.74 | 0.50 | 0.40 | 0.35 |
| | Flow 35 ml/min | 0.04 | 0.35 | 0.60 | 0.12 | 0.16 | 0.18 |
| อิทธิพลของความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน | 10000 rpm | 0.10 | 0.43 | 0.62 | 0.86 | 0.09 | 0.13 |
| | 30000 rpm | 0.08 | 0.35 | 0.74 | 0.5 | 0.4 | 0.35 |
| การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแป้งเย็นที่ผ่านการกักเก็บกับแป้งเย็นที่มีขายตามท้องตลาด | Encapsulated powder | 0.08 | 0.35 | 0.74 | 0.5 | 0.4 | 0.35 |
| | Commercial powder | 0.00 | 0.04 | 0.33 | 0.96 | 0.07 | 0.67 |

3. **ข้อมูลแสดงขนาดของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง** Horiba

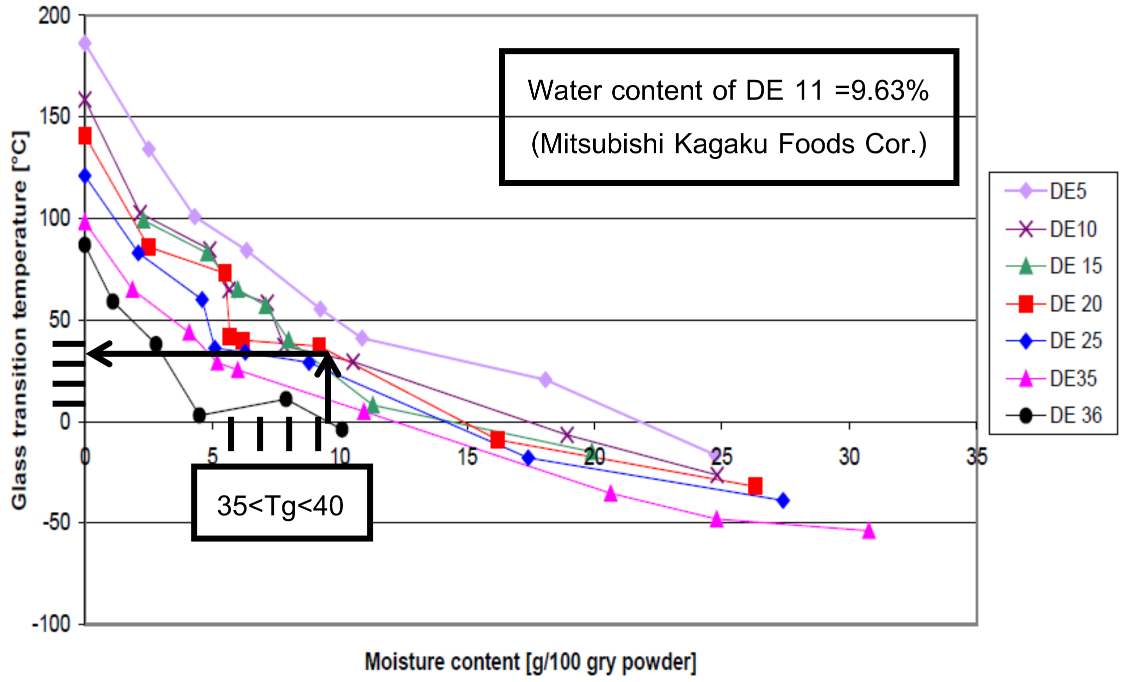
**HORIBA** Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

| | | | |
|---|---|---|---|
| Sample Name | : rice | Median Size | : 42.58216(μm) |
| ID# | : 201307051553607 | Mean Size | : 42.86106(μm) |
| Data Name | : 201307051553607 | Std.Dev. | : 6.4225(μm) |
| Transmittance(R) | : 96.1(%) | Geo.Mean Size | : 42.3742(μm) |
| Transmittance(B) | : 98.3(%) | Geo.Std.Dev. | : 1.1645(μm) |
| Circulation Speed | : OFF | Mode Size | : 42.5349(μm) |
| Agitation Speed | : OFF | Span | : 0.3829 |
| Ultra Sonic | : OFF | Diameter on Cumulative % | : (2)10.00 (%)- 34.7539(μm) |
| Form of Distribution | : Manual | | : (9)90.00 (%)- 51.0601(μm) |
| Distribution Base | : Volume | | |
| Refractive Index (R) | : rice starch 1[rice starch 1( 1.520 - 0.000i),Hexane | | |
| Refractive Index (B) | : rice starch 1[rice starch 1( 1.520 - 0.000i),Hexane | | |
| Material | : rich starch | | |
| Source | : | | |
| Lot Number | : | | |
| Test or Assay. Number | : | | |




ภาพที่ ข-1 ขนาดอนุภาคของแป้งที่ผ่านการกักเก็บโดยใช้มอลโตเด็กซ์ตริน 10% และแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปลงเป็นตัวกักเก็บเมนทอล (MD 10%, modified starch) จากเครื่อง Horiba

4. **อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว** (glass transition temperature, Tg) **ของมอลโตเด็กซ์ตรินที่ใช้ในงานวิจัย**

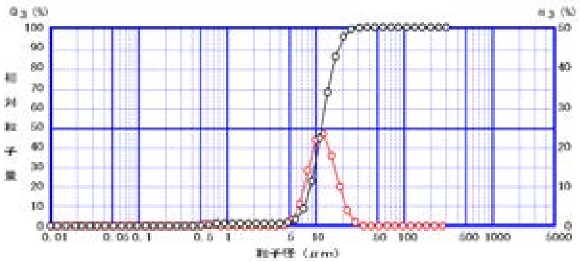
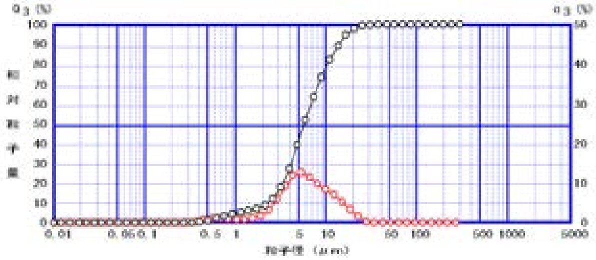



ภาพที่ ข-2 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของมอลโตเด็กซ์ตริน (DE11)

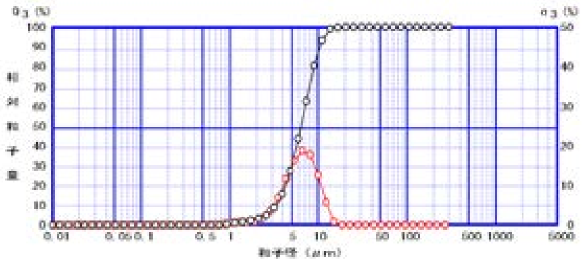
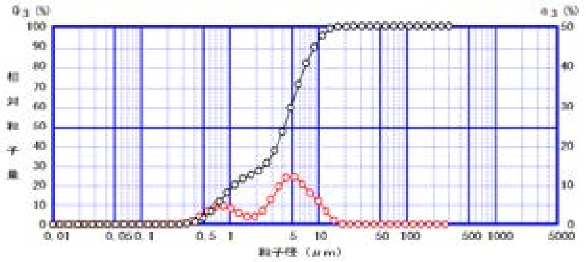
(http://mro.massey.ac.nz/bitstream/handle/10179/1782/02_whole.pdf?sequence=1)

## 5. **ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง** SALD-7100

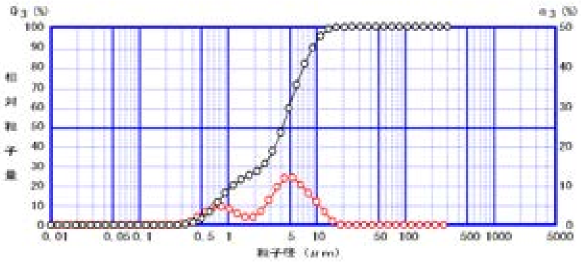
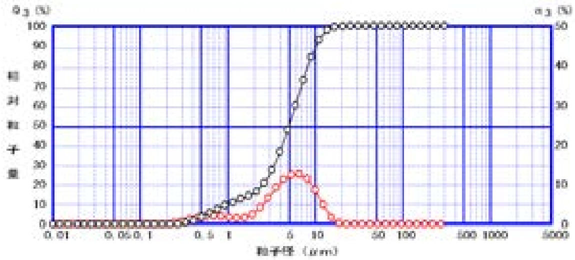
ตารางที่ ข-3 ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100

| | sample | Emulsion size (μm) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | (1) | (2) | (3) |
| ผลของการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ | Control | 11.32 | 12.34 | 11.90 |
| |  | | | |
| | With 5 %Casein | 3.93 | 4.18 | 4.18 |
| |  | | | |

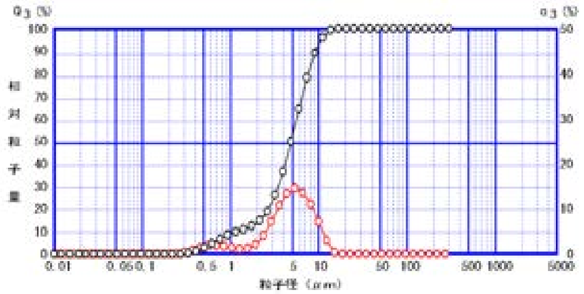
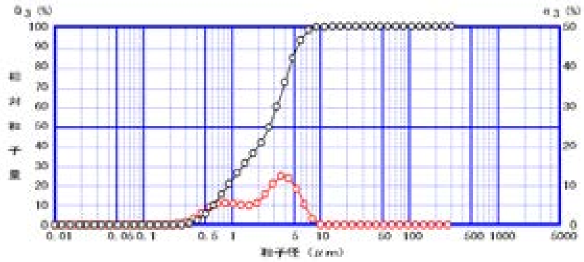
ตารางที่ ข-3 ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100 (ต่อ)

| | sample | Emulsion size (µm) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | (1) | (2) | (3) |
| ผลของชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์ | Gum arabic | 5.84 | 5.69 | 6.02 |
| |  | | | |
| | Casein | 4.15 | 3.77 | 4.11 |
| |  | | | |

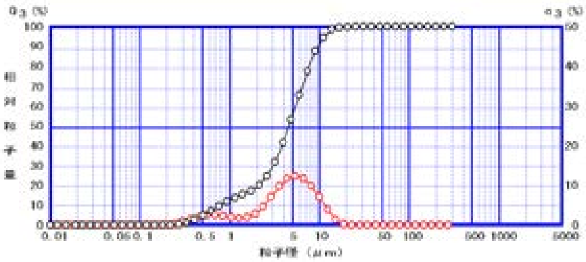
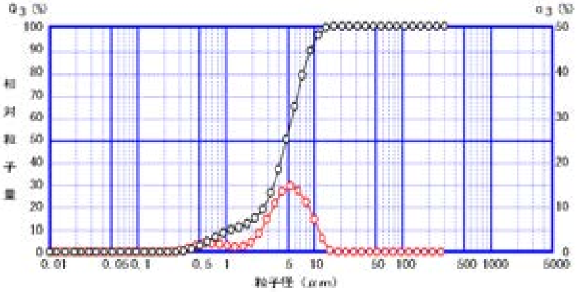
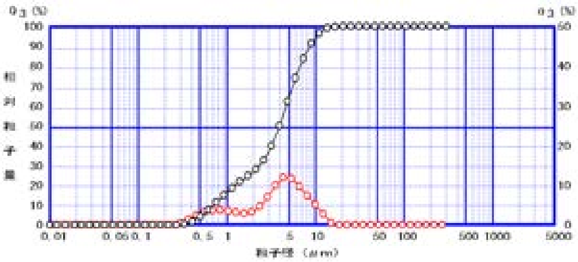
ตารางที่ ข-3 ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100 (ต่อ)

| | sample | Emulsion size (μm) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | (1) | (2) | (3) |
| ผลของปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน (DE 11) | Maltodextrin 0% | 4.15 | 3.77 | 4.11 |
| |  | | | |
| | Maltodextrin 5% | 4.13 | 4.17 | 4.16 |
| |  | | | |

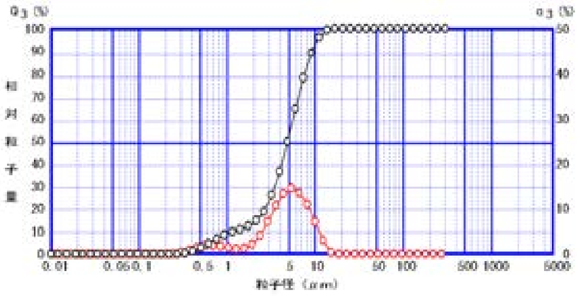
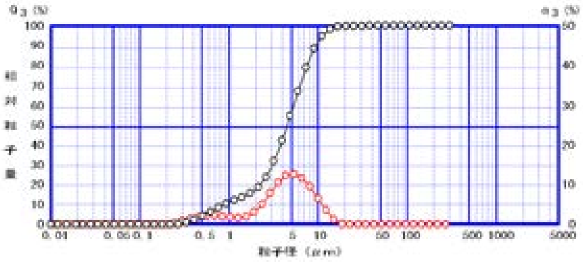
ตารางที่ ข-3 ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100 (ต่อ)

| | sample | Emulsion size (μm) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | (1) | (2) | (3) |
| ผลของปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน (ต่อ) | Maltodextrin 10% | 4.54 | 5.66 | 4.31 |
| |  | | | |
| | Maltodextrin 20% | 2.14 | 2.22 | 2.39 |
| |  | | | |

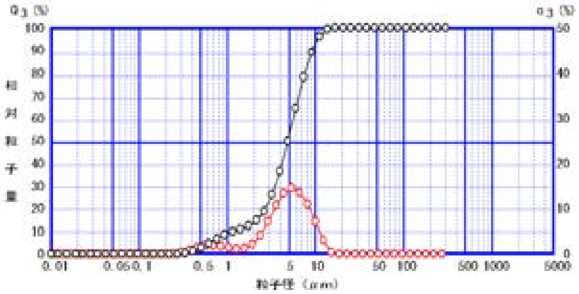
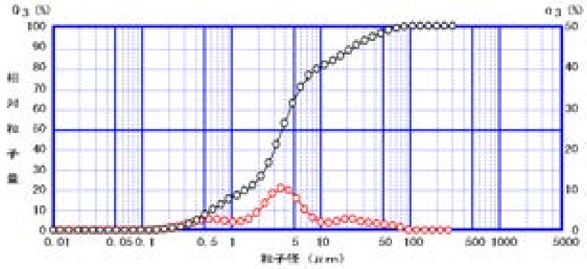
ตารางที่ ข-3 ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100 (ต่อ)

| | sample | Emulsion size (µm) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | (1) | (2) | (3) |
| ผลของค่าสมมูลเด็กซ์โตรสของมอลโตเด็กซ์ตริน | DE 2 | 3.56 | 3.71 | 4.30 |
| |  | | | |
| | DE 11 | 4.54 | 5.66 | 4.31 |
| |  | | | |
| | DE 25 | 3.52 | 2.94 | 3.11 |
| |  | | | |

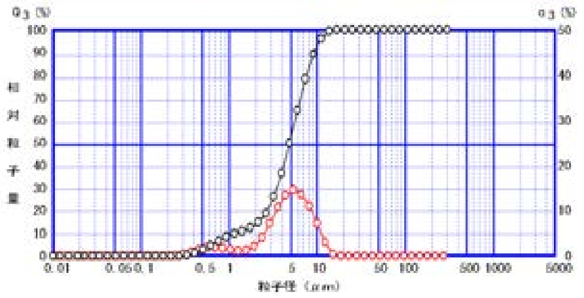
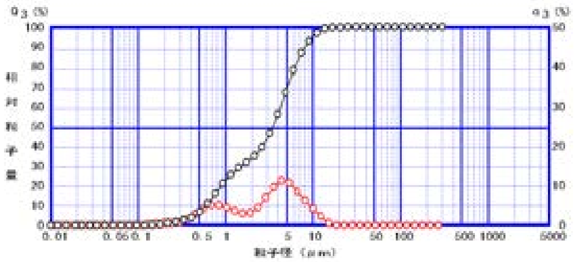
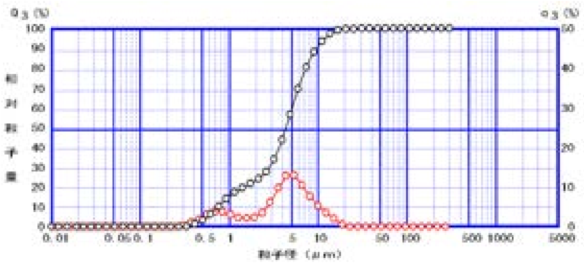
ตารางที่ ข-3 ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100 (ต่อ)

| | sample | Emulsion size (μm) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | (1) | (2) | (3) |
| ผลของชนิดของสารช่วยเกิดชั้นฟิล์ม | Maltodextrin | 4.54 | 5.66 | 4.31 |
| |  | | | |
| | Capsule | 3.78 | 3.83 | 3.63 |
| |  | | | |

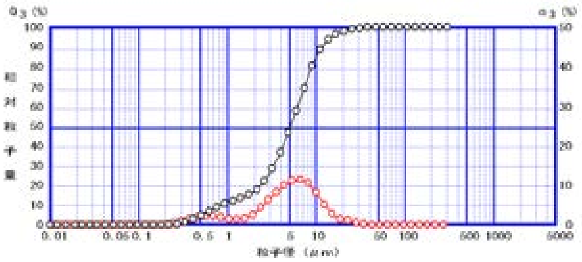
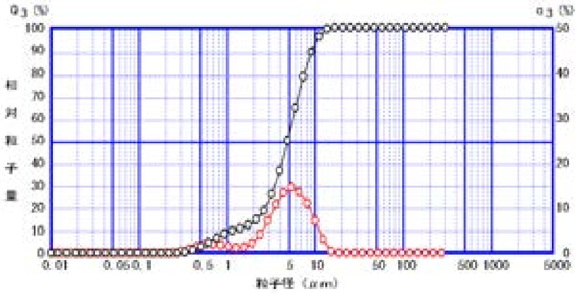
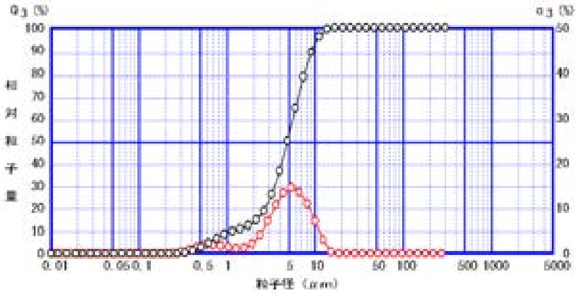
ตารางที่ ข-3 ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100 (ต่อ)

| | sample | Emulsion size (μm) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | (1) | (2) | (3) |
| ผลของปริมาณสารอิมัลซิไฟเออร์ | Casein 5% | 4.54 | 5.66 | 4.31 |
| |  | | | |
| | Casein 10% | 3.79 | 4.84 | 3.72 |
| |  | | | |

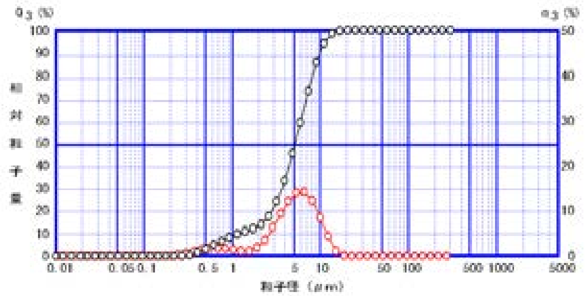
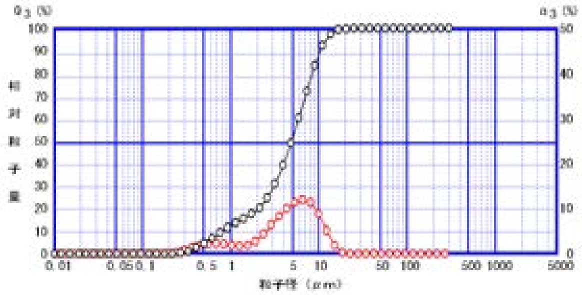
ตารางที่ ข-3 ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100 (ต่อ)

| | sample | Emulsion size (µm) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | (1) | (2) | (3) |
| ผลของการเติมเจลาติน | Gelatin 0% | 4.54 | 5.66 | 4.31 |
| |  | | | |
| | Gelatin 1% | 3.08 | 2.61 | 2.54 |
| |  | | | |
| | Gelatin 2% | 3.47 | 3.54 | 3.51 |
| |  | | | |

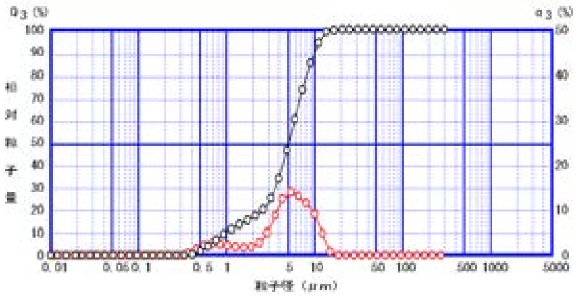
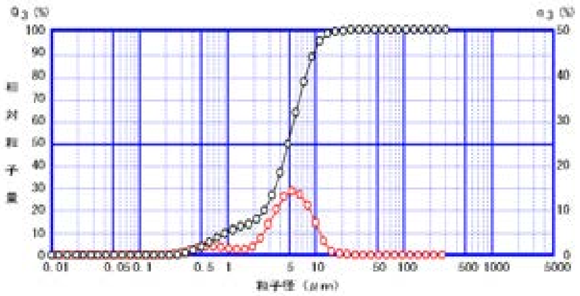
ตารางที่ ข-3 ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100 (ต่อ)

| | sample | Emulsion size (μm) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | (1) | (2) | (3) |
| ผลของปริมาณเมนทอล | Menthol 5% | 5.95 | 4.65 | 5.78 |
| |  | | | |
| | Menthol 10% | 4.54 | 5.66 | 4.31 |
| |  | | | |
| | Menthol 20% | 4.09 | 4.06 | 4.23 |
| |  | | | |

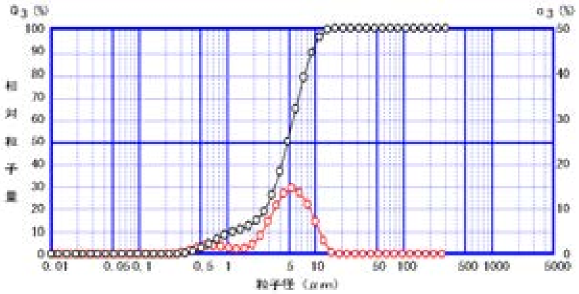
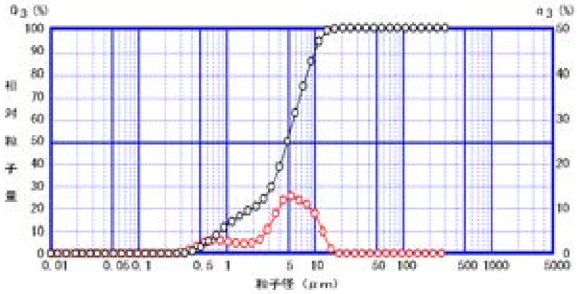
ตารางที่ ข-3 ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100 (ต่อ)

| | sample | Emulsion size (µm) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | (1) | (2) | (3) |
| อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า | Inlet T 120°C | 4.30 | 4.34 | 4.38 |
| |  | | | |
| | Inlet T 140°C | 4.63 | 3.69 | 3.92 |
| |  | | | |

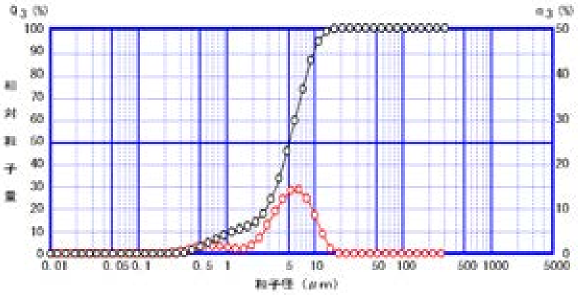
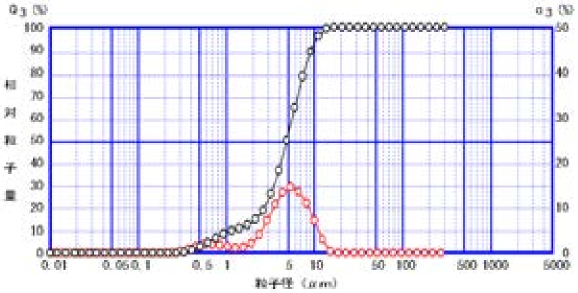
ตารางที่ ข-3 ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100 (ต่อ)

| | sample | Emulsion size (µm) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | (1) | (2) | (3) |
| อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศขาเข้า (ต่อ) | Inlet T 160°C | 4.21 | 4.59 | 4.20 |
| |  | | | |
| | Inlet T 180°C | 4.01 | 4.07 | 4.05 |
| |  | | | |

ตารางที่ ข-3 ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100 (ต่อ)

<table>
<tr><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">sample</td><td colspan="3">Emulsion size (μm)</td></tr>
<tr><td>(1)</td><td>(2)</td><td>(3)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">อิทธิพลของความเร็วในการป้อนสาร</td><td>Flow 25 ml/min</td><td>4.54</td><td>5.66</td><td>4.31</td></tr>
<tr><td colspan="4">
</td></tr>
<tr><td>Flow 35 ml/min</td><td>3.82</td><td>3.89</td><td>4.13</td></tr>
<tr><td colspan="4">
</td></tr>
</table>

ตารางที่ ข-3 ขนาดอิมัลชันของอนุภาคที่ได้จากเครื่อง SALD-7100 (ต่อ)

| | sample | Emulsion size (µm) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | (1) | (2) | (3) |
| อิทธิพลของความเร็วของหัวฉีดแบบจานหมุน | 10000 rpm | 4.30 | 4.34 | 4.38 |
| |  | | | |
| | 30000 rpm | 4.54 | 5.66 | 4.31 |
| |  | | | |

**6. ปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่าง ๆที่อุณหภูมิ 35 37 และ 40 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 80%**

ตารางที่ ข-4 ปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Retained menthol in encapsulated powder (mg retained menthol/ g powder) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 14.19 ± 0.01 $\times10^{-3}$ | 80.25 ± 1.07 $\times10^{-3}$ | 79.36 ± 0 | 6.00 ± 0.04 $\times10^{-3}$ |
| 1 | 14.13 ± 2.37 $\times10^{-3}$ | 78.76 ± 2.58 $\times10^{-3}$ | 77.65 ± 7.87 $\times10^{-3}$ | 5.79 ± 2.39 $\times10^{-3}$ |
| 2 | 14.03 ± 0.99 $\times10^{-3}$ | 76.43 ± 1.73 $\times10^{-3}$ | 76.09 ± 11.8 $\times10^{-3}$ | 5.58 ± 1.46 $\times10^{-3}$ |
| 3 | 14.01 ± 4.77 $\times10^{-3}$ | 75.51 ± 0.94 $\times10^{-3}$ | 75.57 ± 16.1 $\times10^{-3}$ | 5.35 ± 4.82 $\times10^{-3}$ |
| 4 | 13.79 ± 2.60 $\times10^{-3}$ | 74.48 ± 1.31 $\times10^{-3}$ | 74.39 ± 0 | 5.19 ± 0.44 $\times10^{-3}$ |
| 5 | 13.65 ± 6.00 $\times10^{-3}$ | 73.19 ± 3.58 $\times10^{-3}$ | 73.09 ± 9.63 $\times10^{-3}$ | 5.00 ± 1.93 $\times10^{-3}$ |
| 6 | 13.32 ± 1.70 $\times10^{-3}$ | 72.76 ± 2.05 $\times10^{-3}$ | 72.19 ± 15.1 $\times10^{-3}$ | 4.66 ± 4.06 $\times10^{-3}$ |
| 7 | 13.24 ± 3.16 $\times10^{-3}$ | 71.13 ± 6.46 $\times10^{-3}$ | 71.78 ± 14.3 $\times10^{-3}$ | 4.51 ± 2.02 $\times10^{-3}$ |
| 8 | 13.17 ± 2.83 $\times10^{-3}$ | 70.99 ± 2.29 $\times10^{-3}$ | 70.59 ± 0 | 4.48 ± 1.97 $\times10^{-3}$ |

ตารางที่ ข-5 ปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Retained menthol in encapsulated powder (mg retained menthol/ g powder) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 14.19 ± 0.01 $\times 10^{-3}$ | 80.25 ± 1.07 $\times 10^{-3}$ | 79.36 ± 0 | 6.00 ± 0.03 $\times 10^{-3}$ |
| 1 | 13.99 ± 13.1 $\times 10^{-3}$ | 79.39 ± 4.02 $\times 10^{-3}$ | 78.21 ± 0.21 $\times 10^{-3}$ | 5.83 ± 16.7 $\times 10^{-3}$ |
| 2 | 13.73 ± 2.89 $\times 10^{-3}$ | 78.19 ± 4.49 $\times 10^{-3}$ | 77.51 ± 13.7 $\times 10^{-3}$ | 5.60 ± 2.25 $\times 10^{-3}$ |
| 3 | 13.65 ± 5.54 $\times 10^{-3}$ | 76.86 ± 6.35 $\times 10^{-3}$ | 76.31 ± 10.2 $\times 10^{-3}$ | 5.22 ± 3.16 $\times 10^{-3}$ |
| 4 | 13.36 ± 3.72 $\times 10^{-3}$ | 75.22 ± 3.11 $\times 10^{-3}$ | 75.01 ± 1.64 $\times 10^{-3}$ | 4.98 ± 9.96 $\times 10^{-3}$ |
| 5 | 12.84 ± 2.72 $\times 10^{-3}$ | 74.17 ± 6.53 $\times 10^{-3}$ | 73.47 ± 21.2 $\times 10^{-3}$ | 4.74 ± 17.9 $\times 10^{-3}$ |
| 6 | 12.66 ± 2.79 $\times 10^{-3}$ | 73.06 ± 4.48 $\times 10^{-3}$ | 72.27 ± 0 | 4.13 ± 1.81 $\times 10^{-3}$ |
| 7 | 12.58 ± 4.57 $\times 10^{-3}$ | 72.85 ± 11.1 $\times 10^{-3}$ | 71.63 ± 0 | 3.56 ± 33.4 $\times 10^{-3}$ |
| 8 | 12.40 ± 0.36 $\times 10^{-3}$ | 71.17 ± 8.41 $\times 10^{-3}$ | 70.77 ± 7.97 $\times 10^{-3}$ | 3.49 ± 7.50 $\times 10^{-3}$ |

ตารางที่ ข-6 ปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Retained menthol in encapsulated powder (mg retained menthol/ g powder) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 14.19 ± 0.01 x$10^{-3}$ | 80.25 ± 0.04 x$10^{-3}$ | 79.36 ± 0 | 6.00 ± 0.04 x$10^{-3}$ |
| 1 | 13.81 ± 3.66 x$10^{-3}$ | 80.20 ± 0.27 x$10^{-3}$ | 78.71 ± 0 | 5.60 ± 3.80 x$10^{-3}$ |
| 2 | 13.51 ± 1.33 x$10^{-3}$ | 79.07 ± 1.89 x$10^{-3}$ | 77.48 ± 12.5 x$10^{-3}$ | 5.28 ± 3.53 x$10^{-3}$ |
| 3 | 13.27 ± 7.12 x$10^{-3}$ | 78.84 ± 2.05 x$10^{-3}$ | 76.88 ± 0 | 4.86 ± 8.73 x$10^{-3}$ |
| 4 | 13.09 ± 0.23 x$10^{-3}$ | 78.19 ± 1.00 x$10^{-3}$ | 75.74 ± 3.33 x$10^{-3}$ | 4.55 ± 3.59 x$10^{-3}$ |
| 5 | 12.75 ± 1.46 x$10^{-3}$ | 76.97 ± 0.16 x$10^{-3}$ | 74.72 ± 0 | 3.90 ± 34.5 x$10^{-3}$ |
| 6 | 12.41 ± 1.74 x$10^{-3}$ | 76.21 ± 0.08 x$10^{-3}$ | 74.34 ± 0 | 3.30 ± 8.32 x$10^{-3}$ |
| 7 | 12.14 ± 1.88 x$10^{-3}$ | 75.34 ± 0.08 x$10^{-3}$ | 73.67 ± 6.21 x$10^{-3}$ | 2.91 ± 3.43 x$10^{-3}$ |
| 8 | 11.81 ± 1.68 x$10^{-3}$ | 75.10 ± 3.37 x$10^{-3}$ | 73.53 ± 11.3 x$10^{-3}$ | 2.35 ± 0.09 x$10^{-3}$ |

**7. ร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่าง ๆที่อุณหภูมิ 35 37 และ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%**

ตารางที่ ข-7 ร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Retention (g retained menthol /g initial menthol in feed solution) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 1.00 ± 0 | 1.00 ± 0 | 1.00 ± 0 | 1.00 ± 0 |
| 1 | 1.00 ± 2.37 $\times10^{-3}$ | 0.98 ± 2.58 $\times10^{-3}$ | 0.98 ± 7.87 $\times10^{-3}$ | 0.97 ± 2.39 $\times10^{-3}$ |
| 2 | 0.99 ± 0.99 $\times10^{-3}$ | 0.95 ± 1.73$\times10^{-3}$ | 0.96 ± 1.18 $\times10^{-3}$ | 0.93 ± 1.46 $\times10^{-3}$ |
| 3 | 0.99 ± 4.77 $\times10^{-3}$ | 0.94 ± 0.94 $\times10^{-3}$ | 0.95 ± 1.61 $\times10^{-3}$ | 0.89 ± 4.82 $\times10^{-3}$ |
| 4 | 0.97 ± 2.60 $\times10^{-3}$ | 0.93 ± 1.31 $\times10^{-3}$ | 0.94 ± 0 | 0.87 ± 0.44 $\times10^{-3}$ |
| 5 | 0.96 ± 6.00 $\times10^{-3}$ | 0.91 ± 3.58 $\times10^{-3}$ | 0.92 ± 9.62 $\times10^{-3}$ | 0.83 ± 1.93 $\times10^{-3}$ |
| 6 | 0.94 ± 1.70 $\times10^{-3}$ | 0.91 ± 2.05$\times10^{-3}$ | 0.91 ± 15.1 $\times10^{-3}$ | 0.78 ± 4.06 $\times10^{-3}$ |
| 7 | 0.93 ± 3.16 $\times10^{-3}$ | 0.89 ± 6.46 $\times10^{-3}$ | 0.90 ± 14.3 $\times10^{-3}$ | 0.75 ± 2.02 $\times10^{-3}$ |
| 8 | 0.93 ± 2.83 $\times10^{-3}$ | 0.88 ± 2.29 $\times10^{-3}$ | 0.89 ± 0 | 0.75 ± 1.97 $\times10^{-3}$ |

ตารางที่ ข-8 ร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Retention (g retained menthol /g initial menthol in feed solution) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 1.00 ± 0 | 1.00 ± 0 | 1.00 ± 0 | 1.00 ± 0 |
| 1 | 0.99 ± 13.1 $x10^{-3}$ | 0.99 ± 4.49 $x10^{-3}$ | 0.99 ± 0.21 $x10^{-3}$ | 0.97 ± 14.9 $x10^{-3}$ |
| 2 | 0.97 ± 2.88 $x10^{-3}$ | 0.97 ± 6.25 $x10^{-3}$ | 0.98 ± 13.7 $x10^{-3}$ | 0.93 ± 8.10 $x10^{-3}$ |
| 3 | 0.96 ± 5.54 $x10^{-3}$ | 0.96 ± 3.11 $x10^{-3}$ | 0.96 ± 10.2 $x10^{-3}$ | 0.87 ± 4.92 $x10^{-3}$ |
| 4 | 0.94 ± 3.72 $x10^{-3}$ | 0.94 ± 6.53 $x10^{-3}$ | 0.95 ± 1.64 $x10^{-3}$ | 0.83 ± 4.94 $x10^{-3}$ |
| 5 | 0.91 ± 2.72 $x10^{-3}$ | 0.92 ± 4.48 $x10^{-3}$ | 0.93 ± 21.2 $x10^{-3}$ | 0.79 ± 7.64 $x10^{-3}$ |
| 6 | 0.89 ± 2.78 $x10^{-3}$ | 0.91 ± 11.1 $x10^{-3}$ | 0.91 ± 0 | 0.69 ± 12.3 $x10^{-3}$ |
| 7 | 0.89 ± 4.57 $x10^{-3}$ | 0.91 ± 8.41 $x10^{-3}$ | 0.90 ± 0 | 0.59 ± 13.1 $x10^{-3}$ |
| 8 | 0.87 ± 0.37 $x10^{-3}$ | 0.89 ± 4.49 $x10^{-3}$ | 0.89 ± 7.97 $x10^{-3}$ | 0.58 ± 50.1 $x10^{-3}$ |

ตารางที่ ข-9 ร้อยละปริมาณเมนทอลที่คงเหลือในผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Retention (g retained menthol /g initial menthol in feed solution) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 1.00 ± 0 | 1.00 ± 0 | 1.00 ± 0 | 1.00 ± 0 |
| 1 | 0.97 ± 2.66 x$10^{-3}$ | 0.99 ± 0.27 x$10^{-3}$ | 0.99 ± 0 | 0.93 ± 3.80 x$10^{-3}$ |
| 2 | 0.95 ± 1.33 x$10^{-3}$ | 0.99 ± 1.89 x$10^{-3}$ | 0.98 ± 12.5 x$10^{-3}$ | 0.88 ± 3.53 x$10^{-3}$ |
| 3 | 0.93 ± 7.12x$10^{-3}$ | 0.98 ± 2.05 x$10^{-3}$ | 0.97 ± 0 | 0.81 ± 8.73 x$10^{-3}$ |
| 4 | 0.92 ± 0.23 x$10^{-3}$ | 0.97 ± 1.00 x$10^{-3}$ | 0.95 ± 3.33 x$10^{-3}$ | 0.76 ± 3.59 x$10^{-3}$ |
| 5 | 0.90 ± 1.46 x$10^{-3}$ | 0.96 ± 0.16 x$10^{-3}$ | 0.94 ± 0 | 0.65 ± 34.5 x$10^{-3}$ |
| 6 | 0.87 ± 1.74 x$10^{-3}$ | 0.95 ± 0.08 x$10^{-3}$ | 0.94 ± 0 | 0.55 ± 8.31 x$10^{-3}$ |
| 7 | 0.86 ± 1.87 x$10^{-3}$ | 0.94 ± 0 | 0.93 ± 6.21 x$10^{-3}$ | 0.49 ± 3.43 x$10^{-3}$ |
| 8 | 0.83 ± 1.68 x$10^{-3}$ | 0.94 ± 3.37 x$10^{-3}$ | 0.93 ± 11.3 x$10^{-3}$ | 0.39 ± 0.09 x$10^{-3}$ |

**8. ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่าง ๆที่อุณหภูมิ 35 37 และ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%**

ตารางที่ ข-10 ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Menthol release (mg released menthol/ g powder) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | $0.06 \pm 33.7 \times 10^{-3}$ | $1.49 \pm 207 \times 10^{-3}$ | $1.71 \pm 472 \times 10^{-3}$ | $0.20 \pm 14.3 \times 10^{-3}$ |
| 2 | $0.16 \pm 14.0 \times 10^{-3}$ | $3.82 \pm 139 \times 10^{-3}$ | $3.27 \pm 708 \times 10^{-3}$ | $0.42 \pm 8.74 \times 10^{-3}$ |
| 3 | $0.19 \pm 67.6 \times 10^{-3}$ | $4.74 \pm 75.5 \times 10^{-3}$ | $3.78 \pm 963 \times 10^{-3}$ | $0.65 \pm 28.9 \times 10^{-3}$ |
| 4 | $0.40 \pm 36.9 \times 10^{-3}$ | $5.77 \pm 105 \times 10^{-3}$ | $4.97 \pm 0$ | $0.81 \pm 2.65 \times 10^{-3}$ |
| 5 | $0.54 \pm 85.0 \times 10^{-3}$ | $7.05 \pm 288 \times 10^{-3}$ | $6.27 \pm 577 \times 10^{-3}$ | $1.00 \pm 11.6 \times 10^{-3}$ |
| 6 | $0.87 \pm 24.1 \times 10^{-3}$ | $7.49 \pm 165 \times 10^{-3}$ | $7.17 \pm 908 \times 10^{-3}$ | $1.34 \pm 24.4 \times 10^{-3}$ |
| 7 | $0.96 \pm 44.8 \times 10^{-3}$ | $9.12 \pm 518 \times 10^{-3}$ | $7.58 \pm 856 \times 10^{-3}$ | $1.48 \pm 12.1 \times 10^{-3}$ |
| 8 | $1.02 \pm 40.2 \times 10^{-3}$ | $9.26 \pm 184 \times 10^{-3}$ | $8.77 \pm 0$ | $1.51 \pm 11.8 \times 10^{-3}$ |

ตารางที่ ข-11 ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Menthol release (mg released menthol/ g powder) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.20 ± 185 $x10^{-3}$ | 0.86 ± 323 $x10^{-3}$ | 1.15 ± 13.0 $x10^{-3}$ | 0.16 ± 15.1 $x10^{-3}$ |
| 2 | 0.46 ± 40.9 $x10^{-3}$ | 2.06 ± 360 $x10^{-3}$ | 1.85 ± 840 $x10^{-3}$ | 0.29 ± 19.0 $x10^{-3}$ |
| 3 | 0.55 ± 78.7 $x10^{-3}$ | 3.39 ± 50.3 $x10^{-3}$ | 3.04 ± 627 $x10^{-3}$ | 0.78 ± 60.0 $x10^{-3}$ |
| 4 | 0.83 ± 78.7 $x10^{-3}$ | 5.03 ± 249 $x10^{-3}$ | 4.34 ± 101 $x10^{-3}$ | 1.02 ± 108 $x10^{-3}$ |
| 5 | 1.35 ± 52.7 $x10^{-3}$ | 6.08 ± 524 $x10^{-3}$ | 5.88 ± 1.303 | 1.26 ± 108 $x10^{-3}$ |
| 6 | 1.53 ± 38.7 $x10^{-3}$ | 7.19 ± 360 $x10^{-3}$ | 7.09 ± 0 | 1.87 10.9 $x10^{-3}$ |
| 7 | 1.62 ± 39.4 $x10^{-3}$ | 7.40 ± 892 $x10^{-3}$ | 7.72 ± 0 | 2.43 ± 200 $x10^{-3}$ |
| 8 | 1.79 ± 64.8 $x10^{-3}$ | 9.08 ± 675 $x10^{-3}$ | 8.58 ± 188 $x10^{-3}$ | 2.51 ± 45.0 $x10^{-3}$ |

ตารางที่ ข-12 ปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Menthol release (mg released menthol/ g powder) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.38 ± 51.9 $\times 10^{-3}$ | 0.54 ± 21.6 $\times 10^{-3}$ | 0.65 ± 0 | 0.40 ± 22.8 $\times 10^{-3}$ |
| 2 | 0.68 ± 18.8 $\times 10^{-3}$ | 1.18 ± 152 $\times 10^{-3}$ | 1.88 ± 994 $\times 10^{-3}$ | 0.72 ± 21.2 $\times 10^{-3}$ |
| 3 | 0.92 ± 101 $\times 10^{-3}$ | 1.40 ± 165 $\times 10^{-3}$ | 2.48 ± 0 | 1.14 ± 52.4 $\times 10^{-5}$ |
| 4 | 1.11 ± 3.21 $\times 10^{-3}$ | 2.06 ± 80.3 $\times 10^{-3}$ | 3.61 ± 265 $\times 10^{-3}$ | 1.45 ± 21.5 $\times 10^{-3}$ |
| 5 | 1.45 ± 20.8 $\times 10^{-3}$ | 3.27 ± 12.7 $\times 10^{-3}$ | 4.64 ± 0 | 2.48 ± 207 $\times 10^{-3}$ |
| 6 | 1.78 ± 24.7 $\times 10^{-3}$ | 4.04 ± 6.51 $\times 10^{-3}$ | 5.02 ± 0 | 2.69 ± 49.8 $\times 10^{-3}$ |
| 7 | 2.05 ± 26.5 $\times 10^{-3}$ | 4.91 ± 0.05 $\times 10^{-3}$ | 5.68 ± 493 $\times 10^{-3}$ | 3.08 ± 20.5 $\times 10^{-3}$ |
| 8 | 2.38 ± 23.8 $\times 10^{-3}$ | 5.15 ± 271 $\times 10^{-3}$ | 5.83 ± 896 $\times 10^{-3}$ | 3.65 ± 0.56 $\times 10^{-3}$ |

**9. ปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้งที่เวลาต่าง ๆที่อุณหภูมิ 35 37 และ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%**

ตารางที่ ข-13 ปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Endothermic energy (J / g powder) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.03 ± 17.0 x10$^{-3}$ | 0.75 ± 239 x10$^{-3}$ | 0.87 ± 105 x10$^{-3}$ | 0.10 ± 7.26 x10$^{-3}$ |
| 2 | 0.08 ± 7.09 x10$^{-3}$ | 1.93 ± 358 x10$^{-3}$ | 1.65 ± 70.4 x10$^{-3}$ | 0.21 ± 4.43 x10$^{-3}$ |
| 3 | 0.09 ± 34.2 x10$^{-3}$ | 2.40 ± 487 x10$^{-3}$ | 1.91 ± 38.3 x10$^{-3}$ | 0.33 ± 14.6 x10$^{-3}$ |
| 4 | 0.20 ± 18.7 x10$^{-3}$ | 2.92 ± 0 | 2.52 ± 53.1 x10$^{-3}$ | 0.41 ± 1.34 x10$^{-3}$ |
| 5 | 0.27 ± 43.0 x10$^{-3}$ | 3.57 ± 292 x10$^{-3}$ | 3.17 ± 146 x10$^{-3}$ | 0.50 ± 5.87 x10$^{-3}$ |
| 6 | 0.44 ± 12..2 x10$^{-3}$ | 3.79 ± 460 x10$^{-3}$ | 3.63 ± 83.4 x10$^{-3}$ | 0.68 ± 12.3 x10$^{-3}$ |
| 7 | 0.48 ± 22.7 x10$^{-3}$ | 4.61 ± 433 x10$^{-3}$ | 3.84 ± 262 x10$^{-3}$ | 0.75 ± 6.14 x10$^{-3}$ |
| 8 | 0.51 ± 20.3 x10$^{-3}$ | 4.69 ± 0 | 4.44 ± 93.0 x10$^{-3}$ | 0.77 ± 5.98 x10$^{-3}$ |

ตารางที่ ข-14 ปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Endothermic energy (J/ g powder) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.10 ± 93.8 x$10^{-3}$ | 0.44 ± 163 x$10^{-3}$ | 0.58 ± 6.59 x$10^{-3}$ | 0.08 ± 0.008 |
| 2 | 0.23 ± 20.7 x$10^{-3}$ | 1.04 ± 182 x$10^{-3}$ | 0.94 ± 425 x$10^{-3}$ | 0.15 ± 0.010 |
| 3 | 0.28 ± 39.8 x$10^{-3}$ | 1.71 ± 25.4 x$10^{-3}$ | 1.54 ± 317 x$10^{-3}$ | 0.39 ± 0.030 |
| 4 | 0.42 ± 39.8 x$10^{-3}$ | 2.54 ± 126 x$10^{-3}$ | 2.20 ± 51.0 x$10^{-3}$ | 0.52 ± 0.054 |
| 5 | 0.68 ± 26.7 x$10^{-3}$ | 3.08 ± 265 x$10^{-3}$ | 2.98 ± 660 x$10^{-3}$ | 0.64 ± 0.005 |
| 6 | 0.78 ± 19.6 x$10^{-3}$ | 3.64 ± 182 x$10^{-3}$ | 3.59 ± 0 | 0.94 ± 0.101 |
| 7 | 0.82 ± 20.0 x$10^{-3}$ | 3.74 ± 451 x$10^{-3}$ | 3.91 ± 0 | 1.23 ± 0.023 |
| 8 | 0.90 ± 32.8 x$10^{-3}$ | 4.60 ± 341 x$10^{-3}$ | 4.34 ± 95.0 x$10^{-3}$ | 1.27 ± 0.040 |

ตารางที่ ข-15 ปริมาณพลังงานที่เมนทอลใช้ในการระเหิดจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Endothermic energy (J/ g powder) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | $0.19 \pm 26.3 \times 10^{-3}$ | $0.28 \pm 10.9 \times 10^{-3}$ | $0.33 \pm 0$ | $0.20 \pm 11.5 \times 10^{-3}$ |
| 2 | $0.34 \pm 0.95 \times 10^{-3}$ | $0.60 \pm 76.8 \times 10^{-3}$ | $0.95 \pm 503 \times 10^{-3}$ | $0.36 \pm 10.7 \times 10^{-3}$ |
| 3 | $0.47 \pm 51.1 \times 10^{-3}$ | $0.71 \pm 83.3 \times 10^{-3}$ | $1.25 \pm 0$ | $0.58 \pm 26.7 \times 10^{-3}$ |
| 4 | $0.56 \pm 1.63 \times 10^{-3}$ | $1.04 \pm 40.6 \times 10^{-3}$ | $1.83 \pm 134 \times 10^{-3}$ | $0.73 \pm 10.9 \times 10^{-3}$ |
| 5 | $0.73 \pm 10.5 \times 10^{-3}$ | $1.66 \pm 6.44 \times 10^{-3}$ | $2.35 \pm 0$ | $1.25 \pm 105 \times 10^{-3}$ |
| 6 | $0.90 \pm 12.5 \times 10^{-3}$ | $2.04 \pm 3.29 \times 10^{-3}$ | $2.54 \pm 0$ | $1.36 \pm 25.2 \times 10^{-3}$ |
| 7 | $1.04 \pm 13.4 \times 10^{-3}$ | $2.48 \pm 0.03 \times 10^{-3}$ | $2.88 \pm 249 \times 10^{-3}$ | $1.56 \pm 10.4 \times 10^{-3}$ |
| 8 | $1.20 \pm 12.0 \times 10^{-3}$ | $2.61 \pm 137 \times 10^{-3}$ | $2.95 \pm 454 \times 10^{-3}$ | $1.85 \pm 0.28 \times 10^{-3}$ |

**10. ร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่าง ๆที่อุณหภูมิ 35 37 และ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%**

ตารางที่ ข-16 ร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Relative menthol release (g released menthol/ g initial menthol in powder) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.004 ± 2.37 x$10^{-3}$ | 0.019 ± 2.58 x$10^{-3}$ | 0.022 ± 7.87 x$10^{-3}$ | 0.034 ± 2.39 x$10^{-3}$ |
| 2 | 0.011 ± 0.99 x$10^{-3}$ | 0.048 ± 1.73 x$10^{-3}$ | 0.041 ± 11.8 x$10^{-3}$ | 0.070 ± 1.46 x$10^{-3}$ |
| 3 | 0.013 ± 4.77 x$10^{-3}$ | 0.059 ± 0.94 x$10^{-3}$ | 0.048 ± 16.1 x$10^{-3}$ | 0.108 ± 4.82 x$10^{-3}$ |
| 4 | 0.028 ± 2.60 x$10^{-3}$ | 0.072 ± 1.31 x$10^{-3}$ | 0.063 ± 0 | 0.134 ± 0.44 x$10^{-3}$ |
| 5 | 0.038 ± 6.00 x$10^{-3}$ | 0.088 ± 3.58 x$10^{-3}$ | 0.079 ± 9.63 x$10^{-3}$ | 0.166 ± 1.93 x$10^{-3}$ |
| 6 | 0.061 ± 1.70 x$10^{-3}$ | 0.093 ± 2.05 x$10^{-3}$ | 0.090 ± 15.1 x$10^{-3}$ | 0.224 ± 4.06 x$10^{-3}$ |
| 7 | 0.067 ± 3.16 x$10^{-3}$ | 0.114 ± 6.46 x$10^{-3}$ | 0.096 ± 14.2 x$10^{-3}$ | 0.247 ± 2.02 x$10^{-3}$ |
| 8 | 0.072 ± 2.83 x$10^{-3}$ | 0.115 ± 2.29 x$10^{-3}$ | 0.111 ± 0 | 0.252 ± 1.97 x$10^{-3}$ |

ตารางที่ ข-17 ร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Relative menthol release (g released menthol/ g initial menthol in powder) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.014 ± 13.1 x$10^{-3}$ | 0.011 ± 4.02 x$10^{-3}$ | 0.014 ± 0.21 x$10^{-3}$ | 0.027 ± 0.25 x$10^{-3}$ |
| 2 | 0.033 ± 2.88 x$10^{-3}$ | 0.026 ± 4.49 x$10^{-3}$ | 0.023 ± 13.7 x$10^{-3}$ | 0.048 ± 3.16 x$10^{-3}$ |
| 3 | 0.038 ± 5.54 x$10^{-3}$ | 0.042 ± 0.63 x$10^{-3}$ | 0.038 ± 10.2 x$10^{-3}$ | 0.130 ± 9.96 x$10^{-3}$ |
| 4 | 0.059 ± 5.54 x$10^{-3}$ | 0.063 ± 3.11 x$10^{-3}$ | 0.055 ± 0.16 x$10^{-3}$ | 0.170 ± 17.9 x$10^{-3}$ |
| 5 | 0.095 ± 3.72 x$10^{-3}$ | 0.076 ± 6.53 x$10^{-3}$ | 0.074 ± 21.2 x$10^{-3}$ | 0.210 ± 18.1 x$10^{-3}$ |
| 6 | 0.108 ± 2.72 x$10^{-3}$ | 0.090 ± 4.48 x$10^{-3}$ | 0.089 ± 0 | 0.311 ± 33.4 x$10^{-3}$ |
| 7 | 0.114 ± 2.78 x$10^{-3}$ | 0.092 ± 11.1 x$10^{-3}$ | 0.097 ± 0 | 0.406 ± 7.49 x$10^{-3}$ |
| 8 | 0.126 ± 4.57 x$10^{-3}$ | 0.113 ± 8.41 x$10^{-3}$ | 0.108 ± 0.31 x$10^{-3}$ | 0.418 ± 13.1 x$10^{-3}$ |

ตารางที่ ข-18 ร้อยละปริมาณเมนทอลที่ปลดปล่อยออกจากผงแห้งที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 80%

| Release time (hour) | Relative menthol release (g released menthol/ g initial menthol in powder) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MD 0% | MD 10% (rice flour) | MD 10% (modified starch) | Commercial powder |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.027 ± 3.66 x$10^{-3}$ | 0.007 ± 0.27 x$10^{-3}$ | 0.008 ± 0 | 0.066 ± 3.80 x$10^{-3}$ |
| 2 | 0.048 ± 1.33 x$10^{-3}$ | 0.015 ± 1.89 x$10^{-3}$ | 0.024 ± 12.5 x$10^{-3}$ | 0.120 ± 3.53 x$10^{-3}$ |
| 3 | 0.065 ± 7.12 x$10^{-3}$ | 0.017 ± 2.05 x$10^{-3}$ | 0.031 ± 0 | 0.190 ± 8.73 x$10^{-3}$ |
| 4 | 0.078 ± 0.23 x$10^{-3}$ | 0.026 ± 1.00 x$10^{-3}$ | 0.046 ± 3.33 x$10^{-3}$ | 0.241 ± 3.59 x$10^{-3}$ |
| 5 | 0.102 ± 1.46 x$10^{-3}$ | 0.041 ± 0.16 x$10^{-3}$ | 0.058 ± 0 | 0.413 ± 34.5 x$10^{-3}$ |
| 6 | 0.125 ± 1.74 x$10^{-3}$ | 0.050 ± 0.08 x$10^{-3}$ | 0.063 ± 0 | 0.449 ± 8.31 x$10^{-3}$ |
| 7 | 0.145 ± 1.87 x$10^{-3}$ | 0.061 ± 0 | 0.072 ± 6.21 x$10^{-3}$ | 0.514 ± 3.43 x$10^{-3}$ |
| 8 | 0.168 ±1.68 x$10^{-3}$ | 0.064 ± 3.37 x$10^{-3}$ | 0.073 ± 11.3 x$10^{-3}$ | 0.609 ± 0.09 x$10^{-3}$ |

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว พิชญ์วิภา พรหมมาศ เกิดเมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน 2531 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554