

## การเร่งกระบวนการบ่มแผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยวจันทน์ด้วยการใช้อุณหภูมิต่ำ

### Acceleration of Aging Rice Stick Noodle by Using Low Temperature

#### คำนำ

ก๋วยเตี๋ยว เป็นอาหารเส้นแปรรูปมาจากข้าวเจ้าที่ได้รับอิทธิพลจากประเทศจีน ที่คนไทยนิยมรับประทานกันมาก เนื่องจากสามารถนำมาตัดแปดแปลงเป็นอาหารได้หลายชนิด และกำลังเติบโตในตลาดโลกอย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลมาจากผู้บริโภคให้ความสนใจก๋วยเตี๋ยวจากแป้งข้าวเจ้ามากขึ้น แต่เนื่องมาจากเส้นก๋วยเตี๋ยวสดมีอายุการเก็บรักษาสั้น จึงมีการพัฒนานำเทคโนโลยีการทำแห้งมาใช้ยืดอายุการเก็บรักษาเส้นก๋วยเตี๋ยว ซึ่งเส้นก๋วยเตี๋ยวบแห้งหลังคืนรูปแล้วมีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นก๋วยเตี๋ยวสด อีกทั้งกระบวนการผลิตไม่ยุ่งยากซับซ้อน และต้นทุนการผลิตต่ำ แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตมีขั้นตอนสำคัญที่ช่วยให้ตัดเส้นได้ง่าย เส้นที่ได้มีความคงตัว และมีเนื้อสัมผัสที่ผู้บริโภคต้องการ คือขั้นตอนการบ่มแผ่นก๋วยเตี๋ยว ซึ่งในขั้นตอนนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เรียกว่า รีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของแป้ง คือมีการจัดเรียงตัวใหม่ของ แอมิโลส และแอมิโลเพกทิน เกิดเป็นโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบมากขึ้น แต่การบ่มที่ใช้ในกระบวนการผลิตโดยทั่วไปมักจะทำที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่กระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นไปได้ช้ามาก ผู้ผลิตส่วนใหญ่นิยมทำการบ่มเป็นเวลาอย่างน้อย 8-12 ชั่วโมง ส่งผลให้กระบวนการผลิตชะงักซึ่งทำให้เสียเวลา รวมถึงแรงงาน และยังลดปริมาณผลผลิต (yield) ของการผลิตลง ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพ (efficiency) การผลิตต่ำ งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของแผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยว รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อลักษณะเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผลิตได้ เพื่อเป็นแนวทางในการลดระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยว ซึ่งจะเป็นการประหยัดเวลาในการผลิต อีกทั้งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต

เนื่องจากกระบวนการรีโทรเกรเดชันนี้เป็นกระบวนการคายความร้อน ดังนั้นการบ่มแผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยวที่อุณหภูมิต่ำ อาจเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชัน และย่นระยะเวลาการบ่มแผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยวลงได้

## วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลา และอุณหภูมิต่อการเกิดรีโทรเกรดชันในระหว่างการบ่มแผ่นแข็ง
2. ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิบ่มต่อการตัดแผ่นแข็งเป็นเส้น
3. ศึกษาอิทธิพลของการย่นระยะเวลาบ่มต่อเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยว

## การตรวจเอกสาร

### ก้วยเตี่ยว

ก้วยเตี่ยวเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการถ่ายทอดมาจากประเทศจีน โดยก้วยเตี่ยวแปรรูปจากข้าวเจ้าและเป็นอาหารที่คนไทยนิยมบริโภค เนื่องจากสามารถนำมาทำเป็นอาหารได้หลายรูปแบบ จนปัจจุบันกลายเป็นผลิตภัณฑ์อาหารส่งออก (ในรูปก้วยเตี่ยวอบแห้ง) ไปยังประเทศต่าง ๆ เช่น ฮองกง เกาหลี ญี่ปุ่น และอเมริกา เป็นต้น (Luh, 1999) และตลาดก้วยเตี่ยวข้าวเจ้ายังมีการเติบโตมากขึ้น เนื่องจากผู้บริโภคมีความสนใจในผลิตภัณฑ์ชนิดนี้มากขึ้น (Wood and Ho, 2005) ทั้งนี้เนื่องมาจากก้วยเตี่ยวมีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่เฉพาะตัว ไม่ว่าจะเป็นเนื้อสัมผัส กลิ่น รวมถึงรสชาติ (Luh, 2001) นอกจากนี้พบว่าผู้บริโภคชาวตะวันตกเลือกรับประทานก้วยเตี่ยวแทนพาสต้าซึ่งทำมาจากแป้งสาลีเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากก้วยเตี่ยวซึ่งทำมาจากข้าวนั้นย่อยง่าย ไม่มีกลูเตน และไม่มีโปรตีนกลูเตนอันก่อให้เกิดอาการแพ้ได้ (Virtucio, 2005a) ทั้งยังมีราคาถูกแต่มีคุณค่าทางอาหาร (Virtucio, 2005b) โดยประเมินจากยอดการส่งออกของผลิตภัณฑ์เส้นก้วยเตี่ยวพบยอดการส่งออกเพิ่มขึ้นจาก 1,180.5 ล้านบาทในปี 2545 เป็น 1,559 ล้านบาทในปี 2547 และพบว่าประเทศผู้นำเข้าหลักคือสหรัฐอเมริกา (กระทรวงพาณิชย์, 2548)

#### 1. ความหมาย

เส้นก้วยเตี่ยว หมายถึง ผลิตภัณฑ์ซึ่งทำจากข้าวเจ้า หรือแป้งข้าวเจ้าเพียงอย่างเดียว ทำให้เป็นแผ่นบาง นึ่งให้สุก ตัดเป็นเส้น แล้วทำให้แห้ง (มอก. 832-2531; มอก. 959-2533) ในปัจจุบันอาจมีการนำแป้งชนิดอื่นมาผสม เช่น แป้งมันสำปะหลัง เพื่อเป็นตัวประสาน ทำให้เป็นแผ่นได้ดีขึ้น (กัลยาณี, 2541) โดยผลิตภัณฑ์ได้หลังการลวกให้สุก หรือเติมน้ำเดือดจะต้องมีสีขาวนวล นุ่ม เหนียว ไม่เกาะติดกัน และมีกลิ่นรสตามธรรมชาติ (มอก. 832-2531; มอก. 959-2533)

#### 2. ชนิดของก้วยเตี่ยว

การจำแนกประเภทก้วยเตี่ยวทำได้หลายทาง เช่น การจำแนกตามขนาดของเส้นก้วยเตี่ยว วัตถุประสงค์ที่นำมาผลิต กรรมวิธีการผลิต เป็นต้น (Corke and Bhattacharya, 1999) แต่ที่นิยมใช้กันมากคือปริมาณความชื้นภายในเส้นก้วยเตี่ยว แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด (งามชื่น, 2541; กัลยาณี, 2541) คือ

2.1 กว๋ยเตี๋ยวสด คือกว๋ยเตี๋ยวที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 62-64 นิยมทาแผ่น กว๋ยเตี๋ยวด้วยน้ำมันพืช เช่น น้ำมันถั่วลิสง เพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นกว๋ยเตี๋ยวดัดกัน จากนั้นจึงนำ แผ่นกว๋ยเตี๋ยวสดมาหั่นเป็นเส้น ซึ่งอาจเป็นเส้นใหญ่ที่มีขนาดกว้าง 1.5-2.5 เซนติเมตร หรือเส้น เล็กขนาด 0.4-0.5 เซนติเมตร เนื่องจากเส้นกว๋ยเตี๋ยวชนิดนี้ไม่ผ่านการทำแห้ง จึงมีอายุการเก็บ รักษาเพียง 1-2 วัน

2.2 กว๋ยเตี๋ยวกึ่งแห้ง คือกว๋ยเตี๋ยวที่ได้จากการนำเส้นสดมาผึ่งลมจนมีความชื้นประมาณ ร้อยละ 37 แล้วจึงตัดเป็นเส้น โดยปกติเส้นกว๋ยเตี๋ยวชนิดนี้มีอายุการเก็บรักษา 1-2 วัน เช่น เดียวกับกว๋ยเตี๋ยวสด

2.3 กว๋ยเตี๋ยวเส้นแห้ง คือกว๋ยเตี๋ยวที่ทำให้แห้งด้วยการอบลมร้อนหลังจากการตัดเป็น เส้นแล้ว กว๋ยเตี๋ยวชนิดนี้มีความชื้นประมาณร้อยละ 13 หรือต่ำกว่า และในการผลิตจะไม่มี การทาน้ำมัน เพื่อป้องกันการเกิดกลิ่นหืน จึงสามารถเก็บรักษาได้นาน

กว๋ยเตี๋ยวจันท์จัดเป็นกว๋ยเตี๋ยวเส้นแห้งชนิดหนึ่ง การผลิตกว๋ยเตี๋ยวจันท์นั้น เริ่ม จากการเกลี่ยน้ำแป้งบาง ๆ (ความหนาไม่เกิน 1 มิลลิเมตร) บนสายพานผ้า ึ่งน้ำแป้งเพื่อให้ได้ แผ่นแป้งกว๋ยเตี๋ยว ทิ้งแผ่นแป้งให้เย็น และนำไปบ่ม ก่อให้เกิดกระบวนการรีโทรเกรเดชัน เป็น การทำให้แผ่นแป้งมีความแน่นแข็ง และเหนียวพอเหมาะแก่การตัดเป็นเส้น จากนั้นนำเส้น กว๋ยเตี๋ยวที่ตัดได้ไปทำแห้งต่อไป ซึ่งกว๋ยเตี๋ยวจันท์ต้องทำการคืนรูป (rehydrate) ก่อนการ บริโภค (Virtucio, 2005b) กว๋ยเตี๋ยวจันท์มีข้อดีคือ ให้พลังงานไม่สูงมากนัก ไม่มีคลอ เรสเทอรอล (anonymous, 2006) นอกจากนี้กว๋ยเตี๋ยวจันท์ยังปราศจากโปรตีนกลูเตน จึง จัดเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับผู้รักสุขภาพ และผู้ที่มีอาการแพ้โปรตีนกลูเตน (Virtucio, 2005b)

นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ที่ใช้ข้าวเป็นวัตถุดิบ แต่ต่างกันที่ขนาดและรูปร่าง เช่น ใบ เมียง หรือแป้งแผ่น และแผ่นกว๋ยจับ หรือผลิตภัณฑ์ที่มีกระบวนการผลิตต่างกัน เช่น เส้นหมี่ และขนมจีน เป็นต้น (วิภา, 2541)

### 3. วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกล้วยเดี่ยว

#### 3.1 ข้าว

ข้าวมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa* L. จัดเป็นธัญชาติ หมายถึงธัญพืชวงศ์หญ้า ซึ่งเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ที่มีเปลือกแข็งหุ้มเมล็ด ส่วนประกอบที่สำคัญของโครงสร้างคือ (จิตรณา และอรอนงค์, 2543; อรอนงค์, 2547)

3.1.1 เปลือกหุ้มผล (pericarp) อยู่ถัดจากเปลือกแข็ง (husk) ประกอบด้วยเซลล์รูปร่างต่าง ๆ 3 ชั้นคือ ชั้นเปลือกนอก (epicarp) ชั้นกลาง (mesocarp) และชั้นใน (endocarp) ประกอบด้วยเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่และแร่ธาตุต่าง ๆ นอกจากนี้ยังพบว่ามีสารให้สี ซึ่งทำให้เมล็ดข้าวกล้องมีสีต่าง ๆ คือมีสีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีน้ำตาลเกือบดำ

3.1.2 เปลือกหุ้มเมล็ด (testa) และเยื่อโปร่งใส (hyaline layer) เป็นชั้นที่มีเซลล์แถวเดียว หรือแถวคู่โดยเซลล์แถวในจะมีสารให้สีอยู่ด้วยทำให้เปลือกของธัญชาติมีสีต่างกัน ส่วนเยื่อโปร่งใสจะอยู่ถัดจากเปลือกหุ้มเมล็ด มีลักษณะใสไม่มีสี

3.1.3 เยื่อหุ้มเนื้อเมล็ด (aleurone) ประกอบด้วยเซลล์แถวเดียวหรือหลายแถว ขึ้นอยู่กับชนิดของธัญชาติ เป็นแหล่งสะสมโปรตีน ไขมัน และแร่ธาตุรวมทั้งกรดไฟติก (phytic acid)

3.1.4 เนื้อเมล็ด (endosperm) เป็นเซลล์ที่มีผนังบางหุ้มเมล็ดสตาร์ชและสารอาหารอื่น ได้แก่ โปรตีน และไขมันอยู่ภายใน มีรูปร่างต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับบริเวณของเมล็ด ถ้าอยู่ใกล้ชั้นเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ดจะมีรูปร่างยาวรี ถัดเข้ามาข้างในไกลใจกลางจะยิ่งกลมมน

3.1.5 คัพภะ (embryo) เป็นส่วนที่จะเจริญไปเป็นต้นอ่อน อยู่ตอนล่างมีชั้นสคูเทลลัม (scutellum) คั่นระหว่างเนื้อเมล็ดกับส่วนของคัพภะ ที่ประกอบด้วยยอดอ่อน และราก อุดมด้วยสารอาหารโปรตีน ไขมัน วิตามิน และแร่ธาตุ

องค์ประกอบหลักของข้าวคือคาร์โบไฮเดรต โดยพบมากถึงร้อยละ 90 ของน้ำหนักแห้ง ทำให้ข้าวจัดเป็นอาหารที่ให้พลังงานสูง คาร์โบไฮเดรตเกิดขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช โดยทำการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำให้กลายเป็นน้ำตาล และเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโมเลกุลที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ในแป้งข้าวประกอบด้วยสายโซ่โพลีเมอร์ที่สำคัญ 2 ชนิดคือ แอมิโลส และแอมิโลเพกทิน จัดเรียงตัวกันอยู่เป็นเม็ดกลมที่ไม่ละลายน้ำ เรียกว่า เม็ด

แป้ง (starch granule) (Mile *et al.*, 1985) โดยแอมิโลสประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสมาเรียงต่อกันเป็นสายยาวที่มีจำนวนกึ่งน้อยมาก ส่วนแอมิโลเพกตินนั้นแม้ว่าจะประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสมาเรียงต่อกัน แต่เนื่องจากโครงสร้างที่มีจำนวนกึ่งมากมายนี้ เป็นผลให้สมบัติของโพลีแซคคาไรด์ทั้งสองชนิด เช่น สมบัติการละลาย มีความแตกต่างกัน (Coultate and Davies, 1994) นอกจากนี้แอมิโลสยังอยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous) ทำให้แอมิโลสพร้อมที่จะถูกชะออกมานอกเม็ดแป้ง (อรพิน, 2533)

เกณฑ์การแบ่งประเภทของข้าวมีหลากหลายเกณฑ์ ส่วนมากนิยมแบ่งตามปริมาณแอมิโลสที่มีอยู่ โดยแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด คือ ข้าวเหนียว (มีแอมิโลสอยู่น้อยกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก) ข้าวแอมิโลสต่ำมาก (แอมิโลสร้อยละ 5-12) ข้าวแอมิโลสต่ำ (ปริมาณแอมิโลสร้อยละ 12-20) ข้าวแอมิโลสปานกลาง (แอมิโลสร้อยละ 20-25) และข้าวแอมิโลสสูง (แอมิโลสร้อยละ 25-33) (Juliano, 1992)

นอกจากนี้ยังนิยมทำการแบ่งข้าวออกตามความยาวของเมล็ด (McWilliams, 2001) ซึ่งจำแนกข้าวออกได้เป็น 3 ชนิด คือ ข้าวพันธุ์เมล็ดยาว (6-7 ม.ม.) ข้าวเมล็ดขนาดกลาง (5-5.9 ม.ม.) และข้าวพันธุ์เมล็ดสั้น (น้อยกว่า 5 ม.ม.) โดยข้าวเมล็ดยาวจัดเป็นข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงที่สุด เนื่องจากแอมิโลสสามารถดูดซึมน้ำได้น้อยกว่าแอมิโลเพกติน เป็นผลให้ข้าวเมล็ดยาวมีความร่วนเมื่อหุงสุกมากกว่าข้าวอีก 2 ชนิด นอกจากนี้แอมิโลสยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดน้ำของเม็ดแป้ง และช่วยให้เม็ดแป้งไม่ยุบตัวหลังการพอง (วิภา, 2541) แอมิโลสในข้าวแต่ละพันธุ์มีปริมาณที่แตกต่างกัน เป็นผลให้ข้าวแต่ละพันธุ์มีสมบัติที่ต่างกัน ทั้งในด้านกายภาพ เคมี และเคมีกายภาพ

Varavinit *et. al* (2003) ทำการศึกษาผลของปริมาณแอมิโลสต่อสมบัติของแป้งจากข้าวไทยพันธุ์ต่าง ๆ พบว่าปริมาณแอมิโลสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดเจลลาดินโซเพิ่มสูงขึ้น เมื่อวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืด (pasting properties) ด้วยเครื่อง RVA (rapid visco analyzer) พบว่าค่าเบรกดาวน (break down) และค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) มีค่าต่ำลง แต่ค่าเซตแบค (setback) และอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณแอมิโลสของข้าวเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Noda *et al.* (2001) Baik and Lee (2003) และคันทันนีย์ (2548) นอกจากนี้ Cameron and Wang (2005) ยังพบว่าปริมาณแอมิโลสยังมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความแข็งของเจล และมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความเหนียวของเจล

เมื่อทำการศึกษาสมบัติทางความร้อน (thermal properties) ของแป้ง โดยการใช้เครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) พบว่าแป้งที่มีปริมาณแอมิโลสสูงมีค่าอุณหภูมิ

สูงสุด (peak temperature) และเอนทัลปี (enthalpy;  $\Delta H$ ) ของการเกิดเจลลิตในเซชันลดลง (Noda *et al.*, 2001) นอกจากนี้คันสนีย์ (2548) พบว่าข้าวที่มีแอมิโลสสูงมีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันสูงกว่าข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ

Piyachomkwan *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของสตาร์ชข้าวต่อคุณภาพของข้าวสุก พบว่าข้าวแอมิโลสสูงมีเม็ดสตาร์ชที่มีความคงทนต่อการพอง และมีแนวโน้มที่จะเกิดริโทเกรเดชันได้มากกว่าข้าวแอมิโลสต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวที่มีแอมิโลสสูงมีสมบัติในการเกิดเจลได้ดี และพบว่าปริมาณแอมิโลสมีผลต่อเนื้อสัมผัสของข้าวสุก โดยมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความแข็งของเมล็ดข้าวสุก และสัมพันธ์เชิงลบกับค่าความเหนียวติด (adhesiveness) นอกจากนี้ Okuda *et al.* (2005) พบว่าปริมาณแอมิโลสมีผลต่อความไวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์

ข้าวที่นำมาใช้ในการผลิตก๋วยเตี๋ยว คือ ข้าวเจ้า (non-waxy rice) โดย Yoenyongbuddhagal and Noomhorm (2002) รายงานไว้ว่าข้าวเจ้าแต่ละพันธุ์มีผลต่อคุณภาพของเส้นก๋วยเตี๋ยว กล่าวคือข้าวแต่ละพันธุ์ให้ความเหนียวแก่เส้นก๋วยเตี๋ยวต่างกัน เนื่องจากข้าวเป็นธัญชาติที่ไม่มีโปรตีนกลูเตนเช่นในข้าวสาลี ดังนั้นคุณภาพของก๋วยเตี๋ยวจึงขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชข้าวโดยตรง ซึ่งจะมีผลต่อการเกิดโครงสร้างร่างแหในก๋วยเตี๋ยว และพบว่าค่าความแข็งแรงของเจล (gel hardness) มีความสัมพันธ์อย่างมากกับคุณภาพของเส้นหมี่ Tatsumi *et al.* (2001) ได้ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมิโลสกับค่าที่ได้จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสแล้วพบว่า ก๋วยเตี๋ยวที่มีคุณภาพทางประสาทสัมผัสจะต้องผลิตจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสไม่ต่ำกว่าร้อยละ 20

เสนอ (2522) พบว่าข้าวเจ้าพันธุ์ดอกมะลิ 105 (ปริมาณแอมิโลสร้อยละ 17.5 ของน้ำหนักแห้ง) ไม่สามารถผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวได้ แต่ข้าวเจ้าที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (มากกว่าร้อยละ 27 ของน้ำหนักแห้ง) สามารถผลิตเป็นเส้นก๋วยเตี๋ยวได้ แต่มีคุณภาพที่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับงานวิจัยของกมลวรรณ (2548) พบว่าแป้งข้าวพันธุ์ กข 6 กข 7 และขาวดอกมะลิ 105 ไม่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๋วยเตี๋ยวจันทน์ แต่พบว่าแป้งข้าวเหลือง 11 มีความเหมาะสม เนื่องจากให้น้ำแป้งที่มีความหนืดเหมาะสม สามารถกึ่งบนสะดึงได้ทั่วทั้งแผ่นและมีความหนาสม่สม่ำเสมอ และสามารถลอกออกมาเป็นแผ่นแป้งได้โดยไม่ขาด จึงอาจกล่าวได้ว่าปัจจัยสำคัญในการเลือกข้าวเจ้าที่จะนำมาใช้ผลิตก๋วยเตี๋ยวคือ ปริมาณแอมิโลส โดยข้าวเจ้าที่เหมาะสมในการผลิตก๋วยเตี๋ยวควรเป็นข้าวเจ้าแอมิโลสสูง และมีค่าเซตแบคไม่ต่ำกว่า 300 บราเบนเดอรัยูนิต (B.U.) (ณรงค์, 2538)

งานวิจัยของ Baik and Lee (2003) ระบุว่าความแข็งของเส้นอุด้ง (white salted noodle) ซึ่งเป็นเส้นก๋วยเตี๋ยวของญี่ปุ่น มีความสัมพันธ์ทางบวกกับปริมาณแอมิโลส แต่พบว่าความเหนียวติดแปรผกผันกับปริมาณแอมิโลส เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Yoenyongbuddhagal and Noomhorm (2002) นอกจากนี้ Bhattacharya *et al.* (1999) ยังพบว่าแอมิโลสมีความสัมพันธ์กับคุณภาพด้านการบริโภค (eating quality) ของเส้นก๋วยเตี๋ยวโดยพบว่าปริมาณแอมิโลสมีความสัมพันธ์ทางบวกกับค่าแรงต้านทานการดึง (tensile strength) ค่าแรงติดในระหว่างเคี้ยว (chewiness)

Chinnapha (2001) ได้ทำการศึกษาถึงผลของแอมิโลส และแอมิโลเพกตินต่อคุณภาพของเส้นก๋วยเตี๋ยว พบว่าปริมาณแอมิโลสมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่าความเหนียวติด แต่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับสมบัติคล้ายของแข็ง (solid-like characteristic) โดยการจัดเรียงตัวกันใหม่ (retrogradation) ของแอมิโลสมีผลต่อโครงสร้างก๋วยเตี๋ยวและลดค่าความเหนียว (stickiness) และพบว่าแอมิโลเพกตินมีส่วนช่วยแอมิโลสในการพัฒนาโครงสร้างของเนื้อก๋วยเตี๋ยว จึงกล่าวได้ว่าแอมิโลสไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่มีผลต่อคุณภาพของก๋วยเตี๋ยว แต่แอมิโลสมีอิทธิพลต่อการเกิดโครงสร้าง 3 มิติของก๋วยเตี๋ยว ในขณะที่แอมิโลเพกตินมีผลต่อความสมบูรณ์ของโครงสร้างก๋วยเตี๋ยวที่เกิดขึ้น

การผลิตก๋วยเตี๋ยวจันทน์ นิยมใช้ข้าวเก่าที่ผ่านการเก็บรักษามาไม่น้อยกว่า 4 เดือน โดยในระยะเวลา 3-4 เดือนหลังการเก็บเกี่ยว ภายในเมล็ดข้าวมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น พบว่าเมล็ดข้าวมีความแกร่งมากขึ้น เนื่องจากกรดไขมันอิสระเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแอมิโลส เป็นผลให้ข้าวมีอัตราการดูดซึมน้ำได้เพิ่มขึ้น เป็นผลให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น แต่มีความเหนียวลดลง เมล็ดข้าวหุงสุกมีความร่วน และผิวหน้าของข้าวแห้ง นอกจากนี้ไขมันอิสระยังก่อให้เกิดกลิ่น (งามขึ้น, 2541; วิภา, 2541; มรกต, 2538; Juliano, 1992)

Chrastil (1994) กล่าวว่า การเก็บรักษาส่งผลให้เมล็ดข้าวสามารถดูดน้ำ และมีการพองตัวได้เพิ่มขึ้น แต่มีการสูญเสียของแข็งในระหว่างการหุงต้มลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าเมล็ดข้าวมีความแข็งแกร่งมากขึ้น เป็นผลให้มีผลได้จากการโม่เพิ่มขึ้น เมื่อนำข้าวเก่ามาหุง พบว่าต้องใช้ระยะเวลาการหุงเพิ่มขึ้น แต่มีเมล็ดข้าวที่กลดลง และข้าวสุกมีความร่วนมากขึ้น

อรพิน (2533) ได้ระบุว่า การใช้ข้าวเก่าเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๋วยเตี๋ยวจะทำให้แผ่นก๋วยเตี๋ยวที่นึ่งไม่ติดสายพาน เส้นไม่อมน้ำเมื่อนำไปประกอบอาหาร เส้นที่ได้มีความเหนียวไม่ขาดง่าย นอกจากนี้ข้าวเก่ายังให้เนื้อก๋วยเตี๋ยวมากกว่า เพราะมีสมบัติในการดูดน้ำ และขยายตัวได้สูงจึงมีการสูญเสียจากการล้างน้ำน้อย

Fan and Marks (1999) ได้รายงานไว้ว่าสภาวะการเก็บรักษาซึ่งส่งผลต่อเอนทัลปี และอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตไนเซชัน และรีโทรเกรเดชันของแป้งข้าวอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตไนเซชันสูงขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลถึงช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตไนเซชัน โดยพบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตไนเซชันเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อการหุงสุกของข้าว เช่นเดียวกับการศึกษาการเก็บข้าวสารของ Sermsirisophon and Kongkattikajorn (2005) และ Siwapornluk and Kongkattikajorn (2005) ซึ่งทำการศึกษาสมบัติด้านเคมีกายภาพของสตาร์ชจากข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษา พบว่าความคงตัวของเจล (gel consistency) ลดลง เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาข้าวนานขึ้น

### 3.2 น้ำ

น้ำที่ใช้ในการผลิตควรเป็นน้ำสะอาด เหมาะสำหรับบริโภค (มอก. 959-2533) ปราศจากสารแขวนลอย มีความกระด้างต่ำ และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ประมาณ 5.0-7.0 กรณีที่ใช้น้ำบาดาลควรพักน้ำไว้เพื่อให้แร่ธาตุต่าง ๆ ตกตะกอน แล้วจึงนำไปกรองและกำจัดความกระด้าง ความเป็นกรด-ด่างของน้ำมีผลต่อความเหนียวของเจล โดย pH 5.0-7.0 ให้เจลที่มีความเหนียวที่สุด และน้ำที่มีแคลเซียมหรือแมกนีเซียมเจือปนส่งผลให้ความเหนียวของเส้นก๋วยเตี๋ยวลดลง เนื่องจากเกลือเหล่านี้จะไปขัดขวางการซึ่งเข้าเม็ดแป้งของน้ำ ทำให้เม็ดแป้งแตกตัวและปลดปล่อยแอมิโลสลดลง นอกจากนี้หากมีการเจือปนของเหล็ก หรือสารแขวนลอย จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำ (วิภา, 2541; กัลยาณี, 2541)

### 3.3 วัตถุเจือปน

ผู้ผลิตก๋วยเตี๋ยวบางแห่งมีการใช้สารเคมีเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความขาว หรือให้เก็บรักษาได้นานขึ้น โดยสารเจือปนที่พบว่ามีการใช้มากคือ (กัลยาณี, 2541)

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีสมบัติเป็นก๊าซไม่มีสี ไม่ติดไฟ มีกลิ่นแรงแสบจมูก จุดมุ่งหมายของการเติมสารนี้ คือเพื่อปรับปรุงสีของผลิตภัณฑ์ให้มีความขาวตรงตามที่ต้องการ ปริมาณที่อนุญาตให้มีได้ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายต้องไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

กรดเบนโซอิก และเกลือเบนโซเอท เป็นผลึกสีขาวรูปเข็ม ไม่มีกลิ่น มีสมบัติในการขัดขวางการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ แต่มีผลให้สีของก๋วยเตี๋ยวเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว จึงนิยมเติมควบคู่กับสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์

#### 4. กระบวนการผลิตกล้วยเดี่ยวและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอน (กมลวรรณ, 2548)

##### 4.1 การเตรียมข้าว

ในอุตสาหกรรมการผลิตกล้วยเดี่ยวมักจะแยกเศษกระสอบ ฟันผง เศษหญ้า และหินออกด้วยเครื่องคัดแยก (classifier) แล้วจึงนำข้าวมาล้างน้ำเพื่อเอาเศษรำละเอียดออก โดยทั่วไป จะทำการล้างข้าวประมาณ 2-3 ครั้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้าวที่ใช้ การล้างข้าวทำให้ได้เส้นกล้วยเดี่ยวที่ขาวสะอาด และไม่ยุ่ยขาดง่าย (อรพิน, 2533) ในขั้นตอนการล้างนี้ไม่ควรคนข้าวตลอดเวลา เนื่องจากทำให้เมล็ดข้าวแตก และเกิดสารแขวนลอยออกมากับน้ำมาก ดังนั้นจึงควรทำการล้างข้าวอย่างรวดเร็ว เพื่อลดการสูญเสีย และควรใช้อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำให้เหมาะสม โดยให้น้ำท่วมข้าวเพียงเล็กน้อยหรือประมาณ 1:2.5 ส่วน เมื่อล้างข้าวเสร็จแล้วควรแช่ข้าวไว้อีก 1-2 ชั่วโมงเพื่อให้ข้าวดูดน้ำเข้าไปในเมล็ดเป็นการเพิ่มความชื้นทำให้เมล็ดข้าวนิ่ม ง่ายต่อการไม่ และเม็ดแป้งแตกออกง่ายเมื่อทำการไม่

##### 4.2 การไม่ข้าว

การไม่ข้าวเป็นการทำให้เม็ดสตาร์ชและองค์ประกอบอื่น ๆ หลุดและแตกออก รวมทั้งทำให้เยื่อหุ้มเม็ดสตาร์ชแตกด้วย การไม่แป้งทำได้ 2 วิธีด้วยกันคือ การไม่แห้งและการไม่เปียก ซึ่งการไม่ทั้งสองวิธีให้แป้งที่มีความแตกต่างกัน คือแป้งไม่เปียกมีอุณหภูมิการเกิดเจลลาคีไนซ์ และค่าความหนืดสุดท้ายต่ำกว่าแป้งไม่แห้ง แต่พบว่ามีความหนืดสูงสุด และค่าเบรกดาวนสูงสูงกว่าแป้งไม่แห้ง (Sooksomboon *et al.* 2005)

ในการผลิตกล้วยเดี่ยวนิยมใช้การไม่เปียกโดยการใช้ไม่หิน โดยการไม่แบบนี้ทำให้เม็ดสตาร์ชถูกบดละเอียดและแตกตัวได้มาก และการเติมน้ำลงไปจะช่วยทำให้อุณหภูมิในขณะไม่ไม่สูงเกินไป ซึ่งแป้งที่ได้มีคุณภาพดีไม่บูดง่าย แต่การเติมน้ำต้องควบคุมปริมาณน้ำที่เติม โดยมากแล้วการไม่ข้าวเพื่อผลิตเส้นกล้วยเดี่ยวใช้อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำประมาณ 2 ต่อ 1 และจากการศึกษาของพัชรี (2538) พบว่าการไม่ข้าวแบบไม่เปียกด้วยไม่หิน 2 ครั้ง ได้เส้นกล้วยเดี่ยวที่เหนียวและยืดหยุ่นสูงกว่าการไม่เพียงครั้งเดียว Tatsumi *et al.* (2001) ได้รายงานว่าการไม่เปียกจะให้กล้วยเดี่ยวที่มีค่าความแข็งแรงของเจลสูง (gel strength) ซึ่งจัดเป็นกล้วยเดี่ยวที่มีคุณภาพดี

แป้งที่ใช้ในการผลิตเส้นกล้วยเดี่ยวควรมีขนาดเม็ดแป้งที่ละเอียด เนื่องจากความละเอียดของเม็ดแป้งมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของเส้นกล้วยเดี่ยวที่ผลิตได้ จากการศึกษาอิทธิพลของขนาดเม็ดแป้งต่อคุณภาพของเส้นอูด้ง โดย Hatcher *et al.* ในปี 2002 พบว่าเส้นอูด้งที่ผลิต

จากแป้งที่มีขนาดอนุภาคเล็กมีค่าความสว่าง และมีเนื้อสัมผัสที่ดีกว่าการใช้แป้งที่มีขนาดอนุภาคหยาบ เช่นเดียวกับการศึกษาผลของขนาดเม็ดแป้งต่อเนื้อสัมผัสของเส้นบะหมี่กวางตุ้ง พบว่าค่าความแข็งแรงต่อการตัด (cutting strength) เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเม็ดแป้งเล็กลง (Kruger *et al.*, 1994) นอกจากนี้ Chen *et al.* (2003) พบว่าสตาร์ชที่มีความหยาบไม่สามารถนำมาผลิตวุ้นเส้น (starch noodle) จากสตาร์ชมันเทศได้ เนื่องจากไม่สามารถขึ้นรูปให้เป็นเส้นยาวได้ และมีความขุ่นมากกว่าการใช้สตาร์ชที่มีความละเอียด รวมถึงเนื้อสัมผัสของวุ้นเส้นจากสตาร์ชที่มีความหยาบมีคุณภาพที่ต่ำกว่าวุ้นเส้นจากสตาร์ชที่มีความละเอียด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแป้งที่มีความละเอียดมีสมบัติในการดูดน้ำได้มาก (water absorption) และมีการสูญเสียของแข็งได้ดี (solid lost) จึงมีสมบัติทางด้านความร้อนแตกต่างจากแป้งที่มีความหยาบ คือแป้งละเอียดมีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนซ์ต่ำกว่าแป้งที่มีความหยาบ เมื่อทำการศึกษาด้วยเครื่อง DSC (Kerr *et al.*, 2000)

เมื่อได้น้ำแป้งแล้วต้องตั้งทิ้งไว้อีก 2-3 ชั่วโมง การแช่น้ำแป้งจะทำให้ได้เส้นก๋วยเตี๋ยวที่มีความนุ่ม ในระหว่างการแช่น้ำแป้งต้องมีการคนเป็นระยะเพื่อป้องกันแป้งตกตะกอน และช่วยให้แป้งดูดน้ำได้ดี เป็นผลให้น้ำแป้งมีความหนืดมากขึ้น เนื่องจากเม็ดแป้งพองตัว

#### 4.3 การปรับความเข้มข้นของน้ำแป้ง

ความเข้มข้นของน้ำแป้งที่ไม่ได้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเหนียวของเส้นก๋วยเตี๋ยว ปริมาณน้ำที่ใช้ต้องพิจารณาจากชนิดและลักษณะของข้าว โดยข้าวยิ่งเก่ามากและมีแอมิโลสสูงต้องใช้น้ำในการหุงสุกมากกว่าข้าวใหม่และมีแอมิโลสต่ำกว่า ซึ่งปริมาณน้ำจะเป็นตัวควบคุมความแข็งของก๋วยเตี๋ยว คือถ้าน้ำที่ใช้น้อยเกินไปก๋วยเตี๋ยวที่ได้ก็จะมีเนื้อแข็ง ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้น้ำมากเกินไปเส้นก๋วยเตี๋ยวจะนิ่มและขาดง่าย โดยทั่วไปแล้วความเข้มข้นของน้ำแป้งในการผลิตก๋วยเตี๋ยวสด ควรมีปริมาณของแข็งร้อยละ 38-40 โดยน้ำหนัก หรือประมาณ 16 โบเม (Baumé) ที่ 28 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 1) สำหรับการผลิตก๋วยเตี๋ยวเส้นแห้งความเข้มข้นน้ำแป้งสูงกว่า และมีค่าประมาณ 20 โบเม ที่ 28 องศาเซลเซียส น้ำแป้งที่มีความหนืดและแรงตึงผิวที่เหมาะสม ทำให้ได้แผ่นก๋วยเตี๋ยวที่มีความหนาพอดี ซึ่งสามารถปรับความเข้มข้นโดยการคำนวณน้ำหนักของน้ำแป้งดังนี้

$$\text{น้ำหนักของน้ำแป้ง(กก.)} = \frac{\text{น้ำหนักของข้าว(กก.)} \times [100 - \text{ความชื้นของข้าว(ร้อยละ)}]}{[100 - \text{ความชื้นของน้ำแป้งที่ต้องการทำก๋วยเตี๋ยว(ร้อยละ)}]}$$

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของน้ำแป้งต่อคุณลักษณะของเจลที่ได้

| ความเข้มข้นของน้ำแป้ง |                | ลักษณะของเจล  |
|-----------------------|----------------|---|
| ร้อยละ<br>นน./ปริมาตร | โบเม<br>(28°ซ) |   |
| 20                    | 7.5            | เกิดเจลที่บางมาก ส่วนของแป้งกระจายเป็นจุด ๆ ไม่สม่ำเสมอ ผิวหน้าแป้งสุกเป็ยกและ ไม่สามารถลอกออกเป็นแผ่นได้ |
| 30                    | 11.4           | ผิวหน้าเจลเป็ยกและติดมือเมื่อลอกออกฉีกขาดง่าย   |
| 35                    | 13.0           | เจลที่ได้สามารถลอกออกเป็นแผ่น แต่อาจฉีกขาดบางส่วน   |
| 38                    | 14.0           | เจลที่ได้มีความเหนียวนุ่ม ผิวหน้าเจลไม่และ สามารถลอกออกเป็นแผ่นได้ง่ายโดยไม่ฉีกขาด                        |
| 40                    | 14.6           | เจลที่ได้มีความเหนียวนุ่ม ผิวหน้าเจลไม่และ สามารถลอกออกเป็นแผ่นได้ง่ายโดยไม่ฉีกขาด                        |
| 42                    | 15.2           | เจลที่ได้สามารถลอกออกเป็นแผ่นได้ง่ายไม่ฉีกขาด เมื่อทิ้งไว้ได้เจลที่มีความเหนียวหนืดมาก                    |
| 45                    | 16.0           | เจลที่ได้สามารถลอกออกเป็นแผ่นได้ง่ายไม่ฉีกขาด เมื่อทิ้งไว้ได้เจลที่มีความเหนียวหนืดมาก                    |

ที่มา: วิชา (2541)

#### 4.4 การนึ่ง

การนึ่งเป็นการทำให้น้ำแป้งสุกด้วยไอน้ำ โดยความร้อนจากไอน้ำทำให้น้ำแป้งสุก เรียกว่าการเกิดเจลลาตินในเซชัน (gelatinization) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1–2 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ ความหนาและความเข้มข้นของน้ำแป้ง รวมถึงอุณหภูมิและระยะเวลาการนึ่งต้องเพียงพอและเหมาะสมจึงจะทำให้แป้งสุกพอดี

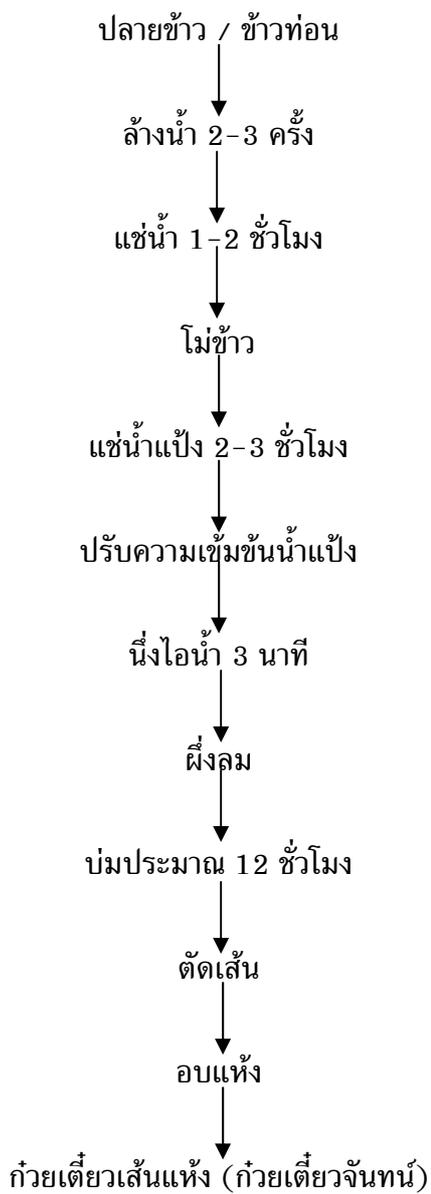
#### 4.5 การบ่ม และการตัดเส้น

เมื่อแผ่นแป้งก๊วยเตี๋ยวกว้างเคลื่อนที่ออกจากอู๋มอ้งค์ไอน้ำ และเคลื่อนสู่สายพาน ลักษณะเป็นซี่คล้ายตะแกรง การผึ่งลมเป็นการทำให้น้ำแป้งเย็นตัวลง เกิดเป็นเจลที่มีความแข็งแรงและเหนียวมากขึ้น เกะยัดเป็นแผ่นได้ดี และไม่ติดกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการรีโทรเกรดชันของแอมิโลส แต่อย่างไรก็ตาม Chinnapha (2001) พบว่าแอมิโลเพกตินจะจับกับแอมิโลส ทำให้แผ่นก๊วยเตี๋ยวกว้างมีความแข็งแรงมากขึ้น

จากนั้นจึงนำมาเรียงซ้อนกัน และบ่มไว้นานประมาณ 12 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นกระจายออกให้ทั่วกันทั้งแผ่น ก่อนนำมาตัดเป็นเส้น ซึ่งได้ก้วยเดี่ยวสดมีความชื้นประมาณร้อยละ 62-64 แต่ถ้าต้องการเส้นเล็กกึ่งแห้งต้องนำแผ่นก้วยเดี่ยวสดไปอบในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส 15 นาที เมื่อออกจากตู้อบใช้พัดลมเป่าให้เย็น แผ่นก้วยเดี่ยวที่ออกมามีความชื้นประมาณร้อยละ 30-40 จากนั้นนำมาวางเรียงซ้อนกันและบ่มไว้ประมาณ 6 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายเท่ากันทั้งแผ่นก่อนนำมาตัดเป็นเส้น ผลิตภัณฑ์เส้นเล็กกึ่งแห้งที่ได้มีความชื้นประมาณร้อยละ 35-37 ส่วนเส้นเล็กแห้งนั้นนำเส้นเล็กกึ่งแห้งมาอบแห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 45-48 องศาเซลเซียส จนมีความชื้นประมาณร้อยละ 11-13

#### 4.6 การบรรจุหีบห่อ

ก่อนการเก็บก้วยเดี่ยวเส้นแห้ง ควรให้เส้นก้วยเดี่ยวเย็นสนิทก่อนอย่างน้อย 1 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการเกิดเหี่ยวในถุงหลังปิดผนึก เนื่องจากความชื้นที่เกิดขึ้นทำให้เก็บรักษาไว้ไม่ได้นาน อาจเกิดเชื้อรา หรือเกิดกลิ่น

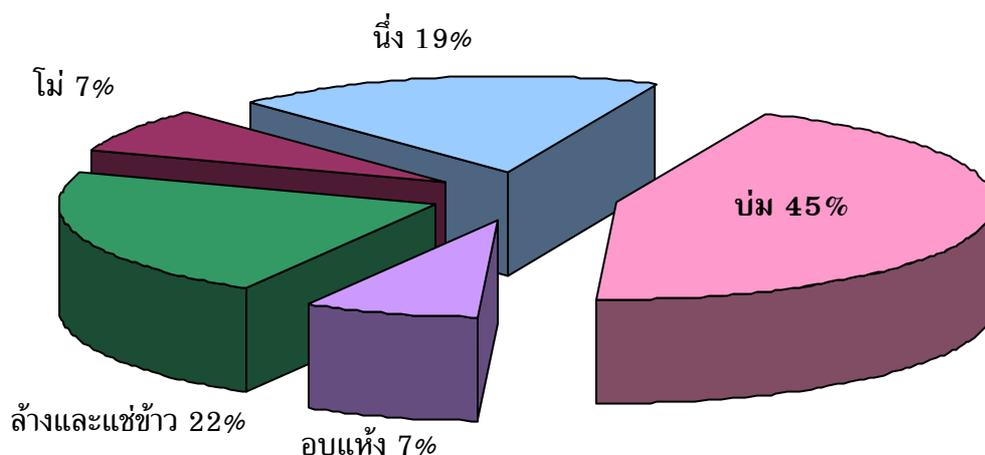


ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตก๊วยเตี่ยวเส้นแห้ง (ก๊วยเตี่ยวจันทน์)  
ที่มา: วิภา (2541)

## 5. ระยะเวลาการบ่มแผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยว

จากกระบวนการผลิตที่กล่าวมาพบว่าขั้นตอนการบ่มเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานที่สุดคือใช้ระยะเวลาถึง 8-12 ชั่วโมง หรือคิดเป็นร้อยละ 45 ของกระบวนการผลิตทั้งหมดดังแสดงในภาพที่ 2

ระยะเวลาการบ่มที่ยาวนาน ก่อให้เกิดการหยุดชะงักของกระบวนการผลิต ส่งผลให้เสียเวลา รวมถึงแรงงาน และยังลดปริมาณผลผลิตของการผลิตลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตต่ำ



ภาพที่ 2 อัตราส่วนระยะเวลาการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวจันทน์ (ข้าว 1 ตันต่อครั้งการผลิต ให้เส้นก๋วยเตี๋ยวประมาณ 800 กิโลกรัมเส้นก๋วยเตี๋ยวจันทน์แห้ง)

ที่มา: บริษัท จริง จริง ฟู้ดส์ตฟ

จากการตรวจเอกสาร พบว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งสามารถนำมาเป็นแนวคิดในการลดระยะเวลาในการบ่มแผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยว ในปี 1903 Maquenne ค้นพบว่าเพสต์สตาร์ชมันฝรั่งมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาลดลง งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยชิ้นแรก ๆ ที่พบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเกิดรีโทรเกรเดชัน ก่อให้เกิดการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันตามมา เช่น ในปี 1979 Kayisu and Hood ศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อความไวต่อเอนไซม์แพนครีเอติกแอลฟา-แอมิเลส (pancreatic alpha-amylase) พบว่าการเก็บเจลสตาร์ชไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส มีความไวต่อเอนไซม์ลดลงมากกว่าการเก็บเจลสตาร์ชไว้ในสภาวะแช่เยือกแข็ง (-18 องศาเซลเซียส) และเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ความไวต่อเอนไซม์ลดลงมากขึ้น เนื่องจากเจลสตาร์ชที่เก็บรักษาไว้ในตู้เย็นเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าเจลที่เก็บรักษาไว้ในสภาวะแช่เยือกแข็ง Jankowski (1992) พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความแน่นแข็งในหัวมันฝรั่งต้มสุกนั้น

เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ เนื่องจากเกิดโครงสร้างร่างแหขึ้นภายในเซลล์ของมันฝรั่งขึ้น และการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดได้เร็วขึ้นได้เมื่อลดอุณหภูมิการเก็บรักษาลง Cauvain (1998) ได้รายงานว่าค่าความแน่นแข็งของขนมปังเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาลดลง ในปี 1998 Czuchajowska *et al.* พบว่าความแน่นแข็งของเจลถั่วเก็บรักษาไว้ที่ 4 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้นมากกว่าเจลที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียสถึง 4 เท่า เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันที่เกิดได้เร็วกว่านั่นเอง

ผลิตภัณฑ์จากข้าวสาลี เช่น ขนมปัง หรือแผ่นตอร์ตีลา (tortilla) มีการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสระหว่างการเก็บรักษา โดย Hug-Iten *et al.* (2003) พบว่าขนมปังมีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดยการเกิดโครงสร้างผลึกของแอมิโลสเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดความแน่นแข็งของขนมปังในช่วงต้นของการเก็บรักษา เช่นเดียวกับ Bárcenas and Rosell (2006) พบว่าขนมปังที่เตรียมจากขนมปังอบกึ่งสุกแช่เยือกแข็ง (frozen par-baked bread) มีการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็ง (hardness) มากขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา และ Limanond *et al.* (2002) พบว่าเนื้อสัมผัสของแผ่นตอร์ตีลาเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา

Indrani *et al.* (2000) ระบุว่าแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่าง (compression force) พารอตตา (parotta) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปจากข้าวสาลีที่นิยมบริโภคในอินเดียเพิ่มขึ้น เมื่อเก็บพารอตตาไว้นานขึ้น Seetharaman *et al.* (2002) กล่าวว่าเกิดการเกิดพันธะขององค์ประกอบในสตาร์ชระหว่างระหว่างการเก็บรักษา มีผลให้เนื้อของผลิตภัณฑ์มีความแน่นเนื้อ (firmness) ขึ้น เป็นผลให้สูญเสียความสดใหม่ในผลิตภัณฑ์ขนมอบ

สำหรับผลิตภัณฑ์จากข้าวนั้น Perdon *et al.* (1999) ได้รายงานไว้ว่าความแน่นแข็ง และความเหนียวของข้าวหุงสุกมีเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเก็บไว้ กล่าวคือ ข้าวสุกมีความแน่นแข็งมากขึ้น แต่มีความเหนียวลดลง และพบว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น รวมถึงชาพาตี (chapati) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากข้าวชนิดหนึ่งที่นิยมบริโภคในอินเดีย มีการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสอย่างมากภายใน 24 ชั่วโมง โดยชาพาตีมีความยืดหยุ่นลดลงอย่างมากเนื่องมาจากการเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโพลีเมอร์ (Gujral *et al.*, 2004) ทั้งนี้ Taylor (1994) พบว่าความเป็นผลึกของข้าวสุกขึ้นอยู่กับระยะเวลาและอุณหภูมิการเก็บรักษา และตามสมการ Avrami นั้นอัตราการเกิดโครงสร้างผลึกขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของการเกิดนิวเคลียส

ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ ได้มีการนำความรู้เกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะตามต้องการ เช่น การผลิตมันฝรั่งบด พบว่าการนำมันฝรั่งต้มสุกไปแช่ตู้เย็นข้ามคืน เพื่อให้เกิดรีโทรเกรเดชันในชั้นมันฝรั่ง ทำให้ได้มันฝรั่งบดที่มีความร่วน (Corriher, 2001) หรือในการผลิตวุ้น

เส้นนั้น มีการนำเส้นที่ตัมสุกแล้วไปแช่แข็ง ทั้งนี้เพื่อให้เกิดรีโทรเกรเดชันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้เส้นแยกออกจากกันได้ง่าย (อรพิน, 2533; Virtucio, 2005b)

สำหรับผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวนั้นมีรายงานว่าอุณหภูมิที่ต่ำมีส่วนช่วยลดระยะเวลาการบ่มแผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยวได้ โดย จารุณี และสุพัตรา (ดวงแก้ว, 2547) ได้ทำการทดลองบ่มแผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยวจันทน์ในตู้เย็น พบว่าสามารถลดระยะเวลาการบ่มเหลือเพียง 7 ชั่วโมงได้ และในงานวิจัยของกมลวรรณ (2548) ใช้ระยะเวลาการบ่มแผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยวจันทน์ 6 ชั่วโมงในตู้เย็นก่อนการตัดเส้น

## การเปลี่ยนแปลงสตาร์ชข้าวระหว่างกระบวนการผลิตก๋วยเตี๋ยว

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของสตาร์ชที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส และ กระแสวิทยา (rheology) ของผลิตภัณฑ์ คือ การเกิดเจลาตินในเซชัน และรีโทรเกรเดชัน

### 1. การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization)

การเกิดเจลาตินในเซชันเป็นการทำลายโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชโดยการให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ชในสภาวะที่มีน้ำอย่างเพียงพอ โมเลกุลน้ำสามารถแพร่เข้าไปในส่วนอสัณฐาน (amorphous) ของเม็ดสตาร์ชได้ก่อน ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลสตาร์ชในส่วนอสัณฐานอ่อนแอลง เม็ดสตาร์ชเริ่มเกิดการพองตัว การพองตัวของส่วนอสัณฐานนี้ทำให้โครงสร้างผลึกเกิดความเครียด (stress) (Tester and Morrison, 1990) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโมเลกุลในโครงสร้างผลึกอ่อนแอลง น้ำจึงสามารถเข้าไปในส่วนโครงสร้างผลึกทำให้เม็ดสตาร์ชดูดน้ำได้มากขึ้น พร้อมกับพองตัวขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งจะมีผลต่อเศษส่วนปริมาตร (volume fraction) และสัณฐานของเม็ดสตาร์ช จนกระทั่งโครงผลึกของเม็ดสตาร์ชสลายไป เกิดเป็นกระบวนการที่โครงสร้างภายในของเม็ดสตาร์ชถูกทำลายแบบไม่ผันกลับ พร้อมกับสายโมเลกุลแอมิโลสแพร่ออกมาจากเม็ดสตาร์ช (Whistler and BeMiller, 1999) เป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกระแสวิทยาของสารละลายสตาร์ช ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลให้สตาร์ชสูญเสียความเป็นผลึกไป อุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า อุณหภูมิการเกิดเจลาติน (D' Appolonia *et al.*, 1971; Eliasson and Gudmundsson, 1996; Parker and Ring, 2001; Sandhu *et al.*, 2004) การเปลี่ยนแปลงในเม็ดสตาร์ชเป็นดังนี้ (Eliasson and Gudmundsson, 1996)

- 1.1 การหายไปของไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence)
- 1.2 การเสียโครงสร้างคล้ายผลึก
- 1.3 การดูดความร้อนไปใช้ในการสลายพันธะ (endothermic transition)
- 1.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (morphological changes)
- 1.5 การพองตัว (swelling)
- 1.6 การแพร่ออกจากเม็ดสตาร์ชขององค์ประกอบ (leaking)

### 2. การเกิดเจล (gelation)

สตาร์ชที่ผ่านกระบวนการเจลาตินในเซชันแล้ว จะอยู่ในสภาพของโซล (sol) หรือเจลได้ เฟสสตาร์ชขณะที่ยังร้อนอยู่มีความสามารถในการไหลได้ เนื่องจากสตาร์ชละลายอยู่ในเฟสของแข็ง (solid phase) โดยมีน้ำเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) หรืออยู่ในสภาพของโซล แต่

เมื่อเพสเย็นตัวลงพบว่าจะกลายเป็นเจล เนื่องจากระบบมีการเสียพลังงานในระหว่างการลดอุณหภูมิ เป็นผลให้สายโซ่โพลีเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ช้าลง ก่อให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ที่อยู่ใกล้กัน พันธะที่เกิดขึ้นนี้แตกออกได้ง่ายเมื่อระบบยังมีอุณหภูมิสูง ทำให้เพสเกิดการเคลื่อนที่ได้ แต่เมื่อทำการลดอุณหภูมิต่ำ ๆ พบว่าเพสจะกลายเป็นเจลได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างร่างแหที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์ และพบว่าแกรนูลที่เหลืออยู่จะติดอยู่ในโครงสร้างร่างแห ในสภาพของเจลนี้จะพบว่าน้ำกลายเป็นเฟสกระจายตัว (dispersed phase) และโครงสร้างร่างแหกลายเป็นเฟสต่อเนื่อง ทำให้สมบัติการไหลของเจลลดลง (McWilliam, 2001) การเกิดเจลของแป้งแบ่งออกได้ตามชนิดของโพลีเมอร์ดังนี้ (Eliasson and Gudmundsson, 1996)

## 2.1 การเกิดเจลของแอมิโลส

สารละลายแอมิโลสที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง มีความไม่เสถียร โดยพบว่าความข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น หรืออาจเกิดตะกอนขึ้นในสารละลายเจือจาง หรือเกิดเป็นเจลได้เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น รวมถึงการเกิดการแยกน้ำ (syneresis) หรือเกิดมีฝ้าน้ำเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของเจล

ขั้นตอนการเกิดเจลเริ่มจากการเกิดโครงสร้างร่างแหของแอมิโลส ซึ่งความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เก็บรักษาซึ่งเกิดมาจากการเกิดโครงสร้างผลึกขึ้นในบริเวณที่มีสายโพลีเมอร์อยู่มาก และเมื่อตรวจสอบโดยใช้การกระเจิงของรังสีเอกซ์ พบว่าเกิดการกระเจิงเป็นแบบบี (B-pattern) นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดสายโซ่เกลียวคู่ขึ้นในบริเวณที่ไม่เกิดโครงสร้างผลึก

เจลแอมิโลสมีความคงทนต่อความร้อน โดยพบว่าไม่เกิดการละลายแม้ผ่านความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียส เมื่อทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC แล้วพบว่าเกิดพีคที่ 117-125 องศาเซลเซียส สำหรับเจลแอมิโลสความเข้มข้นร้อยละ 2.73-7.94 (Leloup *et. al*, 1992)

## 2.2 การเกิดเจลของแอมิโลเพกติน

ตามปรกติเจลสารละลายแอมิโลเพกตินมีความเสถียร แต่ในสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ และสารละลายมีความเข้มข้น พบว่าสารละลายแอมิโลเพกตินสามารถเกิดเจลได้ แต่อัตราเร็วของการเกิดเจลนั้นช้ามาก นอกจากนี้เจลแอมิโลเพกตินจัดเป็นเจลที่ผันกลับได้ (thermoreversible) คือละลายได้ที่ 40-60 องศาเซลเซียส

### 3. การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสตาร์ชเริ่มเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ของทั้งแอมิโลส และแอมิโลเพกติน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน (exo-thermal) จากสภาวะคล้ายเจล (gel-like) สู่สภาวะคล้ายผลึก (crystalline) เนื่องจากเจลาตินไนซ์สตาร์ชอยู่ในภาวะไม่สมดุลทางเทอร์โมไดนามิก (thermodynamic equilibrium) โดยแอมิโลสจะเกิดการจับตัวกันเป็นสายโซ่เกลียวคู่ด้วยพันธะไฮโดรเจน ในขณะที่แอมิโลเพกตินจะเกิดสายโซ่เกลียวคู่สายสั้น ๆ เนื่องจากถูกขัดขวางจากกิ่งก้านที่มีอยู่ในโครงสร้างนั่นเอง และจะกลายเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติเมื่อระยะเวลาการเกิดรีโทรเกรเดชันนานขึ้น ซึ่งโครงสร้างนี้จะทำให้ได้เจลที่มีความแข็งแรง และกระบวนการนี้จะเกิดได้ดีขึ้นในระหว่างกระบวนการทำแห้ง (dehydration) (D' Appolonia *et al.*, 1971; Münzing, 1991; Jacobson *et al.*, 1997; Klucinec and Thompson, 1999; Haralampu, 2000; Lee *et al.*, 2002; Sandhu *et al.*, 2004)

การเกิดรีโทรเกรเดชันนี้จะทำให้เจลมีความแข็ง และความชุ่มเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้ความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอโอดีนลดลง นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชันจะทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลลดลง (D' Appolonia *et al.*, 1971, Eliasson and Gudmundsson, 1996)

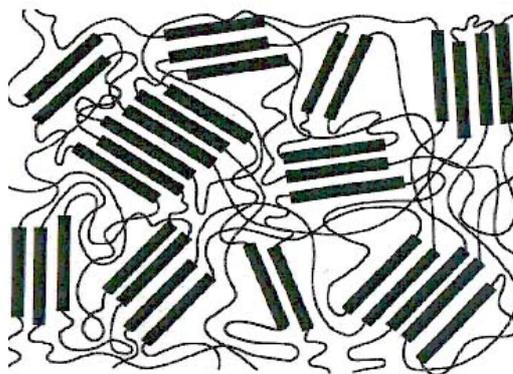
โดยทั่วไปแล้วการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจะประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน คือการเกิดนิวเคลียส (nucleation) ซึ่งเป็นการเกิดโครงสร้างคล้ายผลึกขนาดเล็กจำนวนมากที่จะก่อให้เกิดการรีโทรเกรเดชัน การเกิดการเชื่อมต่อของโมเลกุล (propagation) เป็นขั้นตอนที่จะทำให้โครงสร้างคล้ายผลึกเพิ่มขนาดให้ใหญ่ขึ้น โดยการเกิดการจับตัวกันด้วยพันธะระหว่างโมเลกุล และขั้นตอนที่เกิดโครงสร้างคล้ายผลึกที่สมบูรณ์ (maturation) และพบว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสจะเกิดได้เร็วกว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกติน จึงมีการกำหนดให้การเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกตินนั้นเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการกำหนดอัตรา เร็วของปฏิกิริยา (Mile *et al.*, 1985; Slade and Levine, 1987; Slade and Levine, 1988; Levine and Slade, 1990; Gudmunsson, 1994)

#### 3.1 กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชัน

การเกิดรีโทรเกรเดชันนั้นยังไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่ามีกลไกอย่างไร แต่มีผู้เสนอสมมุติฐานออกมามากมาย ดังนี้

### 3.1.1 แบบจำลอง fringed micelle (Levine and Slade, 1990)

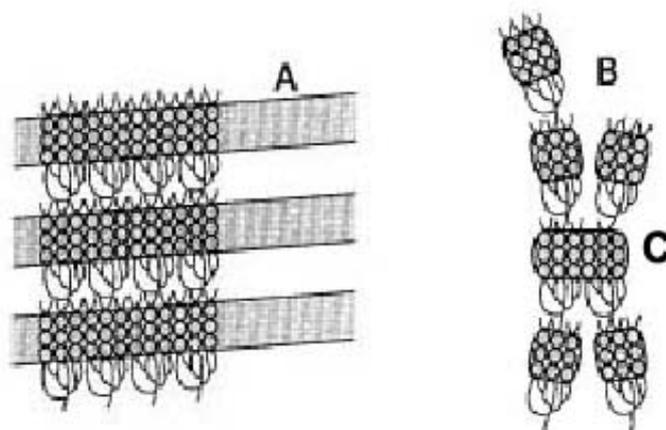
สมมุติฐานเกี่ยวกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยใช้แบบจำลองที่เรียกว่า fringed micelle ซึ่งเป็นแบบจำลองสามมิติของโครงสร้างคล้ายผลึกเล็ก ๆ (microcrystalline) ที่ต่อกับส่วนที่เป็นอสัณฐาน และในส่วนอสัณฐานนี้เองที่พบน้ำอิสระอยู่ สายโซ่ที่มีความยาวจะจับตัวกันแบบเกลียวคู่ (double helix) เป็นส่วนประกอบที่ปรากฏอยู่ในส่วนที่เป็นโครงสร้างคล้ายผลึกเล็ก ๆ ซึ่งจะเชื่อมต่อกับขดโพลีเมอร์ที่มีความยืดหยุ่น (flexible coil) ที่เป็นองค์ประกอบของส่วนที่เป็นอสัณฐานด้วยพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังพบว่าสายโซ่ในส่วนอสัณฐานนั้นสามารถเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลแบบสุ่มได้กับสายโซ่อีกสายหนึ่ง เกิดเป็นโครงร่างแหที่มีการเชื่อมต่อกันอย่างซับซ้อน ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แบบจำลอง Fringed micelle ของโครงสร้างโพลีเมอร์  
ที่มา: Slade and Levine (1987, 1988)

### 3.1.2 แบบจำลองแบบกลุ่ม (cluster) (Keetels *et al.*, 1996 )

แอมิโลสและสายโซ่ของแอมิโลเพกตินที่อยู่ด้านนอกจับกันอยู่ในบริเวณที่เป็นส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ช และการเพิ่มขึ้นของความเป็นผลึก (crystallinity) เป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบของส่วนที่เป็นเส้นตรงของแอมิโลเพกติน ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปของเกลียวคู่ที่มีความยาวประมาณ 5 นาโนเมตร และจับตัวกันแน่นเป็นชั้นบาง ๆ ที่มีความหนาประมาณ 5 นาโนเมตร จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) และเมื่อวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์จะพบว่าการกระเจิงของรังสีเอกซ์เพียงเล็กน้อย ยืนยันได้ว่าในชั้นที่มีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบนี้มีการจัดเรียงตัวเป็นแบบเกลียวคู่ (ภาพที่ 4 A) ในแบบจำลองนี้พบว่าแอมิโลเพกตินที่มีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบจะเรียงตัวขนานกับแกนของเกลียวที่มีขนาดใหญ่ โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียวจะมีค่าประมาณ 18 นาโนเมตร และช่องว่างระหว่างเกลียวจะมีขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร



ภาพที่ 4 แบบจำลองการจัดเรียงตัวของแอมิโลเพกติน ในสตาร์ชธรรมชาติ (A) และในสตาร์ชที่ผ่านการรีโทรเกรดชันแล้ว (B และ C)

ที่มา: Keetels *et al.* (1996)

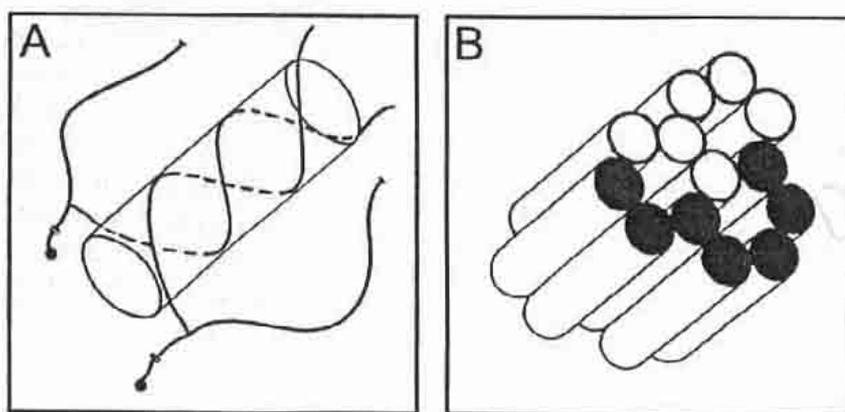
แต่เมื่อสารละลายสตาร์ชผ่านกระบวนการเจลาติไนเซชัน พบว่าแอมิโลสและแอมิโลเพกตินจะแยกออกจากกันเป็นผลทำให้เกิดการเสียโครงสร้างคล้ายผลึก และ birefringence หรืออาจกล่าวได้ว่าบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบถูกทำลายลง และเมื่อการเจลาติไนเซชันเกิดอย่างสมบูรณ์พบว่าไม่มีการกระเจิงของรังสีเอกซ์ ซึ่งหมายความว่าเกลียวคู่ขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นก็ถูกทำลายลงเช่นกัน ในระหว่างการเก็บรักษาพบว่าสายโซ่สั้น ๆ ที่อยู่ทางด้านนอกของโมเลกุลแอมิโลเพกตินจะขดตัวเกิดเป็นเกลียวขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดกลุ่มก้อนของสายโซ่ตรงที่เกิดจากการต่อกันของกลูแคนด้วยพันธะ  $\alpha$ -(1, 4) (ภาพ 4 B) และเกิดกลุ่มของสายโซ่แอมิโลเพกตินที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ จึงเป็นผลทำให้เจลมีความแน่นแข็งมากขึ้น (ภาพ 4 C)

### 3.1.3 แบบจำลองของ Klucinec and Thomson (1999)

จากภาพที่ 5 แสดงถึงการเกิดโครงสร้างเกลียวคู่ที่มีด้วยกัน 2 แบบ คือ โครงสร้างเกลียวคู่ที่เกี่ยวข้องกับจุดเชื่อม (junction zone) และโครงสร้างเกลียวคู่ที่ไม่เกี่ยวข้องกับจุดเชื่อมซึ่งโครงสร้างเกลียวคู่จะเกิดขึ้นได้จากการเกิดจุดเชื่อมได้ 2 ลักษณะคือ การเกิดพันธะระหว่างสาย (intermolecular double helix) (ภาพ 5A) และการเกิดพันธะขึ้นในสายโซ่โพลีเมอร์นั้น (intramolecular double helix) (ภาพ 5B)

เนื่องจากโครงสร้างที่มีพันธะ  $\alpha$ -(1, 6) ที่เป็นกิ่งเชื่อมอยู่จึงทำให้เกิดการจัดเรียงตัวกันของเกลียวแบบ A ที่มีความเป็นระเบียบได้ ซึ่งสายเกลียวคู่ที่ได้จะจัดเป็นสายเกลียว

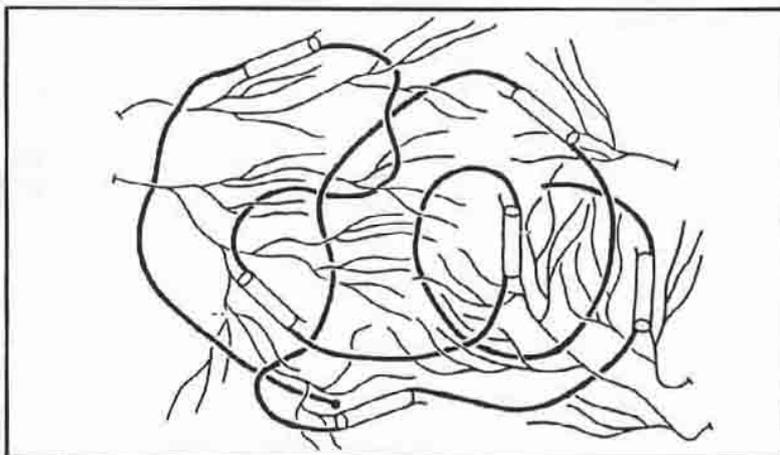
ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของสายโพลีเมอร์คนละสาย สำหรับการเกิดเกลียวคู่แบบ B ของสายโพลีเมอร์ไม่มีการต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -(1, 6) จะเกิดได้ยากกว่า เนื่องจากสายโพลีเมอร์ต้องเคลื่อนที่เข้าใกล้กันเสียก่อน แล้วจึงจะเกิดการจับกัน และเกิดเป็นโครงสร้างเกลียวคู่ที่มีความเสถียร ดังนั้นการเกิดสายเกลียวคู่ของสายโพลีเมอร์นี้จึงน่าจะเกิดแบบ A เนื่องจากการเกิดสายเกลียวคู่แบบ B นั้นต้องพิจารณาจากขอบเขตของโมเลกุล เป็นผลสืบเนื่องต่อความยืดหยุ่นของโครงสร้างที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 5 ลักษณะการเกิดสายเกลียวคู่ (A) intermolecular double helix และ (B) intramolecular double helix โดยส่วนสีดำคือ สายโพลีเมอร์สายที่หนึ่ง และ ส่วนสีขาวคือ สายโพลีเมอร์สายที่สอง

ที่มา: Klucinec and Thompson (1999)

ในสภาพของสารละลายสตาร์ชที่ประกอบขึ้นด้วยแอมิโลส และแอมิโลเพกตินที่มีความแตกต่างกันในเรื่องกิ่งที่มีอยู่ในโมเลกุล การจับตัวกันของโมเลกุลเพื่อสร้างโครงสร้างคล้ายผลึกนั้นจึงน่าจะมีความเป็นไปได้ว่าเกิดดังภาพที่ 6 ซึ่งจะเป็นการจับกันระหว่างสายโซ่สั้น ๆ ของแอมิโลเพกตินกับสายแอมิโลสที่มีความยาว

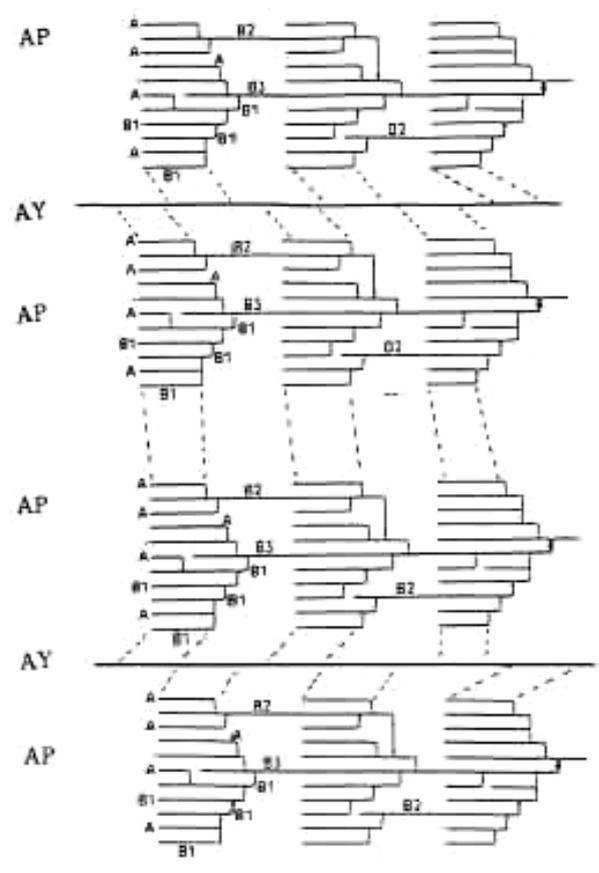


ภาพที่ 6 การเกิดการจับตัวกันระหว่างแอมิโลส และแอมิโลเพกติน  
ที่มา: Klucinec and Thompson (1999)

### 3.1.4 แบบจำลองของ Tako and Hizukuri (2000, 2002)

เมื่อทำการเก็บสตาตาร์ชท์ผ่านการเจลาตินในเซชันไว้ให้เย็นตัวลง เจลจะมีความหนืด และความยืดหยุ่นมากขึ้น เนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายแอมิโลส และสายแอมิโลเพกตินขึ้นระหว่างออกซิเจนของคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของสายแอมิโลส และหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของสายแอมิโลเพกติน และพันธะดังกล่าวก็จะเกิดต่อไปได้เรื่อย ๆ ทำให้ได้โครงสร้างที่มีความแข็งแรงขึ้น โดยพบว่าสายแอมิโลเพกตินที่สามารถเกิดพันธะได้จะเป็นสายแอมิโลเพกตินสายสั้น ๆ ที่เป็นกิ่ง (ภาพที่ 7)

เมื่อสายแอมิโลส และแอมิโลเพกตินเกิดพันธะกันอย่างสมบูรณ์แล้ว พบว่าสายแอมิโลเพกตินสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกันเองได้ โดยจะเกิดที่ออกซิเจนของคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของแอมิโลเพกตินสายที่หนึ่ง กับหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของสายแอมิโลเพกตินที่สอง เป็นผลทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ และแอมิโลเพกตินลดลง นอกจากนี้ยังพบว่ายังมีการจับตัวกันระหว่างไฮโดรเจนอะตอมในตำแหน่งที่ 1 กับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลกลูโคสที่เป็นองค์ประกอบด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์อีกด้วย



ภาพที่ 7 ลักษณะการจับตัวกันระหว่างสายแอมิโลส และแอมิโลเพกติน โดย AP คือ แอมิโลเพกติน และ AY คือแอมิโลส  
ที่มา: Tako and Hizukuri (2000, 2002)

### 3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรีโทรเกรดชัน

#### 3.2.1 แหล่งที่มาของแป้ง

แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการเกิดรีโทรเกรดชันต่างกัน (Collison, 1968) โดย Jacobson *et al.* (1997) ได้ทำการศึกษาการเกิดรีโทรเกรดชันของแป้งแต่ละชนิด โดยวัดความขุ่น (turbidity) ที่เพิ่มขึ้น พบว่าข้าวสาลี และข้าวโพดมีอัตราการเกิดรีโทรเกรดชันได้ดีกว่าข้าว มันสำปะหลัง และมันฝรั่ง Baker and Rayas-Duarte (1998) ได้ทำการเปรียบเทียบอัตราการเกิดรีโทรเกรดชันระหว่างข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี และข้าวฟ่าง พบว่าข้าวฟ่างมีอัตราการเกิดรีโทรเกรดชันต่ำกว่าธัญพืชอื่น ๆ ที่นำมาทดสอบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของอัตราส่วนระหว่างสายโซ่แบบ A และสายโซ่แบบ B ในโครงสร้างของแอมิโลเพกติน (Parker and Ring, 2001)

### 3.2.2 อัตราส่วนแอมิโลสต่อแอมิโลเพกติน

การศึกษาของ Baik and Lee (2003) ซึ่งได้ทำการผสมแป้งสาลีกับแป้งสาลีข้าวเหนียว (blend flour) เพื่อผลิตเส้นอูด้ง พบว่าค่าความแข็งของเส้นอูด้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเติมแป้งสาลีข้าวเหนียว นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งของเส้นอูด้งมีความสัมพันธ์ทางบวกกับปริมาณแอมิโลสในแป้งสาลีที่มีการผสมใหม่ (reconstituted flour) ทั้งนี้แอมิโลสและแอมิโลเพกตินยังมีอิทธิพลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันที่แตกต่างกัน โดย Miles *et al.* (1985) พบว่าแอมิโลสมีอิทธิพลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันในช่วงเริ่มต้น ขณะที่แอมิโลเพกตินก่อให้เกิดรีโทรเกรเดชันในช่วงระหว่างการเก็บรักษา Klucinec and Thompson (2002) ได้รายงานว่าการเติมแอมิโลสลงในเจลจากแป้งข้าวเหนียว ส่งผลให้ค่าอีลาสติคโมดูลัส (elastic modulus) เพิ่มขึ้นได้เร็วกว่าในตัวอย่างที่ไม่มีการเติมแอมิโลส

### 3.2.3 โครงสร้างของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน

Qi *et al.* (2003) ได้รายงานไว้ว่าแอมิโลเพกตินที่มีอัตราส่วนสายโซ่สั้น และมีความยาวสายโซ่สัมพัทธ์ยาว (relatively longer short chain) มีส่วนช่วยให้โครงร่างผลึกเกิดได้ดีขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vandeputte *et al.* (2003) ซึ่งพบว่าแอมิโลเพกตินความยาวสายโซ่ DP 12-22 มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับเอนทัลปีของรีโทรเกรดแอมิโลเพกติน ในขณะที่แอมิโลเพกตินความยาวสายโซ่ DP 6-9 และ DP มากกว่า 25 มีผลในการยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชัน

นอกจากนี้ความยาวของสายโซ่แอมิโลสก็มีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยพบว่ารีโทรเกรเดชันเกิดได้เร็วเมื่อแอมิโลสมีความยาวสายโซ่ปานกลาง ขณะที่แอมิโลสสายยาวมีการเคลื่อนที่ได้ช้า เนื่องจากความยาวของสายโซ่เป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่ และแอมิโลสสายสั้นมีการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) ได้เร็ว จึงเป็นอุปสรรคต่อการจัดเรียงตัวใหม่ (Morrison and Karkalas, 1993)

### 3.2.4 ส่วนผสมในเจล

การเติมน้ำตาล เกลือ กรดอินทรีย์ และไขมันส่งผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ โดยพบว่าส่วนผสมเหล่านี้อาจยับยั้ง หรือส่งเสริมการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ กล่าวคือการเติมไขมันมีผลในการชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ (Chang and Liu, 1991) ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลส และไขมัน (Galvani *et al.*, 1994)

การเติมน้ำตาลนั้นมีส่วนช่วยยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ (Bello-Perez and Paredes-Lopez, 1995) Prokopowich and Biliaderis (1995) ได้รายงานไว้ว่าการเติมน้ำตาลในอัตราส่วนสตาร์ชต่อน้ำตาลต่อน้ำ 1:0.5:1.5 โดยน้ำหนัก พบว่าสามารถยับยั้งการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่โพลีเมอร์ในเจลสตาร์ชได้ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าอิทธิพลของน้ำตาลนั้นแตกต่างกันตามปริมาณแอมิโลสที่มีอยู่ในสตาร์ช

การเติมเกลือช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ (Bello-Perez and Paredes-Lopez, 1995) โดยพบว่าการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์สามารถลดอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ (Chang and Liu, 1991; Ward *et al.*, 1994)

### 3.2.5 ความเข้มข้น

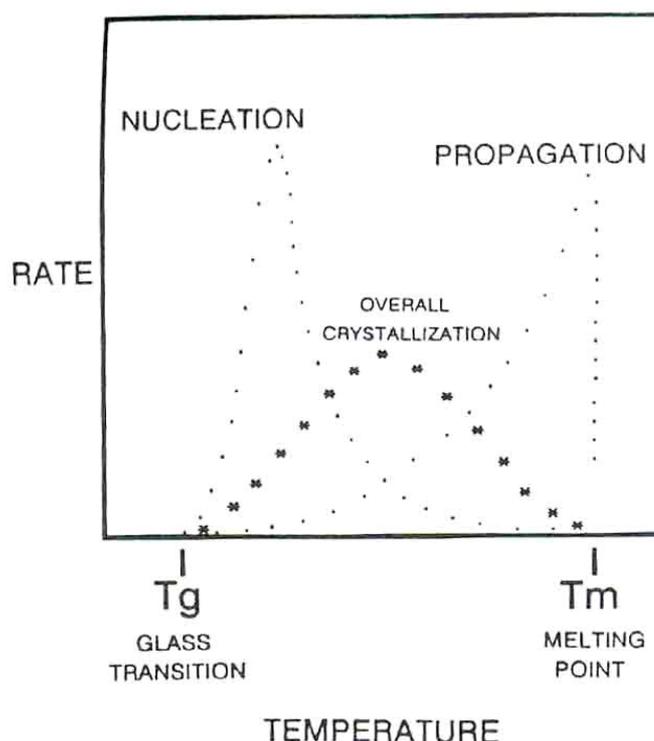
เมื่อสารละลายแป้งมีความเข้มข้นสูง จะได้เจลที่มีความแข็งเนื่องจากมีการเกิดพันธะระหว่างสายโซ่แอมิโลสอย่างอิสระ (random) แต่สารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ จะเกิดการตกตะกอนเนื่องมาจากสายแอมิโลสเกิดการจับตัวกันอย่างมีระเบียบโดยจะจับตัวกันแบบเรียงขนาน (parallel) (Bennion, 1980)

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของ Ward *et al.* (1994) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเจลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 25 เป็น 45 น้ำหนักสตาร์ชต่อปริมาตรน้ำ เป็นผลให้ค่าเอนทัลปีเพิ่มขึ้น และค่าอุณหภูมิการเริ่มต้น (To) ลดลง ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับ Chang and Liu (1991) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการพองตัวที่ต่ำของสารละลายแป้งที่มีความเข้มข้นสูง เป็นผลให้เกิดการกระจายตัว (disorientation) ขึ้น และทำให้ปริมาณสตาร์ชเพิ่มขึ้น จึงทำให้โครงร่างผลึกเกิดได้เร็วขึ้น (Collison, 1968)

### 3.2.6 อุณหภูมิการเก็บรักษา

อุณหภูมิการเก็บรักษามีอิทธิพลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันอย่างมาก เจลสตาร์ชที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าเจลที่เก็บที่อุณหภูมิห้อง (Gudmundsson, 1994) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูง มีค่าการเคลื่อนที่บราวน์เนียนสูง ทำให้ไม่สามารถเกิดการจัดเรียงตัวได้ แต่อย่างไรก็ตามการเก็บเจลสตาร์ชไว้ที่อุณหภูมิต่ำมาก (ต่ำกว่าอุณหภูมิกลาส) เป็นการยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ของสายโมเลกุลช้ามาก ดังนั้นการจัดเรียงตัวของโมเลกุลจึงชะงัก (Collison, 1968)

จากภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดโครงสร้างคล้ายผลึกนั้นจะเกิดได้ดีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง glass transition ( $T_g$ ) และอุณหภูมิที่เกิดการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ซึ่งพบว่าขั้นตอนการเกิดนิวเคลียสเกิดได้เพียงเล็กน้อยที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  เนื่องจากขั้นตอนที่ก่อให้เกิดนิวเคลียสนั้นเกิดได้ดีในสถานะของเหลว ซึ่งเป็นสถานะที่สสารสามารถเคลื่อนที่ได้ จึงทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในระบบได้ ในขั้นตอนที่เกิดการเชื่อมต่อของโมเลกุลนั้น พบว่าอัตราเร็วของกระบวนการเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิที่เป็นจุดหลอมเหลวพบว่าอัตราเร็วลดลงอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 8 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราเร็วของการเกิดโครงสร้างคล้ายผลึก  
ที่มา: Slade and Levine (1987, 1988)

Eerlingen and Delcour (1995) ระบุว่าในระบบของโพลิเมอร์นั้น นิวเคลียสเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของการสลายโครงสร้างผลึก (150 องศาเซลเซียส สำหรับผลึกแอมิโลส) แต่ต้องสูงกว่าอุณหภูมิกลาส ขณะที่การเชื่อมต่อของโมเลกุลนั้นเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายโครงสร้างผลึก แต่ต้องสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทำให้ระบบเป็นของไหลจึงเกิดการเคลื่อนที่ของสสารได้ (Slade and Levine, 1988) สารละลายสตาร์ชความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 70 มีค่า  $-5$  องศาเซลเซียส (Hsu and Heldman, 2005) Charoenrien *et al.* (2004) ระบุว่าอุณหภูมิกลาสของข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ความชื้นร้อยละ 50 คือ  $-2.5$  ถึง  $-3$  องศาเซลเซียส ส่วน Chung *et al.* (2002) พบว่าอุณหภูมิกลาสของข้าวพันธุ์จาปอนนิกา

(japonica) หุงสุกความชื้นร้อยละ 60 อยู่ที่  $-7.7$  องศาเซลเซียส และ Israkarn and Charoenrein (2004) ระบุว่าอุณหภูมิกลาสของเส้นก๋วยเตี๋ยวจันทน์คือ  $-4.5$  องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟที่แสดงอัตราเร็วโดยรวมของการเกิดโครงสร้างคล้ายผลึก ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราเร็วของการเกิดนิวเคลียส และการเกิดการเชื่อมต่อกันของโมเลกุล พบว่าอัตราเร็วสูงสุดของกระบวนการอยู่ที่อุณหภูมิระหว่าง  $T_g$  และ  $T_m$  และการเกิดโครงสร้างคล้ายผลึกเกิดได้น้อยมากเมื่ออุณหภูมิของระบบเข้าใกล้  $T_g$  และ  $T_m$  (Slade and Levine, 1987)

ในปี 2000 Siverio *et al.* ได้ทำการทดลองเก็บเจลสตาร์ชไว้ที่อุณหภูมิต่ำเปรียบเทียบกับเก็บเจลไว้ที่อุณหภูมิสูง หรือการทำรอบ (cycling) อุณหภูมิ พบว่าการเก็บเจลที่อุณหภูมิต่ำมีปริมาณการเกิดรีโทรเกรตมากกว่าการทำรอบอุณหภูมิ แต่พบว่าการทำรอบอุณหภูมิให้โครงสร้างผลึกที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) และมีความเสถียรต่ออุณหภูมิสูงได้ดีกว่า นอกจากนี้ Fredriksson *et al.* (2000) พบว่าการทำรอบอุณหภูมิต่ำส่งผลให้เจลสตาร์ชมีทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มากกว่าการเก็บเจลโดยไม่ทำรอบอุณหภูมิ

### 3.3 การศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชัน

เนื่องจากเจลสตาร์ชอยู่ในสถานะอุปเสถียร (metastable) และยังจัดเป็นระบบที่ไม่สมดุล ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างในระหว่างการเก็บรักษาได้ (Ferrero *et al.*, 1994) ซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันนั้นมีการศึกษาได้หลากหลายวิธี ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ซึ่งแบ่งได้เป็นกลุ่ม ๆ ดังนี้ (Karim *et al.*, 2000)

#### 3.3.1 การศึกษาทางกระแสวิทยา

จัดเป็นวิธีวิเคราะห์การเกิด และสมบัติของโครงสร้างร่างแหที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งเป็นการใช้แรง หรือความเครียดเฉือนกระทำต่อเจลเพื่อทำลายโครงสร้าง วิธีนี้เป็นเทคนิคการศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจน (macroscopic) สามารถแบ่งออกได้เป็น การศึกษาการเสียรูปร่างถาวร (large deformation) เช่น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อ (firmness) ของตัวอย่าง และการศึกษาการเสียโครงสร้างแบบผันกลับได้ (low deformation) เช่น การศึกษาด้วยเครื่อง dynamic oscillatory rheometry ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างร่างแหที่เกิดขึ้นส่งผลต่อความยืดหยุ่นของเจล (Parker and Ring, 2001) วิธีนี้มีความเหมาะสมในการใช้ติดตามการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Collison, 1968) จึงมีผู้นิยมนำมาใช้

ในการศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันในอาหารประเภทต่าง ๆ เพื่อให้เกิดความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงของอาหารในระหว่างการเก็บรักษา เช่น Jankowski (1992) พบว่ามันฝรั่งต้มสุกที่เก็บไว้มีความแข็งมากขึ้น เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของเอมิโลส Inaba *et al.* (1994) ได้ระบุว่าค่างานที่ใช้ในการกด (compression work) และค่าแรงที่ใช้ในการทำลายโครงสร้าง (rupture force) เจลจากสตาร์ชเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา เช่นเดียวกับ Czuchajowska *et al.* (1998) พบว่าค่าความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวโพดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นจาก 24 เป็น 72 ชั่วโมง และ Lee *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาผลของระยะเวลาการบ่มวุ้นเส้นสตาร์ชมันเทศ พบว่าค่าความแข็งของวุ้นเส้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม เนื่องมาจากในระหว่างการบ่มเกิดกระบวนการรีโทรเกรเดชันเกิดขึ้น เป็นผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังใช้ในการอธิบายผลของอุณหภูมิการเก็บรักษาต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ โดย Lin and Chein (1995) พบว่าเจลสตาร์ชข้าวโพดมีความแข็งมากที่สุดเมื่อทำการเก็บรักษาไว้ที่ 3.5 องศาเซลเซียส Limanond *et al.* (2002) พบว่าตอร์ติลาใหม่มีค่าความกระด้าง (stiffness) ต่ำกว่าตอร์ติลาเก่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นตอร์ติลาแข็งมากขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดยแผ่นตอร์ติลาที่มีค่าความกระด้างมากที่สุดเมื่อทำการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิโดยรวมถึง Slade *et al.* (1987) พบว่าผลิตภัณฑ์จากข้าวมีความแน่นแข็งมากขึ้น แต่มีความเหนียวติดน้อยลงเมื่อทำการเก็บรักษาไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บรักษาไว้ที่ 42 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง โดยรักษาความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 80

เพสต์สตาร์ชความเข้มข้นสูง สามารถเกิดเจลได้ในระหว่างลดอุณหภูมิ และความแข็งของเจลเพิ่มขึ้นเมื่อบ่มเจลไว้ เนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวของสตาร์ชขึ้น (Collison, 1968) ในระหว่างการเก็บรักษานั้น เนื้อสัมผัสของอาหารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดย Inaba *et al.* (1994) พบว่าค่าความแข็งของเจลสตาร์ชเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในช่วงระยะเวลา 5-10 วันแรกของการเก็บรักษา แต่ Hagenimana *et al.* (2005) ระบุว่าความแน่นแข็งของเจลข้าวความเข้มข้นร้อยละ 16 เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา เมื่อเก็บเจลข้าวไว้นานกว่า 3 วัน ทั้งนี้ Vandeputte *et al.* (2003) พบว่าเอมิโลสมีผลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของความแน่นเนื้อ ในระหว่างการเก็บรักษาสตาร์ชเกิดการสร้างโครงสร้างร่างแหขึ้น โดยเฉพาะในบริเวณที่มีเอมิโลสสูง เป็นผลให้ความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น (Brunnschweiler *et al.*, 2006)

### 3.3.2 การศึกษาโดยใช้เครื่อง X – ray diffractometer

โครงสร้างคล้ายผลึกในแป้งดิบ ทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีเอกซ์ได้ โดยแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ เอ บี และ ซี (DeMan, 1999) แตกต่างกันตามแหล่งที่มาของแป้ง

นั้น ๆ ในกรณีแบ่งข้างจัดเป็นแบ่งแบบเอ โดยแบบเอ นั้นจะปรากฏค่าที่ 15.1 17.2 18.1 และ 23.2 องศา 2 theta ส่วนแบบบีนั้นเกิดที่ 5.6 15.00 17.2 22.4 และ 24.1 องศา 2 theta และแบบซีนั้นเป็นการผสมระหว่างแบบเอ และแบบบี (Vermeulen *et al.*, 2004) ซึ่งพบว่ามีความแตกต่างกับลักษณะการกระเจิงของผลึกของแข็งที่มีการเกิดฟีกที่จุดจุดเดียว (Cullity, 1978) เมื่อแบ่งผ่านกระบวนการเจลาตินในข้ออย่างสมบูรณ์พบว่าความเป็นผลึกลดลง หรือหายไป (Pikus, 2005) แต่พบว่าความเป็นผลึกจะกลับคืนมาอย่างช้า ๆ ในระหว่างการเก็บรักษา (Gray and BeMiller, 2003)

รีโทรเกรเดชันเป็นขั้นตอนที่มีการเกิดโครงสร้างคล้ายผลึกจำนวนมาก จึงใช้การตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการกระเจิงของรังสีเอกซ์เพื่อวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันได้ โดยพบว่าเมื่อเจลาเกิดการจัดเรียงตัวใหม่จะเกิดการจัดเรียงตัวแบบบี (Eliasson and Gudmundsson, 1996) ขึ้น โดยแบบบีนี้มีความแตกต่างจากแบบเอ เรื่องปริมาณน้ำในโครงสร้าง คือแบบเอจัดเป็นผลึกแบบเข็ม (orthorhombic) ซึ่งประกอบด้วยน้ำ 8 โมเลกุลต่อเซลล์ แต่ผลึกแบบบีนี้มีน้ำโมเลกุลแทรกอยู่ในช่องว่างตรงกลางเซลล์เพิ่มขึ้น และมีการจัดเรียงแบบหกเหลี่ยม (Clark, 1994; Zobel and Stephen, 1995; Parker and Ring, 2001) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเกิดผลึกแบบวีขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาเจลาสตาร์ชข้าวโพดแอมิโลสสูงอีกด้วย (Chung *et al.*, 2003) รวมถึงการเกิดผลึกแบบวีขึ้นในผลิตภัณฑ์ข้าวกึ่งสุก (parboiled rice) (Biliaderis *et al.*, 1993)

จากการศึกษาพบว่า การเกิดโครงสร้างคล้ายผลึกของสตาร์ชจะมีความแตกต่างจากสารละลายแอมิโลสบริสุทธิ์ คือ การเกิดโครงสร้างคล้ายผลึกของแอมิโลสจะเกิดอย่างรวดเร็ว แล้วจะเข้าสู่ขีดจำกัดของการเกิดโครงสร้างคล้ายผลึกภายใน 2 วัน แต่สารละลายสตาร์ชจะดำเนินต่อไปได้เรื่อย ๆ และสำหรับสารละลายแอมิโลเพกตินบริสุทธิ์นั้น จะการเกิดโครงสร้างคล้ายผลึกของสารละลายของแอมิโลเพกตินจะเกิดได้ช้า และจะเข้าสู่ขีดจำกัดภายใน 30-40 วัน (Gudmundsson, 1994)

### 3.3.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบมักเกี่ยวข้องกับความร้อน ไม่ว่าจะเป็นการดูดหรือคายความร้อน ซึ่งส่งผลถึงอุณหภูมิของระบบ การศึกษาด้วยวิธีนี้มีเครื่องมือที่นิยมใช้มากคือ เครื่อง differential thermal analysis (DTA) และเครื่อง differential scanning calorimetry (DSC) โดยเครื่องทำการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือการไหลของความร้อน (heat flow) ของตัวอย่างเปรียบเทียบกับตัวอย่างมาตรฐาน ในสภาวะที่มีน้ำเพียงพอ และอยู่ใน

ภาษาชนิดสนิท ซึ่งนิยมใช้ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงเฟสของตัวอย่าง การจัดเรียงตัวของ โมเลกุล และการสร้างพันธะระหว่างสาร (Münzing, 1991; Gray and BeMiller, 2003)

ในระหว่างการเก็บรักษา พบว่าค่ารีโตรีเกรเดเอนทัลปีของตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาและอุณหภูมิกลาส รวมถึงระยะเวลาการเก็บรักษา (Hoover *et al.*, 1996; Jouppila and Roos, 1997; Vanderputte *et al.*, 2003) โดยอุณหภูมิการเก็บรักษามีผลต่อการเกิดรีโตรีเกรเดชันอย่างมาก

Eliasson and Gudmundsson (1996) พบว่าค่าเอนทัลปีที่ใช้ในการสลาย โครงร่างผลึกเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บรักษา โดยค่าเอนทัลปีนี้เป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการสลาย ผลึกแบบบี จากข้อมูลที่ได้จากเครื่อง DSC พบว่าสตาร์ชที่ผ่านการเจลาติไนซ์เกิดการจัดเรียงตัว ใหม่ได้ (Münzing, 1991) Vanderputte *et al.* (2003) รายงานไว้ว่าค่าเอนทัลปีของเจลที่เก็บไว้ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา และมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเก็บรักษา โดยพบว่า ช่วงการเติบโตของโครงร่างผลึกเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง เมื่อเปรียบเทียบกับเจลที่เก็บไว้ที่ 6 องศาเซลเซียส

#### 3.3.4 การศึกษาด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปิก (spectroscopic)

โมเลกุลมีการเคลื่อนไหวเมื่อมีแรงมากกระตุ้นซึ่งการเคลื่อนไหวนี้มีลักษณะ เฉพาะตัว แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับโมเลกุล เช่น การเกิดรีโตรีเกรเดชันทำให้ลักษณะ การเคลื่อนไหวเปลี่ยนแปลงไป ปัจจุบันมีเครื่องมือที่ได้รับการพัฒนาเพื่อใช้ทำการวิเคราะห์ที่อยู่ 3 เครื่อง คือ เครื่อง nuclear magnetic resonance (NMR), เครื่อง Infra-red (IR) และเครื่อง raman

#### 3.3.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความขุ่น (turbidimetric)

ความขุ่นของเจลาติไนซ์สตาร์ชเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา เป็น ผลให้ค่าการผ่านของแสง (transmitted light) ลดลง แต่วิธีนี้มีความเหมาะสมสำหรับสารละลาย ที่มีความเข้มข้นต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 2) ทั้งยังไม่มีควมไวเพียงพอในการตรวจสอบการเกิดรีโตรี เกรเดชันในช่วงแรก แต่พบว่าเป็นวิธีที่สามารถติดตามกระบวนการเกิดรีโตรีเกรเดชันในระยะยาว ได้ดี (Collison, 1968) Sandhu *et al.* (2004) พบว่าความขุ่นของสารละลายสตาร์ชข้าวโพด เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เก็บรักษา Jacobson *et al.* (1997) พบว่าการเปลี่ยนแปลงความขุ่น สามารถบ่งบอกถึงอัตราการเกิดรีโตรีเกรเดชันได้ และ Parker and Ring (2001) สารละลายใส่

ของเจลาตินซ์แอมิโลสขุ่นขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งบ่งบอกถึงการตกตะกอนของสายโพลีเมอร์ ทั้งนี้ การเกิดความขุ่นได้นั้น ตะกอนของสายโซ่ต้องมีขนาดใหญ่พอกับความยาวคลื่นของแสง

### 3.3.6 การวัดความไวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์

ความยากง่ายในการถูกย่อย (digestibility) ของเจลสตาร์ชขึ้นอยู่กับ กระบวนการผลิต และการเกิดรีโทรเกรดชัน (Gray, 2003; Chung *et al.*, 2006) จึงอาจกล่าวได้ว่าสถานะที่เหมาะสมต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มีดังนี้ สตาร์ชต้องอยู่ในรูปของอณูพื้นฐานที่ละลายได้และไม่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอื่น รวมถึงไม่ผ่านการดัดแปรทางเคมีเพื่อป้องกันการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (Tester *et al.*, 2004) สตาร์ชที่ทนต่อเอนไซม์ (resistant starch) แบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ สตาร์ชที่ไม่ถูกย่อยเนื่องจากข้อจำกัดทางกายภาพ (physically inaccessible to digestion) สตาร์ชดิบ (ungelatinized starch) รีโทรเกรดสตาร์ช (retrograded starch) และสตาร์ชดัดแปรทางเคมี (chemically modified starch) (Haralampu, 2000)

ขั้นตอนการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -แอมิเลส ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การเคลื่อนที่ของเอนไซม์เข้าหาสารตั้งต้น (diffusion to the substrate) การจับกันระหว่างเอนไซม์และสารตั้งต้น (absorption to the substrate) และการย่อยของเอนไซม์ (catalytic event) (Cui and Oates, 1997) ขั้นตอนในการเคลื่อนที่เข้าหาสารตั้งต้นนั้นจัดเป็นขั้นตอนกำหนดอันติกรียาของกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์ สารละลายสตาร์ชที่ผ่านการเจลาตินซ์มีโครงสร้างที่ละลายได้อยู่มาก จึงง่ายต่อเอนไซม์ในการเข้าทำปฏิกิริยา เมื่อลดอุณหภูมิลงรีโทรเกรดชันเกิดขึ้น ก่อให้เกิดโครงสร้างร่างแหจากการพันเกี่ยวกันของสายโซ่แอมิโลส ซึ่งขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ เป็นผลให้รีโทรเกรดสตาร์ชมีความไวต่อเอนไซม์ลดลง (Eerlingen and Delcour, 1995)

ในช่วงแรกของการเก็บรักษา ความต้านทานของสตาร์ชต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ และกรดเพิ่มมากขึ้น จึงสามารถศึกษาอัตราเร็วของการเกิดรีโทรเกรดชันในช่วงแรกของการเก็บรักษาได้ เช่น Ohwada *et al.* (2002) พบว่าเจลถั่วเขียวที่เก็บรักษาไว้ที่ -10 องศาเซลเซียสมีความไวต่อกรดมากกว่าเจลที่เก็บรักษาไว้ที่ 10 องศาเซลเซียส และเจลที่เก็บไว้ที่ 1 องศาเซลเซียสมีความไวต่อกรดต่ำที่สุด เป็นต้น Mujoo and Ali (1998) ระบุว่าเกิดการเกิดรีโทรเกรดชันส่งผลให้ความไวต่อเอนไซม์ของสตาร์ชลดลง Cui and Oates (1997) พบว่าการย่อยด้วยเอนไซม์ลดลงเมื่อทำการเก็บเจลสตาร์ชไว้ที่ 5 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง และยังคงลดลงเรื่อย ๆ ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา แต่พบว่าการเก็บเจลไว้ที่ 5 องศาเซลเซียส นานเกินกว่า 6 ชั่วโมง ไม่มีผลต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ Okuda (2005) ให้ความเห็นว่าการเกิดรีโทรเกรดชันส่งผลต่อความไวต่อเอนไซม์อย่างมาก Sievert *et al.* (1991) พบว่าความต้านทานเอนไซม์

แอมิโลสมีความเชื่อมโยงกับความแตกต่างในการจัดเรียงตัวของโครงสร้างมากกว่าปริมาณความเป็นผลึกในตัวอย่าง

### 3.3.7 การวิเคราะห์การเกิดการแยกน้ำ (syneresis)

เมื่อเจลสตาร์ชผ่านการคืนตัวหลังการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw) พบว่าการแยกตัวของน้ำเกิดขึ้น เนื่องมาจากโครงสร้างร่างแหจับตัวกันแน่นขึ้น และปริมาณน้ำที่แยกออกมานั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณรีโทรเกรดสตาร์ช

### 3.3.8 วิธีอื่น ๆ

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการจับไอโอดีน โดยในระหว่างการบ่ม โมเลกุลแอมิโลสเกิดการจัดเรียงตัวเป็นสายโซ่เกลียวที่มีความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินกับไอโอดีนได้ต่ำลง จึงสามารถวิเคราะห์ถึงปริมาณการเกิดรีโทรเกรดเดชันได้ (Collison, 1968) จากรายงานของ Jankowski (1992) ระบุว่าเกิดการเกิดสีน้ำเงินระหว่างแอมิโลสและไอโอดีนในมันฝรั่งต้มสุกทดลองอย่างรวดเร็วในช่วง 8 ชั่วโมงแรกของการเก็บรักษา แต่พบว่าค่าสีน้ำเงินมีเริ่มคงที่เมื่อเก็บมันฝรั่งสุกไว้นาน 24 ชั่วโมง

การวิเคราะห์ปริมาณสตาร์ชที่ละลายได้ เนื่องจากในระหว่างการเก็บรักษาแอมิโลสเกิดการจับตัวกันเป็นตะกอนเกิดขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการละลายลดลง (Karim *et al.*, 2000) โดย Bello *et al.* (1995) พบว่าปริมาณสตาร์ชที่ละลายได้ในสารละลายข้าวฟ่างลดลงเมื่อทำการเก็บรักษาไว้

การตรวจสอบไบร์ฟรินเจนซ์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ในขนมปังป่น (bread crumb) ที่เก็บรักษาไว้พบว่าการเกิดไบร์ฟรินเจนซ์ขึ้นมาได้อีกครั้ง โดยพบว่าไบร์ฟรินเจนซ์ที่เกิดขึ้นใหม่นี้มีความแตกต่างกับไบร์ฟรินเจนซ์ในเม็ดสตาร์ช ซึ่งชี้ชัดว่าความเป็นระเบียบของโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุล (Hug Iten *et al.*, 1999, Gray and BeMiller, 2003)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. วัสดุดิบ

- 1.1 ข้าวพันธุ์เหลือง 11 อายุการเก็บมากกว่า 4 เดือน (ห.จ.ก.โรงสีไฟฟ้าพาสลินธุ์รุ่งเรือง 3อ.กมลพิสัย จ.กาฬสินธุ์)
- 1.2 ถุงพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน จากตลาดอมรภัณฑ์

#### 2. สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมดเป็นสารเคมีคุณภาพ Analytical grade

##### 2.1 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์แอมิโลส

- 2.1.1 เอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95
- 2.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์
- 2.1.3 กรดแอซีติกกลั่น (glacial acetic acid)
- 2.1.4 แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (Sigma, USA)
- 2.1.5 ไอโอดีน
- 2.1.6 โพแทสเซียมไอโอไดด์

##### 2.2 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ความไวต่อเอนไซม์

- 2.2.1 เอนไซม์แอลฟา-แอมิเลสจาก *Bacillus subtilis* (Fluka, USA)
- 2.2.2 โซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์
- 2.2.3 กรด 3,5-ไดไนโตรซาลิกซาลิก
- 2.2.4 โพแทสเซียมโซเดียมทาร์เตรต
- 2.2.5 น้ำตาลมอลโตส

### 3. เครื่องมือและอุปกรณ์

#### 3.1 เครื่องมือสำหรับผลิตแป้งข้าว และเตรียมเส้นก๋วยเตี๋ยว

- 3.1.1 เครื่องโม่หิน
- 3.1.2 เครื่องหมุนเหวี่ยงแยกแบบตะกร้า (Basket centrifuge)
- 3.1.3 ตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray dryer)
- 3.1.4 เครื่องบด (Hammer mill) พร้อมตะแกรงขนาด 0.5 และ 0.2 มิลลิเมตร
- 3.1.5 เครื่องบดของแข็งแห้ง (Ultra-centrifugal mill type, Retsch รุ่น ZM1)
- 3.1.6 ตะแกรงร่อนแป้งขนาด 80 เมช
- 3.1.7 ตะแกรงร่อนแป้งขนาด 100 เมช
- 3.1.8 อุปกรณ์การทำก๋วยเตี๋ยว (ภาคผนวก ก)
- 3.1.9 เครื่องรีดแป้งและตัดเส้น (Marcato, ATLAS 150)

#### 3.2 เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพ

- 3.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, JEOL, JSM-5600LV, England)
- 3.2.2 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer, JEOL, JDX-3530, Japan)
- 3.2.3 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC, Pyris1 Perkin-Elmer, USA)
- 3.2.4 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Lloyd Food Texture analyzer, รุ่น LRX, Germany)
- 3.2.5 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer, Stable Micro System รุ่น TA-XT2, UK)
- 3.2.6 เครื่องหมุนเหวี่ยงควบคุมอุณหภูมิต่ำ (Refrigerated centrifuge, Hitachi รุ่น Himac CR 20B2)
- 3.2.7 ตู้ควบคุมอุณหภูมิต่ำ (Low temperature incubator, Memmert รุ่น CELSIUS 2000, Germany)
- 3.2.8 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Scaltec รุ่น SPB31)
- 3.2.9 ตู้อบแบบลมร้อน (Hot air oven, Memmert รุ่น ULE500, Germany)
- 3.2.10 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer, Labomed รุ่น Spectronic 22)
- 3.2.11 เครื่องทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze dryer, Heto FD25, Denmark)

### 3.2.12 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

#### วิธีการ

#### 1. การเตรียมแผ่นแป่งก้วยเตี่ยวจันท์

##### 1.1 การผลิตแป่งข้าว

นำข้าวเหลือง 11 มาล้างให้สะอาดจนน้ำที่ใช้ล้างใส แล้วแช่น้ำทิ้งไว้ 3 ชม. จึงม่เปียกด้วยไม้หิน 2 รอบ โดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 2 จากนั้นเหวี่ยงแยกน้ำออกจากน้ำแป่งด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงนาน 1 นาที ลดขนาดของก้อนแป่งให้เล็กลงแล้วนำไปใส่ถาดเข้าอบในตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส 12 ชม. นำแป่งแห้งที่ได้ไปม่ด้วยเครื่องบด โดยผ่านตะแกรงขนาดรูตะแกรง 0.5 และ 0.2 มิลลิเมตรตามลำดับ จากนั้นจึงร่อนผ่านตะแกรง 100 เมช แล้วจึงบรรจุถุงเก็บ

##### 1.2 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นและแอมิโลสของแป่งข้าว

1.2.1 ปริมาณความชื้น ตามวิธีการของ AACC (2000) (ภาคผนวก ข1)

1.2.2 ปริมาณแอมิโลส ตามวิธีการของ Juliano (1971) (ภาคผนวก ข2)

##### 1.3 การผลิตแผ่นแป่ง

ผสมแป่งข้าวกับน้ำ อัตราส่วนแป่งต่อน้ำ 40:60 กวน 1 นาที ตั้งน้ำแป่งทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง โดยคนเป็นระยะเพื่อไม่ให้แป่งตกตะกอนนอนกัน นึ่งแผ่นแป่งโดยใช้น้ำแป่ง 35 มิลลิลิตร เทลงบนสวดึงกลิ้งน้ำแป่งให้เต็มกรอบสี่เหลี่ยม วางสวดึงลงบนหม้อที่มีน้ำเดือด ปิดฝาทันที นึ่งน้ำแป่ง 3 นาที ยกกรอบอะลูมิเนียมออก ใช้พายพลาสติกและมีดจุ่มน้ำแช่แผ่นแป่งที่สุกแล้วออก วางบนตะแกรง ผึ่งลม 10 นาที นำออกจากตะแกรง เรียงซ้อนกันโดยใช้แผ่นพลาสติกพอลิโพรพิลีนคั่นกลางระหว่างแผ่นแป่ง เพื่อป้องกันการติดกัน

##### 1.4 การบ่มแผ่นแป่ง

นำแผ่นแป่งก้วยเตี่ยวจันท์ที่นึ่งสุก มาบ่มที่ 0 5 10 20 และ 30 องศาเซลเซียส ในเดซิกเคเตอร์บรรจุสารละลายโซเดียมโบรไมด์อิ่มตัว ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นในระหว่างการบ่มแผ่นแป่ง

## 2. การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของแผ่นแป้ง

### 2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของแผ่นแป้ง

#### 2.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการตรวจสอบด้วยเครื่องมือเปรียบเทียบกับ การประเมินทางประสาทสัมผัส

นำแผ่นแป้งนึ่งสุก ตัดเป็นชิ้นขนาด 3x5 เซนติเมตร ซ้อนกัน 10 ชั้น ทั้งก่อนและหลังการบ่มนาน 3 6 และ 24 ชั่วโมง ที่ 5 องศาเซลเซียส มาทดสอบความแข็งของความรู้สึกยากง่ายในการตัด และความรู้สึกไม่ติดมีด ด้วยวิธีให้คะแนนความแข็งจาก 1 (ตัดยากที่สุด) ถึง 7 (ตัดง่ายที่สุด) และคะแนนจาก 1 (ติดมีดมากที่สุด) ถึง 5 (ไม่ติดมีด) โดยผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 7 คน เทียบความสัมพันธ์กับค่าความแข็ง (hardness) และความเหนียว (adhesive) (ภาคผนวก ข3) ที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส Lloyd Food texture analyzer โดยวางตั้งแผ่นแป้งชุดเดียวกันกับที่ประเมินผลทางประสาทสัมผัสบนฐานที่มีร่องสำหรับใบมีดผ่าน กดใบมีดลงมาด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็นระยะทาง 8 มิลลิเมตร โหลดเซลล์ 2500 นิวตัน การวัดความแข็งของแผ่นแป้งรายงานเป็นค่าแรงสูงสุด (maximum force) หน่วยนิวตัน และค่าความเหนียวโดยการดึงหัววัดขึ้นด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที แล้วบันทึกค่างานที่ใช้ในการดึงหัววัดขึ้น ทำการทดลอง 2 ซ้ำ และวัดค่าซ้ำละ 7 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย

#### 2.1.2 คุณสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัส

นำแผ่นแป้งที่วางซ้อนกัน 10 ชั้น ทั้งก่อนการบ่มและหลังการบ่มเป็นเวลา 1.5 3 6 9 12 และ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 0 5 10 20 และ 30 องศาเซลเซียส มาวัดความแข็ง (hardness) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส Lloyd Food texture analyzer โดยวางตั้งแผ่นกัวยเดี่ยวบนฐานที่มีร่องสำหรับใบมีดผ่าน ทำการกดใบมีดลงมาด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็นระยะทาง 8 มิลลิเมตร โหลดเซลล์ 2500 นิวตัน เพื่อศึกษาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของแผ่นแป้งที่ไม่ผ่านและผ่านการบ่ม โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ และวัดค่าซ้ำละ 7 ตัวอย่าง แล้วหาค่าเฉลี่ย รายงานค่าแรงสูงสุด หน่วยนิวตัน

#### 2.1.3 การศึกษาผลของการทำรอบอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส

นำแผ่นแป้งที่วางซ้อนกัน 10 ชั้น ทั้งก่อนการบ่มและหลังการบ่มแบบทำรอบอุณหภูมิ โดยทำการบ่มที่ 0 และ 20 องศาเซลเซียส นานอุณหภูมิละ 45 นาที มาวัดความแข็ง

(hardness) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส Lloyd Food texture analyzer โดยวางตั้งแผ่นแป้งบนฐานที่มีร่องสำหรับใบมีดผ่าน ทำการกดใบมีดลงมาด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็นระยะทาง 8 มิลลิเมตร โหลดเซลล์ 2500 นิวตัน เพื่อศึกษาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของแผ่นแป้งที่ไม่ผ่านและผ่านการบ่ม โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ และวัดค่าซ้ำละ 7 ตัวอย่าง แล้วหาค่าเฉลี่ย รายงานค่าแรงสูงสุด หน่วยนิวตัน

## 2.2 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์

นำแผ่นแป้งก่อนและหลังการบ่มนาน 3 6 9 12 และ 24 ชั่วโมง ที่ 0 5 10 20 และ 30 องศาเซลเซียส มาย่อยด้วยเอนไซม์แอมิเลสตามวิธีของ Mujoo and Ali (1998) โดยนำแผ่นแป้งมาย่อยด้วยสารละลายเอนไซม์แอลฟา-แอมิเลสในสารละลายบัฟเฟอร์ความเป็นกรดต่าง 6.9 ที่ 37 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ด้วยการต้มในน้ำเดือดนาน 5 นาที เหยียงแยกส่วนใส และนำมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นด้วยวิธี 3,5-ไดไนโตรซาลิซิลิกแอซิด เทียบกับสารละลายมาตรฐานมอลโทส (ภาคผนวก ข4)

## 2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน

นำแผ่นแป้งก่อน และหลังการบ่มนาน 3 และ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 0 และ 30 องศาเซลเซียส ปริมาณ 20-24 มิลลิกรัมใส่ลงในภาชนะสแตนเลส (stainless pan) ปิดฝาให้สนิท นำมาวิเคราะห์การสลายตัวของรีโทรเกรดสตาร์ชด้วยเครื่อง DSC โดยใช้ภาชนะสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอ้างอิง และกำหนดอุณหภูมิในการให้ความร้อนที่ 30 ถึง 130 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำการวิเคราะห์หาอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature,  $T_o$ ) อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature,  $T_p$ ) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature,  $T_c$ ) ช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลง ( $T_c-T_o$ ) และพลังงานเอนทัลปี (enthalpy,  $\Delta H$ ) ที่ใช้ในการสลายตัวของรีโทรเกรดสตาร์ช

## 2.4 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึก

ด้วยการใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ เพื่อทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงร้อยละความเป็นผลึกสัมพัทธ์ (% relative crystallinity) ตามวิธีการของ Barth (2004) โดยนำแผ่นแป้งไม่ผ่านการขจัดน้ำมาศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึก และผงแผ่นแป้งซึ่งเตรียมขึ้นจากการนำแผ่นแป้งมาแช่แข็งด้วยไนโตรเจนเหลว แล้วทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze dry) และบดตัวอย่างให้ละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช แล้วเก็บแป้งที่ได้ไว้ในเดซิเคเตอร์บรรจุสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตอิ่มตัว เพื่อให้ตัวอย่างมีความชื้นร้อยละ 12 บรรจุตัวอย่าง

ประมาณ 1 กรัมลงบนที่ใส่ตัวอย่างซึ่งทำจากแผ่นซิลิกาที่มีความเป็นผลึกเป็นศูนย์ ทำการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในช่วงมุม  $2\theta$  เท่ากับ 5–40 องศา โดยมีการเพิ่มมุม 0.04 องศาต่อขั้น และมีอัตราการเพิ่มมุม 3 วินาทีต่อขั้น โดยกำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 30 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมป์ (ภาคผนวก ข5)

## 2.5 ลักษณะโครงสร้างรอยตัดของแผ่นแป้ง

นำแผ่นแป้งก่อน และหลังการบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง และแผ่นแป้งที่บ่มที่ 30 องศาเซลเซียสนาน 12 ชั่วโมง มาขจัดน้ำเป็นลำดับในเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 70 90 และ 100 โดยปริมาตร นานความเข้มข้นละ 24 ชั่วโมง ทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งจุดวิกฤต (critical point dryer) หลังจากนั้นนำตัวอย่างติดบนแท่นตัวอย่างและเคลือบผิวหน้าตัดด้วยทองคำ วิเคราะห์โครงสร้างรอยตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยกำหนดอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 กิโลโวลต์ และใช้กำลังขยาย 35 และ 2000 เท่า (ภาคผนวก ข6)

## 3. การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิบ่มต่อการตัดแผ่นแป้ง

### 3.1 การทดลองตัดแผ่นแป้ง

นำแผ่นแป้งก่อนและหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส นาน 1.5 และ 3 ชั่วโมง และแผ่นแป้งที่บ่มที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง มาตัดเป็นเส้นด้วยเครื่องตัดเส้นก้วยเดี่ยว สังเกตเส้นก้วยเดี่ยวที่ตัดได้ และถ่ายรูป

## 4. การตรวจสอบสมบัติของเส้นก้วยเดี่ยวจันทน์ที่ผ่านการย่นระยะเวลาการบ่ม และการบ่มแบบดั้งเดิม

### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติด้านเนื้อสัมผัส

เพื่อศึกษาความแตกต่างด้านคุณภาพของเส้นก้วยเดี่ยวผ่านการบ่มแบบย่นระยะเวลาเปรียบเทียบกับเส้นก้วยเดี่ยวที่บ่มตามวิธีดั้งเดิม โดยนำเส้นก้วยเดี่ยวจันทน์อบแห้งที่ 45 องศาเซลเซียส นาน 1–2 ชั่วโมง มาคืนรูปด้วยการแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง 15 นาที จากนั้นนำมาผึ่งบนตะแกรงให้สะเด็ดน้ำ 10 นาที แล้วจึงนำไปลวกในน้ำเดือด 2 นาที ทำให้เย็นทันทีที่น้ำอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที สะเด็ดน้ำ

นำเส้นจันท์สุกมาวัดความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส TA-XT2 ตามวิธีของกมลวรรณ (2548) โดยพันเส้นก้วยเดียวกับหัววัดชนิดจับดึงสปาทึง 5 กิโลกรัมโหลดเซลล์ (Spaghetti tensile grips 5 kg load cell) เป็นหัววัด ดึงตัวอย่างด้วยอัตราเร็วก่อนการทดสอบ และระหว่างการทดสอบ 3 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราเร็วหลังการทดสอบ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยระยะทาง 50 มิลลิเมตร ชนิดทริกเกอร์อัตโนมัติ 5 กรัม และอัตราการได้มาของข้อมูล 200 จุดต่อวินาที โดยทดลอง 2 ซ้ำ และวัดค่าซ้ำละ 7 เส้น หาค่าเฉลี่ย โดยรายงานค่าแรงสูงสุด (หน่วยนิวตัน) และระยะทาง (หน่วยมิลลิเมตร)

นำเส้นจันท์สุกมาวัดความต้านการกด (compression test) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส TA-XT2 ตามวิธีของอรพรรณ (2547) โดยใช้หัววัดแบบใบมีดพลาสติกขนาดใบมีดกว้าง 1 มิลลิเมตร 5 กิโลกรัมโหลดเซลล์ กดตัวอย่างด้วยอัตราเร็วก่อนการทดสอบ และระหว่างการทดสอบ 0.2 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราเร็วหลังการทดสอบ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยระยะทางกดร้อยละ 75 ของความหนาตัวอย่าง ชนิดทริกเกอร์อัตโนมัติ 10 กรัม และอัตราการได้มาของข้อมูล 400 จุดต่อวินาที โดยทดลอง 2 ซ้ำ และวัดค่าซ้ำละ 7 เส้น หาค่าเฉลี่ย โดยรายงานค่าแรงสูงสุด (หน่วยนิวตัน) และพื้นที่ใต้กราฟ (หน่วยมิลลิเมตรต่อวินาที)

#### 4.2 การประเมินทางประสาทสัมผัส

นำเส้นก้วยเดี่ยวจันท์อบแห้งตัวอย่างเดียวกับข้อ 4.1 มาคืนรูป และทดสอบหาความแตกต่างระหว่างเส้นจันท์ที่บ่มด้วยวิธีการดั้งเดิม เปรียบเทียบกับเส้นจันท์ที่บ่มแบบย่นระยะเวลา ให้ผู้ทดสอบให้คะแนนความแตกต่าง 0 (ไม่แตกต่าง) ถึง 5 (แตกต่างมากที่สุด) ใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน โดยให้ผู้ทดสอบพิจารณาความยืดหยุ่น ความเหนียว และความนิ่มและ (ภาคผนวก ข7)

#### 5. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษาการบ่มแผ่นแป้งใช้แผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (CRD) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) ถ้าพบนัยสำคัญทางสถิติจะทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

การประเมินความแตกต่างทางประสาทสัมผัสใช้แผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (RCBD) ข้อมูลที่ได้นำมาทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Independent Sample T-Test

6. สถานที่ทดลอง

ห้องปฏิบัติการและอาคารแปรรูปภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะ  
อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. ระยะเวลาการทดลอง

ตั้งแต่เดือนมีนาคม 2547 ถึงเดือนมกราคม 2549

## ผลการทดลองและวิจารณ์

### 1. การเลือกพันธุ์ข้าวเจ้าเพื่อเตรียมแผ่นแป้ง

งานวิจัยของกมลวรรณ (2548) พบว่าแป้งข้าวพันธ์เหลือง 11 มีความเหมาะสมในการผลิตก๋วยเตี๋ยวจันทน์ คือให้น้ำแป้งที่มีความหนืดเหมาะสม สามารถกลิ้งบนสะดึงได้ทั่วทั้งแผ่นและมีความหนาสม่สม่ำเสมอ และสามารถลอกออกมาเป็นแผ่นแป้งได้โดยไม่ขาด ในงานวิจัยนี้จึงได้ทดลองนำข้าวเจ้าพันธ์เหลือง 11 ที่มีอายุการเก็บรักษาไม่น้อยกว่า 4 เดือนมาใช้เป็นวัตถุดิบ โดยได้วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสตามวิธีของ Juliano (1971) พบว่าข้าวเจ้าพันธ์เหลือง 11 มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 32.23 ของน้ำหนักแป้งแห้ง เมื่อพิจารณาการแบ่งประเภทข้าวตามเกณฑ์ปริมาณแอมิโลสของสถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ (International Rice Research Institute) พบว่าข้าวเจ้าพันธ์เหลือง 11 ที่นำมาวิจัยจัดเป็นข้าวแอมิโลสสูง คือมีปริมาณแอมิโลสมากกว่าร้อยละ 27 ของน้ำหนักแห้งขึ้นไป (Ruamchit, 1979) และเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่นำมาใช้ในการผลิตก๋วยเตี๋ยวทางอุตสาหกรรม พบว่ามีปริมาณแอมิโลสใกล้เคียงกัน โดยข้าวที่ใช้ในการผลิตในทางอุตสาหกรรมมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 30.82 จากการทดลองเตรียมแผ่นแป้งในเบื้องต้น ด้วยแป้งข้าวเจ้าพันธ์เหลือง 11 พบว่าแผ่นแป้งที่เตรียมได้นั้นมีความหนาพอเหมาะ ลอกออกจากผ้าสะดึงได้ง่ายโดยไม่ขาด จึงได้เลือกแป้งข้าวเจ้าพันธ์เหลือง 11 ในการทดลองเตรียมแผ่นแป้งตลอดการทดลอง

ดังที่ได้กล่าวแล้วในตอนต้นว่าการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มแผ่นแป้งที่สำคัญคือการเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวของโพลีเมอร์องค์ประกอบของสตาร์ช ส่งผลให้แผ่นแป้งมีความแข็งพอเหมาะสำหรับการตัด และแผ่นแป้งไม่ติดกัน แต่เนื่องจากในระหว่างการบ่มตามธรรมชาติ แผ่นแป้งมีการเสียน้ำขึ้นให้แก่สิ่งแวดล้อม เป็นผลให้การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับแผ่นแป้งไม่ได้มีสาเหตุมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันเพียงอย่างเดียว หากแต่เกิดจากการเสียน้ำขึ้นในแผ่นแป้งไป และเนื่องจากการเสียน้ำขึ้น (dehydration) เป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งมีผลต่ออัตราเร็วของการเกิดรีโทรเกรเดชัน อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเฉพาะผลของอุณหภูมิต่อการบ่ม ดังนั้นเพื่อเป็นการควบคุมการเสียน้ำขึ้นในระหว่างการบ่ม ในงานวิจัยนี้จึงบ่มแผ่นแป้งในสภาวะปิด โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของระบบด้วยสารละลายโซเดียมโบรไมด์อิ่มตัว ซึ่งให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 65 เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับความชื้นของแผ่นแป้งหลังนี้ และผึ่งเย็น

## 2. การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของแผ่นแป้ง

### 2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของแผ่นแป้ง

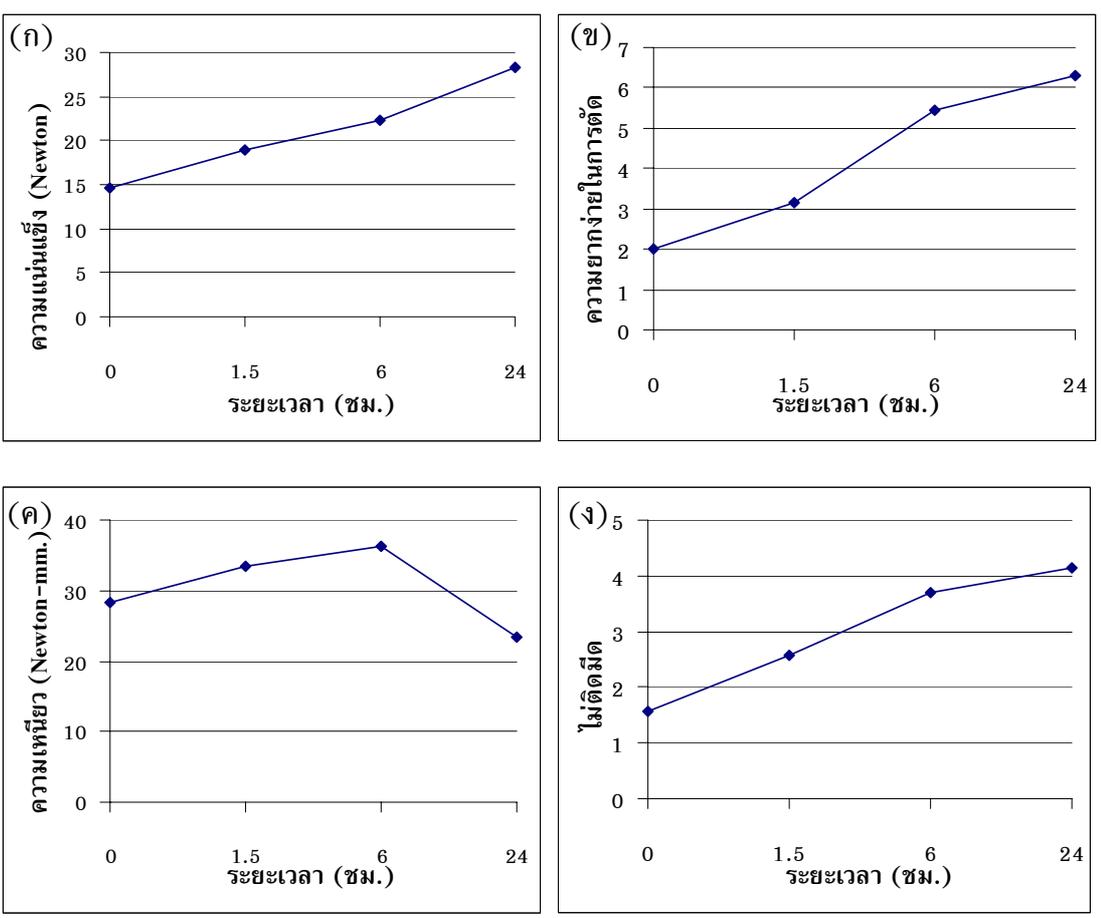
#### 2.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการตรวจสอบด้วยเครื่องมือเปรียบเทียบกับ การประเมินทางประสาทสัมผัส

วัตถุประสงค์ของการบ่มแผ่นแป้ง เพื่อให้แผ่นแป้งมีความแน่นแข็งมากขึ้น และเหนียวติดกันน้อยลง ดังนั้นในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของแผ่นแป้งระหว่างการบ่มจึงมุ่งความสนใจไปยังการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความแน่นแข็ง และค่าความเหนียวติดซึ่งเป็นค่าที่สื่อถึงลักษณะของแผ่นแป้งที่ต้องการหลังการบ่ม

การตรวจสอบความแน่นแข็งด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส เป็นการตรวจสอบด้วยการกด (compression test) โดยค่าความแน่นแข็ง หมายถึงค่าแรงมากที่สุดที่ใช้ในการกดหัววัดลงบนตัวอย่าง (Pons and Fiszman, 1996; Hug-Iten et al., 2003) ส่วนค่าความเหนียว หมายถึงปริมาณงานที่ต้องใช้ในการดึงหัววัดออกจากตัวอย่างอาหาร (Pons and Fiszman, 1996) โดยตั้งหัววัดให้ตึงขึ้น (tensile test) แล้วเปรียบเทียบกับ การประเมินทางประสาทสัมผัส โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนแล้วเป็นผู้ประเมิน เปรียบเทียบค่าความแน่นแข็งกับความยากง่ายในการตัด และความเหนียวกับความรู้สึกติดมีด

การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสระหว่างการบ่มที่ 5 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 9 พบว่าความแน่นแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม (ก) เช่นเดียวกับความยากง่ายในการตัด (ข) ส่วนความรู้สึกไม่ติดมีดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น (ง) ซึ่งแตกต่างกับค่าความเหนียวที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มในช่วงแรก แต่ลดลงเมื่อบ่มนาน 24 ชั่วโมง (ค)

ค่าความเหนียวที่ตรวจสอบได้จากเครื่องมือ นั้น อาจมีความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากหัววัดมีความกว้างมากกว่าชิ้นตัวอย่าง ทำให้ตัวอย่างมีโอกาสยึดติดกับหัววัดได้มากขึ้น (Pons and Fiszman, 1996) นอกจากนี้ข้อจำกัดด้านเครื่องมือซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างแบบกด และดึงต่อเนื่องได้ แต่อย่างไรก็ตามไม่มีผู้ใดเคยศึกษาผลของการเว้นช่วงระหว่างการกด และการดึงต่อค่าความเหนียวที่ตรวจสอบได้ ทั้งนี้ค่าความเหนียวขึ้นอยู่กับพื้นที่สัมผัสระหว่างหัววัด และตัวอย่าง (Lee et al., 2002) การเว้นช่วงระหว่างการกด และการดึงอาจส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการคืนตัวมาติดกับใบมีดที่กดค้างอยู่ในตัวอย่าง เป็นผลให้พื้นที่สัมผัสระหว่างตัวอย่างกับหัววัดเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าความเหนียวที่ตรวจสอบจากเครื่องมือได้นั้นไม่ถูกต้อง

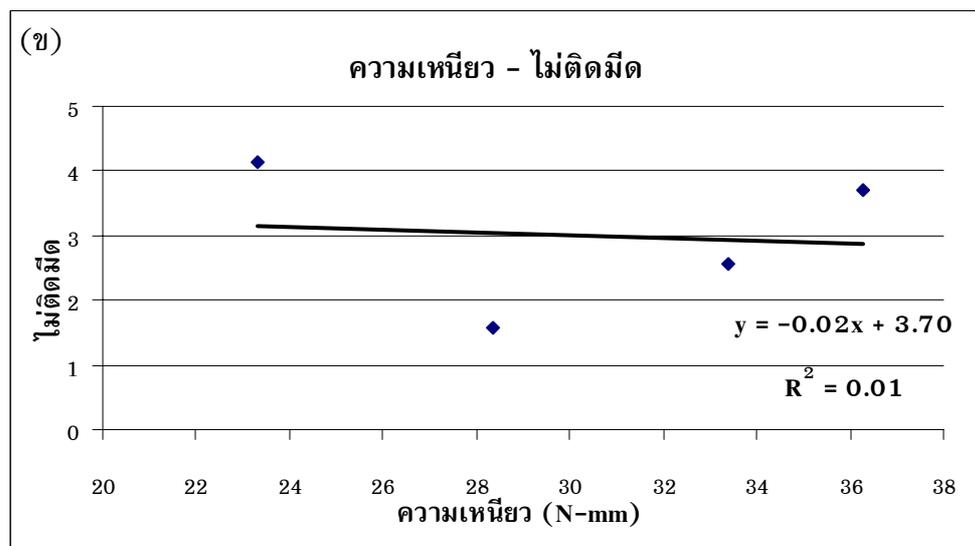
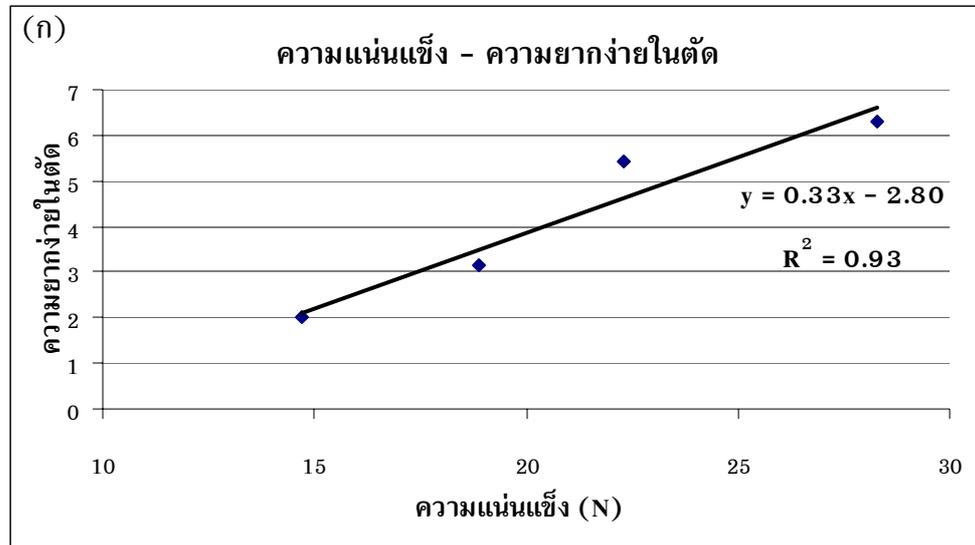


ภาพที่ 9 การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส (ก) ความแน่นแข็ง (ข) ความยากง่ายในการตัด (ค) ความเหนียว (ง) ความรู้สึกไม่ติดมีดของแผ่นแป้งบ่มที่ 5 องศาเซลเซียส

ในงานวิจัยของ Lee et al. (2005) พบว่าค่าความแน่นแข็งของวุ้นเส้นมันเทศ (sweet potato starch noodle) ตรวจสอบได้จากเครื่องวัดเนื้อสัมผัสแปรผันตรงกับระยะเวลาการบ่มเส้น และค่าความเหนียวที่วิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสแปรผกผันกับระยะเวลาการบ่ม ในงานวิจัยนี้ได้ผลสอดคล้องกับ Lee et al. (2005) โดยพบว่าค่าความแน่นแข็งของแผ่นแป้งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม ทั้งการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส และการวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัส ส่วนค่าความเหนียวติดมีดที่วิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสพบว่าลดลงเมื่อบ่มแผ่นแป้งนานขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากเครื่องมือเปรียบเทียบกับค่าทางประสาทสัมผัส ดังแสดงในภาพที่ 10 พบว่าค่าความแน่นแข็งมีความสัมพันธ์ทางบวกกับความยากง่ายในการตัดแผ่นแป้ง (ก) โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.93 ส่วนความเหนียวไม่มีความสัมพันธ์กับความรู้สึกไม่ติดมีด (ข) โดยค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.01 ซึ่ง Friedman et al. (1963) รายงานว่าการตรวจสอบความ

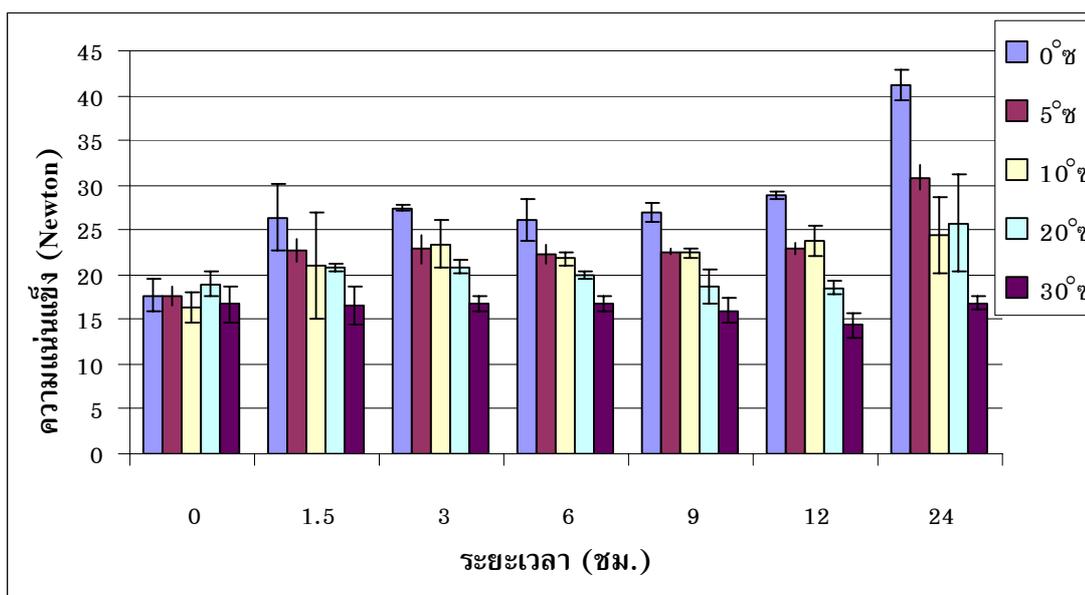
เหนียวติดด้วยเครื่องมือไม่สัมพันธ์กับการวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัส ดังนั้นจึงเลือกศึกษาการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งของแผ่นแป้งในระหว่างการบ่มในงานวิจัยขั้นต่อไป



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างการตรวจสอบด้วยเครื่องมือเปรียบเทียบกับ การประเมินทางประสาทสัมผัส (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นแข็งเปรียบเทียบกับค่าความยากง่ายในการตัด (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวเปรียบเทียบกับความรู้สึกไม่ติดมีด

## 2.1.2 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งของแผ่นแป้ง

การทดสอบอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของแผ่นแป้ง ตรวจสอบโดยวัดค่าความแน่นแข็งของแผ่นแป้ง ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 1.1.1 พบว่าความแน่นแข็งของแผ่นแป้งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) (ภาคผนวก ค1) ดังแสดงในภาพที่ 11 ยกเว้นตัวอย่างบ่มไว้ที่ 30 องศาเซลเซียส การบ่มแผ่นแป้งที่ 0 5 10 20 และ 30 องศาเซลเซียส ในช่วง 1.5 ถึง 12 ชั่วโมง มีการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งเพียงเล็กน้อย แต่ค่าความแน่นแข็งเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มจาก 12 เป็น 24 ชั่วโมง สำหรับการบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 1.5 ชั่วโมงมีค่าความแน่นแข็งเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) และพบว่าหลังการบ่มนาน 3 ชั่วโมงไม่มีการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) จนถึงการบ่มที่ชั่วโมงที่ 9 เช่นเดียวกับตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ ยกเว้นตัวอย่างที่บ่มที่ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งของแผ่นแป้งบ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ และระยะเวลาต่าง ๆ

Bello *et al.* (1995) ระบุว่า การเพิ่มขึ้นของค่าความแน่นแข็งของเจลข้าวฟ่างเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดรีโทรเกรเดชัน และ Sandhu *et al.* (2004) พบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น รีโทรเกรเดชันในเจลสตาร์ชเกิดเพิ่มขึ้น Keetel *et al.* (1996) ให้ความเห็นว่ากลุ่มของสายโซ่ที่จัดเรียงอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้กลุ่มของสายโซ่มีความแข็งแรงมากขึ้น จึงส่งผลให้เจลมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

อุณหภูมิการบ่มมีผลต่อความแน่นแข็งของแผ่นแป้ง โดยการบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสให้ความแน่นแข็งมากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ส่วนแผ่นแป้งบ่มที่ 30 องศาเซลเซียสให้ความแน่นแข็งต่ำมากที่สุด และสามารถแบ่งช่วงอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ อุณหภูมิการบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งมากที่สุด กลุ่มอุณหภูมิการบ่ม 5 และ 10 องศาเซลเซียส กลุ่มอุณหภูมิการบ่ม 20 องศาเซลเซียส และกลุ่มอุณหภูมิการบ่ม 30 องศาเซลเซียส ที่มีการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งต่ำที่สุด แสดงว่าแผ่นแป้งมีความแน่นแข็งได้เร็วขึ้นเมื่อทำการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Perdon *et al.* (1999) ที่พบว่าข้าวสุกมีความแน่นแข็งมากขึ้นเมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากรีโทรเกรเดชันเกิดได้ดีกว่า และ Riva *et al.* (2000) รายงานว่าข้าวสุกที่เก็บรักษาไว้ที่ 5 องศาเซลเซียสเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าข้าวที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง เช่นเดียวกับ Limanond *et al.* (2002) พบว่าความแน่นเนื้อของแผ่นตอร์ตีลาข้าวโพดเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเก็บรักษาไว้ที่ 0 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับเก็บรักษาไว้ที่ 30 องศาเซลเซียส

Chang and Liu (1991) ระบุว่าเจลข้าวเกิดรีโทรเกรเดชันได้เพียงเล็กน้อยเมื่อบ่มไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับบ่มที่ 5 และ -18 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การเก็บเจลดาร์ชแอมมาแรนท (amaranth starch) และโจ๊กข้าวฟ่างที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส เกิดรีโทรเกรเดชันได้ดี (Baker and Rayas-Duarte, 1998; Mokhorro and Jackson, 1995)

แต่อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยพบว่าอุณหภูมิต่ำมีส่วนช่วยในการชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันในบางผลิตภัณฑ์ Guy *et al.* ในปี 1983 รายงานว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งของเค้กมีค่ามากที่สุดที่ 25 องศาเซลเซียส และพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาเข้าใกล้ 0 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Torres *et al.* (1993) พบว่าแผ่นตอร์ตีลาข้าวสาลีผสมข้าวฟ่างมีการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งที่ 25 องศาเซลเซียสมากกว่าที่ 5 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิการเก็บรักษามีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันได้แตกต่างกันตามชนิดของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้เนื่องมาจากแต่ละผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ต่างกัน เช่น Lin and Chein (1995) พบว่าเจลดาร์ชข้าวโพดมีความแน่นแข็งมากที่สุดเมื่อทำการเก็บรักษาไว้ที่ 3.5 องศาเซลเซียส และ Kelekci *et al.* (2003) พบว่าแผ่นตอร์ตีลาที่มีความแน่นเนื้อสูงสุดเมื่อเก็บรักษาไว้ที่ 20 องศาเซลเซียส

จากผลการทดสอบด้านเนื้อสัมผัส พบว่าแผ่นแป้งที่มีความแน่นแข็งมากพอในการตัดเส้น คือแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาประมาณ 1.5-3 ชั่วโมง จึง

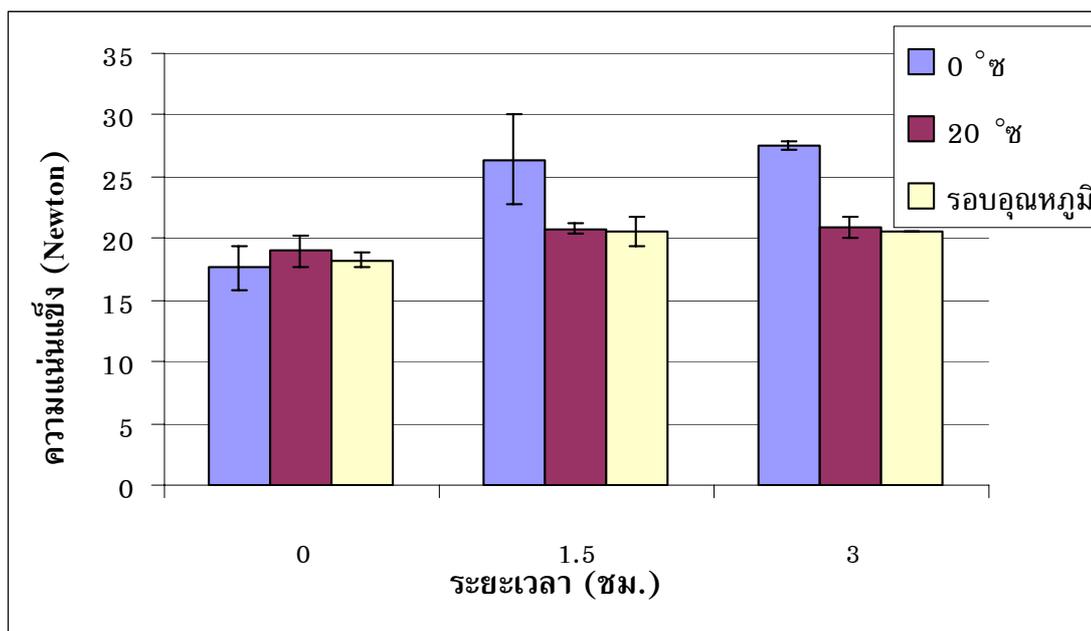
เลือกการบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 1.5-3 ชั่วโมงในการศึกษาการย่นระยะเวลาการบ่มแผ่นแป้งเทียบกับ 30 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะในการบ่มแผ่นแป้งแบบดั้งเดิม

### 2.1.3 ผลของการทำรอบ (cycling) อุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งของแผ่นแป้ง

มีงานวิจัยกล่าวถึงการทำรอบอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน คือ ส่งผลให้เกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้น หรือเกิดโครงสร้างผลึกที่มีความสมบูรณ์มากขึ้น โดย Zeleznak and Hosney (1987) พบว่าการทำรอบอุณหภูมิส่งผลให้เกิดผลึกที่มีความสมบูรณ์มากขึ้นกว่าผลึกที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ เช่นเดียวกับ Gray and BeMiller (2003) ระบุว่าการทำรอบอุณหภูมิมีผลในการเร่งให้ขนมปังมีความแน่นแข็งเพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งของแผ่นแป้งบ่มที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ (ภาพที่ 11) พบว่าภายหลังการบ่มที่ 0 และ 20 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมงไม่มีการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อจนถึงชั่วโมงที่ 9 ดังนั้นจึงได้เลือกทำการบ่มแบบรอบอุณหภูมิจนถึง 3 ชั่วโมง โดยเลือกอุณหภูมิการบ่ม คือ 0 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งมากที่สุด และ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าความแน่นแข็งต่ำ เป็นเวลา 45 นาที เนื่องจากสันนิษฐานว่าเกิดการสร้างนิวเคลียสของโครงสร้างผลึก (nucleation) ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และเกิดการโตของโครงสร้างผลึก (propagation) ที่ 20 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองพบว่าความแน่นแข็งของแผ่นแป้งที่บ่มแบบรอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นแป้งที่ไม่ผ่านการบ่มอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ดังแสดงในภาพที่ 12 แต่ความแน่นแข็งของแผ่นแป้งไม่เปลี่ยนแปลง ( $p \geq 0.05$ ) เมื่อรอบการบ่มเพิ่มเป็น 2 รอบ (3 ชั่วโมง) (ภาคผนวก ค2) และเมื่อเปรียบเทียบการบ่มแบบรอบอุณหภูมิกับการบ่มที่ 0 และ 20 องศาเซลเซียส พบว่าการบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสมีการเปลี่ยนแปลงค่าความแน่นแข็งมากที่สุด ส่วนการบ่มที่ 20 องศาเซลเซียส และการทำรอบอุณหภูมิมิมีค่าความแน่นแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \geq 0.05$ )



ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งของแผ่นแป้งผ่านการบ่มแบบต่าง ๆ

งานวิจัยเกี่ยวกับการทำรอบอุณหภูมิมักเป็นการศึกษาความไวต่อเอนไซม์ เช่น ในการศึกษาของ Fredriksson *et al.* (2000) พบว่าการทำรอบอุณหภูมิต่างกันส่งผลให้เกิดรีโทรเกรดชันได้ดีขึ้น โดยพบว่าเจลที่เก็บรักษาด้วยอุณหภูมิคงที่มีอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-แอมิเลสสูงกว่าเจลที่เก็บรักษาด้วยวิธีทำรอบอุณหภูมิ เช่นเดียวกับ Vasanthan and Bhatti (1998) ซึ่งพบว่าการทำรอบอุณหภูมิต่างกันมีส่วนช่วยในการเพิ่มปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยของ Eerlingen *et al.* (1993) ซึ่งพบว่าการทำรอบอุณหภูมิต่างกันไม่มีผลในการเพิ่มปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์

นอกจากนี้มีการศึกษาด้วยเครื่อง DSC โดย Eerlingen *et al.* (1994) พบว่าการทำรอบอุณหภูมิต่างกันส่งผลให้ค่าเอนทัลปีเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความขัดแย้งกับงานวิจัยของ Silverio *et al.* (2000) ระบุว่าปริมาณผลึกของเจลที่เก็บรักษาแบบรอบอุณหภูมิต่างกันลดลง แต่พบว่าผลึกมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และมีความคงทนต่อความร้อนได้ดีขึ้น

อย่างไรก็ตาม Slade *et al.* (1987) พบว่าการทำรอบอุณหภูมิต่างกันส่งผลให้เส้นก๋วยเตี๋ยว และข้าวสุกมีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น และมีความเหนียวลดลง แต่ในงานวิจัยนี้พบว่า การบ่มแบบรอบอุณหภูมิต่างกันไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความแน่นแข็ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากนิวเคลียสที่เกิดขึ้นในระหว่างการบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส ถูกทำลายเมื่อย้ายอุณหภูมิต่างกันเป็น 20 องศาเซลเซียส

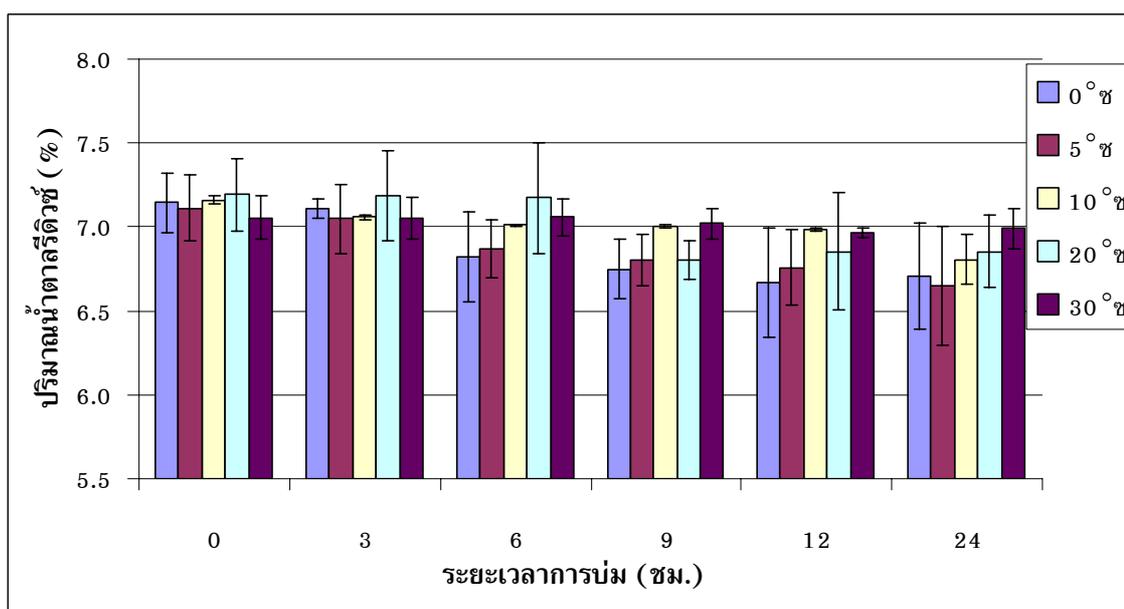
## 2.2 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์ (enzyme susceptibility)

ในระหว่างการบ่มแผ่นแป้งมีการเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์ เนื่องมาจากการเกิดรีโทรเกรดสตาร์ช ดังนั้นจึงได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์ของแผ่นแป้งในระหว่างการบ่ม เพื่อตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรดสตาร์ชในระหว่างการบ่มแผ่นแป้ง ซึ่งเป็นดัชนีตัวหนึ่งที่ยังชี้ถึงการเกิดรีโทรเกรดชันของแผ่นแป้ง

Collison (1968) ระบุว่าการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์เป็นวิธีที่ดีในศึกษาการเกิดรีโทรเกรดชันในระยะแรก โดย Okuda (2005) พบว่าการเกิดรีโทรเกรดชันส่งผลต่อความไวต่อเอนไซม์อย่างมาก และ Sievert *et al.* (1991) พบว่าความไวต่อเอนไซม์แอมิเลสมีความเชื่อมโยงกับความแตกต่างในการจัดเรียงตัวของโครงสร้างในตัวอย่าง

การศึกษาความไวต่อเอนไซม์ของแผ่นแป้งบ่มที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์หลังการย่อยแผ่นแป้งด้วยเอนไซม์แอลฟา-แอมิเลส เปรียบเทียบกับแผ่นแป้งที่ไม่ผ่านการบ่ม โดยการลดลงของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงถึงการลดลงของค่าความไวต่อเอนไซม์ หรือการเกิดรีโทรเกรดสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์โดยแสดงเป็นร้อยละปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ดังแสดงในภาพที่ 13 พบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความไวต่อเอนไซม์ของแผ่นแป้งนั้นไม่ชัดเจน อาจเนื่องจากแผ่นแป้งเป็นเจลที่มีความเข้มข้นสูง ทำให้แอมิเลสที่กระจายตัวออกมานอกเม็ดแป้งได้น้อยเป็นผลให้เกิดสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ต่ำ (Vasanthan and Bhatt, 1998) แต่สามารถบอกถึงแนวโน้มได้ คือเมื่อระยะเวลาการบ่มแผ่นแป้งนานขึ้น ความไวต่อเอนไซม์มีค่าลดลง โดยเฉพาะแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส และพบว่าการบ่มแผ่นแป้งที่ 30 องศาเซลเซียสนั้นไม่ส่งผลให้ค่าความไวต่อเอนไซม์ลดลง



ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์เมื่อบ่มแผ่นแป้งที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ

ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากการย่อยแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) (ภาคผนวก ค3) ในแผ่นแป้งที่บ่มนาน 6 ชั่วโมง และหลังการบ่มนาน 6 ชั่วโมง ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ และการบ่มที่ 30 องศาเซลเซียสนั้นพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญตลอดระยะเวลาการบ่ม สำหรับอุณหภูมิการบ่มอื่น ๆ นั้นการลดลงของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์นั้นไม่ชัดเจน และผลของอุณหภูมิการบ่มต่อความไวต่อเอนไซม์ พบว่าการบ่มแผ่นแป้งที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้ค่าความไวต่อเอนไซม์ลดลงมากกว่าการบ่มแผ่นแป้งที่อุณหภูมิสูง และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีการเพิ่มขึ้นในระหว่างการบ่ม อาจเนื่องมาจากความไม่เสถียรของโครงสร้างผลึกเอมิโลเพกติน ซึ่งสามารถผันกลับได้ (Niba, 2003)

การเพิ่มปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อเอนไซม์ในสตาร์ชสุกนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาและอุณหภูมิการเก็บรักษาอย่างมาก (Eerlingen and Delcour, 1995) Cui and Oates (1997) ระบุว่าปริมาณสตาร์ชสาคุ (sago) ที่ถูกย่อยได้ลดลง เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น แต่พบว่าเมื่อเก็บรักษาไว้ที่ 5 องศาเซลเซียสนานกว่า 6 ชั่วโมงไม่ส่งผลต่อความไวต่อเอนไซม์ของเจลสตาร์ช Eerlingen *et al.* (1993) พบว่าที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 0 องศาเซลเซียสนั้น สตาร์ชสุกมีปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อเอนไซม์เพิ่มขึ้นขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเก็บ เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิการสลายโครงสร้างผลึก (150 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสมาก เหมาะสมต่อการเกิดนิวเคลียส แต่ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิกลาส (-5 องศาเซลเซียส) และ 0 องศาเซลเซียสนั้นน้อยมาก จึงไม่เอื้อให้เกิดการโตของนิวเคลียสที่เกิดขึ้น

Rendon-Villalobos *et al.* (2002) พบว่าอุณหภูมิการเก็บรักษาแผ่นตอร์ติลาที่ 4 องศาเซลเซียสมีผลให้เกิดการลดลงของปริมาณสตาร์ชที่ร่างกายนำไปใช้ได้ (available starch) เพียงเล็กน้อย เช่นเดียวกับ Islas-Hernández *et al.* (2006) พบว่าปริมาณสตาร์ชที่ร่างกายนำไปใช้ได้ ในแผ่นตอร์ติลาลดลงในระหว่างการเก็บรักษา และอุณหภูมิการเก็บรักษาแผ่นตอร์ติลาที่ 25 และ 4 องศาเซลเซียส ปริมาณสตาร์ชที่ร่างกายนำไปใช้ได้มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันที่อุณหภูมิการเก็บทั้งสองมีอัตราเดียวกัน เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการสลายโครงสร้างรีโทรเกรดสตาร์ชที่ตรวจสอบได้จากเครื่อง DSC พบว่าอยู่ระหว่าง 50 ถึง 55 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิการเก็บรักษาทั้งสอง (4 และ 25 องศาเซลเซียส) นั้นต่ำกว่าอุณหภูมิที่ตรวจสอบได้ ระบบจึงอยู่ในสภาวะรับเบอร์รี่ (rubbery stage) แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณรีโทรเกรดสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในแผ่นตอร์ติลาเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำมีปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มากกว่าการเก็บไว้ที่อุณหภูมิสูงอย่างไม่มีนัยสำคัญ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์ในงานวิจัยนี้ พบว่าไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวชี้แสดงการเกิดรีโทรเกรเดชันของแผ่นแป้ง เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์ของแผ่นแป้งบ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงแนวโน้มว่าการบ่มแผ่นแป้งที่อุณหภูมิต่ำมีความไวต่อเอนไซม์ลดลงมากกว่าการบ่มแผ่นแป้งที่อุณหภูมิสูง แสดงว่าเกิดรีโทรเกรดมากกว่า ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งของแผ่นแป้ง ที่พบว่าแผ่นแป้งมีความแน่นแข็งเพิ่มมากขึ้นเมื่อบ่มที่อุณหภูมิต่ำ แสดงว่าที่อุณหภูมิต่ำมีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าที่อุณหภูมิสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Campas-Baypoli (2002) พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในแผ่นตอร์ติลาที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำ และอุณหภูมิตู้เย็นมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับการเพิ่มค่าความแน่นแข็ง

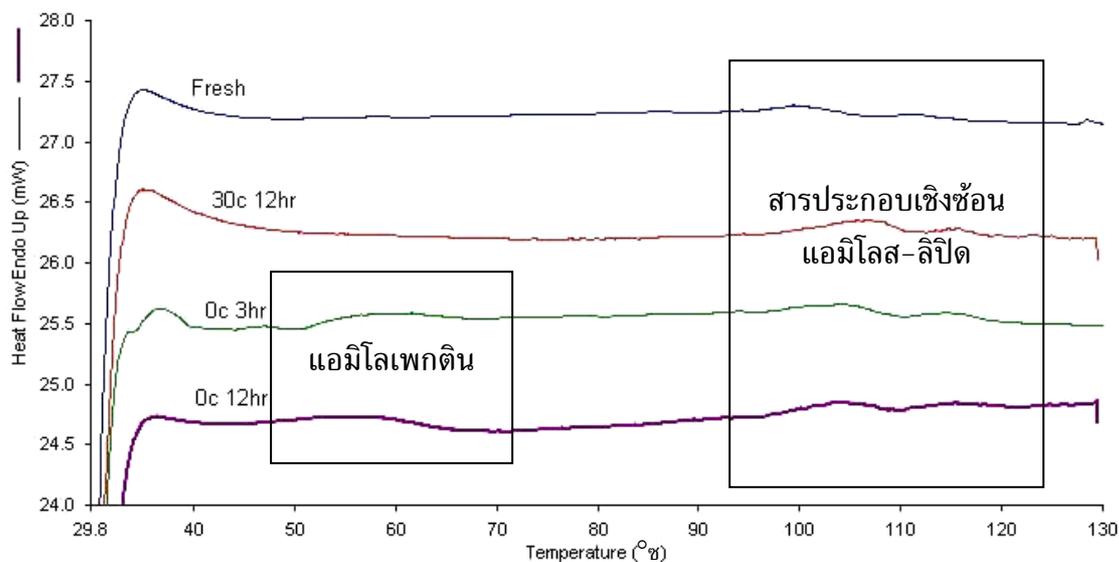
### 2.3 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน

การเกิดรีโทรเกรเดชันนิยมศึกษาด้วยเครื่อง DSC ซึ่งเป็นการติดตามการเปลี่ยนแปลงการไหลของความร้อนในตัวอย่างเปรียบเทียบกับตัวอย่างมาตรฐาน (Gray and BeMiller, 2003) มีงานวิจัยที่ใช้เครื่อง DSC ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันจำนวนมาก เช่น การศึกษาของ Hoover *et al.* (1996) พบว่ารีโทรเกรดเอนทัลปีเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา เช่นเดียวกับ Hug-Iten *et al.* (1999) พบว่าเอนทัลปีของรีโทรเกรดเอนทัลปีในขนมปังเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม เป็นต้น กระบวนการบ่มก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของแผ่นแป้ง เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันนั้นเป็นการสร้างพันธะกันระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในแป้ง (Klucinec and Thompson, 2002)

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส และความไวต่อเอนไซม์ พบว่าการบ่มแผ่นแป้งที่ 0 องศาเซลเซียสมีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน และผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสพบว่าหลังการบ่มนาน 3 ชั่วโมงไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนถึงชั่วโมงที่ 9 ดังนั้นจึงเลือกแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสนาน 3 และ 12 ชั่วโมงเป็นตัวอย่างเปรียบเทียบกับแผ่นแป้งสด และแผ่นแป้งบ่มวิธีดั้งเดิม คือบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง

อุณหภูมิการเกิดการสลายโครงสร้างคล้ายผลึกของสายโซ่แต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน กล่าวคืออุณหภูมิการสลายโครงสร้างคล้ายผลึกของแอมิโลเพกตินอยู่ในช่วง 40-70 องศาเซลเซียส พิจารณาการเกิดการสลายสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลสและลิปิดเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส แต่ไม่เกิน 130 องศาเซลเซียส และพิจารณาการสลายตัวของสายเกลียวคู่แอมิโลส (amylose double helix) นั้นเกิดในช่วงอุณหภูมิ 150-170 องศาเซลเซียส (Zoble and Stephen, 1995; Chung *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2006) ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถศึกษาการสลายแอมิโลส ริโทรเกรดที่เกิดขึ้นในแผ่นแป้งได้ เนื่องจากเมื่อตรวจสอบตัวอย่างที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 160 องศาเซลเซียส) มีพีครบกวน (noise) เกิดขึ้น ทำให้การตรวจสอบมีความแปรปรวนเกิดขึ้น (ภาคผนวก ค4)

แผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยวนึ่งสุกใหม่ ไม่มีพีคในช่วงอุณหภูมิ 40-70 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 14 และตารางที่ 2 แสดงว่าไม่มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่แอมิโลเพกตินขึ้น เช่นเดียวกับแผ่นแป้งบ่มนาน 12 ชั่วโมงที่ 30 องศาเซลเซียส แต่แผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสนาน 3 และ 12 ชั่วโมงเกิดการจัดเรียงตัวกันของสายโซ่แอมิโลเพกตินขึ้นสอดคล้องกับ Kim *et al.* (1997) พบว่าการเก็บเจลข้าวไว้ในตู้เย็นมีระดับการเกิดริโทรเกรดชันมากกว่าที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของแผ่นแป้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 2 สมบัติทางความร้อน เมื่อแป้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

| การหลอมละลายแอมิโลเพกตินรีโทรเกรด |               |               |               |               |                   |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|
| ตัวอย่าง                          | To            | Tp            | Tc            | ช่วงอุณหภูมิ  | เอนทัลปี (J/g db) |
| แผ่นแป้งสด                        | -             | -             | -             | -             | -                 |
| 30 <sup>o</sup> ซ 12 ชม.          | -             | -             | -             | -             | -                 |
| 0 <sup>o</sup> ซ 3 ชม.            | 49.00a ± 3.27 | 60.72a ± 6.94 | 63.60a ± 0.72 | 14.60a ± 2.55 | 1.348a ± 0.61     |
| 0 <sup>o</sup> ซ 12 ชม.           | 47.96a ± 2.03 | 56.70a ± 0.69 | 63.30a ± 0.36 | 15.35a ± 2.39 | 1.397a ± 0.36     |

| การสลายสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ลิปิด |                |                |                 |              |                   |
|---------------------------------------|----------------|----------------|-----------------|--------------|-------------------|
| ตัวอย่าง                              | To             | Tp             | Tc              | ช่วงอุณหภูมิ | เอนทัลปี (J/g db) |
| แผ่นแป้งสด                            | 96.84a ± 0.80  | 100.70a ± 1.85 | 105.73a ± 1.30  | 8.88a ± 2.10 | 0.460a ± 0.03     |
| 30 <sup>o</sup> ซ 12 ชม.              | 102.08a ± 2.48 | 105.02a ± 1.01 | 109.04b ± 0.45  | 6.96a ± 2.03 | 0.673b ± 0.08     |
| 0 <sup>o</sup> ซ 3 ชม.                | 97.79ab ± 0.41 | 101.53a ± 4.42 | 107.71ab ± 0.98 | 9.92a ± 1.39 | 0.932c ± 0.02     |
| 0 <sup>o</sup> ซ 12 ชม.               | 98.91b ± 0.73  | 101.76a ± 1.83 | 107.98ab ± 0.12 | 9.07a ± 0.61 | 0.665b ± 0.05     |

หมายเหตุ

\* - แสดงถึงการไม่พบพีคในตัวอย่าง

\* ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

\* ค่าเฉลี่ยตามตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

Colwell *et al.* (1969) พบว่าโครงสร้างผลึกมีอุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำ เมื่อเก็บเจลไว้ที่อุณหภูมิต่ำ และ Chang and Liu (1991) ศึกษาการเก็บตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าว พบว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันถึงจุดสมดุลได้เร็วเมื่อเก็บเจลที่ 5 และ -18 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับการเก็บเจลที่ 25 องศาเซลเซียส แต่พบว่าโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นที่ 25 องศาเซลเซียสมีความสมบูรณ์มากกว่า เนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวสูงกว่าสอดคล้องกับ Chatakanon *et al.* (2000) ซึ่งพบว่าลักษณะรีโทรเกรดพีคของตัวอย่างเก็บรักษาไว้ที่ 4 องศาเซลเซียสมีลักษณะแบนกว้าง และเกิดที่อุณหภูมิต่ำเช่นเดียวกับในงานวิจัยนี้ อันแสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของผลึก แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่มีแอมิโลเพกตินรีโทรเกรดพีคปรากฏในตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จึงไม่สามารถเปรียบเทียบความสมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นได้

ค่าเอนทัลปีของการสลายโครงสร้างผลึกแอมิโลเพกตินที่เกิดขึ้นในแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 3 และ 12 ชั่วโมงไม่มีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \geq 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 2 รวมถึงอุณหภูมิการสลายโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกตินทั้งอุณหภูมิเริ่มต้น สูงสุด และสิ้นสุด (onset, peak และ end temperature) ของตัวอย่างทั้งสองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \geq 0.05$ ) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lent and Grant (2001) ซึ่งศึกษาการเก็บรักษาขนมบาเกิล (bagel) พบว่าระยะเวลาการเก็บรักษาไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของขนมที่เก็บรักษาไว้ที่ 4 และ 22 องศาเซลเซียส

อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่ระบุว่าระยะเวลา และอุณหภูมิการเก็บรักษามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน โดย Zeleznak and Hosney (1987) พบว่าค่าเอนทัลปีการสลายโครงสร้างผลึกเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา และเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดของการสลายโครงสร้างคล้ายผลึกของแอมิโลเพกตินเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับ Cui and Oates (1997) พบว่าเจลสาคุที่เก็บรักษาไว้ที่ 34 องศาเซลเซียสในช่วงอุณหภูมิการเกิดพีคที่แคบกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับพีคของเจลที่เก็บรักษาไว้ที่ 5 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงว่าอุณหภูมิสูงมีผลให้เกิดโครงสร้างคล้ายผลึกที่มีความสมบูรณ์

แผ่นแป้งทุกตัวอย่างมีพีคการสลายสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและลิปิดขึ้น (amylose-lipid complex) ที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากสารประกอบแอมิโลส-ลิปิดเป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นได้เองในเมล็ดข้าว (Biliaderis *et al.*, 1993) อีกทั้งในแป้งข้าวมีไขมันเป็นองค์ประกอบ เมื่อแป้งข้าวเจลาติไนซ์เป็นผลให้แอมิโลสกระจายตัวออกมานอกเม็ดสตาร์ช และเกิดพันธะกับไขมันในแป้งข้าว ก่อให้เกิดโครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ลิปิดขึ้นได้ (Eliasson, 1994) จึงพบว่าในทุกตัวอย่างมีพีคการสลายโครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อน แอมิโลส-ลิปิดขึ้น และเมื่อทำการตรวจสอบตัวอย่างซ้ำ (rescan) (ภาคผนวก ค5) พบว่ามีพีคปรากฏในช่วงอุณหภูมิเดิม จึงยืนยันได้ว่าเป็นพีคการสลาย

สารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ลิปิดจริง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างสารประกอบนี้มีการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับได้ (Eliasson and Wahlgren, 2004; Nebesny *et al.*, 2005)

Liu *et al.* (2006) ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของธัญพืช ธัญชาติ และพืชหัวชนิดต่าง ๆ พบว่าข้าวเกิดแอมิโลเพกตินรีโทรเกรดได้ดี และมีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและลิปิดขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียสนาน 2 สัปดาห์ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ลิปิดมีอิทธิพลต่อการเกิดรีโทรเกรดชันของแอมิโลเพกติน โดยอุณหภูมิสิ้นสุด และเอนทัลปีของการสลายแอมิโลเพกตินรีโทรเกรด มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ลิปิด เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ลิปิดนั้นเป็นแม่แบบ (template) กับการเกิดนิวเคลียสของแอมิโลเพกติน และมีส่วนเพิ่มความเสถียรให้แก่นิวเคลียสของแอมิโลเพกติน (Vanderputte, 2004) อย่างไรก็ตามมีผู้ให้ความเห็นว่าสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ลิปิดที่เกิดขึ้นนี้ มีส่วนในการชะลอการเกิดรีโทรเกรดชัน (Casiraghi *et al.*, 1993; Gudmundsson, 1994) แต่ในงานวิจัยนี้อิทธิพลของสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ลิปิดต่อแอมิโลเพกตินรีโทรเกรดพบได้ไม่ชัดเจน

คันสนีย์ (2548) พบว่าเจลข้าวเหลือง 11 ที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรดชันของแอมิโลเพกตินมากตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา และการเก็บรักษาเจลไว้ที่ 25 องศาเซลเซียสมีค่าเอนทัลปีของการสลายโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกตินน้อยกว่าการเก็บที่ 4 องศาเซลเซียส แต่เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น พบว่าค่าเอนทัลปีของทั้งสองอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าเอนทัลปี เมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นนั้น Vanderputte *et al.* (2003) ให้ความเห็นว่าอาจเกิดเนื่องมาจากขั้นตอนการเชื่อมต่อโมเลกุลเกิดได้ดีที่อุณหภูมิห้องนั่นเอง

เมื่อค่าเอนทัลปีของการหลอมละลายของแอมิโลเพกตินรีโทรเกรดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราเร็วการย่อยด้วยเอนไซม์ลดลง (Sievert *et al.*, 1991; Chung *et al.*, 2006) จากผลการทดลองพบว่าร้อยละน้ำตาลรีดิวซ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) จาก 7.11 เหลือ 6.67 เมื่อบ่มแผ่นแป้งที่ 0 องศาเซลเซียสนาน 3 และ 12 ชั่วโมงตามลำดับ เปรียบเทียบกับตัวอย่างสดที่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 7.14 แม้ว่าเอนทัลปีของการสลายโครงสร้างผลึกเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ ( $p \geq 0.05$ ) ส่วนการบ่มแผ่นแป้งที่ 30 องศาเซลเซียสนั้นไม่ส่งผลกับความไวต่อเอนไซม์แอมิโลส สอดคล้องกับค่าเอนทัลปีของตัวอย่างสด และตัวอย่างบ่มที่ 30 องศาเซลเซียสนาน 12 ชั่วโมงที่ไม่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายรีโทรเกรดแอมิโลเพกติน พบว่ามีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ใช้บ่มเอนไซม์ จึงอาจมีโครงสร้างบางส่วนหลอมเหลวได้ในระหว่างการย่อยด้วยเอนไซม์ (Chung *et al.*, 2006) มีผลให้ค่าความไวต่อเอนไซม์เพิ่มขึ้นในระหว่างการบ่ม

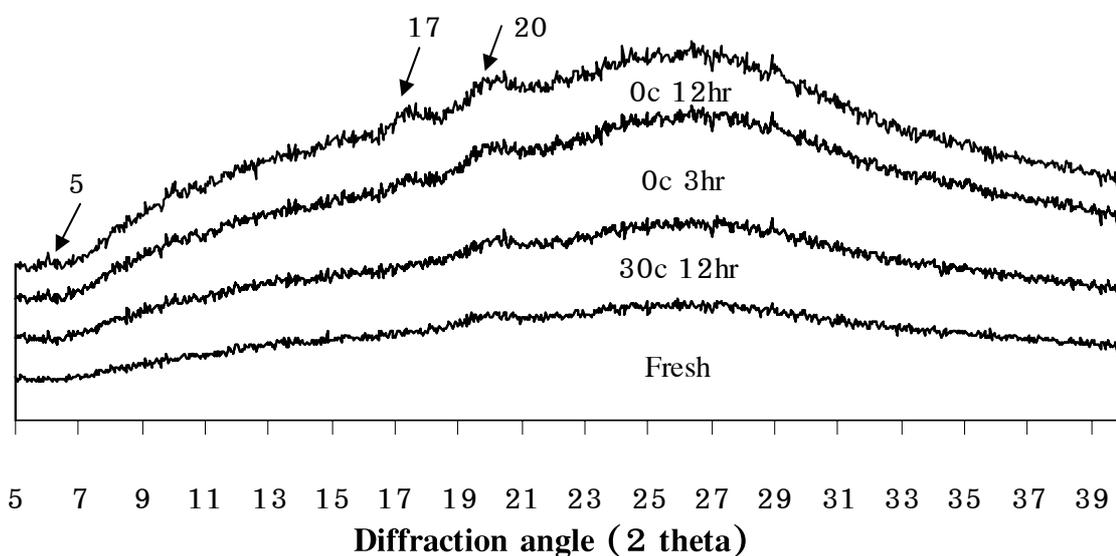
นอกจากนี้พบว่า การเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งของแผ่นแป้งมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน คือ แผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสมีการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งมากกว่าการบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส แต่ความแน่นแข็งของแผ่นแป้งบ่มนาน 3 และ 12 ชั่วโมงที่ 0 องศาเซลเซียสไม่แตกต่างกันเช่นเดียวกับค่าเอนทัลปีของการสลายแอมิโลเพกตินรีโทรเกรดซึ่งพบว่า การบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสมีการเกิดรีโทรเกรดมากกว่าที่ 30 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการบ่มไม่มีผลต่อค่ารีโทรเกรดเอนทัลปี แต่อธิพลของสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ลิปิดต่อการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งนั้นไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตาม Conde-Petit and Escher (1994) พบว่าการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ลิปิดอาจมีส่วนช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงของเจลได้

#### 2.4 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึก

การติดตามการเกิดรีโทรเกรดขึ้นในระหว่างการบ่มแผ่นแป้งสามารถทำได้โดยการศึกษากการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกของแผ่นแป้ง เนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโพลิเมอร์ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะความเป็นผลึกของแผ่นแป้ง นอกจากนี้การเกิดการพันเกลียวของสายโพลิเมอร์ยังเพิ่มความเป็นผลึกของแผ่นแป้งได้ การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของแผ่นแป้งและผงแผ่นแป้งบ่มที่อุณหภูมิ และระยะเวลาต่าง ๆ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction) โดยแสดงผลเป็นค่าความเป็นผลึกสัมพัทธ์ (relative crystallinity) จากสัดส่วนของพื้นที่บริเวณใต้พีคส่วนบนต่อพื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัมที่วัดได้

การเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกในแผ่นแป้งสด และบ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 15 พบว่าแผ่นแป้งทุกตัวอย่างเกิดพีคที่ 20 องศา 2 theta ซึ่งเป็นพีคแสดงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ลิปิด (Vermeulen *et al.*, 2004) โดยแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสปรากฏพีคชัดเจนที่สุด รองลงมาคือแผ่นแป้งบ่มตามวิธีดั้งเดิม และแผ่นแป้งสดปรากฏพีคชัดเจนน้อยที่สุด แผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสเกิดพีคที่ 5 และ 17 องศา 2 theta ซึ่งแสดงถึงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แบบบี อันเป็นผลมาจากแอมิโลเพกตินรีโทรเกรด (Clark, 1994) ผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC คือ แผ่นแป้งสด และแผ่นแป้งบ่มตามวิธีดั้งเดิมเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ลิปิดเพียงอย่างเดียว แต่แผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสเกิดรีโทรเกรดแอมิโลเพกตินร่วมด้วย แต่อย่างไรก็ตาม Cheetham and Tao (1998) พบว่าการเกิดแอมิโลสรีโทรเกรดก่อให้เกิดพีคที่ 17 องศา 2 theta ได้เช่นกัน

ลักษณะสเปกตรัมที่เกิดขึ้นมีลักษณะกว้าง (broad) ทำให้ยากต่อการคำนวณความเป็นผลึก เช่นเดียวกับ Jouppila et al. (1998) ซึ่งพบว่าพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในตัวอย่างที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำมีลักษณะแบน และกว้างทำให้ยากต่อการคำนวณความเป็นผลึก



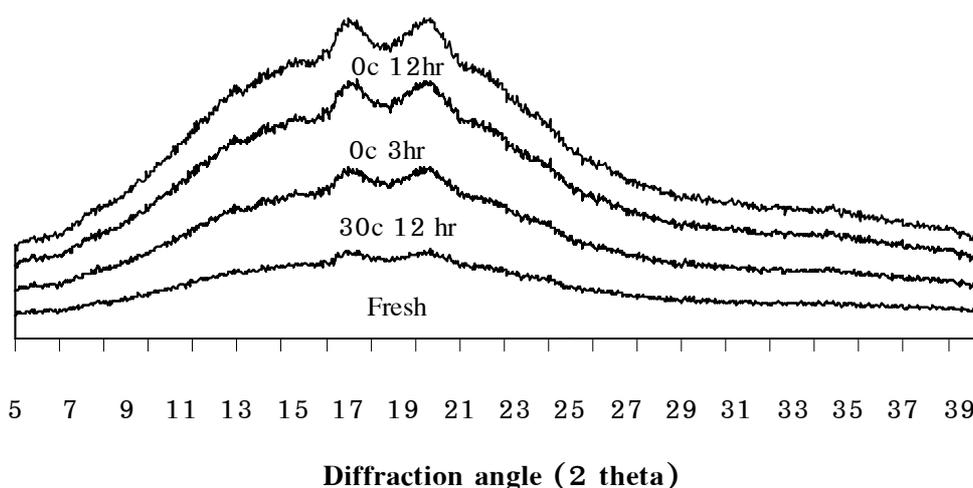
ภาพที่ 15 ความเป็นผลึกของแผ่นแป้งบ่มที่อุณหภูมิต่างและระยะเวลาต่าง ๆ

แผ่นแป้งบ่มมีค่าความเป็นผลึกมากกว่าแผ่นแป้งสด ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าแผ่นแป้งบ่มตามวิธีดั้งเดิมมีค่าความเป็นผลึกมากกว่าแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง แม้ว่าไม่ปรากฏแอมัลโฟเฟกตินรีโทรเกรด และมีความไวต่อเอนไซม์สูงกว่าแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส แสดงว่าความแตกต่างในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในตัวอย่างมีผลต่อความไวต่อเอนไซม์เพียงเล็กน้อย (Gerard et al., 2001) อย่างไรก็ตามค่าความเป็นผลึกของแผ่นแป้งบ่มตามวิธีดั้งเดิมมีค่าน้อยกว่าแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับความไวต่อเอนไซม์ เมื่อพิจารณาความสอดคล้องระหว่างค่าความแน่นแข็ง และค่าความเป็นผลึก พบว่าแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสมีความเป็นผลึก และความแน่นแข็งมากกว่าแผ่นแป้งสด แต่แผ่นแป้งบ่มตามวิธีดั้งเดิมมีความแน่นแข็งใกล้เคียงกับแผ่นแป้งสด แม้ว่าค่าความเป็นผลึกจะมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมงมีความแน่นแข็งมากกว่าแผ่นแป้งบ่มตามวิธีดั้งเดิม แม้ว่าจะมีค่าความเป็นผลึกน้อยกว่า จึงอาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์ แต่ไม่สอดคล้องกับสมบัติทางความร้อนและความแน่นแข็ง แม้ว่า P'anson et al. (1990) พบว่าความแน่นแข็งมีการเปลี่ยนแปลงไปในแนวทางเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึก

ตารางที่ 3 ความเป็นผลึกสัมพันธ์ของแผ่นแป้ง และผงแผ่นแป้งบ่มที่อุณหภูมิ และระยะเวลาต่าง ๆ

| ตัวอย่าง                   | ร้อยละความเป็นผลึกสัมพันธ์ |            |
|----------------------------|----------------------------|------------|
|                            | แผ่นแป้ง                   | ผงแผ่นแป้ง |
| สด (ไม่บ่ม)                | 1.59                       | 3.30       |
| 30 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง | 3.21                       | 4.10       |
| 0 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง   | 2.56                       | 4.05       |
| 0 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง  | 3.93                       | 5.15       |

การเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกของผงแผ่นแป้ง ซึ่งผ่านการขจัดน้ำด้วยวิธีทำแห้งแบบเยือกแข็ง ความชื้นประมาณร้อยละ 12 เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของปริมาณน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึก ดังแสดงในภาพที่ 16 และตารางที่ 3 พบว่าความเป็นผลึกของผงแผ่นแป้งสดมีค่าน้อยกว่าผงแผ่นแป้งที่ผ่านการบ่ม โดยผงแผ่นแป้งบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง มีความเป็นผลึกมากกว่าผงแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง แต่พบว่าความเป็นผลึกของผงแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมงมีค่ามากที่สุด และผงแผ่นแป้งทุกตัวอย่างมีลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แบบบี (B-type pattern) โดยมีแบบวี (V-type pattern) ร่วมด้วย โดยเกิดพีคที่ 17 และ 20 องศา 2 theta แต่ไม่ปรากฏพีคที่ 5 องศา 2 theta แสดงว่าเกิดรีโททรอเมอร์ตีสตาร์ช ร่วมกับการจับกันระหว่างแอมิโลสและลิปิดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้น เมื่อนำผงแผ่นแป้งทั้ง 4 ตัวอย่างมาทดสอบด้วยเครื่อง DSC พบว่าเกิดพีคการสลายโครงสร้างแอมิโลเพกตินรีโททรอเมอร์ตีสตาร์ช (ภาคผนวก ค6)



ภาพที่ 16 ความเป็นผลึกของผงแผ่นแป้งบ่มที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ

ความเป็นผลึกสัมพัทธ์ของแผ่นแข็งมีค่าน้อยกว่าผงแผ่นแข็ง (ตารางที่ 3) เนื่องจากผงแผ่นแข็งผ่านการทำแห้ง ซึ่งเป็นการเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันทางหนึ่ง จึงเป็นผลให้ผงแผ่นแข็งมีความเป็นผลึกมากกว่าแผ่นแข็ง แสดงว่าปริมาณน้ำมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jang and Pyun (1997) และ Sun *et al.* (2002) ซึ่งระบุว่าปริมาณน้ำมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน

การทดลองนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกของตัวอย่างสดที่ไม่ผ่านการขจัดน้ำ ซึ่งที่ผ่านมาไม่มีผู้ใดทดสอบตัวอย่างสดมาก่อน และจากการทดสอบพบว่าความเป็นผลึกของแผ่นแข็ง และผงแผ่นแข็งมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกของแผ่นแข็งไม่จำเป็นต้องขจัดน้ำ ซึ่งสะดวกในการเตรียมตัวอย่าง และทำให้ได้ผลการทดลองที่มีความถูกต้องมากกว่า เนื่องจากไม่ต้องผ่านขั้นตอนการทำแห้งแบบเยือกแข็ง ซึ่งอาจทำให้เกิดความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นได้ อย่างไรก็ตามการใช้แผ่นแข็งมาวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยตรงนั้น ควรใช้แผ่นแข็งที่มีความชื้นใกล้เคียงกัน

Chung *et al.* (2003) พบว่าความเป็นผลึกของผงเจลสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งและละลายแล้ว (freeze-thawed) เพิ่มขึ้น ลักษณะของการเลี้ยวเบนแบบบีผสมวี โดยมีพีคเกิดขึ้นที่ 17 20 23-25 องศา 2 theta ซึ่งเป็นการแสดงถึงการเกิดรีโทรเกรด และ Eerlingen *et al.* (1994) พบว่าโครงสร้างผลึกแบบบีเกิดได้เพิ่มขึ้นเมื่อทำการเก็บรักษาเจลสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวไว้ที่ 40 องศาเซลเซียส

Longton and LeGrys (1981) พบว่าเมื่อเก็บรักษาเจลสตาร์ชข้าวสาลีไว้ที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์ เช่นเดียวกับ Zeleznak and Hosney (1987) ระบุว่าโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นในเจลสตาร์ชข้าวสาลีเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิสูงมีความสมบูรณ์ เนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ และพบว่าอุณหภูมิการสลายโครงสร้างผลึกเกิดในช่วงที่แคบ และ Elfstrand *et al.* (2004) พบว่าการเก็บเจลสตาร์ชที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียสมีผลต่อปริมาณความเป็นผลึก ในขณะที่อุณหภูมิการเก็บรักษาที่ 37 องศาเซลเซียสมีผลให้เกิดโครงสร้างผลึกที่มีความเสถียร นอกจากนี้ Eerlingen and Delcour (1995) พบว่าสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ที่เกิดขึ้นเมื่อเก็บสตาร์ชสุกไว้ที่ 100 องศาเซลเซียสมีลักษณะการกระเจิงรังสีเอกซ์แบบเอ แต่เมื่ออุณหภูมิการเก็บอยู่ที่ 0 และ 68 องศาเซลเซียส มีลักษณะการกระเจิงแบบบี ทั้งนี้เนื่องมาจากอัตราการเพิ่มความเป็ผลึกในตัวอย่างขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิการเก็บรักษา และอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน เมื่อความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทั้งสองน้อย พบว่าผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก และมีความสมบูรณ์น้อยกว่าผลึกที่เกิดขึ้นในสภาวะความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิการเก็บรักษา และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันสูง เมื่อวิเคราะห์ด้วย

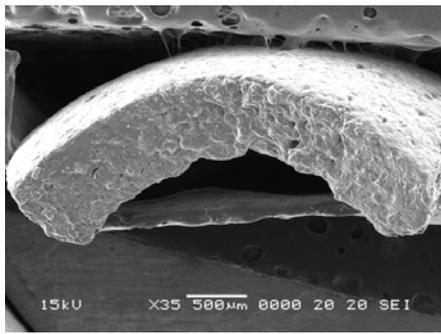
เครื่อง DSC พบว่ามีค่าอุณหภูมิการสลายโครงสร้างผลึกต่ำ เนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดขึ้นได้น้อยกว่า (Juoppila and Roos, 1997)

แม้ว่า Kim *et al.* (1997) ระบุว่าการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกมีความไว (sensitivity) ในการติดตามการเกิดรีโทรเกรดชันน้อยกว่าวิธีทางเอนไซม์ แต่ในงานวิจัยนี้พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกสามารถบอกถึงแนวโน้มกระบวนการที่เกิดขึ้นในแผ่นแป้งได้

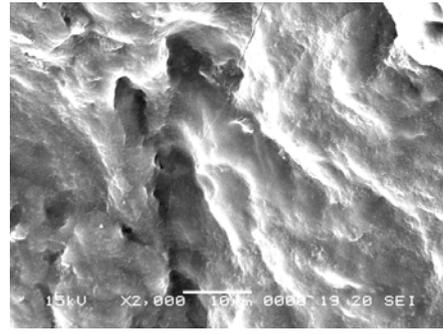
## 2.5 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อลักษณะโครงสร้างรอยตัดของแผ่นแป้ง

การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างรอยตัดของแผ่นแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electromicroscope) ที่กำลังขยายต่าง ๆ พบว่าแผ่นแป้งสด มีลักษณะโครงสร้างรอยตัดขรุขระมากที่สุด เมื่อวิเคราะห์ด้วยกำลังขยาย 35 เท่า (ภาพที่ 17 ก1) และแผ่นแป้งบ่มมีลักษณะโครงสร้างรอยตัดที่มีความเรียบมากขึ้น ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเนื่องมาจากการที่สายโซ่แอมิโลสเกิดการจับตัวกันแน่น (aggregate) ขึ้นจากกระบวนการรีโทรเกรดชัน (Lee *et al.*, 2002) โดยเฉพาะแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมงมีลักษณะโครงสร้างรอยตัดที่มีความเรียบมากที่สุด (ภาพที่ 17 ง1) แผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง และแผ่นแป้งบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง มีลักษณะโครงสร้างรอยตัดเรียบรองลงมาเป็นลำดับ (ภาพที่ 17 ค1 และ ข1)

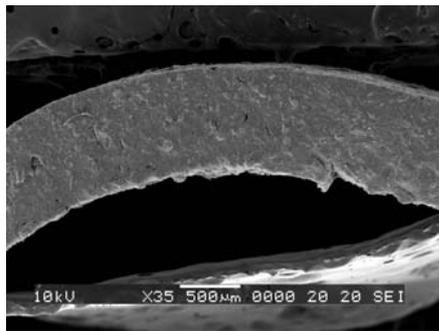
เมื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างรอยตัดที่กำลังขยาย 2000 เท่า พบว่าแผ่นแป้งบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมงมีลักษณะโครงสร้างเรียบ ไม่มีรูพรุน (ภาพที่ 17 ข2) ซึ่งคล้ายคลึงกับลักษณะโครงสร้างแผ่นแป้งสด (ภาพที่ 17 ก2) แต่ลักษณะโครงสร้างของแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง พบว่าโครงสร้างมีความหยาบ และปรากฏตุ่มเล็ก ๆ แทรกอยู่ในเนื้อ รวมถึงมีรูพรุนแทรกอยู่ในเนื้อเจลจำนวนมาก (ภาพที่ 17 ค2) และพบว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเมื่อบ่มแผ่นแป้งที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง (ภาพที่ 17 ง2) รูพรุนที่เกิดขึ้นนี้ อาจเป็นช่องว่างที่มีหยดน้ำที่แยกตัวออก (syneresis) แล้วแทรกอยู่ในเนื้อเจล โดย Czuzhajowska *et al.* (1998) ได้รายงานไว้ว่าเจลสตาร์ชมีการสูญเสียความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส มากเป็น 4 เท่าของเจลที่เก็บรักษาไว้ที่ 22 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่อง มาจากรีโทรเกรดชันเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้เกิดการแยกน้ำได้มากกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง และเมื่อทำการไล่น้ำด้วยเอทานอลความเข้มข้นต่าง ๆ จึงเกิดเป็นช่องว่างแทรกกระจายอยู่ในเนื้อเจลดังที่แสดงในภาพ



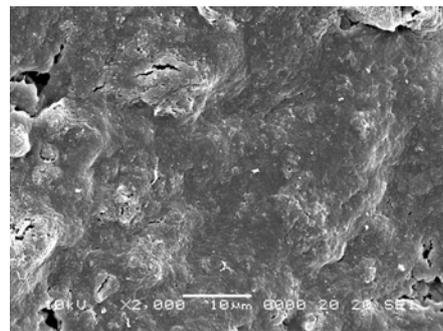
ก1.



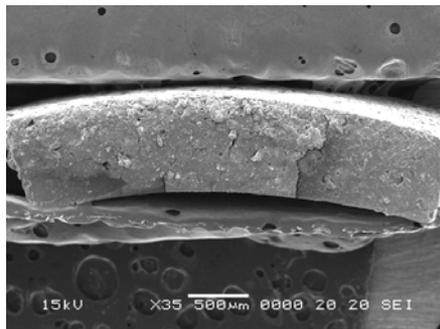
ก2.



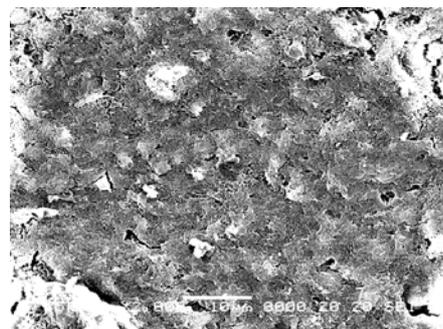
ข1.



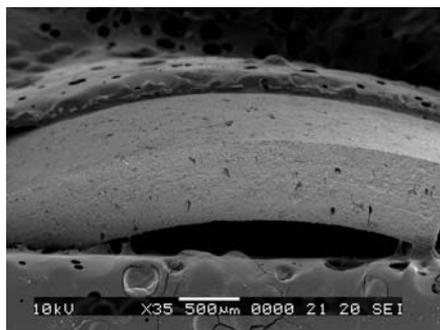
ข2.



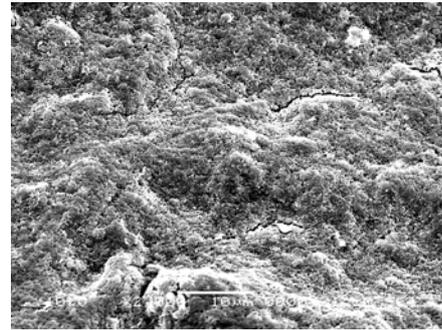
ค1.



ค2.

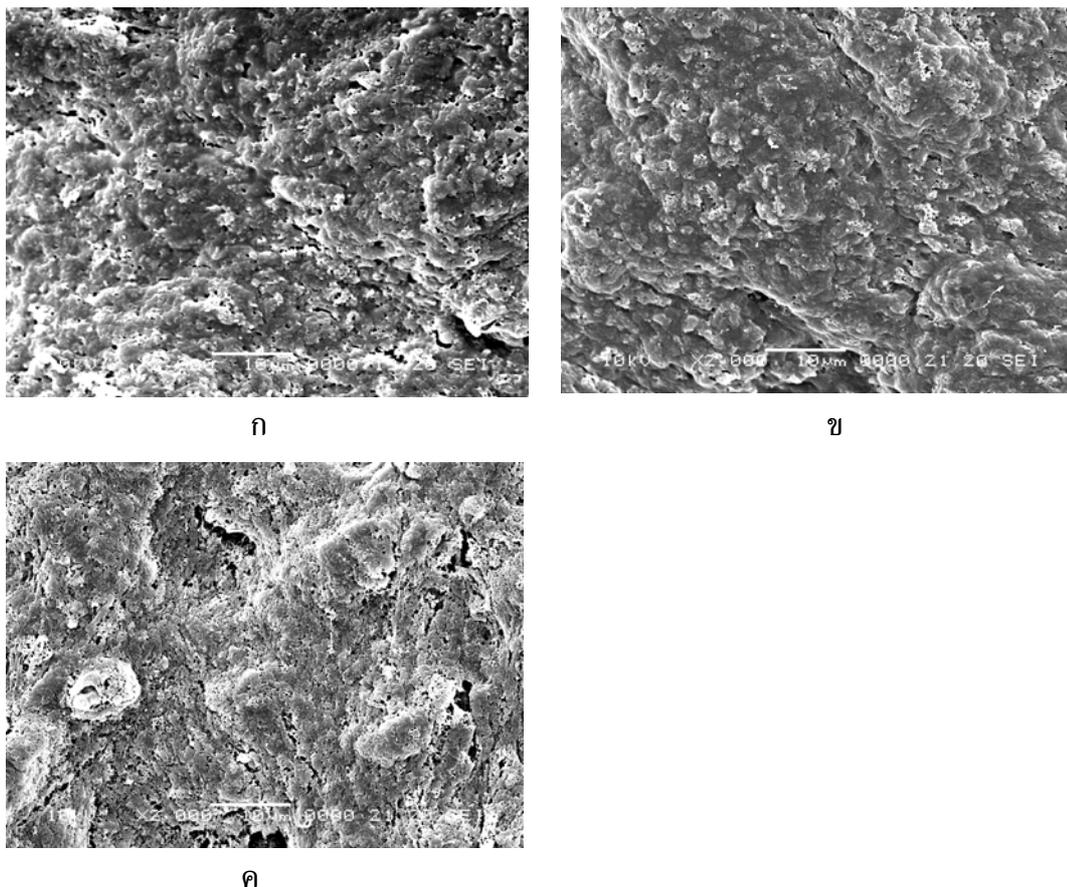


ง1.



ง2.

ภาพที่ 17 ลักษณะโครงสร้างรอยตัดของแผ่นแป้ง (1) กำลังขยาย 35 เท่า (2) กำลังขยาย 2000 เท่า (ก) แผ่นแป้งสด (ข) แผ่นแป้งบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง (ค) แผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง (ง) แผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง



ภาพที่ 18 ลักษณะโครงสร้างภายใน (ก) แผ่นแป้งสด (ข) แผ่นแป้งบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง (ค) แผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง กำลังขยาย 2000 เท่า

เมื่อนำแผ่นแป้งสดมาฉีกเพื่อให้เห็นโครงสร้างภายใน พบว่ามีเม็ดเล็ก ๆ แทรกอยู่ในเนื้อเจล (ภาพที่ 18ก) ซึ่งอาจเกิดมาจากเม็ดสตาร์ชที่ยังไม่สุกอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากกระบวนการผลิตก๋วยเตี๋ยวมีขั้นตอนการให้ความร้อนด้วยการนึ่งไอน้ำเพียง 3 นาที จึงอาจทำให้เม็ดสตาร์ชบางส่วนยังไม่ถูกทำลาย และเม็ดสตาร์ชเหล่านี้อาจปรากฏเป็นตุ่มเล็ก ๆ จำนวนมากในโครงสร้างรอยตัด เมื่อตรวจสอบโครงสร้างภายในของแผ่นแป้งบ่มที่ 30 และ 0 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 18 ข และ ค) พบว่าตุ่มเล็ก ๆ ดังกล่าวปรากฏอยู่ในเนื้อเจลเช่นเดียวกัน

Lu et al. (1997) ศึกษาลักษณะโครงสร้างเนื้อเจลแอมิโลสที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าโครงสร้างเจลที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสมีความหยابมากกว่าโครงสร้างเจลที่เก็บไว้ที่ 15 และ 25 องศาเซลเซียส โดยปรากฏตุ่มเล็ก ๆ (nodules) ซึ่งเกิดจากโครงสร้างผลึกสายสั้น ๆ มาจับรวมกัน เจลที่เก็บรักษาไว้ที่ 15 และ 25 องศาเซลเซียสมีโครงสร้างที่สมบูรณ์มากขึ้น โดยเกิดเป็นร่างแห เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นไปอย่างช้า ๆ ส่วนเจลที่เก็บรักษาไว้ที่ 35 และ 45 องศาเซลเซียสมีโครงสร้างคล้ายเส้นใย จากการจับตัวกันของโมเลกุล

แอมิโลสตกตะกอนอยู่ Kasemsuwan *et al.* (1998) ระบุว่าโครงสร้างรอยตัดขวาง (cross section) ของเส้นเส้นมันสำปะหลังผสมนั้นปรากฏโครงสร้างร่างแหอันเนื่องมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันและพบว่าลักษณะเจลมีความคล้ายคลึงกับโครงสร้างเจลที่เก็บรักษาไว้ที่ 5 องศาเซลเซียสซึ่ง Lu *et al.* (1997) ตรวจสอบได้ ในงานวิจัยนี้พบว่าตัวอย่างแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส ปรากฏตุ่มเล็ก ๆ ในโครงสร้างรอยตัดเช่นเดียวกัน ทั้งนี้อาจเกิดจากแอมิโลสเกิดการจับตัวกันเป็นกระจุกนั่นเอง

## 2.6 กลไกการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มแผ่นแป้ง

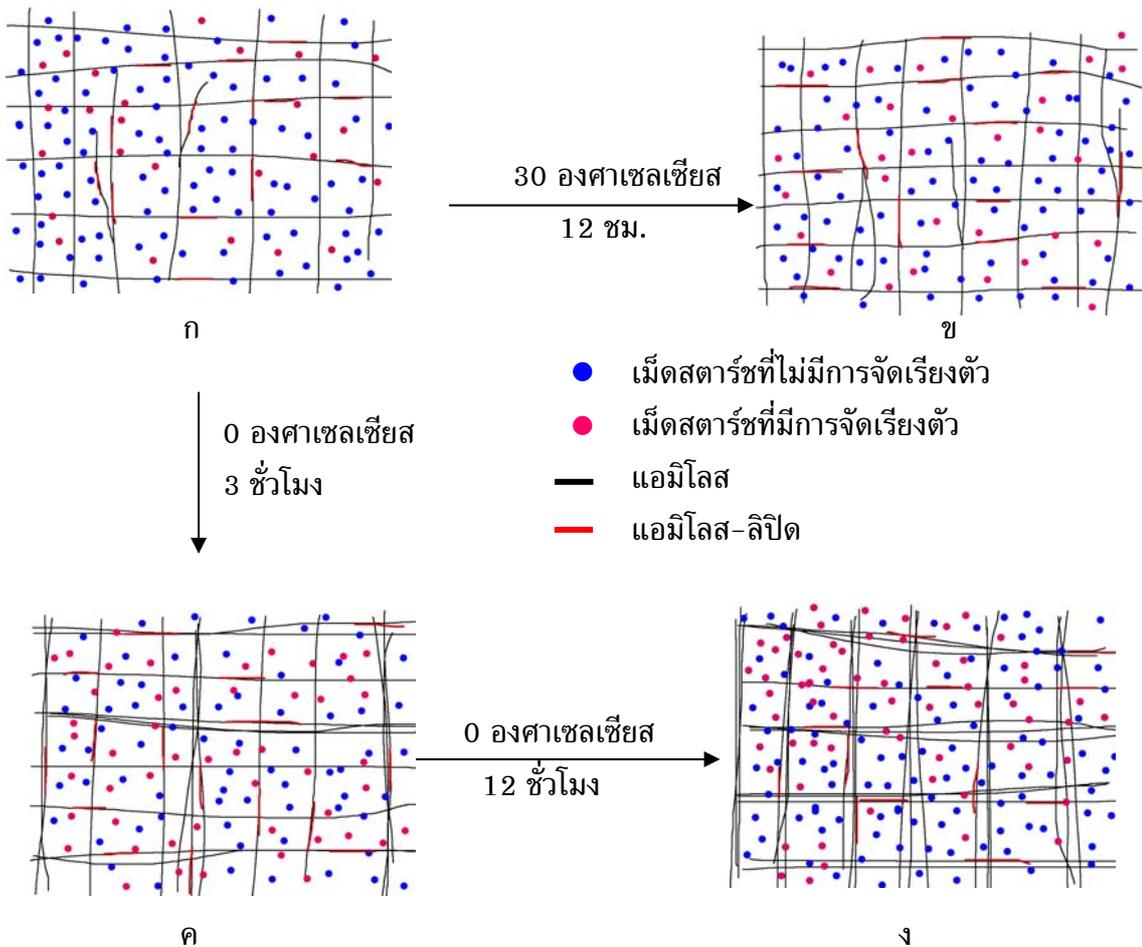
การเปลี่ยนแปลงแผ่นแป้งระหว่างการบ่ม อาจมีกลไกการเกิดขึ้นดังนี้ ในแผ่นแป้งสดที่ไม่ผ่านการบ่ม แสดงในภาพที่ 19ก พบว่าเกิดโครงสร้างร่างแหของแอมิโลส อันเนื่องมาจากการเกิดจุดเชื่อมต่อกายภาพ (physical junction zone) (Klucinec and Thompson, 2002) ดังผลการเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์ ซึ่งปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นมีค่าต่ำ อันแสดงถึงโครงสร้างที่เกิดขึ้นในแผ่นแป้งกีดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ และมีเม็ดสตาร์ชบางส่วนที่คงเหลือจากการนึ่งแทรกตัวอยู่ในร่างแหแอมิโลสที่กระจายตัวออกมานอกเม็ดสตาร์ชจากการเจลาติไนซ์ (Miles *et al.*, 1985) ดังผลการตรวจสอบโครงสร้างภายในแผ่นแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และมีแอมิโลสบางส่วนที่ยังติดอยู่กับเม็ดสตาร์ช (Vasanthan and Bhatt, 1998) โดยเม็ดสตาร์ชที่ยังมีความเป็นผลึกอยู่มีส่วนช่วยค้ำจุนให้โครงสร้างร่างแหมีความแข็งแรงขึ้น (Fernandez *et al.*, 1999) นอกจากนี้อาจมีสารประกอบแอมิโลส-ลิปิดเกิดขึ้น ดังผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนตารางที่ 2

หลังการบ่มแบบวิธีดั้งเดิม แสดงในภาพที่ 19ข พบว่าโครงสร้างร่างแหมีความเป็นระเบียบมากขึ้นเป็นผลให้โครงสร้างรอยตัดมีความเรียบ และความเป็นผลึกมากขึ้น รวมถึงมีความไวต่อเอนไซม์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างรอยตัดของแผ่นแป้งสด และมีการจัดเรียงตัวในเม็ดสตาร์ชเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน พบว่าการบ่มตามวิธีดั้งเดิมนั้นไม่เกิดรีโทรเกรดแอมิโลเพกติน ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ที่ติดอยู่ในเม็ดสตาร์ช แต่ Vasanthan and Bhatt (1998) พบว่าแอมิโลสที่ยังติดอยู่กับเม็ดสตาร์ชไม่มีการเกิดรีโทรเกรเดชัน

ส่วนการบ่มแผ่นแป้งที่ 0 องศาเซลเซียส ส่งผลให้โครงสร้างร่างแหมีความเป็นระเบียบมากขึ้น โครงสร้างแผ่นแป้งบ่มนาน 3 ชั่วโมง (ภาพที่ 19ค) มีความคล้ายคลึงกับแผ่นแป้งบ่มตามวิธีดั้งเดิม ยืนยันได้จากความไวต่อเอนไซม์ที่พบว่ามีความไวต่อเอนไซม์ใกล้เคียงกับแผ่นแป้งบ่มตามวิธีดั้งเดิม แต่มีความเป็นระเบียบมากกว่าเป็นผลให้โครงสร้างรอยตัดมีความเป็นระเบียบมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นแป้งสด และแผ่นแป้งบ่มตามวิธีดั้งเดิม นอกจากนี้มี

การจับตัวกันเป็นกระจุกของโพลีเมอร์ เกิดเป็นโครงสร้างตุ่มเล็ก ๆ แทรกกระจายอยู่ในโครงสร้างร่างแห แต่มีการจัดเรียงตัวกันของโมเลกุลที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชที่แทรกอยู่ในโครงร่างแหซึ่งเกิดได้รวดเร็ว เนื่องจากโมเลกุลอยู่ใกล้ชิดกันมากกว่าโมเลกุลที่กระจายอยู่ภายนอกเม็ดสตาร์ช (Chatakanonda *et al.*, 2000) ดังผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนซึ่งพบว่าการบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสเกิดแอมิโลเพกตินรีโทรเกรด นอกจากนี้ค่าความเป็นผลึกของแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส เพียง 3 ชั่วโมงมีค่าความเป็นผลึกใกล้เคียงกับแผ่นแป้งบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส และการจัดเรียงตัวที่เกิดขึ้นในเม็ดสตาร์ชนั้น อาจเป็นการจับกันระหว่างโพลีเมอร์ชนิดเดียวกัน หรือต่างกันได้ (Miles *et al.*, 1985; Klucinec and Thompson, 1999; Klucinec and Thompson, 2002) โดยการจัดเรียงตัวภายในเม็ดสตาร์ช มีผลให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น (Miles *et al.*, 1985) และโครงสร้างร่างแหมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งยืนยันด้วยผลความแน่นแข็งจากการวัดเนื้อสัมผัสพบว่าแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสมีความแน่นแข็งมาก และการตรวจสอบสมบัติทางความร้อน พบรีโทรเกรดแอมิโลเพกตินพีค ซึ่งแสดงว่ามีการจัดเรียงตัวใหม่ของแอมิโลเพกตินซึ่งเป็นโพลีเมอร์ที่คงเหลืออยู่ภายในเม็ดสตาร์ช

แผ่นแป้งบ่มนาน 12 ชั่วโมงที่ 0 องศาเซลเซียสมีโครงสร้างร่างแหที่แข็งแรง และมีความเป็นระเบียบมากที่สุด ดังภาพที่ 19ง ส่งผลให้โครงสร้างรอยตัดมีความเรียบมากที่สุด มีความเป็นผลึก และความแน่นแข็งมากกว่าแผ่นแป้งบ่มที่อุณหภูมิอื่น ๆ รวมถึงความไวต่อเอนไซม์ต่ำกว่าการบ่มที่อุณหภูมิอื่น ๆ



ภาพที่ 19 กลไกการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแผ่นแป้งที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ

### 3. การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการตัดแผ่นแป้ง

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดรีโทรเกรดชันของแผ่นแป้ง พบว่าการบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสเร่งการเกิดรีโทรเกรดชันได้มากที่สุด ดังผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน และค่าความแน่นแข็งของแผ่นแป้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อบ่มนาน 1.5 ชั่วโมง และค่าความแน่นแข็งเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น จึงได้เลือกอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ใช้ทดลองย่นระยะเวลาการบ่มแผ่นแป้ง และศึกษาผลของการย่นระยะเวลาการบ่มต่อการตัดเส้นก๋วยเตี๋ยว เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ทำการบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะที่ใช้ในการบ่มแผ่นแป้งในกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวจันทน์โดยทั่วไป โดยใช้การตัดเส้นเป็นดัชนี โดยพิจารณาจากลักษณะเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ตัดได้ แต่ในการทดลองนี้ได้ทำการบ่มแผ่นแป้งในเดซิกเคเตอร์บรรจุสารละลายอิมิตัวของโซเดียมโบรไมด์ เพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในแผ่นแป้ง

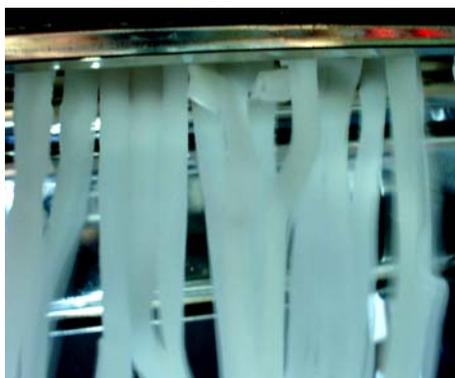
แผ่นแป้งสดมีความนิ่มและเหนียวติดใบมีด จึงไม่สามารถตัดเป็นเส้นได้ เนื่องจากแต่ละเส้นไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ดังภาพที่ 20 ก ส่วนแผ่นแป้งบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง สามารถตัดเป็นเส้นได้ แต่พบว่าบางเส้นมีการติดกัน และเส้นมีความนิ่มจึงทำให้เกิดการขาดได้ในระหว่างการตัด (ภาพที่ 20 ข) ซึ่งพบว่ามีความแตกต่างจากในกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวจันทน์ทั่วไป ทั้งนี้เพราะการผลิตโดยทั่วไปมีการสูญเสียความชื้นในระหว่างการบ่มแผ่นแป้ง ทำให้แผ่นแป้งมีความแน่นแข็งมากขึ้น จึงตัดได้ง่าย และไม่ขาดในระหว่างตัด แผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 1.5 ชั่วโมง เมื่อตัดเป็นเส้นแล้วพบว่าเส้นยังคงติดกัน และมีบางส่วนติดใบมีดของเครื่องตัด (ภาพที่ 20 ค) แผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง เมื่อตัดเป็นเส้น พบว่าเส้นแต่ละเส้นแยกตัวออกจากกัน โดยไม่ติด และขาดในระหว่างการตัด (ภาพที่ 20 ง)



ก.



ข.



ค.



ง.

รูปที่ 20 การตัดแผ่นแป้งบ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเส้นก๋วยเตี๋ยวด้วยเครื่องตัดเส้น (ก) คือ แผ่นแป้งสด (ไม่ผ่านการบ่ม) (ข) แผ่นแป้งบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง (ค) แผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 1.5 ชั่วโมง (ง) แผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง

มีรายงานถึงการใช้อุณหภูมิต่ำในการย่นระยะเวลาการบ่มแผ่นแปงกายเดี่ยวจันทน์จากห้องปฏิบัติการนี้ โดยพบว่าสามารถลดระยะเวลาการบ่มเหลือ 6-7 ชั่วโมง เมื่อทำการบ่มแผ่นแปงกายเดี่ยวจันทน์ในตู้เย็นอุณหภูมิต่ำ 1-4 องศาเซลเซียส (กมลวรรณ, 2548; ดวงแก้ว, 2547)

#### 4. สมบัติของเส้นก้วยเดี่ยวจันทน์ที่ผ่านการย่นระยะเวลาการบ่ม และการบ่มแบบดั้งเดิม

##### 4.1 สมบัติด้านเนื้อสัมผัส

เมื่อนำเส้นก้วยเดี่ยวจันทน์มาวัดลักษณะทางเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสโดยใช้การดึงหัววัดเส้นสปาเกตตีออกจากกัน เพื่อตรวจสอบค่าแรงสูงสุดในการดึงขาด แสดงถึงความแข็งแรงของเส้นก้วยเดี่ยว และระยะทางดึงขาดแสดงถึงความยืดหยุ่น (extensibility) ของเส้นก้วยเดี่ยว (Smewing, 1997) พบว่าค่าแรงสูงสุดในการดึงขาดของตัวอย่างที่ผ่านการบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง และตัวอย่างบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p>0.05$ ) แต่พบว่าระยะทางดึงขาดของตัวอย่างบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสมีค่ามากกว่าการบ่มที่ 30 องศาเซลเซียสอย่างมีนัยสำคัญ ( $p\leq 0.05$ ) ซึ่งแสดงว่าเส้นก้วยเดี่ยวบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสในสภาวะการทดลองมีความยืดหยุ่นมากกว่าการบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าแรงสูงสุด และระยะทางดึงขาดของเส้นก้วยเดี่ยวบ่มที่ 30 และ 0 องศาเซลเซียส

| ตัวอย่าง                   | ค่าแรงสูงสุด (กรัม) | ระยะทางดึงขาด (มิลลิเมตร) |
|----------------------------|---------------------|---------------------------|
| 30 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง | 26.01a ± 5.45       | 15.20a ± 2.48             |
| 0 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง   | 26.81a ± 4.34       | 19.13b ± 2.75             |

หมายเหตุ \* ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 7 ซ้ำ จาก 2 ตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

\* ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p>0.05$ )

การวัดเนื้อสัมผัสด้วยการกด โดยการใช้หัววัดแบบโอบีตพลาสติก โดยค่าแรงสูงสุดบอกถึงค่าความแน่นแข็ง (hardness) และพื้นที่ใต้กราฟบอกถึงความแน่นเนื้อ (firmness) (Smewing, 1997) พบว่าค่าแรงสูงสุดในการตัดเส้นก้วยเดี่ยวที่ผ่านการบ่มทั้งสองวิธีไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p>0.05$ ) แต่พบว่าพื้นที่ใต้กราฟการตัดเส้นก้วยเดี่ยวบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสมีค่ามากกว่าพื้นที่ใต้กราฟการตัดเส้นก้วยเดี่ยวบ่มที่ 30 องศาเซลเซียสอย่างมีนัยสำคัญ ( $p\leq 0.05$ ) แสดงว่าเส้นก้วยเดี่ยวบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสมีความแน่นเนื้อมากกว่าเส้นก้วยเดี่ยวบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส ในสภาวะการทดลอง ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าแรงสูงสุด และพื้นที่ใต้กราฟการตัดเส้นก๋วยเตี๋ยวบ่มที่ 30 และ 0 องศาเซลเซียส

| ตัวอย่าง                   | ค่าแรงสูงสุด (กรัม) | พื้นที่ใต้กราฟ (มิลลิเมตร/วินาที) |
|----------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| 30 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง | 104.94a ± 8.40      | 197.72a ± 25.90                   |
| 0 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง   | 106.60a ± 7.15      | 222.10b ± 22.36                   |

หมายเหตุ \* ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 7 ซ้ำ จาก 2 ตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
\* ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมงในสภาวะการทดลองให้เส้นก๋วยเตี๋ยวที่มีความแข็งแรง และความแน่นแข็งไม่แตกต่างจากเส้นก๋วยเตี๋ยวบ่มตามกรรมวิธีดั้งเดิมในสภาวะการทดลองนี้ แต่พบว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวจากการบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมงมีความยืดหยุ่น และความแน่นเนื้อมากกว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวจากการบ่มตามวิธีดั้งเดิม จึงกล่าวได้ว่าการย่นระยะเวลาการบ่มโดยใช้อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมงให้เส้นก๋วยเตี๋ยวที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างกับเส้นก๋วยเตี๋ยวจากการบ่มตามวิธีดั้งเดิม แต่ให้คุณภาพการบริโภค (eating quality) เรื่องความยืดหยุ่น และความแน่นเนื้อที่ดีขึ้น

#### 4.2 ลักษณะทางประสาทสัมผัส

ตารางที่ 6 ความแตกต่างของค่าทางประสาทสัมผัสเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

| ตัวอย่าง                                       | ความยืดหยุ่น | ความเหนียว   | ความนุ่มและ  |
|--|--------------|--------------|--------------|
| 30 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง<br>(ตัวอย่างควบคุม) | 1.15a ± 0.84 | 1.55a ± 0.87 | 1.50a ± 1.04 |
| 0 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง                       | 1.47a ± 1.11 | 1.77a ± 1.17 | 1.83a ± 1.26 |

หมายเหตุ \* ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 30 คน ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
\* ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

การทดสอบทางประสาทสัมผัสตัวอย่างเส้นก๋วยเตี๋ยวจันทน์ผ่านการอบแห้ง คั้นรูป และลวกในน้ำร้อน ด้วยวิธีทดสอบความแตกต่างของตัวอย่างเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (เส้นก๋วยเตี๋ยวจันทน์บ่มตามวิธีดั้งเดิม) โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน โดยให้ผู้ทดสอบทดลองถึง แล้วบอกความแตกต่างระหว่างตัวอย่างควบคุมกับตัวอย่างบ่มตามวิธีดั้งเดิม และบ่มแบบย่นระยะเวลา โดยให้คะแนน 0 คือไม่แตกต่าง ถึง 5 คือแตกต่างมากที่สุด แล้วคำนวณความแตกต่างของค่าคะแนนที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่าความยืดหยุ่น ความเหนียว และความนุ่มและของเส้นก๋วยเตี๋ยวทั้งสองตัวอย่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05) โดยผู้ทำ

การทดสอบระบุว่าตัวอย่างเส้นก๋วยเตี๋ยวบ่มตามวิธีดั้งเดิม และบ่มแบบย่นระยะเวลา มีความแตกต่างจากตัวอย่างควบคุมในเกณฑ์ แตกต่างเล็กน้อย (1) ถึงแตกต่างปานกลาง (2)

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวจากวิธีการบ่มทั้งสองแบบไม่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาจากเนื้อสัมผัสที่ตรวจสอบได้จากทางเครื่องมือ แสดงว่าสามารถใช้การบ่มแบบย่นระยะเวลาในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวได้

## สรุป

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดรีโทรเกรดชันของแผ่นแป้งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความแน่นแข็ง เป็นลักษณะทางเนื้อสัมผัสที่มีความเหมาะสมที่ใช้เป็นดัชนีในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของแผ่นแป้งในระหว่างการบ่ม เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับการประเมินการตัดแผ่นแป้งทางประสาทสัมผัส เมื่อระยะเวลาการบ่มแผ่นแป้งนานขึ้น ความแน่นแข็งเพิ่มขึ้น ยกเว้นการบ่มแผ่นแป้งที่ 30 องศาเซลเซียส และความแน่นแข็งของแผ่นแป้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการบ่มแผ่นแป้งลดลง นอกจากนี้การบ่มแบบรอบอุณหภูมิไม่มีผลต่อความแน่นแข็งของแผ่นแป้ง

2. ความไวต่อเอนไซม์ของแผ่นแป้งลดลง เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ยกเว้นการบ่มแผ่นแป้งที่ 30 องศาเซลเซียส การบ่มแผ่นแป้งที่อุณหภูมิต่ำมีแนวโน้มก่อให้เกิดความต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ แต่อิทธิพลของการเกิดรีโทรเกรดชันต่อการเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์นั้นไม่ชัดเจน จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้การเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์เป็นดัชนีศึกษาการเกิดรีโทรเกรดชัน

3. การบ่มแผ่นแป้งที่ 30 องศาเซลเซียส ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นแป้งสด แต่การบ่มแผ่นแป้งที่ 0 องศาเซลเซียส เร่งให้เกิดรีโทรเกรดชันของแอมิโลเพกตินได้ และระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นไม่มีผลในการเพิ่มค่าเอนทัลปีการสลายโครงสร้างแอมิโลเพกติน

4. ความเป็นผลึกของผงแผ่นแป้งบ่มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผงแผ่นแป้งสด และความเป็นผลึกของผงแป้งบ่มที่ 30 องศาเซลเซียสนาน 12 ชั่วโมงใกล้เคียงกับผงแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง แต่ผงแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสนาน 12 ชั่วโมงมีค่ามากที่สุด โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นแบบบี ผสมวี ความเป็นผลึกของแผ่นแป้งสดมีค่าน้อยที่สุด และไม่ปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แบบบี เช่นเดียวกับแผ่นแป้งบ่มที่ 30 องศาเซลเซียสนาน 12 ชั่วโมง แต่แผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแบบบีขึ้น และแผ่นแป้งบ่มที่ 0 องศาเซลเซียสนาน 12 ชั่วโมงมีค่าความเป็นผลึกมากที่สุด นอกจากนี้ความเป็นผลึกของผงแผ่นแป้งมีค่ามากกว่าแผ่นแป้ง เนื่องจากอิทธิพลของการสูญเสียน้ำ

5. ลักษณะโครงสร้างรอยตัด พบว่าแผ่นแป้งสดมีรอยตัดที่ขรุขระมากกว่าแผ่นแป้งบ่ม และการบ่มแผ่นแป้งที่ 0 องศาเซลเซียสให้รอยตัดที่มีความเรียบมากกว่า แม้ว่าเนื้อเจลบริเวณรอยตัดมีรูพรุนแทรกอยู่ ลักษณะโครงสร้างภายในพบว่ามีเม็ดสตาร์ชที่ไม่ถูกทำลายปรากฏอยู่

6. การบ่มแผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยวที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสสามารถลดระยะเวลาการบ่มแผ่นแป้งก๋วยเตี๋ยวจันทน์จาก 12 ชั่วโมง เหลือเพียง 3 ชั่วโมงได้ ในสภาวะการทดลอง โดยให้เนื้อสัมผัสที่ไม่แตกต่างจากกรรมวิธีการบ่มแผ่นแป้งแบบดั้งเดิม ทั้งยังมีความแน่นเนื้อ และความยืดหยุ่นมากกว่าการบ่มตามกรรมวิธีดั้งเดิม

7. ดัชนีที่มีความเหมาะสมในการศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของแผ่นแป้งในระหว่างการบ่ม คือ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็ง การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึก และการศึกษาโครงสร้างรอยตัด

### ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยในการย่นระยะเวลาการบ่มเพียงปัจจัยเดียวคือ อุณหภูมิ ดังนั้นจึงได้ศึกษาการบ่มในสภาวะปิดที่มีการกำหนดความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อเป็นการควบคุมการเปลี่ยนแปลงความชื้น แต่ในทางอุตสาหกรรมการผลิตก๋วยเตี๋ยวจันทน์จริง ๆ ไม่ได้ควบคุมสภาวะการบ่มตั้งในการทดลอง จึงมีการสูญเสียความชื้นในระหว่างการบ่ม เพื่อเป็นการยืนยันกรรมวิธีการบ่มแบบย่นระยะเวลาด้วยอุณหภูมิต่ำว่าสามารถนำไปใช้ได้จริงในทางอุตสาหกรรม จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องนี้ต่อไป

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กัลยาณี ดีประเสริฐวงศ์. 2541. เทคโนโลยีสะอาดกับการส่งเสริมมาตรฐานและวิธีการที่ดีในการผลิตกล้วยเดี่ยวและขนมจีน. น. 79-107. ใน รายงานการสัมมนาเรื่องการพัฒนาเพื่อยกระดับอุตสาหกรรมกล้วยเดี่ยวและขนมจีนโดยใช้เทคโนโลยีที่สะอาด. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร, กรุงเทพฯ.

กมลวรรณ อิศราคาร. 2548. ผลของการเติมสตาร์ชตัดแปรและไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพของกล้วยเดี่ยวแช่เยือกแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กระทรวงพาณิชย์. 2548. ผลิตภัณฑ์แปรรูปข้าว. สถิติการส่งออก. แหล่งที่มา <http://www.ops2.moc.go.th/tradeth/cgi/ExComm2asp>, 10 มีนาคม 2548.

งามชื่น คงเสรี. 2541. ข้าวที่เหมาะสมสำหรับการแปรรูปกล้วยเดี่ยวและการตรวจสอบคุณภาพ, น. 14-32. ใน รายงานการสัมมนาเรื่องการพัฒนาเพื่อยกระดับอุตสาหกรรมกล้วยเดี่ยวและขนมจีนโดยใช้เทคโนโลยีที่สะอาด. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร, กรุงเทพฯ.

จิตธนา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล. 2543. ธัญชาติ และผลิตภัณฑ์. น. 349-362. ใน คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, บรรณาธิการ. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ

ณรงค์ นิยมวิทย์. 2538. ธัญพืชและพืชหัว. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ดวงแก้ว ผุงเพิ่มตระกูล. 2547. นวัตกรรมใหม่ผลิตเส้นกล้วยเดี่ยวย่นเวลา...เพิ่มผลผลิตเท่าตัว. หนังสือพิมพ์ไทยรัฐ. แหล่งที่มา: <http://www.thairath.co.th/thairath1/2547/farming/mar/15/farm1.php>, 27 สิงหาคม 2547.

พัชรี เนตรน้อย. 2538. การผลิตแป้งกล้วยเดี่ยว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มรกต ตูลพงศารักษ์. 2538. พันธุ์ข้าว ระยะเวลาการเก็บข้าวเปลือก และเนื้อดินที่ใช้ปลูกที่มีผลต่อคุณภาพกล้วยเดี่ยว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิภา สุโรจนะเมธากุล. 2541. คุณสมบัติของข้าวและการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการผลิต ก๋วยเตี๋ยวและเส้นหมี่, น. 33-51. ใน รายงานการสัมมนาเรื่องการพัฒนาเพื่อยกระดับอุตสาหกรรมก๋วยเตี๋ยวและขนมจีนโดยใช้เทคโนโลยีที่สะอาด. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร, กรุงเทพฯ.

คันสนีย์ อุดมระติ. 2548. การเกิดเจลลาทีโนเซชันและรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าว 4 พันธุ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2531. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมก๋วยเตี๋ยว กึ่งสำเร็จรูป. มอก. 832-2531.

\_\_\_\_. 2533. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมก๋วยเตี๋ยว. มอก. 959-2533.

เสนอ ร่วมจิต. 2522. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของข้าวเจ้าพันธุ์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อลักษณะของเส้นก๋วยเตี๋ยว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรพิน ภูมิภมร. 2533. ระบบชีวภาพที่สำคัญต่อเทคโนโลยีชีวภาพ. เล่มที่ ๕ เทคโนโลยีของแป้ง : เคมีของแป้งและเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์จากแป้งบางชนิดที่ผลิตในประเทศไทย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อรพรรณ กัลปนายุทธ. 2547. การปรับปรุงคุณภาพก๋วยเตี๋ยวพร้อมบริโภคในบรรจุภัณฑ์ปิดสนิทผ่านกระบวนการพาสเจอไรเซชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

A.A.C.C. 2000. *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists*. 10<sup>th</sup> ed., American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN.

Alonso, A.G., A.J. Escrig, N. Martin-Carrón, L. Bravo and F. Saura-Calixto. 1999. Assessment of some parameters involved in the gelatinization and retrogradation of starch. *Food Chem.* 66: 181-187.

- Anonymous. 2006. Calories and Carbs in Filipino, Sides: Rice Stick Noodle Boiled, Bihon. **Food Database**. Available source : [http://www.calorieking.com/foods/food/carbs-calories-in-filipino-sides-rice-stick-noodle-boiled-bihon\\_Y2lkPTEzMTQ3JmJpZD0xOTk5JmZpZD0xMTMyNjQmcGFyPXdvbWVuZml0bmVzcmw.html](http://www.calorieking.com/foods/food/carbs-calories-in-filipino-sides-rice-stick-noodle-boiled-bihon_Y2lkPTEzMTQ3JmJpZD0xOTk5JmZpZD0xMTMyNjQmcGFyPXdvbWVuZml0bmVzcmw.html), 3 April 2006
- Baik, B.K. and M.R. Lee. 2003. Effect of starch amylose content of wheat on textural properties of white salted noodles. **Cereal Chem.** 80(3): 304-309.
- Baker, L.A. and P. Rayas-Duarte. 1998. Retrogradation of amaranth starch at different storage temperatures and the effects of salt and sugars. **Cereal Chem.** 75(3): 308-314.
- Bárcenas, M.E. and C.M. Rosell. 2006. Effect of frozen storage time on the bread crumb and aging of par-baked bread. **Food Chem.** 95: 438-445.
- Barth, A.M. 2004. **Role and Proposed Mechanism of Starch Retrogradation in Determining Sorghum Porridge Texture**. M.S. thesis. Purdue University, USA.
- Bello-Pérez, L.A. and O. Paredes-López. 1995. Effects of solutes on retrogradation of stored starches and amylopectins: a calorimetric study. **Starch.** 47(3): 83-86.
- Bello, A.B., R.D. Waniska. M.H. Gomez and L.W. Rooney. 1995. Starch solubilization and retrogradation during preparation of To (a food gel) from different sorghum cultivars. **Cereal Chem.** 72(1): 80-84.
- Bennion, M., 1980. **The Science of Food**. John Wiley and sons, Inc. Singapore.
- Bernfeld, P. 1951. Enzymes of starch degradation and synthesis, pp. 379-428. *In* F.F. Nord ed. **Advances in Enzymology and Related Subjects of Biochemistry**. Interscience Publ. New York.

- Bernfeld, P. 1955. Amylase,  $\alpha$  and  $\beta$ , pp. 149–158. In S.P. Colowick and N.O. Kaplan eds. **Methods in Enzymology Vol 1**. Academic Press. New York.
- Bhattacharya, M., S.Y. Zee and H. Corke. 1999. Physicochemical properties related to quality of rice noodles. **Cereal Chem.** 76(6): 861–867.
- Biliaderis, C.G., J.R. Tonogai, C.M. Perez and B.O. Juliano. 1993. Thermophysical properties of milled rice starch as influenced by variety and parboiling method. **Cereal Chem.** 70(5): 512–516.
- Brunnschweiler, J., D. Mang, Z. Farah, F. Escher and B. Conde-Petit. 2006. Structure–texture relationships of fresh pasted prepare from different yam (*Dioscorea spp.*) varieties. **Lebensm. Wiss. U. Technol.** Article in Press.
- Cairns, P., V.J. Morris, R.L. Botham and S.G. Ring. 1996. Physicochemical studies on resistant starch *in vitro* and *in vivo*. **J. Cereal Sci.** 23: 265–275.
- Cameron, D.K. and Y.-J. Wang. 2005. The better understanding of factors that affect the hardness and stickiness of long grain rice. **Cereal Chem.** 82(2): 113–119.
- Campas-Baypoli, O.N., E.C. Rosas-Burgos, P.I. Torres-Cháves, B. Ramírez-Wong, S.O. Serna-Saldívar. 2002. Physicochemical changes of starch in maize tortillas during storage at room and refrigeration temperatures. **Starch.** 54(8): 358–363.
- Casiraghi, M.C., F. Brighenti, N. Pellegrini, E. Leopardi and G. Testolin. 1993. Effect of processing on rice starch digestibility evaluated by *in vivo* and *in vitro* methods. **J Cereal Sci.** 17:147–156.
- Cauvain, S.P. 1998. Improving the control of staling in frozen bakery products. **Trends Food Sci and Technol.** 9: 56–61.
- Chang, S.-M. and L.C. Liu. 1991. Retrogradation of rice starches studied by differential scanning calorimetry and influence of sugar, NaCl and lipids. **J. Food Sci.** 56(2): 564–566, 570.

- Charoenrien, S., D. Thirathumthavorn and S. Udomrati. 2004. Retrogradation of waxy rice starch gel below and above glass transition temperatures. **IFT Annual Meeting**. Available Source: [http://ift.confex.com/ift/2004/techprogram/paper\\_25246.htm](http://ift.confex.com/ift/2004/techprogram/paper_25246.htm), September 29, 2005.
- Chatakanonda, P., S. Varavinit and P. Chinachoti. 2000. Relationship of gelatinization and recrystallization of cross-linked rice to glass transition temperature. **Cereal Chem.** 77(3): 315-319.
- Cheetham, N.W.H. and L. Tao. 1998. Variation in crystalline type with amylose content in maize starch granules: an X-ray powder diffraction study. **Carbohydr. Polym.** 36: 277-284.
- Chen, Z., H.A. Schols and A.G.J. Voragen. 2003. Starch granule size strongly determines starch noodle processing and noodle quality. **J. Food Sci.** 68(5): 1584-1589.
- Chinnapha, N. 2001. Effect of amylose and amylopectin on rice noodle quality. **IFT Annual Meeting**. Available Source: <http://ift.confex.com/ift/2001/techprogram/session994.htm>, September 29, 2005.
- Chrastil, J. 1994. Effect of storage in the physicochemical properties and quality factors of rice, pp. 49-75. In W.E. Marshall and J.I. Wadsworth eds. **Rice Science and Technology**. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Chung, H.-J., E.-J. Lee and S.-T. Lim. 2002. Comparison in glass transition and enthalpy relaxation between native and gelatinized rice starches. **Carbohydr. Polym.** 48: 287-298.
- \_\_\_\_\_, H.-Y. Jeong and S.-T. Lim. 2003. Effects of acid hydrolysis and defatting on crystallinity and pasting properties of freeze-thawed high amylose corn starch. **Carbohydr. Polym.** 54:449-455.
- \_\_\_\_\_, H.S. Lim and S.-T. Lim. 2006. Effect of partial gelatinization and retrogradation on the enzymatic digestion of waxy rice starch. **J. Cereal Sci.** Article in Press.

- Clark, A.A. 1994. X-ray scattering and diffraction, pp. 40–65. *In* S.B. Ross–Murphy ed. **Physical Techniques for The Study of Food Biopolymers**. Blackie academic and professional. U.K.
- Collison, R. 1968. Starch retrogradation, pp. 194–200. *In* J.A. Radley ed. **Starch and Its Derivatives**. 4<sup>th</sup> ed. Chapman and Hall Ltd. London.
- Colwell, K.H., D.W.E. Axford, N. Chamberlain and G.A.H. Elton. 1969. Effect of storage temperature on the ageing of concentrated wheat starch gels. **J. the Sci of Food and Agr.** 20: 250–255. Cited in Karim, A.A., M.H. Norzaih and C.C. Seow. 2000. Methods of the study of starch retrogradation. **Food Chem.** 71: 9–36.
- Conde–Petit, B. and F. Escher. 1994. Influence of starch–lipid complexation on the ageing behavior of high concentration starch gel. **Starch.** 46(5): 172–177.
- Corke, H. and M. Bhattacharya. 1999. Wheat product, pp.43–70. *In* C.Y.W. Ang, K. Liu and Y–W. Huang, eds. **Asian Food: Science and Technology**. A Technomic publishing company, Inc., USA.
- Corriher, S.O. 2001. An expanded collection of typical problems in different food areas. **Food For Thought.** 32(1): 6–11.
- Coulter, T. and J. Davies. 1994. **Food: The Definitive Guide**. The royal society of chemistry. Cambridge.
- Cui, R. and C.G. Oates. 1997. The effect of retrogradation on enzyme susceptibility of sago starch. **Carbohydr. Polym.** 32: 65–72.
- Cullity, B.D. 1978. **Elements of X-Ray Diffraction**. 2<sup>nd</sup> ed. Addison–Wesley Publishing Company Inc. Phillipine.
- Czuchajowska, Z., T. Otto, B. Paszczynska and B.–K. Baik. 1998. Composition, thermal behavior and gel texture of prime and tailings starches from garbanzo beans and peas. **Cereal Chem.** 75(4): 446–472.

- D' Appolonia, B.L., K. Giller, E.M. Osman and Y. Pomeranz. 1971. Carbohydrate. In Y. Pomeranz ed. **Wheat Chemistry and Technology**. 2<sup>nd</sup> ed. American Association of Cereal Chemist, INC. Minnesota.
- DeMan, J.M. 1999. **Principles of Food Chemistry**. 3<sup>rd</sup> Ed. Aspen Publishers, Inc. Maryland.
- Eerlingen, R.C., M. Crombezand and J.A. Delcour. 1993. Enzyme-resistant starch. I. Quantitative and qualitative influence of incubation time and temperature of autoclaved starch in resistant starch formation. **Cereal Chem.** 70(3): 339–344.
- \_\_\_\_\_, H. Jacob and J.A. Delcour. 1994. Enzyme resistant starch. V. Effect of retrogradation of waxy maize starch on enzyme susceptibility. **Cereal Chem.** 71(4): 351–355.
- \_\_\_\_\_, and J.A. Delcour. 1995. Formation, analysis structure and properties of type III enzyme resistant starch. **J. Cereal Sci.** 22: 129–138.
- Elfstrand, L., M. Larsson, A. Simpraga and M. Wahlgren. 2004. Starch microspheres for drug delivery: recrystallisation in model systems. p. 24. In **Nordic Starch Network**. The Swedish institute for food and biotechnology. Sweden.
- Eliasson, A.-C. and M. Gudmundsson. 1996. Physicochemical and functional aspects. pp.431–503. In A – C., Eliasson ed. **Carbohydrate in Food**. Marcel Dekker, INC., New York.
- \_\_\_\_ and M. Wahlgren. 2004. Starch–lipid interactions and their relevance in food products. pp. 441–454. In A.-C., Eliasson ed. **Starch in Food: Structure, Function and Applications**. CRC Press., USA.
- Englyst, H.N., J. Veenstra and G.J. Hudson. 1996. Measurement of rapid available glucose (RAG) in plant foods: a potential *in vitro* predictor of the glycemic response. **British J Nutrition.** 75: 327–337.

- Fan, J. and B.P. Marks. 1999. Effect of rough rice storage conditions on gelatinization and retrogradation properties of rice flours. **Cereal Chem.** 76(6): 894–897.
- Fernandez, D.A., R.D. Waniska and L.W. Rooney. 1999. Changes in starch properties of corn tortillas during storage. **Starch.** 51(4): 136–140.
- Ferrero, C., M.N. Martin and N.E. Zantzy. 1994. Corn starch xanthan gum interaction and its effect on the stability during storage of frozen gelatinized suspension. **Starch.** 46: 300–306. Cited in Sandhu, K.S., N., Singh and M. Kaur. 2004. Characteristics of the different corn types and their grain fractions: physicochemical, thermal, morphological and rheological properties of starches. **J. Food Eng.** 64: 119–127.
- Fredriksson, H., I. Björck, R. Andersson, H. Liljeberge, J. Silverio, A.-C. Eliasson and P. Åman. 2000. Studies on  $\alpha$ -amylase degradation of retrograded starch gels from waxy maize and high amylopectin potato. **Carbohydr. Polym.** 43: 81–87.
- Friedman, H.M., J.E. Whitney and A.S. Szczesniak. 1963. The texturometer: a new instrument for objective texture measurement. **J. Food Sci.** 28: 390–369. Cited in Pons, M and S.M. Fiszman. 1996. Instrumental texture profile analysis with particular reference to gelled systems. **J Texture Studies.** 27: 597–624.
- Galvani, A., C.R. Carmargo and C.F. Ciacco. 1994. Effect of some lipids, sugars, salts and acids on starch gelatinization and retrogradation. **Ciencia-e-tecnologia-de-Alimentos.** 14(1): 3–13. (non English).
- Gerard, C., P. Colonna, A. Buleon and V. Planchot. 2001. Amylolysis of maize mutant starches. **J. Sci of Food and Agriculture.** 81: 1281–1287. Cited in Chung, H.-J., H.-Y. Jeong and S.-T. Lim. 2003. Effects of acid hydrolysis and defatting on crystallinity and pasting properties of freeze-thawed high amylose corn starch. **Carbohydr. Polym.** 54:449–455.
- Gray, J.A. and J.N. BeMiller. 2003. Bread staling. Molecular basis and control. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.** Vol. 2: 1–21.

- Gray, J. 2003. **Carbohydrates: Nutritional and Health Aspects**. ILSI Press. USA. 38 pages.
- Gudmundsson, G. 1994. Retrogradation of starch and the role of its components. **Thermochimica Acta**. 246: 329–341.
- Gujral, H.S., M. Haros and C.M. Rosell. 2004. Improving the texture and delaying staling in rice flour chapati with hydrocolloids and  $\alpha$ -amylase. **J. Food Engineering**. 65: 89–94.
- Guy, R.C.E., D.G. Hodge and J. Robb. 1983. An examination of the phenomenon associated with cake staling. **FMBRA Report No. 107 CCFRA**. Chipping. Campden, U.K. Cited in Cauvain, S.P. 1998. Improving the control of staling in frozen bakery products. **Trends in Food Sci and Tech**. 9: 56–61.
- Hagenimana, A., P. Pu and X. Ding. 2005. Study on thermal and rheological properties of native rice starch and their corresponding mixture. **Food Research International**. 38: 257–266.
- Haralampu, S.G. 2000. Resistant starch–A review of the physical properties and biological impact of RS3. **Carbohydr. Polym**. 41: 285–292.
- Hatcher, D.W., M.J. Anderson, R.G. Desjardins, N.M. Edward and J.E. Dexter. 2002. Effect of flour particle size and starch damage on processing and quality of white salted noodles. **Cereal Chem**. 79(1): 64–71.
- Hoover, R., G. Swamidas, L.S. Kok and T. Vasanthan. 1996. Composition and physicochemical properties of starch from pearl millet. **Food Chem**. 56: 355–367.
- Hsu, C.-L. and D.R. Heldman. 2005. Influence of glass transition temperature on rate of rice starch retrogradation during low–temperature storage. **J. Food Engineering**. 28: 506–525.

- Hug-Iten, S., S. Handschin, B. Conde-Petit and F. Escher. 1999. Changes in starch microstructure on baking and staling of wheat bread. **Lebensm-Wiss. U.-Technol.** 255-260.
- \_\_\_\_\_, F., Escher and B. Conde-Petit. 2003. Staling of bread: role of amylose and amylopectin and influence of starch-degrading enzyme. **Cereal Chem.** 80(6):654-661.
- P'anson, K.S., M.J. Miles, V.J. Morris, L.S. Besford, D.A. Jarvis and R.A. Marsh. 1990. The effects of added sugars on the retrogradation of wheat starch gels. **J. Cereal Sci.** 11:243-248.
- Inaba, H., Y. Hatanaka, T. Adachi and T. Mori. 1994. Changes with retrogradation of mechanical and textural properties of gels from various starch. **Carbohydr. Polym.** 24(1): 31-40.
- Indrani, D., S.J. Rao, K.U Sankar and G.V. Rao. 2000. Changes in the physical-chemical and organoleptic characteristics of parotta during storage. **Food Res. Inter.** 33: 323-329.
- Islas-Hernández J.J. R. Rendón-Villalobos, E. Agama-Acevedo, F. Gutiérrez- Meraz, J. Tovar, G. Arámbula-Villa and L.A. Bello-Pérez. 2006. *In vitro* digestion rate and resistant starch content of tortillas stored at two different temperatures. **Lebensmittel-Wissenschaft-und-Technologie.** Article in Press.
- Israkarn, K. and S. Charoenrein. 2004. Glass transition temperature of rice stick noodles. **In Abstracts on The 6<sup>th</sup> Agro-Industrial Conference.** Silpakorn Univeristy. Thailand.
- Jacobson, M.R., M. Obanni and J.N. BeMiller. 1997. Retrogradation of starches from different botanical sources. **Cereal Chem.** 74(5): 511-518.
- Jang, J.K. and Y.R. Pyun. 1997. Effect of moisture level on the crystallinity of wheat starch aged at different temperature. **Starch.** 49(7): 272-277.

Jankowski, T. 1992. Influence of starch retrogradation on the texture of cooked potato tuber. **Int. J. Food Sci and Tech.** 27: 637–642.

Jouppila, K. and Y.H. Roos. 1997. The physical state of amorphous corn starch and its impact on crystallization. **Carbohydr. Polym.** 32: 95–104.

\_\_\_\_\_, J. Kansikas and Y.H. Roos. 1998. Factors affecting crystallization and crystallization kinetics in amorphous corn starch. **Carbohydr Polym.** 36: 143–149.

Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled–rice amylose. **Cereal Sci. Today.** 16(10): 334–360.

\_\_\_\_\_. 1992. Structure, chemistry and function of the rice grain and its fractions. **Cereal Foods World.** 37(10): 772 – 774.

Karim, A.A., M.H. Norzaih and C.C. Seow. 2000. Methods of the study of starch retrogradation. **Food Chem.** 71: 9–36.

Kasemsuwan, T., T. Bailey and J. Jane. 1998. Preparation of clear noodles with mixtures of tapioca and high amylose starch. **Carbohydr. Polym.** 32: 301–312.

Kayisu, K. and L.F. Hood. 1979. Effects of dehydration and storage conditions on the pancreatic  $\alpha$ -amylase susceptibility of various starches. **J. Food Sci.** 44: 1728–1731.

Keetels, C.J.A.M., G.T. Oostergetel and T. van Vliet. 1996. Recrystallization of amylopectin in concentrated starch gels. **Carbohydr. Polym.** 30: 61–64.

Kelekci, N.N., S. Pascut and R.D. Waniska. 2003. The effects of storage temperature on the staling of wheat flour tortillas. **J. Cereal Sci.** 37: 377–380.

- Kerr, W.L., C.D.W. Ward, K.M. McWatters and A.V.A. Resurreccion. 2000. Effect of milling and particle size on functionality and physicochemical properties of cowpea flour. **Cereal Chem.** 77(2): 213–219.
- Kim, J.O., W.S. Kim and M.S. Shin. 1997. A comparative study on retrogradation of rice starch gels by DSC, x-ray and  $\alpha$ -amylase methods. **Starch.** 49(2): 71–75.
- Klucinec, J.D. and D.B. Thompson. 1999. Amylose and amylopectin interact in retrogradation of dispersed high – amylose starches. **Cereal Chem.**76: 282–291.
- \_\_\_\_ and \_\_\_\_\_. 2002. Amylopectin nature and amylose–amylopectin ratio as influences on the behavior of gels of dispersed starch. **Cereal Chem.** 79(1): 24–35.
- Kruger, J.E., M.H. Anderson and J.E. Dexter. 1994. Effect of flour refinement on raw Cantonese noodle color and texture. **Cereal Chem.** 71(2): 177–182.
- Lee, M.H., M.H. Baek, D.S. Cha, H.J. Park and S.T. Lim. 2002. Freeze–thaw stabilization of sweet potato starch gel by polysaccharide gums. **Food Hydrocolloids.** 16: 345–352.
- Lee, S.J., M. Rha, W. Koh, W. Park, C. Lee, Y.A. kwon and J.K. Hwang. 2002. Measurement of cooked noodle stickiness using a modified instrumental method. **Cereal Chem.** 79(6): 838–842.
- Lee, S.–Y., K.–S. Woo, J.–K. Lim, H.I. Kim and S.T. Lim. 2005. Effect of processing variable on texture of sweet potato starch noodles prepared in nonfreezing process. **Cereal Chem.** 82(4): 475–478.
- Leloup, V.M., P. Colonna and S.G. Ring. 1992. Physiochemical aspects of resistant starch. **J. Cereal Sci.** 16: 253–266. Cited in Eerlingen, R.C., H. Jacob and J.A. Delcour. 1994. Enzyme resistant starch. V. Effect of retrogradation of waxy maize starch on enzyme susceptibility. **Cereal Chem.** 71(4): 351–355.

- Lent, P.J. and L.A. Grant. 2001. Effects of additive and storage temperature on staling properties of bagels. **Cereal Chem.** 78(5): 619–624.
- Levine, H. and L. Slade. 1990. Influences of the glassy and rubbery states on the thermal, mechanical and structural properties of doughs and baked products. pp. 157–330. *In* H., Faradi and J.M., Faubion eds. **Dough Rheology and Baked Product Texture.** Van Nostrand Reinhold. New York.
- Limanond, B., M.E. Castell–Perez and R.G. Moreira. 2002. Modeling the kinetics of corn tortilla staling using stress relaxation data. **J. Food Eng.** 53: 237–247.
- Lin, J.Y. and J.T. Chein. 1995. Effect of storage condition on the compatibility between alkali–treated glutens and gelatinized corn starch. **J Chinese Agri. chem. Soc.** 33(1): 65–76 (non English)
- Liu, Q. E. Donner, Y. Yin, R.L. Huang and M.Z. Fan. 2006. The physicochemical properties and *in vitro* digestibility of selected cereals, tubers and legumes grown in China. **Food Chem.** Article in Press.
- Longton, J. and G.A. LeGray. 1981. Differential scanning calorimetry studies on the crystallinity of aging wheat starch gels. **Starch.** 33: 410–414. Cited in Jouppila, K. and Y.H. Roos. 1997. The physical state of amorphous corn starch and its impact on crystallization. **Carbohydr. Polym.** 32: 95–104.
- Lu, T.–J., J.–L. Jane and P.L. Keeling. 1997. Temperature effect on retrogradation rate and crystalline structure of amylose. **Carbohydr. Polym.** 33: 19–26.
- Luh, B.S. 1999. Rice products, pp.5–42. *In* C.Y.W. Ang, K. Liu and Y–W. Huang, eds. **Asian Food: Science and Technology.** A Technomic publishing company, Inc., USA.
- \_\_\_\_\_. 2001. Rice production, pp. 98–99. *In* G. Owen ed. **Cereal Processing Technology.** CRC Press. USA.

- Maquenne, L. 1903. Sur la retrogradation de l'empois d' amidon. **Compt rend.** 137: 797–799. Cited in Jacobson, M.R. and J.N. Bemiller. 1998. Method for determining the rate and extent of accelerated starch retrogradation. **Cereal Chem.** 75(1): 22–29.
- McWilliams, M. 2001. Starch. In M. McWilliams ed. **Foods: Experimental Perspectives.** Prentice–Hall, Inc. New Jersey.
- Mestres, C., P. Colonna and A. Buleon. 1988. Characteristics of starch networks within rice flour noodles and mung bean starch vermicelli. **J Food Sci.** 53: 1809 – 1812. Cited in Ohwada, N., K. Ishibashi and K. Hironaka. 2002. Effect of holding temperature on the structure of mung bean starch gels and noodles. **Cereal Chem.** 79(5): 732–736.
- Miles, M.J., V.J. Morris, P.D. Orford and S.G. Ring. 1985. The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. **Carbohydr. Res.** 135: 271–281.
- Mokhorro, C.T. and D.S. Jackson. 1995. Starch related changes in stored sorghum porridge. **J Food Sci.** 60(2): 389–394.
- Morrison, W.R. and J. Karkalas. 1993. Starch. In P.M. Dey and J.B. Harborne eds. **Methods in Plant Biochemistry.** Academic Press. London.
- Mujoo, R. and S.Z. Ali. 1998. Susceptibility of starch to *in vitro* enzyme hydrolysis in rice, rice flake and intermediate products. **Lebensm. Wiss. U. Technol.** 31: 114–121.
- Münzing, K. 1991. DSC studies of starch in cereal and cereal products. **Thermochimica Acta.** 193: 441–448.
- Nebesny, E., I. Kwaśniewska–Karolak and J. Rosicka–Kaczmarek. 2005. Dependence of thermodynamic characteristics of amylose–lipid complex dissociation on a variety of wheat. **Starch.** 57(8): 378–383.

- Niba, L.L. 2003. Effect of storage period and temperature on resistant starch and  $\beta$ -glucan content in cornbread. **Food Chem.** 83(4): 493–498.
- Noda, T., T. Tohnooka, S. Taya and I. Suda. 2001. Relationship between physicochemical properties of starches and white salted noodle quality in Japanese wheat flours. **Cereal Chem.** 78(4): 395–399.
- Ohwada, N., K. Ishibashi and K. Hironako. 2002. Effect of holding temperature on the structure of mungbean starch gels and noodles. **Cereal Chem.** 79(5): 732–736.
- Okuda, M., I. Aramaki, T. Koseki, H. Satoh and K. Hashizume. 2005. Structural characteristics, properties and in vitro digestibility of rice. **Cereal Chem.** 82(4): 361–368.
- Parker, R. and S.G. Ring. 2001. Aspects of the physical chemistry of starch. **J. Cereal Sci.** 34: 1–17.
- Perdon, A.A., T.J. Siebenmorgen, R.W., Buescher and E.E. Gbur. 1999. Starch retrogradation and texture of cook milled rice during storage. **J. Food Sci.** 64:828–832.
- Pikus, S. 2005. Small-angle x-ray scattering (SAXS) studies of the structure of starch and starch products. **Fibers and Textiles in Eastern Europe.** 13(5): 82–86
- Piyachomkwon, K., R. Wansuksri, C. Kijkhunasatian, P. Chatakanonda, B. Ninchan, V. Suntisopasri and K. Sriroth. 2005. Relationship between structural properties of rice starches and their physico-chemical properties and cooking quality of rice grain. *In Proceeding Starch Update 2005: The 3<sup>rd</sup> Conference on Starch Technology.* BIOTEC. Thailand
- Pons, M and S.M. Fiszman. 1996. Instrumental texture profile analysis with particular reference to gelled systems. **J. Texture Studies.** 27: 597–624.

- Prokopowich, D.J. and C.G. Biliaderis. 1995. A comparative study of the effect of sugars on the thermal and mechanical properties of concentrated waxy maize, wheat, potato and pea starch gels. **Food Chem.** 52(3): 255–262.
- Qi, X., R.F. tester, C.E. Snape and R. Ansell. 2003. Molecular basis of the gelatinization and swelling characteristics of waxy rice starches grown in the same location during the same season. **J. Cereal Sci.** 363–376.
- Rendon–Villalobos, R., L.A. Bello–Pérez, P. Osorio–Díaz, J. Tovar and O. Paredes–López. 2002. Effect of storage time on *in vitro*. Digestibility and resistant starch content of nixtamal, masa and tortilla. **Cereal Chem.** 79(3): 340–344.
- Ribotta, P.D., A.E. León and M.C. Añón. 2003. Effect of freezing and frozen storage on the gelatinization and retrogradation of amylopectin in dough baked in a differential scanning calorimeter. **Food Research International.** 36: 375–363.
- Riva, M., D. Fessas and A. Schiraldi. 2000. Starch retrogradation in cooked pasta and rice. **Cereal Chem.** 77: 433–438.
- Ruamchit, S. 1971. **Studies on The Effects of Rice Physical and Chemical Properties to The Characteristics of Rice Noodle.** M.S. thesis, Kasetsart University. (in thai)  
Cited International Rice Research Institute. 1979. **Annual Report Intern.** Rice Res. Inst., Laguna.
- Sandhu, K.S., N., Singh and M. Kaur. 2004. Characteristics of the different corn types and their grain fractions: physicochemical, thermal, morphological and rheological properties of starches. **J. Food Eng.** 64: 119–127.
- Seetharaman, K., N. Chinnapha, R.D. Waniska and P. White. 2002. Changes in textural, pasting and thermal properties of wheat buns and tortillas during storage. **J. Cereal Sci.** 35: 215–223.

- Sermisrisophon, S. and J. Kongkattikajorn. 2005. Starch composition and thermal properties of milled rice starch during storage. *In Proceeding Starch Update 2005: The 3<sup>rd</sup> Conference on Starch Technology*. BIOTEC. Thailand
- Sievert, D., Z. Czuchajowska and Y. Pomeranz. 1991. Enzyme resistant starch. III. X-ray diffraction of autoclaved amylo maize VII starch and enzyme resistant starch residue. *Cereal Chem.* 68, 86-91. Cited in Chung, H.-J., H.-Y. Jeong and S.-T. Lim. 2003. Effects of acid hydrolysis and defatting on crystallinity and pasting properties of freeze-thawed high amylase corn starch. *Carbohydr. Polym.* 54:449-455.
- Silverio, J., H. Fredriksson, R. Andersson, A. – C. Eliasson and P., Åman. 2000. The effect of temperature cycling on the amylopectin retrogradation of starches with different amylopectin unit – chain length distribution. *Carbohydr. Polym.* 42: 175-184.
- Siwapornluk, P. and J. Kongkattikajorn. 2005. Physicochemical properties of aged milled rice starch. *In Proceeding Starch Update 2005: The 3<sup>rd</sup> Conference on Starch Technology*. BIOTEC. Thailand
- Slade, L and H., Levine. 1987. Recent advances in starch retrogradation. pp. 387-431. *In S.S. Stivala, V. Crescenzi and I.C.M. Dea eds. Proceedings of The Conference on Recent Developments in Industrial Polysaccharides; The Impact of Biotechnology*. Gordon and Breach Science Pub. New York.
- \_\_\_\_\_. and H., Levine. 1988. A food polymer science approach to selected aspects of starch gelatinization and retrogradation. pp. 215-270. *In R.P., Millane, J.N., BeMiller and R., Chandrasekaran eds. Frontiers in Carbohydrate Research 1: Food Applications*. Elsevier. London.
- \_\_\_\_\_, R. Oltizik. R.E. Altomare and D.G. Medcalf. 1987. *Accelerated Staling of Starch Based Products*. US patent. 4,657,770.

- Sooksomboon, A., O Naivikul and B.R. Hamaker. 2005. Comparison of chemical, physicochemical properties of starch molecular structures in dry- and wet milled rice flours. *In Proceeding Starch Update 2005: The 3<sup>rd</sup> Conference on Starch Technology*. BIOTEC. Thailand
- Smewing, J. 1997. Analyzing the texture of pasta for quality control. *Cereal Foods World*. 42(1): 8-12.
- Sun, Z., W. Yang, T. Siebenmergen, A. Stelwagen and A. Cnossen. 2002. Thermomechanical transition of rice kernels. *Cereal Chem*. 79(3): 347-353.
- Tako, M. and S. Hizukuri. 2000. Retrogradation mechanism of rice starch. *Cereal Chem*. 77: 473-477.
- \_\_\_\_ and \_\_\_\_\_. 2002. Gelatinization mechanism of potato starch. *Carbohydr. Polym*. 48: 397-401.
- Tatsumi, E., M. Cheng, L. Li and Z. Li. 2001. Processing of high-quality rice noodles in China. *JIRCAS Research Highlights 2001*. Available Source: <http://ss.jircas.affrc.go.jp/kanko/seika/seikah13/e13-28.pdf>, September 29, 2005
- Taylor, T.A. 1994. **Modeling of Retrogradation in Cooked Rice: A Food Polymer Science Approach**. MS. Thesis. University of California, Davis.
- Tester, R.F. and W.R. Morrison. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose and lipids. *Cereal Chem*. 67(6): 551-557.
- \_\_\_\_, J. Karkalas and X. Qi. 2004. Starch structure and digestibility enzyme-substrate relationship. *World's Poultry Sci. J*. 60: 186-195.
- Torres, P.I., B. Ramirez-Worg, S.O. Serna-Saldivar and L.W. Rooney. 1993. Effect of sorghum flour addition on the characteristic of wheat flour tortillas. *Cereal Chem*. 70: 8-13.

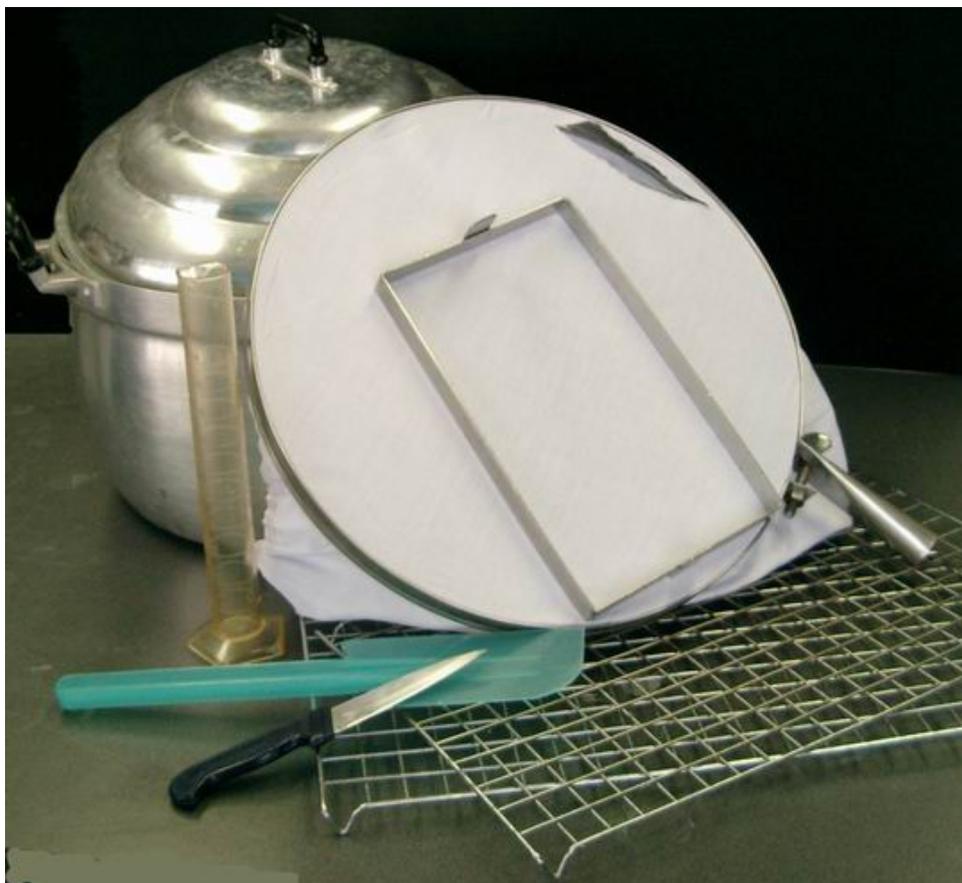
- Vandeputte, G.E., R. Vermeyleylen, J. Geerom and J.A. Delcour. 2003. Rice starch III. Structural aspect provide insight in amilopectin retrogradation properties and gel texture. **J Cereal Sci.** 38: 61–68.
- \_\_\_\_\_. 2004. Starch: Structure–physical behavior relation. **Kathilieke Universiteit Leuven**. Available source: <http://www.biw.kuleuven.be/lmt/labolmc/DOCS/Vandeputte.htm>, September 29, 2005
- Varavinit, S., S. Shobsngob, W. Varanyanond, P. Chinachoti and O. Naivikul. 2003. Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation and pasting properties of flours from different cultivars Thai rice. **Starch.** 55: 410–415.
- Vasanthan, T. and R.S. Bhatta. 1998. Enhancement of resistant starch (RS3) in amylomaize, barley, field pea and lentil starches. **Starch.** 50(7): 286–291.
- Vermeyleylen, R., B. Goderis, H. Reynaer and J.A. Delcour. 2004. Amylopectin molecular structure reflected in macromolecular organization of granular starch. **Biomacromolecules.** 5: 1775–1786.
- Virtucio, L. 2005a. Non traditional pasta. **Pavan Spa**. Available Source: <http://www.pavan.it/r&d.asp>, September 29, 2005
- \_\_\_\_\_. 2005b. Oriental Noodles. **Pavan Spa**. Available Source: <http://www.pavan.com/16.pdf#search='pavanoriental%20noodles'>, September 29, 2005
- Wakai, Y., T. Mizuma, N. Miyazaki, Y. Kiyokawa and T. Yanagiuchi. 1995. Dynamic viscoelasticity of steamed rice for sake brewing. **Seibutsukogku.** 73: 191–197. (In Jap.) Cited in Okuda, M., I. Aramaki, T. Koseki, H. Satoh and K. Hashizume. 2005. Structural characteristics, properties and in vitro digestibility of rice. **Cereal Chem.** 82(4): 361–368.
- Ward, K.E.J., R.C. Hoseney and P.A. Seib. 1994. Retrogradation of amylopectin from maize and wheat starches. **Cereal Chem.** 71(2): 150–155.

- Whistler, R.L. and J.N. BeMiller. 1999. **Carbohydrate Chemistry for Food Scientists**. Egan Press. Minnesota.
- Wood, A. and D. Ho. 2005. Noodle leaders: From raunchy advertising to functional snacks. **Asia Food J.** 2(6):10-12.
- Xu, A. and P.A. Seib. 1993. Structure of tapioca pearls compared to starch noodles from mung beans. **Cereal Chem.** 70: 463-470. Cited in Ohwada, N., K. Ishibashi and K. Hironaka. 2002. Effect of holding temperature on the structure of mung bean starch gels and noodles. **Cereal Chem.** 79(5): 732-736.
- Yoenyongbuddhagal, S. and A. Noomhorm. 2002. Effect of physicochemical properties of high-amylose Thai rice flours on vermicelli quality. **Cereal Chem.** 79(4):481-485.
- ZeleznaK, K.J. and R.C. Hoseney. 1987. Characterization of starch from bread aged at different temperatures. **Starch.** 39: 231-233. Cited in Jouppila, H. and Y.H. Roos. 1997. The physical state of amorphous corn starch and its impact on crystallization. **Carbohydr. Polym.** 32: 95-104.
- Zobel, H.F. and A.M. Stephen. 1995. Starch: structure, analysis and application. pp. 19-66. In A.M. Stephen ed. **Food Polysaccharide and Their Applications**. Marcel Dekker. New York.

**ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก  
อุปกรณ์การทำเส้นก๋วยเตี๋ยว

## อุปกรณ์การทำก้วยเตี่ยว



ภาพผนวกที่ ก1 อุปกรณ์การทำก้วยเตี่ยว

จากภาคผนวกที่ 1 อุปกรณ์สำหรับทำก้วยเตี่ยวประกอบด้วย หม้อและฝาสำหรับนึ่ง สะติงและกรอบสีเหลี่ยมที่ทำจากอะลูมิเนียม ผ้าขาว ตะแกรงสำหรับฟุ้งแผ่นก้วยเตี่ยว กระบอ กตวงน้ำแป้ง พายพลาสติกและมีดสำหรับแชะแผ่นแป้ง

**ภาคผนวก ข**  
**การวิเคราะห์สมบัติ**

## การวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้งข้าว

### ข1 . การหาปริมาณความชื้น (AACC, 2000)

#### 1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1.1.1 ตู้อบลมร้อน (hot air oven)
- 1.1.2 ภาชนะใส่ตัวอย่าง (moisture can) ทำด้วยอลูมิเนียม
- 1.1.3 เดซิกเคเตอร์ (desiccator)

#### 1.2 วิธีวิเคราะห์

ทำแห้งภาชนะใส่ตัวอย่างพร้อมฝา ในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำมาใส่ในเดซิกเคเตอร์ทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอน

ชั่งตัวอย่างแป้งในภาชนะใส่ตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 2-3 กรัม นำไปใส่ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงโดยเปิดฝาภาชนะไว้ เมื่อครบเวลาแล้วนำออกจากตู้อบ ปิดฝาภาชนะและนำมาใส่ในเดซิกเคเตอร์ทันที ทิ้งไว้ให้เย็น จนถึงอุณหภูมิห้อง (ปกติ 45-60 นาที) แล้วจึงนำไปชั่ง คำนวณปริมาณความชื้นจากน้ำหนักที่หายไป โดยที่ A เป็นน้ำหนักที่หายไป (กรัม) และ B เป็นน้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม) ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น (moisture)} = (A/B) \times 100$$

### ข2. การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส (apparent amylose) (Juliano, 1971)

#### 2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 2.1.1 ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
- 2.1.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectronic 22)
- 2.1.3 เครื่องชั่งละเอียด
- 2.1.4 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

## 2.2 สารเคมี

2.2.1 เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) 95 เปอร์เซ็นต์

2.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 นอร์มัล เตรียมโดยชั่ง NaOH หนัก 40 กรัม ละลายในน้ำกลั่นประมาณ 800 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1 ลิตร

2.2.3 กรดแอซิติกล้วน (glacial acetic acid) ความเข้มข้น 1 นอร์มัล เตรียมโดยตวงกรดแอซิติกล้วนเข้มข้นปริมาตร 60 มิลลิลิตร ใส่ลงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1 ลิตร

2.2.4 แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (pure potato amylose) ยี่ห้อ sigma, USA

2.2.5 สารละลายไอโอดีน เตรียมโดยชั่งไอโอดีน ( $I_2$ ) 0.2 กรัม และโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2.0 กรัม ผสมสารทั้งสองให้เข้ากันแล้วละลายในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ควรเก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา

## 2.3 วิธีการวิเคราะห์

2.3.1 ชั่งตัวอย่างแบ่ง 0.1000 กรัม ใส่ในขวด (flask) ขนาด 50 มิลลิลิตรที่แห้งสนิท

2.3.2 เติมเอทิลแอลกอฮอล์ 1 มิลลิลิตร เขย่าเบา ๆ เพื่อเกลี่ยแบ่งให้กระจายออก ระวังอย่าให้แบ่งขึ้นมากะตามผนังขวด

2.3.3 เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล จำนวน 9 มิลลิลิตร พร้อมทั้งล้างแบ่งที่เกาะอยู่ตามผนังขวด

2.3.4 นำแบ่งไปให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

2.3.5 ถ่ายแบ่งลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยใช้น้ำล้าง 2-3 ครั้งเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร และผสมให้เข้ากัน

2.3.6 ตูบน้ำแบ่งปริมาณ 5 มิลลิลิตร ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

2.3.7 เติมกรดแอซิติกล้วนความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน จำนวน 2 มิลลิลิตร

2.3.8 เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที

2.3.9 ทำแบลนด์ (blank) โดยนำขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรมาเติมกรดแอซิติกล้วน ความเข้มข้น 1 นอร์มัล 2 มิลลิลิตร และเติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร

2.3.10 วัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร (nm) โดยปรับค่าของแบลนด์เป็น 0

2.3.11 นำค่าการดูดกลืนแสงไปคำนวณหาค่าปริมาณแอมิโลสโดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน

## 2.4 การเขียนกราฟมาตรฐาน (standard curve)

2.4.1 ชั่งแอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่งจำนวน 0.0400 กรัม ใส่ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และดำเนินการเช่นเดียวกับข้อ 2.3.2-2.3.4 แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ใช้เป็นสารละลายมาตรฐาน

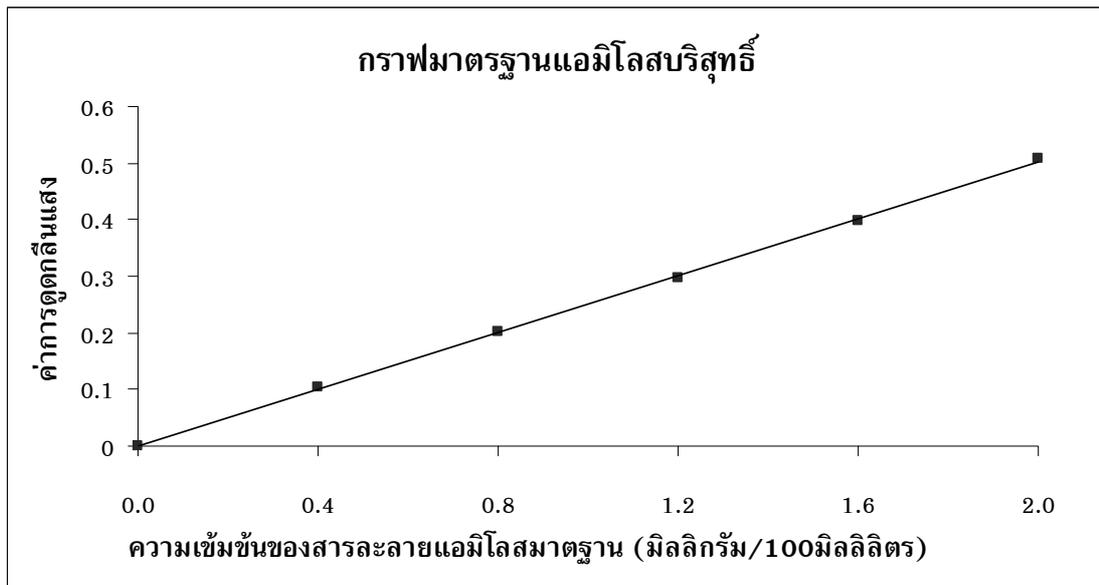
2.4.2 ปิเปตแบ่งสารละลายมาตรฐาน 1 2 3 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดกำหนดปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมกรดแอสติกกลั่น ความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาณ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ลงในขวดแก้วที่มีสารละลายมาตรฐานตามลำดับ เติมสารละลายไอโอดีน 2.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยการเติมน้ำกลั่น เขย่าและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที

2.4.3 วัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร (nm)

2.4.4 เขียนกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายแอมิโลสมาตรฐาน (แกน X) และค่าการดูดกลืนแสง (แกน Y)

## 2.5 วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของปริมาณแอมิโลส} = \frac{\text{ความเข้มข้นที่อ่านได้จากสารละลายแอมิโลสมาตรฐาน} \times 10 \text{ (มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)}}{5 \times \text{น้ำหนักแบ่งแห้ง (กรัม)}}$$



ภาพผนวกที่ ข1 ปริมาณแอมิโลสและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน

**ข3 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส (การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากเครื่องมือ  
เปรียบเทียบกับค่าทางประสาทสัมผัส)**

**การทดสอบทางประสาทสัมผัส แผ่นก๊วยเตี๋ยวจันทน์**

ชื่อ-สกุล ..... วันที่ .....

**คำอธิบาย** กัดใบมีดลงบนตั้งตัวอย่าง ประมาณ 8 มิลลิเมตร แล้วให้ดึงใบมีดขึ้น

ให้คะแนนความแข็ง โดย

- |                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| 1 = ตัดขาดยากมาก       | 5 = ตัดขาดง่าย        |
| 2 = ตัดขาดยากปานกลาง   | 6 = ตัดขาดง่ายปานกลาง |
| 3 = ตัดขาดยากเล็กน้อย  | 7 = ตัดขาดง่ายมาก     |
| 4 = ตัดขาดง่ายเล็กน้อย |                       |

ให้คะแนนความเหนียวติดใบมีด โดย

- |                       |                      |
|-----------------------|----------------------|
| 1 = ติดใบมีดมากที่สุด | 4 = ติดใบมีดเล็กน้อย |
| 2 = ติดใบมีดมาก       | 5 = ไม่ติดใบมีดเลย   |
| 3 = ติดใบมีดปานกลาง   |                      |

ตัวอย่าง ..... ..

ความแข็ง ..... ..

ความเหนียว ..... ..

#### ข4 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Bernfeld, 1951, 1955)

##### 4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

4.1.1 ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

4.1.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectronic 22)

4.1.3 เครื่องชั่งละเอียด

4.1.4 เต้าไฟฟ้า

##### 4.2 สารเคมี

4.2.1 3,5-ไดไนโตรซาลิไซลิก (3,5-dinitrosalicylic)

4.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2 นอร์มัล เตรียมโดยชั่ง NaOH น้ก 8 กรัม ละลายในน้ำกลั่นประมาณ 100 มิลลิลิตร

4.2.3 โพแทสเซียมโซเดียมทาร์เทรต (potassium sodium tartrate)

4.2.4 มอลโตสบริสุทธี

##### 4.3 การเตรียม 3,5-ไดไนโตรซาลิไซเลต รีเอเจนต์

4.3.1 ละลายกรด 3,5-ไดไนโตรซาลิไซลิก น้ก 5 กรัม ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 2 นอร์มอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

4.3.2 เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร

4.3.3 เติมโพแทสเซียมโซเดียมทาร์เทรต น้ก 150 กรัม แล้วปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร

##### 4.4 การวิเคราะห์

4.4.1 ปิเปตต์ 3,5-ไดไนโตรซาลิไซเลต รีเอเจนต์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดสอบ

4.4.2 เติมสารละลายที่ได้จากการย่อยสตาร์ชในแป้งปริมาตร 2 มิลลิลิตร (มีระดับความเข้มข้นเทียบเท่ากับกลูโคส 0.2-2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) ผสมให้เข้ากัน

4.4.3 นำสารละลายไปให้ความร้อนในน้ำเดือดเป็นเวลานาน 5 นาที แล้วนำหลอดทดสอบมาแช่ในน้ำเย็นทันที เพื่อลดอุณหภูมิลง

4.4.4 เติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร เขย่าให้ผสมกัน

4.4.5 ทำแบลงค์ (blank) โดยใช้ น้ำกลั่น แทนตัวอย่าง แล้วดำเนินการเตรียม เช่นเดียวกับตัวอย่าง

4.4.6 นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับแบลงค์

4.4.7 นำค่าการดูดกลืนแสงไปคำนวณหาค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยเทียบกับ กราฟมาตรฐาน

#### 4.5 การเขียนกราฟมาตรฐาน (standard curve)

4.5.1 ชั่งมอลโตส 0.5000 กรัม ละลายน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร

4.5.2 ปิเปตสารละลายนี้มา 10 30 50 70 และ 90 มิลลิลิตร ลงในขวดกำหนด ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบด้วยน้ำกลั่น สารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้นของ มอลโตสเป็น 0.2 0.6 1.0 1.4 และ 1.8 มิลลิกรัม/2 มิลลิลิตร ส่วนสารละลายมอลโตสเข้มข้น 0.5 กรัมต่อ 500 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นเท่ากับ 2 มิลลิกรัม/2 มิลลิลิตร

4.5.3 ปิเปตต์ 3,5 ไดโนโตรซาลิไซเลต รีเอเจนต์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอด ทดสอบ เติมสารละลายมอลโตรมาตรฐานความเข้มข้น 0.2 0.6 1.0 1.4 1.8 และ 2.0 มิลลิกรัม/2 มิลลิลิตร ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน

4.5.4 นำสารละลายไปให้ความร้อนในน้ำเดือดเป็นเวลานาน 5 นาที แล้วนำหลอด ทดสอบมาแช่ในน้ำเย็นทันที เพื่อลดอุณหภูมิลง

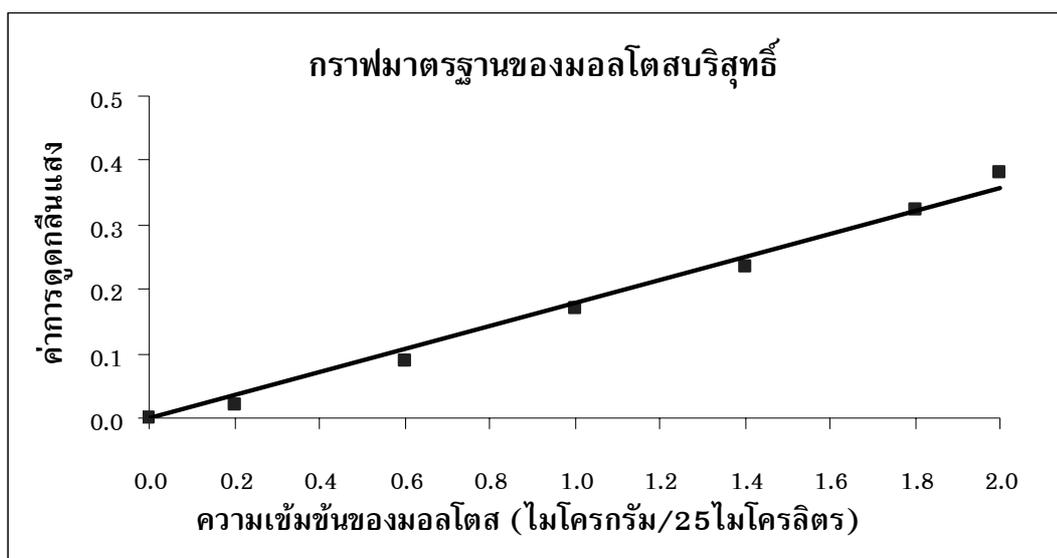
4.5.5 เติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร เขย่าให้ผสมกัน

4.5.6 นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับแบลงค์

4.5.7 เขียนกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมอลโตสมาตรฐาน (แกน X) และค่าการดูดกลืนแสง (แกน Y)

#### 4.6 วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์คำนวณเป็นมอลโตส} = \frac{\text{ปริมาณมอลโตส (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักแบ่งแห้ง (กรัม)}}$$



ภาพผนวกที่ ข4 ปริมาณมอลโตสและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน

## ข5 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก

### 5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, JEOL, JDX-3530, Japan)

### 5.2 วิธีการวิเคราะห์

5.2.1 เตรียมผงแผ่นแป้งกัวยเตี้ยวสด และแผ่นแป้งกัวยเตี้ยวที่ผ่านการบ่ม ด้วยการทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่แข็ง (freeze dryer) โดยใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นสารให้ความเย็น เมื่อแผ่นแป้งกัวยเตี้ยวแห้งสนิท บดให้ละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช

5.2.2 นำผงแป้งที่ได้เก็บในภาชนะปิดที่ภายในมีสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตอิ่มตัวบรรจุอยู่ เป็นเวลา 7 วัน เพื่อให้ตัวอย่างมีความชื้นใกล้เคียงกัน (ประมาณร้อยละ 9)

5.2.3 บรรจุแป้งที่ปรับความชื้นแล้วลงในที่บรรจุตัวอย่างซึ่งทำจากแผ่นซิลิกา ซึ่งมีความเป็นผลึกเป็นศูนย์ โดยต้องเกลี่ยผิวหน้าของตัวอย่างให้เรียบ

5.2.4 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้งด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ใช้ Target เป็นทองแดง (Cu) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ เริ่มสแกนที่มุมหักเหช่วง 5.00 ถึง 40.00 องศา 2 theta โดยมีการเพิ่มมุม 0.04 องศาต่อขั้น และมีอัตราการเพิ่มมุม 3 วินาทีต่อขั้น

5.2.5 บันทึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้ และคำนวณค่าร้อยละของความเป็นผลึกโดยเปรียบเทียบ (Relative crystallinity)

### 5.3 สถานที่วิเคราะห์

ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์แฟรกชันและอิเล็กทรอนิกส์ฟลูออเรสเซนส์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

## ข6 การตรวจสอบลักษณะเนื้อเจลบริเวณรอยตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

6.1.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (JEOL, JSM-5600LV, England)

6.1.2 แท่ง aluminium stub ที่ติดกาวสองหน้าชนิดบาง

6.1.3 เครื่องเคลือบทอง (Ion-coater IB-2)

### 6.2 วิธีการวิเคราะห์

6.2.1 นำแผ่นแป่งกาวเดี่ยวที่ผ่านการไล่น้ำออกแล้ว มาวางบนเทปกาวสองหน้าที่ตั้งอยู่บนแท่ง aluminium stub

6.2.2 นำแท่ง aluminium stub ที่ติดตัวอย่างแล้วเข้าเครื่องเคลือบทอง เพื่อเคลือบทองลงที่ผิวหน้าของตัวอย่าง สำหรับช่วยในการนำประจุอิเล็กตรอน

6.2.3 วางแท่ง aluminium stub ที่ผ่านการเคลือบทองแล้วลงในช่องสำหรับใส่แท่ง aluminium stub ภายในตัวกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

6.2.4 ตรวจสอบลักษณะเนื้อเจลบริเวณรอยตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยควบคุมสภาวะการทดลองที่ค่าอัตราเร่งความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 กิโลโวลต์ และใช้กำลังขยายที่ 35 และ 2000 เท่า

6.2.5 คัดเลือกเนื้อเจลบริเวณที่ต้องการบันทึกภาพ ปรับโฟกัสให้ชัดแล้วจึงบันทึกภาพลงบนแผ่นซีดี

### 6.3 สถานที่วิเคราะห์

หน่วยงานกลังจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ฝ่ายเครื่องมือวิทยาศาสตร์กลาง สถาบันวิจัย  
และพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## ข7 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส (เส้นก๋วยเตี๋ยว)

### แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส

ชื่อผู้ทดสอบ ..... วันที่ .....

ผลิตภัณฑ์ เส้นก๋วยเตี๋ยวจันทน์พร้อมรับประทาน

#### คำแนะนำ

ทดลองดื่งตัวอย่าง “C” แล้วจึงทดสอบตัวอย่าง กรุณาบอกขนาดของความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง “C” ตามสเกลข้างล่าง

- 0 = ไม่แตกต่าง  
 1 = แตกต่างเล็กน้อย  
 2 = แตกต่างปานกลาง  
 3 = แตกต่างมาก  
 4 = แตกต่างมากที่สุด

รหัสตัวอย่าง .....

ความยืดหยุ่น .....

ความเหนียว .....

ความนุ่มละ .....

#### หมายเหตุ

ความยืดหยุ่น สังเกตจากความยาวที่เส้นก๋วยเตี๋ยวสามารถยืดได้เมื่อทำการดึง ถ้ายืดได้มาก แสดงว่ามีความยืดหยุ่นสูง

ความเหนียว สังเกตจากความเหนียวติดมือ หรือการที่เส้นก๋วยเตี๋ยวติดกัน

ความนุ่มละ พิจารณาจากความรู้สึกเมื่อทำการบิบบเส้นก๋วยเตี๋ยว

**ภาคผนวก ค**  
**กราฟและผลการทดลอง**

**ค1 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งของแผ่นแป้งก๊วยเตี๋ยวจันทน์บ่ม**

ตารางผนวกที่ ค1 ค่าความแน่นแข็ง (นิวตัน) เมื่อบ่มแผ่นแป้งที่อุณหภูมิ และระยะเวลาต่าง ๆ

| เวลาบ่ม(ชม.) | อุณหภูมิการบ่ม (องศาเซลเซียส) |                |                 |                 |                |
|--------------|-------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
|              | 0                             | 5              | 10              | 20              | 30             |
| 0            | 17.66aAB ± 1.77               | 17.65aC ± 1.09 | 16.34aA ± 1.73  | 18.99aBC ± 1.29 | 16.74bA ± 2.02 |
| 1.5          | 26.37bA ± 3.68                | 22.73bB ± 1.32 | 21.02bcB ± 6.05 | 20.74bB ± 0.43  | 16.57bC ± 2.21 |
| 3            | 27.45bcA ± 0.34               | 22.82bB ± 1.61 | 23.40bcB ± 2.66 | 20.89bC ± 0.78  | 16.85bD ± 0.85 |
| 6            | 26.18bA ± 2.31                | 22.25bB ± 1.07 | 21.81bcB ± 0.77 | 19.90abC ± 0.39 | 16.80bD ± 0.91 |
| 9            | 26.97bA ± 1.07                | 22.59bB ± 0.33 | 22.44bB ± 0.49  | 18.67aC ± 1.95  | 15.96bD ± 1.36 |
| 12           | 28.88cA ± 0.48                | 22.91bB ± 0.56 | 23.85cB ± 1.68  | 18.56aC ± 0.80  | 14.36aD ± 1.34 |
| 24           | 41.18dA ± 1.63                | 30.86cB ± 1.32 | 24.48cC ± 4.27  | 25.69cC ± 5.42  | 16.85bD ± 0.69 |

หมายเหตุ \* ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 7 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
 \* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)  
 \* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

**ค2 ผลของการทำรอบอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงความแน่นแข็งของแผ่นแป้งกล้วยเดี่ยว  
จันทน์**

ตารางผนวกที่ ค2 ค่าความแน่นแข็งเมื่อบ่มแผ่นแป้งแบบต่าง ๆ

| เวลาบ่ม<br>(ชม.) | อุณหภูมิการบ่ม (องศาเซลเซียส) |                |                   |
|------------------|-------------------------------|----------------|-------------------|
|                  | 0                             | 20             | บ่มแบบรอบอุณหภูมิ |
| 0                | 17.66aA ± 1.77                | 18.99aA ± 1.29 | 18.24aA ± 0.65    |
| 1.5              | 26.37bA ± 3.68                | 20.74bB ± 0.43 | 20.50bB ± 1.20    |
| 3                | 27.45bcA ± 0.34               | 20.89bB ± 0.78 | 20.57bB ± 0.01    |

หมายเหตุ

- \* ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 7 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- \* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )
- \* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

**ค3 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์แผ่นแป้งกล้วยเดี่ยวจันทน์บ่ม**

**ตารางผนวกที่ ค3** การเปลี่ยนแปลงความไวต่อเอนไซม์เมื่อบ่มแผ่นแป้งที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ

| เวลาบ่ม (ชม.) | อุณหภูมิการบ่ม (องศาเซลเซียส) |                 |                 |                  |                 |
|---------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
|               | 0                             | 5               | 10              | 20               | 30              |
| 0             | 7.14aA ± 0.15                 | 7.25aA ± 0.18   | 7.16aA ± 0.11   | 7.12aA ± 0.22    | 7.06aA ± 0.17   |
| 3             | 7.11aA ± 0.06                 | 7.23aA ± 0.21   | 7.06abA ± 0.08  | 7.01abA ± 0.24   | 7.05aA ± 0.25   |
| 6             | 6.82bAC ± 0.24                | 7.09abB ± 0.14  | 7.01bABC ± 0.07 | 6.97abABC ± 0.28 | 7.06aABC ± 0.12 |
| 9             | 6.75bA ± 0.15                 | 6.90bcAB ± 0.14 | 7.00bB ± 0.05   | 6.73bcA ± 0.14   | 7.02aB ± 0.20   |
| 12            | 6.67bAB ± 0.26                | 6.80cdAC ± 0.19 | 6.99bC ± 0.06   | 6.56cB ± 0.27    | 6.97aC ± 0.07   |
| 24            | 6.70bA ± 0.26                 | 6.57dA ± 0.29   | 6.80cAB ± 0.15  | 6.67cA ± 0.24    | 6.99aB ± 0.11   |

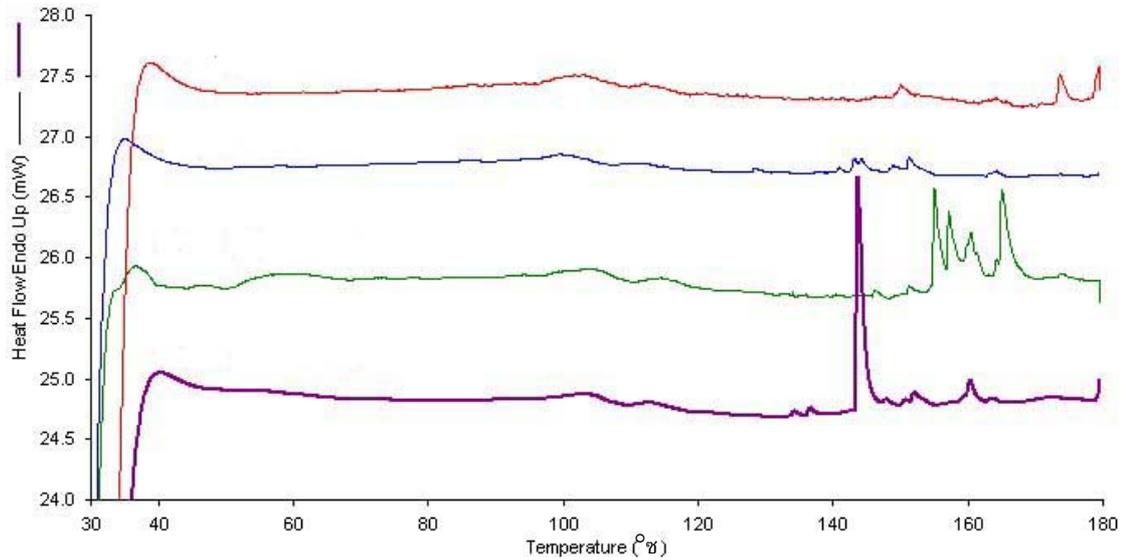
**หมายเหตุ**

\* ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำจาก 2 ตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

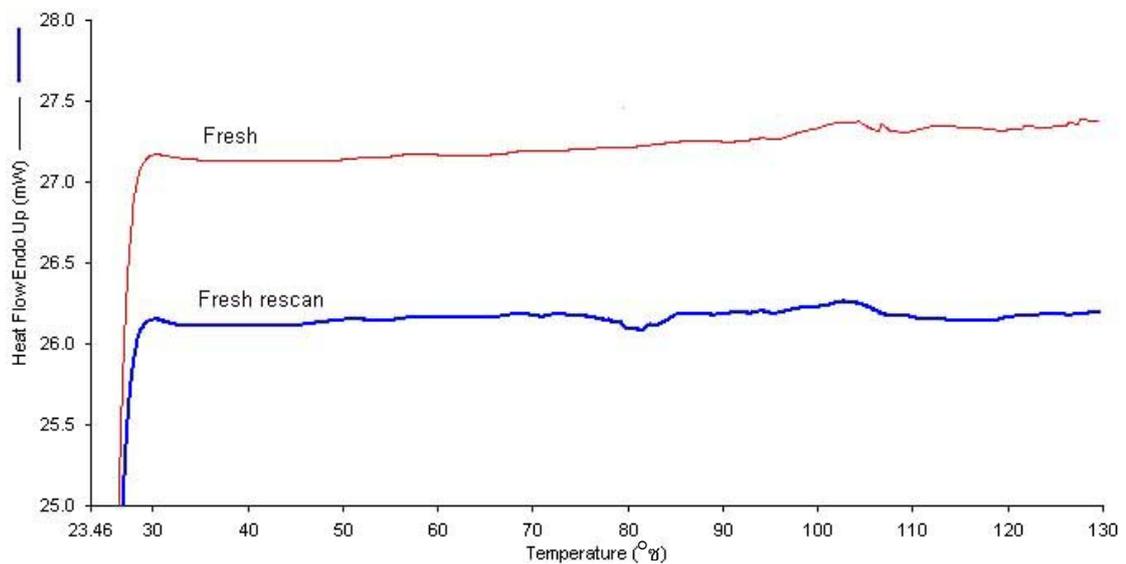
\* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

\* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

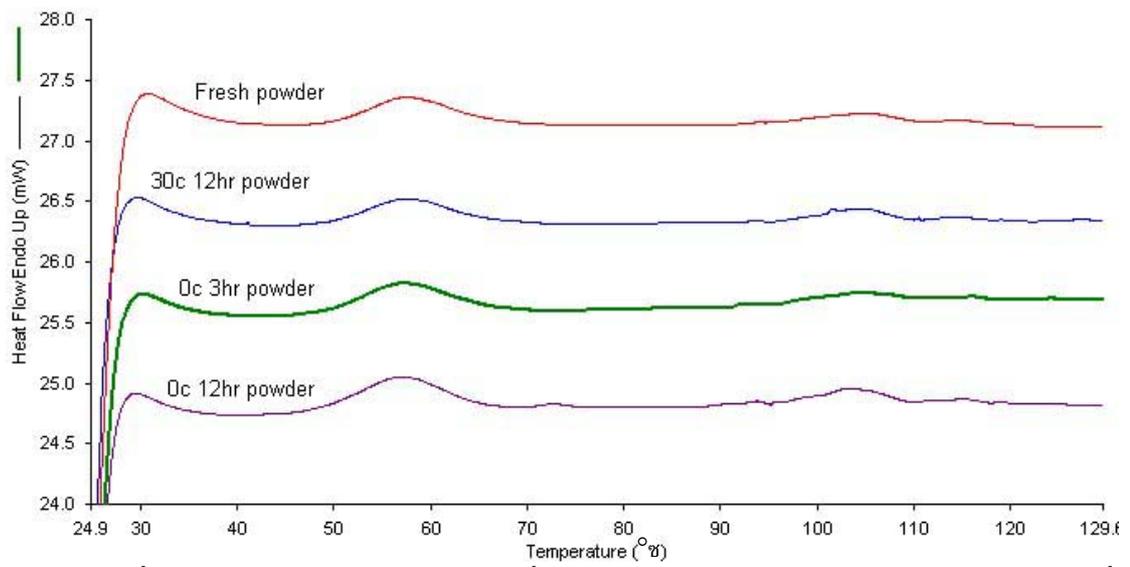
#### ค4 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน



ภาพผนวกที่ ค4 กราฟการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของตัวอย่าง เมื่อทดสอบถึงอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ค5 กราฟการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างเมื่อทดสอบซ้ำ



ภาพผนวกที่ ค6 กราฟการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของผงแผ่นแป้งบ่มที่ อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

**ภาคผนวก ง**  
**การวิเคราะห์ผลทางสถิติ**

ตารางผนวกที่ ๑1 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแน่นแข็ง  
เมื่อบ่มแผ่นแป้งเป็นระยะเวลาต่าง ๆ \*

|             | Source    | Degree of Freedom (df) | Sum of Squares (SS) | Mean Square (MS) | F-value | p-value |
|-------------|-----------|------------------------|---------------------|------------------|---------|---------|
| 0 ชั่วโมง   | Treatment | 4                      | 137.835             | 34.459           | 9.266   | 0.000   |
|             | Error     | 65                     | 241.721             | 3.719            |         |         |
|             | Total     | 69                     | 379.557             |                  |         |         |
| 1.5 ชั่วโมง | Treatment | 4                      | 705.430             | 176.358          | 22.949  | 0.000   |
|             | Error     | 65                     | 499.516             | 7.685            |         |         |
|             | Total     | 69                     | 1204.946            |                  |         |         |
| 3 ชั่วโมง   | Treatment | 4                      | 386.514             | 209.129          | 56.080  | 0.000   |
|             | Error     | 65                     | 242.393             | 3.729            |         |         |
|             | Total     | 69                     | 1078.907            |                  |         |         |
| 6 ชั่วโมง   | Treatment | 4                      | 660.178             | 165.044          | 66.601  | 0.000   |
|             | Error     | 65                     | 161.078             | 2.478            |         |         |
|             | Total     | 69                     | 821.256             |                  |         |         |
| 9 ชั่วโมง   | Treatment | 4                      | 988.544             | 247.136          | 106.590 | 0.000   |
|             | Error     | 65                     | 150.707             | 2.319            |         |         |
|             | Total     | 69                     | 1139.251            |                  |         |         |
| 12 ชั่วโมง  | Treatment | 4                      | 1698.695            | 424.674          | 188.011 | 0.000   |
|             | Error     | 65                     | 146.820             | 2.259            |         |         |
|             | Total     | 69                     | 1845.515            |                  |         |         |
| 24 ชั่วโมง  | Treatment | 4                      | 4534.138            | 124.033          | 124.033 | 0.000   |
|             | Error     | 65                     | 594.035             | 9.139            |         |         |
|             | Total     | 69                     | 5128.172            |                  |         |         |

หมายเหตุ \* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ )

ตารางผนวกที่ ๑2 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแน่นแข็ง  
เมื่อบ่มแผ่นแป้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ \*

|                | Source    | Degree of Freedom (df) | Sum of Squares (SS) | Mean Square (MS) | F-value | p-value |
|----------------|-----------|------------------------|---------------------|------------------|---------|---------|
| 0 องศาเซลเซียส | Treatment | 6                      | 4041.053            | 673.509          | 126.298 | 0.000   |
|                | Error     | 91                     | 482.866             | 5.306            |         |         |
|                | Total     | 97                     | 4523.919            |                  |         |         |

|                     | Source    | Degree of Freedom (df) | Sum of Squares (SS) | Mean Square (MS) | F-value | p-value |
|---------------------|-----------|------------------------|---------------------|------------------|---------|---------|
| 5 องศา<br>เซลเซียส  | Treatment | 6                      | 1275.641            | 212.607          | 61.394  | 0.000   |
|                     | Error     | 91                     | 315.133             | 3.463            |         |         |
|                     | Total     | 97                     | 1590.774            |                  |         |         |
| 10 องศา<br>เซลเซียส | Treatment | 6                      | 740.051             | 123.342          | 20.237  | 0.000   |
|                     | Error     | 91                     | 554.626             | 6.095            |         |         |
|                     | Total     | 97                     | 1294.677            |                  |         |         |
| 20 องศา<br>เซลเซียส | Treatment | 6                      | 516.927             | 86.154           | 20.355  | 0.000   |
|                     | Error     | 91                     | 385.164             | 4.233            |         |         |
|                     | Total     | 97                     | 902.090             |                  |         |         |
| 30 องศา<br>เซลเซียส | Treatment | 6                      | 69.736              | 11.623           | 5.876   | 0.000   |
|                     | Error     | 91                     | 180.000             | 1.978            |         |         |
|                     | Total     | 97                     | 249.736             |                  |         |         |

หมายเหตุ \* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p \leq 0.05$ )

ตารางผนวกที่ 3 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแน่นแข็ง  
เมื่อบ่มแผ่นแข็งแบบคงอุณหภูมิบ่ม และแบบรอบอุณหภูมิเป็นระยะเวลา  
ต่าง ๆ \*

|             | Source    | Degree of Freedom (df) | Sum of Squares (SS) | Mean Square (MS) | F-value | p-value |
|-------------|-----------|------------------------|---------------------|------------------|---------|---------|
| 0 ชั่วโมง   | Treatment | 2                      | 12.475              | 6.238            | 1.897   | 0.164   |
|             | Error     | 39                     | 128.254             | 3.289            |         |         |
|             | Total     | 41                     | 140.729             |                  |         |         |
| 1.5 ชั่วโมง | Treatment | 2                      | 309.063             | 154.532          | 39.522  | 0.000   |
|             | Error     | 39                     | 152.491             | 3.910            |         |         |
|             | Total     | 41                     | 461.555             |                  |         |         |
| 3 ชั่วโมง   | Treatment | 2                      | 423.056             | 211.528          | 103.410 | 0.000   |
|             | Error     | 39                     | 79.776              | 2.046            |         |         |
|             | Total     | 41                     | 502.832             |                  |         |         |

หมายเหตุ \* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p \leq 0.05$ )

ตารางผนวกที่ 4 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแน่นแข็ง  
เมื่อบ่มแผ่นแป้งแบบรอบอุณหภูมิ\*

| Source    | Degree of Freedom (df) | Sum of Squares (SS) | Mean Square (MS) | F-value | p-value |
|-----------|------------------------|---------------------|------------------|---------|---------|
| Treatment | 2                      | 48.808              | 24.404           | 14.648  | 0.000   |
| Error     | 39                     | 64.973              | 1.666            |         |         |
| Total     | 41                     | 113.781             |                  |         |         |

หมายเหตุ \* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ )

ตารางผนวกที่ 5 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณน้ำตาล  
รีดิวซ์เมื่อบ่มแผ่นแป้งเป็นระยะเวลาต่าง ๆ \*

|            | Source    | Degree of Freedom (df) | Sum of Squares (SS) | Mean Square (MS)       | F-value | p-value |
|------------|-----------|------------------------|---------------------|------------------------|---------|---------|
| 0 ชั่วโมง  | Treatment | 4                      | 0.121               | $3.031 \times 10^{-2}$ | 1.058   | 0.398   |
|            | Error     | 25                     | 0.716               | $2.864 \times 10^{-2}$ |         |         |
|            | Total     | 29                     | 0.837               |                        |         |         |
| 3 ชั่วโมง  | Treatment | 4                      | 0.176               | $4.404 \times 10^{-2}$ | 1.290   | 0.301   |
|            | Error     | 25                     | 0.854               | $3.415 \times 10^{-2}$ |         |         |
|            | Total     | 29                     | 1.030               |                        |         |         |
| 6 ชั่วโมง  | Treatment | 4                      | 0.270               | $6.757 \times 10^{-2}$ | 1.912   | 0.140   |
|            | Error     | 25                     | 0.883               | $3.534 \times 10^{-2}$ |         |         |
|            | Total     | 29                     | 1.154               |                        |         |         |
| 9 ชั่วโมง  | Treatment | 4                      | 0.447               | $0.112^2$              | 4.785   | 0.005   |
|            | Error     | 25                     | 0.584               | $2.336 \times 10^{-2}$ |         |         |
|            | Total     | 29                     | 1.031               |                        |         |         |
| 12 ชั่วโมง | Treatment | 4                      | 0.827               | 0.270                  | 5.620   | 0.002   |
|            | Error     | 25                     | 0.920               | $3.678 \times 10^{-2}$ |         |         |
|            | Total     | 29                     | 1.746               |                        |         |         |
| 24 ชั่วโมง | Treatment | 4                      | 0.619               | 0.155                  | 3.147   | 0.032   |
|            | Error     | 25                     | 1.229               | $4.916 \times 10^{-2}$ |         |         |
|            | Total     | 29                     | 1.848               |                        |         |         |

หมายเหตุ \* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ )

ตารางผนวกที่ ๖ ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณน้ำตาล  
รีดิวซ์เมื่อบ่มแผ่นแป้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ \*

|                     | Source    | Degree of Freedom (df) | Sum of Squares (SS)    | Mean Square (MS)       | F-value | p-value |
|---------------------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|---------|---------|
| 0 องศา<br>เซลเซียส  | Treatment | 5                      | 1.305                  | 0.261                  | 6.280   | 0.000   |
|                     | Error     | 30                     | 1.247                  | $4.158 \times 10^{-2}$ |         |         |
|                     | Total     | 35                     | 2.553                  |                        |         |         |
| 5 องศา<br>เซลเซียส  | Treatment | 5                      | 2.141                  | 0.428                  | 10.712  | 0.000   |
|                     | Error     | 30                     | 1.199                  | $3.998 \times 10^{-2}$ |         |         |
|                     | Total     | 35                     | 3.341                  |                        |         |         |
| 10 องศา<br>เซลเซียส | Treatment | 5                      | 0.405                  | $8.096 \times 10^{-2}$ | 9.413   | 0.000   |
|                     | Error     | 30                     | 0.258                  | $8.601 \times 10^{-3}$ |         |         |
|                     | Total     | 35                     | 0.663                  |                        |         |         |
| 20 องศา<br>เซลเซียส | Treatment | 5                      | 1.446                  | 0.289                  | 5.158   | 0.002   |
|                     | Error     | 30                     | 1.682                  | $5.606 \times 10^{-2}$ |         |         |
|                     | Total     | 35                     | 3.128                  |                        |         |         |
| 30 องศา<br>เซลเซียส | Treatment | 5                      | $4.146 \times 10^{-2}$ | $8.291 \times 10^{-3}$ | 0.311   | 0.902   |
|                     | Error     | 30                     | 0.800                  | $2.665 \times 10^{-2}$ |         |         |
|                     | Total     | 35                     | 0.841                  |                        |         |         |

หมายเหตุ \* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ )

ตารางผนวกที่ ๗ ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติทางความร้อนของแผ่นแป้งบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ พิกที่ 1\*

|    | Source    | Degree of Freedom (df) | Sum of Squares (SS) | Mean Square (MS) | F-value   | p-value |
|----|-----------|------------------------|---------------------|------------------|-----------|---------|
| To | Treatment | 3                      | 4700.980            | 1566.993         | 423.647   | 0.000   |
|    | Error     | 4                      | 14.795              | 3.699            |           |         |
|    | Total     | 7                      | 4715.776            |                  |           |         |
| Tp | Treatment | 3                      | 6910.648            | 2303.549         | 189.672   | 0.000   |
|    | Error     | 4                      | 48.580              | 12.145           |           |         |
|    | Total     | 7                      | 6959.227            |                  |           |         |
| Tc | Treatment | 3                      | 8052.022            | 2684.007         | 16497.653 | 0.000   |
|    | Error     | 4                      | 0.651               | 0.163            |           |         |
|    | Total     | 7                      | 8052.673            |                  |           |         |

|            | Source    | Degree of Freedom (df) | Sum of Squares (SS) | Mean Square (MS) | F-value | p-value |
|------------|-----------|------------------------|---------------------|------------------|---------|---------|
| Tc-To      | Treatment | 3                      | 449.008             | 149.669          | 49.117  | 0.001   |
|            | Error     | 4                      | 12.189              | 3.047            |         |         |
|            | Total     | 7                      | 461.196             |                  |         |         |
| $\Delta H$ | Treatment | 3                      | 3.768               | 1.256            | 9.380   | 0.028   |
|            | Error     | 4                      | 0.536               | 0.134            |         |         |
|            | Total     | 7                      | 4.304               |                  |         |         |

หมายเหตุ \* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p \leq 0.05$ )

ตารางผนวกที่ 8 ความแปรปรวน (ANOVA) จากการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติทางความร้อนของแผ่นแปงบ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ พืชที่ 2\*

|            | Source    | Degree of Freedom (df) | Sum of Squares (SS) | Mean Square (MS) | F-value | p-value |
|------------|-----------|------------------------|---------------------|------------------|---------|---------|
| To         | Treatment | 3                      | 31.135              | 10.378           | 5.542   | 0.066   |
|            | Error     | 4                      | 7.491               | 1.873            |         |         |
|            | Total     | 7                      | 38.626              |                  |         |         |
| Tp         | Treatment | 3                      | 21.743              | 7.248            | 1.063   | 0.458   |
|            | Error     | 4                      | 27.264              | 6.816            |         |         |
|            | Total     | 7                      | 49.007              |                  |         |         |
| Tc         | Treatment | 3                      | 11.459              | 3.820            | 5.291   | 0.071   |
|            | Error     | 4                      | 2.888               | 0.722            |         |         |
|            | Total     | 7                      | 14.347              |                  |         |         |
| Tc-To      | Treatment | 3                      | 449.008             | 149.669          | 49.117  | 0.001   |
|            | Error     | 4                      | 12.189              | 3.047            |         |         |
|            | Total     | 7                      | 461.196             |                  |         |         |
| $\Delta H$ | Treatment | 3                      | 3.768               | 1.256            | 9.380   | 0.028   |
|            | Error     | 4                      | 0.536               | 0.134            |         |         |
|            | Total     | 7                      | 4.304               |                  |         |         |

หมายเหตุ \* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p \leq 0.05$ )

ตารางผนวกที่ 9 ความแปรปรวน (T-test) จากการวิเคราะห์ทางสถิติ ในการตรวจสอบเนื้อ  
สัมผัสด้วยการดึง\*

|                   |                            | df | SD   | MD    | T-test | sig. 2-<br>(tailed) | 95%   |       |
|-------------------|----------------------------|----|------|-------|--------|---------------------|-------|-------|
|                   |                            |    |      |       |        |                     | Upper | Lower |
| แรงดึง<br>สูงสุด  | Equal variances<br>assumed | 26 | 1.86 | -0.80 | -0.43  | 0.671               | 3.03  | -4.63 |
| ระยะทาง<br>สูงสุด | Equal variances<br>assumed | 26 | 1.00 | -3.94 | -3.97  | 0.001               | -1.90 | -5.97 |

หมายเหตุ \* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ )

ตารางผนวกที่ 10 ความแปรปรวน (T-test) จากการวิเคราะห์ทางสถิติ ในการตรวจสอบเนื้อ  
สัมผัสด้วยการกด\*

|                    |                            | df | SD   | MD     | T-test | sig. 2-<br>(tailed) | 95%   |        |
|--------------------|----------------------------|----|------|--------|--------|---------------------|-------|--------|
|                    |                            |    |      |        |        |                     | Upper | Lower  |
| แรงกด<br>สูงสุด    | Equal variances<br>assumed | 26 | 2.95 | -1.66  | 0.563  | 0.578               | 4.40  | -7.72  |
| พื้นที่ใต้<br>กราฟ | Equal variances<br>assumed | 26 | 9.14 | -24.38 | -2.667 | 0.013               | -5.58 | -43.18 |

หมายเหตุ \* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ )

ตารางผนวกที่ 11 ความแปรปรวน (T-test) จากการวิเคราะห์ทางสถิติ ในการตรวจสอบเนื้อ  
สัมผัสด้วยการทดสอบทางประสาทสัมผัส\*

|                   |                            | df | SD   | MD    | T-test | sig. 2-<br>(tailed) | 95%   |       |
|-------------------|----------------------------|----|------|-------|--------|---------------------|-------|-------|
|                   |                            |    |      |       |        |                     | Upper | Lower |
| ความ<br>ยืดหยุ่น  | Equal variances<br>assumed | 58 | 0.27 | -0.32 | -0.815 | 0.217               | 0.19  | -0.82 |
| ความนิ่ม<br>และ   | Equal variances<br>assumed | 58 | 0.30 | -0.33 | -1.116 | 0.269               | 0.26  | -0.93 |
| ความ<br>เหนียวติด | Equal variances<br>assumed | 58 | 0.25 | -0.22 | -1.248 | 0.419               | 0.32  | -0.75 |

หมายเหตุ \* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ )

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

|                      |   |
|----------------------|---|
| ชื่อ-นามสกุล         | นางสาวประจเวท สาดมาลี   |
| วัน เดือน ปีเกิด     | 1 มิถุนายน 2523   |
| สถานที่เกิด          | จังหวัดกรุงเทพมหานคร  |
| ประวัติการศึกษา      | วท.บ. (วิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ)<br>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2544)  |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ | - ทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา<br>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2546)<br>- ทุนวิจัยในโครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งด้านการวิจัยมหาวิทยาลัย<br>เกษตรศาสตร์ ประจำปี 2546/2547 (รหัส ส-ช (อก) 14.46)<br>จากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |