# บทที่ 5

# วิจารณ์ผลการทดลอง

## 5.1 การผลิตขนมขบเคี้ยวจากข้าวโดยใช้กระบวนการผลิตในห้องปฏิบัติการ

ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมในประเทศญี่ปุ่น มีองค์ประกอบหลักเป็นข้าว มีวิธีการผลิตแตกต่างกันไปตามวัตถุดิบซึ่งทำให้คุณภาพแตกต่างกันไปด้วย หากใช้ข้าวเหนียวเป็นวัตถุดิบในการผลิตโดยทั่วไปจะเรียกว่า อาราเร่ หรือโอคากิ เวลารับประทานจะรู้สึกนุ่ม ละลายได้ง่ายในปาก แต่ถ้าใช้ข้าวเจ้าเป็นวัตถุดิบ จะเรียกว่า เซมเบ เวลากินจะรู้สึกแข็งและหยาบ ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากข้าวมีลักษณะกรอบพองซึ่งเกิดจากการขยายตัวของน้ำภายในชิ้นขนมเมื่อได้รับความร้อน ดังนั้นคุณภาพที่สำคัญสำหรับขนมขบเคี้ยวจากข้าวเหนียวจึงต้องมีลักษณะพองกรอบ เนื้อขนมมีลักษณะพรุน มีการพองตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น และมีกลิ่นหอมของข้าวในชิ้นผลิตภัณฑ์ จากการทดลองผลิตขนมขบเคี้ยวจากข้าวโดยใช้กระบวนการผลิตในห้องปฏิบัติการ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นแท่งกลม สีน้ำตาลอ่อน และมีการพองตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น ดังรูปที่ 4.1 ดังนั้นจึงใช้ภาวะกระบวนการผลิตในห้องปฏิบัติการสำหรับศึกษาภาวะกระบวนการผลิตที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของขนมขบเคี้ยวจากข้าวต่อไป

## 5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของวัตถุดิบ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า ใยอาหาร คาร์โบไฮเดรต อะไมโลส ความคงตัวของเจล (gel consistenscy) และค่าการสลายตัวของเมล็ดในด่าง (alkaline digestibility) ผลการวิเคราะห์พบว่า องค์ประกอบหลักที่สำคัญซึ่งพบในเมล็ดข้าวคือ พอลิแซกคาไรด์ หรือคาร์โบไฮเดรต รองลงมาคือ ความชื้น โปรตีนและไขมันตามลำดับ ซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณภาพของข้าว และการนำข้าวไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคาร์โบไฮเดรต ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในสัดส่วนต่าง ๆ ขึ้น

อยู่กับชนิดของข้าว ทำให้ข้าวมีลักษณะในการหุงต้มและคุณภาพในการรับประทานต่างกันไป สำหรับโปรตีนในข้าวยังนับว่าเป็นแหล่งอาหารหลักซึ่งประชาชนในทวีปเอเชียได้รับจากอาหาร (Chavan และ Duggal, 1978) ซึ่งโปรตีนจะก่อให้เกิดการเสื่อมเสีย ขณะเก็บรักษาเมล็ดข้าวรวมทั้งข้าวที่แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส พบว่าข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 มีปริมาณอะไมโลสเพียงร้อยละ 2.25 ซึ่งตรงกับการศึกษาของ Matz (1991) โดยพบว่าผลึกแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าร้อยละ 3 ดังนั้นองค์ประกอบหลักของผลึกแป้งในข้าวเหนียวคืออะไมโลเพคติน เมล็ดข้าวเหนียวจึงมีลักษณะสีขาวขุ่น เมื่อนึ่งแล้วได้ข้าวสุกที่มีลักษณะใสและเหนียวติดกัน ปริมาณของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่แตกต่างกัน ทำให้สมบัติของแป้งแตกต่างกันด้วย (Oates, 1997) ส่วนการวัดความคงตัวของเจล พบว่าระยะทางที่แป้งไหลไปเท่ากับ 97 มิลลิเมตร ซึ่งหมายถึงข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 เมื่อนำไปทำให้สุกจะได้เจลมีลักษณะแป้งสุกอ่อนหรือนุ่ม (Perez, 1979) ในขณะที่การวิเคราะห์ค่าการสลายตัวของเมล็ดในด่างพบว่า ข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 มีค่าเท่ากับ 6.60 ซึ่งหมายถึงแป้งข้าวเหนียวชนิดนี้มีอุณหภูมิแป้งสุก < 70 องศาเซลเซียส (Perez และคณะ, 1979)

<u>การศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงความหนืดในแป้งข้าวเหนียว กข6</u>

จากการวิเคราะห์รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของ paste ใน heating-cooling cycle ของแป้งข้าวเหนียว พบว่าแป้งข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 มีความหนืดสูงสุดที่ 793.33 BU มีความหนืดสุดท้ายที่ 640 BU มีค่า breakdown 346.66 BU และมีค่า setback -153.33 BU เมื่อน้ำแป้งได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน เม็ดแป้งบางส่วนพองตัวมากจนไม่มีโครงร่าง ทำให้อะไมโลสและอะไมโลเพคตินกระจายตัวสู่สารละลาย (Miller และคณะ, 1973) มีลักษณะข้นหนืดและใสขึ้น (Leach, 1965) เรียกว่า ความข้นหนืดของสตาร์ช (starch paste) ประกอบด้วยเม็ดแป้งที่ไม่พองตัว เม็ดแป้งที่พองตัวบางส่วน เม็ดแป้งที่พองตัว ชิ้นส่วนของเม็ดแป้งที่พองตัว กลุ่มของเม็ดแป้งที่พองตัว (swollen starch aggregates) และโมเลกุลของเม็ดแป้งที่เคลื่อนที่เข้าใกล้กันและจับตัวกันตกตะกอนลงมา (retrogradation)

เมื่อปล่อยให้เจลแป้งที่ข้นหนืดนี้เย็นลง อาจจะยังคงเป็นสารละลายข้นหนืด (sol) หรือเป็นเจล (gel) ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของน้ำในส่วนผสม ถ้ามีปริมาณน้ำมากจะเป็นสารละลายข้นหนืด แต่ถ้ามีปริมาณน้ำน้อยจะเกิดเจลได้ทันที (Kerr, 1950) โมเลกุลอะไมโลสมีความสำคัญในการจับตัวกันเพื่อเกิดเป็นเจล เนื่องจากโมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรงจับตัวกันได้ง่ายกว่าอะไมโลเพคตินที่เป็นกิ่งก้าน (Zobel, 1984) แป้งข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 มีความหนืดสูง แสดงว่าแป้งข้าวเหนียวมีความสามารถในการพองตัวได้สูง (Swinkel, 1985) มีค่า breakdown สูงแสดงถึงเสถียรภาพของเม็ดแป้ง

ขณะพองตัวดี คือเม็ดแป้งจะไม่แตกง่ายขณะให้ความร้อน ในขณะที่มีค่า setback ติดลบ หมายถึง แป้งข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 เกิดการคืนตัวของแป้งสุก หรือรีโทรกราเดชั่นน้อยมาก หรือแทบไม่มีเลย แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวมากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง (Sanders, 1996)

**ผลของภาวะกระบวนการผลิตที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของขนมขบเคี้ยวที่ทำจากข้าว**

5.3 ผลของระยะเวลาในการแช่ข้าวต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

จากการแปรระยะเวลาในการแช่ข้าวเป็น 6 ระดับคือ 1 3 5 7 9 และ 11 ชั่วโมง ข้าวที่ได้นำไปโม่เป็นแป้งแล้วนำมาทำผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้นำมาตรวจสอบสมบัติทางด้านความหนาแน่น (bulk density) ปริมาตรการพองตัว (volume expansion) และค่าความแข็ง (hardness) ได้ผลดังรูปที่ 4.3 – 4.5 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

ความหนาแน่น (bulk density) และปริมาตรการพองตัว (volume expansion) พบว่าระยะเวลาในการแช่เย็นมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นและปริมาตรการพองตัวแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิต ($p \leq 0.05$) (ตาราง จ.1) โดยเมื่อระยะเวลาในการแช่นานขึ้นความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาตรการพองตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวมีสมบัติในการดูดซึมน้ำแตกต่างกัน คือบริเวณใจกลางเมล็ด จะมีสมบัติ inelastic ที่ดูดซึมน้ำได้น้อย ในขณะที่บริเวณด้านนอกของเมล็ดจะมีสมบัติ elastic ซึ่งสามารถดูดและคายความชื้นได้ดี (Yamamoto, 1995) ดังนั้นในการใช้เวลาแช่ข้าวน้อยกว่าทำให้น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปได้เพียงชั้นนอกของข้าวเท่านั้น แต่ภายในเมล็ดข้าวยังไม่มีการซึมของน้ำเข้าไปอย่างทั่วถึง ดังนั้นเมื่อนำข้าวมาบดจะเกิดลักษณะการบด 2 แบบได้แก่ การบดแห้งและการบดเปียก โดยส่วนภายนอกของเมล็ดที่น้ำซึมผ่านเข้าไปได้เร็วกว่าจะเป็นลักษณะการบดเปียก ส่วนภายในซึ่งน้ำซึมผ่านเข้าไปได้น้อยหรือเพียงบางส่วนจะเป็นลักษณะการบดแบบแห้งทำให้เม็ดแป้ง (starch granule) บางส่วนถูกทำลาย และโปรตีนบางส่วนเกิดการเสียสภาพ (denature) จึงส่งผลที่ไม่ดีต่อผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Jomduang และ Mohamed, 1994) แต่เมื่อเวลาการแช่ข้าวนานขึ้นการซึมผ่านของน้ำเข้าไปยังภายในเมล็ดข้าวจะมากขึ้น ทำให้ได้ลักษณะการบดเปียกทั้งหมด จึงเกิดความร้อนจากการบดน้อยกว่าเม็ดแป้ง (starch granule) ไม่ถูกทำลาย จึงส่งผลที่ดีต่อผลิตภัณฑ์สุดท้ายด้วย

ความแข็ง (hardness) พบว่าระยะเวลาในการแช่ข้าวมีผลให้ความแข็งของผลิตภัณฑ์แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตาราง จ.1) โดยเมื่อระยะเวลาในการแช่นานขึ้นความแข็งมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากข้าวที่ใช้เวลาแช่น้อย ในส่วนของใจกลางเม็ดข้าวไม่มีความสมดุลของน้ำที่เหมาะสม เมื่อบดออกมาเป็นแป้งบางส่วนของเม็ดแป้งยังไม่เกิดการดูดซึมน้ำเข้าไปในโมเลกุลจึงมีลักษณะผลึกภายในที่เกาะตัวกันอย่างหนาแน่น (Osman, 1967) ดังนั้นเมื่อนำไปทำผลิตภัณฑ์ส่วนของเม็ดแป้งที่มีการจับตัวกันของโครงสร้างภายในอย่างหนาแน่นจะเกิดการเจลาติไนเซชั่นไม่สมบูรณ์ เกิดเป็นลักษณะไตขาวภายในผลิตภัณฑ์ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นโดยใช้เวลาแช่ข้าวน้อยกว่ามีลักษณะผลิตภัณฑ์ที่แข็งกว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากข้าวที่ใช้เวลาแช่เหมาะสม

5.3.2 การประเมินผลทางประสาทสัมผัส

จากการทดลองนำข้าวที่แปรระยะเวลาในการแช่ต่างกัน ไปผลิตผลิตภัณฑ์และประเมินผลทางประสาทสัมผัสในด้าน ความกรอบ (cruchiness) ลักษณะการละลายในปาก (melting in mouth) ลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์ (grain texture) กลิ่นหอมของข้าว (odor) และการยอมรับรวม (total acceptance) พบว่า ระยะเวลาในการแช่ข้าวไม่มีผลต่อคะแนนด้านความกรอบ ลักษณะการละลายในปาก และกลิ่นหอมของข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (ตาราง จ.2) แต่จะมีผลต่อคะแนนด้านลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์ และการยอมรับรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยคะแนนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการแช่ข้าวเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้าวที่แช่นานจะมีปริมาตรการพองตัวค่อนข้างสูง มีผลให้ความหนาแน่นของโมเลกุลแป้งที่อยู่ล้อมรอบ air cell ลดลง ผลิตภัณฑ์ที่มีความพองตัวสูงจึงให้ลักษณะความกรอบสูงเช่นเดียวกัน (Mohamed และคณะ, 1989) ส่วนลักษณะการละลายในปากและลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์จะให้ค่าที่สูงในผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากข้าวที่ผ่านการแช่ที่ระยะเวลาสูงกว่า เพราะผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะสม่ำเสมอ และไม่มีส่วนของแป้งที่เกิดเจลาติไนเซชั่นไม่สมบูรณ์หลงเหลืออยู่อีก

5.3.3 ผลการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้งด้วย DSC

การศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้งด้วย DSC นั้นเพื่อเปรียบเทียบผลของระยะเวลาแช่ข้าวที่ต่างกันต่อการเกิดลักษณะผลึกโครงสร้างใหม่ในแป้งที่ได้จากชิ้นขนมหลังผ่านการแช่เย็นโดยใช้เวลาแช่ต่างกัน พบว่า peak ที่เกิดขึ้นใหม่ไม่ได้เป็น peak ที่เกิดจากพลังงานในการสลายพันธะภายในผลึกของเม็ดแป้งดิบ โดยพบว่าแป้งดิบจะเกิด peak ของพลังงานในการสลายผลึกที่ช่วงอุณหภูมิ 59.9 - 78.5 องศาเซลเซียส ส่วนตัวอย่างแป้งที่ได้จากชิ้นขนมหลังผ่านการแช่เย็นโดยใช้เวลาแช่ข้าวต่างกันจะให้ peak ของพลังงานในการสลายพันธะที่ช่วงอุณหภูมิ 36.5 - 60.7 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Paredes และคณะ (1994) และพบว่าพลังงานในการสลายผลึก ($\Delta H$) มีแนวโน้มสูงขึ้นในตัวอย่างแป้งที่ได้จากชิ้นขนมหลังผ่าน

การแช่เย็นจากเวลาในการแช่ข้าวที่ต่างกัน เนื่องจากการใช้เวลาแช่ข้าวที่น้อยกว่า จะพบผลึกแป้งบางส่วนเหลืออยู่ในชิ้นขนมหลังผ่านการแช่เย็น เนื่องจากการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งไม่สมบูรณ์ ดังนั้นในตัวอย่างแป้งจะมีผลึกของแป้งที่ยังไม่เกิดเจลาติไนเซชั่นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการแช่ข้าวที่ลดลง เมื่อนำไปวัดค่าพลังงานในการสลายผลึกจึงให้ค่าน้อย เพราะจำนวนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่แตกออกมาจากเม็ดแป้งมีจำนวนน้อยกว่าจึงไม่สามารถสร้างโครงร่างผลึกขึ้นใหม่ในภาวะที่เหมาะสมได้ (Watanabe และคณะ, 1999)

ดังนั้นในการศึกษาระยะเวลาในการแช่ข้าวที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ จะเลือกที่ภาวะที่ใช้ระยะเวลาในการแช่ 9 ชั่วโมง เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นต่ำ มีปริมาตรการพองตัวสูง มีความแข็งต่ำ และได้รับคะแนนด้านลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์ และการยอมรับรวมอยู่ในเกณฑ์ดี โดยภาวะดังกล่าวจะมีค่าพลังงานในการหลอมเหลวผลึก ($\Delta H$) ของแป้งที่ได้จากชิ้นขนมหลังผ่านการแช่เย็นคือ 6.75 cal/g จากการตรวจสอบด้วย DSC

5.4 <u>ผลของอุณหภูมิและเวลาในการนึ่งแป้งต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์</u>

จากการทดลองนึ่งแป้งด้วยไอน้ำ แล้วแปรอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้งเป็น 3 ระดับคือที่อุณหภูมิ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียสแปรเวลาเป็น 10 20 และ 30 นาที แล้วนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้นำมาตรวจสอบสมบัติทางด้าน ความหนาแน่น ปริมาตรการพองตัว และค่าความแข็ง ได้ผลดังรูปที่ 4.7 – 4.9 ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

5.4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

ความหนาแน่น และปริมาตรการพองตัว พบว่าอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้งและเวลาในการนึ่งมีผลทำให้ค่าความหนาแน่น และปริมาตรการพองตัวของผลิตภัณฑ์แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) (ตาราง จ.3) โดยเมื่ออุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้งและเวลาในการนึ่งเพิ่มขึ้นความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาตรการพองตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้งและเวลาในการนึ่ง ส่งผลให้แป้งนึ่งที่ได้เกิดเจลาติไนเซชั่นที่สมบูรณ์ ซึ่งเกิดจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีส่วนหนึ่งของโมเลกุลจับตัวกับโมเลกุลอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้กัน และหากมีการจับตัวกันมากกว่า 2 ตำแหน่งก็จะเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เจลมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีโมเลกุลอื่น ๆ มาจับที่เดิมที่จุดเดียวกันอีก และมีการจับตัวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยตำแหน่งที่จับตัวกันนั้นจะแตกต่างกันออกไป ด้วยเหตุนี้แต่ละโมเลกุลจึงจับกันกับโมเลกุลอื่น ๆ มากกว่า 1 ตำแหน่ง ทำให้เกิดโครงสร้างเหมือนร่างแห 3 ทิศทาง โดยมีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ทั่วไป โครงสร้างที่เกิดขึ้นเรียกว่าเจล (Whistler และ Daniel, 1990) ดังนั้นเจลที่สมบูรณ์จึงมีน้ำแทรกอยู่ใน

โครงสร้างของแป้งโดยทั่วไป ส่วนอุณหภูมิและเวลาในการนึ่งที่ไม่เหมาะสมซึ่งเกิดจากอุณหภูมิและเวลาในการนึ่งไม่เพียงพอทำให้เจลที่ได้ไม่สมบูรณ์ จึงไม่สามารถรองรับการพองตัวของผลิตภัณฑ์ขณะได้รับความร้อนและขยายตัวของน้ำที่แทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลได้อย่างเหมาะสม จึงทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีลักษณะที่ไม่ดีด้วย

- ความแข็ง พบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้ง จะมีผลให้ความแข็งของผลิตภัณฑ์แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (ตาราง จ.3) โดยพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งที่มีอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้ง 80 และ 90 องศาเซลเซียสมีค่าความแข็งต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งที่มีอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้ง 70 องศาเซลเซียสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (ตาราง 4.5) เนื่องจากอุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เกิดกระบวนการเจลาติไนเซชั่นที่สมบูรณ์ คือเม็ดแป้งได้รับความร้อนจนมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้พันธะไฮโดรเจนแตกออกจากกัน จึงทำให้การจับตัวกันระหว่างโมเลกุลในเม็ดแป้งในส่วนโครงสร้างผลึกคลายตัวลง น้ำสามารถเข้าไปในโมเลกุลของเม็ดแป้งได้ (Osman, 1967) เมื่อน้ำแป้งได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชั่น เม็ดแป้งบางส่วนพองตัวมากจนไม่มีโครงร่าง ทำให้อะไมโลสและอะไมโลเพคตินกระจายตัวสู่สารละลาย (Miller และคณะ, 1973) จึงมีลักษณะเจลที่สมบูรณ์มีน้ำแทรกอยู่ในโครงสร้างของแป้งโดยทั่วไป และไม่พบส่วนของผลึกแป้งเหลืออยู่อีกเมื่อนำไปทำผลิตภัณฑ์จึงมีความแข็งต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากเจลแป้งที่ไม่สมบูรณ์คือแป้งที่มีอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้ง 70 องศาเซลเซียส

5.4.2 การประเมินผลทางประสาทสัมผัส

จากการทดลองนำแป้งที่แปรอุณหภูมิและเวลาในการนึ่งที่ต่างกัน มาผลิตผลิตภัณฑ์และประเมินผลทางประสาทสัมผัสในด้าน ความกรอบ ลักษณะการละลายในปาก ลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์ กลิ่น และการยอมรับรวม พบว่าอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้งและเวลาในการนึ่งแป้งมีผลต่อคะแนนด้านการยอมรับรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตาราง จ.4) และอิทธิพลของอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้งมีผลทำให้คะแนนด้านความกรอบ ลักษณะการละลายในปาก ลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์ และกลิ่นหอมของข้าวแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตาราง จ.4) โดยจากตาราง 4.7 พบว่าเมื่ออุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้งเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้คะแนนด้านความกรอบ ลักษณะการละลายในปาก ลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์และกลิ่นหอมของข้าวเพิ่มขึ้น โดยพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งนึ่งที่อุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้ง 80 และ 90 องศาเซลเซียส มีคะแนนทางประสาทสัมผัสในด้านความกรอบ ลักษณะการละลายในปาก ลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์ และกลิ่นหอมของข้าวสูงและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัย

สำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$ ) เนื่องจากอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้งที่สูงขึ้นทำให้แป้งเกิดเจลที่สมบูรณ์ ซึ่งให้ลักษณะของการกระจายตัวของไอน้ำที่สม่ำเสมอในชิ้นผลิตภัณฑ์ก่อนการพองตัว ดังนั้นเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปย่าง ทำให้ลักษณะการพองตัวของผลิตภัณฑ์สม่ำเสมอจากการขยายตัวของไอน้ำในชิ้นผลิตภัณฑ์ทำให้มีลักษณะพรุนโดยทั่วไปในผลิตภัณฑ์ (Matz, 1984) ทำให้คะแนนด้านความกรอบและลักษณะการละลายในปากมีค่าสูง เนื่องจากไม่มีส่วนของเม็ดแป้งที่เจลาติไนเซชั่นไม่สมบูรณ์หลงเหลืออยู่อีก จึงให้ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ดีเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

5.4.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ด้วยกล้อง SEM

การศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ด้วยกล้อง SEM นั้นเพื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้งและเวลาในการนึ่งแป้งที่ต่างกันมีผลต่อลักษณะโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์อย่างไร พบว่าที่อุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้ง 70 องศาเซลเซียสทุกระดับเวลา และ 80 องศาเซลเซียส 10 นาทียังพบผลึกของแป้งที่สมบูรณ์หลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากอุณหภูมิและเวลาดังกล่าวไม่เพียงพอต่อการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งที่สมบูรณ์ หรือไม่เพียงพอต่อการเกิดเจลที่เหมาะสม ซึ่งอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนเซชั่นที่สมบูรณ์ต้องทำให้โมเลกุลของแป้งในส่วนผลึก (crystalline) คลายตัวลงเกิดปฏิกิริยาดูดซับน้ำและเกิดการขยายตัวของเม็ดแป้งที่ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) ส่วนอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้ง 80 องศาเซลเซียส เวลา 20 และ 30 นาที พบผลึกของแป้งส่วนที่ดูดน้ำเข้าไปจนมีลักษณะพองและบางส่วนเกิดการแตกออกและหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์หนึ่งก่อนการเกิดเจลาติไนเซชั่นที่สมบูรณ์ (Leach, 1965) ในขณะที่อุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้ง 90 องศาเซลเซียสทุกระดับเวลา ไม่พบส่วนของผลึกแป้งหรือเม็ดแป้งที่พองตัวหลงเหลืออยู่อีก ซึ่งหมายถึงเกิดเจลาติไนเซชั่นที่สมบูรณ์ เป็นระยะที่ร่างแหระหว่างไมเซลล์ (micelles) อ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย และเม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้างไป (Sanders, 1996)

5.4.4 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้งด้วย DSC

การศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้งด้วย DSC นั้นเพื่อตรวจสอบว่าอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้งและเวลาในการนึ่งแป้งที่ต่างกัน มีผลต่อการทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงร่างผลึกของแป้งอย่างไร พบว่าอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้ง 70 องศาเซลเซียสทุกระดับเวลา และ 80 องศาเซลเซียส 10 นาที ไม่เพียงพอต่อการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งที่สมบูรณ์ เนื่องจากยังพบ peak ของพลังงานในการหลอมละลายผลึกปรากฏอยู่ ส่วนอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้ง 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 และ 30 นาที รวมถึงอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้ง 90 องศาเซลเซียสทุกระดับเวลานั้นเพียงพอต่อการเกิดเจลที่สมบูรณ์ของแป้ง เนื่องจากเป็นภาวะที่

สามารถทำลายพันธะในเม็ดแป้งได้ทั้งหมด จึงไม่พบ peak ปรากฏขึ้นอีกที่อุณหภูมิและเวลาดังกล่าว ส่วนช่วงของอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลง (onset temperature) มีแนวโน้มให้ค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับช่วงอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลง (onset temperature ) ของแป้งดิบ โดย peak ของพลังงานในการสลายผลึก ($\Delta H$) ของแป้งดิบอยู่ในช่วง 61.2 - 80.3 องศาเซลเซียส ส่วนตัวอย่างแป้งที่ได้จากอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้งและเวลาในการนึ่งต่างกันจะเกิด peak ของพลังงานในการสลายผลึกที่ช่วงอุณหภูมิ 79.2 -95.5 องศาเซลเซียส โดยมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับแป้งดิบซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Watanabe และคณะ (1994) ซึ่งพบว่าแป้งนึ่งที่มีอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้ง 80 องศาเซลเซียส ไม่เพียงพอในการเกิดเจลที่สมบูรณ์

ดังนั้นในการศึกษาการนึ่งแป้งด้วยไอน้ำที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ จะเลือกภาวะที่จุดกึ่งกลางก้อนแป้งมีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสใช้เวลานึ่ง 10 นาที ซึ่งเป็นภาวะต่ำสุดที่ก่อให้เกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งที่สมบูรณ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ มีปริมาตรการพองตัวสูงโดยไม่แตกต่างกับผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งที่มีอุณหภูมิจุดกึ่งกลางก้อนแป้ง 90 องศาเซลเซียส เวลา 20 และ 30 นาทีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และมีคะแนนทางประสาทสัมผัสด้านการยอมรับรวมสูง โดยภาวะดังกล่าวก้อนแป้งที่ได้จากการตรวจด้วยกล้อง SEM พบว่ามีลักษณะพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีผลึกของเม็ดแป้งหลงเหลืออยู่ และไม่พบ peak ของพลังงานในการหลอมเหลวผลึก ($\Delta H$) จากการตรวจสอบด้วย DSC

5.5 <u>ผลของเวลาในการนวดแป้งต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์</u>

จากการแปรระยะเวลาในการนวดแป้งเป็น 6 ระดับคือ 0 2 4 6 8 และ 10 นาที แล้วนำมาผลิตผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้นำมาตรวจสอบสมบัติทางด้าน ความหนาแน่น ปริมาตรการพองตัว และค่าความแข็ง ได้ผลดังรูปที่ 4.20 – 4.22 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.5.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

ความหนาแน่น และปริมาตรการพองตัว พบว่าอิทธิพลของระยะเวลาในการนวดมีผลให้ค่าความหนาแน่น และปริมาตรการพองตัวของผลิตภัณฑ์แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตาราง จ.5) โดยเมื่อระยะเวลาในการนวดนานขึ้นความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาตรการพองตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการนวดเป็นการเพิ่มอากาศเข้าไปในผลิตภัณฑ์ โดยการนวดที่เหมาะสมจะทำให้ฟองอากาศมีจำนวนมากและมีขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะสามารถลดความหนืดของแป้งและทำให้แป้งมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น เพื่อรองรับการขยายตัวของอากาศขณะนำไปให้ความร้อนด้วยการย่าง (Horiuchi, 1980) ส่วน Jomduang (1994) พบว่า ในการทำข้าวเกรียบว่าว dough ของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการนวดจะให้ลักษณะทาง

กายภาพในด้าน hardness thickness และ expansion ratio ที่ดีกว่า dough ที่ไม่ผ่านการนวด เนื่องจาก dough ที่ผ่านการนวดจะได้รับแรงเฉือนจากการนวดซึ่งจะไปทำลายเม็ดแป้ง (starch granule) ใน dough ทำให้ความหนืดของ dough ลดลง มีความยืดหยุ่นสูงมากขึ้น จึงทำให้ไอน้ำใน dough ขยายตัวได้ง่าย ทำให้โครงสร้างขยายตัวเกิดลักษณะเป็นโพรงจำนวนมาก ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการพองตัวที่ดีกว่า dough ที่ไม่ผ่านการนวด ซึ่งกลไกในการพองตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในขณะที่แป้งมีความชื้นต่ำ คือเกิดการสร้างไอน้ำและทำให้แกสขยายตัวภายในก้อนแป้งสุก ไอน้ำและอากาศจะถูกเก็บกักไว้อยู่ภายในจนเกิดแรงดันที่สูงมากเมื่อโครงสร้างของก้อนแป้งอ่อนตัวลง ไอน้ำและแกสจะหนีออกอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการขยายตัวและเหลือเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนไว้ การที่ผลิตภัณฑ์จะพองตัวได้ดีนั้น จะต้องอาศัยปัจจัยหลายประการ เช่น การเกิดไอน้ำและการขยายตัวของแกสจะต้องเกิดขึ้นก่อนการอ่อนตัวของแป้ง โดยมีช่วงระยะเวลาที่เหมาะสม กล่าวคือไอน้ำและการขยายตัวของแกสที่เกิดขึ้นจะต้องมีแรงดันสูงมากพอก่อนที่แป้งจะอ่อนตัวลง การพองตัวจึงจะเกิดขึ้นได้มาก การเกิดไอน้ำช้าเกินไป เช่นอุณหภูมิต่ำเกินไปไอน้ำจะเกิดขึ้นก่อนการอ่อนตัวมาก ไอน้ำส่วนหนึ่งจึงหนีออกไปก่อน แรงดันที่เหลืออยู่จึงไม่มากนัก การพองตัวของผลิตภัณฑ์จึงมีน้อยลง หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า การเกิดไอน้ำจะต้องรวดเร็วพอจนกระทั่งมีแรงดันมากพอก่อนการอ่อนตัวของแป้ง (Li และ Luh, 1980) ดังนั้นเวลาในการนวดจึงมีบทบาทสำคัญในการกระจายตัวของน้ำในก้อนแป้ง และช่วยกระจายฟองอากาศให้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นของผลิตภัณฑ์

ความแข็ง พบว่าระยะเวลาในการนวดแป้งมีผลให้ความแข็งของผลิตภัณฑ์แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตาราง จ.5) โดยผลิตภัณฑ์มีความแข็งสูงในทุกระยะเวลาการนวด ยกเว้นที่เวลาในการนวด 8 นาที ผลิตภัณฑ์มีความแข็งต่ำกว่าเวลาการนวดอื่น แต่พบว่าค่าความแข็งที่ได้มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการนวดที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งที่ผ่านการนวดนานจะมีเนื้อขนมค่อนข้างพรุนมากกว่าจากการขยายตัวของอากาศและไอน้ำภายในชิ้นขนม ดังนั้นจึงส่งผลให้ใช้แรงน้อยกว่าในการทำให้ขนมแตกออกจากการวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture analyzer)

5.5.2 การประเมินผลทางประสาทสัมผัส

จากการทดลองนำแป้งที่แปรระยะเวลาในการนวดต่างกัน ไปผลิตผลิตภัณฑ์ และประเมินผลทางประสาทสัมผัสในด้านความกรอบ ลักษณะการละลายในปาก ลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์ กลิ่นหอมของข้าว และการยอมรับรวม พบว่าอิทธิพลของระยะเวลาในการนวดแป้งมีผลต่อคะแนนด้านความกรอบ ลักษณะการละลายในปาก ลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์ กลิ่นหอมของข้าว และการยอมรับรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตาราง จ.6) โดยคะแนนมีแนวโน้ม

เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการนวดแป้งนานขึ้น โดยเวลาในการนวด 10 นาทีให้คะแนนด้านลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์สูงที่สุด ส่วนระยะเวลาในการนวด 2 4 6 8 และ 10 นาที ให้คะแนนด้านกลิ่นหอมของข้าวสูงแต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ระยะเวลาในการนวดที่ 6 8 และ 10 นาทีจะได้คะแนนด้านความกรอบ ลักษณะการละลายในปาก และการยอมรับรวมสูงแต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากเวลาในการนวด 6 นาทีเป็นระยะเวลาที่ทำให้แป้งมีฟองอากาศจำนวนมากเกิดขึ้น และฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กสม่ำเสมอและกระจายอยู่ทั่วไป ทำให้แป้งมีลักษณะยืดหยุ่นพอเหมาะและสามารถรองรับการขยายตัวของแรงดันภายในได้อย่างดี ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการพองตัวที่สม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งชิ้นผลิตภัณฑ์ ส่วนเวลาในการนวดที่เพิ่มขึ้นเกินกว่า 6 นาทีนอกจากจะไม่เพิ่มจำนวนฟองอากาศให้กับผลิตภัณฑ์แล้วยังอาจทำลายโครงสร้างภายในก้อนแป้งก็เป็นได้ จากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการนวด และความร้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กจำนวนมากถูกแรงเฉือนทำให้เกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศทำให้ขนาดเล็กใหญ่ไม่สม่ำเสมอกัน และมีบางส่วนแตกออกรวมทั้งทำให้โครงสร้างของแป้งอ่อนตัวลงความยืดหยุ่นก็ลดน้อยลงด้วย ดังนั้นเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการพองตัวโพรงอากาศขนาดใหญ่จะขยายตัวได้น้อย และไอน้ำที่เกิดขึ้นจะหนีไปทางใดทางหนึ่งทำให้การพองตัวเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ และเกิดช่องอากาศขนาดใหญ่ จึงทำให้คะแนนทางประสาทสัมผัสในด้านการยอมรับรวมเมื่อเวลาในการนวดสูงมากขึ้นมีค่าน้อยลง

5.5.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในก้อนแป้ง (โมจิ) ด้วยกล้อง SEM

การศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ด้วยกล้อง SEM นั้นเพื่อเปรียบเทียบผลของเวลาในการนวดแป้งที่ต่างกันมีผลต่อลักษณะโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์อย่างไร พบว่าที่กำลังขยาย 200 เท่า เวลาในการนวดแป้งที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อจำนวนโพรงอากาศในผลิตภัณฑ์โดยจะพบโพรงอากาศจำนวนมากขึ้นเมื่อเวลาในการนวดเพิ่มมากขึ้น และจะพบจำนวนโพรงอากาศสูงมากที่สุดที่เวลาในการนวด 6 นาที ซึ่งโพรงอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก และกระจายตัวอยู่ทั่วไปอย่างสม่ำเสมอ ส่วนเวลาในการนวดที่ต่ำกว่า 6 นาที โพรงอากาศมีจำนวนน้อยลงตามลำดับ และขนาดของโพรงอากาศก็ค่อนข้างใหญ่และไม่สม่ำเสมอ ส่วนที่เวลาในการนวด 8 นาที พบว่าโพรงอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานจากการนวด ทำให้ฟองอากาศบางส่วนเชื่อมต่อกันจากการทำลายโครงสร้างของแป้ง และมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในขณะที่เวลาในการนวด 10 นาทีแสดงให้เห็นถึงฟองอากาศขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นจากหลอมรวมกันของฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก และมีบางส่วนของแป้งที่ถูกทำลายจากแรงเสียดทานจากการนวดกระจายอยู่โดยทั่วไป เมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 2000 เท่า พบว่าที่เวลาในการนวดน้อยกว่า 6 นาทีโครงสร้างของแป้งค่อนข้างมีลักษณะ

คล้ายกับส่วนของผลึกแป้งที่พองตัวและแตกออกมาหลอมรวมกันสร้างเป็นโครงสร้างใหม่ และมีลักษณะบางแห่งคล้ายส่วนของผลึกแป้งหลงเหลืออยู่ ส่วนเวลาในการนวด 6 นาที พบว่ามีลักษณะของโพรงอากาศปรากฏอย่างชัดเจนโดยโพรงอากาศที่ได้มีลักษณะสม่ำเสมอและกระจายตัวอยู่โดยทั่วไป ส่วนเวลาในการนวด 8 นาที พบว่าโพรงอากาศค่อนข้างมีขนาดใหญ่ และส่วนเชื่อมต่อระหว่างโพรงอากาศก็มีลักษณะถูกทำลายจากแรงเสียดทานของการนวดด้วย ในขณะที่เวลาในการนวด 10 นาทีจะพบลักษณะโครงสร้างของแป้งที่ถูกทำลายด้วยแรงเสียดทานจากการนวดกระจายอยู่โดยทั่วไป และพบโพรงอากาศขนาดเล็กและมีจำนวนน้อยมาก

ดังนั้นในการศึกษาระยะเวลาในการนวดแป้งที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ จะเลือกภาวะที่ใช้ระยะเวลาในการนวดแป้งที่ 6 นาที ซึ่งเป็นภาวะต่ำสุดสำหรับการสร้างโพรงอากาศในก้อนแป้งที่เหมาะสมสำหรับรองรับการพองตัวของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ และมีปริมาตรการพองตัวค่อนข้างสูง และได้รับคะแนนด้านความกรอบ และการยอมรับรวมอยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยไม่แตกต่างกับเวลาในการนวด 8 และ 10 นาที โดยภาวะดังกล่าวก้อนแป้ง (โมจิ) ที่ได้จากการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM พบว่ามีโพรงอากาศขนาดเล็กจำนวนมากกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอภายในก้อนแป้ง (โมจิ)

5.6 <u>ผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่เย็นแป้งต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์</u>

จากการแปรอุณหภูมิในการแช่เย็นแป้ง (โมจิ) เป็น 4 ระดับคือ 10 5 0 และ -5 องศาเซลเซียส และแปรเวลาเป็น 3 ระดับคือ 1 2 และ 3 วัน แล้วนำแป้งมาผลิตผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้นำมาตรวจสอบสมบัติทางด้าน ความหนาแน่น ปริมาตรการพองตัว และค่าความแข็ง ได้ผลดังรูปที่ 4.35 – 4.37 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.6.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

ความหนาแน่น และปริมาตรการพองตัว พบว่าอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและเวลาในการแช่เย็นแป้งมีผลทำให้ความหนาแน่น และปริมาตรการพองตัวของผลิตภัณฑ์แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตาราง จ.7) โดยพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เวลา 1 วัน ไม่สามารถทำเป็นผลิตภัณฑ์ได้เนื่องจากแป้งที่ได้ไม่คงรูปมีลักษณะเหนียวเยิ้มไม่เป็นรูปร่าง จึงไม่สามารถตัดให้ได้ขนาดตามต้องการ จึงไม่มีผลทดสอบทางกายภาพและทางประสาทสัมผัส ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งแช่เย็นที่ -5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 และ 2 วัน จะมีความหนาแน่นสูง และไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$ ) ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งแช่เย็นที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสทุกระดับเวลาจะมีความหนาแน่นต่ำ ในขณะที่ อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการแช่เย็นแป้งมีผลทำให้ปริมาตรการพองตัวแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$ ) (ตาราง จ.7) โดยพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งแช่เย็นที่อุณหภูมิ 0 องศา

เซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน จะมีปริมาตรการพองตัวสูงสุด ($p \leq 0.05$ ) ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งแช่เย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วัน 5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน และ -5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน จะมีปริมาตรการพองตัวต่ำและไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$ ) เนื่องจากอุณหภูมิในการแช่เย็น 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน มีลักษณะของแป้งค่อนข้างนุ่มคงตัวน้อย ตัดทำรูปร่างได้ยากจึงไม่เหมาะในกระบวนการผลิตส่วนที่อุณหภูมิแช่เย็น –5 องศาเซลเซียสทุกระดับเวลา แป้งที่ได้ค่อนข้างแข็งมากยากต่อการตัดเป็นชิ้นให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ และเมื่อทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องสักครู่แป้งจะอ่อนตัวลงมีลักษณะเหนอะหนะไม่คงตัวยากต่อกระบวนการผลิตเช่นเดียวกัน ซึ่งส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพโดยจะให้ความหนาแน่นสูง และมีปริมาตรการพองตัวที่ต่ำปรากฏการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับการเกิดรีโทรเกรดหรือการคืนตัวของแป้ง (retrogradation) กลไกการเกิดรีโทรกราเดชั่นของแป้ง เป็นกระบวนการเกิดผลึกของแป้งที่เกิดเจลาติไนเซชั่นแล้วมีอุณหภูมิลดลง มีผลทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอะไมโลสเข้าใกล้กันและจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลอะไมโลสในน้ำแป้งจากเดิมที่เป็นอสัณฐานไปเป็นผลึก (Eliasson, 1996) โมเลกุลอะไมโลสที่ละลายอยู่จะจัดเรียงตัวกันระหว่างสาย ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสาย สายโมเลกุลจะเกาะเข้าด้วยกันเกิดการรวมกลุ่ม (aggregration) แล้วไม่ละลายน้ำ สายที่รวมกลุ่มเหล่านี้จะจับของเหลวเข้าไว้ ในตาข่ายของโมเลกุลทำให้เกิดเป็นเจล (Sanders, 1996) โมเลกุล อะไมโลสในเม็ดแป้งจะมีขนาดไม่เท่ากัน อัตราการคืนตัวจะเกิดเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความยาวของโมเลกุล โดยสายยาวจะเคลื่อนที่ไปใกล้กันได้ยากและไม่สามารถเรียงตัวขนานกันได้ตลอดความยาวสายโมเลกุล ส่วนโมเลกุลขนาดเล็กจะไม่สามารถเกาะตัวกันได้ดี เนื่องจากมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาและไม่มีทิศทางแน่นอนแบบบราวเนียน (brownian) ทำให้รวมตัวกันได้ยาก (Collision, 1968) ดังนั้นในการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิในการแช่เย็นที่ 10 องศาเซลเซียสให้ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ไม่ค่อยดีคือมีความหนาแน่นค่อนข้างสูงและปริมาตรการพองตัวต่ำเนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวสูงเกินไป แป้งที่ได้มีความคงตัวต่ำตัดเป็นชิ้นได้ไม่สม่ำเสมอซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ นิอร และ สมชาย (2541) ซึ่งรายงานว่าโดข้าวเหนียวที่ผ่านการนึ่งสุกแล้วนำมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 27 5 และ –22 องศาเซลเซียส พบว่าโดที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียสผิวหน้าของโดจะมีลักษณะแห้งแข็ง แต่ด้านในยังคงชื้นเหนียวเมื่อทำการหั่นด้วยเครื่องหั่นข้าวเกรียบจึงทำให้ชิ้นโดเหนียวติดใบมีดจนไม่สามารถหั่นเป็นชิ้นได้ ส่วนโดที่เก็บที่อุณหภูมิ –22 องศาเซลเซียสจะได้โดที่แข็ง และยิ่งใช้ระยะเวลาในการเก็บนานขึ้นโดจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นจนไม่สามารถหั่นได้ด้วยเครื่องหั่นข้าวเกรียบ พบว่าชิ้นโดจะเหนียวติดใบมีดทำให้ชิ้นโดที่ได้ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับการทดลองที่อุณหภูมิแช่เย็น –5 องศา

เซลเซียส ในทุกระดับเวลา เนื่องจากถ้าเก็บสารละลายแป้งที่อุณหภูมิแช่เยือกแข็ง น้ำที่อยู่ในสารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำแข็ง (ice crystalline) ทำให้น้ำในเม็ดแป้งลดลง ความเข้มข้นของสารละลายแป้งเพิ่มมากขึ้น จนแป้งไม่สามารถเกิดการคืนตัวได้หรือเกิดได้น้อยมาก (Kim และ คณะ, 1997) ในขณะที่เมื่อเก็บแป้งไว้ในอุณหภูมิห้องก้อนแป้งจะอ่อนตัวและเมื่อทิ้งไว้นาน ๆ จะเกิดการหลอมเหลวจนไม่สามารถเกิดการคืนตัวของแป้งได้เช่นกัน (Chang และ Liu, 1991) ในขณะที่อุณหภูมิและเวลาในการแช่เย็นที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส 2 และ 3 วัน รวมถึง 0 องศาเซลเซียสทุกระดับเวลา เนื่องจากเป็นภาวะที่ทำให้แป้งมีความคงตัวค่อนข้างเหมาะสมสะดวกในการตัดทำเป็นรูปร่าง

ความแข็ง พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการแช่เย็นแป้งมีผลทำให้ความแข็งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$ ) (ตาราง จ.7) โดยพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งแช่เย็นที่อุณหภูมิ -5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน จะมีความแข็งสูงที่สุด ($p \leq 0.05$ ) ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งแช่เย็นที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน จะมีความแข็งต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$ ) เนื่องจากแป้งแช่เย็นที่อุณหภูมิ -5 องศาเซลเซียสไม่เกิดการรีโทรเกรดจึงไม่สามารถจับโมเลกุลของน้ำไว้ในโครงสร้างได้เกิดการสูญเสียน้ำค่อนข้างมากขณะทำการอบลดความชื้นในขั้นตอนการผลิต ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งแช่เย็นที่ 5 และ 0 องศาเซลเซียส แป้งที่ได้มีความคงตัวดี ตัดเป็นชิ้นได้สม่ำเสมอ และมีการจับโมเลกุลของน้ำไว้ในโครงสร้างได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเกิดการรีโทรเกรดที่เหมาะสม เมื่อนำไปย่างจะให้การพองตัวที่ดีจึงส่งผลให้มีความแข็งต่ำด้วย

5.6.2 การประเมินผลทางประสาทสัมผัส

จากการทดลองนำแป้งที่แปรอุณหภูมิและเวลาในการแช่เย็นต่างกันไปผลิตผลิตภัณฑ์ แล้วนำมาประเมินผลในด้าน ความกรอบ ลักษณะการละลายในปาก ลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์ กลิ่นหอมของข้าว และการยอมรับรวม พบว่าอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและเวลาในการแช่เย็นแป้ง ไม่มีผลต่อคะแนนด้านกลิ่นหอมของข้าวและการยอมรับรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$ ) (ตาราง จ.8)แต่จะมีผลต่อคะแนนด้านความกรอบ ลักษณะการละลายในปาก และลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์ ($p \leq 0.05$ ) จากตารางที่ 4.11 พบว่าภาวะที่ใช้อุณหภูมิในการแช่เย็นแป้งที่ 0 องศาเซลเซียสทุกระดับเวลา 10 และ 5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 และ 3 วัน จะได้คะแนนด้านความกรอบ ลักษณะการละลายในปาก และลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์สูงโดยไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$ ) เนื่องจากอุณหภูมิและเวลาในการแช่เย็นแป้งที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส 2 และ 3 วัน รวมถึง 0 องศาเซลเซียสทุกระดับเวลาเป็นภาวะที่เหมาะสมในการให้ลักษณะความคง

ตัวของแป้งที่ดีสะดวกต่อการตัดทำเป็นรูปร่าง จึงให้ลักษณะทางกายภาพที่ดีของผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่งผลต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัสเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงเลือกภาวะกระบวนการแช่เย็นแป้งที่เหมาะสมคือที่ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน เนื่องจากให้คุณภาพทางลักษณะทางกายภาพ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่ดีไม่แตกต่างจากที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสทุกระดับเวลา เพื่อความสะดวกและประหยัดสำหรับกระบวนการผลิตต่อไป

5.6.3 ผลการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้งด้วย DSC

การศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้งด้วย DSC นั้นเพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิและระยะเวลาในการแช่เย็นแป้งที่ต่างกันมีผลต่อการเกิดโครงสร้างผลึกจากพันธะไฮโดรเจนในแป้งรีโทรเกรดหรือไม่ พบว่าอุณหภูมิในการแช่เย็นแป้งที่ 10 องศาเซลเซียส และ –5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน ไม่ปรากฏ peak ใน DSC thermogram ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang และ Liu (1991) ซึ่งศึกษาการเกิดรีโทรเกรดของแป้งข้าวเหนียวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยพบว่าไม่มีการเกิดรีโทรเกรดในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเนื่องจากไม่มี peak ของพลังงานในการหลอมเหลวผลึก ($\Delta H$) ใน DSC thermogram ส่วนที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสเกิดการรีโทรเกรดสูงสุดเนื่องจากพลังงานในการหลอมเหลวผลึก ($\Delta H$) มีค่าสูง และเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บที่เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสน้ำภายในก้อนแป้งมีการเคลื่อนที่น้อยลงทำให้สายของโมเลกุลอะไมโลส และอะไมโลเพคติน เคลื่อนตัวเข้าจับกันได้ง่ายมากขึ้น และจับตัวกันแน่นขึ้นเมื่อระยะเวลาในการแช่เย็นเพิ่มขึ้น รองลงมาคือที่อุณหภูมิในการแช่ที่ 5 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการแช่เย็นที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ในขณะที่อุณหภูมิในแช่เย็นที่ –5 องศาเซลเซียสมีพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก ($\Delta H$) ค่อนข้างต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim และคณะ (1997) ซึ่งพบว่าแป้งข้าวเหนียวที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 มีค่าพลังงานในการหลอมเหลวผลึกสูงที่สุดเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิแช่เย็น อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิแช่เยือกแข็งตามลำดับ

ดังนั้นในการศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการแช่เย็นแป้งที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ จะเลือกภาวะที่ใช้อุณหภูมิในการแช่เย็นที่ 5 องศาเซลเซียสเวลา 2 วัน เนื่องจากให้ความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ ปริมาตรการพองตัวค่อนข้างสูง และสะดวกในการผลิตรวมถึงประหยัดพลังงานในการผลิตมากกว่าภาวะแช่เย็นที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และมีคะแนนทางประสาทสัมผัสสูง โดยภาวะดังกล่าวมีค่าพลังงานในการหลอมเหลวผลึก ($\Delta H$) ของแป้งที่ได้จากชิ้นขนมหลังผ่านการแช่เย็นคือ 6.65 cal/g จากการตรวจสอบด้วย DSC

5.7 ผลของขนาดอนุภาคของแป้งข้าวเหนียวต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

จากการแปรขนาดอนุภาคของแป้งข้าวเหนียวเป็น 4 ระดับคือ 20-30 mesh 30-40 mesh 40-50 mesh และ 50-60 mesh แป้งที่ได้นำมาผลิตผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้นำมาตรวจสอบสมบัติทางด้านความหนาแน่น ปริมาตรการพองตัว และค่าความแข็ง ได้ผลดังรูปที่ 4.39 – 4.41 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.7.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

ความหนาแน่น และปริมาตรการพองตัว พบว่าขนาดอนุภาคของแป้งข้าวเหนียวมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นและปริมาตรการพองตัวของผลิตภัณฑ์แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตาราง จ.9) โดยเมื่อขนาดอนุภาคของแป้งข้าวเหนียวมีขนาดเล็กลงความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาตรการพองตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากจากขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับลักษณะในการเกิดเจลโดยจะให้ลักษณะความสมบูรณ์ของเจลที่แตกต่างกันเมื่อผ่านกระบวนการผลิตด้วยภาวะเดียวกัน Glickman (1969) กล่าวว่าการเกิดเจลาติไนเซชั่นเริ่มต้นในส่วนที่อยู่ระหว่าง micelle ในเม็ดแป้ง เป็นส่วนที่มีโครงสร้างหลวมส่วนนี้พันธะไฮโดรเจนจะอ่อนที่สุด ความแรงของพันธะในส่วนที่เป็นโครงสร้างหลวมนี้ ขึ้นกับชนิดของแป้ง พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพันธะไฮโดรเจนจะแตกออกโมเลกุลของน้ำจะไปจับกับหมู่ ไฮดรอกซิลอิสระทำให้เม็ดแป้งพองตัว ซึ่งจะทำให้แป้งละลายน้ำได้มากขึ้น เจลจะใสขึ้น และความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อเม็ดแป้งดูดน้ำไว้มากขึ้น โครงตาข่ายจะขยายออก โมเลกุลของแป้งจะถูกแยกออกจากกัน ไม่รวมเป็นโครงสร้างของ micelle อีกต่อไป จะกระจายไปรอบ ๆ ในสารละลายแป้งเมื่อมีการพองตัว เม็ดแป้งจะหลุดแยกจากกันได้ง่ายขึ้นโดยเฉพาะเมื่อมีแรงเฉือนมากระทำ เนื่องจากพันธะภายในเม็ดแป้งอ่อนตัวลงเมื่อความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อแป้งพองตัวเต็มปริมาตรทั้งหมด แป้งที่ละลายอยู่ในน้ำซึ่งแพร่กระจายออกมาจะแพร่กลับเข้าไปในเม็ดแป้งที่พองตัวเต็มที่ เกิดเป็นลักษณะเจล ซึ่งยึดติดกันด้วยพันธะเคมี paste ร้อนที่ได้นี้เป็นของผสมของเม็ดแป้งที่พองตัว เม็ดแป้งที่แตก และโมเลกุลแป้งที่กระจายอยู่ในรูปของ colloid และเมื่อแป้งมีขนาดเล็กลงย่อมส่งผลให้น้ำสามารถล้อมรอบโมเลกุลของแป้งได้ง่ายขึ้น เม็ดแป้งสามารถดูดน้ำเย็นได้มากขึ้นและเมื่อได้รับความร้อนจนเกิดการเจลาติไนเซชั่นที่สมบูรณ์จึงให้ลักษณะทางกายภาพที่ดีกว่าในผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง

ความแข็ง พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งข้าวเหนียวทุกขนาดอนุภาคไม่มีผลต่อค่าความแข็งของขนมขบเคี้ยวที่ทำจากข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) แต่พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งข้าวที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่ามีแนวโน้มจะให้ค่าความแข็งที่น้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่

เตรียมขึ้นจากแป้งข้าวเหนียวที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า โดยค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของอนุภาคที่เพิ่มขึ้น

5.7.2 การประเมินผลทางประสาทสัมผัส

จากการทดลองนำแป้งที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ไปผลิตผลิตภัณฑ์และประเมินผลการประเมินผลทางประสาทสัมผัสในด้านความกรอบ ลักษณะการละลายในปาก ลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์ กลิ่นหอมของข้าว และการยอมรับรวม พบว่าขนาดอนุภาคไม่มีผลต่อคะแนนด้านลักษณะการละลายในปาก กลิ่นหอมของข้าว และการยอมรับรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตาราง จ.10) แต่จะมีผลต่อคะแนนด้านความกรอบ และลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยคะแนนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของแป้งที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กลง เนื่องจากความกรอบมีความสัมพันธ์กับการพองตัวของเม็ดแป้ง เมื่อผลิตภัณฑ์ได้รับ พลังงานความร้อนจะทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยออกมา เกิดแรงดันและ รูพรุน ขณะที่เกิดแรงดันในเนื้อผลิตภัณฑ์ก็จะเกิดมีแรงต้านทานหรือแรงยึดมิให้น้ำขยายตัวระเหยออกไป เมื่อมีความดันเพิ่มขึ้น แรงยึดหรือแรงต้านทานนี้ก็จะมีเพิ่มขึ้น แล้วความต้านทานจะคงที่อยู่ระยะหนึ่งซึ่งเป็นขณะที่พลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปพอเหมาะที่จะทำให้เกิดความดันทำให้อาหารพองตัวมีรูพรุนพอดี จากนั้นความดันก็จะเริ่มลดลงพร้อมทั้งความต้านทานก็เริ่มลดลงจนมีค่าเท่ากัน ถ้าพลังงานความร้อนที่ได้รับพอเหมาะที่จะทำให้ความดันเท่ากับความต้านทาน จะทำให้ได้รูพรุนสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น มีความชื้นเหลือพอเหมาะที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์กรอบพอดี มีโครงสร้างและเนื้อสัมผัสดีไปด้วย แต่ถ้าความดันมากกว่าความต้านทานจะทำให้เกิดการแยกของโครงสร้างได้ถ้าความดันน้อยกว่าความต้านทานจะทำให้รูพรุนไม่สม่ำเสมอ (Eskew และคณะ, 1963) ซึ่งกระบวนการทั้งหมดจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ได้นั้นจะต้องเกิดจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเจลาติไนเซชั่นมาแล้วอย่างสมบูรณ์ ส่วนคุณภาพทางประสาทสัมผัสอื่นมีแนวโน้มให้ค่าที่สูงตามขนาดของอนุภาคที่เล็กลงเช่นเดียวกัน

5.7.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ด้วยกล้อง SEM

การศึกษาโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ด้วยกล้อง SEM นั้นเพื่อเปรียบเทียบผลของขนาดอนุภาคที่ต่างกันมีผลต่อลักษณะโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์อย่างไร พบว่าที่กำลังขยาย 100 เท่า ลักษณะโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากอนุภาคขนาดใหญ่จะให้พื้นผิวขรุขระและมีโพรงอากาศขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วไป แต่เมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงพบว่า พื้นผิวของผลิตภัณฑ์มีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีโพรงอากาศขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งที่มีขนาดอนุภาคใหญ่นั้นผลึกแป้งบางส่วนยังถูกทำลายไปไม่หมด หรือเกิดเจลไม่สมบูรณ์จึงไม่สามารถสร้างโครงสร้างซึ่งเกิดจากโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่สมบูรณ์

จึงพบว่ามีส่วนที่ขรุขระจากเม็ดแป้งอยู่โดยทั่วไป ในขณะที่กำลังขยาย 2000 เท่า พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งที่มีขนาดอนุภาคใหญ่จะยังพบผลึกของแป้งที่พองตัวแต่ยังไม่แตกออกหลงเหลืออยู่ และจะลดน้อยลงเมื่อเตรียมผลิตภัณฑ์ด้วยแป้งที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง และจะไม่พบผลึกของแป้งที่พองตัวอีกเลยรวมทั้งมีลักษณะพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอ มีโพรงอากาศขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป ในผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นจากแป้งที่มีขนาดอนุภาค 50-60 mesh เนื่องจากเป็นแป้งที่มีอนุภาคขนาดเล็กสามารถเกิดเจลาติไนเซชั่นได้สมบูรณ์กว่า จึงทำให้ได้ลักษณะของโครงสร้างแป้งที่เกิดจากอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่แตกออกมาจากเม็ดแป้งที่สมบูรณ์เหมาะสมสำหรับให้ผลิตภัณฑ์ที่ดี

ดังนั้นในการศึกษาขนาดอนุภาคของแป้งข้าวเหนียวที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ จะเลือกที่ขนาดอนุภาค 50-60 mesh เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นต่ำ มีปริมาตรการพองตัวสูง และความแข็งมีแนวโน้มให้ค่าต่ำ และได้รับคะแนนด้านความกรอบ และลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์ที่ดี โดยขนาดอนุภาคดังกล่าวพบว่าก้อนแป้ง (โมจิ) ที่ได้จากการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM พบว่ามีผิวเรียบสม่ำเสมอและมีโพรงอากาศขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป โดยไม่พบส่วนของผลึกแป้งในตัวอย่างอีก