บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า ใยอาหาร คาร์โบไฮเดรต และอะไมโลส พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของข้าวเหนียวขาว ข้าวเหนียวกล้องจะมีปริมาณ โปรตีน ไขมัน ใยอาหารที่สูงกว่าในข้าวขาว โดยเฉพาะใยอาหารที่แทบจะไม่พบในข้าวขาว ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ใช้แป้งข้าวเหนียวกล้องเป็นวัตถุดิบนอกจากจะให้พลังงานจากคาร์โบไฮเดรตที่เป็นองค์ประหลักแล้ว ยังให้ใยอาหารซึ่งมีประโยชน์ต่อสุขภาพในหลาย ๆ ด้านเช่น ช่วยในการขับถ่าย เป็นตัวช่วยดูดซึมสารพิษและไขมัน (Robert และคณะ, 1994) เนื่องจากส่วนของรำข้าวไม่ถูกขัดสีออก ข้าวเหนียวกล้องจะมีปริมาณของอะไมโลสต่ำกว่าในข้าวเหนียวขาวเล็กน้อยจึงไม่มีผลต่อสมบัติการสุกและการคืนตัวของแป้งสุก แต่ปริมาณไขมันที่สูงจะส่งผลถึงสมบัติการสุกและการคืนตัวของแป้งข้าวโดย ไขมันจะขัดขวางการละลายของอะไมโลสจากเม็ดแป้งทำให้แป้งสุกได้ยากขึ้นและจะขวางการจับตัวกันระหว่างโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคติน ทำให้แป้งสุกใช้เวลาในการคืนตัวนานกว่าในแป้งที่มีไขมันต่ำ (William และคณะ, 1993) นอกจากส่งผลถึงสมบัติการสุกและการคืนตัวของแป้งสุกนั้นซึ่งมีผลต่อสมบัติในด้านต่างๆของผลิตภัณฑ์เช่น การพองตัว ลักษณะของเนื้อผลิตภัณฑ์ เป็นต้น (Somchi และ Suihaila, 1994) ไขมันยังส่งผลโดยตรงกับสมบัติการพองตัวของผลิตภัณฑ์โดยตรงโดยจะขัดขวางการเกิดร่างแหของอะไมโลเพคตินซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในข้าวเหนียว และเป็นโครงสร้างหลักในการพองตัวของผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้นรำข้าวในแป้งข้าวเหนียวกล้องยังขัดขวางการจับตัวเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อโมจิทำให้การพองตัวของผลิตภัณฑ์ลดลง (Kim และ Maga, 1990)

5.2 กระบวนการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากข้าวเหนียวกล้อง

ในการผลิตขนมขบเคี้ยวจากข้าวเหนียวผลของกระบวนการผลิตได้แก่ การนึ่ง นวด แช่เย็น และการอบแห้ง สามารถอธิบายได้ดังนี้

การนึ่ง เป็นกระบวนการที่ทำให้แป้งดิบเกิดการเจลาติไนเซชั่น โดยระดับการเกิดเจลาติไนเซชั่นนั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาในการนึ่ง (ที่ความชื้นแป้งเริ่มต้นเท่ากัน) ที่อุณหภูมินึ่งสูงขึ้นเวลานึ่งจะลดลง ในข้าวเหนียวขาวนั้นเมื่อนึ่งข้าวมี 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาทีพบว่าระดับการเกิดเจลาติไนเซชั่นจะเป็นร้อยละ 100

การนวด เป็นการให้แรงเฉือนแก่แป้งสุกที่ผ่านการนึ่งเมื่อเนื้อแป้งสุกได้รับแรงเฉือนเม็ดแป้งที่เกิดการพองตัวจะแตกออกทำให้เกิดากรกระจายตัวของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินเกิดเป็นเจล และการนวดยังเป็นการเพิ่มและกระจายฟองอากาศให้แก่แป้งนึ่งเป็นการช่วยในการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ แต่ถ้าเวลานวดนานเกินไปจะทำให้การขยายตัวของผลิตภัณฑ์ลดลง

การแช่เย็น จะทำให้แป้งสุกเกิดการคืนตัว (retrogradation) ระดับการคืนตัวนี้จะสัมพันธ์กับเวลาและอุณหภูมิ ในการแช่เย็นแป้งข้าวเหนียวสุกนั้นที่ 4 องศาเซลเซียส แป้งข้าวเหนียวสุกจะเกิดการจับตัวกันและสามารถตัดขึ้นรูปได้ที่เวลา 48 ชั่วโมง และเมื่อเวลาแช่เย็นนานขึ้นผลิตภัณฑ์จะให้การพองตัวที่สูงขึ้น ความแข็งที่ต่ำลง และระดับการเกิดการคืนตัวของแป้งสุกที่สูงขึ้น (การันต์ วีระพัฒนานุวงศ์, 2543)

การอบแห้ง เป็นการปรับระดับความชื้นให้เหมาะสมกับการย่าง และจากการสูญเสียน้ำจากก้อนแป้งสุกแช่เย็น ทำให้โครงสร้างจับตัวกันแน่นขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงนี้แสดงในค่า ΔH ที่เพิ่มขึ้นจากแป้งสุกแช่เย็นของตัวอย่าง (Watanabe และคณะ, 1999)

5.2.1 ปริมาณความชื้นและเวลานวดที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ในการย่าง

ในการศึกษากระบวนการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากข้าวเหนียวกล้องพบว่าปริมาณความชื้นในขนมก่อนย่างมีอิทธิพลมากที่สุดต่อสมบัติทางกายภาพและการยอมรับทางประสาทสัมผัส โดยเมื่อแปรเวลานวดเป็น 3 ระดับคือ 0 10 และ 20 นาทีแล้วผลิตตามรูปที่ 3.1 แล้วแปรปริมาณความชื้นก่อนย่างเป็น 3 ระดับคือปริมาณความชื้นร้อยละ 23 26 และ 30 โดยน้ำหนักเปียก ได้ผลคือเมื่อปริมาณความชื้นในขนมก่อนย่างเป็นร้อยละ 26 โดยน้ำหนักเปียก ผลิตภัณฑ์จะมีสมบัติทางกายภาพและคะแนนการยอมรับรวมของผลิตภัณฑ์สูงที่สุด และในปริมาณความชื้นต่าง ๆ ยังส่งผลที่แตกต่างกันต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ ด้านความหนาแน่นและปริมาตรการพองตัว พบว่าผลของปริมาณความชื้นก่อนย่างและเวลานวดมีผลทำให้ความหนาแน่นและปริมาตรการพองตัวแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยที่เวลานวดหนึ่ง เมื่อปริมาณความชื้นก่อนย่างสูงขึ้น ความหนาแน่นจะมีแนวโน้มลดลงและปริมาตรการพองตัวจะมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณความชื้นก่อนย่างสูงเกินไปจะให้ค่าความหนาแน่นและปริมาตรการพองตัวไม่มีแนวโน้มที่แน่นอน เนื่องจากในขณะที่นวดแป้งสุกนั้นจะเกิดการทำลายโครงสร้างของเม็ดแป้งที่เกิดการพองตัวแต่ยังไม่แตกออกเนื่องจากในกระบวนการผลิตนั้นมีปริมาณความชื้นของแป้งข้าวไม่เพียงพอในการทำให้เม็ดแป้งแตกออก (การันต์ วีระพัฒนานุวงศ์, 2543) ทำให้โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินกระจายตัวทั่วในก้อนแป้ง ดังนั้นในขั้นตอนการแช่เย็นที่ต้องการการคืนตัวของแป้งสุกโดยการจับตัวกันของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจึงเกิดได้ดีขึ้น (Jomduang, 1994) นอกจากนี้การนวดยังเป็นการช่วยให้โมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

สามารถเคลื่อนตัวเข้าใกล้กันและช่วยให้น้ำกระจายตัวทั่วทั้งก่อนแป้งเกิดเป็นสร้างร่างแหที่อุ้มน้ำ (Watanabe และคณะ, 1999) แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลอง (ที่สภาวะย่างที่ทำการทดลอง) จะเห็นได้ว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่น และปริมาตรการพองตัวจะเกิดที่ความชื้นร้อยละ 26 โดยน้ำหนักเปียกเท่านั้น ที่ปริมาณความชื้นต่ำลงผลิตภัณฑ์ที่มีการพองตัวต่ำ เมื่อเพื่อปริมาณความชื้นเกินกว่าร้อยละ 26 โดยน้ำหนักเปียกการพองตัวของผลิตภัณฑ์จะสูงขึ้นแต่สภาวะการย่างที่ใช้จะไม่เหมาะสมผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่กรอบ

ด้านความแข็ง พบว่าผลของปริมาณความชื้นก่อนย่างและเวลานวดมีผลทำให้ความแข็งแตกต่างความแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ที่ความชื้นร้อยละ 26 โดยน้ำหนักเปียก ความแข็งจะลดลงอย่างมากเมื่อเวลานวดเป็น 10 นาที และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่เวลานวด 20 นาที ทั้งนี้เกิดจากการที่เม็ดแป้งถูกทำลาย ทำให้การกระจายตัวของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินเป็นไปอย่างทั่วถึง เมื่อเกิดการคืนตัวของแป้งสุกจึงทำให้เกิดโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงและยืดหยุ่น ซึ่งสามารถพองตัวได้ดี (Whistler และ Daniel, 1990) แต่ที่ความชื้นร้อยละ 23 โดยน้ำหนักเปียก ค่าความแข็งจะไม่แตกต่างกันทางสถิติเนื่องจากผลิตภัณฑ์มีปริมาณความชื้นที่ไม่เพียงพอในการพองตัว เนื้อขนมอัดตัวกันแน่นทำให้ค่าความแข็งสูง แต่ในกรณีที่ความชื้นเป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักเปียก เนื่องจากความชื้นที่สูงสภาวะการย่างที่ใช้ไม่เหมาะสมไม่สามารถไล่ความชื้นออกได้ตามที่ต้องการ ดังนั้นภายในเนื้อขนมที่ชื้นเมื่อนำมาหาค่าความแข็งจะเกิดการจับตัวกันเป็นชั้นแข็งทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้น

จากการประเมินทางประสาทสัมผัส เมื่อทดลองนำแป้งที่มีเวลานวดและความชื้นก่อนย่างต่างกันมาทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสในด้านความกรอบ ลักษณะการละลายในปาก ลักษณะความหยาบของผลิตภัณฑ์ และการยอมรับรวม พบว่าผลของความชื้นก่อนย่างที่เวลานวดหนึ่ง ๆ นั้นมีผลต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.3) พบว่าเมื่อปริมาณความชื้นก่อนย่างเพิ่มขึ้น การยอมรับทางประสาทสัมผัสจะสูงขึ้นถึงที่ปริมาณความชื้นก่อนย่างค่าหนึ่งแล้วลดลง มีลักษณะเช่นเดียวกับค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการย่างขนม น้ำที่อยู่ภายในเนื้อขนมจะเกิดการขยายตัวและเนื้อขนมเกิดการอ่อนตัวทำให้แรงดันไอน้ำสามารถดันเนื้อขนมให้พองออกได้ (Li และ Luh, 1980) ดังนั้นถ้าปริมาณความชื้นน้อย เกินไปแรงดันไอที่เกิดขึ้นจะต่ำทำให้เนื้อขนมมีลักษณะแบนและอัดตัวกันแน่น มีความแข็งมาก ซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ แต่เมื่อมีปริมาณความชื้นที่สูงเกินไปนั้น รูปร่างของขนมจะพองให้รูปร่างที่ดี แต่เนื่องจากในขั้นตอนการย่างได้มีการใช้สภาวะที่คงที่ ไม่สามารถปรับอุณหภูมิและเวลาในการย่างให้เหมาะสมกับปริมาณความชื้นได้ ดังนั้นความชื้นที่หลงเหลืออยู่จะทำให้เนื้อขนมมีลักษณะผิวกรอบแต่ภายในเหนียวเป็นยาง ซึ่งทำให้ค่าการยอมรับทางประสาทสัมผัสต่ำ ในด้านการเปลี่ยนแปลงของคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสที่เวลานวดแตกต่างกัน พบว่าเฉพาะที่ปริมาณ

ความชื้นก่อนย่างเป็นร้อยละ 26 โดยน้ำหนักเปียก จะให้คะแนนด้านความกรอบและการยอมรับรวมที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการพองตัวและสภาวะการย่างดังที่ได้อธิบายแล้วในข้างต้น

5.2.2 เวลานึ่ง นวด และแช่เย็น

จากขั้นตอนการหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมนั้นทำให้ทราบว่าเมื่อปริมาณความชื้นแตกต่างกัน ผลของกระบวนการผลิตในขั้นตอนอื่นได้แก่ เวลานึ่ง นวดและแช่เย็นนั้นมีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์เช่นกันโดยเฉพาะที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 26 โดยน้ำหนักเปียก ดังนั้นจึงมีการทดลองโดยแปรระยะเวลานึ่งเป็น 3 ระดับคือ 10 20 และ 30 นาที แล้วนำมาแปรเวลานวดเป็น 3 ระดับคือ 0 10 และ 20 นาที และแปรเวลาแช่เย็น 2 ระดับคือ 48 และ 72 ชั่วโมง เพื่อหาผลและความสัมพันธ์ของสภาวะกระบวนการผลิตต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ทั้งทางกายภาพและประสาทสัมผัส

ในด้านลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์พบว่าจะมีความสัมพันธ์ระหว่างเวลานึ่ง นวด และแช่เย็นต่อ ความหนาแน่น ปริมาตรการพองตัว และความแข็งของผลิตภัณฑ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตาราง จ.3) โดยเมื่อพิจารณาที่ผลของแต่ละปัจจัยจะได้ว่า

ด้านเวลาแช่เย็น เมื่อเวลาแช่เย็นเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นและความแข็งของผลิตภัณฑ์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นทิศทางเดียวกันแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างเวลานวด เวลานึ่ง และเวลาแช่เย็น ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อนำแป้งสุกไปแช่เย็นจะเกิดการคืนตัวและเกิดโครงสร้างผลึกขึ้นใหม่ ความแข็งแรงของโครงสร้างจะมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการแช่เย็นของแป้งสุก คือเมื่อแป้งสุกถูกแช่เย็นนานจะมีโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น (Eliasson, 1996) ซึ่งโครงสร้างผลึกนี้จำเป็นต่อการพองตัวของผลิตภัณฑ์ โดยจะเกิดเป็นร่างแห เมื่อถูกความร้อนจะอ่อนตัว เกิดความยืดหยุ่นทำให้แรงดันที่เกิดจากไอน้ำดันโครงสร้างให้เกิดการขยายตัว (Li และ Luh, 1980) ความแข็งแรงของร่างแหจึงเป็นสิ่งสำคัญ ถ้าโครงสร้างร่างแหจะไม่แข็งแรง เมื่อถูกความร้อนจะไม่สามารถเก็บน้ำได้ทำให้ผลิตภัณฑ์มีการพองตัวที่ต่ำ แต่ถ้าร่างแหที่ความแข็งแรงเกินไปจะทำให้แรงดันไอน้ำไม่เพียงพอในการทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการพองตัวเช่นกัน

เมื่อเวลานวดเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่น ปริมาตรการพองตัว และความแข็งของผลิตภัณฑ์จะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันในเวลานึ่งและแช่เย็นที่เปลี่ยนไป แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างเวลานวด เวลานึ่ง และเวลาแช่เย็นกัน ในขั้นตอนนี้ เม็ดแป้งที่เกิดการพองตัวจากการนึ่งจะถูกทำลายโดยแรงเฉือน เกิดการผสมและการกระจายตัวของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคติน นอกจากนั้นยังเกิดการตีอากาศเข้ามาเก็บในเนื้อแป้งทำให้ช่วยในการพองตัวของผลิตภัณฑ์ เวลานวดที่นานขึ้นจะทำลายเม็ดแป้งสุกที่มากและให้ปริมาณและขนาดของฟองอากาศที่ต่างกัน (Horiuchi, 1980)

เมื่อเวลานึ่งเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่น จะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันในเวลานวดและแช่เย็นที่เปลี่ยนไป แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างเวลานวด เวลานึ่ง และแช่เย็น ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเป็นการทำให้แป้งสุกโดยใช้ไอน้ำ เม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อนสูงเกินกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชั่นและมีน้ำอยู่ด้วย เม็ดแป้งจะเกิดการสูญเสียโครงร่างผลึกทำให้พองตัวและโมเลกุลของอะไมโลสละลายออกมา ระดับของการเกิดเจลลาติไนเซชั่นและการพองตัวจะขึ้นกับเวลาที่แป้งได้รับความร้อน (กล้าณรงค์ ศรีรอต, 2542)

ในเวลานึ่ง นวดและเวลาแช่เย็นหนึ่ง ๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่น ปริมาตรการพองตัวและความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่เป็นเอกลักษณ์ ที่เวลาแช่เย็นที่ 48 ชั่วโมง เวลานึ่ง 10 และ 20 นาที ค่าความหนาแน่นและความแข็งของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเวลานวด ที่เวลานึ่ง 30 นาที ค่าความหนาแน่นและความแข็งของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเวลานวด ปริมาตรการพองตัวที่เวลานึ่ง 10 นาที จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มเวลานวด ที่เวลานึ่ง 20 นาที ปริมาตรการพองตัวจะสูงขึ้นระยะหนึ่งและจะตกลงเมื่อเวลานวดเพิ่มขึ้น ที่เวลานึ่ง 30 นาที ปริมาตรการพองตัวจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเวลานวด ที่เวลาแช่เย็น 72 ชั่วโมง เวลานึ่ง 10 นาที ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเวลานวด ความแข็งของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเวลานวด เวลานึ่ง 20 นาที ค่าความหนาแน่นจะสูงขึ้นระยะหนึ่งและจะตกลงเมื่อเวลานวดเพิ่มขึ้น ความแข็งของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลานวด ที่เวลานึ่ง 30 นาที ค่าความหนาแน่นจะสูงขึ้นระยะหนึ่งและจะตกลงเมื่อเวลานวดเพิ่มขึ้น ความแข็งของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเวลานวด ปริมาตรการพองตัวของผลิตภัณฑ์จะแทบไม่แตกต่าง จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ โดยแป้งดิบที่ผ่านการนึ่งที่เวลาต่างกันจะมีระดับการเกิดเจลลาติไนเซชั่นและการพองตัวสูงขึ้นเมื่อเวลานึ่งนานขึ้น (การันต์ วีระพัฒนานุวงศ์, 2543) จากการเปลี่ยนแปลงของแป้งในขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ ที่ได้อธิบายแล้วนั้น สามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้จากระดับการคืนตัวที่ไม่เท่ากันของแป้งสุกในแต่ละการทดลอง เนื่องจากผลของการแปรกระบวนการผลิต ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ดังนี้ คือเมื่อเวลานึ่งน้อย แป้งจะมีระดับการเกิด เจลาติไนเซชั่นที่ต่ำและเนื่องจากเป็นระบบที่มีน้ำจำกัด ดังนั้นถ้าเวลาการนวดไม่เพียงพอจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีการพองตัวที่ต่ำ แต่แป้งมีการนวดนานเกินไปจะมีการพองตัวที่ต่ำเช่นกัน เนื่องจากการพองตัวของผลิตภัณฑ์ต้องอาศัยโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงเกินไปและมีความยืดหยุ่น เวลานวดน้อยจำนวนเม็ดแป้งสุกที่ถูกทำลายน้อย การกระจายของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่จะจับตัวกับน้ำเกิดเป็นเจลมีน้อย เมื่อย่างโครงสร้างไม่สามารถขยายตัวได้มาก การพองตัวจึงน้อย แต่ถ้านวดนานเกิดการกระจายตัวของโมเลกุลอะไมโลส อะไมโลเพคตินและน้ำได้ดี เมื่อนำไปแช่เย็นเกิดการคืนตัวที่ดี โครงสร้างของเนื้อผลิตภัณฑ์แข็งแรงทำให้การพองตัวเป็นไปได้ยาก แต่

ทั้งนี้ขึ้นกับเวลานึ่งของผลิตภัณฑ์ด้วย ดังนั้นจึงมีจุดที่เหมาะสมระหว่างเวลานึ่งและนวดที่ ความชื้นก่อนย่างและเวลาแช่เย็นหนึ่ง ๆ

จากการทดลองนำแป้งที่ผ่านการแปรระยะเวลา นึ่ง นวด และแช่เย็น ต่างกันมาทำการทดสอบการยอมรับทางด้านความกรอบ การละลายในปาก ความหยาบของเนื้อขนม และความชอบรวม ในแต่ละการทดลองจะมีความแตกต่างกันทางสถิติของค่าความกรอบและความชอบรวม แต่ด้านการละลายในปาก และความหยาบของเนื้อขนมจะไม่มีความแตกต่างทางสถิติ คะแนนค่าความชอบรวมจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแนวทางเดียวกับค่าความกรอบ (ตารางที่ 4.5) และเมื่อเปรียบเทียบด้านความแข็งของผลิตภัณฑ์จะพบว่า การยอมรับในด้านความกรอบและความชอบรวมนั้นจะลดลงเมื่อความแข็งของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการทดลองที่ 3.2.1 ซึ่งมีผลจากเนื้อในขนมที่ไม่แห้งทำให้เหนียว ผู้ทดสอบจึงไม่ยอมรับ โดยการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ ที่ส่งผลถึงสมบัติทางกายภาพและการยอมรับทางประสาทสัมผัสได้อธิบายแล้วในข้างต้น การละลายในปากและความหยาบของเนื้อขนมที่ไม่แตกต่างทางสถิตินั้นเกิดจากวัตถุดิบที่ใช้เป็นแป้งข้าวเหนียวกล้องซึ่งมีปริมาณรำข้าวอยู่ถึงร้อยละ 7 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำและไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์อะไมเลส (Marshall และคณะ, 1994) ดังนั้นเมื่อรับประทานจึงเหลือตกค้างอยู่ในปาก รบกวนความรู้สึกละลายในปากและทำให้รู้สึกความหยาบของเนื้อขนม แต่อย่างไรก็ตามลักษณะที่ตกค้างของรำข้าว คะแนนที่ได้ยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปศึกษาผลของกระบวนการผลิตต่อลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อผลิตภัณฑ์โดยใช้กล้อง SEM ที่กำลังขยายต่างกันสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อผลิตภัณฑ์ เนื่องจากผลของกระบวนการผลิต ผลของเวลานึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่กำลังขยาย 2000 เท่า เนื่องจากการนึ่งเป็นการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เม็ดแป้งซึ่งมีขนาดเล็ก ผลจากเวลานวดจะเห็นการเปลี่ยนแปลงทั้งที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 2000 เท่าการนวดมีวัตถุประสงค์สองอย่างคือเพื่อตีอากาศ และการทำลายเม็ดแป้งที่เกิดเจลาติไนเซชั่น ส่วนระดับการแช่เย็นนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับโมเลกุลกำลังขยายของอุปกรณ์ไม่เพียงพอที่จะตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงได้ ถ้าใช้กำลังขยายเกิน 2000 เท่า เนื้อของตัวอย่างที่ใช้จะแยกเนื่องจากไม่สามารถทนต่อความเข้มของอิเลคตรอนได้ แต่อาจใช้วิธีการอื่น ๆ เช่น X-ray diffaction หรือ DSC ในการตรวจวัดแทน ผลของเวลานึ่ง เมื่อดูด้วยกำลังขยาย 2000 เท่า (รูปที่ 4.19-4.27) พบว่าเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้นเมื่อเวลานึ่งเพิ่มขึ้น ที่เวลานึ่ง 30 นาที เม็ดแป้งจะที่การพองตัวมาเชื่อมกัน ทั้งนี้เกิดจากการนึ่งทำให้เกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคติน และมีโมเลกุลของน้ำแทรก ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนตัวได้และเกิดการพองตัวออกทำให้เกิดการเชื่อมกันกับเม็ดแป้งที่อยู่ใกล้เคียง และเมื่อมีการนวดจะเห็นการเชื่อมของเม็ดแป้งมากขึ้นและ เมื่อเปรียบเทียบรูปถ่าย SEM ที่ 2000 เท่า เวลานึ่งที่นานขึ้นจะลดเวลานวดลง และ ที่

กำลังขยาย 100 เท่า (รูปที่ 4.10-4.18) พบว่าเมื่อนวดมากขึ้นจะมีฟองอากาศเพิ่มขึ้นและขนาดของฟองอากาศจะลดลงซึ่งฟองอากาศนี้จะช่วยในการพองตัวของผลิตภัณฑ์ แต่เมื่อเทียบความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อผลิตภัณฑ์กับความแข็งและการยอมรับทางประสาทสัมผัสแล้ว พบว่าไม่เป็นในแนวทางเดียวกันคือลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์ ที่เกิดที่เวลานึ่งและนวดต่าง ๆ กันไม่ได้ให้ค่าความแข็งและการยอมรับที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเกิดจากเม็ดแป้งสุกที่ หลงเหลืออยู่ที่สังเกตไม่เห็นใน SEM

เมื่อนำวัตถุดิบที่เตรียมตามภาคผนวก ค ไปทำการวัดสมบัติทางความร้อน ด้วย DSC พบว่าผลจากการวัดให้ลักษณะของกราฟที่ไม่สามารถหาค่า ΔH ได้ ดังแสดงในภาคผนวก ฉ เนื่องจากในช่วงการทำการทดลองนี้ยังไม่สามารถหาสภาวะของเครื่อง DSC ที่เหมาะสมกับแป้งข้าวเหนียวกล้องได้

5.2.3 เวลานวดที่เหมาะสม

เพื่อหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสมที่สุดจึงได้ทำการ แปรเวลานึ่งแป้งข้าวเหนียวกล้อง เป็น 2 ระดับ 5 และ10 นาที เวลานวด 8 ระดับคือ 0 5 10 20 30 40 50 และ 60 นาที แช่เย็นและอบแห้งโดยใช้เวลาและความชื้นที่เหมาะสมจากข้อ 4.2.1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้นำไปตรวจสอบสมบัติด้านค่าความแข็ง ได้ผลดังรูปที่ 4.4- 4.27 พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างเวลานึ่ง นวด ที่มีผลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตาราง 4.6) โดยที่เวลานึ่ง 5 นาที และ 10 นาที มีความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่ใกล้เคียงกันที่เวลานวด 0 5 และ 10 นาที แต่ที่เวลานวด 20 นาที ขึ้นไปผลิตภัณฑ์ที่นึ่ง 5 นาทีจะมีความแข็งสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่นึ่ง 10 นาทีในทุกเวลานวด และสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งในทั้งสองเวลานึ่งได้ว่า เมื่อเวลานวดสูงขึ้นค่าความแข็งจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นช่วงหนึ่งและลดต่ำลงจากนั้นจะเริ่มสูงขึ้นและลดลงตามเวลานวดที่เพิ่มขึ้น อาจเกิดจากเม็ดแป้งดิบ เมื่อได้รับความร้อนชื้นจากการนึ่ง ทำให้เม็ดแป้งมีการพองตัว ความแข็งแรงของโครงสร้างผลึกลดลง เมื่อได้รับแรงเฉือนจากการนวดทำให้เกิดการแตกออก เกิดการกระจายของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินเมื่อได้รับความเย็นจะเกิดการคืนตัวของแป้ง เมื่อใช้เวลานึ่งที่ไม่เท่ากันเวลานึ่งที่ต่ำกว่า เม็ดแป้งสุกอาจถูกทำลายไม่หมดในขั้นตอนการนวดดังนั้นจึงส่งผลต่อการคืนตัว โดยเมื่อมีโครงสร้างเม็ดแป้งสุกที่ไม่แตกเมื่อเกิดการคืนตัวโมเลกุลที่ใกล้กันมากกว่าจะให้โครงสร้างที่แข็งแรงกว่าโครงสร้างของแป้งสุกคืนตัวที่อยู่โดยรอบทำให้การขยายตัวไม่ดีและเกิดการอัดตัวกันแน่นของเนื้อผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้น ในเวลานึ่งเดียวกันการที่เกิดวงจรการขึ้นลงของความแข็งของผลิตภัณฑ์ อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดและปริมาณฟองอากาศในเนื้อผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 4.10-4.18) รวมกับการเกิดและการทำลายโครงสร้างที่เป็นโครงข่ายของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจากแรงเฉือนของการนวด โดยเมื่อนวดจน

ถึงระดับหนึ่งเม็ดแป้งสุกถูกทำลายหมดและโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะเริ่มจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นโครงข่ายขึ้นลักษณะโครงข่ายนี้เองที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีการพองตัวอย่างทั่วทั้งชิ้นส่งผลให้ไม่แข็งมาก และเมื่อได้รับแรงเฉือนต่อไปอาจเกิดการทำลายโครงข่ายที่เกิดขึ้นและจะเกิดโครงข่ายขึ้นอีกครั้งที่มีการจัดเรียงที่แตกต่างออกไปและมีความแข็งแรงลดลง (สังเกตได้จากความหนืดของแป้งนวดที่ลดลงเมื่อเวลานวดนานขึ้น (ข้อมูลได้จากการสังเกตของผู้ทดลอง)) ส่งผลถึงโครงสร้างเมื่อเกิดการคืนตัวของแป้งสุกที่ทำให้มีโครงสร้างที่มีความแข็งแรงต่ำ เมื่อนำผ่านขั้นตอนการย่าง โครงสร้างที่มีความแข็งแรงต่ำจะไม่สามารถทนต่อแรงดันไอน้ำจึงให้ลักษณะเนื้อผลิตภัณฑ์ที่แน่นมีความแข็งสูง แต่เมื่อได้รับแรงเฉือนนานขึ้นโครงสร้างที่เกิดอาจให้ลักษณะที่แข็งแรงอีกครั้ง ซึ่งเหตุผลที่แท้จริงจำเป็นต้องศึกษาต่อไป

ในด้านผลการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสจากการทดลองพบว่าเมื่อนำแป้งที่ผ่านการแปรระยะเวลานึ่งและนวด ต่างกันมาทำการทดสอบการยอมรับทางด้านความกรอบ การละลายในปาก ความหยาบของเนื้อขนม และความชอบรวม แต่ละตัวอย่างจะมีความแตกต่างกันทางสถิติในด้านความกรอบและความชอบรวมโดยเวลานวดที่ 10 นาทีจะให้ผลิตภัณฑ์ที่ให้ค่าการยอมรับสูงที่สุดและอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่ในด้านการละลายในปากและความหยาบของเนื้อขนมจะมีระดับคะแนนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างปัจจัยที่ศึกษา คะแนนความชอบรวมจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแนวทางเดียวกับความกรอบ (ตารางที่ 4.7) และเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติทางกายภาพในด้านความแข็งของผลิตภัณฑ์จะพบว่า การยอมรับในด้านความกรอบและความชอบรวมนั้นจะลดลงเมื่อความแข็งของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น

ลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อผลิตภัณฑ์เมื่อดูจากกล้อง SEM สามารถสังเกตได้ที่กำลังขยายต่างกัน ที่กำลังขยาย 100 เท่าไม่สามารถเห็นความแตกต่างระหว่างเวลานึ่ง 5 และ 10 นาทีได้ แต่เมื่อเวลานวดเพิ่มขึ้นสามารภสังเกตปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นและขนาดเล็กลงได้ในช่วง 20 นาทีแรก หลังจากนั้นฟองอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและปริมาณลดลง จากนั้นขนาดจะเล็กลงและปริมาณเพิ่มขึ้นอีก เป็นเพราะการนวดมีการตีเก็บอากาศเข้าในเนื้อแป้ง ได้รับแรงเฉือนทำให้ฟองอากาศแตกตัวออกเป็นขนาดเล็ก หลังจากนั้นการนวดจะทำให้ฟองอากาศเคลื่อนตัวเข้าหากันและรวมตัวกันอีกครั้ง ในช่วงเวลานวดสูงกว่า 20นาที ที่กำลังขยาย 2000 เท่า จะสามารถสังเกตเห็นลักษณะของเนื้อผลิตภัณฑ์ที่เรียบเป็นเนื้อเดียวจะเริ่มมีลักษณะที่ขรุขระขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากเม็ดแป้งที่ถูกทำลายและรวมตัวเป็นเนื้อเดียวนั้นเมื่อได้รับแรงจากการนวดโครงสร้างที่เป็นเจลจะอ่อนแอลงทำให้สามารถเห็นส่วนที่ถูกหุ้มอยู่มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความแข็งของผลิตภัณฑ์จะพบว่าเมื่อส่วนที่รวมตัวกันถูกทำลายจะให้ค่าความแข็งที่สูงขึ้น แต่เมื่อนวดนานขึ้นเนื้อผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างเจลที่แข็งแรงขึ้นจะให้ค่าความแข็งที่ต่ำลง

เมื่อนำวัตถุดิบที่เตรียมตามภาคผนวก ค ไปทำการวัดสมบัติทางความร้อน ด้วย DSC พบว่าผลจากการวัดให้ลักษณะของกราฟที่ไม่สามารถหาค่า ΔH ได้ ดังแสดงในภาคผนวก ฉ เนื่องจากในช่วงการทำการทดลองนี้ยังไม่สามารถหาสภาวะของเครื่อง DSC ที่เหมาะสมกับแป้งข้าวเหนียวกล้องได้

ดังนั้นกระบวนการผลิตขนมขบเคี้ยวจากข้าวเหนียวกล้องในระดับห้องปฏิบัติการที่เลือกคือ เวลานึ่งเมื่ออุณหภูมิใจกลางก้อนแป้งเป็น 100 องศาเซลเซียสคือ 10 นาที เวลานวด 10 นาที แช่เย็นที่ 4 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง และ ความชื้นก่อนย่างร้อยละ 26 โดยน้ำหนักเปียก ที่เลือกกระบวนการนี้เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวให้ค่าการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูงที่สุด ให้ลักษณะเนื้อของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ไม่เหนียว และเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติทางกายภาพจะให้ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่ต่ำ