คุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และรีโอโลจีของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม

สวนิต อิชยาวณิชย์ [1] มณฑิรา นพรัตน์ [2] และ พรรณจิรา วงศ์สวัสดิ์ [3]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

รับเมื่อ 29 มกราคม 2547 ตอบรับเมื่อ 20 พฤษภาคม 2547

บทคัดย่อ

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี คุณลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางรีโอโลจีของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม พบว่าปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้าและอะมิโลสของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตจากทั้งสองกระบวนการมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ส่วนขนาดอนุภาคและความเสียหายของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) โดยแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่กว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง แต่มีความเสียหายของแป้งต่ำกว่า เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้งที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม พบว่าที่อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส ดัชนีการละลายของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีค่าสูงกว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งแต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส ดัชนีการละลายของแป้งทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้พบว่ากำลังการพองตัวของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีค่าสูงกว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งเล็กน้อย สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางรีโอโลจีของแป้งด้วยวิธี oscillatory พบว่าเจลของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีค่า storage modulus (G') และ loss modulus (G'') มากกว่าเจลของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง

คำสำคัญ : กระบวนการโม่เปียกและโม่แห้ง / ขนาดอนุภาค / ความเสียหายของแป้ง / คุณสมบัติทางรีโอโลจี / แป้งข้าวเจ้า

---

[1] *นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร*

[2] *อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร*

[3] *อาจารย์ ภาควิชาจุลชีววิทยา*

สวนิต อิชยาวณิชย์, มณฑิรา นพรัตน์ และ พรรณจิรา วงศ์สวัสดิ์. "คุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และรีโอโลจีของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม" *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.* 27, 3 (ก.ค.-ก.ย. 2547) 357-374

Chemical, Physical and Rheological Properties of Commercial Wet-milled and Dry-milled Rice Flour

Sawanit Aichayawanich [1] **Montira Nopharatana** [2] **and Punchira Vongsawasdi** [3]

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Received 29 January 2004 ; accepted 20 May 2004

Abstract

Chemical, physical and rheological properties of commercial wet-milled and dry-milled rice flour were investigated. The results showed that protein, fat, ash and amylose content were not significantly different ($p>0.05$). However, the average particle size of wet-milled rice flour was significantly higher than dry-milled rice flour while the percentage of damaged starch was significantly lower ($p\leq0.05$). When rice flour suspension was heated, the results indicated that at the temperature between 60-80 °C, water solubility index of dry-milled rice flour was higher than that of wet-milled rice flour. However, at the temperature higher than 80 °C, the water solubility index of both samples were comparable. The swelling power of wet-milled rice flour was slightly higher than dry-milled rice flour. Oscillatory testing results indicated that storage modulus (G') and loss modulus (G'') of wet-milled rice flour were higher than that of dry-milled rice flour.

Keywords : Wet-milled and Dry-milled / Particle Size / Damaged Starch / Rheological Properties / Rice Flour

[1] *Graduate Student, Department of Food Engineering.*

[2] *Lecturer, Department of Food Engineering.*

[3] *Lecturer, Department of Microbiology.*

1. บทนำ

ถึงแม้ว่าแป้งข้าวเจ้าจะสามารถผลิตได้ทั้งจากกระบวนการโม่เปียกและกระบวนการโม่แห้ง กระบวนการโม่เปียกเริ่มต้นจากนำข้าวหักมาแยกสิ่งสกปรกออก แล้วล้างด้วยน้ำ หลังจากนั้นจึงนำข้าวหักไปแช่น้ำ นำข้าวเข้าเครื่องโม่พร้อมน้ำโดยใช้เครื่องโม่หิน (stone mill) หลังจากนั้นน้ำแป้งที่ได้จะเข้าสู่ระบบกรองโดยเครื่องกรองแบบเพลท (filter plate) แล้วนำก้อนแป้งที่ได้เข้าเครื่องตีให้เป็นก้อนเล็กๆ และอบโดยใช้เครื่องอบแบบลมร้อน แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรง ส่วนการผลิตแป้งข้าวเจ้าโดยกระบวนการโม่แห้งเริ่มจากนำข้าวหักมาแยกสิ่งสกปรกด้วยวิธีการเป่าลม จากนั้นนำข้าวที่ได้ไปโม่โดยนิยมใช้เครื่องโม่แบบค้อน (hammer mill) จากนั้นร่อนแป้งด้วยตะแกรง ซึ่งจะเห็นว่ากระบวนการโม่แห้งมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากและไม่ต้องใช้น้ำในกระบวนการผลิตเหมือนวิธีการโม่เปียก แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีคุณสมบัติเหมาะสมแก่การนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิด เช่น เส้นก๋วยเตี๋ยว เส้นขนมจีน ซุปกระป๋อง และขนมชนิดต่างๆ เป็นต้น ในขณะที่แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งนิยมผลิตเพื่อนำไปทำขนมขบเคี้ยว หรือนำไปผสมกับแป้งสาลีในการผลิตแป้งสำหรับชุบทอดอาหาร ถึงแม้ว่าการผลิตแป้งข้าวเจ้าด้วยกระบวนการโม่แห้งมีขั้นตอนที่ค่อนข้างง่าย และไม่จำเป็นต้องใช้น้ำในระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำ และไม่ส่งผลให้เกิดน้ำเสียที่เป็นภาระต่อระบบบำบัดเหมือนเช่นการผลิตแป้งข้าวเจ้าโดยกระบวนโม่เปียกก็ตาม แต่สัดส่วนการผลิตแป้งข้าวเจ้าโดยกระบวนโม่แห้งจะน้อยกว่าการผลิตโดยกระบวนโม่เปียก เนื่องจากผู้ประกอบการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารจำพวกเส้นนิยมใช้แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมากกว่า โดยงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chen และคณะ [1] พบว่าความแตกต่างของแป้งข้าวเหนียวที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งเกิดจากปริมาณโปรตีนและไขมันที่แตกต่างกัน ในขณะที่ Bettge และคณะ [2] ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของแป้งสาลีที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้ง พบว่าแป้งสาลีที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งมีขนาดอนุภาคเล็กและมีความเสียหายของแป้งสูงกว่าแป้งสาลีที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียก ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้แป้งสาลีที่ผลิตจากทั้งสองกระบวนการมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาองค์ประกอบทางเคมี คุณลักษณะทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ รวมทั้งคุณสมบัติทางรีโอโลจีซึ่งเป็นคุณสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรม เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งมีคุณสมบัติในการนำไปใช้ประโยชน์ต่างกัน ผลการศึกษาที่ได้จะทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการโม่แป้งที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้ามากขึ้น รวมทั้งอาจใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนากระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งให้มีคุณภาพใกล้เคียงกับแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียก

2. วัตถุดิบและวิธีการทดลอง

2.1 วัตถุดิบ

ข้าวหักที่ใช้ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม

2.2 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี

นำแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม รวมทั้งข้าวหักที่ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า ตามวิธีของ A.O.A.C. [3] และอะมิโลสตามวิธีของ Juliano [4]

2.3 การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

นำแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม มาวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคโดยใช้เครื่อง Mastersizer รุ่น S2000 (Melvern Instrument, USA) ร้อยละความเสียหายของแป้งตามวิธีของ A.A.C.C. [5] ดัชนีการละลายตามวิธีของ Holm [6] และกำลังการพองตัวตามวิธีของ Leach และคณะ [7]

2.4 การศึกษาคุณสมบัติทางรีโอโลจี

นำแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรมมาวัดคุณสมบัติทางรีโอโลจีโดยใช้เครื่อง Rheometer รุ่น MCR150 (Paar Physica, USA) นำสารละลายน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 40 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และใช้หัววัดแบบ concentric cylinder โดยปิดทับสารละลายน้ำแป้งด้วยพาราฟินเหลวเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ จากนั้นในขั้นแรกทำการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของเจล โดยให้ความร้อนกับน้ำแป้งจนอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส แล้วลดอุณหภูมิลงเหลือ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นแปรค่าแอมปลิจูดของความเค้นในช่วงร้อยละ 0.1-100 ที่ความถี่เชิงมุมของความเค้น 10 1/วินาที ซึ่งพบว่า ความเค้นที่ทำให้ storage modulus (G′) และ loss modulus (G″) ของเจลแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรมอยู่ในช่วง linear viscoelastic เท่ากับร้อยละ 0.1-19 ซึ่งความเค้นที่ร้อยละ 30 ของความเค้นในช่วงเส้นตรงมีค่าเท่ากับร้อยละ 6 นำค่าความเค้นนี้มาใช้ในการทำ temperature test และ frequency sweep test

การวัดคุณสมบัติทางรีโอโลจีโดยวิธี Temperature test ทำโดยตั้งโปรแกรมการให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้งจากอุณหภูมิ 30-95 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นจากอุณหภูมิ 95-30 องศาเซลเซียส บันทึกการเปลี่ยนแปลงของ storage modulus (G′) และ loss modulus (G″) ของสารละลายในช่วงให้ความร้อนและทำให้เย็น

ส่วนการวัดคุณสมบัติทางรีโอโลจีโดยวิธี Frequency sweep test ทำโดยนำเจลแป้งซึ่งเตรียมโดยให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้งจากอุณหภูมิ 30 - 95 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นจากอุณหภูมิ 95 - 30 องศาเซลเซียส มาวัดค่า storage modulus (G′) และ loss modulus (G″) โดยปรับขณะทดสอบจะปรับค่าความเค้นของหัววัดเท่ากับร้อยละ 6 และแปรความถี่เชิงมุมในช่วง 0.1-100 1/วินาที

2.5 การประเมินผลทางสถิติ

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test [8]

3. ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวหักที่ใช้ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม

จากการทดลองหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของข้าวหักที่ใช้ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม พบว่าปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้าและอะมิโลสของข้าวหักที่ใช้ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 1

ในขณะที่ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม พบว่าปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และอะมิโลสของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตจากทั้งสองกระบวนการมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (ตารางที่ 1) นอกจากนี้ยังพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของข้าวหักที่ใช้เป็นวัตถุดิบและแป้งข้าวเจ้าที่ได้จากการโม่ทั้งสองวิธี มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการโม่ไม่มีผลต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีภายในเม็ดสตาร์ชจะละลายออกจากเม็ดสตาร์ชได้ต่อเมื่อเม็ดสตาร์ชแตกและมีน้ำเป็นตัวพาออกไป ดังนั้นกระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้าโดยกระบวนการโม่แห้งซึ่งไม่ใช้น้ำในการโม่จึงไม่เกิดการสูญเสียองค์ประกอบทางเคมี สำหรับกระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้าโดยกระบวนการโม่เปียก พบว่ากระบวนการที่ใช้ไม่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดสตาร์ชในเมล็ดข้าวมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก ซึ่งส่วนผลึกนี้จะขัดขวางการแพร่ของน้ำสู่ภายในเม็ดสตาร์ช น้ำจึงแพร่เข้าสู่เม็ดสตาร์ชได้ในปริมาณที่จำกัด องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ จึงละลายออกมากับน้ำได้น้อย [9] นอกจากนี้กระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้าโดยกระบวนการโม่เปียกในอุตสาหกรรมจะทำการโม่เพียงรอบเดียว ดังนั้นเม็ดสตาร์ชที่แตกจึงมีเวลาในการสัมผัสกับน้ำน้อย การสูญเสียองค์ประกอบทางเคมีภายในเม็ดสตาร์ชจึงเกิดขึ้นน้อยมาก อย่างไรก็ตาม Chen และคณะ [10] ซึ่งศึกษาการผลิตแป้งข้าวเหนียวโดยกระบวนการโม่เปียก โดยใช้เครื่องโม่หินแบบพื้นบ้าน พบว่าการโม่เป็นจำนวน 4 รอบ ทำให้ปริมาณโปรตีนและไขมันในแป้งข้าวเหนียวลดลงประมาณร้อยละ 15 จากปริมาณเริ่มต้นในวัตถุดิบ โดยโปรตีนที่สูญเสียไปเป็นโปรตีนที่มีความสามารถในการละลายน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่มีผลต่อคุณสมบัติของแป้งน้อยมาก เนื่องจากเป็นโปรตีนที่ไม่เกิดประจุ ทำให้ไม่มีผลต่อการพองตัวของเม็ดสตาร์ชเหมือนกับโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ [11]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวหักที่ใช้ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้ง และแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม

ตัวอย่าง	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)*				
	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	อะมิโลส
ข้าวหักที่ใช้ในกระบวนการโม่เปียก	$13.05^{a} \pm 0.02$	$8.42^{ns} \pm 0.46$	$0.05^{ns} \pm 0.03$	$0.05^{ns} \pm 0.01$	$33^{ns} \pm 2$
ข้าวหักที่ใช้ในกระบวนการโม่แห้ง	$13.29^{a} \pm 0.12$	$8.45^{ns} \pm 0.52$	$0.06^{ns} \pm 0.05$	$0.05^{ns} \pm 0.01$	$31^{ns} \pm 4$
แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียก	$11.07^{b} + 0.02$	$7.93^{ns} \pm 0.25$	$0.06^{ns} \pm 0.05$	$0.05^{ns} \pm 0.01$	$33^{ns} \pm 4$
แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง	$8.12^{c} \pm 0.15$	$8.42^{ns} \pm 0.51$	$0.04^{ns} \pm 0.02$	$0.05^{ns} \pm 0.01$	$30^{ns} \pm 2$

* ข้อมูลในแนวตั้งที่มีอักษรแตกต่างกัน (a,b,...) แสดงความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

^{ns} มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

เมื่อพิจารณาปริมาณความชื้นของแป้งข้าวเจ้าพบว่า ปริมาณความชื้นของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่อย่างไรก็ตาม Young และคณะ พบว่าปริมาณความชื้นของแป้งไม่มีผลต่อคุณสมบัติของแป้งและผลิตภัณฑ์จากแป้งที่ผลิตได้ [12]

3.2 คุณลักษณะทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

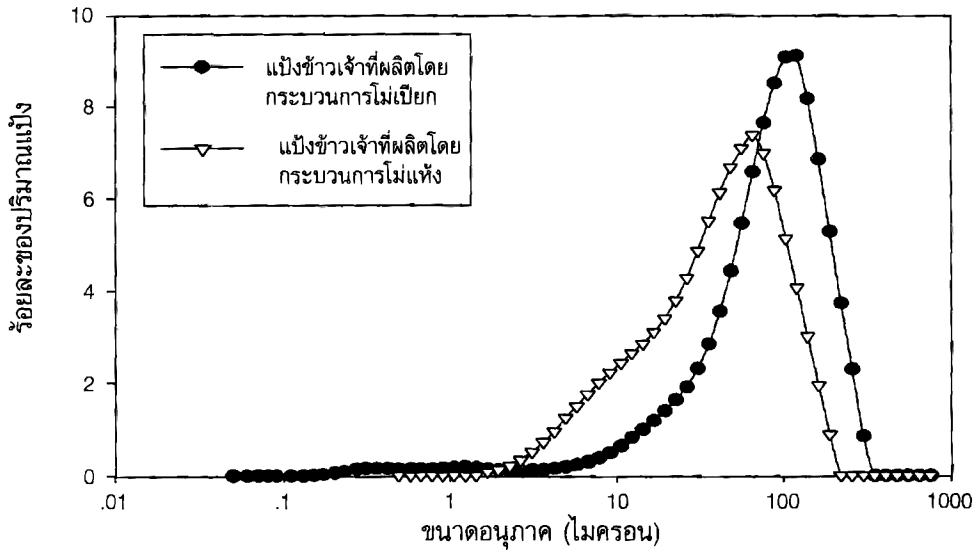
เมื่อนำแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรมมาวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค พบว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งมีความละเอียดสูงกว่าและมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้อยกว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียก (ตารางที่ 2) โดยแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 57.22 ไมครอน และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งในช่วง 9.37-120.30 ไมครอน ส่วนแป้งข้าวโม่เปียกมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 105.78 ไมครอน และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งในช่วง 23.28-202.08 ไมครอน เมื่อนำผลที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับปริมาณแป้ง จะได้ผลแสดงดังรูปที่ 1

ความแตกต่างของขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคระหว่างแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรมอาจมีสาเหตุมาจากน้ำที่ใช้ในระหว่างการโม่และชนิดของเครื่องมือที่ใช้ในการโม่ โดยน้ำที่ใช้ในระหว่างกระบวนการโม่เปียกช่วยรับแรงจากการโม่ก่อนส่งผ่านไปยังเมล็ดข้าว ทำให้แรงบางส่วนสูญเสียไป เมล็ดข้าวได้รับแรงจากการโม่ไม่เต็มที่ จึงแตกออกเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ และมีขนาดไม่สม่ำเสมอขึ้นอยู่กับว่าส่วนใดของเมล็ดข้าวจะสัมผัสกับแผ่นโม่มากกว่ากัน ในขณะที่เมล็ดข้าวที่ผ่านกระบวนการโม่แห้งจะได้รับแรงจากการโม่โดยตรง ทำให้เมล็ดข้าวแตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆ ได้มากกว่า ซึ่งจากการศึกษาโครงสร้างของแป้งข้าวเหนียวที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งด้วย scanning electron microscopy โดย Arisaka และคณะ [13] พบว่าเม็ดสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกจะเกาะกันเป็นกลุ่มใหญ่กว่าเม็ดสตาร์ชข้าวเหนียวที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง

ตารางที่ 2 ขนาดอนุภาคของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคที่ 10% ของตัวอย่างมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ* (ไมครอน)	ขนาดอนุภาคที่ 50% ของตัวอย่างมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ* (ไมครอน)	ขนาดอนุภาคที่ 90% ของตัวอย่างมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ* (ไมครอน)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย* (ไมครอน)
แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียก	$23.28^{a} + 0.05$	$95.56^{a} + 1.69$	$202.08^{a} + 1.19$	$105.78^{a} + 1.19$
แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง	$9.37^{b} + 0.15$	$47.51^{b} + 0.76$	$120.30^{b} + 2.63$	$57.22^{b} + 0.99$

* ข้อมูลในแนวตั้งที่มีอักษรแตกต่างกัน (a,b,...) แสดงความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)



รูปที่ 1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม

นอกจากนี้พบว่าชนิดของเครื่องโม่มีผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคแป้ง เครื่องโม่หินที่ใช้ในกระบวนการโม่เปียกให้แรงเฉือนกับเมล็ดข้าวที่ใช้โม่ซึ่งแรงเฉือนนี้เกิดจากการขัดสีระหว่างแผ่นหินทำให้โม่สามารถโม่ด้วยความเร็วรอบที่สูงมากได้ เนื่องจากทำให้เกิดการแตกของแผ่นหินเป็นเศษเล็กๆ และปนเปื้อนลงในแป้ง ทำให้แป้งมีสีคล้ำ ในขณะที่เครื่องโม่แบบค้อนซึ่งใช้ในกระบวนการโม่แห้งสามารถปรับความเร็วรอบของการโม่เพื่อให้แรงกระแทกกับเมล็ดข้าวได้อย่างเต็มที่ ทำให้แป้งที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งมีความละเอียดสูง ผลการทดลองนี้ขัดแย้งกับงานวิจัยของ Chen และคณะ [10] ซึ่งพบว่าแป้งข้าวเหนียวที่ได้จากกระบวนการโม่แห้งด้วยเครื่องโม่แบบค้อนหยาบกว่าแป้งข้าวเหนียวจากกระบวนการโม่เปียกด้วยเครื่องโม่หินแบบพื้นบ้าน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก Chen และคณะ [10] ใช้จำนวนการโม่ต่อครั้งถึง 4 รอบ จึงทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลงเรื่อยๆ ตามจำนวนครั้งของการโม่ [14] ในขณะที่แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกในงานวิจัยนี้โม่เพียงหนึ่งรอบต่อครั้ง จึงเป็นผลให้แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกหยาบกว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง

ในส่วนค่าร้อยละความเสียหายของแป้ง ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงปริมาณความเสียหายของเม็ดสตาร์ชที่เกิดการแตกหักระหว่างการโม่นั้น พบว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรมมีปริมาณความเสียหายของแป้งสูงกว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกในระดับอุตสาหกรรม (ตารางที่ 3) เนื่องจากเมล็ดข้าวที่ใช้ในกระบวนการโม่เปียกจะผ่านการแช่น้ำ ทำให้น้ำบางส่วนแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดสตาร์ช เป็นผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดสตาร์ชและความต้านทานการเสียรูปของเม็ดสตาร์ชลดลง ดังนั้นเมื่อมีแรงมาดึงให้เม็ดสตาร์ชแยกออกจากกัน เม็ดสตาร์ชจึงแยกออกเป็นอนุภาคได้ง่ายและเกิดความเสียหายน้อยกว่าเม็ดสตาร์ชในแป้งที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง [15]

ตารางที่ 3 ร้อยละความเสียหายของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม

ตัวอย่าง	ความเสียหายของแป้ง* (ร้อยละกลูโคส)
แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียก	$20.54^{a} \pm 0.50$
แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง	$27.58^{b} \pm 0.17$

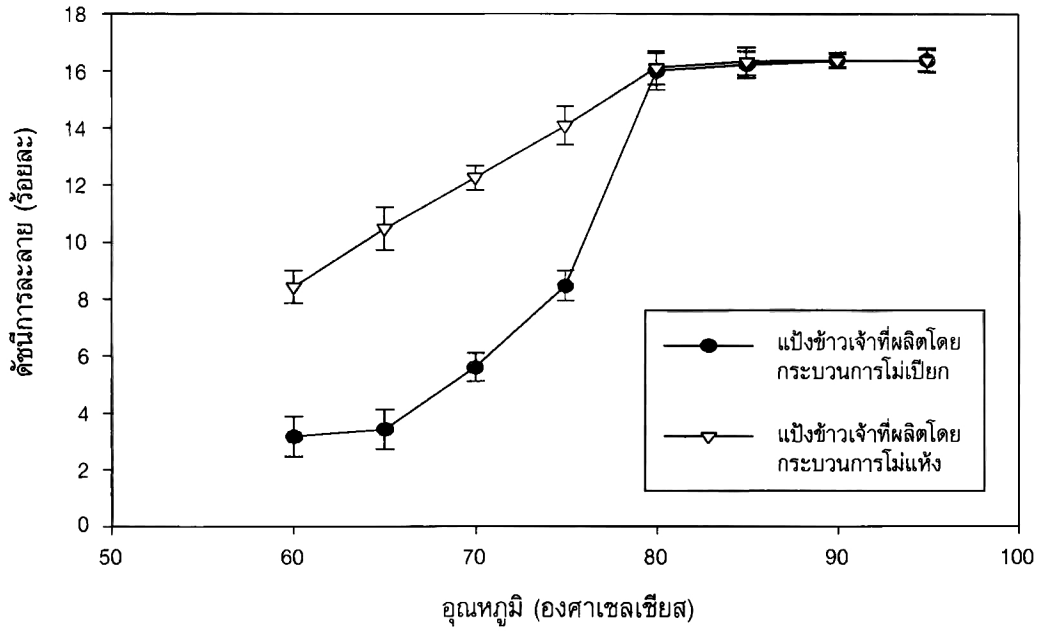
* ข้อมูลในแนวตั้งที่มีอักษรแตกต่างกัน (a,b,...) แสดงความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคร่วมกับร้อยละความเสียหายของแป้ง พบว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กมีแนวโน้มที่มีปริมาณความเสียหายของแป้งสูงกว่าของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า ทั้งนี้เนื่องจากความเสียหายที่เกิดกับเม็ดสตาร์ชมักเกิดบริเวณขอบของอนุภาคแป้ง [16] ดังนั้นแป้งขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าจึงมีแนวโน้มที่เกิดความเสียหายสูงขึ้นด้วย

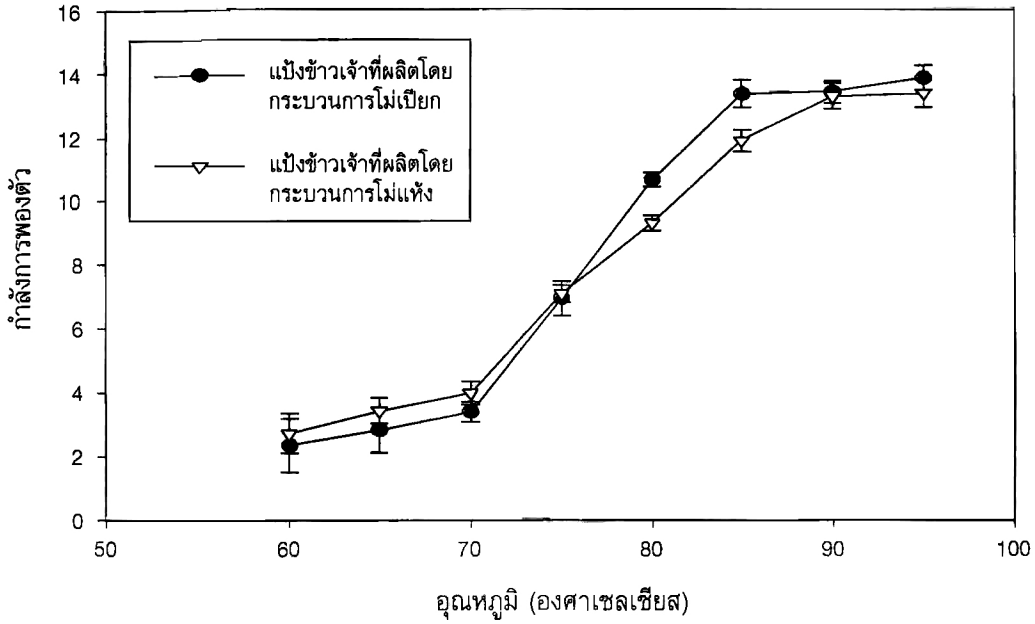
ในส่วนของค่าการละลายและการพองตัวของแป้ง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพระหว่างการเกิดเจลาทิไนเซชัน โดยเมื่อสารละลายน้ำแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิเจลาทิไนเซชัน ความร้อนจะเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของอะมิโลเพกติน ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชดูดซับน้ำและพองตัว และเกิดการละลายของอะมิโลสออกจากเม็ดสตาร์ช ซึ่งการละลายของแป้งจะวัดในรูปของดัชนีการละลาย ซึ่งเป็นค่าที่

บ่งบอกถึงปริมาณอะมิโลสที่ละลายออกมาจากเม็ดสตาร์ชระหว่างการให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง ส่วนการพองตัวของแป้งวัดในรูปของกำลังการพองตัว ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเม็ดสตาร์ชในการดูดซับน้ำและพองตัวขณะให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง

จากรูปที่ 2 และ 3 พบว่าทั้งค่าดัชนีการละลายและกำลังการพองตัวของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากแป้งเริ่มเกิดการเจลาทิไนเซชัน โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 60 - 80 องศาเซลเซียส ค่าดัชนีการละลายของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งมีค่ามากกว่าค่าดัชนีการละลายของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียก แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส ค่าดัชนีการละลายของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตจากทั้งสองกระบวนการจะมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาผลการทดลองเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงก่อนเกิดการเจลาทิไนเซชันและช่วงการเกิดเจลาทิไนเซชัน ซึ่งอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชันของแป้งข้าวเจ้าจะอยู่ในช่วงประมาณ 68 - 72 องศาเซลเซียส [17] พบว่าที่ช่วงอุณหภูมิ 60 - 65 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงก่อนเกิดการเจลาทิไนเซชัน ดัชนีการละลายของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 8.42 เป็นร้อยละ 10.46 ในขณะที่ดัชนีการละลายของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 3.17 เป็นร้อยละ 3.42 และมีค่าน้อยกว่าดัชนีการละลายของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งมาก ซึ่งที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งจะมีขนาดอนุภาคเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับน้ำมาก อีกทั้งกระบวนการโม่ยังมีผลให้เม็ดสตาร์ชแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ทำให้ส่วนอสัณฐานซึ่งประกอบด้วยอะมิโลสกระจายออกมาและละลายน้ำได้ง่ายขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ดัชนีการละลายของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งมีค่าสูงกว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียก



รูปที่ 2 ดัชนีการละลายของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรมที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 - 95 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 กำลังการพองของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้ง ในระดับอุตสาหกรรมที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 - 95 องศาเซลเซียส

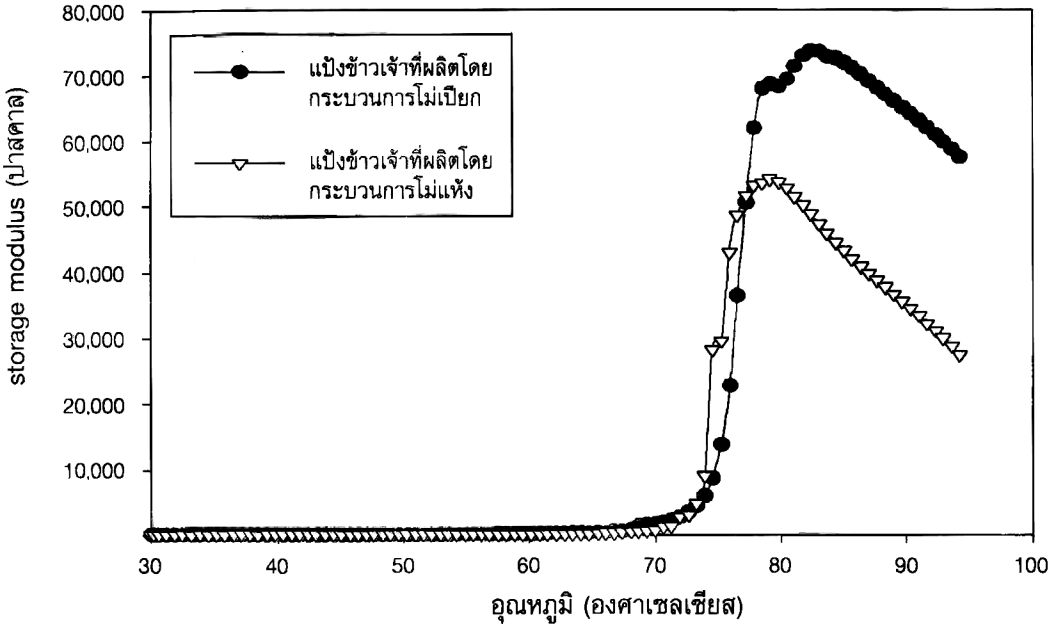
เมื่ออุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งสูงขึ้นถึงอุณหภูมิประมาณ 68-72 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงการเกิดเจลาทิไนเซชัน พบว่าดัชนีการละลายของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกเริ่มมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ช่วงอุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส (รูปที่ 2) เนื่องจากอะมิโลสจะละลายน้ำได้ดีเมื่อถึงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชัน ในขณะที่ดัชนีการละลายของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งเพิ่มในอัตราที่ช้ากว่า ทั้งนี้เพราะอะมิโลสบางส่วนได้ละลายออกไปในช่วงก่อนการเกิดเจลาทิไนซ์และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส อะมิโลสเกือบทั้งหมดละลายออกมาจากเม็ดสตาร์ช เป็นผลให้แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งซึ่งมีปริมาณอะมิโลสเริ่มต้นเท่ากันมีดัชนีการละลายใกล้เคียงกันมาก และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีก ค่าดัชนีการละลายของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตจากทั้งสองกระบวนการเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

สำหรับกำลังการพองตัวของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้ง (รูปที่ 3) พบว่าเมื่ออุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งเพิ่มขึ้นในช่วง 60 - 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงก่อนเกิดการเจลาทิไนเซชัน การพองตัวของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตจากทั้งสองกระบวนการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จนเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลาทิไนเซชัน การพองตัวของเม็ดสตาร์ชจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะความร้อนเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของอะมิโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ช เกิดหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่มีความสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มขึ้น [14] โดยในช่วงอุณหภูมิ 60 - 75 องศาเซลเซียส กำลังการพองตัวของเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งมีค่าใกล้เคียงกับแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียก แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 75 - 95 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงหลังเกิดการเจลาทิไนเซชันแล้ว พบว่ากำลังการพองตัวของเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการเปียกมีค่าสูงกว่า เนื่องจากช่วงนี้แป้งพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ ความร้อนเข้าไปแยกสายอะมิโลเพกตินออกจากกัน อะมิโลเพกตินจึงจับกับน้ำจนไม่สามารถคืนสภาพเดิมได้ โดยที่อะมิโลเพกตินเส้นยาว

และเกาะกลุ่มกันเป็นเม็ดสตาร์ชที่สมบูรณ์มีความสามารถดูดซับน้ำแล้วพองตัวได้ในปริมาณที่สูงกว่าส่วนที่เป็นเศษอะมิโลเพกติน [18] จึงทำให้แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกซึ่งมีความเสียหายของแป้งต่ำ มีกำลังการพองตัวสูงกว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง

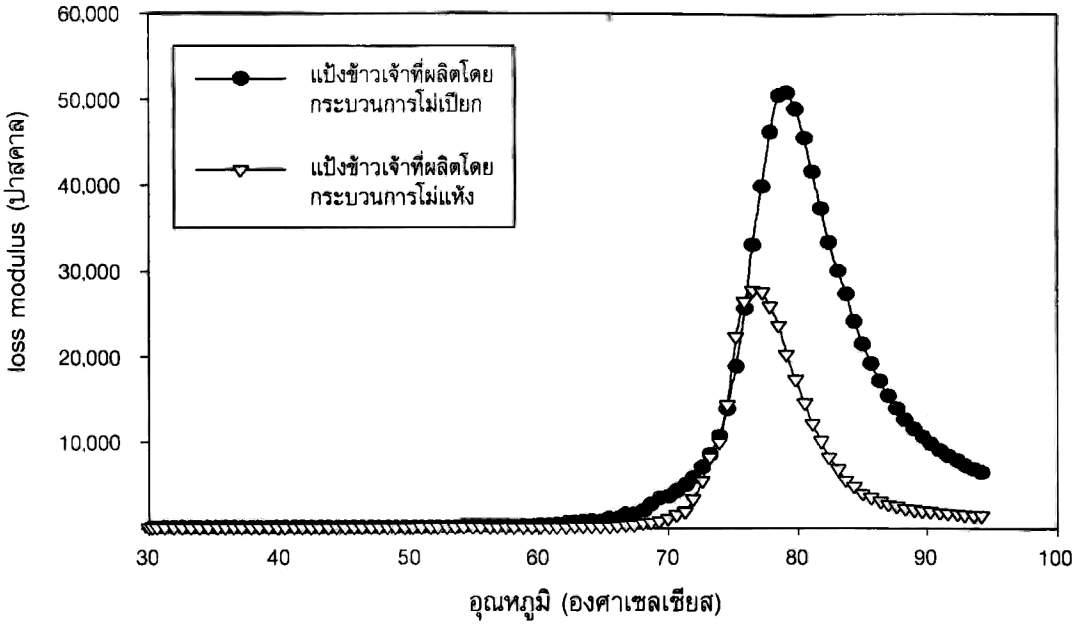
3.3 คุณสมบัติทางรีโอโลจี

เมื่อทดลองให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้งจากอุณหภูมิ 30 - 95 องศาเซลเซียส และลดอุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนจาก 95 - 30 องศาเซลเซียส พบว่าในช่วงแรกของการเพิ่มอุณหภูมิค่า storage modulus (G′) ซึ่งแสดงความยืดหยุ่นของส่วนที่แสดงลักษณะของของแข็งภายในโครงสร้างของสารละลายน้ำแป้งที่เตรียมจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งมีค่าคงที่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งสูงถึง 70 องศาเซลเซียส ค่า G′ ของสารละลายน้ำแป้งจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งสูงขึ้น สังเกตได้จากเส้นกราฟมีความชันเพิ่มขึ้น แสดงว่าความยืดหยุ่นของสารละลายน้ำแป้งเพิ่มขึ้นจากเดิมหรือสารละลายน้ำแป้งเริ่มมีลักษณะใกล้เคียงของแข็ง ปรากฏการณ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าสารละลายน้ำแป้งเริ่มเกิดการเจลาทิไนเซชัน ซึ่งลักษณะของสารละลายน้ำแป้งที่เปลี่ยนแปลงไปนี้เรียกว่า sol โดยค่า G′ ของ sol จากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งจะเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ส่วนค่า G′ ของ sol จากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีก sol จากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตจากทั้งสองกระบวนการมีค่า G′ ลดลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการวิจัยของ Cheng และคณะ [1] ซึ่งพบว่าการให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้งที่เกิดการเจลาทิไนเซชันแล้ว sol ที่ได้มีค่า G′ ลดลงประมาณ 1/2 หรือ 1/3 ของค่า G′ สูงสุด ซึ่ง Eliasson และ Bohlin [18] อธิบายว่าการลดลงของค่า G′ เกิดจากความร้อนที่มากเกินไป เป็นผลทำให้โมเลกุลต่างๆ ภายในโครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่ซนกันหรือเกิดเอนโทรปีอิสระมากขึ้น ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดการแตกหัก ความแข็งแรงของโครงสร้างจึงลดลง ดังนั้นลักษณะของของแข็งภายในโครงสร้างจึงลดลง ส่งผลให้ค่า G′ ต่ำลง จากรูปที่ 4 ยังพบว่าค่า G′ ของ sol จากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกเริ่มลดลงที่อุณหภูมิสูงกว่า 85 องศาเซลเซียส ในขณะที่แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งมีค่า G′ ลดลงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แสดงว่าส่วนที่แสดงลักษณะของของแข็งภายในโครงสร้างของ sol จากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีความแข็งแรงสูงกว่าจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง



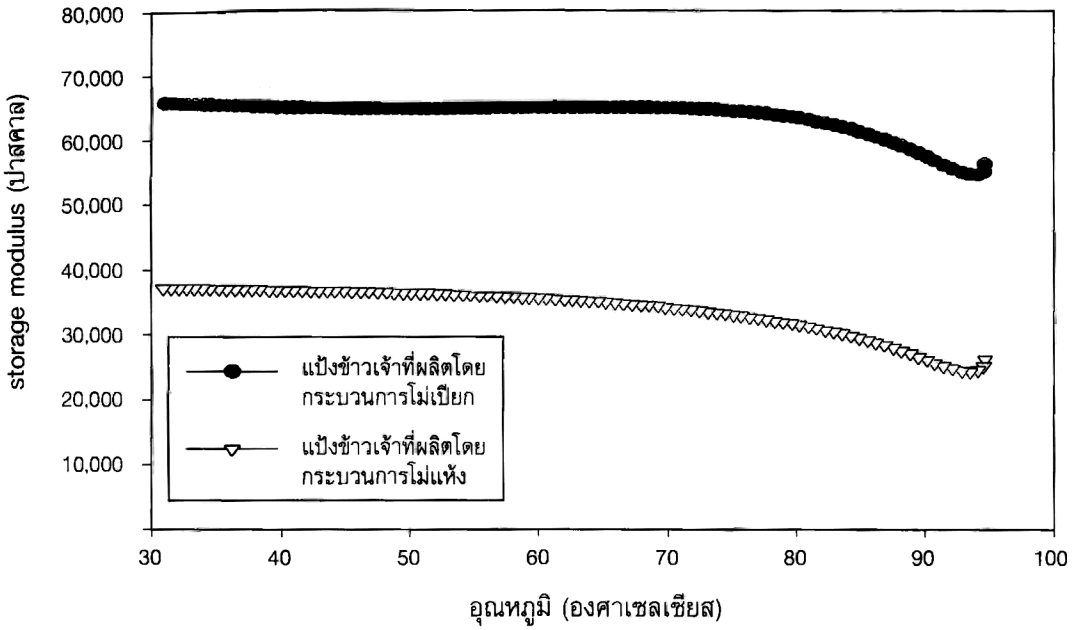
รูปที่ 4 ค่า storage modulus (G′) ของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการไม่เปียก และไม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม ระหว่างให้ความร้อน

จากรูปที่ 5 ซึ่งแสดงค่า loss modulus (G″) ของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการไม่เปียกและไม่แห้ง พบว่าในช่วงแรกของการให้ความร้อน ค่า G″ ซึ่งแสดงความหนืดของส่วนที่แสดงลักษณะของของเหลวภายในโครงสร้างมีค่าคงที่เช่นเดียวกับค่า G′ แต่ค่า G″ จะเริ่มเพิ่มสูงขึ้นที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้นของค่า G′ คือที่อุณหภูมิประมาณ 75 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4) ทั้งนี้เนื่องมาจากอะมิโลสภายในเม็ดสตาร์ชสามารถละลายออกมาในน้ำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชัน ซึ่งอะมิโลสที่ละลายออกมานี้ทำให้สารละลายน้ำแป้งมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชันแล้ว เม็ดสตาร์ชจะดูดซับน้ำมากขึ้นทำให้มีน้ำในระบบเหลือน้อยลง เป็นผลให้การเคลื่อนที่ของเม็ดสตาร์ชลดลง ความหนืดจึงมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อให้ความร้อนต่อไปอีกพบว่า ค่า G″ ลดลงเช่นเดียวกับค่า G′ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกัน โดยในช่วงหลังการเกิดเจลาทิไนเซชันนี้ ค่า G″ ของ sol จากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการไม่เปียกมีค่ามากกว่าค่า G″ ของ sol จากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการไม่แห้ง โดย sol จากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการไม่เปียกมีค่า G″ สูงสุดเท่ากับ 50,900 ปาสคาล ส่วน sol จากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการไม่แห้งมีค่า G″ สูงสุดเท่ากับ 27,700 ปาสคาล ซึ่งค่า G″ ที่มากกว่าของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการไม่เปียกนี้ แสดงให้เห็นว่าส่วนที่แสดงลักษณะของของเหลวภายในโครงสร้างของ sol จากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการไม่เปียกมีความหนืดสูงกว่า sol จากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการไม่แห้ง เนื่องจากโครงสร้างที่มีความหนืดสามารถดูดซับพลังงาน ทำให้ความเครียดที่ sol ได้รับลดลงไป ค่า G″ ของ sol จากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการไม่เปียกจึงสูงขึ้น

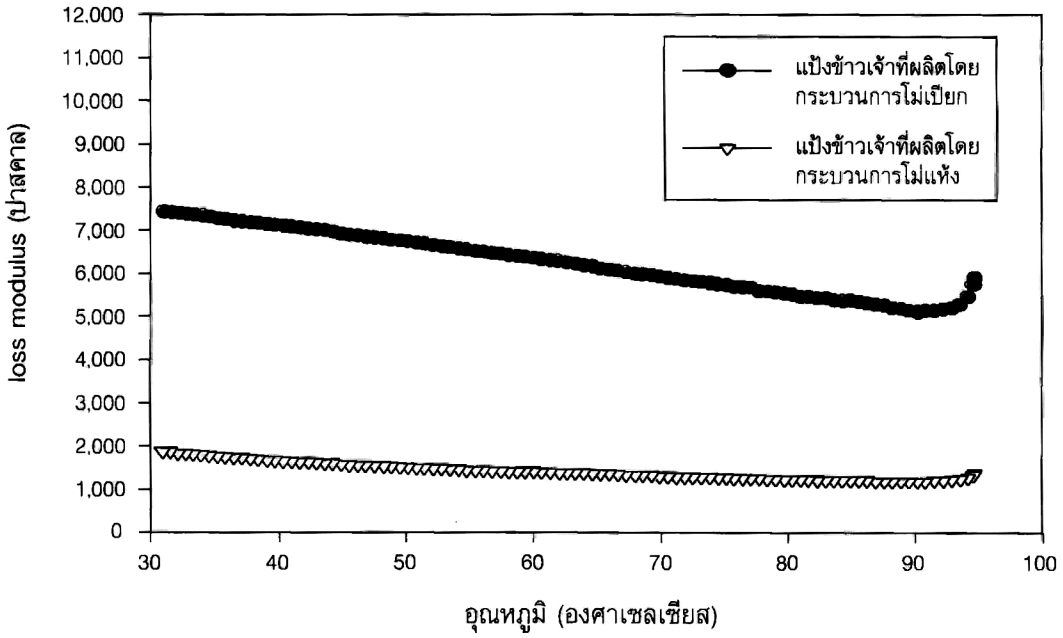


รูปที่ 5 ค่า loss modulus (G″) ของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียก และโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรมระหว่างให้ความร้อน

จากการศึกษาค่า G′ และค่า G″ ของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งเมื่อลดอุณหภูมิของ sol ลงจาก 95 จนถึง 30 องศาเซลเซียส พบว่าทั้งค่า G′ และค่า G″ ของ sol จากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตจากทั้งสองกระบวนการมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิลดลง (รูปที่ 6 และ 7) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอะมิโลสที่ละลายออกมาจากเม็ดสตาร์ชในช่วงให้ความร้อนจับตัวกันล้อมรอบเม็ดสตาร์ชที่พองตัวเกิดเป็นโครงร่างสามมิติของเจลแป้ง ทำให้ sol ค่อยๆ มีความแข็งแรงและมีความหนืดสูงขึ้นจนกลายเป็นเจลในที่สุด โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ sol ในช่วงนี้เรียกว่า sol to gel [18] ซึ่งเมื่อสังเกตพบว่าค่า G′ และค่า G″ ของ sol to gel จากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกยังคงมีค่าสูงกว่าจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดสตาร์ชที่แตกต่างกัน โดยเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกจะมีการพองตัวสูงกว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง (รูปที่ 3) ดังนั้นความยืดหยุ่นและความหนืดของโครงสร้าง sol to gel ของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกจึงมีค่าสูงกว่าด้วย

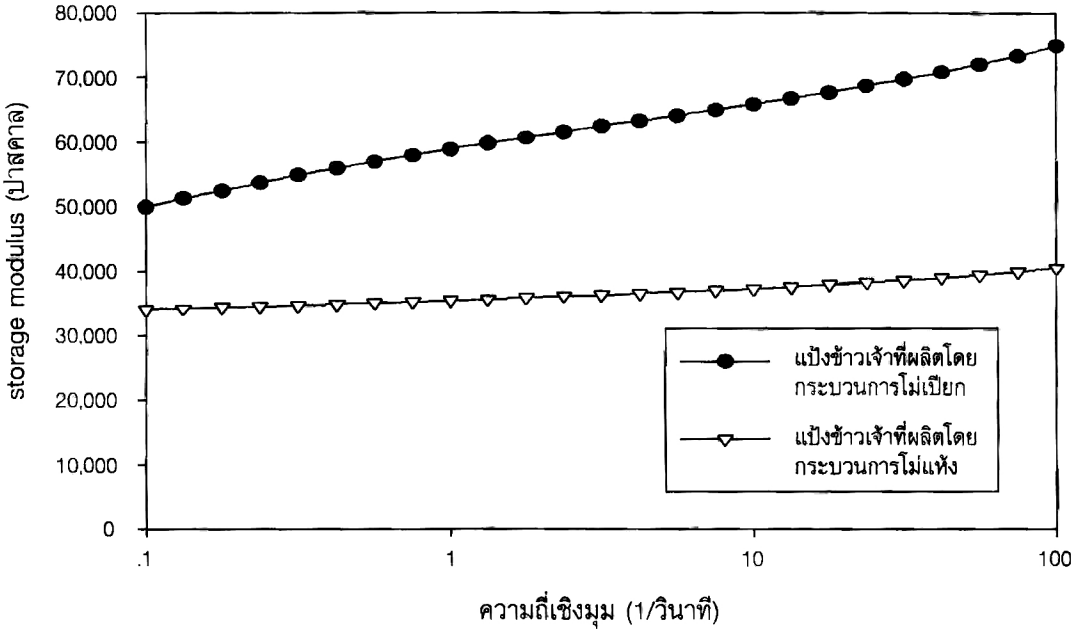


รูปที่ 6 ค่า storage modulus (G′) ของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียก และโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรมขณะทำให้เย็น



รูปที่ 7 ค่า loss modulus (G″) ของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียก และโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรมขณะทำให้เย็น (จาก 90 °ซ ถึง 30 °ซ)

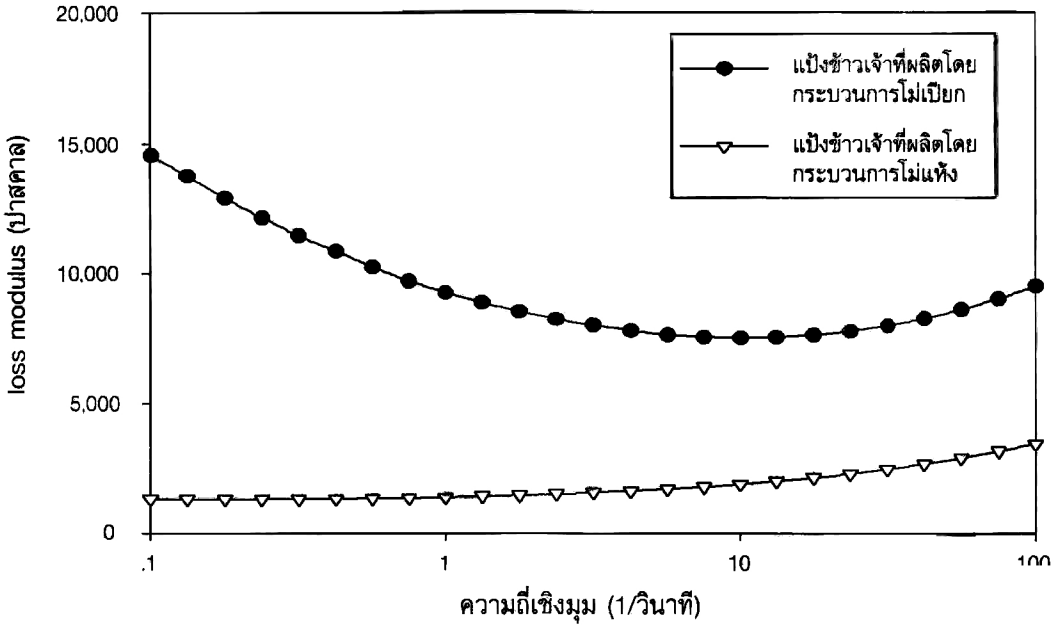
สำหรับการทำ frequency sweep test นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเจลแป้งเมื่อรับแรงในอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะบ่งชี้ถึงโครงสร้างและความแข็งแรงของตัวเจลแป้งได้ จากผลการทดลองพบว่าค่า G′ ของเจลจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีค่าอยู่ในช่วง 49,950 - 75,000 ปาสคาล ส่วนค่า G′ ของเจลจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งมีค่าอยู่ในช่วง 34,050 - 40,450 ปาสคาล (รูปที่ 8) โดยค่า G′ ของแป้งทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เชิงมุมของความเค้นสูงขึ้น แสดงว่าเจลของแป้งทั้งสองชนิดมีพฤติกรรมเหมือนกัน นั่นคือ ส่วนที่แสดงลักษณะของของแข็งภายในโครงสร้างมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำในอัตราเร็วที่สูงขึ้น โดยเจลจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีความยืดหยุ่นมากกว่าเจลจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งมาก ทำให้มีค่า G′ สูงกว่าเจลจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งในทุกๆ ช่วงความถี่ ซึ่งอาจเนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีรูปร่างสมบูรณ์ และมีการรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ การคืนรูปร่างเมื่อใส่แรงเข้าไปและปล่อยออก จึงดีกว่าเม็ดสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าและมีความเสียหายของแป้งมาก



รูปที่ 8 ค่า storage modulus (G′) ของเจลจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม (จาก 90°ซ ถึง 30°ซ)

รูปที่ 9 แสดงค่า G″ ของเจลจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้ง ซึ่งพบว่าค่า G″ ของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีค่าอยู่ในช่วง 7,520-14,550 ปาสคาล ส่วนค่า G″ ของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งมีค่าอยู่ในช่วง 1,315 - 3,445 ปาสคาล โดยช่วงความถี่เชิงมุมของความเค้นเท่ากับ 0.1 - 10 1/วินาที ค่า G″ ของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีค่าลดลงจาก 14,550 ปาสคาส เป็น 7,520 ปาสคาล และจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจาก 7,520 ปาสคาล เป็น 9,505 ปาสคาล เมื่อความถี่เชิงมุมสูงกว่า 10 1/วินาที ซึ่งการลดลงของค่า G″ชี้ให้เห็นว่าเมื่อเจลจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกได้รับแรงในอัตราเร็วที่สูงขึ้น ส่วนที่แสดงลักษณะของของเหลวภายในโครงสร้างของเจลมีแรงต้านทานต่อการไหลน้อยลง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในโครงสร้างมากขึ้นส่งผลให้เจลมีค่า G″ ลดลง ในขณะที่ค่า G″ ของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิต

โดยกระบวนการโม่แห้งมีค่ามากขึ้น เมื่อความถี่ของการให้แรงสูงขึ้น แสดงว่าโมเลกุลภายในเจลจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งมีการเคลื่อนที่น้อยลงหรือมีแรงต้านทานการไหลมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแรงต้านทานการไหลของเจลจากแป้งโม่เปียกยังคงมีค่าสูงกว่าเจลจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้งหรืออีกนัยหนึ่งคือเจลจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีความหนืดสูงกว่าเจลจากแป้งข้าวเจ้าโม่แห้ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีขนาดอนุภาคใหญ่จึงมีการดูดซับน้ำและพองตัวได้มาก (รูปที่ 2 และ 3) เม็ดสตาร์ชจึงเกิดการเคลื่อนที่เมื่อได้รับแรงน้อยกว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตจากกระบวนการโม่แห้ง ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็ก



รูปที่ 9 ค่า loss modulus (G″) ของเจลจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้าและอะมิโลสของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตจากกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) แต่พบว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าและมีความเสียหายของแป้งต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง ซึ่งขนาดอนุภาคและความเสียหายของเม็ดสตาร์ชที่แตกต่างกันส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและคุณสมบัติทางรีโอโลจีของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรมมีความแตกต่างกันด้วย โดยสารละลายน้ำแป้งจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียก มีกำลังการพองตัวสูงกว่าสารละลายน้ำแป้งจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง นอกจากนี้พบว่าสารละลายน้ำแป้งจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกขณะให้ความร้อนแล้วทำให้เย็น รวมทั้งเจลจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีความยืดหยุ่นและความหนืดสูงกว่าจากแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่แห้ง ความแตกต่างของคุณสมบัติทางรีโอโลจีดังกล่าวอาจเป็นสาเหตุทำให้แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกมีความเหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นอาหารจำพวกเส้นก๋วยเตี๋ยว เส้นขนมจีน ซุปกระป๋อง และขนมต่างๆ เช่น ลอดช่อง ขนมเปียกปูน เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2546

6. เอกสารอ้างอิง

1. Chen, J. J., Lu, S., and Lii, C. Y., 1998, "Physicochemical Properties Changes in Waxy Rice Flour using Different Milling Methods", *Journal of the Chinese Agricultural Chemical Society,* Vol. 36, No. 3. pp. 272-282.

2. Bettge, A. D., Giroux, M. J., and Morris, C. F., 2000, "Susceptibility of Waxy Starch Granules to Mechanical Damage", *Cereal Chemistry,* Vol. 77, No. 6, pp. 750-753.

3. A. O. A. C., 1984, *Association of Official Analytical Chemistry,* 16th ed., Washington D. C., USA.

4. Juliano, B. O., 1972, *Rice Chemistry and Technology,* American Associate of Cereal Chemists Inc, St. Paul, pp. 23-25.

5. A. A. C. C., 1983, *American Association of Cereal Chemistry,* 6th ed., St. Paul, USA.

6. Holm, J., Bjorck, I., ASP, N. J., and Lundquist, I., 1985. "Starch Availability *in vitro* and *in vivo* after Flaking, Steam Cooking and Popping of Wheat", *Journal of Cereal Science,* Vol. 3, p. 193.

7. Leach, H. W., Mccowen, L. D., and Schoch, T. J., 1959, "Structure of the Starch Granule I. Swelling and Solubility Patterns of Various Starches", *Cereal Chemistry,* Vol. 36, pp. 543.

8. Cochran, W. G. and Cox, G. M., 1985, *Experimental Designs,* John Wiley and Sons, New York.

9. Sang, S. K. and Young, J. K., 1995, "Effects of Moisture Contents of Waxy Paddy on the Physical Properties of Dry Milled Rice Flour in Comparison with Wet-milled Rice Flour" *Foods and Biotechnology,* Vol. 4, No. 3, pp. 150-154.

10. Chen, J. J., Lu, S., and Lii, C. Y., 1999, "Effect of Milling on the Physicochemical Characteristics of Waxy Rice in Taiwan", *Cereal Chemistry,* Vol. 76, No. 5, pp. 796-799.

11. กล้าณรงค์ ศรีรอต, 2542, เทคโนโลยีของแป้ง, บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ, หน้า 9-57.

12. Young, I. K., Kum, J. S., and Kim, K. S., 1995, "Effect of Different Milling Methods of Rice Flour on Quality Characteristic of Jeungpyun", *Journal of Korean Society of Food Science,* Vol. 11, No. 3, pp. 213-219.

13. Arisaka, M., Nakamura, K., and Yoshii, Y., 1992, "Properties of Waxy Rice Flour Prepared by Different Milling Methods", *Denpun Kagaku,* Vol. 39, No. 3, pp. 155-163.

14. Mao, Y. and Flores, R. A., 2001, "Mechanical Starch Damaged on Wheat Flour Tortilla Texture", *Cereal Chemistry,* Vol. 78, No. 3, pp. 286-293.

15. Chiang, P. Y. and Yeh, A. I, 2002, "Effect of Soaking on Wet-milling of Rice", *Journal of Cereal Science,* Vol. 35, pp. 85-94.

16. Jones, C. R., 1940, "The Production of Mechanically Damaged Starch in Milling as a Governing Factor in the Diastatic Activity of Flour", *Cereal Chemistry,* Vol. 17, No. 2, pp. 74-90.

17. Lii, Y. C., Shao, Y. Y., and Tseng, H. K., 1995, "Gelation Mechanism and Rheological Properties of Rice Starch", *Cereal Chemistry,* Vol. 72, No. 4, pp. 393-400.

18. Morrison, W. R. and Tester, R. F., 1994a, "Properties of Damaged Starch Granules IV. Composition of Ball-milled Wheat Starches and Fractions Obtained on Hydration", *Journal Cereal Science,* Vol. 20, pp. 69-77.

19. Eliasson, A. C. and Bohlin, L., 1982, "Rheological Properties of Concentrated Wheat Starch Gels", *Starch/Stearke,* Vol. 34, p. 267.