



ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลัง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลัง ได้ผลดังตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณโปรตีนของสตาร์ชมันสำปะหลังและปริมาณไขมันของสตาร์ชมันฝรั่งและมันสำปะหลังมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้ด้วยวิธี AOAC ตามภาคผนวก ก.2 และ ก.3 และเมื่อเปรียบเทียบกับงานของ Swinkle (1992) ที่วัดปริมาณโปรตีนและไขมันของสตาร์ชมันฝรั่งได้ค่อนข้างต่ำคือ 0.06 และ 0.05 % ตามลำดับ ในขณะที่งานของ Sriroth และคณะ (1998) วัดปริมาณโปรตีนและไขมันของสตาร์ชมันสำปะหลังได้ค่อนข้างต่ำเช่นกันคือ 0.13 และ 0.03% ตามลำดับ สตาร์ชมันสำปะหลังมี pH ค่อนข้างเป็นกรดเนื่องจากเป็นสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตในประเทศไทยที่มักจะใช้สาร sulphur dioxide ในขั้นตอนการสกัดสตาร์ชซึ่งเชื่อว่าจะแยกสตาร์ชออกจากสารเจือปนอื่น ๆ ได้เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยในการฟอกสีและเพิ่มสมบัติในด้านการต่อต้านจุลินทรีย์ (Sriroth และคณะ, 1998) และจากการหาปริมาณสตาร์ชพบว่าสตาร์ชทั้งสองชนิดมีปริมาณสตาร์ชสูงมากจัดเป็นสตาร์ชไม่ใช่แป้ง(flour)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชตัวอย่าง

องค์ประกอบทางเคมี <sup>a</sup>	สตาร์ชมันฝรั่ง	สตาร์ชมันสำปะหลัง
ความชื้น(%)	17.8368 ± 0.0230	11.5686 ± 0.0821
โปรตีน*(Nx6.25) (%)	0.0588 ± 0.0014	-
ไขมัน*(%)	-	-
เถ้า*(%)	0.3709 ± 0.0223	0.1250 ± 0.0164
ความเป็นกรดต่าง (pH)	7.463 ± 0.006	5.317 ± 0.012
สตาร์ช*(%)	98.912 ± 0.929	97.793 ± 1.162
อัมัยโลส*(%)	26.15 ± 1.51	18.79 ± 1.40
อัมัยโลเพกติน*(%)	73.85 ± 1.51	81.21 ± 1.40

a ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

\* ข้อมูลโดยน้ำหนักแห้ง (dry basis)

- หมายถึงวิเคราะห์ไม่ได้ตามวิธีของAOAC ตามภาคผนวก ก

## 4.2 การพัฒนาเครื่องมือทางแสงสำหรับวัดอุณหภูมิเจลาตินในเซชันโดยมีพื้นฐานจากเครื่อง Kofler hot stage microscope

แนวความคิดในการพัฒนาเครื่องมือทางแสงสำหรับวัดอุณหภูมิเจลาตินในเซชันของสตาร์ชได้มาจากเครื่อง Kofler hot stage microscope ซึ่งเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้กันมาเป็นเวลานานโดยอาศัยสมบัติ birefringence ของเม็ดสตาร์ชที่ค่อย ๆ เลื่อนหายไปในขณะที่สารแขวนลอยสตาร์ชได้รับความร้อน เป็นผลให้สายโมเลกุลของอัมยิลโอเพกตินภายในเม็ดสตาร์ชที่เคยจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบเริ่มห่างออกจากกันเนื่องจากมีโมเลกุลของน้ำแทรกตัวเข้าไปภายในและเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชและน้ำ ทำให้สูญเสียความเป็นระเบียบภายในโมเลกุลของเม็ดสตาร์ชและเสียลักษณะ birefringence ไป

### 4.2.1 วัดอุณหภูมิเจลาตินในเซชันของสตาร์ชตัวอย่างด้วยเครื่อง Kofler hot stage microscope

จากการทดลองเบื้องต้นเพื่อวัดอุณหภูมิเจลาตินในเซชันของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติด้วยเครื่อง Kofler hot stage microscope เพื่อศึกษาถึงข้อดีและนำมาใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องมือที่จะสร้างขึ้นได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเจลาตินในเซชันของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังที่วัดด้วยเครื่อง Kofler hot stage microscope<sup>a</sup>

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเจลาตินในเซชัน (°C)*		
	เริ่มต้น	กึ่งกลาง	สิ้นสุด
สตาร์ชมันฝรั่ง	67.7 ± 1.3	72.6 ± 1.6	77.6 ± 1.6
สตาร์ชมันสำปะหลัง	65.3 ± 2.2	70.1 ± 2.5	74.0 ± 1.9

a ค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ซ้ำ

\* อุณหภูมิเริ่มต้นเจลาตินในเซชันคืออุณหภูมิที่ birefringence ของเม็ดสตาร์ชหายไป 2-3 เม็ด

อุณหภูมิกึ่งกลางเจลาตินในเซชันคืออุณหภูมิที่ birefringence ของเม็ดสตาร์ชหายไปประมาณครึ่งหนึ่งของทั้งหมด

อุณหภูมิสิ้นสุดเจลาตินในเซชันคืออุณหภูมิที่ birefringence ของเม็ดสตาร์ชเหลืออยู่ 2-3 เม็ด

จากตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นผลการวัดอุณหภูมิเจลาตินในเซชันของสตาร์ชด้วยเครื่อง Kofler hot stage microscope พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูงคือ 1.3 – 2.5 °C เนื่องจากเป็นการวัดที่ขึ้นกับผู้ทดลองเป็นอย่างมากในการนับจำนวนเม็ดสตาร์ชที่เสีย birefringence

ไปพร้อมกับการอ่านอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ ทำให้ผลที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อนและไม่น่าเชื่อถือ (Leszczynski และ Golachowski, 1988)

#### 4.2.2 การสร้างและทดสอบเครื่องมือวัดอุณหภูมิเจลาตินในเซชัน

จากการวัดอุณหภูมิเจลาตินในเซชันของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยเครื่อง Kofler hot stage microscope ในตอนที่ 4.2.1 ซึ่งให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูงเนื่องจากเป็นวิธีที่ขึ้นกับการนับจำนวนเม็ดสตาร์ชที่เสีย birefringence ไปพร้อมกับการอ่านค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ทำให้ผลที่ได้ค่อนข้างคลาดเคลื่อน งานวิจัยนี้จึงได้มีการพัฒนาเครื่องมือวัดอุณหภูมิเจลาตินในเซชันโดยใช้หลักการเช่นเดียวกับ Leszczynski (1987) โดยติดตั้งตัวรับแสงที่ส่องผ่านแผ่นสไลด์ของสารแขวนลอยสตาร์ชเพื่อวัดปริมาณความเข้มแสงที่ลดลงเนื่องจากเม็ดสตาร์ชเกิดการเจลาตินในเซชันและสูญเสียลักษณะ birefringence ไป พื้นที่ที่เคยสว่างจะกลายเป็นมืดทั้งหมด ความเข้มแสงที่ส่องผ่านไปยังตัวรับแสงจึงลดลง แต่ได้มีการปรับปรุงในส่วนของแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้ LED ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก หาง่าย ราคาถูก มาใช้แทนแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดจูลทอร์ศน์ ดังนั้นเครื่องที่สร้างขึ้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้ประกอบกับหลอดจูลทอร์ศน์ที่มีขนาดใหญ่และราคาค่อนข้างแพง และยังได้ปรับปรุงอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนให้ร้อนได้เร็วกว่าและเสียความร้อนออกไปยังบรรยากาศภายนอกน้อยกว่า Kofler hot stage อีกด้วย

เมื่อนำสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติมาวัดการเปลี่ยนแปลงของ %ความเข้มแสงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นด้วยเครื่องที่สร้างขึ้นได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าค่อนข้างต่ำคืออยู่ในช่วง 0.4-1.1 °C และมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผันอยู่ในช่วง 0.64-1.88% แสดงว่าเครื่องที่สร้างขึ้นมีความสามารถในการทำซ้ำ (reproducibility) ค่อนข้างดี และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิเจลาตินในเซชันที่วัดได้จากเครื่องที่สร้างขึ้นกับที่วัดได้จากเครื่อง Kofler hot stage microscope พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นเจลาตินในเซชันที่วัดได้จากเครื่องที่สร้างขึ้น (%ความเข้มแสงลดลงมาเหลือ 98%) มีค่าต่ำกว่าคือวัดได้ประมาณ 58.6 และ 60.8 °C ในขณะที่อุณหภูมิเริ่มต้นเจลาตินในเซชันที่วัดได้จากเครื่อง Kofler hot stage microscope วัดได้ 67.7 และ 65.3 °C สำหรับสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังตามลำดับ เนื่องจากเครื่องที่สร้างขึ้นมีไดโอดเป็นตัววัดอุณหภูมิซึ่งติดอยู่กับฝาของอุปกรณ์ให้ความร้อน เมื่อปิดฝาลงมาไดโอดก็จะสัมผัสกับแผ่นสไลด์พอดี จึงวัดอุณหภูมิได้ใกล้เคียงกับสารแขวนลอยสตาร์ชมากกว่า แต่เครื่อง Kofler hot stage microscope

วัดอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ที่เสียบอยู่ที่แทนโลหะสำหรับให้ความร้อนทางด้านล่างแก่แผ่นสไลด์ของสารแขวนลอยสตาร์ช จึงทำให้อุณหภูมิที่วัดได้สูงกว่าอุณหภูมิที่แท้จริงของสารแขวนลอยสตาร์ช นอกจากนี้อุณหภูมิเริ่มต้นเจลาติไนเซชันของสตาร์ชมันฝรั่งที่วัดได้คือ  $58.6^{\circ}\text{C}$  ยังมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มเจลาติไนเซชันของตัวอย่างสตาร์ชมันฝรั่งสองชนิดที่ Leszczynski วัดจากเครื่องที่ใช้หลักการวัดอุณหภูมิเจลาติไนเซชันจากการลดลงของ %ความเข้มแสงเช่นเดียวกัน ได้อุณหภูมิเริ่มต้นเจลาติไนเซชันเท่ากับ  $60.0$  และ  $58.3^{\circ}\text{C}$  ตามตารางที่ 2.3

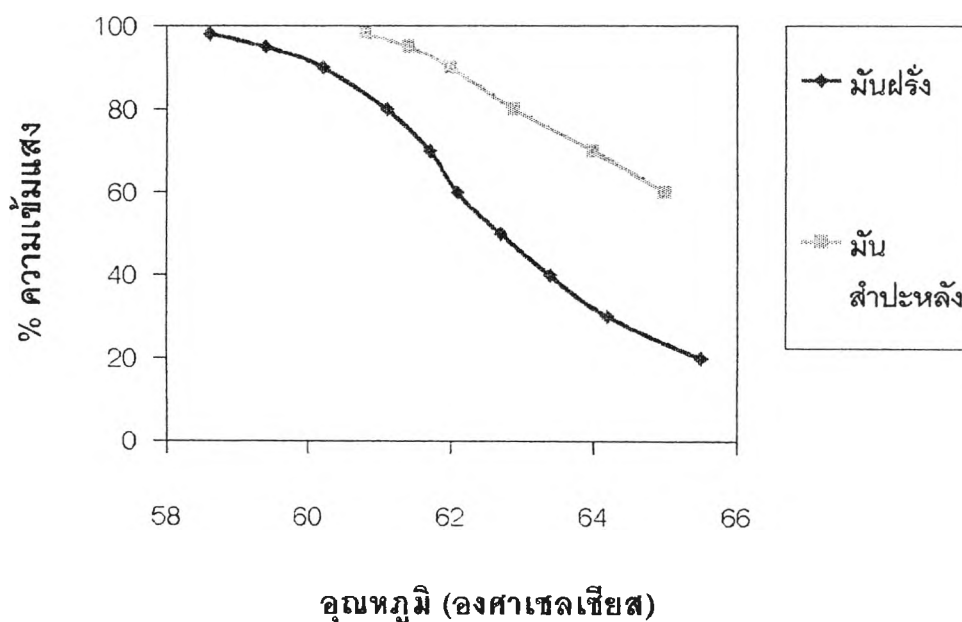
ตารางที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงโพลาไรซ์ที่ส่องผ่านสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังเมื่อได้รับความร้อนที่วัดจากเครื่องที่สร้างขึ้น

% ความเข้มแสง	อุณหภูมิของตัวอย่าง <sup>a</sup> ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	สตาร์ชมันฝรั่ง		สตาร์ชมันสำปะหลัง	
	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	สัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (%)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	สัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (%)
98	$58.6 \pm 1.1$	1.88	$60.8 \pm 0.8$	1.32
95	$59.4 \pm 0.9$	1.52	$61.4 \pm 0.7$	1.14
90	$60.2 \pm 0.9$	1.50	$62.0 \pm 0.5$	0.81
80	$61.1 \pm 0.8$	1.31	$62.9 \pm 0.4$	0.64
70	$61.7 \pm 0.7$	1.13	$64.0 \pm 0.5$	0.78
60	$62.1 \pm 0.7$	1.13	$65.0 \pm 0.5$	0.77
50	$62.7 \pm 0.6$	0.96		
40	$63.4 \pm 0.7$	1.10		
30	$64.2 \pm 0.7$	1.09		
20	$65.5 \pm 0.6$	0.92		

a ค่าเฉลี่ยจากการวัด 10 ซ้ำ

เมื่อนำค่า %ความเข้มแสงที่ส่องผ่านสไลด์ของสารแขวนลอยสตาร์ชมา plot กับอุณหภูมิของตัวอย่างได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.1 พบว่า %ความเข้มแสงที่ส่องผ่านสไลด์ของสารแขวนลอยสตาร์ชค่อย ๆ ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยสตาร์ชมันฝรั่งมี %ความเข้มแสงลดลงจาก 100% ลงมาถึง 20% แต่สตาร์ชมันสำปะหลังลดลงจาก 100% ลงมาถึง 60% เท่านั้นที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสตาร์ชมันสำปะหลังมีขนาดเล็กแสดงลักษณะ birefringence ที่มีความเข้มน้อยจึงอ่านค่าความต่างศักย์เริ่มต้นได้เพียง 2 volts แต่เครื่องต้องการความต่างศักย์ที่เหมาะสม

ที่เกิดจากความเข้มแสงที่ส่องผ่านสตาร์ชเริ่มต้นเท่ากับ 6 volts จึงต้องขยายสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้กับสตาร์ช มันสำปะหลังขึ้น 3 เท่า ดังนั้น %ความเข้มแสงที่วัดจากตัวอย่างสตาร์ชมันสำปะหลังจึงลดลงเหลือ 60% แล้วคงที่ ซึ่งเป็นค่าประมาณ 3 เท่าของสตาร์ชมันฝรั่งที่ %ความเข้มแสงลดลงได้ถึง 20%

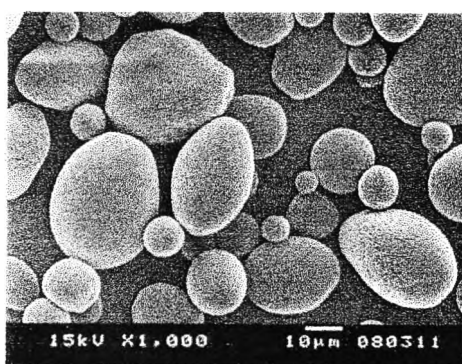


ภาพที่ 4.1 กราฟการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงโพลาริซ์ที่ส่องผ่านสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังเมื่อได้รับความร้อนที่วัดจากเครื่องที่สร้างขึ้น

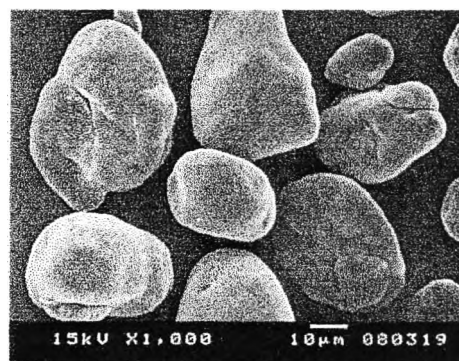
### 4.3 ศึกษาผลของระยะเวลาในการโม่ด้วย ball mill ต่อสมบัติในด้านต่าง ๆ ของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลัง

#### 4.3.1 พื้นผิวและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชเมื่อส่องด้วย SEM

จากการนำสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการโม่ด้วย ball mill มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเมื่อระยะเวลาในการโม่ด้วย ball mill นานขึ้น ทำให้ผิวของเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังเกิดความขรุขระเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองของ Baldwin และคณะ (1994) ที่ใช้ ball mill โม่สตาร์ชมันฝรั่งแล้วส่องดูด้วย SEM พบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเม็ดสตาร์ชส่วนใหญ่ก็คือแบบผิวหน้าขรุขระ (rough face) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดสีของลูกบอลลิในขณะที่ไม่ขัดสีผิวของเม็ดสตาร์ชออกไปบางส่วน นอกจากนี้รูปร่างของเม็ดสตาร์ชที่ผ่านการโม่ด้วย ball mill ก็เปลี่ยนแปลงไปคือจากเดิมที่กลมหรือรีจะกลายเป็นมีเหลี่ยมมุมและมีรอยบุบมากขึ้นซึ่งน่าจะเกิดจากแรงกระทบกระแทกที่เกิดจากลูกบอลลิและผนังของหม้ออบดในระหว่างการโม่

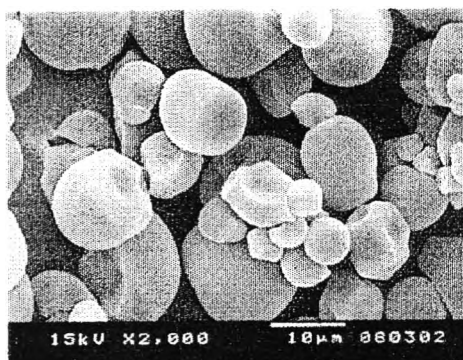


สตาร์ชธรรมชาติ

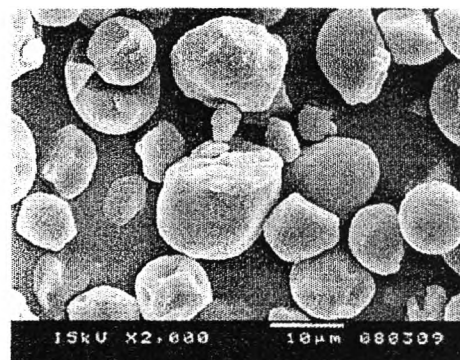


สตาร์ชผ่านการโม่ 12 ชม.

ภาพที่ 4.2 ผลของระยะเวลาในการโม่ต่อพื้นผิวและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 1,000 เท่า



สตาร์ชธรรมชาติ



สตาร์ชผ่านการไม่ 12 ชม.

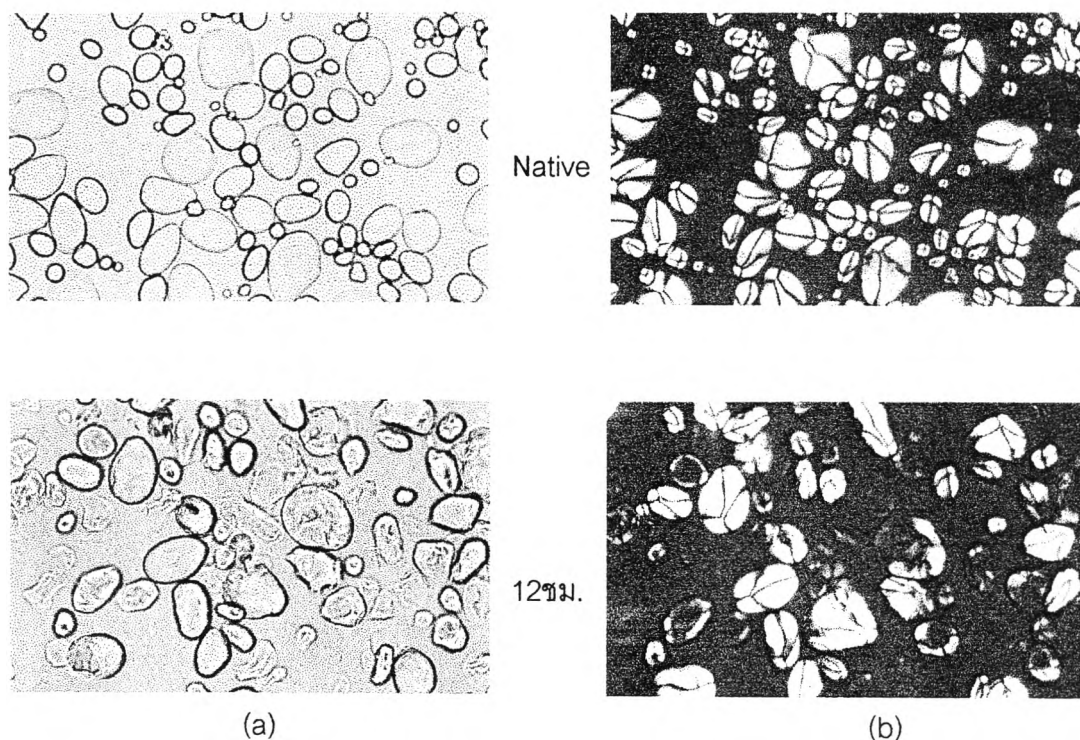
ภาพที่ 4.3 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อพื้นผิวและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 2,000 เท่า

#### 4.3.2 รูปร่างและลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงธรรมดาและแสงโพลาไรซ์

จากการนำสตาร์ชมันฝรั่งธรรมชาติไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งมีทั้งรูปร่างรีและกลมขนาดใหญ่และเล็กปนกันดังภาพ 4.4 และเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยใช้แสงโพลาไรซ์พบว่ามองเห็นลักษณะที่เรียกว่า birefringence ซึ่งเป็นรูปกากบาทสีดำ (Maltese cross) ชัดเจน ณ จุดที่กากบาทตัดกันซึ่งเป็นตำแหน่งของไฮลัมมีได้อยู่บริเวณกึ่งกลางของเม็ด สำหรับเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติมีขนาดเล็กกว่าสตาร์ชมันฝรั่งมีทั้งรูปร่างกลมและรูปร่างเหมือนถั่วซึ่งเกิดจากการที่สตาร์ชมันสำปะหลังเป็น compound starch คือมีหลายเม็ดที่เชื่อมต่อกันอยู่และเมื่อผ่านขั้นตอนการสกัดสตาร์ชทำให้ส่วนที่เชื่อมต่อกันอยู่แตกออกเผยให้เห็นรอยตัด (Garcia และคณะ, 1997) เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยใช้แสงโพลาไรซ์พบว่าเห็น birefringence ชัดเจนน้อยกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง และมีไฮลัมอยู่บริเวณกลางเม็ดดังภาพที่ 4.5

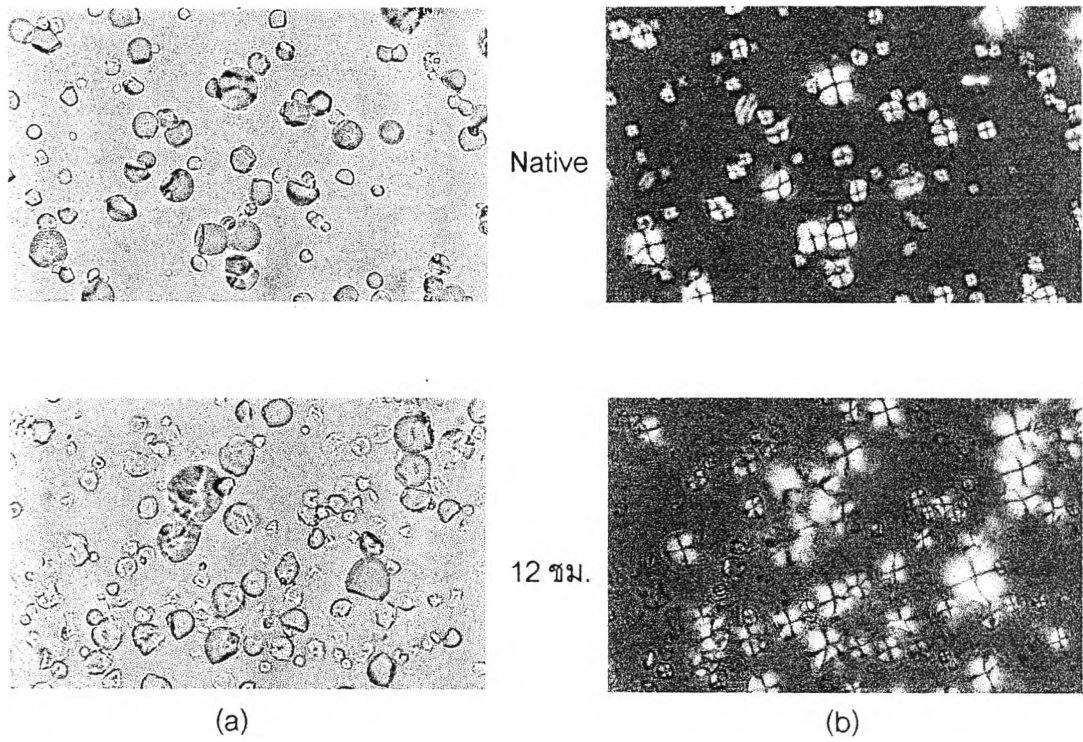
จากการนำสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังไปไม่ด้วย ball mill พบว่าเมื่อระยะเวลาในการไม่นานขึ้น เม็ดสตาร์ชทั้ง 2 ชนิดเกิดความเสียหายมากขึ้นดังจะเห็นได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยใช้แสงธรรมดามองเห็นลักษณะโครงสร้างที่เรียกว่า Ghost มีมากขึ้นซึ่งก็คือเม็ดสตาร์ชที่เกิดความเสียหายบริเวณขอบจะค่อนข้างจางเห็นเป็นเจลใสซึ่งเกิดจากการที่สารภายในเม็ดสตาร์ชละลายออกมา (Jones, 1940) นอกจากนี้เมื่อดูเม็ดสตาร์ชภายใต้แสงโพลาไรซ์

พบว่าเมื่อระยะเวลาในการไม่ทนขึ้น birefringence ของเม็ดสตาร์ชค่อย ๆ เลื่อนหายไปบ่งบอกถึงความเป็นระเบียบของการจัดเรียงตัวโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชน้อยลง และเป็นที่น่าสังเกตว่าเม็ดสตาร์ชส่วนใหญ่จะเริ่มเสีย birefringence โดยเกิดเป็นสีดำมืดที่บริเวณไฮลัมก่อนซึ่งเหมือนกับที่เกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยความร้อนในการทดลองของ Garcia และคณะ (1997)



ภาพที่ 4.4 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อรูปร่างและลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงธรรมดา (a) และแสงโพลาไรซ์ (b) โดยใช้กำลังขยาย 400 เท่า





ภาพที่ 4.5 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อรูปร่างและลักษณะ birefringence ของเม็ด สตาร์ชมันสำปะหลังเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงธรรมดา (a) และแสงโพลาไรซ์ (b) โดยใช้กำลังขยาย 400 เท่า

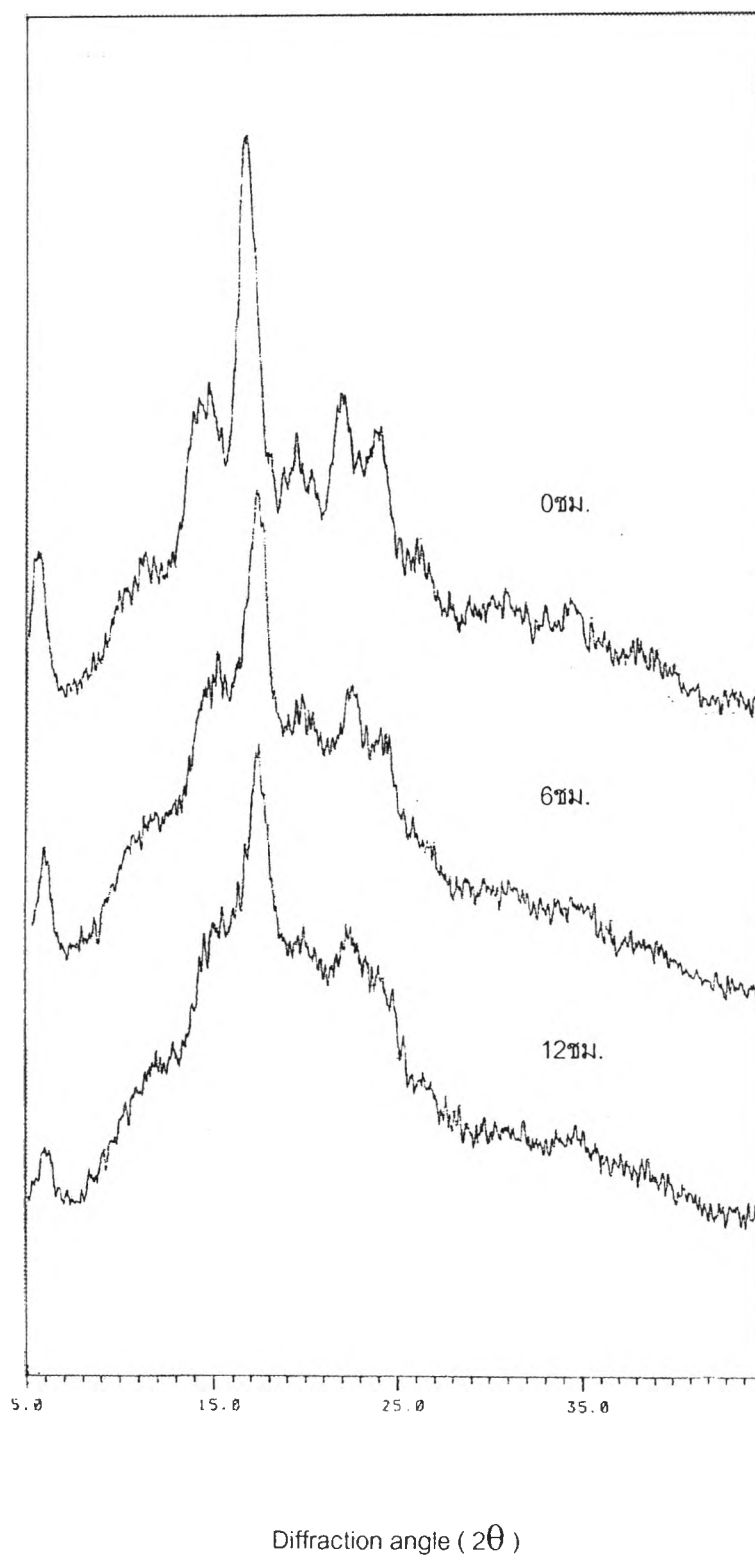
### 4.3.3 โครงสร้างผลึกของสตาร์ช

จากการนำสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติมาศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.6 และ 4.7 พบว่าสตาร์ชมันฝรั่งธรรมชาติมีรูปแบบผลึกชนิด B ซึ่งจะเห็นได้จาก X-ray diffraction pattern ที่ได้มี peak ที่ d – spacing เท่ากับ 15.331, 5.855, 3.973 และ 3.681 และมี peak สูงสุดที่ d – spacing เท่ากับ 5.163 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ pattern ของผลึกชนิด B ตามตารางเทียบของ Zobel (1964) ในตารางที่ 2.2 ที่ควรจะมี peak ปานกลางที่ d – spacing เท่ากับ 15.8, 6.14, 4.00 และ 3.70 และมี peak สูงสุดที่ d – spacing เท่ากับ 5.16 สำหรับสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติมีรูปแบบผลึกชนิด C ซึ่งจะเห็นได้จาก X-ray diffraction pattern ที่ได้มี peak ที่ d – spacing เท่ากับ 5.824, 5.151, 4.946 และ 3.864 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ pattern ของผลึกชนิด C ตามตารางเทียบของ Zobel (1964) ในตารางที่ 2.2 ที่ควรจะมี peak ที่ d – spacing 5.78, 5.12, 4.85 และ 3.78

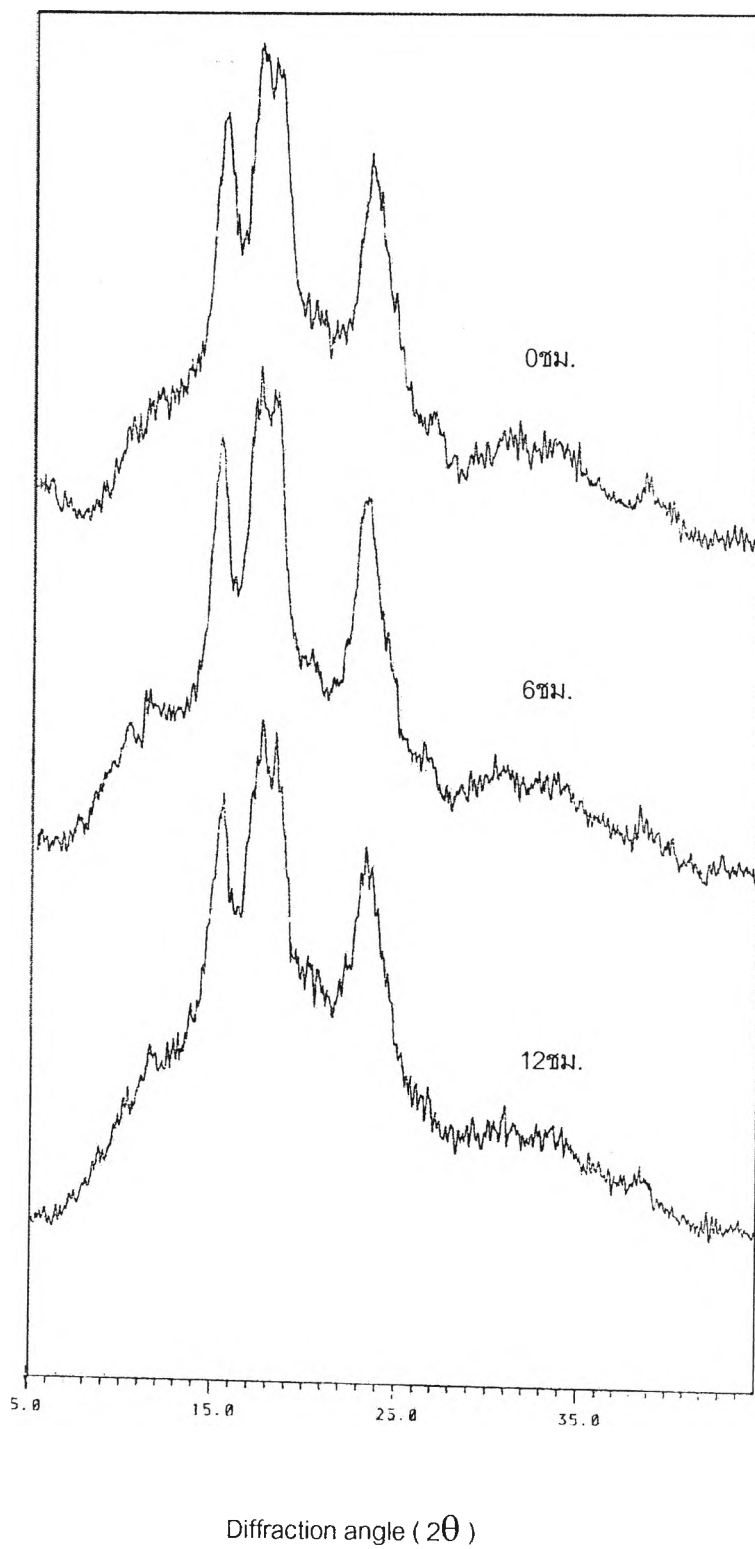
จากการนำสตาร์ชมันฝรั่งไปโม่ด้วย ball mill ที่ระยะเวลา 6 และ 12 ชม. พบว่า pattern ของสตาร์ชมันฝรั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงดังภาพที่ 4.6 ยังคงมีรูปแบบผลึกชนิด B แต่ความสูงของ peak ใน pattern ของสตาร์ชมันฝรั่งทุก peak มีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ peak สูงสุดที่ d – spacing ประมาณ 5.1 ค่าความเข้ม (intensity) ลดลงจาก 1022 มาเป็น 911 และ 895 ที่ระยะเวลาการโม่ 6 และ 12 ชม. ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ของสตาร์ชมันฝรั่งมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการโม่ด้วย ball mill นานขึ้น สำหรับสตาร์ชมันสำปะหลังที่นำไปโม่ด้วย ball mill ที่ระยะเวลา 6 และ 12 ชม. พบว่า pattern ที่ได้ก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเช่นกันดังภาพที่ 4.7 คือยังคงมีรูปแบบผลึกชนิด C เช่นเดิม และพบว่าความสูงของ peak ในแต่ละ pattern ของสตาร์ชมันสำปะหลังทุก peak มีค่าไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม้จะโม่ด้วย ball mill นานถึง 12 ชม. ก็มิได้ทำให้ระดับความเป็นผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังลดลงได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 20  $\mu\text{m}$  ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งที่มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 30  $\mu\text{m}$  ตามตารางที่ 2.1 ทำให้เม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังมีพื้นที่บริเวณกลางเม็ดน้อยกว่า จึงเกิดความเสียหายจากแรงทางกลและสูญเสียความเป็นผลึกน้อยกว่าสตาร์ชมันฝรั่งที่ระยะเวลาในการโม่ด้วย ball mill เท่ากัน ซึ่งให้ผลการทดลองคล้ายกับงานของ Tamaki และคณะ (1997) ที่พบว่าเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งที่มีรูปร่างรีและมีขนาดใหญ่จะเกิดความเสียหายได้มากกว่าเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งที่มีรูปร่างกลมและมีขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.4 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อค่า d – spacing, Intensity และ  $2\theta$  ที่ได้จากการทำ x-ray diffraction ของสตาร์ซมันฝรั่งและสตาร์ซมันสำปะหลัง

ตัวอย่าง	เวลาไม่ (ชม.)	d – spacing( $^{\circ}$ A)	Intensity (counts)	$2\theta(^{\circ})$
สตาร์ซมันฝรั่ง	0	15.331	432	5.76
		5.855	682	15.12
		5.163	1022	17.16
		3.973	665	22.36
		3.681	609	24.16
	6	15.018	404	5.88
		5.764	680	15.36
		5.092	911	17.40
		3.931	636	22.60
		3.681	577	24.16
	12	14.718	324	6.00
		5.886	642	15.04
		5.046	895	17.56
		3.966	623	22.40
		3.699	582	24.04
สตาร์ซมันสำปะหลัง	0	5.824	815	15.20
		5.151	918	17.20
		4.946	900	17.92
		3.864	746	23.00
	6	5.824	803	15.20
		5.199	900	17.04
		4.990	880	17.76
		3.870	749	22.96
	12	5.870	785	15.08
		5.163	884	17.16
		4.881	834	18.16
		3.837	702	23.16



ภาพที่ 4.6 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อ X-ray diffractogram ของสตาร์ชมันฝรั่ง



ภาพที่ 4.7 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อ X-ray diffractogram ของสตาร์ชมันสำปะหลัง

#### 4.3.4 ร้อยละของเม็ดสตาร์ชที่เสียหาย

จากการนำสตาร์ชมันฝรั่งและมันสำปะหลังที่ผ่านการโม่ด้วย ball mill มาวิเคราะห์ค่าร้อยละของเม็ดสตาร์ชที่เสียหายซึ่งหาได้จากการใช้เอนไซม์  $\alpha$ -amylase ย่อยสตาร์ช ในระยะเวลาที่กำหนดคือ 30 นาที เพื่อตัดสายโพลิเมอร์ของสตาร์ชเป็นสายสั้นๆ ได้ maltosaccharide และ dextrin แล้วใช้เอนไซม์ amyloglucosidase ตัดสาย dextrin ทีละ 1 หน่วยกลูโคสให้กลายเป็นโมเลกุลกลูโคสเดี่ยว ๆ แล้วจึงใช้เอนไซม์ glucose oxidase เปลี่ยนกลูโคส เป็น gluconic acid และ hydrogen peroxide ตามสมการที่ 1 หลังจากนั้นในระบบที่มีเอนไซม์ peroxidase สาร hydrogen peroxide จะสลายตัวและปลดปล่อย oxygen ออกมา ออกซิไดซ์ hydrogen donor ( $DH_2$ ) ไปเป็นสารอนุพันธ์ที่มีสี (D) ตามสมการที่ 2 (Pomeranz และ Meloan, 1994) ซึ่งสารที่ได้จะเป็นสารสีชมพูที่มีความเสถียรและสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ได้ที่ความยาวคลื่น 510 nm ซึ่งค่าร้อยละของเม็ดสตาร์ชที่เสียหายที่มากขึ้นจะบ่งบอกถึงความเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการจัดเรียงกันอย่างหนาแน่นลดลงจึงทำให้เม็ดสตาร์ชต้านทานต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ได้น้อยลง

glucose oxidase



peroxidase

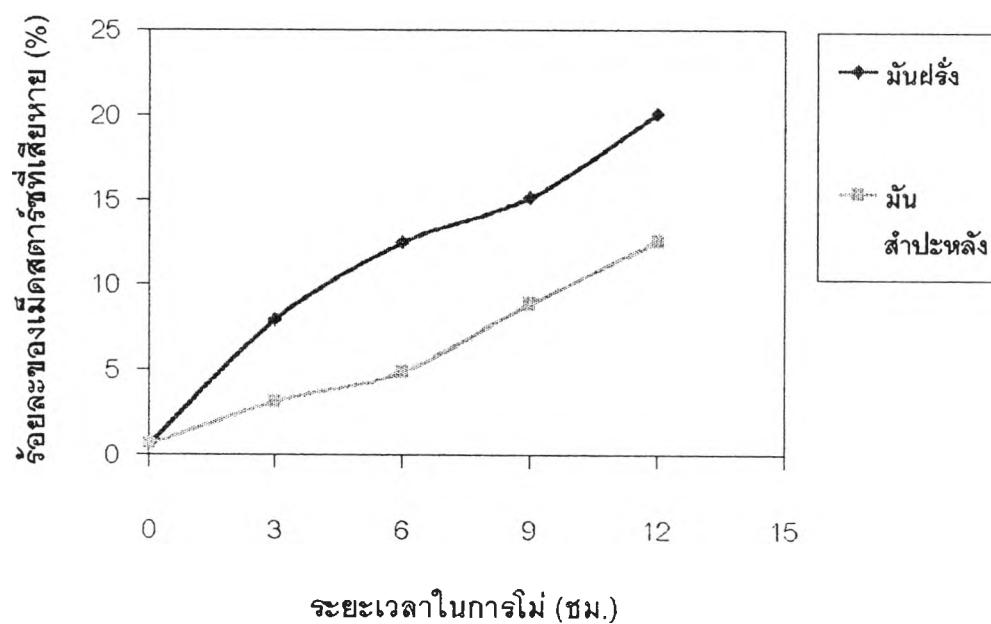


จากผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาในการโม่เพิ่มขึ้น ทั้งเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังมีความเสียหายมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ตามตารางที่ 4.5 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเม็ดสตาร์ชถูกแรงกระแทกและแรงเสียดทานจากลูกบอลล์ ทำให้ผิวเม็ดสตาร์ชที่อยู่ชั้นนอกถูกขีดออกและบางเม็ดเกิดการแตกร้าว ทำให้เอนไซม์  $\alpha$ -amylase เข้าทำลายโมเลกุลภายในของเม็ดสตาร์ชได้ง่ายขึ้น และจากการเปรียบเทียบระหว่างสตาร์ชทั้งสองชนิดดังภาพที่ 4.8 พบว่าที่ระยะเวลาการโม่ที่เท่ากันสตาร์ชมันฝรั่งเกิดความเสียหายมากกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังจึงมีพื้นที่ตรงกลาง (central region) ในการรับแรงกระแทกและแรงเสียดทานจากลูกบอลล์มากกว่าจึงเกิดความเสียหายได้มากกว่า (Tamaki และคณะ, 1997) ผลการทดลองสอดคล้องกับการวัดระดับความเป็นผลึกจาก X-ray diffractogram ที่ peak ของ สตาร์ชมันฝรั่งที่ระยะเวลาการโม่ 12 ชม. ต่ำลงจากสตาร์ชธรรมชาติมากกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง

ตารางที่ 4.5 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อร้อยละของเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังที่เสียหาย

เวลาในการไม่ (ชม.)	ร้อยละของเม็ดสตาร์ชที่เสียหาย (%)	
	สตาร์ชมันฝรั่ง	สตาร์ชมันสำปะหลัง
0	0.5986 <sup>e</sup> ± 0.0106	0.6236 <sup>e</sup> ± 0.0216
3	7.9034 <sup>d</sup> ± 0.3497	3.1260 <sup>d</sup> ± 0.1512
6	12.4593 <sup>c</sup> ± 1.1977	4.8512 <sup>c</sup> ± 0.2972
9	15.0837 <sup>b</sup> ± 0.7780	8.8762 <sup>b</sup> ± 0.5254
12	20.0837 <sup>a</sup> ± 1.5760	12.5419 <sup>a</sup> ± 0.3941

a, b, c... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )



ภาพที่ 4.8 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อร้อยละของเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังที่เสียหาย

### 4.3.5 การดูดซับน้ำ

การดูดซับน้ำที่อุณหภูมิห้องของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการโม่ด้วย ball mill แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการโม่ยาวนานขึ้น สตาร์ชทั้ง 2 ชนิดมีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) เนื่องจากการโม่ด้วย ball mill ทำให้เกิดการขัดสีผิวหน้าของเม็ดสตาร์ชดังจะเห็นได้จากภาพที่ 4.2 และ 4.3 ที่ได้จาก SEM ซึ่งผิวหน้าของเม็ดสตาร์ชนี้เป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยป้องกันการซึมผ่านของน้ำเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ช นอกจากนี้แรงทางกลที่เกิดขึ้นยังทำลายความต่อเนื่องของชั้น concentric ring ที่เป็นส่วนเปลือกที่จำกัดการพองตัวของเม็ดสตาร์ช (Morrison และคณะ, 1994) จึงทำให้เม็ดสตาร์ชมีการดูดซับน้ำได้มากขึ้นที่อุณหภูมิห้อง

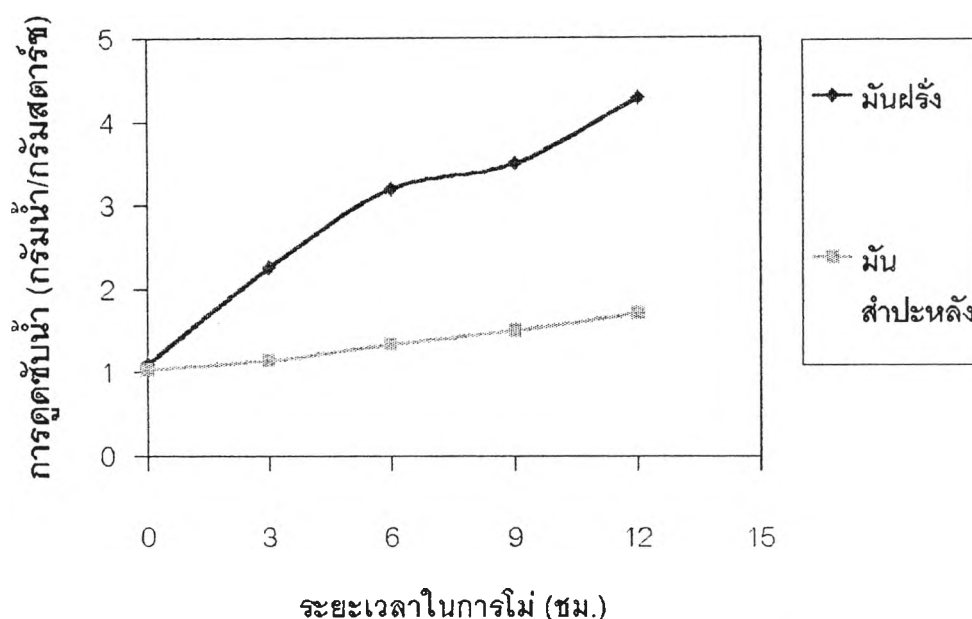
ที่ระยะเวลาในการโม่เท่ากันสตาร์ชมันฝรั่งดูดซับน้ำได้มากกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังซึ่งจะเห็นได้จากกราฟระหว่างค่าการดูดซับน้ำและระยะเวลาในการโม่ดังภาพที่ 4.9 และยังสามารถเห็นได้จากการโม่ที่ระยะเวลา 12 ชม. สตาร์ชมันฝรั่งมีค่าการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 1.1027 เป็น 4.2876 คิดเป็น 288.83% ในขณะที่สตาร์ชมันสำปะหลังมีค่าการดูดซับน้ำเพิ่มจากเดิม 1.0381 เป็น 1.7029 คิดเป็น 64.04% เท่านั้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่ระยะเวลาในการโม่เท่ากันเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งเกิดความเสียหาย (damage) และถูกทำลายความเป็นผลึกได้มากกว่าสตาร์ชมันสำปะหลังทำให้น้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปภายในโมเลกุลของสตาร์ชได้มากกว่า

ตารางที่ 4.6 ผลของระยะเวลาในการโม่ต่อการดูดซับน้ำของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังที่อุณหภูมิห้อง

เวลาในการโม่ (ชม.)	การดูดซับน้ำ (กรัม น้ำ / กรัม สตาร์ชแห้ง)	
	สตาร์ชมันฝรั่ง	สตาร์ชมันสำปะหลัง
0	1.1027 <sup>e</sup> ± 0.0128	1.0381 <sup>e</sup> ± 0.0159
3	2.2653 <sup>d</sup> ± 0.1006	1.1371 <sup>d</sup> ± 0.1048
6	3.1994 <sup>c</sup> ± 0.3101	1.3408 <sup>c</sup> ± 0.0422
9	3.4940 <sup>b</sup> ± 0.0856	1.5004 <sup>b</sup> ± 0.0231
12	4.2876 <sup>a</sup> ± 0.0799	1.7029 <sup>a</sup> ± 0.0230

a, b, c... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )





ภาพที่ 4.9 ผลของระยะเวลาในการโม่ต่อการดูดซับน้ำของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังที่อุณหภูมิห้อง

#### 4.3.6 กำลังการพองตัวและร้อยละการละลาย

ค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 55, 65, 75 และ 85 °C ของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการโม่ด้วย ball mill เป็นระยะเวลาต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.7-4.10 พบว่าสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติมีกราฟรูปแบบกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายดังภาพที่ 4.10 และ 4.11 ซึ่งได้ผลการทดลองเช่นเดียวกับที่ Leach และคณะ (1959) ได้ทำการทดลองไว้คือสตาร์ชทั้งสองชนิดมีรูปแบบการพองตัวแบบขั้นตอนเดียวแสดงว่าแรงที่ยึดพันธะภายในมีความสม่ำเสมอ โดยที่สตาร์ชมันฝรั่งมีกราฟกำลังการพองตัวเป็นเส้นตรง แต่กราฟร้อยละการละลายไม่เป็นเส้นตรงคือมีการละลายเกือบคงที่ที่อุณหภูมิ 65-75 °C แล้วการละลายจะเพิ่มขึ้นอีก ในขณะที่สตาร์ชมันสำปะหลังมีรูปแบบกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายเป็นเส้นตรง อย่างไรก็ตามเมื่อมีการแปรระดับเวลาในการโม่สตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังด้วย ball mill เป็น 0, 3, 6, 9 และ 12 ชม. พบว่ากราฟรูปแบบการพองตัวและร้อยละการละลายไม่มีการเปลี่ยนแปลงคือมีรูปแบบเช่นเดียวกับสตาร์ชธรรมชาติดังภาพที่ 4.12-4.15

ตารางที่ 4.7 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อกำล้างการพองตัวที่อุณหภูมิ 55, 65, 75 และ 85 °C ของสตาร์ชมันฝรั่ง

เวลาในการไม่ (ชม.)	กำล้างการพองตัว			
	อุณหภูมิ 55 °C	อุณหภูมิ 65 °C	อุณหภูมิ 75 °C	อุณหภูมิ 85 °C
0	3.7222 <sup>d</sup> ± 0.1165	40.2826 <sup>ab</sup> ± 1.5860	65.7898 <sup>b</sup> ± 2.5158	96.6938 <sup>a</sup> ± 3.9017
3	7.0054 <sup>c</sup> ± 0.1679	38.9110 <sup>b</sup> ± 0.9499	60.6096 <sup>c</sup> ± 1.8802	86.2938 <sup>b</sup> ± 2.9928
6	13.5171 <sup>b</sup> ± 0.8423	39.7052 <sup>ab</sup> ± 0.0989	58.2599 <sup>c</sup> ± 0.9283	97.4744 <sup>a</sup> ± 4.1519
9	13.2110 <sup>b</sup> ± 0.8591	38.6150 <sup>b</sup> ± 0.8335	69.4728 <sup>a</sup> ± 0.9714	86.8712 <sup>b</sup> ± 1.2488
12	16.8983 <sup>a</sup> ± 0.6744	41.0044 <sup>a</sup> ± 0.8387	65.9574 <sup>b</sup> ± 1.0720	87.7659 <sup>b</sup> ± 2.3508

a, b, c ... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ 4.8 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 55, 65, 75 และ 85 °C ของสตาร์ชมันฝรั่ง

เวลาในการไม่ (ชม.)	ร้อยละการละลาย			
	อุณหภูมิ 55 °C	อุณหภูมิ 65 °C	อุณหภูมิ 75 °C	อุณหภูมิ 85 °C
0	0.6000 <sup>a</sup> ± 0.0804	10.6048 <sup>c</sup> ± 0.1976	12.0524 <sup>c</sup> ± 0.4766	16.5467 <sup>ab</sup> ± 1.0805
3	2.3160 <sup>d</sup> ± 0.1629	11.2390 <sup>b</sup> ± 0.4222	12.2695 <sup>c</sup> ± 0.4204	16.8453 <sup>ab</sup> ± 0.2726
6	4.5391 <sup>c</sup> ± 0.4029	11.2476 <sup>b</sup> ± 0.3466	13.2828 <sup>b</sup> ± 0.4978	17.1759 <sup>ab</sup> ± 0.4717
9	5.4819 <sup>b</sup> ± 0.2199	11.7096 <sup>b</sup> ± 0.2279	14.4340 <sup>a</sup> ± 0.0173	16.4894 <sup>ab</sup> ± 0.2700
12	6.0739 <sup>a</sup> ± 0.3217	13.0361 <sup>a</sup> ± 0.2705	14.7165 <sup>a</sup> ± 0.8937	17.6299 <sup>a</sup> ± 0.1571

a, b, c... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ 4.9 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 55, 65, 75 และ 85 °C ของสตาร์ชมันสำปะหลัง

เวลาในการไม่ (ชม.)	กำลังการพองตัว			
	อุณหภูมิ 55 °C	อุณหภูมิ 65 °C	อุณหภูมิ 75 °C	อุณหภูมิ 85 °C <sup>ns</sup>
0	2.0836 <sup>a</sup> ± 0.0129	17.7564 <sup>b</sup> ± 0.1350	30.3013 <sup>a</sup> ± 0.3877	35.9095 ± 0.6340
3	2.7706 <sup>d</sup> ± 0.0573	18.0887 <sup>b</sup> ± 0.2085	28.7076 <sup>b</sup> ± 0.1344	35.8460 ± 0.7626
6	3.3109 <sup>c</sup> ± 0.1609	15.9154 <sup>c</sup> ± 0.6603	26.5918 <sup>c</sup> ± 0.1459	35.2375 ± 0.8034
9	4.4392 <sup>b</sup> ± 0.0942	17.8297 <sup>b</sup> ± 0.3019	30.9313 <sup>a</sup> ± 0.9356	34.1846 ± 2.6441
12	5.6741 <sup>a</sup> ± 0.1318	18.8132 <sup>a</sup> ± 0.2547	30.1556 <sup>a</sup> ± 0.7439	35.3280 ± 1.3305

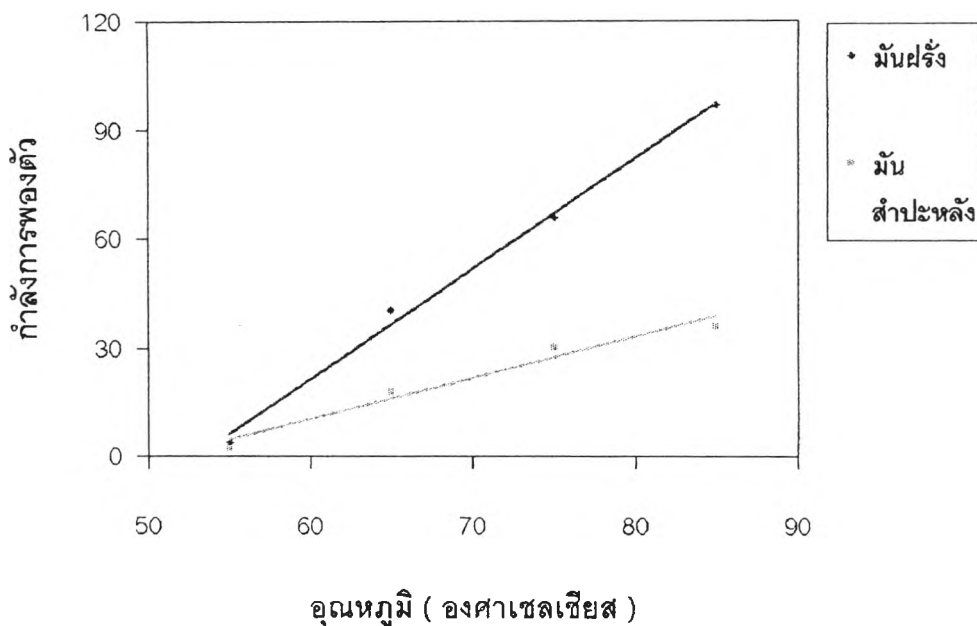
a, b, c... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ns หมายถึงไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ )

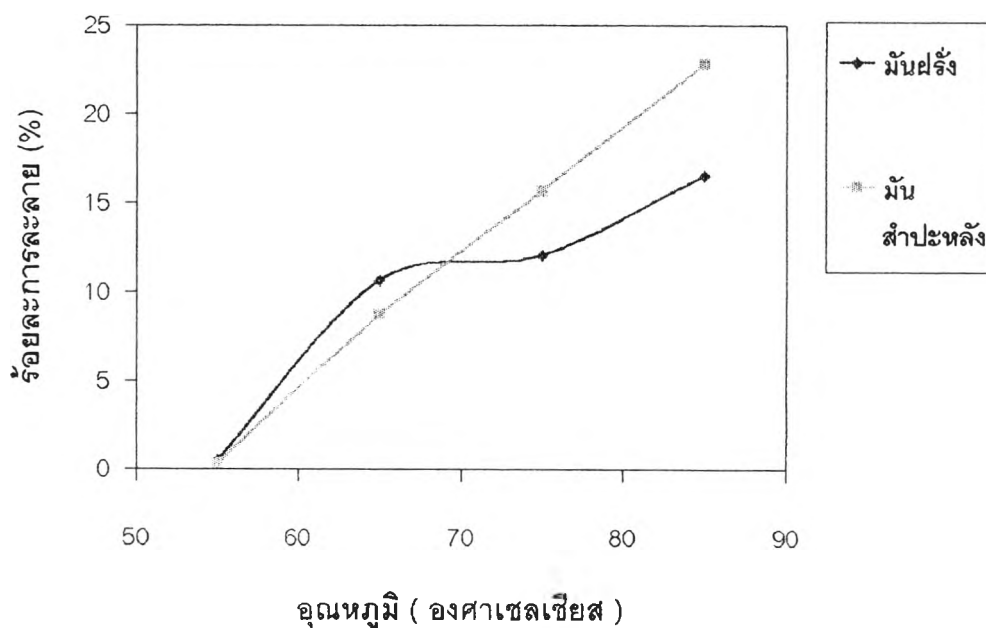
ตารางที่ 4.10 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 55, 65, 75 และ 85 °C ของสตาร์ชมันสำปะหลัง

เวลาในการไม่ (ชม.)	ร้อยละการละลาย			
	อุณหภูมิ 55 °C	อุณหภูมิ 65 °C	อุณหภูมิ 75 °C	อุณหภูมิ 85 °C
0	0.3090 <sup>a</sup> ± 0.0546	8.7089 <sup>d</sup> ± 0.4392	15.6726 <sup>b</sup> ± 0.7521	22.7811 <sup>b</sup> ± 0.5159
3	1.1757 <sup>d</sup> ± 0.0533	10.1286 <sup>c</sup> ± 0.2243	15.7709 <sup>b</sup> ± 0.4727	22.9822 <sup>b</sup> ± 0.2602
6	2.1934 <sup>c</sup> ± 0.1622	11.3474 <sup>b</sup> ± 0.8402	16.3256 <sup>b</sup> ± 0.4007	22.2411 <sup>b</sup> ± 0.3212
9	3.5082 <sup>b</sup> ± 0.0517	11.4531 <sup>b</sup> ± 0.2273	17.3595 <sup>a</sup> ± 0.0755	23.0781 <sup>b</sup> ± 1.0123
12	4.9750 <sup>a</sup> ± 0.0637	12.5240 <sup>a</sup> ± 0.1420	17.4860 <sup>a</sup> ± 0.3068	26.5519 <sup>a</sup> ± 0.3203

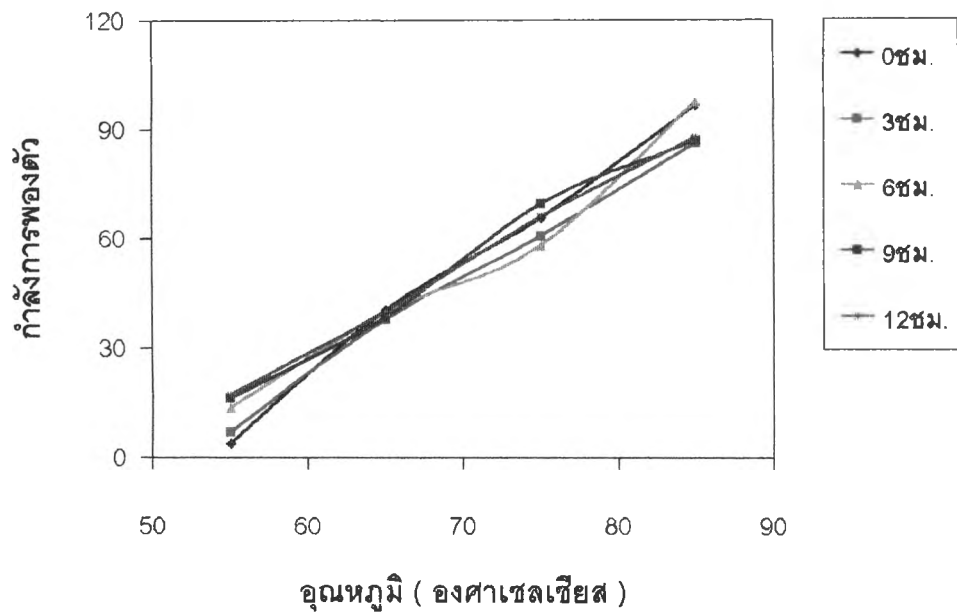
a, b, c... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )



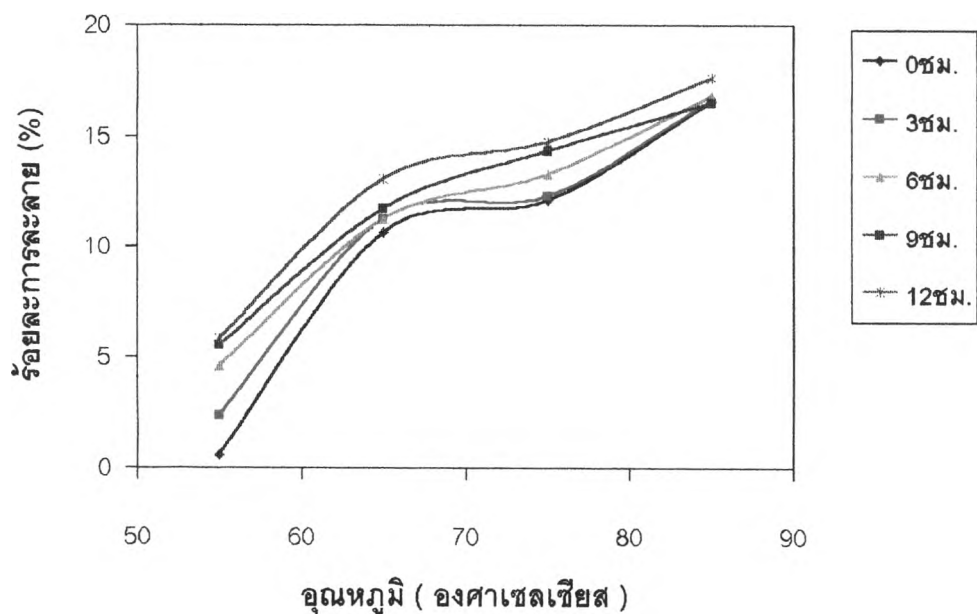
ภาพที่ 4.10 รูปแบบก้ำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 55, 65, 75 และ 85 °C ของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลัง



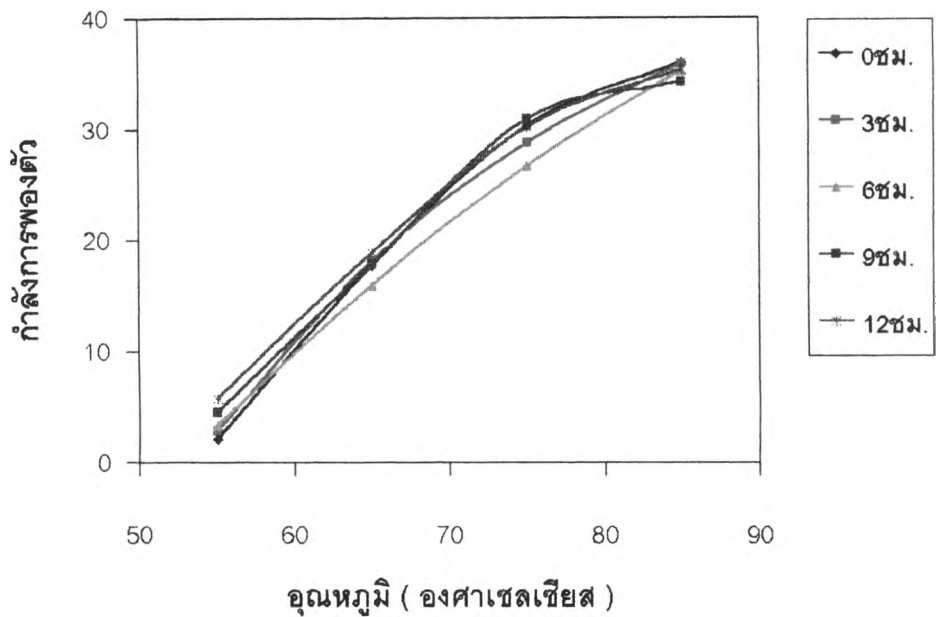
ภาพที่ 4.11 รูปแบบร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 55, 65, 75 และ 85 °C ของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลัง



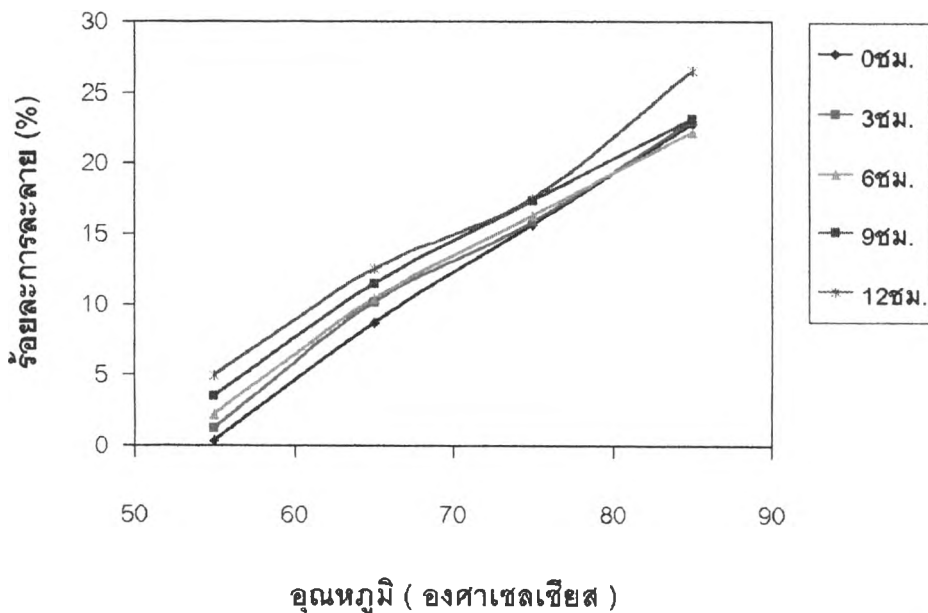
ภาพที่ 4.12 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 55, 65, 75 และ 85 °C ของสตาร์ชมันฝรั่ง



ภาพที่ 4.13 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 55, 65, 75 และ 85 °C ของสตาร์ชมันฝรั่ง



ภาพที่ 4.14 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 55, 65, 75 และ 85 °C ของสตาร์ชมันสำปะหลัง



ภาพที่ 4.15 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 55, 65, 75 และ 85 °C ของสตาร์ชมันสำปะหลัง

จากตารางที่ 4.7 และ 4.9 ซึ่งแสดงผลของระยะเวลาในการโม่ที่มีต่อค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชมันฝรั่งและมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 55, 65, 75 และ 85 °C พบว่าที่อุณหภูมิ 55 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชันของสตาร์ชทั้งสองชนิด เมื่อระยะเวลาในการโม่ยาวนานขึ้น สตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังมีค่ากำลังการพองตัวเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก และมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิห้องที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากระยะเวลาการโม่ที่นานขึ้นทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดความเสียหายมากขึ้น ผิวของเม็ดสตาร์ชที่ป้องกันการซึมผ่านของน้ำและส่วนผลึกที่มีการเรียงตัวเป็นชั้น ๆ ภายในเม็ดสตาร์ชที่จำกัดการพองตัวของเม็ดสตาร์ชถูกทำลายทำให้น้ำแทรกเข้าไปภายในได้มากขึ้น (Morrison และคณะ, 1994) ในขณะที่สตาร์ชที่ผ่านการโม่ น้อยกว่ามีความเสียหายน้อยกว่าจะเกิดการพองตัวได้น้อยกว่า สำหรับที่อุณหภูมิ 65 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิเจลาติไนเซชันและที่อุณหภูมิ 75 และ 85 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชันของสตาร์ชทั้งสองชนิด พบว่าเมื่อระยะเวลาในการโม่ด้วย ball mill นานขึ้นค่ากำลังการพองตัวไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนเข้าใกล้อุณหภูมิเจลาติไนเซชันเม็ดสตาร์ชที่สมบูรณ์ไม่เกิดความเสียหายจากแรงทางกลก็สามารถพองตัวได้เช่นเดียวกับเม็ดสตาร์ชที่เสียหาย (Tester และ Morrison, 1994)

และจากตารางที่ 4.8 และ 4.10 ซึ่งแสดงผลของระยะเวลาในการโม่ต่อร้อยละการละลายของสตาร์ชมันฝรั่งและมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 55, 65, 75 และ 85 °C พบว่าเมื่อระยะเวลาในการโม่ยาวนานขึ้นร้อยละการละลายของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 55 °C มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด แต่ที่อุณหภูมิ 65, 75 และ 85 °C มีปริมาณการเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ทั้งนี้อธิบายได้เช่นเดียวกับกำลังการพองตัวคือที่อุณหภูมิ 55 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชันของสตาร์ชทั้งสองชนิด เม็ดสตาร์ชที่เกิดความเสียหายจากแรงทางกลโดย ball mill จนพื้นผิวถูกทำลายหรือบางเม็ดอาจแตกออกจากกันทำให้สารที่อยู่ภายในซึ่งส่วนใหญ่เป็นอมัยโลสที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติและอมัยโลเพกตินมวลโมเลกุลต่ำที่เกิดจากการทำลายพันธะของอมัยโลเพกตินด้วยแรงทางกลของ ball mill (Morrison และ Tester, 1994) ละลายออกมาภายนอกได้มากขึ้นทำให้ค่าร้อยละการละลายเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิ 65, 75 และ 85 °C เม็ดสตาร์ชที่ไม่เสียหายก็มีการพองตัวจากการดูดซับน้ำจนผิวของเม็ดสตาร์ชปริแตกออกและทำให้สารที่อยู่ภายในละลายออกมาได้เช่นกัน

#### 4.3.7 สมบัติด้านความหนืดที่วัดจากเครื่อง Brabender viscograph

เมื่อนำสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังไปโม่ด้วย ball mill เป็นระยะเวลา 0, 3, 6, 9 และ 12 ชม. แล้วนำสตาร์ชที่ไม่ได้มาวัดความหนืดด้วยเครื่อง Brabender viscograph โดยสตาร์ชมันฝรั่งใช้ความเข้มข้น 4% และสตาร์ชมันสำปะหลังใช้ความเข้มข้น 6 % โดยน้ำหนักแห้ง ที่ใช้ความเข้มข้นของสารแขวนลอยสตาร์ชต่างกันเนื่องจากสตาร์ชมันฝรั่งมีการพองตัวสูงกว่าจึงต้องใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า เพื่อมิให้ค่าความหนืดสูงสุดที่วัดจากเครื่องเกิน 1000 Brabender unit (BU) เนื่องจากถ้าความหนืดเกิน 1,000 BU จะต้องถ่วงหัว cartridge ด้วยตุ้มน้ำหนักซึ่งจะมีผลทำให้สปริงของเครื่องเสื่อมสภาพเร็ว

ผลการทดลองดังในภาพที่ 4.16 และ 4.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟความหนืดที่ได้จากสตาร์ชทั้งสองชนิดที่ผ่านการโม่เป็นระยะเวลาต่าง ๆ กันมีสมบัติทางความหนืดเปลี่ยนแปลงไปคือมีอุณหภูมิเริ่มต้นเจลาติไนเซชันต่ำลงและความหนืด ณ จุดต่าง ๆ มีค่าต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และ 4.12 เนื่องจากการโม่ที่นานขึ้นทำให้เม็ดสตาร์ชเสียหายมากขึ้น โครงสร้างผลึกถูกทำลาย น้ำซึมผ่านเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชและเกิดการพองตัวได้ง่ายขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง รวมทั้งการที่บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชถูกทำลายยังทำให้สารภายในเม็ดสตาร์ช (อัมัยโลสและอัมัยโลเพกตินมวลโมเลกุลต่ำที่เกิดจากการทำลายพันธะโควาเลนต์ด้วยแรงทางกล) ละลายออกมาได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 55 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชันมีค่ามากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) จึงเป็นสาเหตุให้ความหนืดของสตาร์ชมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงพอที่เครื่อง Brabender viscograph วัดได้ 10 BU ที่อุณหภูมิต่ำลงจึงทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นเจลาติไนเซชันต่ำลงและส่งผลให้เวลาที่เริ่มเกิดเจลาติไนเซชันมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ด้วยเช่นกัน เนื่องจากเครื่อง Brabender viscograph ตั้งโปรแกรมให้เพิ่มอุณหภูมิในอัตราคงที่คือ 1.5 °C/นาที

สำหรับอุณหภูมิสิ้นสุดเจลาติไนเซชันซึ่งเป็นอุณหภูมิ ณ จุดที่มีความหนืดสูงสุด (Leszczynski และ Golachowski, 1988) พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมากสำหรับสตาร์ชมันฝรั่งและไม่แตกต่างกันสำหรับสตาร์ชมันสำปะหลังเนื่องจากลักษณะของกราฟความหนืดที่ได้ตามภาพที่ 4.16 และ 4.17 มิได้เกิดการเพิ่มและลดของความหนืดอย่างฉับพลันในช่วงความหนืดสูงสุด แต่มีลักษณะเป็นรูปโค้งมนโดยเฉพาะสตาร์ชที่ผ่านการโม่เวลานานขึ้นกราฟจะมีความโค้งมากขึ้น และในขณะที่บันทึกค่าความหนืดที่เข้าใกล้จุดสูงสุดสตาร์ชจะมีความหนืดมากและเข็มของเครื่อง Brabender viscograph ที่ใช้สำหรับบันทึกค่าความหนืดจะสั่นขึ้น ๆ ลง ๆ ทำให้โปรแกรมของ



เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิที่จุดสูงสุดของความหนืดได้ค่อนข้างคลาดเคลื่อน ซึ่งจะเห็นได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มีค่ามากกว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วัดได้จากอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจลาติโนเซชัน สำหรับค่าเวลาสิ้นสุดเจลาติโนเซชันของสตาร์ชมันฝรั่งก็มีค่าแตกต่างกันน้อยมากและไม่ต่างกันสำหรับสตาร์ชมันสำปะหลัง ซึ่งผลก็เป็นไปในทำนองเดียวกับค่าอุณหภูมิสิ้นสุดเจลาติโนเซชัน เนื่องจากอุณหภูมิแปรผันตามเวลา

สำหรับค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชทั้งสองชนิดซึ่งเป็นจุดที่มีความสมดุลกันระหว่างจำนวนเม็ดสตาร์ชที่ดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวกับจำนวนของเม็ดสตาร์ชที่แตกออก (Katz, 1938) มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อระยะเวลาในการไม่นานขึ้นเนื่องจากแรงทางกลจากการไม่ด้วย ball mill ทำลายพันธะภายในของเม็ดสตาร์ชทำให้โครงสร้างภายในโมเลกุลของสตาร์ชที่เคยยึดกันอยู่อ่อนลง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเม็ดสตาร์ชพองตัวอย่างมากพร้อมกับได้รับแรงเฉือนจากการกวนในระบบของเครื่อง Brabender viscograph ทำให้เม็ดสตาร์ชแตกออกได้ง่ายขึ้นจึงทำให้ค่าความหนืดสูงสุดมีค่าต่ำลง ซึ่งก็เป็นเหตุผลเดียวกันกับที่ความหนืดที่อุณหภูมิ  $95^{\circ}\text{C}$ , ที่  $95^{\circ}\text{C}$  คงไว้ 20 นาที, ที่  $50^{\circ}\text{C}$ , และที่  $50^{\circ}\text{C}$  คงไว้ 17 นาที ที่มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาในการไม่นานขึ้น

สำหรับค่า breakdown ซึ่งแสดงถึงเสถียรภาพของเม็ดสตาร์ชต่อแรงเฉือนและความร้อน คำนวณจากผลต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดกับความหนืดที่  $95^{\circ}\text{C}$  คงไว้ 20 นาที และค่า setback ซึ่งแสดงถึงการรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเมื่อลดอุณหภูมิลง คำนวณจากผลต่างระหว่างค่าความหนืดที่  $50^{\circ}\text{C}$  และค่าความหนืดสูงสุด (Park, Kim และ Kim, 2001) ทั้งสองค่าดังกล่าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระยะเวลาในการไม่นานขึ้น แสดงให้เห็นว่าการไม่ด้วย ball mill ทำให้สมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไป ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากทั้ง breakdown และ setback ใช้ค่าความหนืดสูงสุดในการคำนวณซึ่งเป็นค่าที่ลดลงมากที่สุดจากการไม่เมื่อเทียบกับค่าความหนืด ที่  $95^{\circ}\text{C}$  คงไว้ 20 นาทีและค่าความหนืดที่  $50^{\circ}\text{C}$  ที่ลดลงเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.11 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่ออุณหภูมิเจลาตินในเซชันและความหนืดของสตาร์ชมันฝรั่งความเข้มข้น 4% ที่วัดจากเครื่อง Brabender viscograph

	ระยะเวลาในการไม่ (ชม.)				
	0	3	6	9	12
อุณหภูมิเจลาตินในเซชัน(°C)	65.13 <sup>a</sup> ± 0.23	63.90 <sup>b</sup> ± 0.00	62.90 <sup>c</sup> ± 0.17	62.13 <sup>d</sup> ± 0.23	60.50 <sup>e</sup> ± 0.00
เวลาที่เริ่มเจลาตินในเซชัน(นาที)	10.05 <sup>a</sup> ± 0.09	9.15 <sup>b</sup> ± 0.00	8.35 <sup>c</sup> ± 0.09	8.05 <sup>d</sup> ± 0.09	7.00 <sup>e</sup> ± 0.00
อุณหภูมิที่ความหนืดสูงสุด(°C)	85.77 <sup>ab</sup> ± 0.40	87.03 <sup>a</sup> ± 1.17	87.00 <sup>a</sup> ± 0.56	86.63 <sup>a</sup> ± 0.40	84.13 <sup>b</sup> ± 1.72
เวลาที่ความหนืดสูงสุด(นาที)	23.77 <sup>ab</sup> ± 0.40	24.53 <sup>a</sup> ± 0.68	24.53 <sup>a</sup> ± 0.43	24.25 <sup>a</sup> ± 0.17	22.58 <sup>b</sup> ± 1.30
ความหนืดสูงสุด(BU) (A)	901.67 <sup>a</sup> ± 5.77	815.00 <sup>b</sup> ± 17.52	774.33 <sup>c</sup> ± 6.51	735.00 <sup>d</sup> ± 5.29	679.67 <sup>e</sup> ± 4.04
ความหนืดที่ 95 °C (BU)	783.00 <sup>a</sup> ± 7.00	740.00 <sup>b</sup> ± 9.00	701.33 <sup>c</sup> ± 3.79	673.00 <sup>d</sup> ± 8.72	619.00 <sup>e</sup> ± 1.73
ความหนืดที่ 95 °C คงไว้ 20 นาที (BU) (B)	440.33 <sup>a</sup> ± 1.53	432.33 <sup>a</sup> ± 3.06	422.67 <sup>b</sup> ± 5.51	411.00 <sup>b</sup> ± 2.65	391.33 <sup>c</sup> ± 1.53
ความหนืดที่ 50 °C (BU) (C)	588.33 <sup>a</sup> ± 5.69	590.00 <sup>a</sup> ± 3.61	577.67 <sup>b</sup> ± 10.50	575.33 <sup>b</sup> ± 0.58	552.33 <sup>c</sup> ± 1.53
ความหนืดที่ 50 °C คงไว้ 17 นาที (BU)	542.67 <sup>ab</sup> ± 4.51	549.00 <sup>a</sup> ± 3.61	538.01 <sup>ab</sup> ± 1.14	536.33 <sup>b</sup> ± 3.21	515.33 <sup>c</sup> ± 1.53
Breakdown (BU)  A-B	461.33 <sup>a</sup> ± 7.23	382.67 <sup>b</sup> ± 14.50	351.67 <sup>c</sup> ± 2.52	324.00 <sup>d</sup> ± 4.58	288.33 <sup>e</sup> ± 5.51
Setback (BU)  C-A	313.33 <sup>a</sup> ± 9.07	225.00 <sup>b</sup> ± 14.11	196.67 <sup>c</sup> ± 4.04	159.67 <sup>d</sup> ± 5.69	127.33 <sup>e</sup> ± 2.52

a, b, c ... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวนอนเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

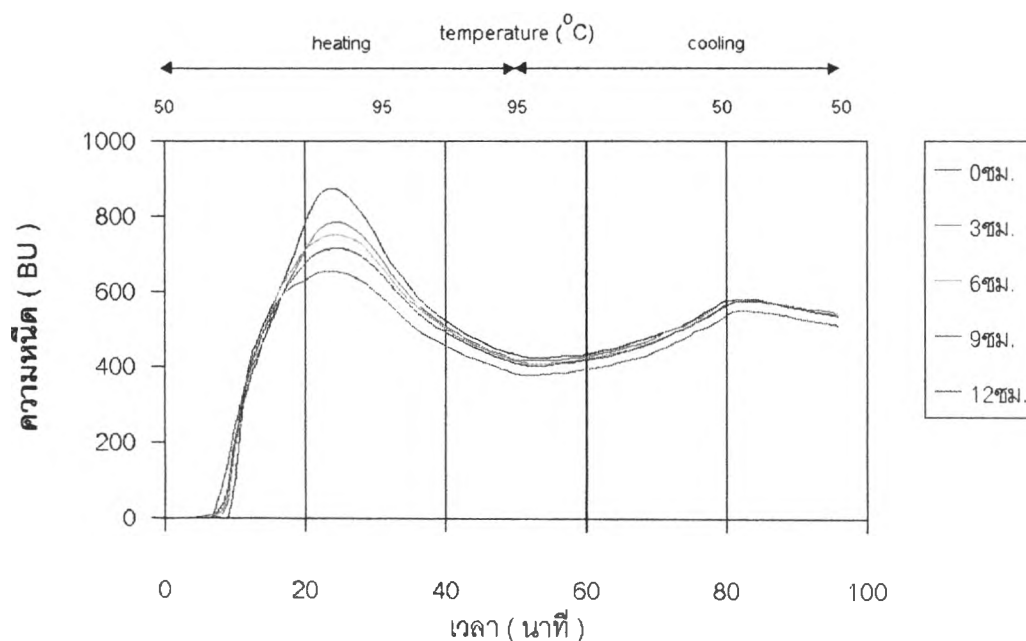
ตารางที่ 4.12 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่ออุณหภูมิเจลาตินในเซชันและความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังความเข้มข้น 6% ที่วัดจากเครื่อง Brabender viscograph

	ระยะเวลาในการไม่ (ชม.)				
	0	3	6	9	12
อุณหภูมิเจลาตินในเซชัน(°C)	67.60 <sup>a</sup> ± 0.00	66.90 <sup>b</sup> ± 0.00	66.10 <sup>c</sup> ± 0.00	65.40 <sup>d</sup> ± 0.00	64.40 <sup>e</sup> ± 0.17
เวลาที่เริ่มเจลาตินในเซชัน(นาที)	11.45 <sup>a</sup> ± 0.00	11.15 <sup>b</sup> ± 0.00	10.45 <sup>c</sup> ± 0.00	10.15 <sup>d</sup> ± 0.00	9.35 <sup>e</sup> ± 0.09
อุณหภูมิที่ความหนืดสูงสุด <sup>ns</sup> (°C)	76.03 ± 0.23	77.03 ± 1.00	76.17 ± 0.23	76.53 ± 1.17	76.53 ± 0.40
เวลาที่ความหนืดสูงสุด <sup>ns</sup> (นาที)	17.20 ± 0.09	17.87 ± 0.63	17.25 ± 0.09	17.53 ± 0.68	17.53 ± 0.40
ความหนืดสูงสุด(BU) (A)	583.67 <sup>a</sup> ± 6.81	562.33 <sup>b</sup> ± 4.93	560.67 <sup>bc</sup> ± 5.13	550.00 <sup>c</sup> ± 3.61	535.00 <sup>d</sup> ± 8.72
ความหนืดที่ 95 °C (BU)	314.33 <sup>a</sup> ± 2.08	312.67 <sup>a</sup> ± 3.51	309.33 <sup>b</sup> ± 3.06	304.67 <sup>b</sup> ± 5.51	297.00 <sup>c</sup> ± 4.00
ความหนืดที่ 95 °C คงไว้ 20 นาที (BU) (B)	215.33 <sup>a</sup> ± 1.53	216.67 <sup>a</sup> ± 2.89	213.67 <sup>a</sup> ± 0.58	212.67 <sup>b</sup> ± 2.52	208.33 <sup>b</sup> ± 3.06
ความหนืดที่ 50 °C (BU) (C)	400.00 <sup>a</sup> ± 1.00	401.67 <sup>a</sup> ± 4.04	393.67 <sup>ab</sup> ± 5.51	395.67 <sup>ab</sup> ± 2.08	391.00 <sup>b</sup> ± 6.08
ความหนืดที่ 50 °C คงไว้ 17 นาที (BU)	394.00 <sup>a</sup> ± 1.00	388.33 <sup>a</sup> ± 5.03	389.00 <sup>a</sup> ± 5.00	386.33 <sup>ab</sup> ± 1.53	379.33 <sup>b</sup> ± 6.11
Breakdown (BU)  A-B	368.33 <sup>a</sup> ± 5.51	345.67 <sup>b</sup> ± 2.08	347.00 <sup>b</sup> ± 4.58	337.33 <sup>c</sup> ± 2.31	326.67 <sup>d</sup> ± 6.11
Setback (BU)  C-A	183.67 <sup>a</sup> ± 6.11	160.67 <sup>bc</sup> ± 1.53	167.00 <sup>b</sup> ± 4.36	154.33 <sup>c</sup> ± 4.16	144.00 <sup>d</sup> ± 7.55

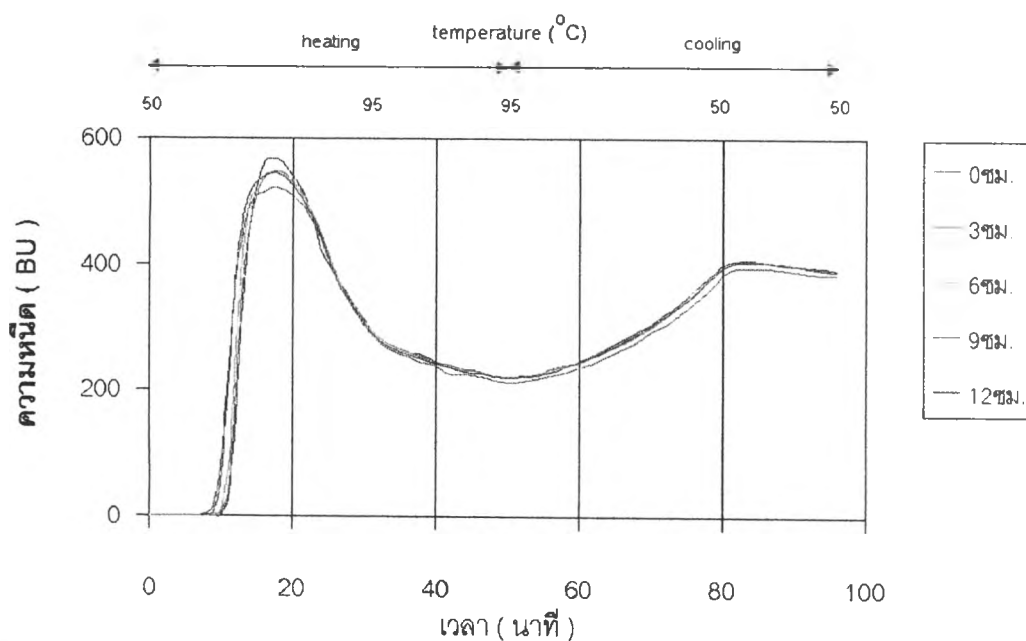
a, b, c ... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวนอนเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

ns หมายถึงไม่แตกต่างกัน (p>0.05)





ภาพที่ 4.16 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อลักษณะกราฟความหนืดของสตาร์ไขมันฝรั่ง ความเข้มข้น 4 % ที่วัดด้วยเครื่อง Brabender viscosgraph



ภาพที่ 4.17 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อลักษณะกราฟความหนืดของสตาร์ไขมัน สำปะหลังความเข้มข้น 6 % ที่วัดด้วยเครื่อง Brabender viscosgraph

#### 4.3.8 สมบัติด้านความหนืดที่วัดจากเครื่อง Rapid visco analyser (RVA)

นำสสารไขมันฝรั่งและสสารไขมันลำปะหลังที่ผ่านการโม่ด้วย ball mill มาวัดความหนืดด้วยเครื่อง RVA โดยใช้ความเข้มข้นของสารแขวนลอยสสารเท่ากับที่ใช้วัดความหนืดด้วยเครื่อง Brabender viscograph คือสสารไขมันฝรั่งใช้ 4% และสสารไขมันลำปะหลังใช้ 6 % โดยน้ำหนักแห้งได้ผลดังภาพที่ 4.18 และ 4.19 ซึ่งได้ผลการทดลองคล้ายกับกราฟความหนืดที่วัดจากเครื่อง Brabender viscograph คือเมื่อใช้เวลาในการโม่นานขึ้นสมบัติทางความหนืดของสสารทั้งสองเปลี่ยนแปลงไปคืออุณหภูมิเจลาติไนเซชันซึ่งเป็นจุดที่เครื่อง RVA วัดความหนืดได้ 2 RVU เป็นเวลา 20 วินาที และความหนืด ณ จุดต่าง ๆ มีแนวโน้มเป็นไปในทำนองเดียวกับที่วัดจากเครื่อง Brabender viscograph ดังตารางที่ 4.13 และ 4.14 โดยอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน, อุณหภูมิที่ความหนืดสูงสุด, เวลาที่ความหนืดสูงสุด, ความหนืดสูงสุด, ความหนืดที่ 95 °C, ความหนืดต่ำสุด (trough), ความหนืดที่ 50 °C และความหนืดสุดท้ายที่ 50 °C คงไว้เป็นเวลา 2.1 นาที มีค่าลดลง สอดคล้องกับการทดลองของ Becker, Hill และ Mitchell (2001) ที่ทดลองโม่ maize grit ด้วย disk mill และ impeller mill แล้วพบว่าสสารที่ได้จากการโม่ด้วย impeller mill เกิดความเสียหายมากกว่าและมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าจะทำให้ความหนืดสูงสุดและความหนืดสุดท้ายที่วัดได้จากเครื่อง RVA ต่ำกว่าที่วัดได้จากสสารที่โม่ด้วย disk mill

สำหรับค่า breakdown ที่บ่งชี้ถึงความคงตัวของสสารต่อแรงเฉือนและความร้อน คำนวณจากผลต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด และ setback ที่บ่งชี้ถึงการเกิดรีโทรเกรดเซชัน คำนวณจากผลต่างระหว่างความหนืดที่อุณหภูมิ 50 °C และความหนืดสูงสุด ทั้งสองค่าดังกล่าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระยะเวลาในการโม่ยาวนานขึ้น แสดงให้เห็นว่าการโม่ด้วย ball mill ทำให้สมบัติทางด้านความหนืดของสสารเปลี่ยนแปลงไปเช่นเดียวกับที่วัดได้จากเครื่อง Brabender viscograph ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากทั้ง breakdown และ setback ใช้ค่าความหนืดสูงสุดในการคำนวณซึ่งเป็นค่าที่ลดลงมากที่สุดจากการโม่เมื่อเทียบกับค่าความหนืดต่ำสุดและค่าความหนืดที่ 50 °C ที่ลดลงเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.13 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่ออุณหภูมิเจลาตินในเซชันและความหนืดของสตาร์ชมันฝรั่งความเข้มข้น 4% ที่วัดจากเครื่อง RVA

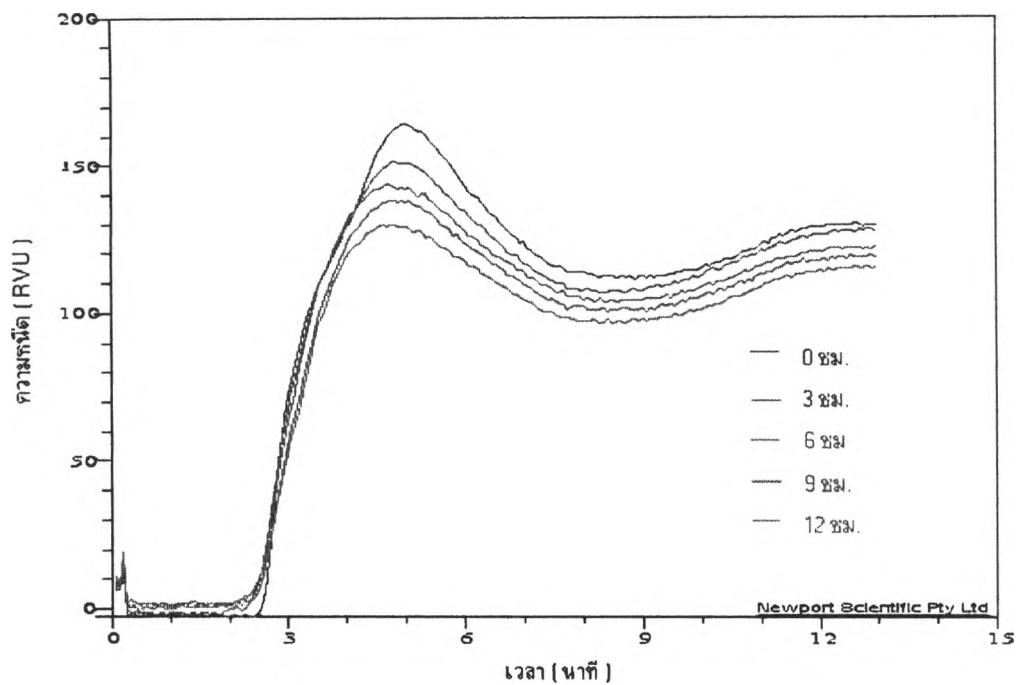
	ระยะเวลาในการไม่ (ชม.)				
	0	3	6	9	12
อุณหภูมิเจลาตินในเซชัน(°C)	67.42 <sup>a</sup> ± 0.03	66.74 <sup>a</sup> ± 0.47	65.40 <sup>b</sup> ± 0.66	65.58 <sup>b</sup> ± 0.92	65.10 <sup>b</sup> ± 0.52
อุณหภูมิที่ความหนืดสูงสุด(°C)	95.52 <sup>a</sup> ± 0.09	95.30 <sup>ab</sup> ± 0.21	95.00 <sup>ab</sup> ± 0.30	95.08 <sup>ab</sup> ± 0.93	94.54 <sup>b</sup> ± 0.16
เวลาที่ความหนืดสูงสุด(นาที)	4.92 <sup>ab</sup> ± 0.05	4.99 <sup>a</sup> ± 0.08	4.80 <sup>bc</sup> ± 0.15	4.78 <sup>bc</sup> ± 0.13	4.68 <sup>c</sup> ± 0.02
ความหนืดสูงสุด(RVU) (A)	167.98 <sup>a</sup> ± 6.18	155.71 <sup>b</sup> ± 2.13	145.19 <sup>c</sup> ± 0.43	137.72 <sup>d</sup> ± 2.38	129.61 <sup>e</sup> ± 1.69
ความหนืดที่ 95 °C (RVU)	164.57 <sup>a</sup> ± 7.69	152.24 <sup>b</sup> ± 1.25	144.72 <sup>c</sup> ± 0.14	137.10 <sup>d</sup> ± 2.00	129.29 <sup>e</sup> ± 1.64
ความหนืดที่ต่ำที่สุด (RVU) (B)	110.39 <sup>a</sup> ± 1.54	109.95 <sup>a</sup> ± 1.69	104.09 <sup>b</sup> ± 0.57	100.88 <sup>c</sup> ± 2.12	95.51 <sup>d</sup> ± 1.09
ความหนืดที่ 50 °C (RVU) (C)	122.96 <sup>a</sup> ± 1.68	124.90 <sup>a</sup> ± 2.45	118.39 <sup>b</sup> ± 1.12	114.05 <sup>c</sup> ± 2.18	108.90 <sup>d</sup> ± 0.64
ความหนืดที่ 50 °C คงไว้ 2.1 นาที (RVU)	129.31 <sup>a</sup> ± 1.05	130.03 <sup>a</sup> ± 1.04	124.10 <sup>b</sup> ± 3.00	120.30 <sup>c</sup> ± 1.52	115.24 <sup>d</sup> ± 0.81
Breakdown (RVU)  A-B	57.59 <sup>a</sup> ± 4.64	45.78 <sup>b</sup> ± 0.90	41.10 <sup>c</sup> ± 0.19	36.91 <sup>d</sup> ± 0.75	34.18 <sup>d</sup> ± 1.72
Setback (RVU)  C-A	45.01 <sup>a</sup> ± 4.66	30.81 <sup>b</sup> ± 3.84	26.79 <sup>bc</sup> ± 1.09	23.66 <sup>cd</sup> ± 0.61	20.71 <sup>d</sup> ± 1.12

a, b, c ... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวนอนเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

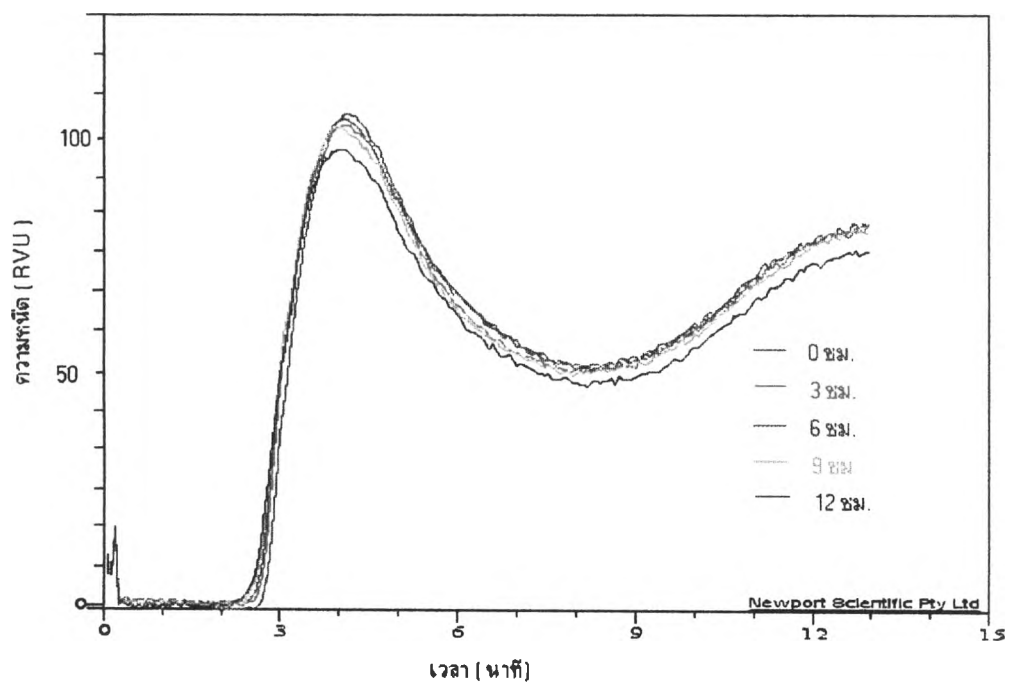
ตารางที่ 4.14 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่ออุณหภูมิเจลาตินในเซชันและความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังความเข้มข้น 6% ที่วัดจากเครื่อง RVA

	ระยะเวลาในการไม่ (ชม.)				
	0	3	6	9	12
อุณหภูมิเจลาตินในเซชัน(°C)	70.12 <sup>a</sup> ± 0.23	69.32 <sup>b</sup> ± 0.23	68.79 <sup>b</sup> ± 0.46	67.70 <sup>c</sup> ± 0.22	66.90 <sup>d</sup> ± 0.32
อุณหภูมิที่ความหนืดสูงสุด(°C)	88.44 <sup>a</sup> ± 0.70	88.55 <sup>a</sup> ± 0.80	87.90 <sup>a</sup> ± 0.24	87.78 <sup>a</sup> ± 0.37	86.35 <sup>b</sup> ± 0.57
เวลาที่ความหนืดสูงสุด(นาที)	4.17 <sup>a</sup> ± 0.06	4.17 <sup>a</sup> ± 0.06	4.13 <sup>a</sup> ± 0.02	4.12 <sup>a</sup> ± 0.03	3.99 <sup>b</sup> ± 0.05
ความหนืดสูงสุด(RVU) (A)	103.36 <sup>a</sup> ± 1.09	100.36 <sup>b</sup> ± 0.21	102.22 <sup>a</sup> ± 0.58	99.93 <sup>b</sup> ± 0.87	97.51 <sup>c</sup> ± 0.60
ความหนืดที่ 95 °C (RVU)	96.13 <sup>a</sup> ± 0.11	93.80 <sup>b</sup> ± 0.33	94.59 <sup>b</sup> ± 0.47	92.75 <sup>c</sup> ± 0.92	89.17 <sup>d</sup> ± 0.13
ความหนืดที่ต่ำที่สุด (RVU) (B)	50.00 <sup>a</sup> ± 0.60	49.77 <sup>a</sup> ± 0.50	49.88 <sup>a</sup> ± 0.46	48.02 <sup>b</sup> ± 0.97	46.73 <sup>c</sup> ± 0.18
ความหนืดที่ 50 °C (RVU) (C)	69.07 <sup>a</sup> ± 0.63	68.95 <sup>a</sup> ± 1.04	69.13 <sup>a</sup> ± 0.45	67.30 <sup>ab</sup> ± 1.23	65.90 <sup>b</sup> ± 1.12
ความหนืดที่ 50 °C คงไว้ 2.1 นาที (RVU)	80.95 <sup>a</sup> ± 0.29	79.78 <sup>b</sup> ± 0.28	80.71 <sup>a</sup> ± 0.36	78.27 <sup>c</sup> ± 0.89	75.98 <sup>d</sup> ± 0.33
Breakdown (RVU)  A-B	53.18 <sup>a</sup> ± 1.25	50.59 <sup>b</sup> ± 0.30	52.35 <sup>a</sup> ± 0.37	51.91 <sup>ab</sup> ± 0.15	50.78 <sup>b</sup> ± 0.78
Setback (RVU)  C-A	34.29 <sup>a</sup> ± 0.69	31.41 <sup>b</sup> ± 1.20	33.10 <sup>ab</sup> ± 0.48	32.62 <sup>ab</sup> ± 0.41	31.60 <sup>b</sup> ± 1.69

a, b, c ... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวนอนเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)



ภาพที่ 4.18 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อลักษณะกราฟความหนืดของสตาร์ชมันฝรั่ง ความเข้มข้น 4 % ที่วัดด้วยเครื่อง RVA



ภาพที่ 4.19 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อลักษณะกราฟความหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังความเข้มข้น 6 % ที่วัดด้วยเครื่อง RVA



#### 4.3.9 สมบัติทางความร้อนที่วัดจากเครื่อง DSC

เมื่อระยะเวลาในการโม่สตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังด้วย ball mill นานขึ้น อุณหภูมิเจลาติไนเซชันที่วัดจากเครื่อง DSC มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางที่ 4.15 และ 4.16 เนื่องจากแรงกลทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดความเสียหายและมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบลดลง อีกทั้งยังทำลายความต่อเนื่องของเปลือกนอกของเม็ดสตาร์ช ทำให้ส่วนอสัณฐานเผยออกมาจึงง่ายต่อการเกิดเจลาติไนเซชัน (Morrison และคณะ, 1994) สตาร์ชมันฝรั่งที่ระยะเวลาในการโม่ 12 ชม. มีอุณหภูมิเริ่มต้นเจลาติไนเซชัน ( $T_o$ ) ลดลงจากสตาร์ชธรรมชาติมากที่สุดคือประมาณ  $6^\circ\text{C}$  ในขณะที่อุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชันสูงสุด ( $T_p$ ) และอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลาติไนเซชัน ( $T_c$ ) มีค่าลดลงน้อยกว่าคือประมาณ  $3$  และ  $2^\circ\text{C}$  ตามลำดับ เช่นเดียวกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระยะเวลาในการโม่ 12 ชม.  $T_o$  มีค่าลดลงมากกว่า  $T_p$  และ  $T_c$  คือลดลงจากสตาร์ชธรรมชาติประมาณ  $9$ ,  $2$  และ  $2^\circ\text{C}$  ตามลำดับ เนื่องจากการโม่เป็นเวลา 12 ชม. ทำให้เกิดความเสียหายกับสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังเพียง 20 และ 12 % ตามลำดับดังตารางที่ 4.5 ซึ่งจากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงโพลาไรซ์พบว่าเม็ดสตาร์ชแต่ละเม็ดเกิดความเสียหายมากน้อยไม่เท่ากันคือบางเม็ดที่สมบูรณ์ดีหรือเสียหายน้อยยังคงมี birefringence ในขณะที่บางเม็ดที่เกิดความเสียหายมาก birefringence ก็หายไป ดังนั้นเม็ดสตาร์ชที่เสียหายมากก็จะเริ่มเจลาติไนเซชันได้ก่อนที่อุณหภูมิต่ำลงทำให้ค่า  $T_o$  ต่ำลง แต่เม็ดสตาร์ชส่วนใหญ่ที่ยังคงสมบูรณ์ดีหรือเสียหายน้อยก็ยังคงเจลาติไนเซชันที่อุณหภูมิเดิมจึงทำให้ค่า  $T_p$  และ  $T_c$  ลดลงไม่มากนัก

นอกจากนี้เมื่อระยะเวลาในการโม่ยาวนานขึ้นค่าพลังงานที่ถูกดูดกลืนสำหรับเจลาติไนเซชันสตาร์ช ( $\Delta H$ ) ทั้งสองชนิดก็มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) เนื่องจากแรงทางกลจากการโม่ด้วย ball mill ทำให้พันธะ  $\alpha$ -1,4-glucosidic ในสายของอัมัยโลเพกตินบริเวณใกล้เคียงกับจุดเชื่อมกิ่งแตกออกเกิดเป็นอัมัยโลเพกตินมวลโมเลกุลต่ำที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน (Morrison และคณะ, 1994) ซึ่งจะเห็นได้จากพื้นที่ใต้ peak จาก thermogram ของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการโม่ยาวนานขึ้นดังภาพที่ 4.20 และ 4.21

ตารางที่ 4.15 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่ออุณหภูมิเจลาตินในเซชันและพลังงานที่ใช้สำหรับเจลาตินในเซชันสตาร์ชมันฝรั่งที่วัดจากเครื่อง DSC

เวลาในการ ไม่(ชม.)	อุณหภูมิเจลาตินในเซชัน (°C)*			$\Delta H$ (J/g)
	To	Tp	Tc	
0	59.562 <sup>a</sup> ± 0.569	63.360 <sup>a</sup> ± 0.281	75.733 <sup>a</sup> ± 0.577	19.672 <sup>a</sup> ± 0.421
3	56.238 <sup>b</sup> ± 0.198	62.807 <sup>b</sup> ± 0.341	73.922 <sup>b</sup> ± 0.686	15.909 <sup>b</sup> ± 0.636
6	54.485 <sup>c</sup> ± 0.119	61.682 <sup>c</sup> ± 0.069	73.689 <sup>b</sup> ± 1.086	14.189 <sup>c</sup> ± 0.305
9	54.498 <sup>c</sup> ± 0.193	61.447 <sup>c</sup> ± 0.243	73.955 <sup>b</sup> ± 0.434	13.640 <sup>c</sup> ± 0.204
12	53.575 <sup>d</sup> ± 0.117	60.145 <sup>d</sup> ± 0.011	73.322 <sup>b</sup> ± 0.957	11.982 <sup>d</sup> ± 0.579

a, b, c...ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

\* To (onset temperature) คืออุณหภูมิเริ่มต้นเกิดเจลาตินในเซชัน

Tp (peak temperature) คืออุณหภูมิที่เกิดเจลาตินในเซชันสูงสุด

Tc (conclusion temperature) คืออุณหภูมิสิ้นสุดการเกิดเจลาตินในเซชัน

$\Delta H$  คือพลังงานที่ใช้สำหรับเจลาตินในเซชัน

ตารางที่ 4.16 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่ออุณหภูมิเจลาตินในเซชันและพลังงานที่ใช้สำหรับเจลาตินในเซชันสตาร์ชมันสำปะหลังที่วัดจากเครื่อง DSC

เวลาในการ ไม่(ชม.)	อุณหภูมิเจลาตินในเซชัน (°C)*			$\Delta H$ (J/g)
	To	Tp	Tc	
0	61.890 <sup>a</sup> ± 0.437	67.598 <sup>a</sup> ± 0.337	81.444 <sup>a</sup> ± 0.330	15.973 <sup>a</sup> ± 1.143
3	59.589 <sup>b</sup> ± 0.395	66.391 <sup>b</sup> ± 0.023	79.933 <sup>b</sup> ± 0.306	15.238 <sup>ab</sup> ± 0.241
6	57.655 <sup>c</sup> ± 0.332	66.091 <sup>b</sup> ± 0.121	79.733 <sup>b</sup> ± 0.611	14.597 <sup>bc</sup> ± 0.235
9	54.494 <sup>d</sup> ± 0.497	65.417 <sup>c</sup> ± 0.239	79.300 <sup>b</sup> ± 0.177	13.929 <sup>c</sup> ± 0.360
12	52.320 <sup>e</sup> ± 0.295	65.491 <sup>c</sup> ± 0.192	79.311 <sup>b</sup> ± 0.934	12.352 <sup>d</sup> ± 0.228

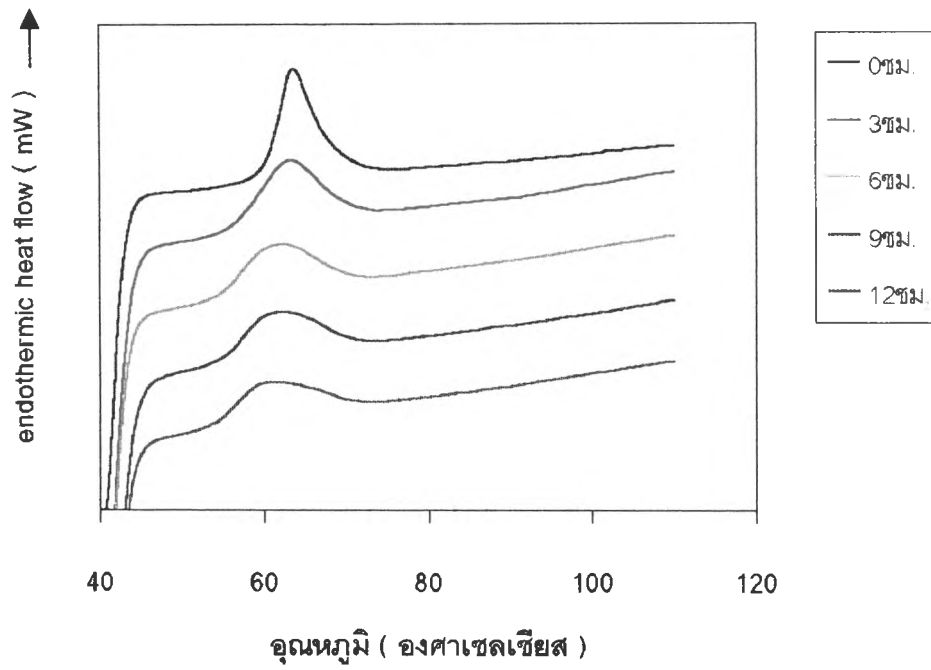
a, b, c...ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

\* To (onset temperature) คืออุณหภูมิเริ่มต้นเกิดเจลาตินในเซชัน

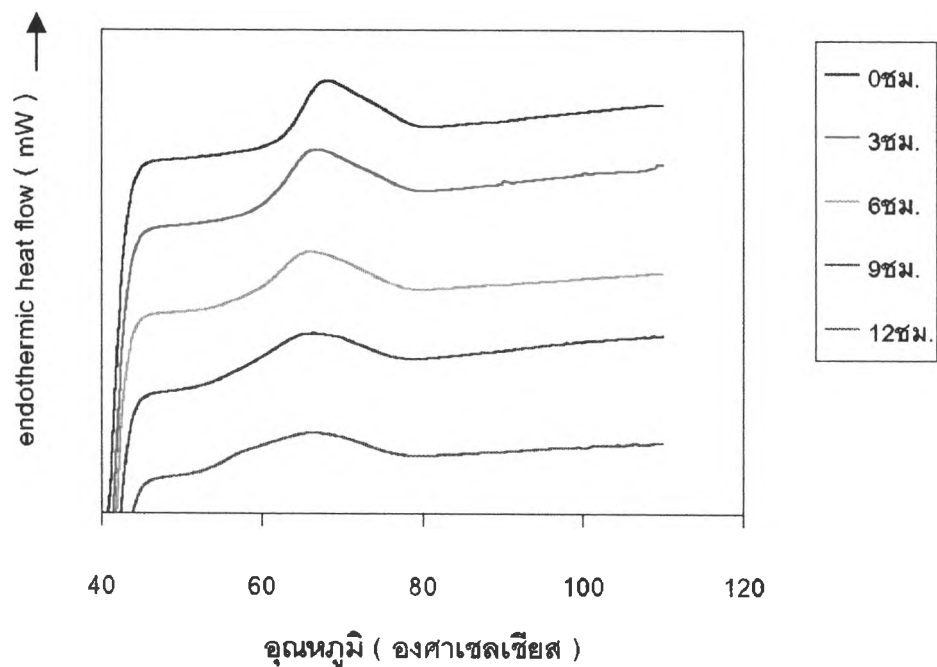
Tp (peak temperature) คืออุณหภูมิที่เกิดเจลาตินในเซชันสูงสุด

Tc (conclusion temperature) คืออุณหภูมิสิ้นสุดการเกิดเจลาตินในเซชัน

$\Delta H$  คือพลังงานที่ใช้สำหรับเจลาตินในเซชัน



ภาพที่ 4.20 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อ DSC thermogram ของสตาร์ชมันฝรั่ง



ภาพที่ 4.21 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่อ DSC thermogram ของสตาร์ชมันสำปะหลัง

#### 4.3.10 อุณหภูมิเจลาตินในเซชันเมื่อวัดด้วยเครื่องมือที่สร้างขึ้น

จากการนำสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการโม่ด้วย ball mill มาวัดอุณหภูมิเจลาตินในเซชันจากการลดลงของค่า%ความเข้มแสงโพลาไรซ์ที่ส่องผ่านสไลด์ของสารแขวนลอยสตาร์ชตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นด้วยเครื่องมือที่สร้างขึ้นได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.17 และ 4.18 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการโม่เพิ่มขึ้น อุณหภูมิเริ่มเจลาตินในเซชันที่วัดจาก % ความเข้มแสงลดลงเหลือ 98% ของทั้งสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังมีค่าต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) และอุณหภูมิที่ % ความเข้มแสงต่าง ๆ ก็ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากแรงทางกลจากการโม่ทำลายความต่อเนื่องของชั้นผลึกทำให้โครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชอ่อนลง เมื่อได้รับความร้อนจึงเกิดเจลาตินในเซชันและสูญเสียลักษณะ birefringence ได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.17 ผลของระยะเวลาในการโม่ต่ออุณหภูมิที่ค่า % ความเข้มแสงต่าง ๆ ของสตาร์ชมันฝรั่งที่วัดจากเครื่องมือที่สร้างขึ้น

% ความเข้มแสง	อุณหภูมิของสตาร์ชที่ระยะเวลาการโม่ต่างกัน ( $^{\circ}\text{C}$ )				
	0ชม.	3ชม.	6ชม.	9ชม.	12ชม.
98	58.6 <sup>a</sup> ± 0.8	51.7 <sup>b</sup> ± 1.1	50.2 <sup>bc</sup> ± 0.6	49.1 <sup>cd</sup> ± 1.6	48.1 <sup>d</sup> ± 0.5
95	59.4 <sup>a</sup> ± 0.6	53.9 <sup>b</sup> ± 0.9	52.5 <sup>bc</sup> ± 0.3	51.3 <sup>cd</sup> ± 1.3	50.8 <sup>d</sup> ± 0.8
90	60.2 <sup>a</sup> ± 0.5	55.8 <sup>b</sup> ± 0.9	54.4 <sup>c</sup> ± 0.2	53.1 <sup>cd</sup> ± 1.0	52.9 <sup>d</sup> ± 0.8
80	61.1 <sup>a</sup> ± 0.5	57.7 <sup>b</sup> ± 0.8	56.5 <sup>bc</sup> ± 0.3	55.3 <sup>cd</sup> ± 0.8	55.0 <sup>d</sup> ± 0.8
70	61.7 <sup>a</sup> ± 0.4	58.7 <sup>b</sup> ± 0.8	57.7 <sup>bc</sup> ± 0.3	56.5 <sup>c</sup> ± 0.7	56.6 <sup>c</sup> ± 0.8
60	62.1 <sup>a</sup> ± 0.3	59.5 <sup>b</sup> ± 0.8	58.7 <sup>bc</sup> ± 0.4	57.7 <sup>d</sup> ± 0.6	57.8 <sup>cd</sup> ± 0.6
50	62.7 <sup>a</sup> ± 0.4	60.3 <sup>b</sup> ± 0.9	59.5 <sup>bc</sup> ± 0.3	58.4 <sup>d</sup> ± 0.6	58.8 <sup>cd</sup> ± 0.6
40	63.3 <sup>a</sup> ± 0.3	61.1 <sup>b</sup> ± 0.9	60.3 <sup>bc</sup> ± 0.4	59.1 <sup>d</sup> ± 0.7	59.7 <sup>cd</sup> ± 0.6
30	64.1 <sup>a</sup> ± 0.3	61.9 <sup>b</sup> ± 1.0	61.2 <sup>bc</sup> ± 0.4	59.9 <sup>d</sup> ± 0.7	60.6 <sup>cd</sup> ± 0.5

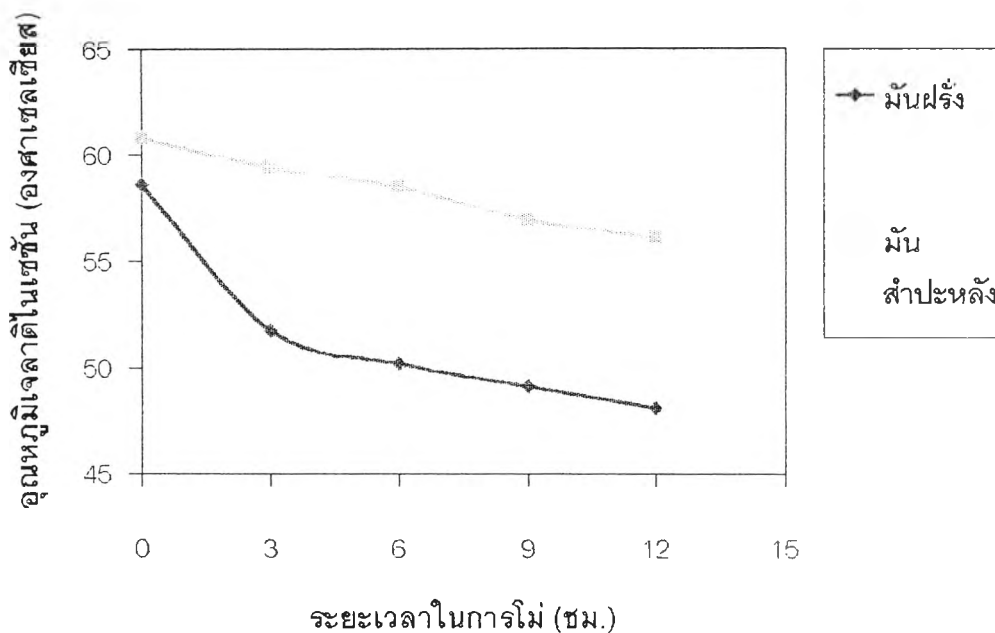
a, b, c... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวนอนเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ 4.18 ผลของระยะเวลาในการไม่ต่ออุณหภูมิที่ค่า % ความเข้มแสงต่าง ๆ ของสตาร์ชมันสำปะหลังที่วัดจากเครื่องมือที่สร้างขึ้น

% ความเข้มแสง	อุณหภูมิของสตาร์ชที่ระยะเวลาการไม่ต่างกัน (°C)				
	0ชม.	3ชม.	6ชม.	9ชม.	12ชม.
98	60.8 <sup>a</sup> ± 0.7	59.4 <sup>ab</sup> ± 0.3	58.5 <sup>bc</sup> ± 0.6	56.9 <sup>d</sup> ± 0.8	56.1 <sup>d</sup> ± 1.2
95	61.4 <sup>a</sup> ± 0.6	60.1 <sup>ab</sup> ± 0.3	59.3 <sup>bc</sup> ± 0.5	58.0 <sup>d</sup> ± 0.7	57.2 <sup>d</sup> ± 1.1
90	62.0 <sup>a</sup> ± 0.4	60.9 <sup>ab</sup> ± 0.3	60.1 <sup>bc</sup> ± 0.4	59.1 <sup>cd</sup> ± 0.7	58.5 <sup>d</sup> ± 0.8
80	63.0 <sup>a</sup> ± 0.3	62.2 <sup>ab</sup> ± 0.5	61.4 <sup>bc</sup> ± 0.4	60.7 <sup>cd</sup> ± 0.5	60.2 <sup>d</sup> ± 0.8
70	63.9 <sup>a</sup> ± 0.2	63.3 <sup>ab</sup> ± 0.6	62.5 <sup>bc</sup> ± 0.4	61.9 <sup>cd</sup> ± 0.5	61.5 <sup>d</sup> ± 0.8
60	65.0 <sup>a</sup> ± 0.3	64.4 <sup>ab</sup> ± 0.7	63.6 <sup>bc</sup> ± 0.4	63.1 <sup>c</sup> ± 0.4	62.8 <sup>c</sup> ± 0.9

a, b, c...ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวนอนเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

เมื่อพิจารณากราฟระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นเจลาติไนเซชันซึ่งเป็นอุณหภูมิที่วัดความเข้มแสงได้ 98 % กับระยะเวลาในการไม่ดังภาพที่ 4.22 พบว่าอุณหภูมิเริ่มเจลาติไนเซชันของสตาร์ชมันฝรั่งมิได้มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงกับระยะเวลาในการไม่ โดยช่วง 3 ชม.แรกของการไม่กราฟมีความชันมากที่สุด หลังจากนั้นความชันเกือบคงที่จากระยะเวลาในการไม่ 3-12 ชม. ในขณะที่กราฟของสตาร์ชมันสำปะหลังมีความสัมพันธ์กันเข้าใกล้เส้นตรงตั้งแต่ระยะเวลาในการไม่ 0-12 ชม. ซึ่งสอดคล้องกับกราฟของร้อยละของเม็ดสตาร์ชที่เสียหายดังภาพที่ 4.8 ทั้งนี้ อาจมีสาเหตุมาจากการที่เม็ดสตาร์ชมันฝรั่งมีขนาดใหญ่และเล็กปนกัน (5-100  $\mu\text{m}$  ดังตารางที่ 2.1) เม็ดที่มีขนาดใหญ่มีพื้นที่ในการรองรับแรงกระแทกจากลูกบอลล์มากกว่าจึงเกิดความเสียหายได้มากในช่วงเวลา 3 ชม.แรกของการไม่ แต่เม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังมีขนาดเล็กกว่าเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งอีกทั้งยังมีขนาดสม่ำเสมอ (4-35  $\mu\text{m}$  ดังตารางที่ 2.1) จึงทำให้เกิดความเสียหายได้สม่ำเสมอตามระยะเวลาการไม่ที่นานขึ้นมากกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง



ภาพที่ 4.22 ผลของระยะเวลาในการโม่ต่ออุณหภูมิเจลาติเนชันของสตาร์ชมันฝรั่งและมันสำปะหลังเมื่อวัดด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น

#### 4.4 เปรียบเทียบและหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเจลาติเนชันที่วัดด้วยเครื่องต่าง ๆ

จากการนำสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผ่านการโม่ด้วย ball mill ที่ระยะเวลาต่าง ๆ มาวัดอุณหภูมิเจลาติเนชันด้วยเครื่อง Brabender viscograph, RVA , DSC และเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยใช้สภาวะในการวัดสำหรับเครื่อง Brabender viscograph และ RVA ตามวิธีของ Thiewes และ Steeneken (1997) ดังตารางที่ 4.19 สำหรับวิธีวัดด้วยเครื่อง DSC ใช้เครื่องของ Perkin Elmer รุ่น DSC-7 ปริมาณสารแขวนลอยสตาร์ช 10 mg โดยใช้อัตราส่วนสตาร์ชแห้ง : น้ำ เท่ากับ 1 : 2 ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่มากเกินไปที่จะทำให้สตาร์ชเกิดเจลาติเนชันได้อย่างสมบูรณ์และเกิด peak ของการเจลาติเนชันเพียง peak เดียว และใช้อัตราการให้ความร้อน  $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$  จากอุณหภูมิ  $40-110^{\circ}\text{C}$  รายละเอียดในภาคผนวก ก.16 ส่วนวิธีวัดอุณหภูมิเจลาติเนชันจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นมีรายละเอียดดังภาพที่ 3.3 แล้วนำอุณหภูมิเจลาติเนชันที่วัดได้จากแต่ละเครื่องมาเปรียบเทียบและหาความสัมพันธ์กันได้ผลดังตารางที่ 4.20 และ 4.21

ตารางที่ 4.19 เปรียบเทียบสภาวะที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิเจลลาติโนเซชันด้วยเครื่อง Brabender viscograph และ RVA

เครื่องมือ	Brabender viscograph	RVA
รุ่น	PT 100	3d
ปริมาณสารแขวนลอยสตาร์ช (g)	460 ± 0.05	27.50 ± 0.01
เวลาที่คงไว้ที่ 50 °C (นาที)	-	1
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิจาก 50 °C → 95 °C (°C/นาที)	1.5	12.2
เวลาที่คงไว้ที่ 95 °C (นาที)	20	2.5
อัตราการลดอุณหภูมิจาก 95 °C → 50 °C (°C/นาที)	1.5	12.2
เวลาที่คงไว้ที่ 50 °C (นาที)	17	2.1
ความเร็วรอบใบกวน (rpm)	75(700cmg cartridge)	160

จากการทดลองวัดอุณหภูมิเจลลาติโนเซชันด้วยเครื่อง Brabender viscograph และ RVA ใช้ความเข้มข้นของสารแขวนลอยสตาร์ชเท่ากันทั้งสองเครื่องมือ โดยสตาร์ชมันฝรั่งใช้ 4% และ สตาร์ชมันสำปะหลังใช้ 6% โดยน้ำหนักแห้ง เพื่อตัดปัจจัยนี้ออกไป และ Thiewes และ Steeneken (1997) ได้ทำการทดลองแล้วพบว่าถ้าใช้ความเข้มข้นต่างกัน ข้อมูลความหนืดที่ได้จากทั้งสองเครื่องมือจะให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำ แต่ที่ใช้ความเข้มข้นของสารแขวนลอยสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังต่างกันเนื่องจากที่อุณหภูมิเท่ากันเม็ดสตาร์ชมันฝรั่งมีกำลังการพองตัวสูงกว่าเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังมาก จึงต้องใช้ความเข้มข้นน้อยกว่าเพื่อมิให้ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) มีค่าเกิน 1,000 BU ทำให้ต้องถ่วงหัว cartridge ด้วยตุ้มน้ำหนักซึ่งจะมีผลทำให้สปริงของหัว cartridge เสื่อมสภาพเร็ว

และจากการทดลองเลือกใช้ profile standard 1 ซึ่งเป็นวิธีวัดมาตรฐานของเครื่อง RVA ที่ใช้อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 12.2 °C/นาที และใช้เวลาในการทดสอบ 13 นาที เนื่องจาก Haase, Mintus และ Weipert (1995) ได้ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างเครื่อง Brabender viscograph และ RVA โดยเครื่อง Brabender viscograph ใช้อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิปกติคือ 1.5 °C/นาที ในขณะที่เครื่อง RVA เลือกใช้ 4 profile ที่ใช้เวลาทดสอบ 13, 22, 42 และ 93 นาทีตามลำดับ โดยทำการทดลองกับตัวอย่างสตาร์ชมันฝรั่งที่ต่างกัน 10 ชนิด พบว่าค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity), ความหนืดต่ำสุด (trough), ความหนืดสุดท้าย (final

viscosity) และเวลาในการเกิดเจลลิตีในเซชันที่วัดได้จาก profile standard 1 ที่ใช้เวลาในการทดสอบ 13 นาที ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่าที่วัดได้จากเครื่อง Brabender viscograph สูงที่สุด

จากตารางที่ 4.20 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติเจลลิตีในเซชันที่วัดได้จากเครื่อง Brabender viscograph และ RVA พบว่าอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันที่วัดได้จากเครื่อง RVA มีค่ามากกว่าที่วัดได้จากเครื่อง Brabender viscograph ประมาณ 2-4 °C เนื่องจากระบบการวัดอุณหภูมิของทั้งสองเครื่องแตกต่างกันโดยที่ Brabender viscograph จะวัดอุณหภูมิของตัวอย่างสารแขวนลอยสตาร์ชจริงๆ ในขณะที่เครื่อง RVA มิได้วัดอุณหภูมิที่แท้จริงของตัวอย่างที่อยู่ในถ้วย RVA แต่จะวัดอุณหภูมิของ block โลหะที่อยู่ล้อมรอบถ้วยซึ่งเป็นตัวให้ความร้อนแก่ถ้วย โดยในปี ค.ศ.1996 Hazelton และ Walker ได้ทดลองนำถ้วย RVA มาเจาะรูแล้วใส่ thermocouple เข้าไปเพื่อวัดอุณหภูมิของสารแขวนลอยสตาร์ชจริงๆ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่เครื่อง RVA บันทึกได้จากการวัดอุณหภูมิที่ block โลหะภายนอก พบว่ามีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของ block โลหะและอุณหภูมิของสารแขวนลอยสตาร์ชที่อยู่ภายในถ้วย โดยที่อุณหภูมิของสารแขวนลอยสตาร์ชมีค่าตามหลังอุณหภูมิของ block มากกว่าหรือน้อยขึ้นกับอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิและค่าความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) ของตัวอย่าง โดยที่ความแตกต่างจะมีค่ามากขึ้นถ้าอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและความหนืดปรากฏของตัวอย่างเพิ่มขึ้น

และจากผลการทดลองอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันที่วัดได้จากเครื่อง Brabender viscograph และ RVA มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นเจลลิตีในเซชัน (To) ที่วัดได้จากเครื่อง DSC เนื่องจากเครื่อง DSC เป็นการวัดอุณหภูมิในการหลอมผลึกสตาร์ชซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในช่วงแรก ๆ ของกระบวนการเจลลิตีในเซชัน แต่ทั้ง Brabender viscograph และ RVA เป็นการวัดอุณหภูมิเจลลิตีในเซชัน ณ จุดที่สตาร์ชมีการดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวพร้อมทั้งมีการละลายของสารภายในเพียงพอที่จะทำให้เครื่องตรวจวัดความหนืดได้ 10 BU และ 20 RVU สำหรับเครื่อง Brabender viscograph และ RVA ตามลำดับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการเจลลิตีในเซชันแต่ค่าอุณหภูมิที่เกิดเจลลิตีในเซชันสูงสุด (Tp) ที่วัดได้จากเครื่อง DSC ค่อนข้างมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันที่วัดได้จากเครื่อง Brabender viscograph และ RVA



ตารางที่ 4.20 อุณหภูมิเจลลิตีโนเซชันของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังที่วัดด้วยเครื่อง Brabender viscograph ,RVA, DSC และเครื่องมือที่สร้างขึ้นที่ระยะเวลาในการไม่ต่างกัน

ตัวอย่าง	เวลา ไม่ (ชม.)	ซ้ำ ที่	อุณหภูมิเจลลิตีโนเซชัน ( $^{\circ}\text{C}$ ) ที่วัดได้จากเครื่อง					
			Brabender viscograph	RVA	DSC			เครื่องที่ สร้างขึ้น
					To	Tp	Tc	
สตาร์ช มันฝรั่ง	0	1	65.4	67.40	60.246	63.682	76.066	59.1
		2	65.0	67.45	59.282	63.166	75.066	59.0
		3	65.0	67.40	59.157	63.232	76.066	57.6
	3	1	63.9	67.03	56.493	62.464	74.566	50.8
		2	63.9	67.00	56.273	62.811	73.200	51.8
		3	63.9	66.20	56.097	63.146	74.400	52.9
	6	1	62.8	66.16	54.356	61.718	72.933	49.7
		2	62.8	65.05	54.508	61.725	73.200	50.9
		3	63.1	64.98	54.591	61.603	74.933	49.9
	9	1	62.4	64.58	54.653	61.726	73.933	50.8
		2	62.0	66.40	54.559	61.280	74.000	48.7
		3	62.0	65.75	54.281	61.334	73.533	47.7
	12	1	60.5	65.36	53.684	60.144	74.133	48.4
		2	60.5	65.35	53.451	60.156	73.560	48.4
		3	60.5	64.50	53.591	60.135	72.266	47.5

\* อ่านค่าชี้แจงความหมายของอุณหภูมิเจลลิตีโนเซชันที่หน้า ณ

ตารางที่ 4.20 (ต่อ) อุณหภูมิเจลาติไนเซชันของสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังที่วัดด้วยเครื่อง Brabender viscograph ,RVA ,DSC และเครื่องมือที่สร้างขึ้นที่ระยะเวลาในการไม่ต่างกัน

ตัวอย่าง	เวลา ไม่ (ชม.)	ซ้ำ ที่	อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน ( $^{\circ}\text{C}$ ) ที่วัดได้จากเครื่อง*					เครื่องมือที่ สร้างขึ้น
			Brabender viscograph	RVA	DSC			
					To	Tp	Tc	
สตาร์ชมัน สำปะหลัง	0	1	67.6	69.85	61.571	67.293	81.666	61.6
		2	67.6	70.25	62.388	67.959	81.066	60.3
		3	67.6	70.25	61.711	67.541	81.600	60.6
	3	1	66.9	69.48	59.894	66.418	80.266	59.6
		2	66.9	69.05	59.143	66.380	79.666	59.1
		3	66.9	69.40	59.730	66.376	79.866	59.6
	6	1	66.1	68.25	57.980	65.980	80.400	58.9
		2	66.1	69.08	57.669	66.072	79.600	58.9
		3	66.1	69.03	57.316	66.220	79.200	57.8
	9	1	65.4	67.80	54.080	65.226	79.533	57.6
		2	65.4	67.45	54.357	65.685	79.800	57.0
		3	65.4	67.85	55.046	65.340	79.466	56.0
	12	1	64.3	66.73	52.167	65.322	78.266	56.2
		2	64.6	66.70	52.134	65.700	79.600	54.8
		3	64.3	67.27	52.660	65.452	80.066	57.2

\* อ่านค่าชี้แจงความหมายของอุณหภูมิเจลาติไนเซชันที่หน้า ณ

นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชันที่วัดได้จากเครื่องมือที่สร้างขึ้นของทั้งสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังธรรมชาติ (ที่ระยะเวลาไม่ 0 ชม.) มีค่าใกล้เคียงกับที่วัดได้จากเครื่อง DSC ทั้งนี้เนื่องจากหลักการวัดอุณหภูมิเจลาติไนเซชันของทั้งสองเครื่องเกี่ยวข้องกันโดยที่เครื่องมือที่สร้างขึ้นใช้หลักการวัดอุณหภูมิเจลาติไนเซชันจากการสูญเสียลักษณะ birefringence ซึ่งเกิดจากการที่ผลึกภายในเม็ดสตาร์ชที่จัดตัวกันอย่างเป็นระเบียบเปลี่ยนไปเป็นไร้ระเบียบ และเครื่อง DSC ใช้หลักการวัดอุณหภูมิเจลาติไนเซชันจากการหลอมของผลึกสตาร์ช ดังนั้นเมื่อผลึกของสตาร์ชถูกหลอมละลายไปจึงทำให้สูญเสียลักษณะ birefringence ไปด้วย แต่เมื่อนำสตาร์ชทั้งสองชนิดที่

ผ่านการไม่ที่ระยะเวลาต่าง ๆ มาวัดอุณหภูมิเจลลิตีในเซชัน พบว่าอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชมันฝรั่งที่วัดจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันที่วัดได้จากเครื่อง DSC แต่อุณหภูมิเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชมันสำปะหลังที่วัดจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันที่วัดได้จากเครื่อง DSC อาจมีสาเหตุมาจากการวัดอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชทั้งสองชนิดด้วยเครื่องมือที่สร้างขึ้นใช้กำลังขยายสัญญาณในวงจรวัดความเข้มแสงต่างกัน คือสตาร์ชมันสำปะหลังใช้กำลังขยายสูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง 3 เท่า ทำให้เครื่องมือมีความไวเพิ่มขึ้น ดังนั้นเกณฑ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันจาก %ความเข้มแสงที่ลดลงจาก 100% มาเป็น 98% ของสตาร์ชทั้งสองชนิดจึงต่างกัน

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ( $r$ ) ที่วัดได้จากทั้งสี่เครื่องได้ผลดังตารางที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันที่วัดได้จากทั้งสี่เครื่องได้ค่า  $r$  ค่อนข้างสูงคือมากกว่า 0.8 แสดงว่าอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันที่วัดได้จากทั้งสี่เครื่องมีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรงค่อนข้างสูง (วัฒนา สุนทรชัย, 2542) และมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.01$ ) ซึ่งก็มีผลดีคือสามารถทำนายอุณหภูมิเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชที่วัดได้จากอีกสามเครื่องจากเครื่องมือที่อยู่เพียงเครื่องเดียวจากสมการในตารางที่ 4.21 หรืออาจใช้ในกรณีนี้ที่ตัวอย่างสตาร์ชมีปริมาณจำกัดหรือต้องการระยะเวลาในการวิเคราะห์ที่สั้นในช่วงอุณหภูมิ 50-95°C ก็สามารถเลือกใช้เครื่อง DSC ที่ใช้น้ำหนักตัวอย่างเพียง 3 mg เวลาวิเคราะห์ประมาณ 5 นาทีต่อตัวอย่าง หรือใช้เครื่อง RVA ที่ใช้ตัวอย่างประมาณ 3 g เวลาวิเคราะห์ 4 นาทีต่อตัวอย่าง หรือใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นซึ่งใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยมากคือสารแขวนลอยสตาร์ชความเข้มข้น 4 % ประมาณ 1 หยด (40  $\mu$ l) เวลาวิเคราะห์ 15 นาที ในขณะที่ Brabender viscograph ต้องใช้ตัวอย่างมากกว่าคือประมาณ 30 g และเวลาวิเคราะห์ที่ยาวนานคือ 30 นาทีต่อตัวอย่าง

ตารางที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเจลาตินเซชันและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ที่วัดได้จากเครื่อง Brabender viscograph, RVA, DSC และ เครื่องมือที่สร้างขึ้น

อุณหภูมิเจลาตินเซชันที่วัดจากเครื่อง (°C)		สมการ	r*
Y	X		
RVA	Brabender viscograph	$Y = 0.744x + 19.295$	0.933
To (DSC)	Brabender viscograph	$Y = 1.060x - 11.935$	0.747
Tp (DSC)	Brabender viscograph	$Y = 1.072x - 5.104$	0.947
Tc (DSC)	Brabender viscograph	$Y = 1.274x - 5.080$	0.861
To (DSC)	RVA	$Y = 1.374x - 36.063$	0.772
Tp (DSC)	RVA	$Y = 1.285x - 22.435$	0.905
Tc (DSC)	RVA	$Y = 1.576x - 28.982$	0.850
Brabender viscograph	เครื่องมือที่สร้างขึ้น	$Y = 0.436x + 40.544$	0.945
RVA	เครื่องมือที่สร้างขึ้น	$Y = 0.325x + 49.426$	0.884
To (DSC)	เครื่องมือที่สร้างขึ้น	$Y = 0.460x + 31.164$	0.702
Tp (DSC)	เครื่องมือที่สร้างขึ้น	$Y = 0.477x + 37.856$	0.912
Tc (DSC)	เครื่องมือที่สร้างขึ้น	$Y = 0.591x + 44.614$	0.866

\* มีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.01$ )