

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวสุกในระหว่างการ  
เก็บรักษาที่สภาวะต่างๆ

STUDY ON RETROGRADATION OF COOKED RICE DURING  
STORAGE IN DIFFERENCE CONDITIONS

RCH  
TX  
558  
R5  
พ.ศ. 2555

เลขหมึก.....
เลขทะเบียน..... 45218
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ค. 2546

โดย

b. 11203122
i. ....

นางพอใจ ถามากร

โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11203122

## บทคัดย่อ

การศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกัน ได้แก่ ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 ( $15.12\% \pm 0.12$ ) สุพรรณบุรี60 ( $22.90\% \pm 0.07$ ) และขาวตาแห้ง ( $29.42\% \pm 0.50$ ) เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  ด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC) การศึกษาระดับการเกิดเจลาติไนเซชัน (Degree of gelatinization ; DG) และการวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture analyser) โดยใช้วิธี Back Extrusion (BE) และ Texture Profile Analysis (TPA) พบว่าพันธุ์ข้าว อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อค่าเอนทัลปีการเกิดรีโทรกราเดชัน ระดับการเกิดเจลาติไนเซชัน ลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งและความเหนียว และปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุก โดยข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้งมีค่าเอนทัลปีการเกิดรีโทรกราเดชันสูงที่สุด เมื่อวัดด้วยเครื่อง DSC รองลงมาคือข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 และข้าวดอกมะลิ105 ตามลำดับ การเก็บรักษาข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ ที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  ค่าเอนทัลปีการเกิดรีโทรกราเดชันจะสูงกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และมีแนวโน้มคงที่เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น สำหรับระดับการเกิดเจลาติไนเซชัน และปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกจะลดลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างการเก็บรักษา นอกจากนี้การเกิดรีโทรกราเดชันมีผลทำให้ข้าวเจ้าสุกมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าความเหนียวลดลง จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร พบว่าค่าเอนทัลปีการเกิดรีโทรกราเดชันมีความสัมพันธ์อย่างสูงในเชิงบวกเป็นเส้นตรงกับความแข็ง เมื่อวัดด้วยวิธี Texture Profile Analysis และ Back Extrusion โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุดเท่ากับ 1.000 และ 0.947 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์อย่างปานกลางและสูงในเชิงลบเป็นเส้นตรงกับระดับการเกิดเจลาติไนเซชันและความเหนียวของข้าวเจ้าสุก ตามลำดับ

การอุ่นข้าวเจ้าสุกด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ มีผลทำให้ค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ค่าความเหนียวและปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการอุ่นทั้ง 2 วิธี ไม่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุก จากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวเจ้าสุกหลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ พบว่าผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 ในด้านลักษณะปรากฏ ความแข็ง ความเหนียว และการยอมรับรวมมากกว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 และขาวตาแห้ง

# สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 คุณภาพข้าวสุก.....	3
2.2 เนื้อสัมผัสของข้าวสุก.....	5
2.3 องค์ประกอบของสตาร์ช.....	9
2.4 การเกิดเจลลาติโนเซชัน.....	13
2.5 การเกิดรีโทรกราเดชัน.....	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 วัตถุประสงค์ และอุปกรณ์.....	30
3.2 สถานที่ดำเนินงาน.....	32
3.3 ระยะเวลาดำเนินงาน.....	32
3.4 วิธีการดำเนินงาน.....	32
3.5 การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	42
4.1 คุณภาพการสีและอัตราส่วนของข้าวสารต่อน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าว.....	42
4.2 ปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชัน.....	44
4.3 การศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกด้วย DSC.....	46
4.4 การศึกษาระดับการเกิดเจลลาติโนเซชันของข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชัน.....	49
4.5 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชัน.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชัน ระดับการเกิด เจลาตินในเซชัน และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุก.....	59
4.7 ปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชัน หลังจากนำมาอุ่นด้วย ไมโครเวฟและไอน้ำ.....	61
4.8 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชัน หลังจากนำมาอุ่นด้วย ไมโครเวฟและไอน้ำ.....	64
4.9 การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวเจ้าสุกหลังจากนำมาอุ่นด้วย ไมโครเวฟและไอน้ำ.....	73
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	80
ข้อเสนอแนะ.....	82
บรรณานุกรม.....	83
ภาคผนวก.....	89

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 คุณภาพการสีและปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ.....	42
4.2 ปริมาณอะไมโลสและอัตราส่วนของข้าวสารต่อน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าว.....	43
4.3 ปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -20°C และ 5°C นาน 7 วัน <sup>1)</sup> .....	45
4.4 ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -20°C และ 5°C นาน 7 วัน <sup>1)</sup> .....	47
4.5 ระดับการเกิดเจลาคีโนเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -20°C และ 5°C นาน 7 วัน <sup>1)</sup> .....	50
4.6 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -20°C และ 5°C นาน 7 วัน เมื่อวัดด้วยวิธี Back Extrusion <sup>1)</sup> .....	52
4.7 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -20°C และ 5°C นาน 7 วัน เมื่อวัดด้วยวิธี Texture Profile Analysis <sup>1)</sup> .....	54
4.8 ความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -20°C และ 5°C นาน 7 วัน เมื่อวัดด้วยวิธี Texture Profile Analysis <sup>1)</sup> .....	57
4.9 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชัน ระดับการเกิดเจลาคีโนเซชัน และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุก.....	60
4.10 ปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ ที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชันหลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ.....	62
4.11 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บรักษาที่สภาวะต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ โดยใช้วิธีวัดแบบ Back Extrusion.....	65
4.12 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บรักษาที่สภาวะต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ โดยใช้วิธีวัดแบบ Texture Profile Analysis.....	68
4.13 ความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บรักษาที่สภาวะต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ โดยใช้วิธีวัดแบบ Texture Profile Analysis.....	71
4.14 คะแนนเฉลี่ยด้านลักษณะปรากฏของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ.....	74
4.15 คะแนนเฉลี่ยด้านความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ.....	76

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.16 คะแนนเฉลี่ยด้านความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ.....	77
4.17 คะแนนเฉลี่ยด้านการยอมรับรวมของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ.....	79
ก 1 ค่ามาตรฐานการดูดกลืนแสงในการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสของข้าวเจ้าสุก.....	91
ก 2 ค่าการดูดกลืนแสงในการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสของข้าวพันธุ์ต่าง ๆ .....	92
ก 3 ปริมาณอะไมโลสของข้าวพันธุ์ต่าง ๆ .....	93
ก 4 ระดับการขัดสี และปริมาณผลผลิตของข้าวเจ้าพันธุ์ต่าง ๆ .....	93
ค 1 ค่ามาตรฐานระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105.....	96
ค 2 ค่ามาตรฐานระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60.....	97
ค 3 ค่ามาตรฐานระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้ง.....	98
ฉ 1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติค่าแอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 ด้วยวิธี Multiple regression analysis.....	103
ฉ 2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติค่าแอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 ด้วยวิธี Multiple regression analysis.....	103
ฉ 3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติค่าแอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้ง ด้วยวิธี Multiple regression analysis.....	104
ฉ 4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 ด้วยวิธี Multiple regression analysis.....	104
ฉ 5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 ด้วยวิธี Multiple regression analysis.....	105
ฉ 6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้ง ด้วยวิธี Multiple regression analysis.....	105
ฉ 7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 ด้วยวิธี Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Back Extrusion (BE).....	106
ฉ 8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 ด้วยวิธี Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Back Extrusion (BE).....	106

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ฉ 9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้ง ด้วยวิธี Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Back Extrusion (BE).....	107
ฉ 10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ด้วยวิธี Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Texture Profile Analysis (TPA) .....	107
ฉ 11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 ด้วยวิธี Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Texture Profile Analysis (TPA) .....	108
ฉ 12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้ง ด้วยวิธี Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Texture Profile Analysis (TPA) .....	108
ฉ 13 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ด้วยวิธี Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Texture Profile Analysis (TPA) .....	109
ฉ 14 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 ด้วยวิธี Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Texture Profile Analysis (TPA) .....	109
ฉ 15 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้ง ด้วยวิธี Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Texture Profile Analysis (TPA) .....	110

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้าง Fringed micelle ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นระเบียบของ Crystalline region (C) และโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบของ Amorphous region (A).....	9
2.2 โครงสร้างของอะไมโลส.....	10
2.3 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส.....	10
2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน.....	11
2.5 ลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน.....	12
2.6 ลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยสาย A B และ C.....	12
2.7 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในสารละลายสตาร์ชข้าว.....	13
2.8 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชในระหว่างการหุงต้ม.....	14
2.9 กลไกการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชข้าวพันธุ์ Akihikari.....	17
2.10 การรวมตัวของโมเลกุลอะไมโลเพคตินสายสั้น (A และ B1) ในสารละลายสตาร์ชเมื่อเก็บที่อุณหภูมิค่าเป็นเวลานานและหลังจากการอิมิตัวระหว่างพันธะไฮโดรเจนของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน.....	18
2.11 ลักษณะเกลียวของอะไมโลสในระหว่างการเกิดเจลาติในเซชันและรีโทรกราเดชัน.....	19
2.12 การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของโครงสร้างแสดงเป็นค่าโมดูลัสเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	20
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราการเกิดผลึก.....	20
2.14 หลักการทำงานของเครื่อง DSC (ก) และ DSC Endotherm peak ของข้าวเจ้าสุก (ข).....	28
3.1 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (Shimadzu : DSC-50).....	33
3.2 การวัดความแข็งของเมล็ดข้าวเจ้าสุกวิธี Back Extrusion ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyser) รุ่น TA-XT2i.....	36
3.3 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุกเมื่อวัดด้วยวิธี Back Extrusion.....	37
3.4 การวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุกด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyser) รุ่น TA-XT2i.....	38
3.5 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวัดความแข็งและความเหนียวของข้าวเจ้าสุกเมื่อวัดด้วยวิธี Texture Profile Analysis .....	39

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.1 ปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ $-20^{\circ}\text{C}$ และ $5^{\circ}\text{C}$ นาน 7 วัน.....	46
4.2 ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อที่อุณหภูมิ $-20^{\circ}\text{C}$ และ $5^{\circ}\text{C}$ นาน 7 วัน.....	47
4.3 ระดับการเกิดเจลลาติโนเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ $-20^{\circ}\text{C}$ และ $5^{\circ}\text{C}$ นาน 7 วัน.....	50
4.4 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ $-20^{\circ}\text{C}$ และ $5^{\circ}\text{C}$ นาน 7 วัน โดยใช้วิธีวัดแบบ Back Extrusion.....	53
4.5 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ $-20^{\circ}\text{C}$ และ $5^{\circ}\text{C}$ นาน 7 วัน โดยใช้วิธีวัดแบบ Texture Profile Analysis.....	55
4.6 ความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ $-20^{\circ}\text{C}$ และ $5^{\circ}\text{C}$ นาน 7 วัน โดยใช้วิธีวัดแบบ Texture Profile Analysis.....	57
4.7 ปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ.....	63
4.8 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ โดยใช้วิธีวัดแบบ Back Extrusion.....	66
4.9 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ โดยใช้วิธีวัดแบบ Texture Profile Analysis.....	69
4.10 ความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ โดยใช้วิธีวัดแบบ Texture Profile Analysis.....	72
ก 1 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส.....	92
ข 1 ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ $-5^{\circ}\text{C}$ และ $5^{\circ}\text{C}$ นาน 16 วัน.....	94
ข 2 DSC endotherm peak ของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $5^{\circ}\text{C}$ นาน 3 วัน โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC-50).....	95
ค 1 กราฟมาตรฐานระหว่างระดับการเกิดเจลลาติโนเซชันกับค่าการดูดกลืนแสงของ ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ105.....	96

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ค 2 กราฟมาตรฐานระหว่างระดับการเกิดเจลลาติโนเซชันกับค่าการดูดกลืนแสงของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60.....	97
ค 3 กราฟมาตรฐานระหว่างระดับการเกิดเจลลาติโนเซชันกับค่าการดูดกลืนแสงของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้ง.....	98
ง 1 ลักษณะกราฟที่ได้จากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 5°C ด้วยวิธี Back Extrusion (BE).....	99
ง 2 ลักษณะกราฟที่ได้จากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 5°C ด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA).....	100



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นธัญพืชที่ปลูกกันมากในประเทศไทย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa*, L. นิยมนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร หรือนำมาหุงเพื่อบริโภคเป็นอาหารประจำวันที่เรียกว่า “ข้าวสวย” หรือ “ข้าวสุก” คุณภาพของข้าวสุกขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสตาร์ชที่เป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณอะไมโลส ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำข้าวสุกจะมีลักษณะนุ่มและเหนียว ส่วนข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงข้าวสุกจะมีลักษณะร่วนและแข็ง

การเปลี่ยนแปลงของข้าวที่สำคัญในระหว่างและหลังการแปรรูป คือการเกิดเจลาติไนเซชัน และการเกิดรีโทรกราเดชันซึ่งมีผลทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวสุกเปลี่ยนแปลงไป การเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชในข้าวสุกมักจะเกิดในระหว่างการเก็บรักษา ทำให้ข้าวสุกมีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์และมีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยการเกิดรีโทรกราเดชันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษา ข้าวสุกจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานาน ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากของข้าวสุกในการนำมาใช้เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ เพราะจะทำให้ทราบว่าเป็นข้าวชนิดใด มีความเหมาะสมในการนำมาแปรรูปหรือนำมาใช้เป็นส่วนผสมของอาหาร เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตรงกับความต้องการของผู้บริโภคมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจุบันนี้การแข่งขันในตลาดข้าวเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ต้องมีการพัฒนาปรับปรุงข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าวทั้งทางด้านคุณภาพ การตลาด การแปรรูป เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของข้าวให้สูงขึ้น

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น การศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาที่สภาวะต่าง ๆ กัน จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเลือกวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีข้าวหรือแป้งเป็นองค์ประกอบ เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกเมื่อเก็บรักษาที่สภาวะต่าง ๆ กัน

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการลดการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเก็บที่สภาวะต่าง ๆ โดยใช้วิธีไมโครเวฟและไอน้ำ

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ ที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกัน คือ ข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ ข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสปานกลาง และข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสสูง ที่ปลูกได้ในประเทศไทย เมื่อเก็บรักษาที่สภาวะต่าง ๆ กัน ด้วยวิธี DSC การวัดลักษณะเนื้อสัมผัส ระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน การยอมรับของผู้บริโภค ตลอดจนศึกษาถึงวิธีการลดการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชัน

### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 แบบจำลองอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกัน เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ กัน

1.4.2 วิธีการลดการเกิดรีโทรกราเดชันโดยใช้ไมโครเวฟและการนึ่งโดยใช้ไอน้ำ



## ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คุณภาพข้าวสุก

คุณภาพข้าวสุก หมายถึง ลักษณะปรากฏของเมล็ดข้าวภายหลังจากผ่านการหุง เภณท์ที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพข้าวสุกจะแตกต่างกันไปตามนิสัยในการรับประทานข้าวของผู้บริโภคในแต่ละท้องถิ่น คุณภาพข้าวสุกเหล่านี้จะแตกต่างกันไปในข้าวแต่ละพันธุ์ (งามชื่น คงเสรี, 2540) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพข้าวสุก ได้แก่

#### 2.1.1 ปริมาณอะไมโลส (Amylose content)

ปริมาณอะไมโลสในเมล็ดข้าวจะสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก ได้แก่ลักษณะความนุ่มหรือแข็งและความเหนียวหรือร่วน ในการหุงข้าวขาวที่มีอะไมโลสสูงจะดูดซึมน้ำมากและข้าวสุกที่ได้จะร่วนแข็ง ในขณะที่ข้าวอะไมโลสต่ำจะดูดซึมน้ำได้น้อยจึงมีลักษณะเหนียวติดกัน (Juliano *et al.*, 1981)

#### 2.1.2 ความคงตัวของเจล (Gel consistency)

ข้าวมีคุณภาพหุงต้มและรับประทานแตกต่างกัน มีปัจจัยสำคัญมาจากปริมาณอะไมโลส ข้าวบางพันธุ์มีปริมาณอะไมโลสใกล้เคียงกันแต่ข้าวสุกอาจมีคุณภาพแตกต่างกัน เนื่องจากแป้งสุกเมื่อเย็นแล้วมีความแข็งหรือความคงตัวของเจลแตกต่างกัน โดยข้าวที่มีค่าความคงตัวของเจลต่ำจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกนุ่มกว่าข้าวที่มีความคงตัวของเจลสูงเมื่อมีปริมาณอะไมโลสเท่ากัน (Juliano *et al.*, 1980)

#### 2.1.3 อุณหภูมิแป้งสุก (Gelatinization temperature)

อุณหภูมิแป้งสุกเป็นอุณหภูมิที่ทำให้แป้งกลายเป็นเจล อุณหภูมิแป้งสุกมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาหุงต้ม โดยทั่วไปต้องใช้เวลา 14–24 นาที เพื่อต้มเมล็ดข้าวให้สุก ข้าวที่มีอุณหภูมิแป้งสุกสูงต้องใช้เวลายาวนานกว่าข้าวที่มีอุณหภูมิแป้งสุกต่ำ (Juliano *et al.*, 1980)

Kongseree (1979) พบว่าข้าวที่มีคุณภาพดีควรมีอุณหภูมิแป้งสุกต่ำ หากมีอุณหภูมิแป้งสุกปานกลางหรือสูงจะทำให้ข้าวไม่สุกและข้าวสุกที่ได้แข็งกระด้าง ในทำนองเดียวกันข้าวอะไมโลสต่ำควรมีอุณหภูมิแป้งสุกต่ำเนื่องจากในระหว่างการหุงต้มเมล็ดข้าวจะดูดน้ำเข้าไปด้วยทำให้ความชื้นภายในเมล็ดสูงขึ้น หากข้าวอะไมโลสต่ำมีอุณหภูมิแป้งสุกปานกลางหรือสูงปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวเมื่อสุกแล้วอาจสูงเกินไปทำให้ข้าวมีลักษณะและ

#### 2.1.4 อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก (Elongation ratio)

ในระหว่างการหุงข้าวเมล็ดข้าวจะขยายตัวโดยรอบโดยเฉพาะด้านยาว ในข้าวบางพันธุ์ เมล็ดข้าวสามารถยืดตัวได้มากซึ่งเป็นลักษณะพิเศษที่เป็นที่นิยม การที่เมล็ดยืดตัวได้มากหากเมล็ดข้าวสุกไม่เหนียวติดกันคุณสมบัตินี้ช่วยเสริมให้ข้าวนั้นขึ้นหม้อได้ดียิ่งขึ้น (Juliano and Perez, 1984)

#### 2.1.5 กลิ่นหอม (Aroma)

ข้าวมีกลิ่นหอมเนื่องจากมีสาร 2-acetyl-1-pyrroline ซึ่งสารดังกล่าวนี้พบในข้าวหอมพันธุ์ต่าง ๆ ปริมาณ 0.04-0.09 ไมโครกรัมต่อกรัม และพบในข้าวกล้องประมาณ 0.1-0.2 ไมโครกรัมต่อกรัม (Buttery *et al.*, 1986)

#### 2.1.6 ลักษณะปรากฏ (Appearance)

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อลักษณะปรากฏของข้าวสุก คือ ความขาว (Whiteness) และความมัน (Luster) ลักษณะปรากฏของข้าวสุกที่ดี คือ เมล็ดข้าวสุกต้องไม่แข็งหรือนิ่มจนเกินไป มีความมันวาว ซึ่งความมันของข้าวเกิดจากการละลายของคาร์โบไฮเดรตในน้ำร้อน และปริมาณลิปิดที่มีอยู่ในเมล็ดข้าว (Matsuo and Hoshikawa, 1993)

Juliano *et al.* (1980) พบว่าคุณภาพข้าวสุกนอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวดังกล่าวแล้ว วิธีการหุงยังมีส่วนทำให้คุณภาพข้าวสุกแตกต่างกันได้อีกด้วย เช่น การหุงต้มข้าวอะไมโลสสูงหากใส่น้ำน้อยจะแข็งกระด้างมาก แต่เมื่อใส่น้ำเพิ่มขึ้นจะช่วยให้ข้าวนุ่มและการขยายปริมาตรเพิ่มมากขึ้นด้วย

งามชื่น คงเสรี (2536) ทดลองหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าวสาร พบว่าปริมาณอะไมโลสเป็นปัจจัยที่แสดงความสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำหุงต้มที่เหมาะสมที่สุด โดยมีสมการถดถอยในกลุ่มผู้ชมรวม คือ  $W = 0.329 + 0.089A$  มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.76 โดย W คือ อัตราส่วนของน้ำหุงต้มที่เหมาะสม และ A คือ ปริมาณอะไมโลสเป็นร้อยละ และถ้าเพิ่มปัจจัยของปริมาณโปรตีนและระยะเวลาหุงข้าวให้สุกจะได้ผลดียิ่งขึ้น โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.85 และมีสมการถดถอยคือ  $W = 0.124 + 0.114A + 0.089P - 0.069CT$  โดยที่ P คือ ปริมาณโปรตีนเป็นร้อยละ และ CT คือ ระยะเวลาหุงข้าวให้สุก

Ikeda *et al.* (1996) พบว่าการกระจายของน้ำ (Water distribution) ในเมล็ดข้าวขณะหุงมีความสัมพันธ์กับการเกิดเจลาตินเซชัน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเซลล์ในเมล็ดข้าวทำให้เม็ดสตาร์ชของตัวเมล็ดข้าวจึงขยายตัวเพิ่มมากขึ้น

ปาริชาติ สุจิตานนท์ และสุธิ พรสวรรค์วงศ์ (2537) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการหุงต้มข้าวพันธุ์กข1 (ข้าวอะไมโลสต่ำ) สุพรรณบุรี60 (ข้าวอะไมโลสปานกลาง) และเหลืองประแจสารนี้ เป็นทิว123 (ข้าวอะไมโลสสูง) เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณอะไมโลส ปริมาณโปรตีน ค่าการสลายเมล็ดในค้าง และความคงตัวของเจล ไม่เปลี่ยนแปลงแต่อัตราการยืดตัว การขยายตัวทางปริมาตร ค่าการดูดซึมน้ำ และเวลาการหุงต้มข้าวสุกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในน้ำที่ใช้หุงลดลง

## 2.2 เนื้อสัมผัสของข้าวสุก

ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture) ของข้าวสุกเป็นสมบัติที่สำคัญมากของข้าว ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของข้าวสุก คือปริมาณอะไมโลส ปริมาณโปรตีน และอุณหภูมิแป้งสุก (Juliano *et al.*, 1965) ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวประกอบด้วยสมบัติ 2 ประการ คือความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Stickiness) โดยที่ความแข็งหมายถึงสมบัติในการต้านแรงที่มากกระทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเหนียว หมายถึงสมบัติในการเกาะกันระหว่างเมล็ดข้าว (Jowitt, 1974)

Okabe (1979) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกมีดังนี้

1. พันธุ์ข้าว ข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีความแข็งมากกว่าข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำซึ่งสอดคล้องกับ Perez and Juliano (1981) พบว่าข้าวสุกที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งกว่าข้าวสุกที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 28–30°C นาน 3 เดือน
2. อายุ ข้าวใหม่ (New rice) คือข้าวที่มีอายุการเก็บ 2–3 เดือน หลังการเก็บเกี่ยวจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกนุ่มและเหนียวกว่าข้าวที่เก็บนาน 6 เดือน ซึ่งจะร่วนและแข็งกว่า
3. อุณหภูมิการเก็บ อุณหภูมิในการเก็บจะมีผลต่อเนื้อสัมผัสของข้าวสุก พบว่าถ้าเก็บข้าวสุกที่อุณหภูมิ 30–38°C ข้าวสุกจะมีความแข็งต่ำกว่าข้าวสุกที่เก็บที่อุณหภูมิ 5–10°C
4. การแช่ข้าวและปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุง เนื้อสัมผัสของข้าวสุกขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้หุง ถ้าใช้น้ำมากข้าวจะมีลักษณะเหนียวนุ่ม แต่ถ้าใช้น้ำน้อยเกินไปจะทำให้ข้าวแข็ง พบว่าข้าวเก่าต้องใช้น้ำในการหุงมากกว่าข้าวใหม่ นอกจากนี้การแช่ข้าวก่อนการหุง จะทำให้ข้าวมีความเหนียวเพิ่มขึ้นอีกด้วย

นอกจากนี้ Champagne *et al.* (1998) พบว่าสถานะหลังการเก็บเกี่ยว (Postharvest) ได้แก่ การทำแห้ง ความชื้นสุดท้าย และระดับการขัดสีมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกพันธุ์ต่าง ๆ เช่นเดียวกัน เมื่อวัดด้วยวิธี Texture Profile Analysis โดยพบว่า ปริมาณความชื้นสุดท้ายและระดับการขัดสีมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของข้าวสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ข้าวที่มีปริมาณความชื้นสูง (ร้อยละ 15) จะมีความแข็งต่ำกว่าข้าวที่มีความชื้นต่ำ (ร้อยละ 12) แต่มีค่าความเกาะตัวกัน (Cohesiveness) ความยึดกัน (Adhesiveness) และความยืดหยุ่น (Springiness) สูงกว่า และข้าวที่มีระดับการขัดสีสูงจะมีค่าความแข็งต่ำกว่าข้าวที่มีระดับการขัดสีต่ำ และมีค่าความเกาะตัวกัน ความยึดกัน และความยืดหยุ่นสูงกว่าเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 วิธีวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก

การวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก ให้ได้ลักษณะตรงตามต้องการ หรือพัฒนาปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหาร ให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค มีวิธีการวัด 2 แบบด้วยกัน คือ การวัดโดยตรง (Objective measurement) และการวัดโดยอ้อม (Subjective measurement) (สมจินตนา สุमितสวรรณค์, 2542)

#### 2.2.1.1 การวัดโดยตรง (Objective measurement)

เป็นการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ ในการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร ผลที่ออกมาจะมีความถูกต้องตามลักษณะที่เป็นจริง การวัดลักษณะเนื้อสัมผัสแบบนี้อาจเรียกว่า วิธีการใช้เครื่องมือ การวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกโดยใช้เครื่องมือมีหลายวิธีด้วยกัน คือ

##### 1) การวัดด้วยเครื่องอินสตรอน (Instron)

อินสตรอนเป็นเครื่องมือที่สามารถนำมาใช้วัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกได้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ Drive mechanism ใช้การเคลื่อนที่ของ Test cell ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้แรงกระทำต่อตัวอย่างอาหาร Test cell ที่แตกต่างกันจะใช้ในจุดประสงค์การทดลองต่างกัน เช่น การกด การแทงทะลุ การอัด การใช้แรงเฉือน การหัก และการดึง เป็นต้น และส่วน Force-sensing และ Recording system ใช้บันทึกค่าแรงที่เปลี่ยนแปลงตลอดการทดลอง ประกอบด้วย Load cell ที่สามารถปรับค่าแรงที่ใช้ตั้งแต่ 0.5-50 กิโลกรัม สำหรับแรงดึงหรือแรงกดค่าใดค่าหนึ่ง ส่วน Load cell ที่ปรับค่าแรงตั้งแต่ 500-10,000 กิโลกรัม ใช้ได้ทั้งแรงดึงและแรงกด (สมจินตนา สุमितสวรรณค์, 2542)

เครื่องอินสตรอนสามารถนำมาใช้กับ Test cell ได้หลายชนิดในการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก นักวิทยาศาสตร์แห่งศูนย์วิจัยข้าวนานาชาติเปรียบเทียบการวัดความแข็งของข้าวสุกด้วยเครื่องอินสตรอน โดยวิธีการต่าง ๆ คือวิธี Double-bite วิธี Back extrusion วิธี Modified OTMS และวิธี Instron anvil พบว่าวิธี Modified OTMS ได้ผลดีที่สุด รองลงมาคือวิธี Back extrusion ซึ่งวิธีการหลังนี้ใช้ปริมาณข้าวสุกในการทดสอบมากจึงไม่เป็นที่นิยม (กิตติชัย บรรจง, 2534)

กิตติชัย บรรจง (2534) ปรับปรุงการวัดความแข็งของข้าวสุกด้วยวิธี Back extrusion ให้เป็นวิธีที่ง่าย พบว่าวิธี Back extrusion ที่เหมาะสมสำหรับใช้วัดความแข็งของข้าวสุกประกอบด้วย Test cell รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30.9 มิลลิเมตร และหัวกดรูปทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 28.9 มิลลิเมตร โดยทำให้มีช่องว่างโดยรอบระหว่างหัวกดกับทรงกระบอกเท่ากับ 1 มิลลิเมตร

## 2) การวัดด้วยเครื่อง Texture Analyser

เครื่อง Texture Analyser เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่มีผู้ใช้วัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก มีหลักการและการใช้ประโยชน์คล้ายคลึงกับเครื่องอินสตรอน แต่ถูกพัฒนาให้นำมาใช้กับวัตถุคิบทางด้านอุตสาหกรรมมากขึ้น เครื่อง Texture Analyser มีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ ส่วนทดสอบ (Test bed) และส่วนควบคุม (Control console) ซึ่ง 2 ส่วนนี้สามารถใช้งานโดยลำพัง การควบคุมระยะทางและความเร็วอาศัยการทำงานของนาฬิกาควอตซ์ซึ่งมีความเที่ยงตรงสูง มีระบบป้องกันการเกิด Overload และ Underload ของ Load cell เครื่อง Texture Analyser สามารถเปลี่ยนแปลงสภาวะการทดสอบได้ง่าย และใช้กับตัวอย่างที่มีช่วงอุณหภูมิกว้าง 0-40°C และเปลี่ยนหัววัดได้หลายแบบให้เลือกใช้ตามวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับเครื่องอินสตรอน (สมจินตนา สุमितสุวรรณค์, 2542)

Friedman *et al.* (1963) ; Szczesniak *et al.* (1963) ประสบความสำเร็จในการทำ Texture Profile Analysis โดยพัฒนาจาก General Foods Texturometer โดยเครื่องดังกล่าวใช้กระบอกตวงหน้าตัดขนาดเล็กกดลงบนชิ้นอาหารที่มีขนาดพอเคี้ยว โดยตัดเป็นลูกเต๋าคขนาดความยาวแต่ละด้านประมาณ 1-2 เซนติเมตร กดลงไปร้อยละ 75 ของความสูง (75% Compression) 2 ครั้งเพื่อเลียนแบบการเคลื่อนที่เข้าปากกันของฟันกราม โดยใช้ Strain guage และเครื่องบันทึกกราฟบนกระดาษ บันทึกค่าออกมาเป็นกราฟระหว่างแรงกับเวลา ซึ่งแสดงความเป็นไปได้ในการจำลองอาการเคี้ยวอาหาร

Tsuji (1981) วัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก โดยใช้วิธี Texture Profile Analysis พบว่าวิธีนี้สามารถทดสอบความแตกต่างลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกพันธุ์ต่าง ๆ ได้ดี และใช้ตัวอย่างน้อย

การวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารด้วยวิธี Texture Profile Analysis นี้ ควรวัดตัวอย่างที่มีความแข็งไม่เกินร้อยละ 90 ของ Load cell โดยทดสอบตัวอย่างที่แข็งที่สุดก่อนที่จะเริ่มกำหนดค่าแปรต่าง ๆ ในการทดสอบจริง และควรกำหนดค่าความเร็วก่อนการวัด (Pre-test speed) เท่ากันกับความเร็วที่กดลงบนตัวอย่าง (Test speed) เพื่อให้ได้ค่าความเกาะตัวกันที่ถูกต้อง คุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสที่ได้จากการทดสอบแบบ Texture Profile Analysis ได้แก่ ความเกาะตัวกัน ความแข็ง ความเหนียว ความยืดหยุ่น ความหนึบ (gumminess) ความยืดหยุ่น และความแตกเปราะ (Fractureability) (Anonymous, 2537)

### 2.2.1.2 การวัดค่าโดยอ้อม (Subjective measurement)

เป็นการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation) โดยใช้มนุษย์เป็นเครื่องมือในการวัด เนื่องจากมนุษย์แต่ละคนมีความรู้สึกนึกคิดแตกต่างกันอาจให้ผลที่มีความแปรปรวนสูง ทำให้มีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลการวิเคราะห์และทดสอบ ดังนั้นจึงต้องมีการวางแผนและความคุมที่ดีในช่วงก่อนและระหว่างการวิเคราะห์และทดสอบ (กิตติชัย บรรจง, 2534)

Hori *et al.* (1995) กล่าวว่า การทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวสุกส่วนใหญ่ จะทำการทดสอบคุณสมบัติทางด้านลักษณะปรากฏ ความแข็ง ความเหนียว กลิ่น รสชาติ และความชอบรวม (Overall palatability) ซึ่งการทดสอบมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น del Mundo (1979) ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวสุกโดยใช้การเรียงลำดับ (Ranking test) Schutz and Damrell (1974) ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวสุกด้วยวิธีสเกลความชอบ 7 จุด (7-Point hedonic scale) โดยใช้อาสาสมัคร 50 คน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบทางประสาทสัมผัสและความชอบสูงสุด

Meullenet *et al.* (2000) ศึกษาภาวะหลังการเก็บเกี่ยวที่มีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวสุกพันธุ์ Cypress โดยใช้วิธีการทดสอบแบบพรรณนา (Descriptive test) พบว่าภาวะหลังการเก็บเกี่ยวมีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) โดยการเก็บข้าวเปลือกที่มีปริมาณความชื้นร้อยละ 15 นาน 3 เดือน เมื่อนำมาหุง ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับมากที่สุด

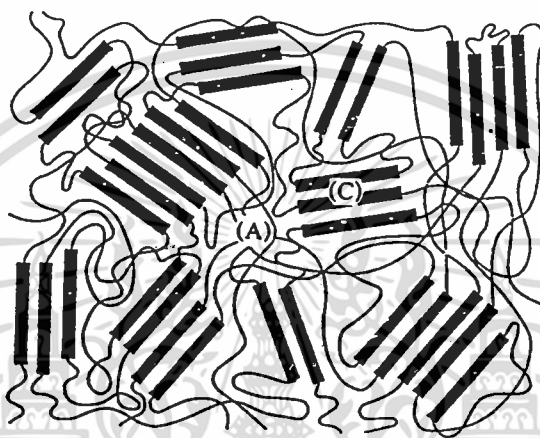
เนื่องจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยใช้นุชนั้น จะได้ผลที่มีค่าความแปรปรวนสูง ค่าที่ได้ขาดความแม่นยำ ส่วนการใช้เครื่องมือวัดจะให้ผลที่มีความแม่นยำ ได้ค่าตัวเลขที่บอกได้ถึงความแตกต่างที่มีในผลิตภัณฑ์แต่ละตัวที่มนุษย์เราไม่สามารถจะแยกออกได้ แต่ค่าที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัดไม่สามารถบ่งบอกได้ถึงการยอมรับในผลิตภัณฑ์ชนิดนั้น ๆ ของผู้บริโภคได้ จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในงานวิจัยหรือพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารใหม่ ๆ หรือแม้แต่การควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร มักจะใช้ 2 วิธีนี้ควบคู่กันเพื่อให้สามารถได้ค่าที่แม่นยำในขณะที่เดียวกันก็เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคด้วย (กิตติชัย บรรจง, 2534)

Lyon *et al.* (2000) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวสุกโดยใช้วิธีทดสอบแบบพรรณนาและใช้เครื่องมือวัดโดยใช้วิธี Texture Profile Analysis มีค่าต่ำ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient ; R) เท่ากับ 0.624 เนื่องจากพารามิเตอร์ (Parameter) ที่วัดด้วยเครื่องมือไม่เหมือนกับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินผลทางประสาทสัมผัส นอกจากนี้ยังพบว่า การทดสอบทางประสาทสัมผัสมีความแปรปรวนมากเนื่องจากผู้ทดสอบชิมไม่สามารถเปรียบเทียบระหว่างความเหนียวกับความยืดกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 องค์ประกอบของสตาร์ช

เม็ดสตาร์ช (Starch granule) เป็นโพลีเมอร์ลักษณะกึ่งผลึก (Semi-crystalline) ประกอบด้วยบริเวณอสัณฐาน (Amorphous region) และบริเวณผลึก (Crystalline region) แสดงดังภาพที่ 2.1 ซึ่งโครงสร้างทั้งสองนี้สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระดับความชื้น (Slade and Levine, 1991)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้าง Fringed micelle ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นระเบียบของ Crystalline region (C) และ โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบของ Amorphous region (A)

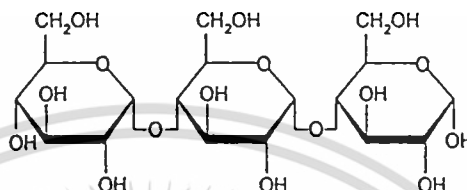
ที่มา : Slade and Levine (1991)

เม็ดสตาร์ชหรือแป้งเป็นโพลีเมอร์ของกลูโคสซึ่งประกอบด้วยแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose unit) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคสิดิก (Glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายโพลีเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า หมู่รีดิวซิง (Reducing end group) แป้งประกอบด้วยโพลีเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิดคือ โพลีเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และโพลีเมอร์เชิงกิ่ง (อะไมโลเพกติน) วางตัวในแนวรัศมี (กล้าณรงค์ ศรีรอด, 2542)

### 2.3.1 อะไมโลส (Amylose)

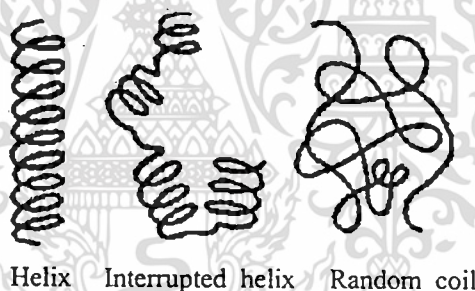
อะไมโลสเป็นโพลีเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4-กลูโคสิดิก ( $\alpha$ -1,4-glucosidic linkage) แสดงดังภาพที่ 2.2 ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดสตาร์ชขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสตาร์ช อะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มอะไมโลเพกติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐานและส่วนผลึก (Oates, 1997) โครงสร้างของ

อะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่  
 คลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (Random coil) แสดงดังภาพที่ 2.3 ในสารละลาย  
 ที่อุณหภูมิห้องอะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว (Whistler and  
 Daniel, 1984)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส

ที่มา : Oates (1997)



Helix Interrupted helix Random coil

ภาพที่ 2.3 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส

ที่มา : Whistler and Daniel (1984)

2.3.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin)

อะไมโลเพคตินเป็นโพลีเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4-กลูโคสิดิก และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาที่เป็นโพลีเมอร์กลูโคสสายสั้นมีระดับของโพลีเมอร์ไรเซชันอยู่ในช่วง 10-60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,6-กลูโคสิดิก แสดงดังภาพที่ 2.4 หน่วยกลูโคสที่มีพันธะแอลฟา-1,6-กลูโคสิดิก มีอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด และมีอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

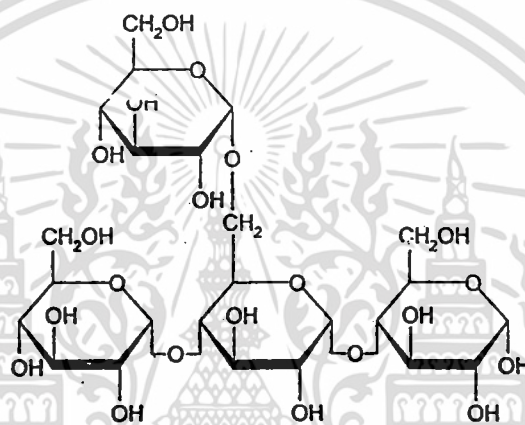
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพคตินประกอบด้วยสาย (Chain) 3 ชนิด

1. สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (Unbranched structure)

2. สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ สองสายหรือมากกว่า โครงสร้างอะไมโลเพคตินประกอบด้วยสาย A และสาย B ในอัตราส่วน 1:1

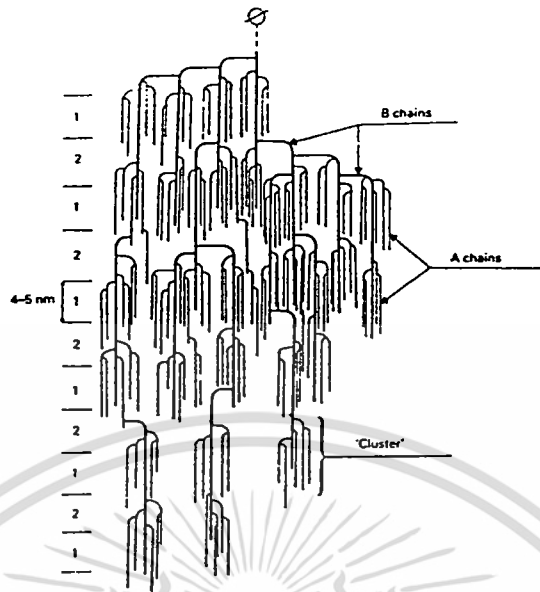
3. สาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในอะไมโลเพคตินแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสาย C 1 สายเท่านั้น



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน

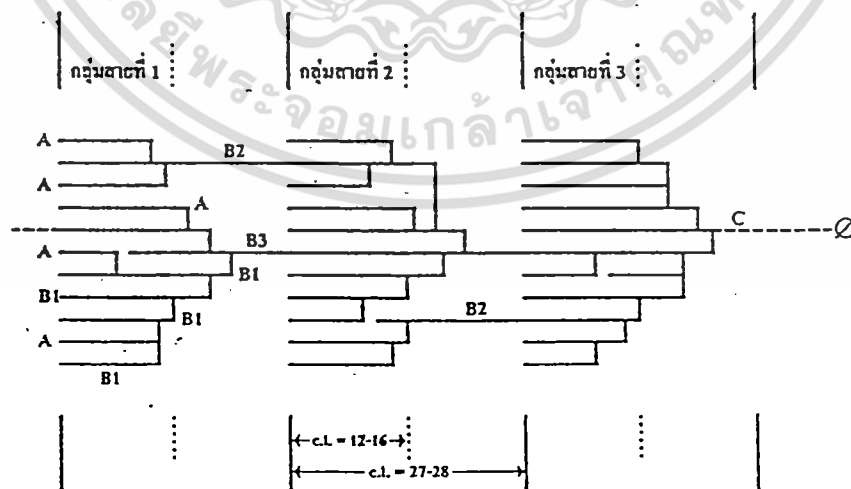
ที่มา : Oates (1997)

Robin *et al.* (1974) ศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของอะไมโลเพคตินโดยใช้เอนไซม์ย่อยพันธะกิ่ง (Debranching enzyme) และเบต้า-อะไมเลส ( $\beta$ -amylase) ย่อยอะไมโลเพคตินจากมันฝรั่ง โครงสร้างของอะไมโลเพคติน แสดงดังภาพที่ 2.5 ส่วนที่หนึ่งแสดงถึงส่วนผลึก และส่วนที่สองแสดงถึงส่วนอสัณฐาน



ภาพที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน  
ที่มา : Robin *et al.* (1974)

Hizukuri (1986) แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพคติน แสดงดังภาพที่ 2.6 ซึ่งมีอัตราส่วนของสาย A และ สาย B เท่ากับ 1:1 และมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างอะไมโลลิซิส (Amylysis) ของอะไมโลเพคติน จากโครงสร้างของอะไมโลเพคติน ลักษณะสาย A และสาย B1 จะประกอบเป็นกลุ่มเดี่ยว สำหรับสาย B2 และสาย B3 มีความยาวของสายแผ่ออกไปทำให้เกิดเป็นกลุ่มสาย 2 และกลุ่มสาย 3 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยสาย A B และ C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ที่มา : Hizukuri (1986)  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

### 2.4.1 ความหมายของการเกิดเจลาตินในเซชัน

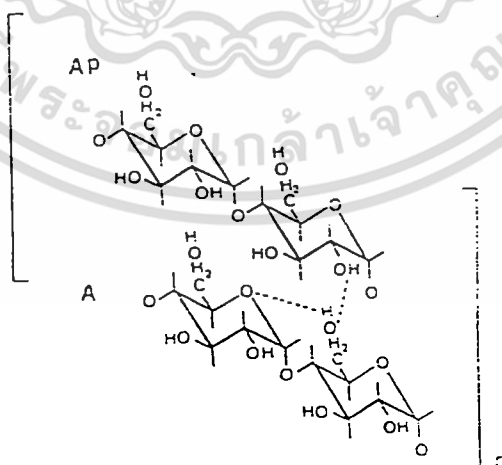
การเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ช คือ การสูญเสียความเป็นระเบียบของโมเลกุลเม็ดสตาร์ช จนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางประการอย่างไม่ผันกลับ เช่น การพองของเม็ดสตาร์ช การหลอมเหลวของโครงสร้างผลึก (Native crystalline melting) การสูญเสียไบฟรินเจนซ์ (Birefringence) และความสามารถในการละลายของสตาร์ช จุดเริ่มต้นของการเกิดเจลาตินในเซชันและช่วงระยะของการเกิดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสตาร์ช กับวิธีการสังเกต ชนิดของเม็ดสตาร์ช และความแตกต่างกันระหว่างจำนวนเม็ดสตาร์ชที่นำมาศึกษา (Atwell *et al.*, 1988)

### 2.4.2 กลไกการเกิดเจลาตินในเซชัน

การเกิดเจลาตินในเซชันเป็นผลมาจากการแตกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของสตาร์ช กลไกการเกิดเจลาตินในเซชันมี 2 ขั้นตอน (Marchant and Blanshard, 1978) คือ

#### ขั้นตอนที่ 1 การกระจายของน้ำเข้าสู่เม็ดแป้ง

เมื่อนำเม็ดสตาร์ชมาละลายในน้ำเย็น เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำและพองตัวแบบผันกลับ และยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบไบฟรินเจนซ์ได้ Tako and Hizukuri (2000) เสนอรูปแบบการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของสตาร์ชข้าวพันธุ Nihonbare ในสารละลายแขวนลอยก่อนเกิดเจลาตินในเซชัน แสดงดังภาพที่ 2.7 พบว่าการเกิดพันธะไฮโดรเจนในสตาร์ชจะเกิดขึ้นที่ออกซิเจนตำแหน่งที่ 6 (O-6) ของอะไมโลสและหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ตำแหน่งที่ 2 ของอะไมโลเพกติน



ภาพที่ 2.7 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในสารละลายสตาร์ช

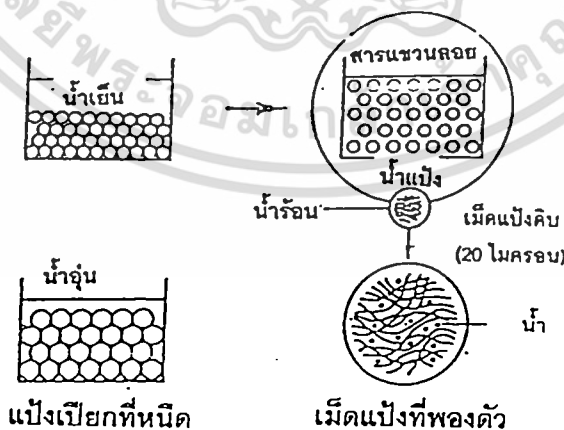
ข้าว (เส้นประ = พันธะไฮโดรเจน A = อะไมโลส AP = อะไมโลเพกติน (A และ B1))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ที่มา : Tako and Hizukuri (2000)  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 การพองตัวและการหลอมเหลว

เมื่อนำสารละลายสตาร์ชที่มีปริมาณน้ำมากพอ (ความชื้นประมาณร้อยละ 70) มาให้ความร้อน ผลึกของเม็ดสตาร์ชที่จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย น้ำถูกดูดซึมเข้าไปในช่องว่างของเม็ดแป้งและจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชทำให้เม็ดแป้งพองตัว ในระหว่างการให้ความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนสถานะบริเวณผลึกและบริเวณอสัณฐาน ระบบจะดูดความร้อน (Endotherm process) เพื่อให้บริเวณอสัณฐานเปลี่ยนจากสภาพคล้ายแก้ว (Glassy state) ซึ่งแข็งและเปราะไปเป็นสภาพยาง (Rubbery state) ที่ยืดหยุ่น ความหนืดลดลง กิ่งก้านของอะไมโลเพคตินในบริเวณอสัณฐานมีการเคลื่อนไหวเกิดขึ้น ทำให้บริเวณผลึกมีสถานะไม่คงที่ อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ เรียกว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature :  $T_g$ )

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นระบบจะดูดความร้อนครั้งที่สอง ทำให้บริเวณผลึกเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว หรือ Amorphous fluid อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า อุณหภูมิหลอมตัวผลึก (Melting temperature :  $T_m$ ) คุณสมบัติของเม็ดสตาร์ชเปลี่ยนแปลงมากกว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิหลอมตัวผลึกนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงอันดับหนึ่ง (First-order transition) ในช่วงนี้เม็ดสตาร์ชจะแตกออกอะไมโลสซึ่งละลายน้ำได้ดีกว่า จะออกจากเม็ดสตาร์ชเข้าไปในสารละลาย ตามด้วยอะไมโลเพคตินและจับกันแน่นจนแยกไม่ออก เกิดเป็นเจล ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “การเกิดเจลาติโนเซชัน” และอุณหภูมิที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว เรียกว่า “อุณหภูมิเจลาติโนเซชัน” หรือ “อุณหภูมิแป้งสุก” การเกิดเจลาติโนเซชันไม่ได้เกิดที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งแต่จะเกิดเป็นช่วงประมาณ 8–12°C (Noel et al., 1993) การเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชระหว่างการหุงต้มแสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชในระหว่างการหุงต้ม

ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด (2542)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Yrjö (1995) พบว่าการเกิดเจลลาคีโนเซชันของแป้งหรือสตาร์ชจะเกิดได้สมบูรณ์หรือไม่สามารถพิจารณาได้จาก

1. การสูญเสียไบพรีนเจนซ์ของเม็ดสตาร์ช เนื่องจากการพองตัวของเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน

2. การสูญเสียความเป็นผลึกในระหว่างการให้ความร้อนสามารถสังเกตได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของเม็ดสตาร์ชข้าวจากเดิมที่เป็นแบบเอ (A-pattern) จะหายไปและหลังจากการเกิดเจลลาคีโนเซชันจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์เป็นแบบบี (V-pattern) เนื่องจากการเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนของอะไมโลส-ไขมัน (Amylose-lipid complex) ในระหว่างการเกิดเจลลาคีโนเซชัน ช่วงอุณหภูมิและอัตราการสูญเสียความเป็นผลึกขึ้นกับปริมาณน้ำและชนิดของสตาร์ช (Eliasson and Gudmundsson, 1996)

ในการบริโภคข้าวนิยมนำมาหุงทั้งเมล็ด การเกิดเจลลาคีโนเซชันของสตาร์ชจะเกิดในระหว่างการหุงข้าว อุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชเกิดเจลลาคีโนเซชันมีความสัมพันธ์กับเวลาในการหุงเพื่อไม่ให้ข้าวสุกแข็งเกินไปพลังงานความร้อนและเวลาที่ใช้ในการหุงต้องเหมาะสม เพื่อให้เมล็ดข้าวสุกมีคุณภาพดีที่สุด ปัจจุบันการศึกษาการเกิดเจลลาคีโนเซชันของข้าวสุก แป้ง และสตาร์ช นิยมใช้วิธีตรวจสอบหาค่าเอนทัลปี (Enthalpy) ซึ่งเปลี่ยนแปลงแบบเฉียบพลัน ในขณะที่ผลึกกำลังหลอมเหลว โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (จารนัย, 2537)

Normand and Marshall (1989) ศึกษาการเกิดเจลลาคีโนเซชันของเมล็ดข้าว และแป้งข้าวด้วย DSC พบว่าเมล็ดข้าวจะดูดความร้อน 2 ครั้ง ครั้งแรกจะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 60-70°C พีก (Peak) ที่ได้จะเล็กและแคบ ครั้งที่สองเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 80-90°C พีกที่เกิดใหญ่กว่าครั้งแรก ในขณะที่แป้งข้าวจะดูดความร้อนเพียงครั้งเดียวเนื่องจากมีโครงสร้างไม่สมบูรณ์ เพราะโครงสร้างบางส่วนของแป้งข้าว เช่น ผนังเซลล์ (Cell wall) ถูกทำลายในระหว่างการบดแห้ง สตาร์ชในเมล็ดข้าวจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าในการเกิดเจลลาคีโนเซชัน ค่าเอนทัลปีการเกิดเจลลาคีโนเซชัน (Enthalpy gelatinization) ของเมล็ดข้าวสูงกว่าแป้งข้าวประมาณร้อยละ 40 Hogan and Deobald (1961) พบว่าการดูดความร้อนครั้งที่สองของเมล็ดข้าวใช้อุณหภูมิสูงกว่าครั้งแรกนั้น เนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำลายโครงสร้างเชิงซ้อนของอะไมโลส-ไขมันที่ฟอร์มตัวขึ้นในระหว่างการเกิดเจลลาคีโนเซชัน

## 2.5 การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation)

### 2.5.1 ความหมายการเกิดรีโทรกราเดชัน

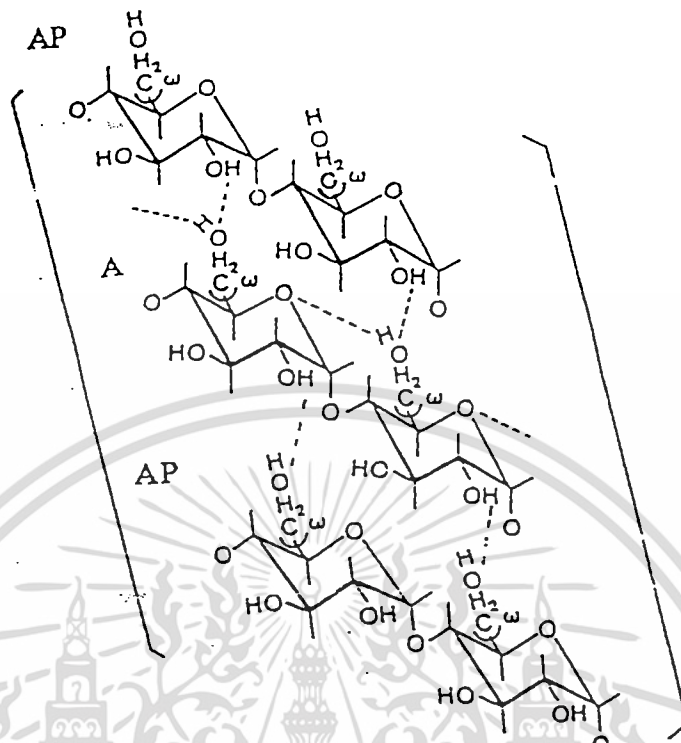
ปัจจุบันการเกิดรีโทรกราเดชันได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากการเกิดรีโทรกราเดชันมีบทบาทสำคัญในการเกิดความเก่า (Staling) ของขนมปัง ข้าวสุก และอาหารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก การเกิดรีโทรกราเดชันของแป้งเป็นปรากฏการณ์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา และอุณหภูมิ ซึ่งนำไปสู่การเกิดผลึก (Crystallization) บางส่วนในองค์ประกอบของสตาร์ช (Ytjo, 1995)

Atwell *et al.* (1988) ให้คำจำกัดความของการเกิดรีโทรกราเดชันว่า การเกิดรีโทรกราเดชันของแป้ง เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของแป้งที่เกิดเจลลาติไนเซชันแล้ว มารวมกันในลักษณะโครงสร้างที่เป็นระเบียบซึ่งเป็นผลมาจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ในระหว่างโมเลกุล หรือภายในโมเลกุลเองเกิด โครงสร้างเป็นเกลียวมาช่วยให้สภาวะที่เหมาะสม มีผลทำให้เกิดผลึก

### 2.5.2 กลไกการเกิดรีโทรกราเดชัน

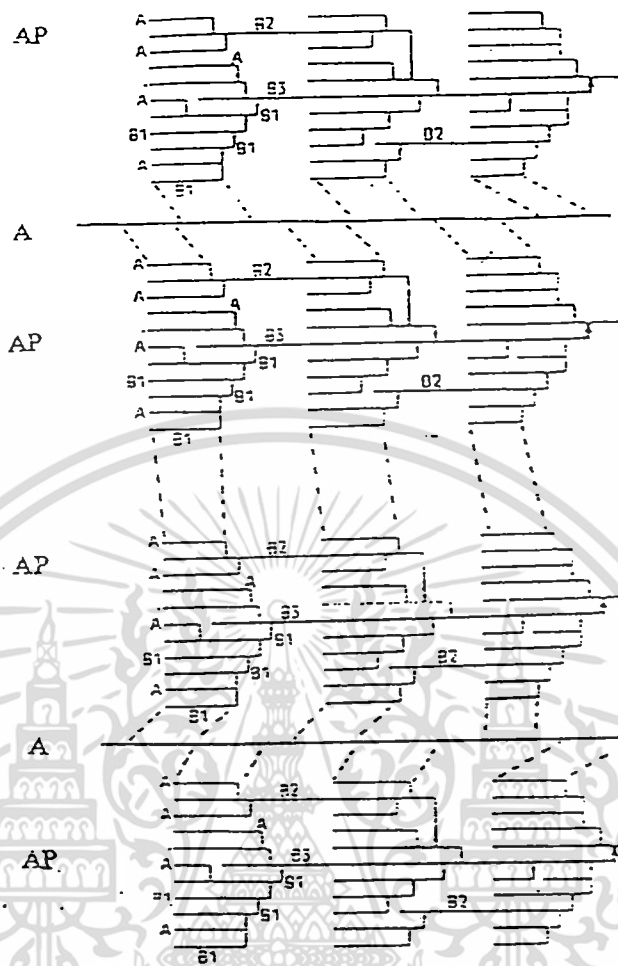
กลไกการเกิดรีโทรกราเดชันเป็นกระบวนการเกิดผลึกของแป้งที่เกิดเจลลาติไนเซชันแล้ว เมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอะไมโลสและจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของโมเลกุลอะไมโลสในน้ำแป้งจากเดิมที่เป็นอสัณฐานไปเป็นผลึก (Eliasson, 1996) หลังจากนั้นโมเลกุลของอะไมโลเพคตินจะจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรง และจับกันเป็นผลึก การจับกันนี้มีผลทำให้น้ำที่เคยจับกันอยู่ก่อนตอนที่โครงสร้างร่างแหต้องถูกกำจัดออกไป ผลิตภัณฑ์พวกเจลจะมีการแยกน้ำ (Syneresis) ซึ่งสังเกตได้จากการที่มีน้ำซึมออกมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ทำให้เจลมีความชื้นลดลง (Fan and Marks, 1998)

การเกิดรีโทรกราเดชันเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากการเกิดเจลลาติไนเซชันเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังนั้นการเกิดเจลลาติไนเซชันจึงมีความสำคัญต่อการเกิดรีโทรกราเดชันของแป้ง Tako and Hizukuri (2000) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารละลายสตาร์ชข้าวพันธุ์ Akihikari ความเข้มข้นร้อยละ 4 ซึ่งเกิดเจลลาติไนเซชันแล้ว มาเก็บที่อุณหภูมิ 25°C และ 4°C นาน 24 ชั่วโมง พบว่าการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินของสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไป แสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 กลไกการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชข้าวพันธุ Akihikari  
ที่มา : Tako and Hizukuri (2000)

จากภาพที่ 2.9 การเกิดพันธะไฮโดรเจนในสารละลายสตาร์ชนอกจากจะเกิดระหว่างออกซิเจนอะตอมที่ 6 ของอะไมโลสและหมู่ไฮดรอกซิลตำแหน่งที่ 2 ของอะไมโลเพคตินแล้ว การเกิดพันธะไฮโดรเจนอาจขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลตำแหน่งที่ 2 ของอะไมโลสกับโมเลกุลอื่นหรืออาจเกิดกับออกซิเจนตำแหน่งที่ 6 ของอะไมโลเพคตินสายสั้น (A และ B1) เมื่อเก็บสารละลายสตาร์ชที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานาน การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะอึดตัว มีผลทำให้เกิดการรวมตัวระหว่างโมเลกุลของอะไมโลเพคตินด้วยพันธะไฮโดรเจน แสดงดังภาพที่ 2.10 พันธะไฮโดรเจนนี้เกิดขึ้นจากการลดลงของ Brownian motion และพลังงานจลน์ของอะไมโลเพคตินและโมเลกุลของน้ำระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และ 4°C (Tako and Hizukuri, 2000)



ภาพที่ 2.10 การรวมตัวของโมเลกุลอะไมโลเพคตินสายสั้น (A และ B1) ในสารละลายสตาร์ช เมื่อเก็บที่อุณหภูมิค่าเป็นเวลาานานและหลังจากการอ้อมตัวระหว่างพันธะไฮโดรเจนของ อะไมโลสและอะไมโลเพคติน

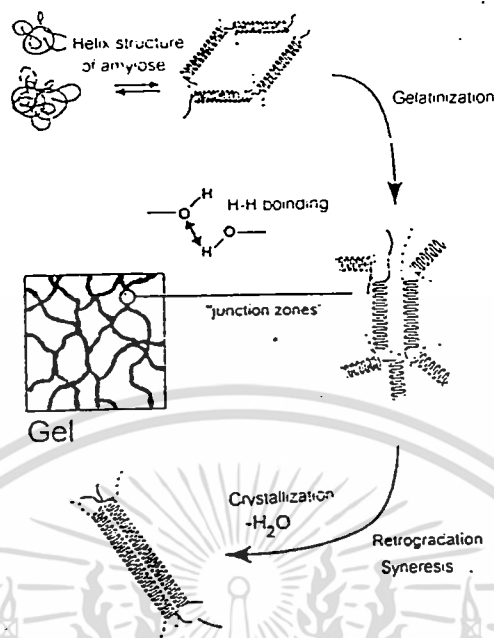
ที่มา : Tako and Hizukuri (2000)

Klucinnec and Thomson (1999) พบว่าในระหว่างการเกิดรีโทรกราเดชัน โมเลกุลของอะไมโลสจะฟอร์มตัวเป็นเกลียวคู่ (Double-helical) เกิดจากการรวมตัวของกลูโคสประมาณ 40-70 หน่วย และโมเลกุลของอะไมโลเพคตินก็จะฟอร์มตัวเป็นเกลียวคู่เช่นเดียวกันแต่สั้นกว่า เนื่องจากข้อจำกัดของโครงสร้างที่มีกิ่งก้านสาขา จากนั้นเกลียวคู่ที่เกิดขึ้นจะรวมตัวเป็นผลึก ลักษณะเกลียวของอะไมโลสในระหว่างการเกิดเจลาคิโนเซชันและรีโทรกราเดชัน แสดงดังภาพที่ 2.11

นอกจากนี้การเกิดรีโทรกราเดชันยังมีผลทำให้ผลึกของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีการหักเหแสงเป็นแบบบี (B-pattern) เมื่อศึกษาจากการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ โดยที่ผลึกของอะไมโลเพคตินสามารถเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับได้เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 70°C

(Eliasson and Gudmunsson, 1996)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



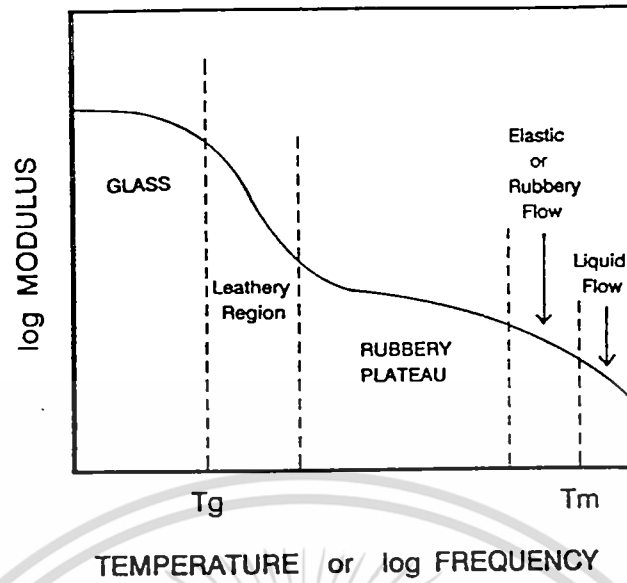
ภาพที่ 2.11 ลักษณะเกลียวของอะไมโลสในระหว่างการเกิดเจลตาดีในเซชันและรีโทรกราเดชัน  
ที่มา : Borchard (1996)

### 2.5.3 การเกิดผลึกในระหว่างการเกิดรีโทรกราเดชัน

การเกิดผลึกของโพลีเมอร์หรือการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชสามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีกลไกการเกิดผลึก (Theory of crystallization kinetics) ของสสาร โดยที่ความแข็งแรงของโครงสร้างของสสารหรืออาหารจะแตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังภาพที่ 2.12 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของโครงสร้างโดยแสดงค่าเป็น โมดูลัส (Modulus) เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิของอาหารต่ำกว่า  $T_g$  อาหารจะเปราะและแตกง่าย  $T_g$  เป็นอุณหภูมิเฉพาะของอาหารแต่ละชนิด ดังนั้นอาหารแต่ละชนิดจึงมี  $T_g$  ไม่เท่ากัน  $T_g$  เป็นอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของสสารซึ่งเป็นของแข็งที่มีความหนืดสูงมากคล้ายแก้วหรือมีค่าโมดูลัสสูง เป็นสสารที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น (แสดงเป็นค่าโมดูลัสที่ลดต่ำลง) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอาหารให้สูงกว่า  $T_g$  สสารจะเป็นของแข็งที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายขึ้นแต่ยังไม่สามารถไหลได้เหมือนของเหลว มีลักษณะเหนียวคล้ายหนัง (Leathery) หรือเหนียวเป็นยาง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสสารจนสูงกว่า  $T_m$  สสารจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับของเหลว (Liquid-like) คือไหลได้และเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามภาชนะ เนื่องจากโครงสร้างมีความแข็งแรงลดลง (ค่าโมดูลัสลดต่ำลง) เพราะแรงยึดเกาะภายในของอาหารลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จึงทำให้อาหารเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้

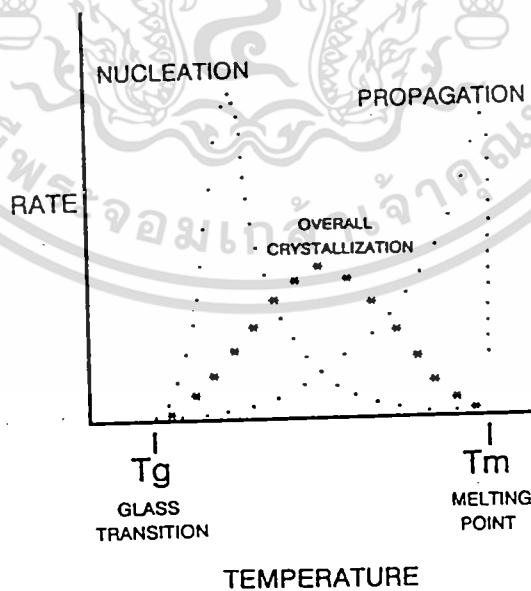
เอกสารนี้เบี่ยงเหมือนของเหลว (Slade and Levine, 1991) ถึงแม้ว่าในทฤษฎีที่กล่าวถึงนั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของโครงสร้างแสดงค่าเป็น โมดูลัสเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ที่มา : Slade and Levine (1991)

การเกิดผลึกของสสารในระหว่างการเกิดรีโทรกราเดชัน ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ 1) การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) หรือการเกิดอนุภาคใหม่ของผลึกและเจริญเติบโตขึ้นจนมีขนาดหนึ่ง และ 2) โพรพาเกชัน (Propagation) คือการเพิ่มจำนวนและขนาดของผลึก ดังภาพที่ 2.13 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการเกิดผลึกของสสาร



ภาพที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราการผลึก

เอกสารนี้เป็นที่มาของ Slade and Levine (1991) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเกิดผลึกของสสารซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยผลึกจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ  $T_c < T < T_m$  ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่สสารมีสภาพเหนียวเป็นยาง ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในภาพที่ 2.12 ดังนั้นการเกิดผลึกของสสารจึงสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาพเหนียวเป็นยางเท่านั้น และจากการทดลองพบว่า สารละลายอะไมโลเพคตินที่มีปริมาณน้ำมากกว่าร้อยละ 27 สามารถเกิดผลึกได้ในช่วง  $T_c$  เท่ากับ  $-5^\circ\text{C}$  และ  $T_m$  ประมาณ  $60^\circ\text{C}$  จากภาพที่ 2.13 การเกิดนิวคลีโอซันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อสสารมีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งทำให้โมเลกุลของสสารเคลื่อนที่ตลอดเวลา และฟอร์มตัวเป็นนิวคลีโอ (Nuclei) จำนวนการเกิดนิวคลีโอขึ้นอยู่กับอัตราการทำความเย็น นิวคลีโอเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็วมากจึงเรียกว่า หน่วยเคลื่อนที่ (Kinetic unit) ซึ่งแต่ละหน่วยอยู่ในตำแหน่ง เวลา ความเร็ว พลังงานและความเข้มข้นแตกต่างกันมาก เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอหน่วยเคลื่อนที่ 2 อนุภาค อาจมาเชื่อมต่อกันและอาจมีอนุภาคที่ 3 และอนุภาคอื่นๆ มาเชื่อมต่อกัน การรวมกันในลักษณะนี้เรียกว่า คลัสเตอร์ (Cluster) และเจริญเติบโตเป็นเอ็มบริโอ (Embryo) และนิวเคลียส (Nucleus) ถ้านิวเคลียสรับคลัสเตอร์และเอ็มบริโอเข้ามาเพิ่มมากขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นผลึก นิวคลีโอซันจะไม่เกิดขึ้นถ้า  $T < T_c$  ซึ่งโมเลกุลของสสารส่วนใหญ่จะไม่เคลื่อนที่ในสภาวะของแข็งที่  $\eta > 10^{-12}$  PaS อัตราการเกิดนิวคลีโอซันจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสสารเพิ่มขึ้น โดยอัตราการเกิดนิวคลีโอซันจะเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิของสสารเท่ากับ  $T_m$  และเมื่ออุณหภูมิของสสารสูงกว่า  $T_c$  เล็กน้อยอัตราการเกิดนิวคลีโอซันจะสูงที่สุด (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2541 ; Jacobson and Bemiller, 1998 ; Slade and Levine, 1991)

สำหรับการเกิดโพรพาเกชันจะเกิดขึ้นเมื่อสสารมีสถานะเป็นของเหลว โดยอัตราการเกิดโพรพาเกชันมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่ออุณหภูมิของสสารมีค่าเท่ากับ  $T_c$  และเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสสารเพิ่มขึ้น โดยอัตราการเกิดโพรพาเกชันจะมีค่าสูงสุดเมื่ออุณหภูมิของสสารต่ำกว่า  $T_m$  เล็กน้อย ดังนั้นจากภาพที่ 2.13 การเกิดผลึกของสสารในระหว่างการเกิดรีโทรกราเดชัน ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดนิวคลีโอซันและโพรพาเกชันจะเกิดสูงสุดที่ช่วงอุณหภูมิตรงกลางระหว่าง  $T_c$  และ  $T_m$  และอัตราการเกิดผลึกจะเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิของสสารเท่ากับ  $T_c$  และ  $T_m$  (Slade and Levine, 1991)

#### 2.5.4 ผลจากการเกิดรีโทรกราเดชันที่มีต่อเจลของแป้ง

การเกิดรีโทรกราเดชันเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้คุณสมบัติของสสารเปลี่ยนแปลงไป ผลจากการเกิดรีโทรกราเดชันที่มีต่อเจลของแป้ง มีดังนี้ (ณรงค์ นิยมวิทย์ และ อัญชนีย์ อุทัยพัฒนาชีพ, 2528)

1. ทำให้เจลของแป้งสลายตัวได้ยาก เมื่อสัมผัสกับกรดหรือเอนไซม์ เนื่องจากลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้โครงสร้างแน่นและแข็งเพิ่มมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำให้เจลของแข็งขึ้น เนื่องจากเกิดผลึกขึ้นมากมายและหลายขนาด โดยขึ้นอยู่กับชนิดของแข็ง แข็งที่เกิดผลึกขนาดใหญ่กว่า 250 นาโนเมตร แสงจะผ่านไม่ได้ และสะท้อนออกมา เจลที่ได้จึงมีลักษณะขุ่นแต่ถ้าผลึกมีขนาดเล็กกว่า 250 นาโนเมตร แสงผ่านได้เจลที่ได้จะมีลักษณะใส

3. เจลของแข็งที่เกิดรีโทรกราเดชันจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีน หรือทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนได้น้อยลง

4. ทำให้แข็งที่เกิดรีโทรกราเดชันละลายน้ำได้น้อยลง แต่ยังละลายได้ดีในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์

### 2.5.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรีโทรกราเดชัน

การเกิดรีโทรกราเดชันของแข็งนั้น เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง อาทิ เช่น อัตราส่วนระหว่างอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน ความเข้มข้นของน้ำแข็ง อุณหภูมิ ระยะเวลาการหุงต้ม ค่าความเป็นกรด-ด่าง และสารประกอบอื่น ๆ ที่มีอยู่ในแข็ง (Fan and Marks, 1998) เป็นต้น

#### 2.5.5.1 อัตราส่วนระหว่างอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน

ในระหว่างการเกิดรีโทรกราเดชัน โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจะมีโครงสร้างแบบเกลียวคู่ อะไมโลสเป็นโมเลกุลที่เกิดรีโทรกราเดชันได้เร็วและสูงกว่าอะไมโลเพกติน เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ง่าย และเร็วกว่า ในขณะที่อะไมโลเพกตินมีบทบาทต่อการเกิดรีโทรกราเดชันน้อยกว่าอะไมโลส เนื่องจากโมเลกุลส่วนที่เป็นแขนงของอะไมโลเพกตินเป็นอุปสรรคต่อการรวมตัว แต่ถ้าในสภาวะที่มีความเข้มข้นสูงๆ หรืออยู่ในอุณหภูมิเยือกแข็ง บางส่วนของโมเลกุลที่เป็นแขนงสามารถเกิดรีโทรกราเดชันได้ โมเลกุลแขนงที่สามารถเกิดรีโทรกราเดชันได้นี้จะมีความยาวของกลูโคส 20-30 หน่วยกลูโคส (อรพิน ภูมิภมร, 2532 ; Eliasson and Gudmunsson, 1996)

Chang and Liu (1991) พบว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูง จะเกิดรีโทรกราเดชันเร็วและสูงกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสดำ ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ Fan and Marks (1998) พบว่า แป้งข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดรีโทรกราเดชันได้สูงกว่าแป้งข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสดำ และ รังสิตา สิมابرพ์ (2540) ศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของแป้งข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกัน ได้แก่ แป้งข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 (อะไมโลสดำ) กข23 (อะไมโลสปานกลาง) และ เหลืองประทิว123 (อะไมโลสสูง) ความเข้มข้นร้อยละ 30 พบว่าแป้งข้าวพันธุ์เหลืองประทิว123 จะเกิดรีโทรกราเดชันได้สูงและเร็วกว่าแป้งข้าวพันธุ์กข23 และแป้งข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ Kim *et al.* (1997) ศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของเจลสตาร์ชข้าว (Rice starch gel) ด้วยวิธี DSC X-ray diffraction และ  $\alpha$ -amylase method พบว่าเจลสตาร์ชข้าวเจ้าจะเกิดรีโทรกราเดชันได้เร็วกว่าเจลสตาร์ชข้าวเหนียว

#### 2.5.5.2 ความเข้มข้นของน้ำแป้ง

ความเข้มข้นเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดรีโทรกราเดชัน Eliasson and Gudmunsson (1996) พบว่าเจลสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 10-80 สามารถเกิดรีโทรกราเดชันได้ และเมื่อเจลสตาร์ชมีความเข้มข้นร้อยละ 50-60 จะเกิดรีโทรกราเดชันสูงสุดเช่นเดียวกับ Chang and Liu (1991) พบว่าน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 50 จะเกิดรีโทรกราเดชันสูงที่สุด แต่ถ้าน้ำแป้งมีความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 10 หรือสูงกว่าร้อยละ 80 การเกิดรีโทรกราเดชันของแป้งข้าวจะเกิดขึ้นน้อยมาก

Kim *et al.* (1997) ศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชข้าวเจ้าและข้าวเหนียว ความเข้มข้นร้อยละ 10 และร้อยละ 50 ด้วยวิธี  $\alpha$ -amylase method ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า สตาร์ชข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 50 มีอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันสูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 10 สตาร์ชข้าวเหนียวความเข้มข้นร้อยละ 50 และร้อยละ 10 ตามลำดับ

#### 2.5.5.3 อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษา

อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ช Kim *et al.* (1997) ศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวความเข้มข้นร้อยละ 10 และร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิแช่เย็น (Refrigerated temperature) และอุณหภูมิต่ำเยือกแข็ง (Frozen temperature) เมื่อเก็บนาน 3 วัน พบว่าสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 10 จะเกิดรีโทรกราเดชันสูงสุดเมื่อเก็บที่อุณหภูมิแช่เย็น รองลงมาคือ อุณหภูมิเยือกแข็งและอุณหภูมิห้อง ในขณะที่สตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 50 อัตราการเกิดรีโทรกราเดชันสูงสุดเมื่อเก็บที่อุณหภูมิแช่เย็น รองลงมาคืออุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิต่ำเยือกแข็ง ตามลำดับ

การเก็บเจลสตาร์ชที่อุณหภูมิ  $-4^{\circ}\text{C}$  อัตราการเกิดรีโทรกราเดชันจะสูงที่สุด เพราะว่าโมเลกุลอะมิโลสขนาดเล็กเคลื่อนที่ช้าลงจึงจับตัวกันเป็นผลึก เจลสตาร์ชที่มีปริมาณน้ำร้อยละ 45-50 เมื่อเก็บที่อุณหภูมิสูงกว่า  $T_g$  จะเพิ่มการเกิดรีโทรกราเดชันเนื่องจากโมเลกุลของเจลสตาร์ชไม่เสถียร มีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้โมเลกุลของอะมิโลสเคลื่อนที่เข้าใกล้กันและเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลและเกิดผลึกมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งวันแรกของการเก็บรักษา อัตราการเกิดนิวคลีเอชันและโพรพาเกชันจะเพิ่มเป็นกำลังสองขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเก็บรักษา (Chang and Liu, 1991 ; Eliasson and Gudmunsson, 1996)

Hsu and Heldman (1998) ศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 55 พบว่าที่อุณหภูมิต่ำเยือกแข็งอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันจะต่ำที่สุด เนื่องจาก  $T_g$  ไม่ต่ำกว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสตาร์ชลดลง ทำให้เจลสตาร์ชมีสภาพแข็งคล้ายแก้ว โมเลกุลของสตาร์ชจึงเคลื่อนที่ได้น้อยลง การเกิดรีโทรกราเดชันจึงต่ำ และ Kim *et al.* (1997) พบว่าอุณหภูมิเยือกแข็งน้ำที่อยู่ในสารละลาย แป้ง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นผลึกน้ำแข็งทำให้น้ำในสตาร์ชลดลง ความเข้มข้นของแป้งเพิ่มมากขึ้น จนแป้งไม่สามารถเกิดรีโทรกราเดชันได้หรือเกิดน้อยมาก ดังนั้นการเก็บเจลสตาร์ชควรเก็บที่อุณหภูมิเยือกแข็งเพื่อลด  $T_g$  ให้ต่ำลง ในขณะที่อุณหภูมิห้อง ผลึกแป้งจะอ่อนตัวเมื่อทิ้งไว้นาน ๆ และเกิดการหลอมเหลว จนไม่สามารถเกิดรีโทรกราเดชันได้ โดย Eliasson and Gudmunsson (1996) พบว่าที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  การเกิดนิวเคลียสของผลึกจะถูกยับยั้ง

Chang and Liu (1991) กล่าวว่าระยะเวลาในการเก็บมีความสัมพันธ์ในทางบวกกับการเกิดรีโทรกราเดชัน พบว่าในช่วงแรกสตาร์ชข้าวเจ้าจะเกิดรีโทรกราเดชันอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการรวมตัวของโมเลกุลอะไมโลส เมื่อระยะเวลาการเก็บนานขึ้นสตาร์ชข้าวเหนียวจะเกิดรีโทรกราเดชันสูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้าเนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรงและจับกันเป็นผลึกได้เช่นเดียวกับโมเลกุลของอะไมโลส

#### 2.5.5.4 ปริมาณน้ำระหว่างการเกิดรีโทรกราเดชัน

ปริมาณน้ำที่พบในเจลสตาร์ชระหว่างการเก็บรักษามีผลต่อการเกิดรีโทรกราเดชัน โดยน้ำทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) น้ำมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงช่วยเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free volume) และความหนืด ทำให้ค่า  $T_g$  ของสตาร์ชบริเวณออสซิลและ  $T_m$  บริเวณผลึกลดลง โมเลกุลต่าง ๆ จึงเคลื่อนที่ได้มากขึ้นและมีแรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุลลดลง ทำให้โอกาสในการเกิดผลึกเพิ่มสูงขึ้นและอัตราการเกิดผลึกจะเกิดสูงสุดที่อุณหภูมิ  $T = \frac{1}{2}(T_g + T_m)$  (Eliasson and Gudmunsson, 1996 ; Levine and Slade, 1987)

ถ้าเจลสตาร์ชมีปริมาณน้ำร้อยละ 45-50 การเกิดผลึกจะสูงที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการพลาสติกไซเซชัน (Plasticization) ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณน้ำในเจลสตาร์ชน้อยกว่าร้อยละ 20 ผลึกจะไม่เกิดขึ้น และการเกิดผลึกจะลดลงเมื่อปริมาณน้ำในเจลสตาร์ชเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 90 เนื่องจากขององค์ประกอบภายในผลึกบริเวณ Plasticized amorphous matrix เจือจาง (Eliasson and Gudmunsson, 1996 ; Kim *et al.*, 1997)

#### 2.5.5.5 ความเป็นกรด - ด่าง

แป้งเกิดรีโทรกราเดชันเร็วที่ความเป็นกรด-ด่างประมาณ 5-7 การเกิดรีโทรกราเดชันของแป้งจะไม่เกิดขึ้นที่ความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 10 หรือน้อยกว่า 2 แต่กรดบางชนิด เช่น กรดซัลฟูริก หรือกรดไฮโดรคลอริกมีผลทำให้เกิดรีโทรกราเดชันเร็วที่ความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 2 ส่วนด่างมีผลทำให้เกิดรีโทรกราเดชันช้าลง เนื่องจากด่างทำให้โมเลกุลของอะไมโลสแตกตัว (อรพิน ภูมิภมร, 2532)

### 2.5.5.6 สารประกอบต่างๆ

สารประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดรีโทรกราเดชันคือ น้ำตาล โซเดียมคลอไรด์ และน้ำมันหรือไขมันชนิดต่างๆ

#### 1) น้ำตาลและโซเดียมคลอไรด์

Chang and Liu (1991) พบว่าน้ำตาลซูโครสจะเพิ่มอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันเนื่องจากน้ำตาลทำให้แป้งมีความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง เพราะน้ำตาลไปขัดขวางการรับน้ำของเม็ดแป้งโดยไปแย่งน้ำที่มีอยู่มาแทน ส่วนโซเดียมคลอไรด์จะทำให้อัตราการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชลดลง เพราะโซเดียมคลอไรด์สามารถแตกตัวเป็นประจุ ทำให้โมเลกุลของสตาร์ชมีการแตกตัว การเกิดรีโทรกราเดชันของเม็ดแป้งจึงเกิดช้ากว่า

#### 2) น้ำมันหรือไขมันชนิดต่างๆ

Chang and Liu (1991) ศึกษาผลของน้ำมันปาล์ม น้ำมันรำข้าว น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันหมู ต่อการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชข้าวที่เก็บนาน 21 วัน พบว่าน้ำมันถั่วเหลืองมีผลทำให้การเกิดรีโทรกราเดชันลดลงมากกว่าน้ำมันปาล์ม น้ำมันรำข้าว และน้ำมันหมู เนื่องจากมีระดับความไม่อิ่มตัวสูงกว่าไขมันชนิดอื่น ๆ

อย่างไรก็ตามการเกิดรีโทรกราเดชันของแป้งสามารถเกิดได้อีกลักษณะหนึ่งคือการเกิดรีโทรกราเดชันในระหว่างช่วงอุณหภูมิสูง เรียกว่า การเกิดรีโทรกราเดชันที่อุณหภูมิสูง (High temperature retrogradation) คือทำให้สารละลายแป้งเกิดเจลที่อุณหภูมิสูงถึง 120-160°C และเมื่อเก็บแป้งเปียกนี้ไว้ที่อุณหภูมิ 75-95°C จะเกิดการตกตะกอนของโมเลกุลเชิงซ้อนของอะไมโลส-ไขมัน ซึ่งส่วนใหญ่จะพบการเกิดรีโทรกราเดชันแบบนี้ในแป้งที่ยังไม่สกัดไขมันเท่านั้น (อรพิน ภูมิภมร, 2532)

### 2.5.6 การยับยั้งการเกิดรีโทรกราเดชัน

การป้องกันการเกิดรีโทรกราเดชันของแป้ง คือ การเตรียมเป็นอนุพันธ์แป้ง (Derivated starch) ด้วยกลุ่มอีเทอร์หรือเอสเทอร์ ซึ่งกลุ่มนี้จะเข้าไปเพียง 2-3 กลุ่ม หรือจะให้มียูนิทตำแหน่งกลูโคสทุก ๆ 100 หน่วย เพื่อป้องกันการเชื่อมต่อเป็นเส้นตรงของโมเลกุล

Yook *et al.* (1993) ตรวจสอบการเกิดเจลลาติโนเซชันและการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวสุกที่เติมโพรพิลีนออกไซด์ (Propylene oxide) อีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) และ การทำครอสลิงข้าวสุก (Cross-linked cooked rice) ด้วยวิธี DSC พบว่าข้าวทั้ง 3 ชนิด มีอุณหภูมิเจลลาติโนเซชันลดลงจาก 62°C เป็น 50°C และอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันลดลง และการนำข้าวสุกมาทำการไฮดรอกซีโพรพิลเลชัน (Hydroxypropylation) ร่วมกับการครอสลิง จะเกิดรีโทรกราเดชันน้อยกว่าข้าวสุกที่ทำการไฮดรอกซีโพรพิลเลชันเพียงอย่างเดียว

การทำไฮดรอกซีโพรพิลเลชันสตาร์ช เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มอายุการเก็บและความคงตัวจากการแช่เยือกแข็งหรือการละลาย (Freeze or thaw stability) ได้ เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหมู่ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เมื่อเติมลงในเม็ดแป้ง จะช่วยให้เม็ดแป้งมีโครงสร้างแข็งแรงมากขึ้นและช่วยเก็บน้ำในแป้งเปียก เมื่อเกิดการแยกน้ำจากแป้งเปียกหรือเมื่อนำข้าวไปทำการแช่เยือกแข็งหรือละลายน้ำแข็ง หมู่ไฮดรอกซิลสามารถยับยั้งการเกิดรีโทรกราเดชันได้ โดยทำให้สตาร์ชมีลักษณะเป็นเพสต์ที่ไหลได้ (Fluid paste) และมีความใสเพิ่มขึ้น โดยปกติแล้วการทำไฮดรอกซีโพรพิลเลชันจะถูกนำมาใช้ในการครอสลิงเพื่อปรับปรุงคุณภาพสตาร์ช

Dai *et al.* (1997) พบว่าสารอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) สามารถทำให้อาหารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบเกิดรีโทรกราเดชันช้าลง โดยข้าวที่ผสมลอริลแอลกอฮอล์ (Lauryl alcohol) จะเกิดรีโทรกราเดชันช้ากว่าข้าวที่ไม่ได้ผสมลอริลแอลกอฮอล์

Mun *et al.* (1996) ศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของเจลแป้งข้าวที่ผสม Sucrose fatty acid ester 1670 กับน้ำมันถั่วเหลืองความเข้มข้นร้อยละ 0-2 พบว่าอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันจะเกิดช้ากว่าเจลแป้งข้าวที่ไม่เติมสารนี้ อย่างไรก็ตามการใช้สารอิมัลซิไฟเออร์หรือน้ำมันต่าง ๆ จะมีผลต่อกลิ่นและรสชาติของผลิตภัณฑ์อาหารเล็กน้อย

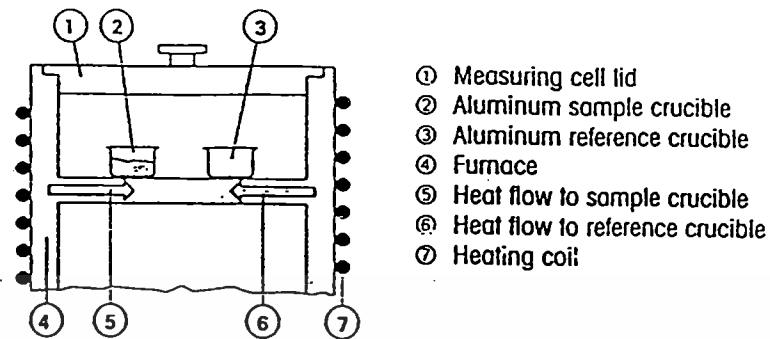
### 2.5.7 การวัดการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกโดยใช้ DSC

DSC เป็นเทคนิคที่พัฒนามาจาก Differential Thermal Analysis (DTA) ซึ่งมีหลักการทำงานที่แตกต่างกัน DTA จะบันทึกความแตกต่างการเปลี่ยนแปลงค่าเอนทัลปีที่พบในตัวอย่างและตัวอย่างอ้างอิงเมื่อนำมาให้ความร้อน โดยที่ตัวอย่างและตัวอย่างอ้างอิงจะให้ความร้อนจากแหล่งเดียวกัน ในขณะที่ DSC นั้นแหล่งพลังงานความร้อนระหว่างตัวอย่างและตัวอย่างอ้างอิงจะแยกออกจากกัน ซึ่งมีโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเพื่อทำให้อุณหภูมิของสารทั้งสองเท่ากันตลอดเวลา โดยการดูดหรือปล่อยพลังงานให้แก่สารนั้น และบันทึกค่าพลังงานที่แตกต่างกันระหว่างสารตัวอย่างและตัวอย่างอ้างอิง ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารตัวอย่างและตัวอย่างอ้างอิงต้องเท่ากับศูนย์ ( $\Delta T = T_s - T_r = 0$ ) DSC เป็นเครื่องมือที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้อย่างกว้างขวาง อาทิเช่น การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative data) เช่น การหาอุณหภูมิของ  $T_g$  การเกิดผลึก การหลอมเหลว การทำแห้ง และการเสถียรภาพของโปรตีน และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative data) เช่น การหาค่าเอนทัลปีการเปลี่ยนแปลงความร้อน ค่าเอนทัลปีของปฏิกิริยา การหาความร้อนจำเพาะ การหาความบริสุทธิ์ ระดับของความเป็นผลึก และการวิเคราะห์หาปริมาณของผสม เป็นต้น (Lund, 1983)

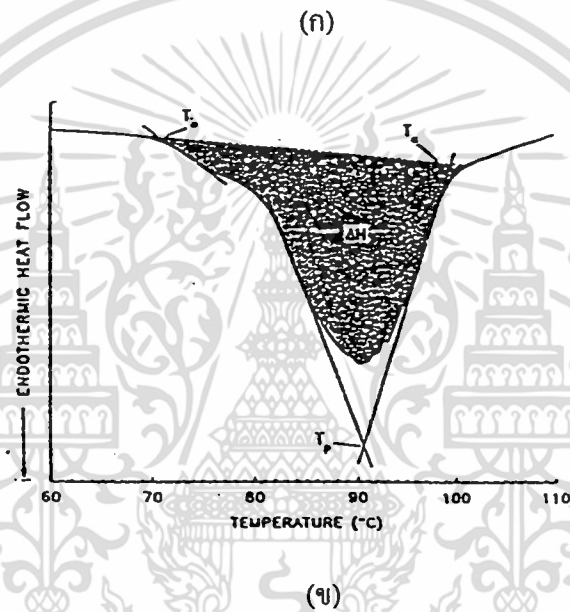
DSC เป็นเครื่องมือที่สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยแสดงผลเป็นกราฟที่มีแกน Y เป็นการไหลของความร้อน (Heat flow) และแกน X เป็นค่าอุณหภูมิ หลักการทำงานของ DSC คือให้พลังงานความร้อนกับตัวอย่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่บรรจุอยู่ในจานอลูมิเนียม (Sample pan) เปรียบเทียบกับจานอลูมิเนียมอ้างอิง (Reference pan) เครื่องจะอ่านค่าพลังงานที่แตกต่างกันออกมาเป็นกราฟดูดความร้อน (DSC endotherm peak) และคำนวณพลังงานหรือความร้อนที่ใช้จากพื้นที่ใต้กราฟดูดความร้อน ได้ค่าเอนทาลปี ( $\Delta H$ ) มีหน่วยเป็น จูลต่อกรัม (J/g) แสดงดังภาพที่ 2.14 ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างควรมีลักษณะเป็นแผ่นบาง พิล์มหรืออนุภาคขนาดเล็ก เพราะจานอลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างมีขนาดเล็ก บรรจุตัวอย่างได้เพียง 10-20 ไมโครกรัม ตัวอย่างที่มีความบริสุทธิ์ปริมาณของตัวอย่างไม่มีผลต่อการทดลอง สำหรับการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ตัวอย่างควรมีการกระจายตัวหรือละลายในน้ำได้ดี พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างจานอลูมิเนียมและตัวอย่างต้องมากพอที่จะขยายได้ และตัวอย่างที่มีน้ำควรปิดฝาให้สนิทเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ และจานอลูมิเนียมที่ใช้ควรสามารถทนความดันภายในได้ถึง 2-3 ความดันบรรยากาศ การให้ความร้อนที่เหมาะสมซึ่งซ้ำพอที่จะเห็นความแตกต่างของพีคที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนได้ มักใช้ในช่วงการให้ความร้อนระหว่าง 1-10°C/นาที (Dollimore, 1997)

การนำเครื่อง DSC มาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชอาศัยหลักการทำงานดังกล่าว เครื่อง DSC จะอ่านค่าพลังงานที่แตกต่างกันออกมาเป็นกราฟดูดความร้อน ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิเริ่มเกิดการหลอมละลายผลึกของสตาร์ชที่เกิดรีโทรกราเดชัน (Onset temperature ;  $T_o$ ) อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (Peak temperature ;  $T_p$ ) และอุณหภูมิสิ้นสุดการหลอมละลายผลึก (Conclusion temperature ;  $T_c$ ) และปริมาณการเกิดรีโทรกราเดชันก็คือ ค่าพลังงานหรือความร้อนที่ใช้ คำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟ ได้ “ค่าเอนทาลปี” มีหน่วยเป็น “จูลต่อกรัม” ซึ่งค่าเอนทาลปี หมายถึง พลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกสตาร์ชที่เกิดรีโทรกราเดชัน โดยใช้เป็นดัชนีบอกค่าการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ช พบว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีค่าเอนทาลปีสูงกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ เพราะต้องใช้พลังงานมากในการทำลายพันธะไฮโดรเจนของผลึกอะไมโลส (Chang and Liu, 1991)



- ① Measuring cell lid
- ② Aluminum sample crucible
- ③ Aluminum reference crucible
- ④ Furnace
- ⑤ Heat flow to sample crucible
- ⑥ Heat flow to reference crucible
- ⑦ Heating coil



ภาพที่ 2.14 หลักการทำงานของเครื่อง DSC (ก) และ DSC endotherm peak ของข้าวเจ้าสุก (ข)  
ที่มา : Dollimore (1997) ; Marshall (1993)

การศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชโดยใช้เครื่อง DSC นั้นได้มีการศึกษามาเป็นเวลานานแล้ว อาทิเช่น Chang ana Liu (1991) ศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของแป้งข้าวเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าแป้งข้าวจะเกิดรีโทรกราเดชันสูงสุดเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ  $-4^{\circ}\text{C}$  Lima and Singh (1993) ศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวสุก พบว่าข้าวที่มีขนาดเมล็ดคยาจะมีอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันสูงกว่าข้าวที่มีเมล็ดขนาดปานกลางและสั้น และ Perdon *et al.* (1999) ศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวสุกที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกัน พบว่าข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันสูงและเร็วกว่าข้าวที่มีปริมาณปานกลางและต่ำ เป็นต้น

Lima and Singh (1993) วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าเอนทัลปี การเกิดรีโทรกราเดชันเมื่อวัดด้วย DSC เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสใน ระหว่างการเก็บรักษาเมื่อวัดด้วยเครื่องอินสตรอน โดยใช้วิธี OTMS และ Back Extrusion พบว่า การวัดเนื้อสัมผัสด้วยวิธี OTMS มีความสัมพันธ์อย่างสูงกับการวัดเนื้อสัมผัสด้วยวิธี Back Extrusion โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.978 ในขณะที่ค่าเอนทัลปีการเกิดรีโทรกราเดชันเมื่อวัดด้วย DSC มีความสัมพันธ์ปานกลางกับการวัดเนื้อสัมผัสด้วยวิธี OTMS และ Back Extrusion โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.716 และ 0.788 ตามลำดับ

Kim et al. (1997) เปรียบเทียบวิธีการวัดการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชระหว่างวิธี DSC และ  $\alpha$ -amylase-iodine ของเจลดสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 50 เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ เยือกแข็ง อุณหภูมิแช่เย็น และอุณหภูมิห้อง นาน 6 วัน พบว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 ค่า รีโทรกราเดชันที่ได้จากการวัดทั้ง 2 วิธี จะใกล้เคียงกันแต่ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 การวัดด้วย วิธี DSC จะวัดได้ปริมาณที่มากกว่าการวัดด้วยเอนไซม์ แต่ทั้งนี้ไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจนถึง วิธีการที่ดีที่สุดได้เนื่องจากข้อจำกัดของวิธีการศึกษาที่แตกต่างกัน แต่สามารถยืนยันถึงความ สามารถในการประยุกต์ใช้เครื่อง DSC ในการวัดการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชได้

การวัดการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชหรือแป้งโดยใช้เครื่อง DSC สามารถทำได้โดย นำแป้งดิบไปหาค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาตินในเซชัน (เอนทัลปี,  $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ ) แล้วนำแป้งที่ ผ่านเจลาตินในเซชันนี้ไปบ่มไว้ในสภาวะที่กำหนดเพื่อให้เกิดรีโทรกราเดชันโดยใช้อุณหภูมิต่าง ๆ กัน เช่น  $-20^{\circ}\text{C}$   $4^{\circ}\text{C}$  และ  $25^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลาต่างกันตั้งแต่ 1 ถึง 21 วัน แล้วนำแป้งที่เกิดรีโทรกราเดชันแล้วไปตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC อีกครั้ง บันทึกค่าพลังงานที่ใช้ (เอนทัลปี,  $\Delta H_{\text{retrogradation}}$ ) ร้อยละของการเกิดรีโทรกราเดชันสามารถหาได้จากอัตราส่วนของเอนทัลปีของแป้งรีโทรกราเดชันต่อเอนทัลปีของแป้งเจลาตินในเซชัน (Jacobson and BeMiller, 1998) คือ

$$\text{รีโทรกราเดชัน (ร้อยละ)} = \frac{\Delta H_{\text{retrogradation}}}{\Delta H_{\text{gelatinization}}} \times 100$$

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.1 วัสดุดิบ และอุปกรณ์

#### 3.1.1 วัสดุดิบ

3.1.1.1 ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี เก็บเกี่ยววันที่ 2 ธันวาคม 2542 นำมาทดลองในเดือนมิถุนายน 2543 ข้าวเปลือกมีปริมาณความชื้นร้อยละ 12.11 นำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  จนกว่าจะนำมาทดลอง

3.1.1.2 ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี60 ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี เก็บเกี่ยววันที่ 21 ตุลาคม 2542 นำมาทดลองในเดือนเมษายน 2543 ข้าวเปลือกมีความชื้นร้อยละ 14.70 และนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  จนกว่าจะนำมาทดลอง

3.1.1.3 ข้าวพันธุ์ข้าวตาแห้ง ได้รับความอนุเคราะห์จากสถานีทดลองพันธุ์ข้าวลพบุรี จ. ลพบุรี เก็บเกี่ยววันที่ 25 ธันวาคม 2542 นำมาทดลองในเดือนมิถุนายน 2543 ข้าวเปลือกมีปริมาณความชื้นร้อยละ 12.51 และนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  จนกว่าจะนำมาทดลอง

#### 3.1.2 อุปกรณ์

##### 3.1.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมข้าวเจ้าสุกและการเก็บรักษา

- |                                  |                    |         |
|----------------------------------|--------------------|---------|
| 1) หม้อหุงข้าวไฟฟ้าอัตโนมัติ     | TOSHIBA, RC - 126E | ญี่ปุ่น |
| 2) ตู้เย็นควบคุมอุณหภูมิ         | Sanyo              | ไทย     |
| 3) เครื่องปิดผนึกสุญญากาศ        | Multivac           | ไทย     |
| 4) เครื่องชั่งชนิดละเอียด        | Mettler AE50       | ญี่ปุ่น |
| 5) เครื่องกะเทาะเปลือก           | AS-200             | ญี่ปุ่น |
| 6) เครื่องขัดสีเมล็ดข้าว         | PM-400             | ญี่ปุ่น |
| 7) เครื่องแยกเมล็ดข้าว           |                    |         |
| 8) ถ้วยพลาสติก                   |                    |         |
| 9) ถุงโพลีเอทิลีน (polyethylene) |                    |         |

### 3.1.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชัน และลักษณะเนื้อสัมผัส

- |  |                    |         |
|--|--------------------|---------|
| 1) เครื่องหาอัตราการเกิดรีโทรกราเดชัน<br>(Differential Scanning Calorimeter) | Shimadzu (DSC- 50) | ญี่ปุ่น |
| 2) เครื่องวัดเนื้อสัมผัสอาหาร<br>(Texture Analyser)                          | TA – XT2i          | อังกฤษ  |
| 3) ไมโครเวฟ  | Sharp,R - 4A68     | ไทย     |
| 4) อ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)                                    | Memmert            | เยอรมัน |
| 5) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)  | Memmert            | เยอรมัน |
| 6) โกร่ง   |                    |         |

### 3.1.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโดส

- |  |                    |         |
|--|--------------------|---------|
| 1) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง<br>(Spectrophotometer) | Shimadzu,UV – 1601 | ญี่ปุ่น |
| 2) เครื่องชั่งชนิดละเอียด                            | Mettler AE50       | ญี่ปุ่น |
| 3) เครื่องแก้วต่างๆ                                  |                    |         |

### 3.1.2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลลิตินเซชัน

- |  |                    |         |
|--|--------------------|---------|
| 1) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง<br>(Spectrophotometer) | Shimadzu,UV – 1601 | ญี่ปุ่น |
| 2) หม้อนึ่งภายใต้ความดันไอ (Autoclave)               | SS-320             | ญี่ปุ่น |
| 3) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)                        | Memmert            | เยอรมัน |
| 4) เครื่องบด (Restch Miller)                         | F.Kurt Retsch,GmbH | เยอรมัน |
| 5) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)                   | T-42K              | อิตาลี  |
| 6) Vibration mixer                                   | K-550-GE           | อเมริกา |
| 7) เครื่องแก้วต่างๆ                                  |                    |         |

### 3.1.2.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส

- 1) ถ้วยแก้วขนาดเล็ก
- 2) ช้อน ส้อมพลาสติก
- 3) แก้วน้ำพลาสติก
- 4) แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส

### 3.2 สถานที่ดำเนินงาน

3.2.1 ห้องปฏิบัติการภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.2.2 ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.2.3 ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### 3.3 ระยะเวลาดำเนินงาน

เดือนตุลาคม 2542-กันยายน 2543

### 3.4 วิธีการดำเนินงาน

#### 3.4.1 การเก็บรักษาข้าวเปลือก

นำข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 สุพรรณบุรี60 และขาวตาแห้ง หลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  นาน 6 เดือน มาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 3 ชั่วโมง จึงนำมากะเทาะเปลือก และจัดสีที่ระดับความเร็วเท่ากับ 4 จากนั้นนำมาแยกข้าวเต็มเมล็ดออกจากข้าวหักด้วยเครื่องแยกเมล็ด วิเคราะห์หาปริมาณความชื้น (AOAC, 1995) ระดับการจัดสี (Datta, 1978) และปริมาณอะไมโลส (Juliano, 1971)

#### 3.4.2 การเตรียมข้าวเจ้าสุกและการเก็บรักษา

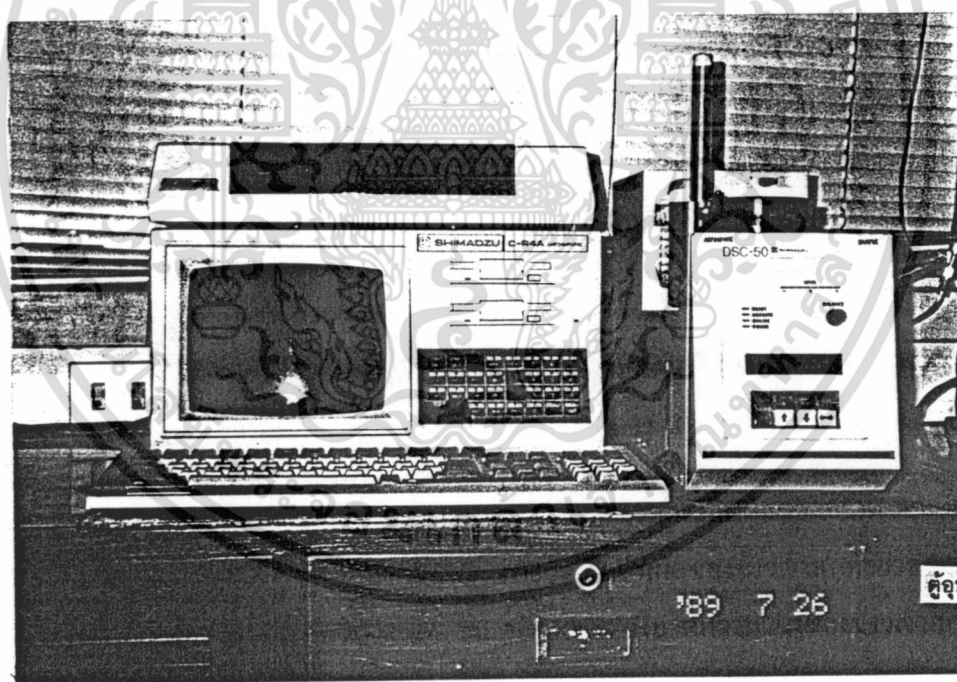
นำข้าวสารปริมาณ 2,000 กรัม ที่มีเมล็ดสมบูรณ์มาล้างด้วยน้ำกลั่น รินน้ำทิ้งผ่านตะแกรง และหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าอัตโนมัติ อัตราส่วนของข้าวสารต่อน้ำที่ใช้ในการหุงคัดแปลงจากวิธีของงามชื่น คงเสรี (2536) จนกระทั่งสวิตซ์ตัดและตั้งทิ้งไว้ 10 นาที

นำข้าวเจ้าสุกที่ได้จากการหุง เฉพาะตรงส่วนกลางหม้อมาผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้เย็น บรรจุในถ้วยพลาสติก ปิดให้สนิท และนำมาเก็บในถุงโพลีเอทิลีนโดยปิดผนึกภายใต้สภาวะสุญญากาศ จากนั้นนำมาเก็บที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  นาน 7 วัน สำหรับตัวอย่างข้าวสุกที่แช่แข็งก่อนการวิเคราะห์ต้องนำมาละลาย (Thawing) ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ที่อุณหภูมิ  $26^{\circ}\text{C}$  นาน 2 ชั่วโมง

3.4.3 การศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกด้วย DSC (Lima and Singh, 1993 ; Kim *et al.*, 1997)

นำตัวอย่างข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาบดจนมีลักษณะคล้ายแป้งเปียก (Homogeneous rice paste) จากนั้นนำตัวอย่างมาประมาณ 2.5 มิลลิกรัม ใส่ในถ้วยอลูมิเนียม หยคน้ำลงไปในอัตราส่วนแป้งต่อน้ำเท่ากับ 1:2.5 หรือให้ความชื้นประมาณร้อยละ 70 ปิดฝาให้สนิทนำไปวางไว้ภายในเครื่อง DSC เปรียบเทียบกับถ้วยอลูมิเนียมอ้างอิงที่ปิดฝาสนิทแล้ว ให้ความร้อนกับตัวอย่างด้วยอัตราคงที่  $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$  จนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $20-80^{\circ}\text{C}$  เครื่องจะอ่านค่าพลังงานที่แตกต่างกันออกมาในรูปของกราฟดูความร้อน และคำนวณพลังงานหรือความร้อนที่ใช้จากพื้นที่ใต้กราฟดูความร้อนได้ “ค่าเอนทาลปี” มีหน่วยเป็น “จูลต่อกรัม” (J/g)

ทำการวิเคราะห์การเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกในวันที่ 0 1 3 5 และ 7 วันของการเก็บที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกเมื่อเก็บรักษาในสภาวะต่าง ๆ กัน ทำการทดลอง 2 ซ้ำ



ภาพที่ 3.1 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (Shimadzu ; DSC-50)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 การศึกษาการเกิดเจลลาติโนเซชันของข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชัน

(Birch and Priestley, 1973)

นำข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชันแล้วมาละลายน้ำแข็งที่อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 26°C นาน 20 นาที จากนั้นนำมาอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 58°C นาน 2 ชั่วโมง บดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรง (Sieve) ขนาด 200 เมช

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่บดเป็นผง 0.2 กรัม เติมน้ำกลั่น 98 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 นอร์มัล จำนวน 32 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 5 นาที นำน้ำปั่นไปหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) นำส่วนใส 1 มิลลิลิตร มาเติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล จำนวน 0.4 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรให้ได้ 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายไอโอดีน (Iodine reagent) จำนวน 0.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร โดยเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน (Reagent blank)

การทำกราฟมาตรฐาน นำตัวอย่างข้าวเจ้าห้อนึ่งความดันไอที่ 15 Psi เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ข้าวมีอัตราการเกิดเจลลาติโนเซชันเท่ากับร้อยละ 100 แล้วทำให้แห้งโดยอบในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 58°C หลังจากนั้นนำข้าวมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช แล้วจึงนำไปผสมกับข้าวดิบที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช เพื่อให้ได้อัตราการเกิดเจลลาติโนเซชันเป็นร้อยละ 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 และ 100 จากนั้นเติมสารเคมีและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงตามวิธีข้างต้น นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาเขียนกราฟมาตรฐาน

ทำการวิเคราะห์ในวัน 0 1 3 5 และ 7 วันของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่าง ๆ เช่นเดียวกันทำการทดลอง 2 ซ้ำ

### 3.4.5 การศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชันด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyser) (ดัดแปลงจาก Anonymous, 1994)

#### 3.4.5.1 การวัดเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกด้วยวิธี Back Extrusion

การวัดเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกด้วยวิธี Back Extrusion ใช้เครื่อง Texture Analyser รุ่น TA-XT2i เพื่อวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุก โดยบรรจุข้าวเจ้าสุกจำนวน 15 กรัม ลงใน Test cell รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร อัดข้าวเจ้าสุกด้วยท่อพลาสติกน้ำหนัก 100 กรัม นาน 30 วินาที ใช้หัววัดแผ่นขนานรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ซึ่งต่อกับ Load cell ของเครื่อง ความเร็วของหัววัดที่เคลื่อนที่ลงมาก่อนสัมผัสข้าวเจ้าสุก (Pre-test speed) 1.0 มิลลิเมตร/วินาที ความเร็วของหัววัดขณะเคลื่อนที่ลงในเนื้อข้าวเจ้าสุก (Test speed) 1.0 มิลลิเมตร/วินาที ความเร็วของหัววัดขณะเคลื่อนที่ขึ้นจากข้าวเจ้าสุก (Post-test speed) 10 มิลลิเมตร/วินาที และระยะทางที่หัววัดเคลื่อนที่ลงในเนื้อข้าวเจ้าสุกเท่ากับร้อยละ 50 (50% Strain) ในการวัดแต่ละตัวอย่างทำการทดลอง 10 ซ้ำ ค่าแรงที่อ่านได้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยเป็น “กิโลกรัม” แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของแรงสูงสุดที่ตกลงบนข้าวเจ้าสุก (Average maximum peak force) การวัดความแข็งและตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุก แสดงดังภาพที่ 3.2 และ 3.3

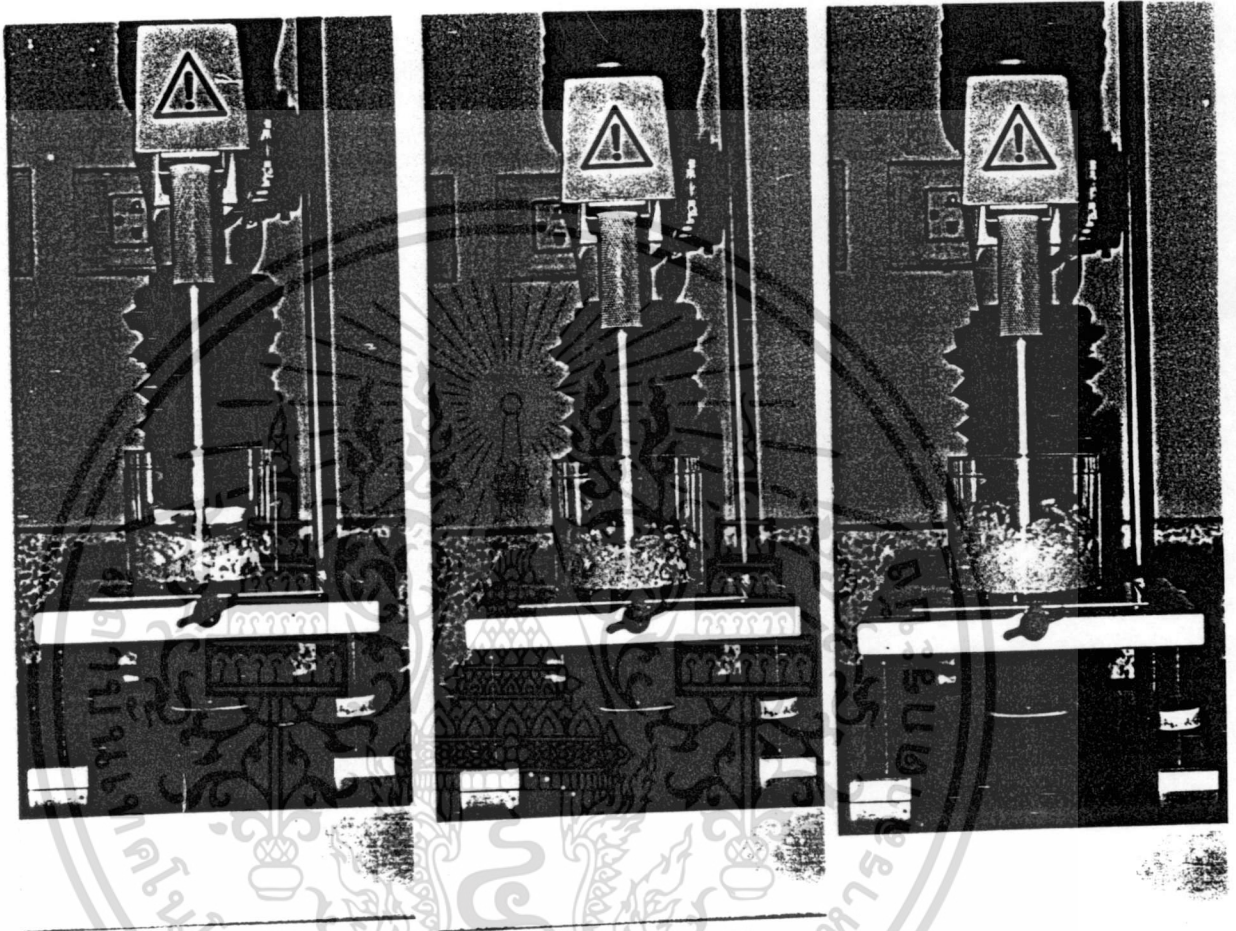
วัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกในวัน 0 1 3 5 และ 7 วันของการเก็บที่ อุณหภูมิต่าง ๆ เช่นเดียวกับการศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชัน ในแต่ละการทดลองทำการทดลอง 2 ซ้ำ และวัดตัวอย่างละ 10 ซ้ำ

#### 3.4.5.2 การวัดเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกด้วยวิธี Texture Profile Analysis

การศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกใช้ Texture Analyser รุ่น TA – XT2i ขนาดรับน้ำหนัก 5 กิโลกรัม และอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม ใช้โปรแกรม Texture Profile Analysis (TPA) โดยทดสอบความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Stickiness)

การวัดเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกทำได้โดยเลือกเมล็ดข้าวเจ้าสุก 3 เมล็ด ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน รูปร่างสม่ำเสมอ เมล็ดข้าวสุกเต็มเมล็ด สมบูรณ์ ไม่มีรอยร้าวมาวางเรียงกันได้หัววัด แผ่นขนานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ซึ่งต่อกับ Load cell ของเครื่อง ความเร็วของหัววัดที่เคลื่อนที่ลงก่อนสัมผัสข้าวเจ้าสุก (Pre-test speed) 0.5 มิลลิเมตร/นาที ความเร็วของหัววัดขณะที่เคลื่อนที่ลงในเนื้อข้าวเจ้าสุก (Test-speed) 0.5 มิลลิเมตร/วินาที ความเร็วของหัววัดขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นจากข้าวเจ้าสุก (Post-test speed) 10 มิลลิเมตร/วินาที และระยะทางที่หัววัดเคลื่อนที่ลงลงในเนื้อข้าวเจ้าสุกเท่ากับร้อยละ 90 (90% Strain) เพื่อกดเมล็ดข้าว และเพื่อให้มีพื้นที่ผิวกว้าง สำหรับการวัดความเหนียว เลือกการทดสอบแบบ Return to start โดยมีระยะพักเพียง 2 วินาที ระหว่าง Texture Profile Analysis 2 รอบ การวัดความแข็งและตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุกแสดงดังภาพที่ 3.4 และ 3.5

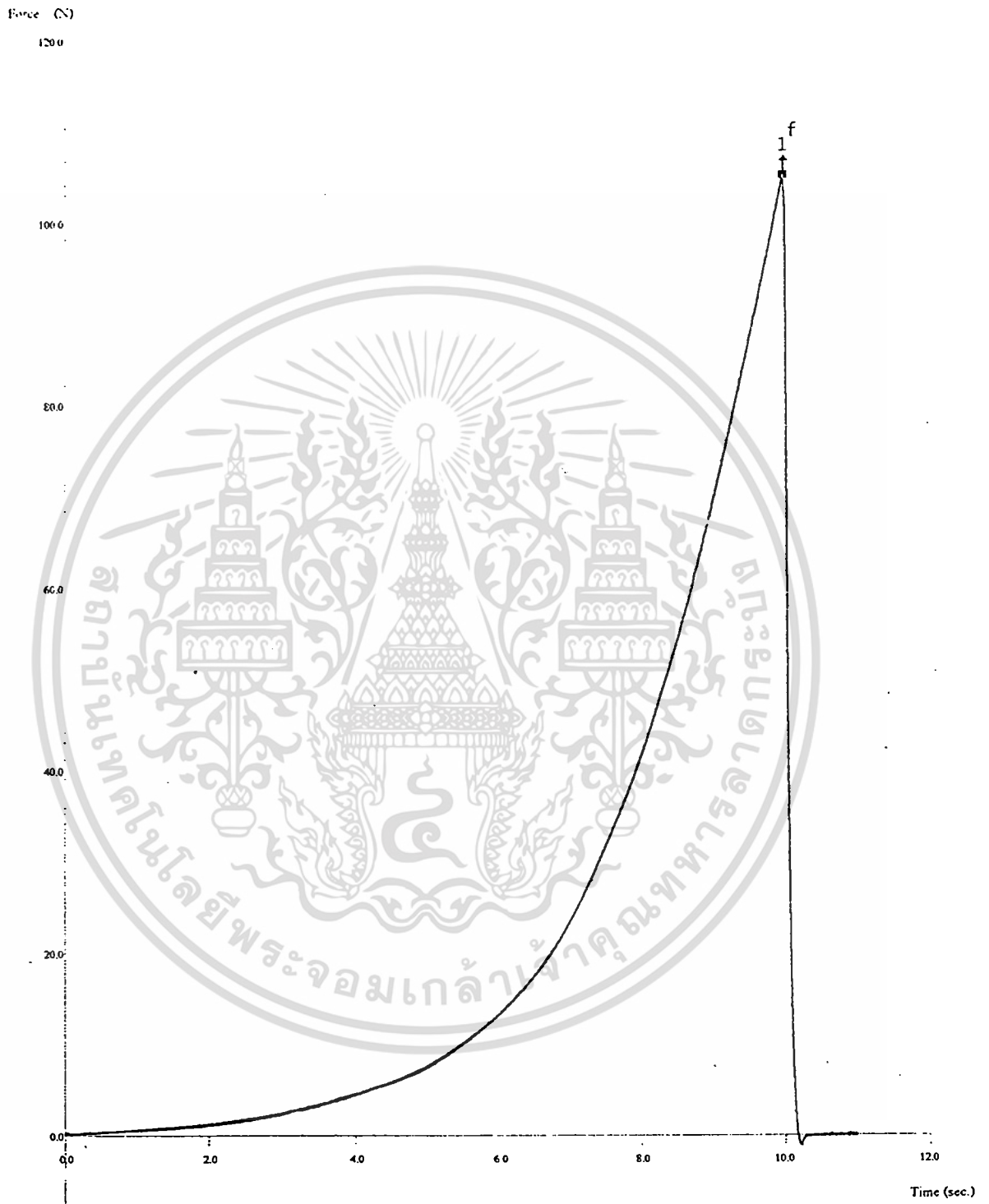
วัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกแต่ละตัวอย่างจากการหุงแต่ละครั้ง ในวัน 0 1 3 5 และ 7 วัน ของการเก็บที่อุณหภูมิต่าง ๆ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ และวัดตัวอย่างละ 10 ซ้ำ ในแต่ละตัวอย่างค่าแรงที่อ่านได้มีหน่วยเป็น “กิโลกรัม” นำมาหาค่าเฉลี่ยของแรงสูงสุดที่ตกลงบนข้าวเจ้าสุก โดยค่าในเชิงบวก หมายถึง “ค่าความแข็ง” และค่าในเชิงลบ หมายถึง “ค่าความเหนียว”



ภาพที่ 3.2 การวัดความแข็งของเมล็ดข้าวเจ้าสุกวิธี Back Extrusion (BE) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyser) รุ่น TA-XT2i

TA-XT2i Settings:	Mode	Measure Force in Compression
	Option	Return To Start
	Pre-Test Speed	1.0 mm/s
	Test Speed	1.0 mm/s
	Post-test Speed	10.0 mm/s
	Distance	50% strain
	Trigger Type	Auto-10 g
	Data Acquisition Rate	400 pps

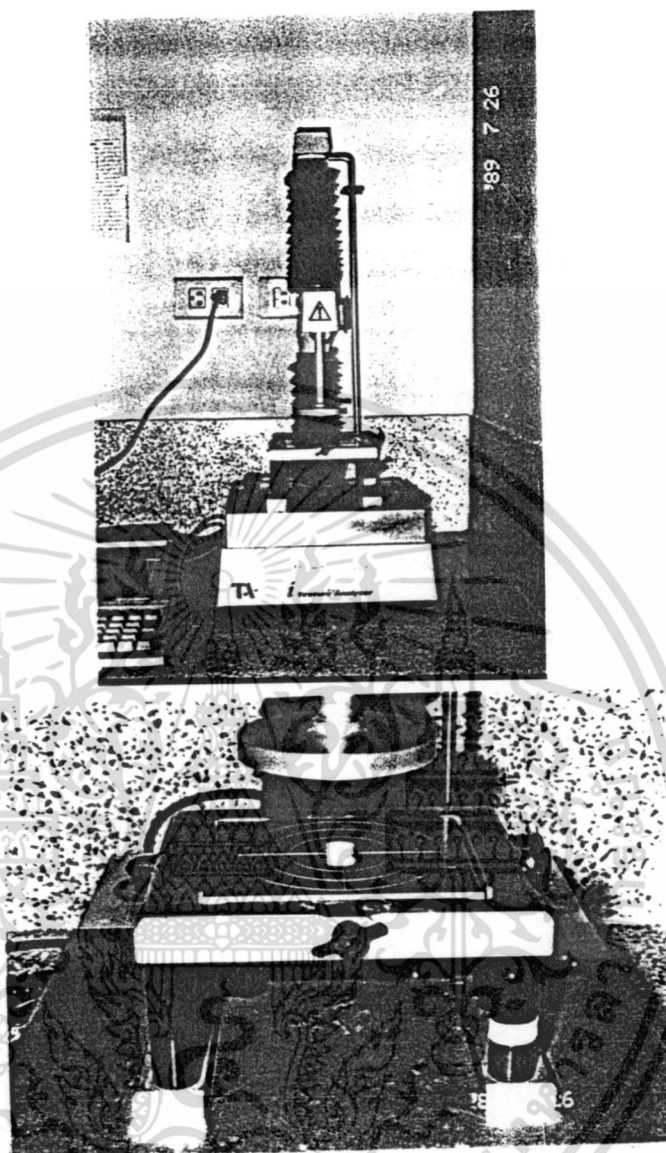
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเมื่อละเมิดลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวัดความแข็งแรงของข้อเท้าผู้สูงอายุเมื่อวัดด้วยวิธี Back Extrusion

(1 = ค่าแรงสูงสุดหรือค่าความแข็งแรงของข้อเท้าผู้สูงอายุ)

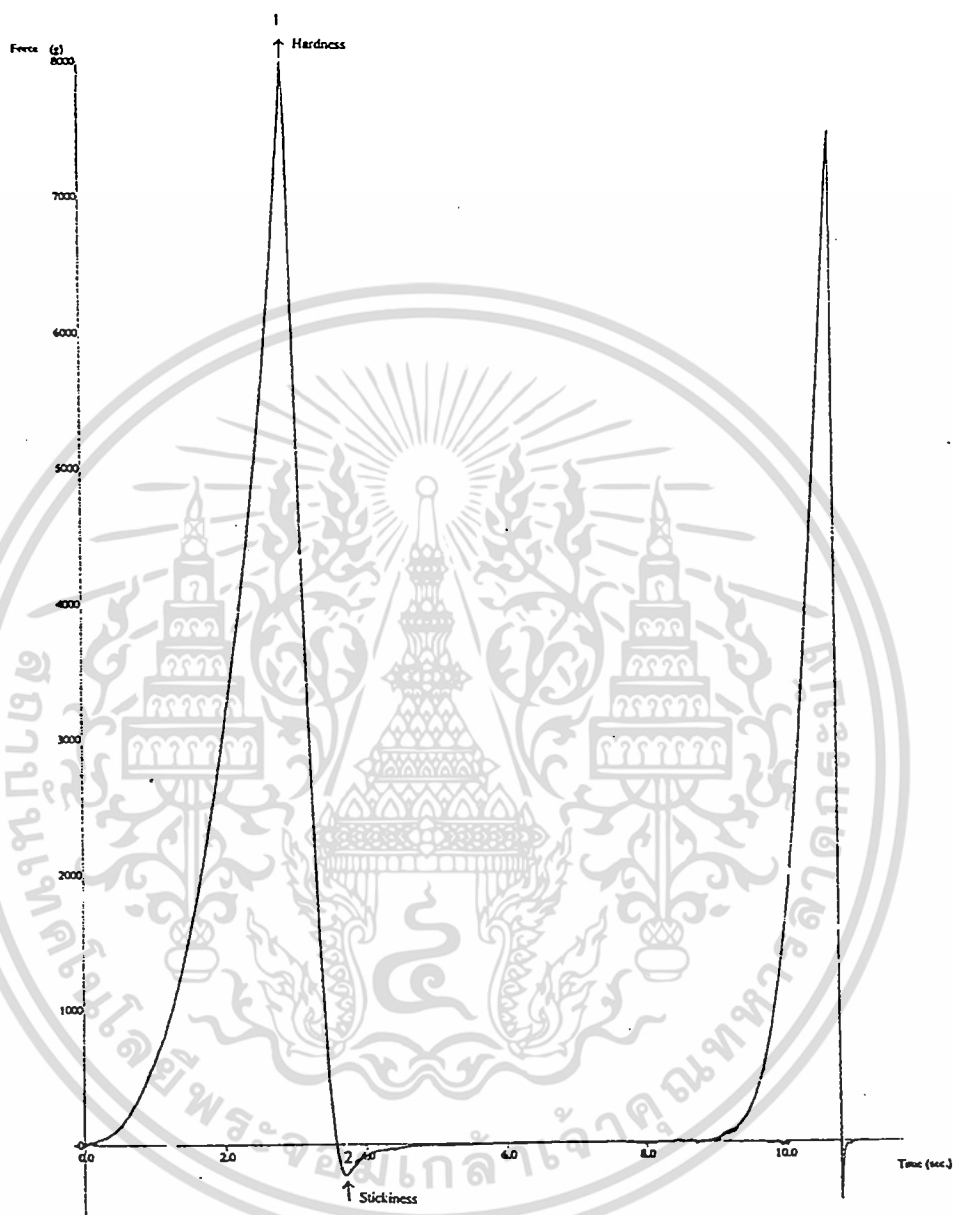
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 การวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุกวิี Texture Profile Analysis (TPA) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyser) รุ่น TA-XT2i

TA-XT2i Settings:	Mode	Measure Force in Compression
	Option	Return To Start
	Pre-Test Speed	0.5 mm/s
	Test Speed	0.5 mm/s
	Post-test Speed	10.0 mm/s
	Trigger Type	Auto-10 g
	Data Acquisition Rate	400 pps

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวัดความแข็งและความเหนียวเมื่อวัดด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) (ค่าในเชิงบวก (1) หมายถึง ค่าความแข็ง และค่าในเชิงลบ (2) หมายถึง ค่าความเหนียว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.6 การลดการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเก็บที่สภาวะต่าง ๆ โดยใช้ไมโครเวฟและไอน้ำ ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส

นำข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชันมาละลายน้ำแข็งที่อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 26°C นาน 20 นาที จากนั้นนำข้าวเจ้าสุกจำนวน 1,000 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร สเปรย์น้ำ ปิดผนึกโดยใช้ฟิล์มพลาสติกที่สามารถอุ่นโดยใช้ไมโครเวฟได้ และอุ่นด้วยไมโครเวฟโดยใช้กำลังไฟสูงสุด 900 วัตต์ อุ่นประมาณ 4 นาที หรืออุณหภูมิใจกลางข้าวเจ้าสุกเท่ากับ  $70 \pm 5^{\circ}\text{C}$  จากนั้นจึงนำข้าวเจ้าสุกมาวัดลักษณะเนื้อสัมผัสตามวิธีข้อ 3.4.5 และทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสตามวิธีข้อ 3.4.7

สำหรับการอุ่นโดยใช้ไอน้ำ นำข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชันมาละลายน้ำแข็งที่อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 26°C นาน 20 นาที เช่นเดียวกัน จากนั้นนำข้าวเจ้าสุกจำนวน 1,000 กรัม มาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร สเปรย์น้ำ ปิดผนึกโดยใช้ฟิล์มพลาสติก นำตัวอย่างมาอุ่นประมาณ 12 นาที หรืออุณหภูมิใจกลางข้าวเจ้าสุกเท่ากับ  $70 \pm 5^{\circ}\text{C}$  และนำมาวัดลักษณะเนื้อสัมผัสตามวิธีข้อ 3.4.5 และ ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสตามวิธีข้อ 3.4.7

ทำการวิเคราะห์ในวันที่ 2 4 และ 6 วันของการเก็บที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชันก่อนและหลังการอุ่น เมื่อใช้วิธีการอุ่นข้าวเจ้าสุกแตกต่างกัน

### 3.4.7 การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส (ดัดแปลงจาก Lyon *et al.*, 1999)

การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส ทำได้โดยนำข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชันมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ โดยใช้ข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการเก็บรักษาเป็นตัวอย่างเปรียบเทียบ ใช้ผู้ทดสอบชิม จำนวน 20 คน โดยเป็นกลุ่มนักศึกษาปริญญาตรีและโทของภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้การทดสอบแบบ Scoring Test โดยแบบทดสอบที่ใช้เป็นแบบ Descriptive Scoring ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดคุณภาพในแต่ละคะแนน โดยให้ผู้ทดสอบชิมประเมินคุณภาพทางด้านด้านลักษณะปรากฏ ความแข็ง ความเหนียว และความชอบรวม ของข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ

เตรียมตัวอย่างโดยใส่ตัวอย่างข้าวเจ้าสุกในถ้วยแก้วขนาดเล็กประมาณ 20 กรัม เติรฟตัวอย่างให้ผู้ทดสอบชิมครั้งละ 4 ตัวอย่างรวมทั้งตัวอย่างควบคุม ตัวอย่างข้าวเจ้าสุกควรมีอุณหภูมิประมาณ  $50-55^{\circ}\text{C}$  ทำการทดสอบในช่วงเวลา 10.00–11.30 น. หรือ 14.00–15.30 น. บ้วนปากก่อนชิมตัวอย่างทุกครั้งด้วยน้ำอุ่น โดยทำการวิเคราะห์ในวันที่ 2 4 และ 6 วันของการเก็บที่อุณหภูมิต่าง ๆ

การทดลองในขั้นตอนนี้วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ การวิเคราะห์ผลทำได้โดยนำค่าตัวเลขที่ได้ไปวิเคราะห์สถิติโดย ANOVA เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

### 3.5 การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษากาการเกิดโรโทรกราเดชัน ระดับการเกิดเจลาตินเซชัน และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกที่เกิดโรโทรกราเดชันแล้วนั้น วางแผนการทดลองแบบ Factorial in Randomized Complete Block Design (RCBD) ขนาด 2x5 โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโรโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุก 2 ปัจจัย คือ

ปัจจัยที่ 1 อุณหภูมิการเก็บรักษา 2 ระดับ คือ -20 และ 5°C

ปัจจัยที่ 2 ระยะเวลาเก็บรักษา 5 ระดับคือ 0 1 3 5 และ 7 วัน

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Statistical Package for the Social Science (SPSS) Version 7.5 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุ (Multiple regression analysis) ด้วย Statgraphic Plus Version 3.0

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 คุณภาพการสีและอัตราส่วนของข้าวสารต่อน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าว

##### 4.1.1 คุณภาพการสีและปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวทั้ง 3 พันธุ์

คุณภาพการสี หมายถึง ปริมาณต้นข้าว (Head rice) หรือ ข้าวเต็มเมล็ดที่ได้จากกระบวนการสี โดยแสดงผลในรูปร้อยละ (Datta, 1978) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี60 และข้าวพันธุ์ขาวตาแห้ง มีระดับการขัดสีประมาณร้อยละ 32 และปริมาณข้าวเต็มเมล็ดร้อยละ 55-56 โดยเมล็ดข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ จะมีปริมาณความชื้นหลังการเก็บเกี่ยวประมาณร้อยละ 12-14 และเมื่อเก็บรักษานาน 6 เดือน ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ จะลดลงเหลือร้อยละ 10-11

ตารางที่ 4.1 คุณภาพการสีและปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวพันธุ์ต่างๆ

คุณลักษณะ	พันธุ์ข้าว		
	ขาวดอกมะลิ105	สุพรรณบุรี60	ขาวตาแห้ง
ระดับการขัดสี (ร้อยละ)	31.90	31.70	32.00
ปริมาณข้าวเต็มเมล็ด (ร้อยละ)	55.75	56.94	56.66
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)			
ข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว	12.11	14.70	12.51
ข้าวเปลือกเก็บนาน 6 เดือน	10.31	11.53	10.81

โดยปกติเมล็ดข้าวมีคุณสมบัติไฮโกรสโคปิก (Hygroscopic) คือ สามารถดูดความชื้นได้ทั้งก่อนและหลังเก็บเกี่ยว Normand and Marshall (1989) อธิบายว่า การนำเมล็ดข้าวไปเก็บไว้ในบริเวณที่มีความชื้นสูง เมล็ดข้าวจะดูดซึมความชื้นทำให้เซลล์ด้านนอกขยายตัวอย่างรวดเร็ว ในขณะที่เซลล์ที่อยู่ด้านในจะขยายตัวช้ากว่า ลักษณะนี้จะทำให้เกิดความเค้น (Stress) ระหว่างชั้นทั้งสอง ทำให้เกิดการแตกภายในขึ้น ในทางกลับกันถ้านำเมล็ดข้าวไปเก็บไว้ในบริเวณที่มีความชื้นต่ำจะพบว่าเซลล์ที่บริเวณด้านนอกจะหดตัวอย่างรวดเร็วทำให้ความยืดหยุ่นของเซลล์บริเวณดังกล่าวลดลง ในขณะที่เดียวกันก็มีแรงดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากภายในเมล็ดทำให้เกิดรอยแตกขึ้นที่บริเวณผิวของเมล็ดข้าว การเกิดรอยแตกทั้งสองกรณีดังกล่าวจะทำให้เมล็ดข้าวมีความแข็งแรงลดลง และหักได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระหว่างการขัดสี นกขมก เนี้เครื่องขัดสีก็มีผลต่อปริมาณข้าวเต็มเมล็ดด้วยเช่นกัน เนื่องจากเครื่องขัดสีเมล็ดข้าวรุ่น PM-400 เป็นเครื่องขัดสีที่เหมาะสมกับข้าวเจ้าปอนนิกา (Japonica rice) ซึ่งมีเมล็ดป้อมสั้น เมื่อนำมาขัดสีเมล็ดข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ซึ่งเป็นข้าวที่มีเมล็ดเรียวยาวทำให้เมล็ดข้าวหักได้ง่าย ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดจึงต่ำ

ระดับการขัดสีมีผลต่อการเกิดริโทกราเดชันของสคาร์ชเช่นเดียวกัน Lyon *et al.* (1999) เปรียบเทียบเมล็ดข้าวที่มีระดับการขัดสีปกติ คือเมล็ดข้าวที่ได้จากการขัดสีแล้วนำมาวัดด้วย Satake whiteness meter-values จะมีค่าความขาวอยู่ในช่วง  $40 \pm 2$  กับข้าวที่มีระดับการขัดสีสูงที่มีค่าความขาวอยู่ในช่วง  $49 \pm 2$  พบว่าเมล็ดข้าวที่มีระดับการขัดสีสูง องค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวได้แก่ไขมัน โปรตีนจะถูกขัดสีออกไป ทำให้มีปริมาณสคาร์ชและอะไมโลสสูงกว่าข้าวที่มีระดับการขัดสีปกติ แต่มีปริมาณโปรตีนต่ำกว่า ดังนั้นข้าวที่มีระดับการขัดสีสูงจึงมีโอกาสเกิดริโทกราเดชันสูงกว่าข้าวที่มีระดับการขัดสีปกติ ในการทดลองนี้จึงควบคุมระดับการขัดสีให้ใกล้เคียงกันทั้ง 3 พันธุ์ เพื่อให้สามารถใช้เปรียบเทียบกันได้

#### 4.1.2 ปริมาณอะไมโลสและอัตราส่วนของข้าวสารต่อน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าว

เนื่องจากเมล็ดข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกัน ทำให้ต้องการปริมาณน้ำในการหุงข้าวแตกต่างกันด้วย การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าวมีความสัมพันธ์กับปริมาณอะไมโลสของเมล็ดข้าวแต่ละพันธุ์ เพราะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวสุกมีคุณภาพแตกต่างกัน การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าวคำนวณได้จากสมการของงามซัน คองเสรี (2536) คือ  $W = 0.329 + 0.089A$  โดย W คือ อัตราส่วนของน้ำหุงต้มที่เหมาะสม และ A คือ ปริมาณอะไมโลสเป็นร้อยละ

ตารางที่ 4.2 ปริมาณอะไมโลสและอัตราส่วนของข้าวสารต่อน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าว

พันธุ์ข้าว	ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละ)	อัตราส่วนระหว่างข้าวสาร : น้ำ
ขาวดอกมะลิ105	$15.12 \pm 0.12$	1:1.5
สุพรรณบุรี60	$22.90 \pm 0.07$	1:2.1
ขาวตาแห้ง	$29.42 \pm 0.50$	1:2.5

ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 สุพรรณบุรี60 และขาวตาแห้งมีปริมาณอะไมโลสร้อยละ  $15.12 \pm 0.12$   $22.90 \pm 0.07$  และ  $29.42 \pm 0.50$  และมีอัตราส่วนของข้าวสารต่อน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าวจากการคำนวณตามสมการดังกล่าวเท่ากับ 1:1.6 1:2.3 และ 1:2.9 ตามลำดับ เมื่อนำอัตราส่วนนี้มาทดลองหุงข้าว พบว่าข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ มีลักษณะและ เมล็ดข้าวมีรอยแตกและนุ่มมากเกินไป ดังนั้นในการทดลองจึงลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงข้าว และจากการทดลองใช้ปริมาณน้ำลดลง พบว่าข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบเขียวหรือเห็นต้นฉบับนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 ใช้ปริมาณน้ำในการหุงข้าวน้อยที่สุดเนื่องจากเป็นข้าวชนิดอะไมโลสต่ำ อัตราส่วนระหว่างข้าวสารต่อน้ำที่เหมาะสมเท่ากับ 1:1.5 เมล็ดข้าวเจ้าสุกจะมีลักษณะเรียวยาว เนื้อสัมผัสนุ่ม และมีกลิ่นหอม เมื่อทดลองใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่านี้เมล็ดข้าวเจ้าสุกจะมีเนื้อสัมผัสแข็งและแข็ง

ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี60 จัดเป็นข้าวชนิดอะไมโลสปานกลาง ใช้ปริมาณน้ำในการหุงข้าวมากกว่าข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 อัตราส่วนระหว่างข้าวสารต่อน้ำที่เหมาะสมเท่ากับ 1:2.1 เมื่อหุงแล้วจะได้ข้าวสุกที่มีเนื้อสัมผัสค่อนข้างร่วน ลักษณะเมล็ดขาว เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพข้าวสุกเมื่อทดลองหุงด้วยอัตราส่วนระหว่างข้าวสารต่อน้ำเท่ากับ 1:2.3 ตามที่คำนวณจากสมการ พบว่าเมล็ดข้าวมีรอยแตก และมีลักษณะแฉะ ในขณะที่ข้าวพันธุ์ขาวตาแห้งเป็นข้าวชนิดอะไมโลสสูง ใช้ปริมาณน้ำในการหุงข้าวมากกว่าข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 และข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี60 อัตราส่วนระหว่างข้าวสารต่อน้ำที่เหมาะสมเท่ากับ 1:2.5 ข้าวสุกที่ได้จะมีเนื้อสัมผัสร่วนแข็ง ลักษณะเมล็ดขาว พองตัวมากเนื่องจากใช้น้ำในการหุงข้าวมาก ไม่มีกลิ่นหอม เมื่อทดลองหุงด้วยอัตราส่วนระหว่างข้าวสารต่อน้ำเท่ากับ 1:2.9 ตามที่คำนวณได้จากสมการ พบว่าเมล็ดข้าวมีรอยแตกและขนาดเมล็ดข้าวสุกใหญ่ขึ้น แต่ถ้าใช้ปริมาณน้ำน้อยลงเมล็ดข้าวสุกทั้ง 2 พันธุ์ จะมีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งมาก อัตราส่วนข้าวสารต่อน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า อยู่ในเกณฑ์ที่ Juliano (1965) สรุปไว้ว่าข้าวอะไมโลสต่ำมีอัตราส่วนระหว่างข้าวสารต่อน้ำเท่ากับ 1.2-1.7 เท่า และข้าวอะไมโลสปานกลางและสูงเท่ากับ 1.7-2.5 เท่า

#### 4.2 ปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชัน

การหาปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชัน พบว่าพันธุ์ข้าว อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.1 ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 สุพรรณบุรี60 และขาวตาแห้งที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชันจะมีปริมาณความชื้นต่ำกว่าข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา เนื่องจากในระหว่างการเกิดรีโทรกราเดชันเจลสตาซ์ของข้าวเจ้าสุกจะมีน้ำซึมออกมาและแยกออกจากเจลสตาซ์ ซึ่งสังเกตได้จากหยดน้ำที่พบบนถุงโพลีเอทิลีน ทำให้ปริมาณความชื้นในข้าวเจ้าสุกลดลง

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 มีปริมาณความชื้นสูงที่สุด เพราะว่ามีปริมาณน้ำที่แยกออกจากเจลข้าวเจ้าสุกต่ำที่สุด รองลงมาคือข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 และขาวตาแห้ง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Zheng and Sosulski (1998) พบว่าเจลสตาซ์ข้าวเหนียวมีปริมาณน้ำที่แยกออกมาจากเจลสตาซ์ (Expelled water) ต่ำมากประมาณร้อยละ 1.2-2.6 ในขณะที่เจลสตาซ์ที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีปริมาณน้ำที่แยกออกมาจากเจลสตาซ์ประมาณร้อยละ 60-65 ในระหว่างการแช่เย็นและการละลายน้ำแข็ง (Freeze-thaw) โดยปกติการเกิดผลึกหรือการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาซ์จะเกิดขึ้นเมื่อเจลสตาซ์มี

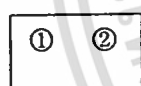
ปริมาณน้ำร้อยละ 45-50 (Eliasson and Gudmunsson, 1996) จากตารางที่ 4.3 พบว่าข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 ไม่ผ่านการใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันธุ์ เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  จะมีปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 40-70 ซึ่งทำให้  
 เจลสตาร์ชของข้าวเจ้าสุกสามารถเกิดผลึกได้เมื่อเก็บรักษานาน 7 วัน แต่ถ้าเจลสตาร์ชมีปริมาณน้ำ  
 น้อยกว่าร้อยละ 20 ผลึกของเจลสตาร์ชจะไม่เกิดขึ้น และการเกิดผลึกจะลดลงเมื่อเจลสตาร์ชมีปริมาณ  
 น้ำเพิ่มสูงถึงร้อยละ 90

ตารางที่ 4.3 ปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$   
 นาน 7 วัน<sup>1)</sup>

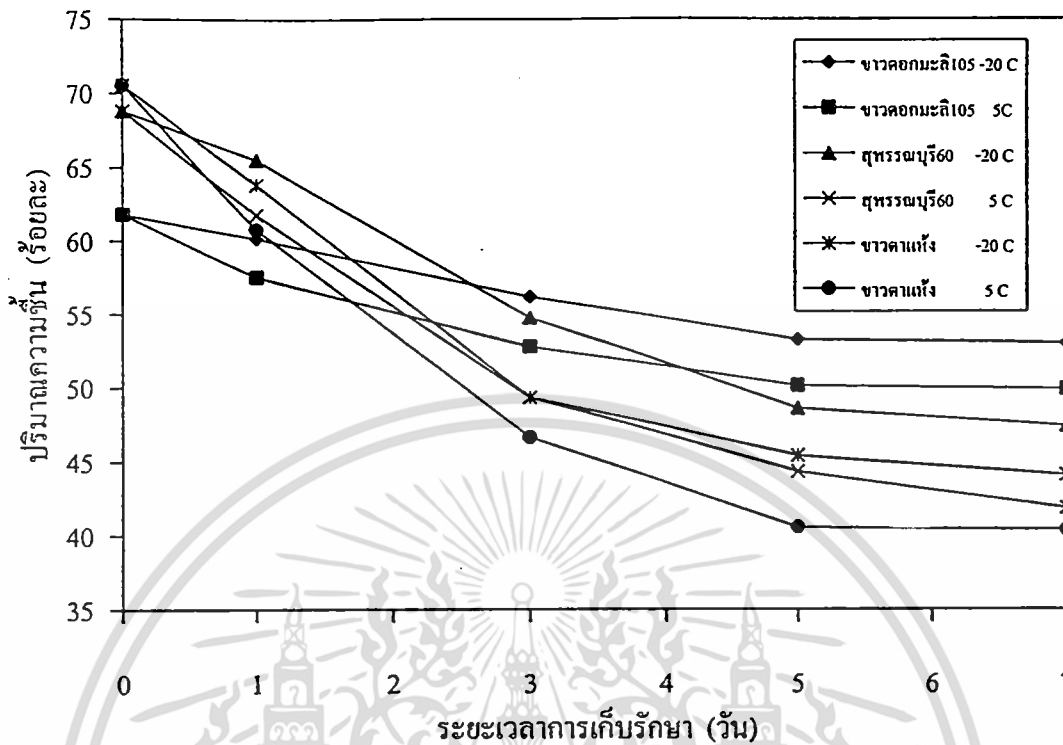
ระยะเวลา การเก็บ (วัน)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)					
	ข้าวดอกมะลิ105		สุพรรณบุรี60		ขาวตาแห้ง	
	$-20^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}$
0	<sup>a</sup> 61.79±0.06 <sup>a</sup>	<sup>c</sup> 61.79±0.06 <sup>a</sup>	<sup>b</sup> 68.81±0.13 <sup>a</sup>	<sup>b</sup> 68.81±0.13 <sup>a</sup>	<sup>a</sup> 70.53±0.23 <sup>a</sup>	<sup>a</sup> 70.53±0.23 <sup>a</sup>
1	<sup>d</sup> 60.13±0.20 <sup>b</sup>	<sup>c</sup> 57.50±0.50 <sup>c</sup>	<sup>a</sup> 65.50±0.13 <sup>b</sup>	<sup>c</sup> 61.73±0.08 <sup>c</sup>	<sup>b</sup> 63.79±0.84 <sup>b</sup>	<sup>d</sup> 60.75±0.90 <sup>c</sup>
3	<sup>a</sup> 56.15±0.23 <sup>d</sup>	<sup>c</sup> 52.75±0.35 <sup>b</sup>	<sup>b</sup> 54.72±0.11 <sup>d</sup>	<sup>d</sup> 49.35±0.16 <sup>e</sup>	<sup>d</sup> 49.33±0.61 <sup>d</sup>	<sup>c</sup> 46.67±0.84 <sup>c</sup>
5	<sup>a</sup> 53.29±0.12 <sup>e</sup>	<sup>b</sup> 50.18±0.02 <sup>h</sup>	<sup>c</sup> 48.64±0.30 <sup>f</sup>	<sup>c</sup> 44.37±0.43 <sup>h</sup>	<sup>d</sup> 45.45±0.41 <sup>f</sup>	<sup>f</sup> 40.58±0.15 <sup>h</sup>
7	<sup>a</sup> 53.04±0.09 <sup>f</sup>	<sup>b</sup> 49.95±0.13 <sup>i</sup>	<sup>c</sup> 47.47±0.67 <sup>g</sup>	<sup>c</sup> 41.89±0.31 <sup>i</sup>	<sup>d</sup> 44.15±0.42 <sup>g</sup>	<sup>f</sup> 40.41±0.39 <sup>h</sup>

หมายเหตุ : <sup>1)</sup> ค่าที่ได้ในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ



- ① ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )  
 ② ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการเก็บรักษากับข้าวเจ้าสุกที่เก็บ  
 รักษานาน 7 วัน พบว่าข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ จะมีปริมาณความชื้นลดลงเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  
 $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  นาน 7 วัน และมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ช  
 ข้าวเจ้าสุกในระหว่างการเก็บรักษา ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.1 พบว่าการเก็บรักษาข้าวเจ้าสุกที่  
 อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  จะมีปริมาณความชื้นสูงกว่าการเก็บรักษาข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากอัตราการ  
 เกิดรีโทรกราเดชันต่ำกว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 4.1 ปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  นาน 7 วัน

#### 4.3 การศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกด้วย DSC

การวิเคราะห์หาค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ ด้วย DSC พบว่าพันธุ์ข้าว อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อการเกิดรีโทรกราเดชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.2

จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.2 พบว่าข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ ที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา จะมีค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันเท่ากับศูนย์ และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวตาแห้งมีค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันสูงที่สุด รองลงมาคือข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 และข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 ตามลำดับ ของการเก็บรักษาทั้ง 2 อุณหภูมิ เนื่องจากปริมาณอะไมโลสมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดรีโทรกราเดชัน ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูง อัตราการเกิดรีโทรกราเดชันจะสูงและเร็วกว่าข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ ดังนั้นข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวตาแห้งซึ่งเป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจึงมีค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันสูงกว่าข้าวเจ้าสุก 2 พันธุ์ ที่เหลือ ยกเว้นข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 ซึ่งเป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสปานกลาง เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันจะสูงกว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวตาแห้ง ซึ่งเป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$

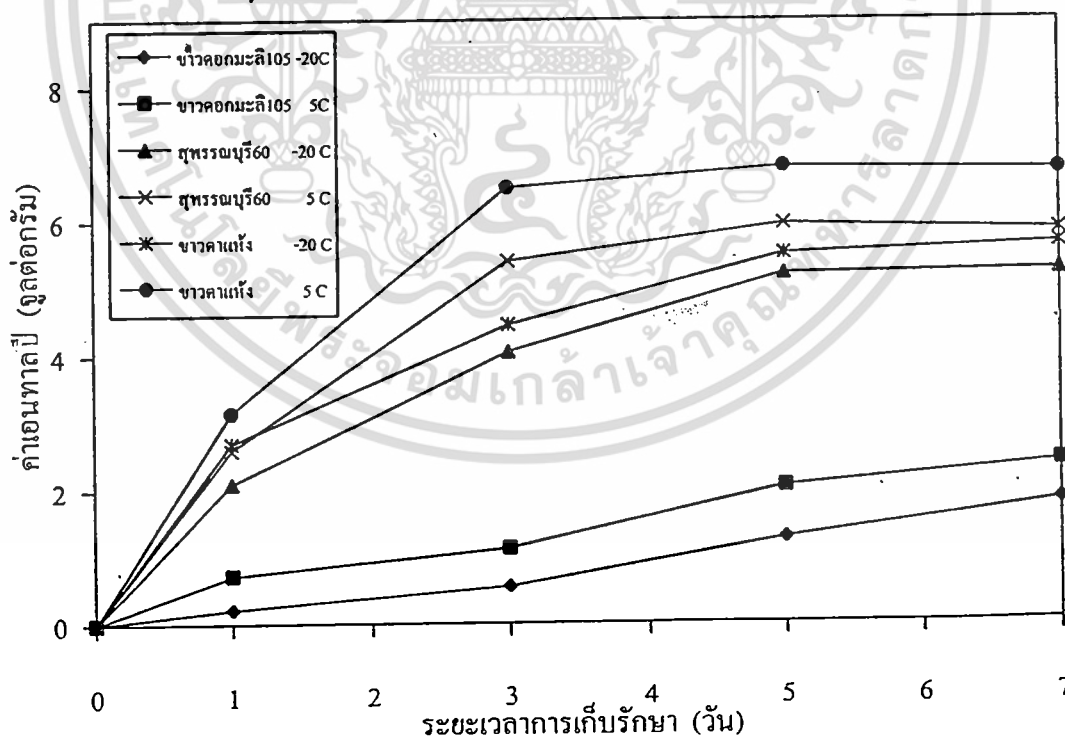
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -20°C และ 5°C นาน 7 วัน<sup>1)</sup>

ระยะเวลา การเก็บ (วัน)	ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชัน (จูลต่อกรัม)					
	ข้าวดอกมะลิ105		สุพรรณบุรี60		ข้าวคาแห้ง	
	-20 °C	5°C	-20 °C	5°C	-20 °C	5°C
0	<sup>ns</sup> 0.00±0.00 <sup>i</sup>	<sup>ns</sup> 0.00±0.00 <sup>i</sup>	<sup>ns</sup> 0.00±0.00 <sup>f</sup>	<sup>ns</sup> 0.00±0.00 <sup>f</sup>	<sup>ns</sup> 0.00±0.00 <sup>h</sup>	<sup>ns</sup> 0.00±0.00 <sup>h</sup>
1	<sup>c</sup> 0.22±0.00 <sup>h</sup>	<sup>d</sup> 0.73±0.00 <sup>f</sup>	<sup>e</sup> 2.10±0.14 <sup>e</sup>	<sup>b</sup> 2.60±0.14 <sup>d</sup>	<sup>b</sup> 2.70±0.00 <sup>g</sup>	<sup>a</sup> 3.15±0.07 <sup>f</sup>
3	<sup>f</sup> 0.56±0.01 <sup>b</sup>	<sup>c</sup> 1.13±0.05 <sup>c</sup>	<sup>d</sup> 4.05±0.07 <sup>c</sup>	<sup>b</sup> 5.40±0.00 <sup>b</sup>	<sup>e</sup> 4.45±0.07 <sup>c</sup>	<sup>a</sup> 6.50±0.14 <sup>b</sup>
5	<sup>f</sup> 1.27±0.02 <sup>d</sup>	<sup>e</sup> 2.04±0.08 <sup>b</sup>	<sup>d</sup> 5.20±0.14 <sup>b</sup>	<sup>b</sup> 5.95±0.07 <sup>a</sup>	<sup>e</sup> 5.50±0.00 <sup>d</sup>	<sup>a</sup> 6.80±0.00 <sup>a</sup>
7	<sup>f</sup> 1.82±0.00 <sup>c</sup>	<sup>e</sup> 2.40±0.14 <sup>a</sup>	<sup>d</sup> 5.25±0.07 <sup>b</sup>	<sup>b</sup> 5.85±0.07 <sup>a</sup>	<sup>e</sup> 5.65±0.07 <sup>c</sup>	<sup>a</sup> 6.75±0.07 <sup>a</sup>

หมายเหตุ : 1) ค่าที่ได้ในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ

① ② ① ตัวอักษรที่ต่างกัน ในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05)  
 ② ตัวอักษรที่ต่างกัน ในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05)  
 ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05)



ภาพที่ 4.2 ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่างๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -20°C และ 5°C นาน 7 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.2 พบว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  ค่าเอนทัลปีการเกิดรีโทรกราเดชันจะสูงกว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Lima and Singh (1993) และ Perdon *et al.* (1999) พบว่าข้าวสุกมีอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันสูงที่สุดเมื่อเก็บที่อุณหภูมิแช่เย็น เพราะว่ที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิของข้าวเจ้าสุกจะสูงกว่า  $T_g$  ( $T_g$  ประมาณ  $-5^{\circ}\text{C}$ ) ทำให้เจลสตาร์ชข้าวเจ้าสุกมีสภาพเหนียวคล้ายยาง ไม่เสถียร โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจึงมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา มีผลทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลและเกิดผลึกมากขึ้น แต่การเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิของข้าวเจ้าสุกจะต่ำกว่า  $T_g$  เจลสตาร์ชของข้าวเจ้าสุกจึงมีสภาพแข็งคล้ายแก้ว ทำให้อัตราการเกิดนิวคลีเอชันและโพรพาเกชันหรือการเกิดผลึกลดลง นอกจากนี้ น้ำที่มีอยู่ในเจลสตาร์ชข้าวเจ้าสุกเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นผลึกน้ำแข็ง น้ำในเจลสตาร์ชข้าวเจ้าสุกจึงลดลง ความเข้มข้นของเจลสตาร์ชเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดรีโทรกราเดชันได้น้อย ดังนั้นการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิเยือกแข็งจะลดอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันได้มากกว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิแช่เย็น

เมื่อพิจารณาระยะเวลาการเก็บรักษาที่มีผลต่อค่าเอนทัลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุก จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.2 พบว่าระยะเวลาการเก็บรักษามีความสัมพันธ์ในทางบวกกับค่าเอนทัลปีการเกิดรีโทรกราเดชัน กล่าวคือเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นข้าวเจ้าสุกจะมีค่าเอนทัลปีการเกิดรีโทรกราเดชันเพิ่มสูงขึ้น หรือสังเกตได้จากความขุ่นของเมล็ดข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ ที่มีความขุ่นเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา โดยค่าเอนทัลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้งและสุพรรณบุรี 60 จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรกของการเก็บรักษา เนื่องจากเกิดการรวมตัวของโมเลกุลอะไมโลสและมีแนวโน้มนคงที่เมื่อเก็บรักษานานถึง 7 วัน ในขณะที่ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ค่าเอนทัลปีการเกิดรีโทรกราเดชันจะต่ำมากในช่วง 3 วันแรกของการเก็บรักษา แต่มีแนวโน้มนเพิ่มสูงขึ้นและคาดว่าจะคงที่เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานาน เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรง และจับกันเป็นผลึกได้เช่นเดียวกับโมเลกุลของอะไมโลส โดย Teo and Seow (1992) พบว่าในช่วงวันแรกของการเก็บรักษาสตาร์ชข้าวเหนียวมีแนวโน้มนการเกิดรีโทรกราเดชันต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินเกิดนิวคลีเอชันได้ยากกว่าอะไมโลส

จากผลการทดลองดังกล่าว เมื่อวิเคราะห์การลดรอยหาสมการพยากรณ์ระหว่างค่าเอนทัลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่าง ๆ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105

$$\Delta H = 0.124278 + 0.339396X + 0.0102537Y - 0.0028301X^2 + 0.00287073XY \dots \text{สมการ 4.31}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.956$$

ข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60

$$\Delta H = 0.331405 + 2.06691X + 0.0167805Y - 0.185329X^2 + 0.0027561XY \dots \text{สมการ 4.32}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.971$$

ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวตาแห้ง

$$\Delta H = 0.49149 + 2.3689X + 0.0192195Y - 0.21595X^2 + 0.0062439XY \dots \text{สมการ 4.33}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.942$$

เมื่อ  $\Delta H$  = ค่าเอนทัลปีการเกิดรีโทรกราเดชัน (จูลต่อกรัม)

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)

Y = อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### 4.4 การศึกษาระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชัน

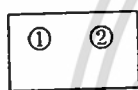
ในระหว่างการหุงข้าว เมื่อให้ความร้อนจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชในเมล็ดข้าวเกิดเจลลิตินในเซชัน โมเลกุลของอะไมโลส อะไมโลเพกทิน และน้ำจะรวมตัวกันเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห เรียกว่า “การเกิดเจล” ซึ่งสามารถละลายได้ดีในสารละลายค่างและทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนแล้วให้สีน้ำเงิน จากนั้นจึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร หรือเรียกว่า “Blue value method” ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถใช้ตรวจหาระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ชได้ และเนื่องจากการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชมีผลต่อระดับการเกิดเจลลิตินในเซชัน ทำให้สตาร์ชของข้าวเจ้าสุกทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนได้น้อยลง ดังนั้นการศึกษาระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเจ้าสุกจึงอาจเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถศึกษาระดับการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชได้

จากการทดลองเพื่อศึกษาระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเจ้าสุกข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 สุพรรณบุรี60 และข้าวตาแห้ง เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  นาน 7 วัน พบว่าพันธุ์ข้าว อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5 และ ภาพที่ 4.3

ตารางที่ 4.5 ระดับการเกิดเงลาติในเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -20°C และ 5°C นาน 7 วัน<sup>1)</sup>

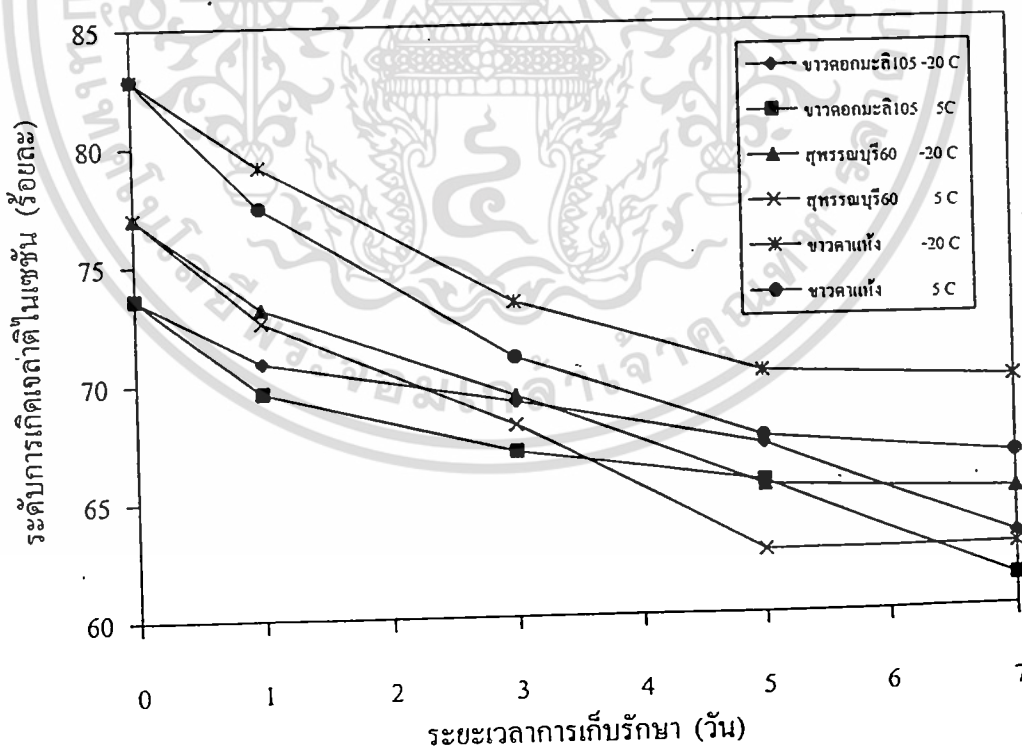
ระยะเวลา การเก็บ (วัน)	ระดับการเกิดเงลาติในเซชัน (ร้อยละ)					
	ขาวดอกมะลิ105		สุพรรณบุรี60		ขาวคาแห้ง	
	-20°C	5°C	-20°C	5°C	-20°C	5°C
0	<sup>c</sup> 73.58±0.68 <sup>a</sup>	<sup>c</sup> 73.58±0.68 <sup>a</sup>	<sup>b</sup> 76.99±0.33 <sup>a</sup>	<sup>b</sup> 76.99±0.33 <sup>a</sup>	<sup>a</sup> 82.84±0.19 <sup>a</sup>	<sup>a</sup> 82.84±0.19 <sup>a</sup>
1	<sup>d</sup> 70.88±0.49 <sup>b</sup>	<sup>c</sup> 69.61±0.47 <sup>c</sup>	<sup>b</sup> 73.14±0.43 <sup>b</sup>	<sup>c</sup> 72.57±0.33 <sup>b</sup>	<sup>a</sup> 79.12±0.29 <sup>b</sup>	<sup>b</sup> 77.39±0.29 <sup>c</sup>
3	<sup>c</sup> 69.13±0.62 <sup>c</sup>	<sup>c</sup> 66.99±0.47 <sup>d</sup>	<sup>c</sup> 69.38±0.33 <sup>c</sup>	<sup>d</sup> 68.14±0.21 <sup>d</sup>	<sup>a</sup> 73.29±0.29 <sup>d</sup>	<sup>b</sup> 70.98±0.40 <sup>c</sup>
5	<sup>b</sup> 67.15±0.36 <sup>d</sup>	<sup>c</sup> 65.56±0.23 <sup>e</sup>	<sup>c</sup> 65.39±0.33 <sup>c</sup>	<sup>d</sup> 62.64±0.45 <sup>f</sup>	<sup>a</sup> 70.21±0.40 <sup>f</sup>	<sup>b</sup> 67.13±0.40 <sup>e</sup>
7	<sup>d</sup> 63.10±0.59 <sup>f</sup>	<sup>c</sup> 61.28±0.48 <sup>e</sup>	<sup>c</sup> 65.03±0.33 <sup>c</sup>	<sup>d</sup> 62.64±0.33 <sup>f</sup>	<sup>a</sup> 69.83±0.40 <sup>f</sup>	<sup>b</sup> 66.56±0.40 <sup>h</sup>

หมายเหตุ : <sup>1)</sup> ค่าที่ได้ในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ



① ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05)

② ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05)



ภาพที่ 4.3 ระดับการเกิดเงลาติในเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -20°C และ 5°C

นาน 7 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.3 พบว่าข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ ที่เกิดรีโทรกราเดชันจะมีระดับการเกิดเจลาติโนเซชันต่ำกว่าข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน พบว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้งมีระดับการเกิดเจลาติโนเซชันสูงที่สุด เพราะว่าเป็นระหว่างการหุงข้าว ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้งเป็นข้าวชนิดปริมาณอะไมโลสสูง ทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำและเวลาในการหุงมากกว่าข้าวเจ้าสุก 2 พันธุ์ ที่เหลือ เพื่อให้สคาร์ชในเมล็ดข้าวเกิดเจลาติโนเซชันอย่างสมบูรณ์ รองลงมาคือข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 และขาวดอกมะลิ105 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามระดับการเกิดเจลาติโนเซชันมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นในทุก ๆ พันธุ์

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาที่มีผลต่อระดับการเกิดเจลาติโนเซชันของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชัน จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.3 พบว่าการเก็บรักษาข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  ระดับการเกิดเจลาติโนเซชันจะสูงกว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  มีอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันที่ต่ำกว่า และพบว่าระดับการเกิดเจลาติโนเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้งและสุพรรณบุรี60 จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น โดยลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรกของการเก็บรักษาและมีแนวโน้มคงที่เมื่อเก็บนาน 5 วัน ในขณะที่ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ระดับการเกิดเจลาติโนเซชันจะลดลงเล็กน้อยอย่างต่อเนื่องในระหว่างการเก็บรักษา Birch *et al.* (1973) อธิบายว่าโดยปกติอะไมโลสและอะไมโลเพคตินสามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนได้ อะไมโลสมีลักษณะเป็นเกลียวม้วน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีน โมเลกุลของไอโอดีนจะสอดเข้าไปในเกลียวนี้เกิดเป็นสารเชิงซ้อนอะไมโลส-ไอโอดีน (Amylose-iodine complex) และให้สีน้ำเงิน ในขณะที่อะไมโลเพคตินจะให้สีแดงเมื่อเกิดรีโทรกราเดชัน โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในเจลาตาร์ชข้าวเจ้าสุกจะฟอร์มตัวเป็นเกลียวคู่และจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงและแน่นกว่าเจลาตาร์ชข้าวเจ้าสุกที่ยังไม่เกิดรีโทรกราเดชัน ทำให้โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินไม่สามารถจับกับสารละลายไอโอดีน จึงไม่เกิดสีน้ำเงินหรือเกิดสีน้ำเงินน้อยมาก ระดับการเกิดเจลาติโนเซชันจึงลดลง

เมื่อวิเคราะห์การถดถอยหาสมการพยากรณ์ระหว่างระดับการเกิดเจลาติโนเซชันของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชันที่อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ105

$$DG = 72.5638 - 1.54052X - 0.029252Y + 0.00361783X^2 - 0.00875041XY \dots \text{สมการ 4.41}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.933$$

ข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60

$$DG = 76.7619 - 3.88635X - 0.00509593Y + 0.269828X^2 - 0.0155325XY \dots \text{สมการ 4.42}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.980$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้ง

$$DG = 82.4883 - 4.7408X - 0.0293171Y + 0.365057X^2 - 0.0159634XY \quad \dots \text{สมการ 4.43}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.994$$

เมื่อ DG = ระดับการเกิดเจลาตินในเซชัน (ร้อยละ)

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)

Y = อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### 4.5 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชัน

การศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชันด้วยเครื่อง Texture Analyser โดยใช้วิธีวัดแบบ Back Extrusion (BE) เพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง และวัดแบบ Texture Profile Analysis (TPA) เพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง และความเหนียว

##### 4.5.1 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชัน

###### 4.5.1.1 การวัดความแข็งข้าวเจ้าสุกด้วยวิธี Back Extrusion

เมื่อวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าพันธุ์ข้าว อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.4

ตารางที่ 4.6 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่างๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  นาน 7 วัน เมื่อวัดด้วยวิธี "Back Extrusion"

ระยะเวลา การเก็บ (วัน)	ความแข็ง (กิโลกรัม)					
	ขาวดอกมะลิ105		สุพรรณบุรี60		ขาวตาแห้ง	
	$-20^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}$
0	$4.47 \pm 0.10^b$	$4.47 \pm 0.10^b$	$5.86 \pm 0.03^b$	$5.86 \pm 0.03^b$	$8.19 \pm 0.06^i$	$8.19 \pm 0.06^i$
1	$4.79 \pm 0.03^f$	$5.55 \pm 0.05^c$	$7.60 \pm 0.00^e$	$10.66 \pm 0.01^c$	$9.14 \pm 0.01^h$	$13.10 \pm 0.06^f$
3	$4.87 \pm 0.04^f$	$5.99 \pm 0.10^d$	$10.06 \pm 0.06^f$	$13.53 \pm 0.02^c$	$12.52 \pm 0.01^g$	$16.46 \pm 0.01^e$
5	$5.61 \pm 0.01^e$	$6.17 \pm 0.02^c$	$10.08 \pm 0.01^f$	$15.69 \pm 0.11^b$	$14.43 \pm 0.12^c$	$17.86 \pm 0.10^b$
7	$7.50 \pm 0.00^b$	$8.64 \pm 0.03^a$	$12.85 \pm 0.04^d$	$16.16 \pm 0.17^a$	$15.20 \pm 0.11^d$	$18.18 \pm 0.14^a$

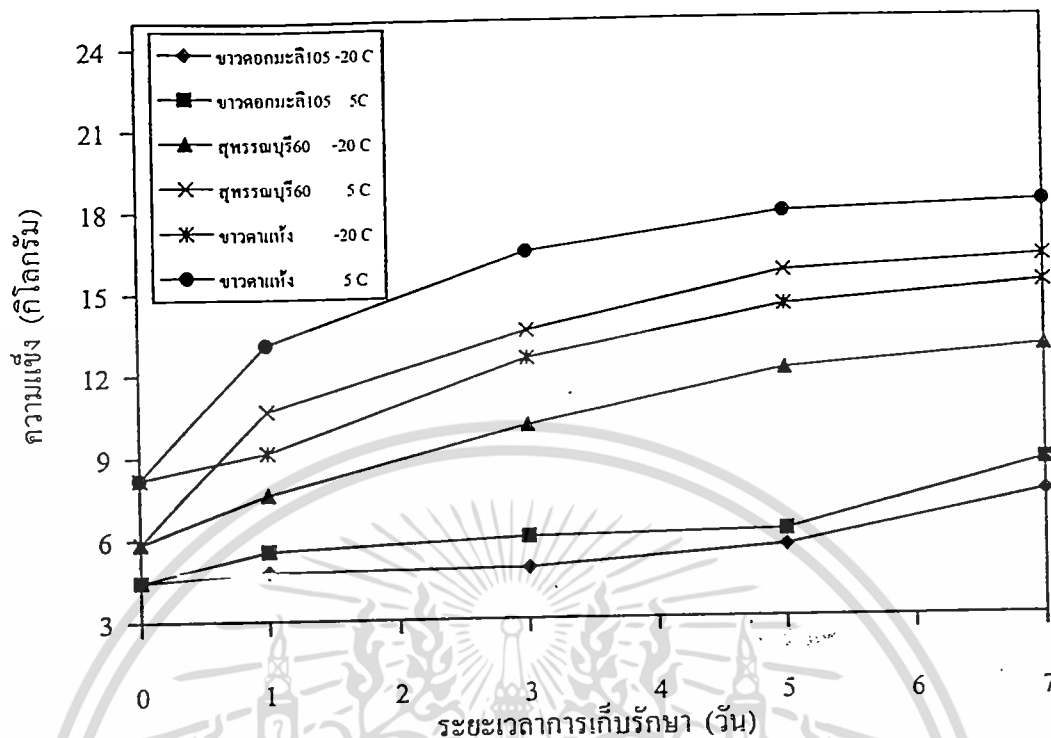
หมายเหตุ : <sup>1)</sup> ค่าที่ได้ในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ

① ②

① ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

② ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  นาน 7 วัน โดยใช้วิธีวัดแบบ Back Extrusion

จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.4 พบว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจากข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวคาแข้งจะมีค่าความแข็งสูงสุด รองลงมาคือข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 และข้าวคอกมะลิ105 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Lima and Singh (1993) พบว่าพันธุ์ข้าวมีผลต่อความแข็งของข้าวเจ้าสุก เนื่องจากข้าวเจ้าสุกแต่ละชนิดมีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกัน อัตราการเกิดรีโทรกราเดชันจึงแตกต่างกัน มีผลทำให้ข้าวเจ้าสุกมีค่าความแข็งแตกต่างกันด้วย ข้าวเจ้าสุกที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจึงมีค่าความแข็งสูงกว่าข้าวเจ้าสุกที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ ยกเว้นการเก็บข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 ซึ่งเป็นข้าวชนิดอะไมโลสปานกลางที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  จะมีความแข็งสูงกว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวคาแข้งซึ่งเป็นข้าวชนิดอะไมโลสสูงเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$

เมื่อพิจารณาระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน พบว่าค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวคาแข้งและสุพรรณบุรี60 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและคงที่เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ทั้ง 2 อุณหภูมิการเก็บรักษา ยกเว้นข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวคอกมะลิ105 และการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่าความแข็งสูงกว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$

จากผลการทดลองข้างต้น เมื่อวิเคราะห์การลดอxygen การพหุการ ระหว่างความแข็งของข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่าง ๆ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105

$$H = 4.8801 - 0.0083292X + 0.0151967Y + 0.0695728X^2 + 0.00419268XY \dots \text{สมการ 4.51}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.917$$

ข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60

$$H = 6.8644 + 2.34716X + 0.0641431Y + 0.155364X^2 + 0.0185886XY \dots \text{สมการ 4.52}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.933$$

ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวตาแห้ง

$$H = 9.02557 + 2.72537X + 0.0833951Y + 0.211632X^2 + 0.00977236XY \dots \text{สมการ 4.53}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.956$$

เมื่อ H = ความแข็งของข้าวเจ้าสุก (กิโลกรัม)

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)

Y = อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### 4.5.1.2 การวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุกด้วยวิธี Texture Profile Analysis

จากผลการทดลอง พบว่าพันธุ์ข้าว อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) แสดงดังตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.5

ตารางที่ 4.7 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  นาน 7 วัน

เมื่อวัดด้วยวิธี "Texture Profile Analysis"

ระยะเวลา การเก็บ (วัน)	ความแข็ง (กิโลกรัม)					
	ข้าวดอกมะลิ105		สุพรรณบุรี60		ข้าวตาแห้ง	
	$-20^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}$
0	$2.85 \pm 0.03^i$	$2.85 \pm 0.03^i$	$3.07 \pm 0.03^i$	$3.07 \pm 0.03^i$	$6.06 \pm 0.00^i$	$6.06 \pm 0.00^i$
1	$3.06 \pm 0.00^h$	$4.08 \pm 0.01^c$	$6.60 \pm 0.01^h$	$8.08 \pm 0.01^b$	$8.11 \pm 0.03^h$	$9.76 \pm 0.04^b$
3	$3.32 \pm 0.02^b$	$5.06 \pm 0.03^c$	$9.33 \pm 0.03^f$	$11.99 \pm 0.10^c$	$11.55 \pm 0.01^f$	$13.37 \pm 0.01^c$
5	$3.87 \pm 0.07^f$	$6.00 \pm 0.05^b$	$10.86 \pm 0.03^c$	$14.57 \pm 0.03^b$	$13.17 \pm 0.01^c$	$15.73 \pm 0.01^b$
7	$4.75 \pm 0.00^d$	$6.93 \pm 0.02^a$	$11.05 \pm 0.05^d$	$14.86 \pm 0.05^a$	$13.26 \pm 0.03^d$	$15.78 \pm 0.05^a$

หมายเหตุ : <sup>1)</sup> ค่าที่ได้ในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ

①

②

① ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

② ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองข้างต้น เมื่อวิเคราะห์การถดถอยหาสมการพยากรณ์ ระหว่างความแข็งของข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่าง ๆ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้  
ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ105

$$H = 3.1148 + 0.50972X + 0.0192748Y - 0.00264506X^2 + 0.011635XY \quad \dots\text{สมการ 4.54}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.972$$

ข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60

$$H = 3.76109 + 3.42057X + 0.0255024Y - 0.277261X^2 + 0.0211805XY \quad \dots\text{สมการ 4.55}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.981$$

ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้ง

$$H = 6.38433 + 2.91999X + 0.0287252Y - 0.233715X^2 + 0.012365XY \quad \dots\text{สมการ 4.56}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.933$$

เมื่อ H = ความแข็งของข้าวเจ้าสุก (กิโลกรัม)

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)

Y = อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### 4.5.2 ความเหนียวของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชัน

เมื่อวัดความเหนียวของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชันด้วยวิธี Texture Profile Analysis พบว่าพันธุ์ข้าว อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อความเหนียวของข้าวเจ้าสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) โดยการเก็บข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ ที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  นาน 7 วัน จะมีความเหนียวต่ำกว่าข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.8 และ ภาพที่ 4.6

จากการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุก พบว่าเมื่อค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา ค่าความเหนียวของข้าวเจ้าสุกจะลดลง เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 จะมีค่าความเหนียวสูงที่สุด รองลงมาคือข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60และข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้ง ตามลำดับ ทั้ง 2 อุณหภูมิของการเก็บรักษา ยกเว้นข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่าความเหนียวต่ำกว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้งเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 4.8 ความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  นาน 7 วัน  
เมื่อวัดด้วยวิธี Texture Profile Analysis<sup>1)</sup>

ระยะเวลา การเก็บ (วัน)	ความเหนียว (กิโลกรัม)					
	ข้าวหอมมะลิ105		สุพรรณบุรี60		ข้าวตาแห้ง	
	$-20^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C}$
0	<sup>a</sup> 0.66±0.06 <sup>a</sup>	<sup>a</sup> 0.66±0.06 <sup>a</sup>	<sup>ab</sup> 0.61±0.02 <sup>a</sup>	<sup>ab</sup> 0.61±0.02 <sup>a</sup>	<sup>b</sup> 0.57±0.04 <sup>a</sup>	<sup>b</sup> 0.57±0.04 <sup>a</sup>
1	<sup>a</sup> 0.60±0.03 <sup>ab</sup>	<sup>a</sup> 0.56±0.03 <sup>bc</sup>	<sup>b</sup> 0.40±0.02 <sup>b</sup>	<sup>cd</sup> 0.32±0.04 <sup>c</sup>	<sup>bc</sup> 0.35±0.06 <sup>b</sup>	<sup>d</sup> 0.26±0.02 <sup>c</sup>
3	<sup>a</sup> 0.50±0.04 <sup>cd</sup>	<sup>a</sup> 0.46±0.04 <sup>dc</sup>	<sup>b</sup> 0.25±0.03 <sup>d</sup>	<sup>cd</sup> 0.17±0.02 <sup>c</sup>	<sup>bc</sup> 0.21±0.01 <sup>c</sup>	<sup>d</sup> 0.12±0.02 <sup>def</sup>
5	<sup>a</sup> 0.45±0.03 <sup>dc</sup>	<sup>b</sup> 0.35±0.01 <sup>f</sup>	<sup>c</sup> 0.19±0.04 <sup>c</sup>	<sup>d</sup> 0.10±0.01 <sup>f</sup>	<sup>cd</sup> 0.15±0.04 <sup>d</sup>	<sup>d</sup> 0.08±0.02 <sup>cf</sup>
7	<sup>a</sup> 0.39±0.03 <sup>cf</sup>	<sup>b</sup> 0.28±0.03 <sup>e</sup>	<sup>c</sup> 0.18±0.01 <sup>c</sup>	<sup>de</sup> 0.10±0.02 <sup>f</sup>	<sup>cd</sup> 0.14±0.04 <sup>dc</sup>	<sup>c</sup> 0.06±0.01 <sup>f</sup>

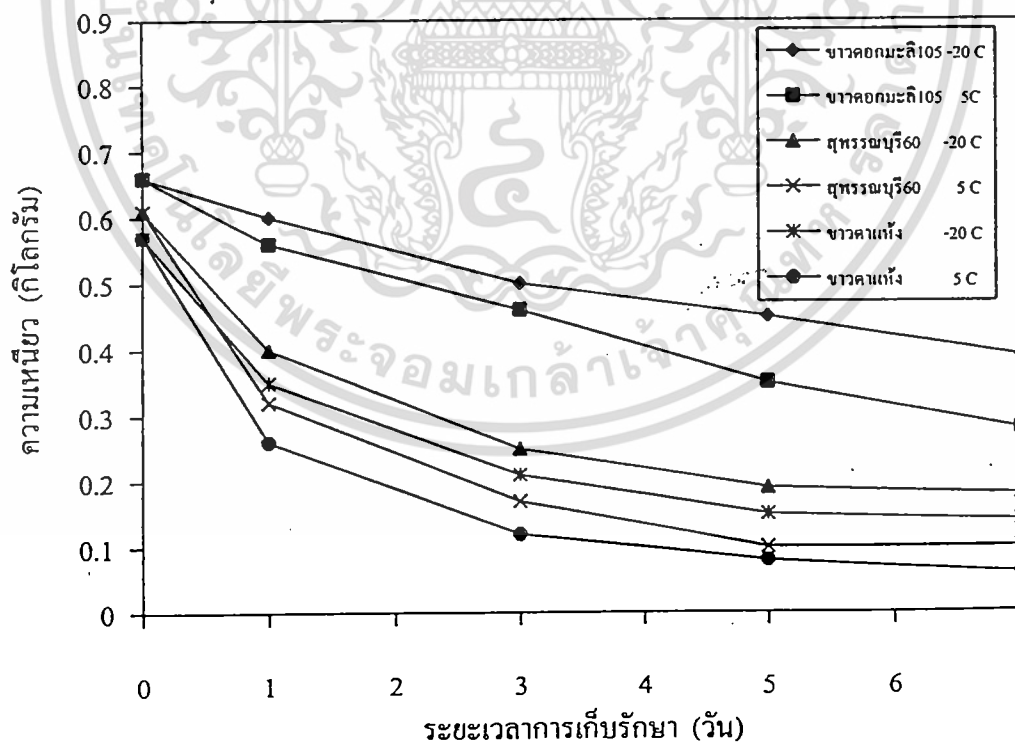
หมายเหตุ :

1) ค่าที่ได้ในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ

① ②

① ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

② ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )



ภาพที่ 4.6 ความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  นาน 7 วัน  
เมื่อวัดด้วยวิธี Texture Profile Analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.6 พบว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  มีผลทำให้ค่าความเหนียวของข้าวเจ้าสุกแตกต่างกัน พบว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  ค่าความเหนียวจะสูงกว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  นาน 7 วัน และเมื่อพิจารณาระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน ข้าวเจ้าสุกมีค่าความเหนียวลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น โดยค่าความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้งและสุพรรณบุรี 60 จะลดลงในช่วง 5 วันของการเก็บรักษาทั้ง 2 อุณหภูมิการเก็บรักษา และลดลงอีกเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ลดลงน้อยมากในช่วง 3 วันแรกของการเก็บรักษาและมีแนวโน้มลดลงอย่างมากเมื่อเก็บรักษานาน 7 วัน ทั้ง 2 อุณหภูมิการเก็บรักษา

จากผลการทดลองข้างต้น เมื่อวิเคราะห์การถดถอยหาสมการพยากรณ์ ระหว่างค่าความเหนียวของข้าวเจ้าสุกเมื่อวัดด้วยวิธี Texture Profile Analysis ที่อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่าง ๆ สามารถเขียนเป็นสมการถดถอยได้ดังนี้

ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

$$S = 0.651155 - 0.0725088X - 0.000360976Y + 0.003242X^2 - 0.000612XY \dots \text{สมการ 4.57}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.991$$

ข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี 60

$$S = 0.559758 - 0.171833X - 0.0015707Y + 0.0156731X^2 - 0.0003341XY \dots \text{สมการ 4.58}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.926$$

ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้ง

$$S = 0.510833 - 0.169575X - 0.00180488Y + 0.0156552X^2 - 0.00026009XY \dots \text{สมการ 4.59}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0.893$$

เมื่อ S = ความเหนียวของข้าวเจ้าสุก (กิโลกรัม)

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)

Y = อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชัน ระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุก

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันด้วย DSC ระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกซึ่งวัดด้วยวิธี Back Extrusion (BE) เพื่อศึกษาคุณลักษณะด้านความแข็งของข้าวเจ้าสุก และวิธี Texture Profile Analysis (TPA) เพื่อศึกษาคุณลักษณะด้านความแข็ง และความเหนียว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.9

จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันมีความสัมพันธ์อย่างสูงในเชิงบวกเป็นเส้นตรงกับความแข็ง และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุดเท่ากับ 1.000 และ 0.947 เมื่อวัดด้วยวิธี Texture Profile Analysis และ Back Extrusion ตามลำดับ แสดงว่าการเกิดรีโทรกราเดชันมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุก ถ้าค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา ค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกจะเพิ่มสูงขึ้น ในทางตรงข้ามค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันมีความสัมพันธ์อย่างสูงในเชิงลบกับความเหนียวของข้าวเจ้าสุกเมื่อวัดด้วยวิธี Texture Profile Analysis โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ -0.976 และมีความสัมพันธ์ในเชิงลบค่อนข้างต่ำกับระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน นั่นคือถ้าค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกเพิ่มขึ้น ความเหนียวและระดับการเกิดเจลลิตีในเซชันของข้าวเจ้าสุกจะลดลง

สำหรับระดับการเกิดเจลลิตีในเซชันมีความสัมพันธ์ในเชิงลบค่อนข้างต่ำกับทุก ๆ วิธี นั่นคือถ้าระดับการเกิดเจลลิตีในเซชันลดลงในระหว่างการเก็บรักษา ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันและความแข็งของข้าวเจ้าสุกจะเพิ่มขึ้น ยกเว้นความเหนียวของข้าวเจ้าสุก จะมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกค่อนข้างต่ำกับระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.520

จากตารางที่ 4.9 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกเมื่อวัดด้วยวิธี Back Extrusion กับค่าความแข็ง และค่าความเหนียวของข้าวเจ้าสุกเมื่อวัดด้วยวิธี Texture Profile Analysis พบว่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกเมื่อวัดด้วยวิธี Back Extrusion มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกอย่างสูงเป็นเส้นตรงกับความแข็งของข้าวเจ้าสุกเมื่อวัดด้วยวิธี Texture Profile Analysis และมีค่าสัมประสิทธิ์ของสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.947 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุกทั้ง 2 วิธี มีความสอดคล้องกันอย่างสูง ในทางตรงกันข้ามค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกเมื่อวัดด้วยวิธี Back Extrusion และ Texture Profile Analysis จะมีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับความเหนียวของข้าวเจ้าสุก แสดงว่าถ้าในระหว่างการเก็บรักษาเมื่อค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกเพิ่มสูงขึ้น จะมีผลทำให้ค่าความเหนียวของข้าวเจ้าสุกลดลง

ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าเอนทาลปีการเกิดรีโพรทราเคชั่น ระดับการเกิดเจลาติโนเซชัน และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุก

	ค่าเอนทาลปี	ระดับการเกิดเจลาติโนเซชัน	ความแข็ง (BE)	ความแข็ง (TPA)	ความเหนียว (TPA)
ค่าเอนทาลปี	1.000				
ระดับการเกิดเจลาติโนเซชัน	-0.482	1.000			
ความแข็ง (BE)	0.947	-0.294	1.000		
ความแข็ง (TPA)	1.000	-0.334	0.947	1.000	
ความเหนียว (TPA)	-0.976	0.520	-0.924	-0.948	1.000

#### 4.7 ปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชัน หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ

เมื่อนำข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ ที่เกิดรีโทรกราเดชันมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำในวันที่ 2 4 และ 6 วันของการเก็บรักษา พบว่าพันธุ์ข้าว อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษา มีผลต่อปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ในขณะที่วิธีการอุ่นไม่มีผลต่อความชื้นของข้าวเจ้าสุกหลังอุ่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่าปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกหลังจากอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำจะเพิ่มขึ้นจากข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการอุ่นเมื่อเก็บนาน 2 4 และ 6 วัน แต่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการเก็บรักษาเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้ง มีปริมาณความชื้นสูงที่สุด รองลงมาคือข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี 60 และขาวดอกมะลิ 105 ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.10 พบว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำจะมีปริมาณความชื้น ไม่แตกต่างจากข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการอุ่น ในขณะที่ข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี 60 และขาวตาแห้ง ปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกหลังจากนำมาอุ่นจะเพิ่มสูงกว่าข้าวเจ้าสุกที่ยังไม่ได้อุ่นอย่างชัดเจน และเนื่องจากการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  มีปริมาณความชื้นสูงกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นเมื่อนำข้าวเจ้าสุกมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำจึงยังทำให้ข้าวเจ้าสุกมีปริมาณความชื้นสูงกว่าข้าวเจ้าสุกที่เก็บที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในภาพที่ 4.7

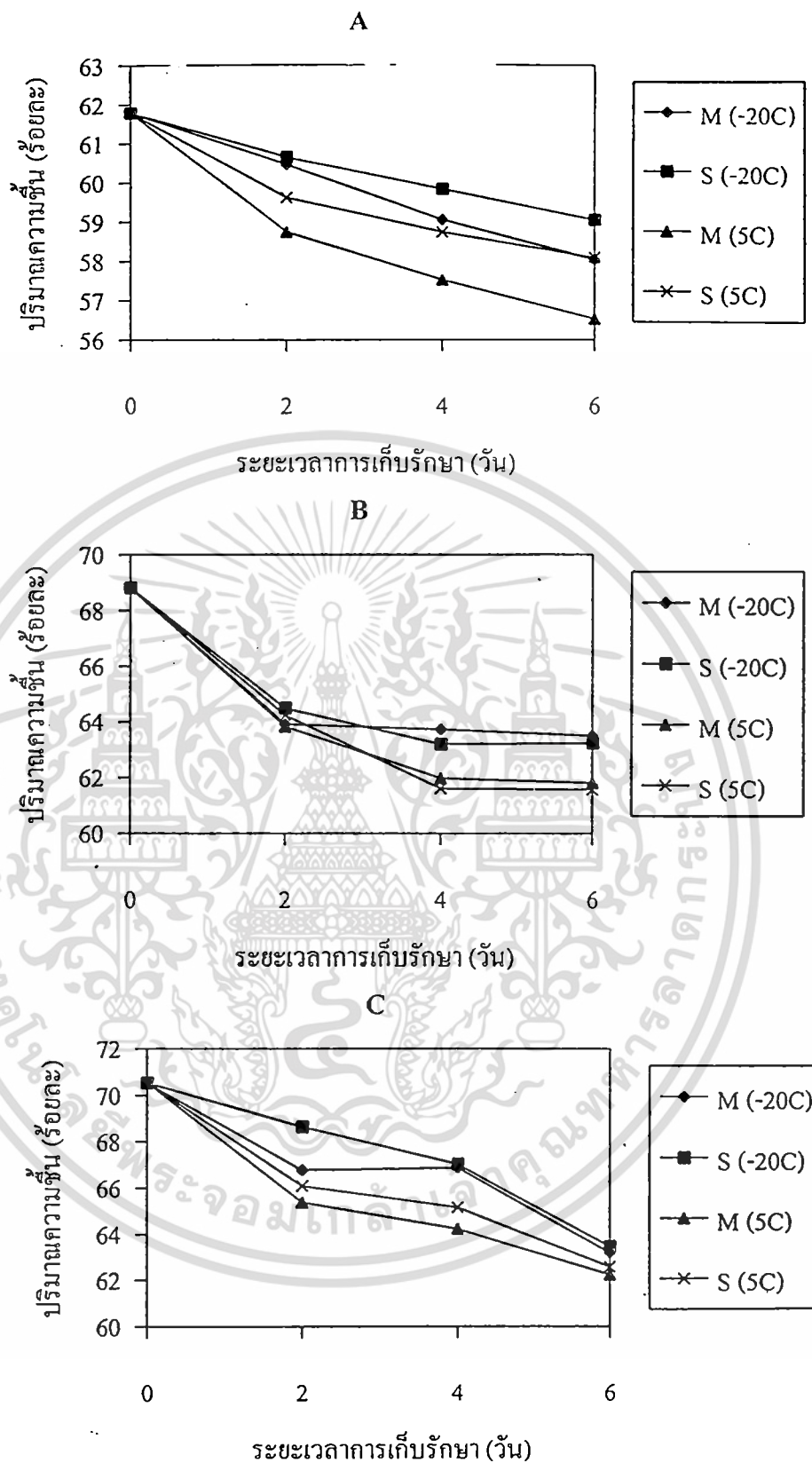
การศึกษาอิทธิพลของวิธีการอุ่นที่มีผลต่อปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุก จากตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.7 พบว่าวิธีการอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำนั้นปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกไม่แตกต่างกันมากนัก โดยข้าวเจ้าสุกที่อุ่นด้วยไอน้ำจะมีปริมาณความชื้นสูงกว่าข้าวเจ้าสุกที่อุ่นด้วยไมโครเวฟเล็กน้อยแต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติทั้ง 2 อุณหภูมิการเก็บรักษา

ตารางที่ 4.10 ปริมาณความชื้นของข้าวเข้าสู่สุกพันธุ์ต่างๆ ที่ผ่านการเกิดโรโทรกราเดชั่น หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ

ข้าวออกมละติ105	-20°C				5°C			
	ข้าวสุกที่ผ่าน <sup>1)</sup>		วิธีการอุ่น		ข้าวสุกที่ผ่าน <sup>1)</sup>		วิธีการอุ่น	
	การเก็บรักษา	ไมโครเวฟ <sup>2)</sup>	ไอน้ำ <sup>2)</sup>	การเก็บรักษา	ไมโครเวฟ <sup>2)</sup>	ไอน้ำ <sup>2)</sup>		
0	61.79±0.060 <sup>C</sup>	60.46±0.727 <sup>mn</sup>	-	61.79±0.060 <sup>C</sup>	-	-		
2	59.13±0.148 <sup>D</sup>	59.06±0.132 <sup>vp</sup>	60.65±0.419 <sup>m</sup>	54.06±0.055 <sup>F</sup>	58.75±0.929 <sup>mn</sup>	59.62±0.549 <sup>mn</sup>		
4	54.23±0.030 <sup>F</sup>	58.03±0.325 <sup>ur</sup>	59.84±0.142 <sup>mmn</sup>	51.39±0.101 <sup>H</sup>	57.53±0.358 <sup>F</sup>	58.74±0.386 <sup>M</sup>		
6	52.92±0.045 <sup>G</sup>	-	59.05±0.160 <sup>mp</sup>	50.15±0.070 <sup>I</sup>	56.53±0.231 <sup>S</sup>	58.08±0.026 <sup>V</sup>		
สุพรรณบุรี60								
0	68.81±0.130 <sup>B</sup>	63.92±0.581 <sup>sh</sup>	-	68.81±0.130 <sup>B</sup>	-	-		
2	61.84±0.970 <sup>C</sup>	63.74±0.394 <sup>li</sup>	64.49±0.55 <sup>is</sup>	55.52±0.343 <sup>E</sup>	63.84±0.713 <sup>sh</sup>	64.24±0.251 <sup>gh</sup>		
4	51.34±0.551 <sup>H</sup>	63.51±1.056 <sup>hi</sup>	63.20±0.210 <sup>I</sup>	46.88±0.096 <sup>K</sup>	61.98±0.080 <sup>sh</sup>	61.61±0.674 <sup>u</sup>		
6	48.17±0.190 <sup>J</sup>	-	63.24±0.262 <sup>li</sup>	42.87±0.621 <sup>V</sup>	61.81±0.620 <sup>sh</sup>	61.58±0.309 <sup>y</sup>		
ขาวตาแห้ง								
0	70.53±0.235 <sup>A</sup>	66.78±0.127 <sup>bc</sup>	-	70.53±0.235 <sup>A</sup>	-	-		
2	54.67±0.321 <sup>F</sup>	66.88±0.742 <sup>bc</sup>	68.64±0.820 <sup>d</sup>	52.75±0.199 <sup>G</sup>	65.39±0.386 <sup>de</sup>	66.11±0.840 <sup>cd</sup>		
4	47.41±0.208 <sup>K</sup>	63.21±0.145 <sup>y</sup>	67.04±0.337 <sup>b</sup>	44.10±0.761 <sup>L</sup>	64.23±0.301 <sup>gh</sup>	65.17±0.320 <sup>ef</sup>		
6	44.41±0.208 <sup>L</sup>	-	63.18±0.758 <sup>y</sup>	41.22±0.072 <sup>N</sup>	62.26±0.226 <sup>M</sup>	62.59±0.596 <sup>kl</sup>		

หมายเหตุ : <sup>1)</sup> ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05)

<sup>2)</sup> ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05)



ภาพที่ 4.7 ปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ (A) ข้าวคอกมะลิ105 (B) สุพรรณบุรี60 และ (C) ข้าวตาแห้ง (M= ไมโครเวฟ และ S= ไอน้ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.8 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชัน หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ

การศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชัน หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำด้วย Texture Analyser โดยใช้วิธีวัดแบบ Back Extrusion เพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง และ Texture Profile Analysis เพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็ง และความเหนียว

##### 4.8.1 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกหลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ

###### 4.8.1.1 การวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุกด้วยวิธี Back Extrusion

เมื่ออุ่นข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ ด้วยไมโครเวฟและไอน้ำจะทำให้ข้าวเจ้าสุกนุ่มขึ้น แต่มีค่าความแข็งสูงกว่าข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา (อายุการเก็บ 0 วัน) ดังแสดงในตารางที่ 4.11 เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการอุ่นข้าวทั้ง 2 วิธี ถูกควบคุมให้คงที่ที่อุณหภูมิประมาณ  $70\pm 5^{\circ}\text{C}$  ทำให้มีความร้อนไม่เพียงพอที่จะทำลายพันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลของอะไมโลสซึ่งรวมตัวกันเป็นผลึกเนื่องจากการเกิดรีโทรกราเดชันในเมล็ดข้าว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงผันกลับอย่างไม่สมบูรณ์ เมล็ดข้าวสุกจึงยังคงมีความแข็งสูงกว่าข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา ในการทำลายพันธะไฮโดรเจนของอะไมโลสต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง  $100-160^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่อะไมโลเพคตินสามารถเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับได้บางส่วน (กล้าณรงค์ ศรีรอด, 2542 ; Perez *et al.*, 1993)

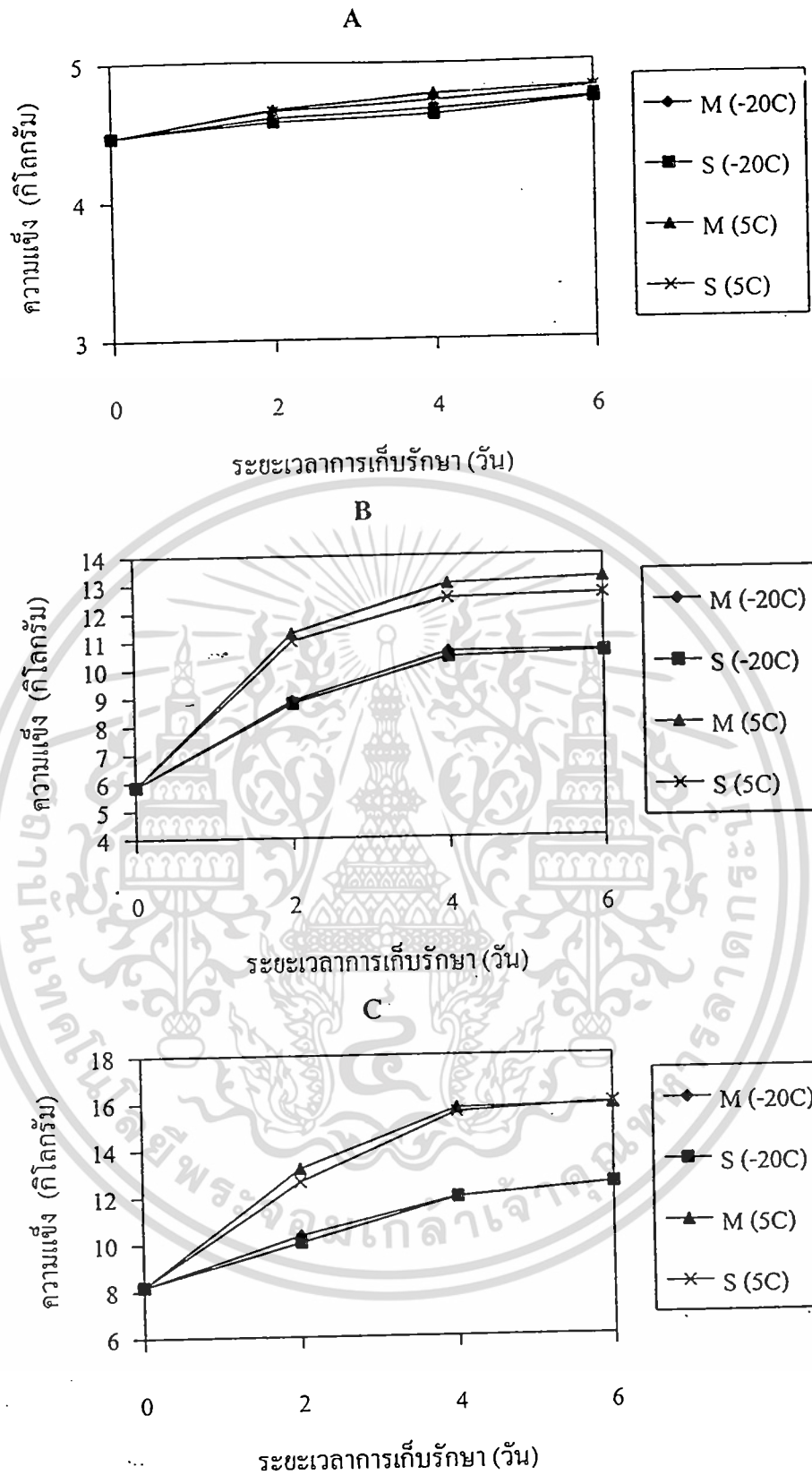
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาที่มีผลต่อค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกหลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ จากตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.8 พบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาไม่ทำให้ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เปลี่ยนแปลงมากนัก หลังจากอุ่นทั้ง 2 วิธี แต่การเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  ทำให้ค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยมากกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่ข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี 60 และขาวตาแห้งจะมีค่าความแข็งแตกต่างกันเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิและระยะเวลาแตกต่างกัน โดยการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่าความแข็งสูงกว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  เช่นกัน และค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานาน

ตารางที่ 4.11 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บรักษาที่สภาวะต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ โดยวิธีวัดแบบ Back Extrusion

		5°C			
		-20°C			
ข้าวตอกมะลิ 105	ข้าวสุกที่ผ่าน <sup>1)</sup> การเก็บรักษา	วิธีการอุ่น		วิธีการอุ่น	
		ไมโครเวฟ <sup>2)</sup>	ไอน้ำ <sup>2)</sup>	ไมโครเวฟ <sup>2)</sup>	ไอน้ำ <sup>2)</sup>
0	4.47±0.100 <sup>T</sup>	-	-	4.47±0.100 <sup>T</sup>	-
2	4.84±0.037 <sup>S</sup>	4.60±0.036 <sup>m</sup>	4.57±0.052 <sup>m</sup>	5.73±0.037 <sup>O</sup>	4.64±0.026 <sup>m</sup>
4	5.07±0.083 <sup>R</sup>	4.67±0.020 <sup>m</sup>	4.63±0.030 <sup>m</sup>	6.00±0.020 <sup>O</sup>	4.73±0.055 <sup>m</sup>
6	6.26±0.035 <sup>O</sup>	4.74±0.062 <sup>m</sup>	4.73±0.060 <sup>m</sup>	7.87±0.015 <sup>N</sup>	4.81±0.036 <sup>N</sup>
ข้าวตอกมะลิ 60					
0	5.86±0.036 <sup>O</sup>	-	-	5.86±0.036 <sup>O</sup>	-
2	9.42±0.070 <sup>L</sup>	8.90±0.043 <sup>k</sup>	8.79±0.088 <sup>k</sup>	12.89±0.023 <sup>H</sup>	11.00±0.930 <sup>R</sup>
4	11.91±0.020 <sup>L</sup>	10.60±0.087 <sup>h</sup>	10.40±0.070 <sup>m</sup>	14.85±0.030 <sup>F</sup>	12.50±0.045 <sup>d</sup>
6	12.34±0.156 <sup>L</sup>	10.62±0.026 <sup>h</sup>	10.55±0.040 <sup>m</sup>	15.53±0.090 <sup>C</sup>	12.61±0.036 <sup>d</sup>
ข้าวตอกแห้ง					
0	8.19±0.066 <sup>N</sup>	-	-	8.19±0.066 <sup>N</sup>	-
2	11.01±0.005 <sup>K</sup>	10.34±0.045 <sup>L</sup>	10.04±0.087 <sup>L</sup>	15.05±0.035 <sup>B</sup>	12.63±0.060 <sup>d</sup>
4	13.21±0.005 <sup>C</sup>	11.94±0.020 <sup>C</sup>	11.92±0.020 <sup>C</sup>	17.09±0.010 <sup>B</sup>	15.55±0.020 <sup>h</sup>
6	14.59±0.323 <sup>F</sup>	12.50±0.043 <sup>d</sup>	12.47±0.052 <sup>d</sup>	17.38±0.070 <sup>A</sup>	15.92±0.052 <sup>d</sup>

หมายเหตุ : <sup>1)</sup> ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

<sup>2)</sup> ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )



ภาพที่ 4.8 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ โดยใช้วิธีวัดแบบ Back Extrusion (A) ข้าวดอกมะลิ105 (B) สุพรรณบุรี60 และ (C) ข้าวตาแห้ง (M = ไมโครเวฟ และ S = ไอน้ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.8.1.2 การวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุกด้วยวิธี Texture Profile Analysis

เมื่อวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ ด้วยวิธี Texture Profile Analysis ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุกด้วยวิธี Back Extrusion ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.12 และภาพที่ 4.9 โดยพบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) การเก็บรักษาข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่าความแข็งสูงกว่าการเก็บรักษาข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Kum *et al.* (1996) พบว่าการอุ่นข้าวสุกเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  ด้วยไมโครเวฟ ข้าวสุกจะมีค่าความแข็งลดลงและมีค่าความแข็งน้อยกว่าการอุ่นข้าวสุกเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $-5^{\circ}\text{C}$  และ  $15^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นจากผลการทดลองอาจสรุปได้ว่าอุณหภูมิการเก็บรักษาเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุก

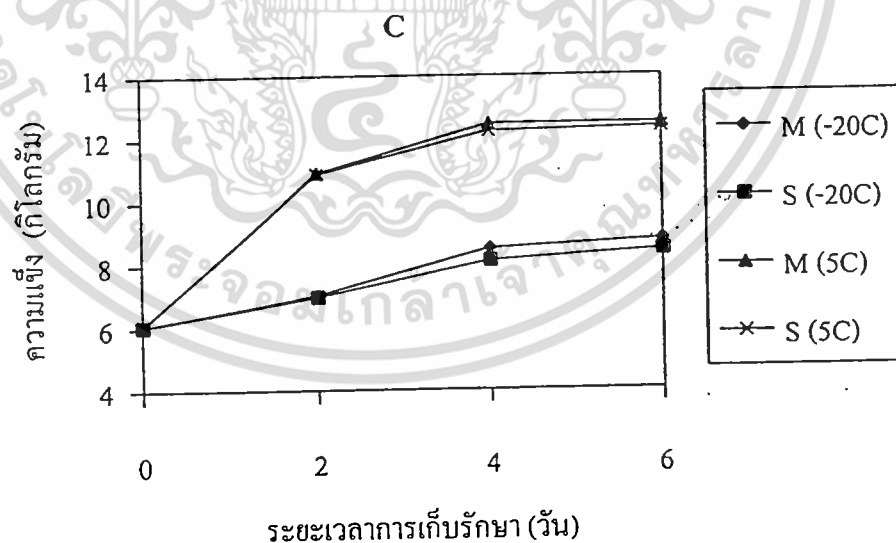
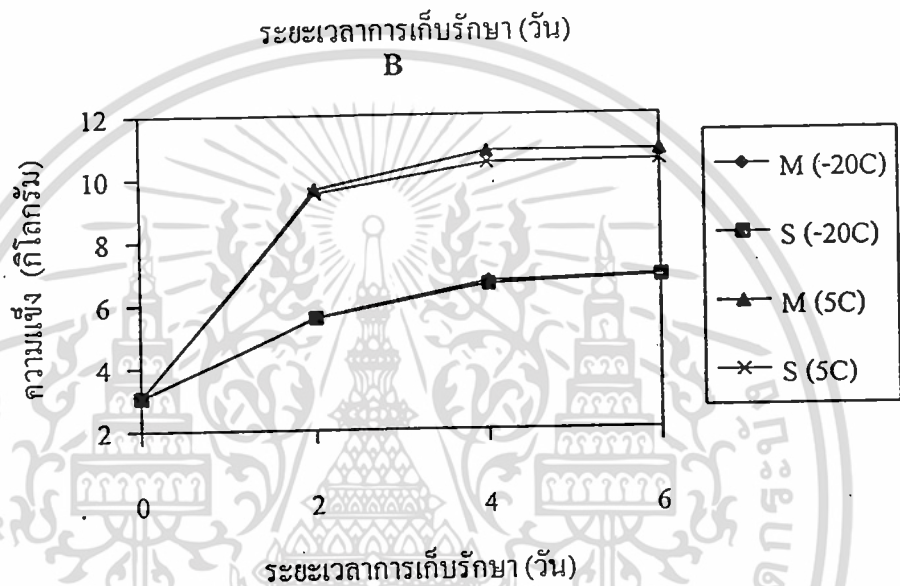
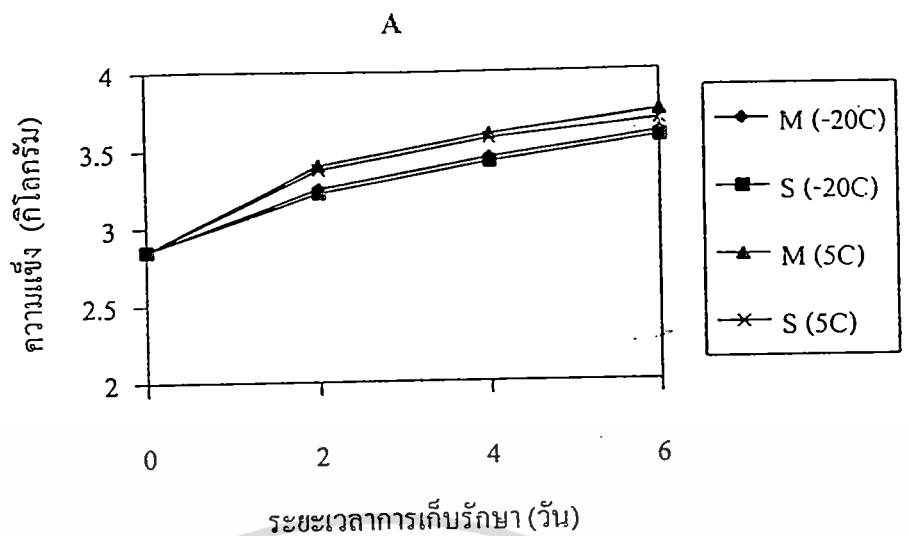
จากผลการทดลองเมื่อวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุกด้วยวิธี Back Extrusion และ Texture Profile Analysis พบว่าค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกหลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ มีความแตกต่างกันน้อยมาก หรือกล่าวได้ว่าการอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ ไม่มีผลต่อค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุก ดังนั้นการเลือกวิธีการอุ่นข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ ที่เกิดรีโทรกราเดชัน สามารถเลือกใช้วิธีการอุ่นข้าวเจ้าสุกด้วยไมโครเวฟหรือไอน้ำก็ได้ แต่การอุ่นด้วยไอน้ำจะใช้เวลามากกว่าการอุ่นด้วยไมโครเวฟ

ตารางที่ 4.12 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อเก็บรักษาที่สภาวะต่าง ๆ หลังจากนำมาอุณหภูมิด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ โดยใช้วิธีวัดแบบ Texture Profile Analysis

	-20°C				5°C			
	ข้าวสุกที่ผ่าน <sup>1)</sup>		วิธีการอุ่น		ข้าวสุกที่ผ่าน <sup>1)</sup>		วิธีการอุ่น	
	การเก็บรักษา	ไมโครเวฟ <sup>2)</sup>	ไอน้ำ <sup>2)</sup>	การเก็บรักษา	ไมโครเวฟ <sup>2)</sup>	ไอน้ำ <sup>2)</sup>		
<b>ข้าวหอมมะลิ105</b>								
0	2.85±0.034 <sup>S</sup>	3.25±0.020 <sup>MI</sup>	3.22±0.010 <sup>NI</sup>	2.85±0.034 <sup>S</sup>	-	-	-	-
2	3.27±0.034 <sup>O</sup>	3.45±0.078 <sup>MI</sup>	3.42±0.156 <sup>MI</sup>	4.36±0.000 <sup>N</sup>	3.40±0.070 <sup>MI</sup>	3.37±0.130 <sup>NI</sup>	3.40±0.070 <sup>MI</sup>	3.37±0.130 <sup>NI</sup>
4	3.73±0.040 <sup>P</sup>	3.60±0.020 <sup>MI</sup>	3.57±0.050 <sup>MI</sup>	5.67±0.070 <sup>M</sup>	3.60±0.049 <sup>MI</sup>	3.57±0.100 <sup>MI</sup>	3.60±0.049 <sup>MI</sup>	3.57±0.100 <sup>MI</sup>
6	4.08±0.010 <sup>O</sup>	-	-	6.33±0.015 <sup>K</sup>	3.74±0.115 <sup>S</sup>	3.68±0.121 <sup>S</sup>	3.74±0.115 <sup>S</sup>	3.68±0.121 <sup>S</sup>
<b>สุพรรณบุรี60</b>								
0	3.07±0.037 <sup>R</sup>	-	-	3.07±0.037 <sup>N</sup>	-	-	-	-
2	7.80±0.011 <sup>I</sup>	5.60±0.010 <sup>I</sup>	5.57±0.101 <sup>I</sup>	9.61±0.011 <sup>II</sup>	9.65±0.052 <sup>F</sup>	9.53±0.036 <sup>F</sup>	9.65±0.052 <sup>F</sup>	9.53±0.036 <sup>F</sup>
4	10.93±0.015 <sup>O</sup>	6.72±0.640 <sup>I</sup>	6.61±0.010 <sup>K</sup>	13.47±0.055 <sup>I</sup>	10.83±0.020 <sup>S</sup>	10.47±0.043 <sup>I</sup>	10.83±0.020 <sup>S</sup>	10.47±0.043 <sup>I</sup>
6	11.04±0.005 <sup>F</sup>	6.88±0.078 <sup>II</sup>	6.84±0.078 <sup>I</sup>	14.60±0.049 <sup>II</sup>	10.85±0.087 <sup>F</sup>	10.53±0.020 <sup>I</sup>	10.85±0.087 <sup>F</sup>	10.53±0.020 <sup>I</sup>
<b>ข้าวตาแห้ง</b>								
0	6.06±0.005 <sup>L</sup>	-	-	6.06±0.005 <sup>L</sup>	-	-	-	-
2	9.33±0.005 <sup>I</sup>	7.04±0.078 <sup>I</sup>	6.98±0.060 <sup>II</sup>	11.05±0.036 <sup>F</sup>	10.94±0.045 <sup>S</sup>	10.90±0.026 <sup>S</sup>	10.94±0.045 <sup>S</sup>	10.90±0.026 <sup>S</sup>
4	12.86±0.025 <sup>E</sup>	8.51±0.055 <sup>S</sup>	8.13±0.026 <sup>I</sup>	14.57±0.015 <sup>II</sup>	12.46±0.087 <sup>F</sup>	12.25±0.087 <sup>b</sup>	12.46±0.087 <sup>F</sup>	12.25±0.087 <sup>b</sup>
6	13.14±0.041 <sup>O</sup>	8.78±0.043 <sup>I</sup>	8.44±0.078 <sup>S</sup>	15.78±0.032 <sup>A</sup>	12.50±0.030 <sup>S</sup>	12.35±0.062 <sup>ab</sup>	12.50±0.030 <sup>S</sup>	12.35±0.062 <sup>ab</sup>

หมายเหตุ : <sup>1)</sup> ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05)

<sup>2)</sup> ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05)



ภาพที่ 4.9 ความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ โดยใช้วิธีวัดแบบ Texture Profile Analysis (A) ข้าวคอกมะติ105 (B) สุพรรณบุรี60 และ (C) ข้าวตาแห้ง (M = ไมโครเวฟ และ S = ไอน้ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.8.2 ความเหนียวของข้าวเจ้าสุกหลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ

ข้าวเจ้าสุกที่มีปริมาณอะไมโลสสูง เมื่อเกิดรีโทรกราเดชันจะมีค่าความเหนียวต่ำกว่าข้าวเจ้าสุกที่มีปริมาณอะไมโลสปานกลางและต่ำ ดังนั้นเมื่อนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้งจึงยังคงมีค่าความเหนียวต่ำกว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 และขาวดอกมะลิ105 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.10 และเมื่อพิจารณาวิธีการอุ่น อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน พบว่าข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ ที่อุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำจะมีค่าความเหนียวสูงกว่าข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการอุ่นเมื่อเก็บรักษานาน 2 4 และ 6 วัน แต่มีค่าความเหนียวต่ำกว่าข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา

การเก็บรักษาข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  เมื่อนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำจะมีความเหนียวสูงกว่าการเก็บรักษาข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  โดยที่ข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 และขาวตาแห้งจะมีค่าความเหนียวลดลงในช่วง 3 วันแรกของการเก็บรักษา และมีแนวโน้มคงที่เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ลดลงเล็กน้อยในช่วงแรกของการเก็บรักษา และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษามากกว่า 6 วัน ทั้ง 2 อุณหภูมิการเก็บรักษา

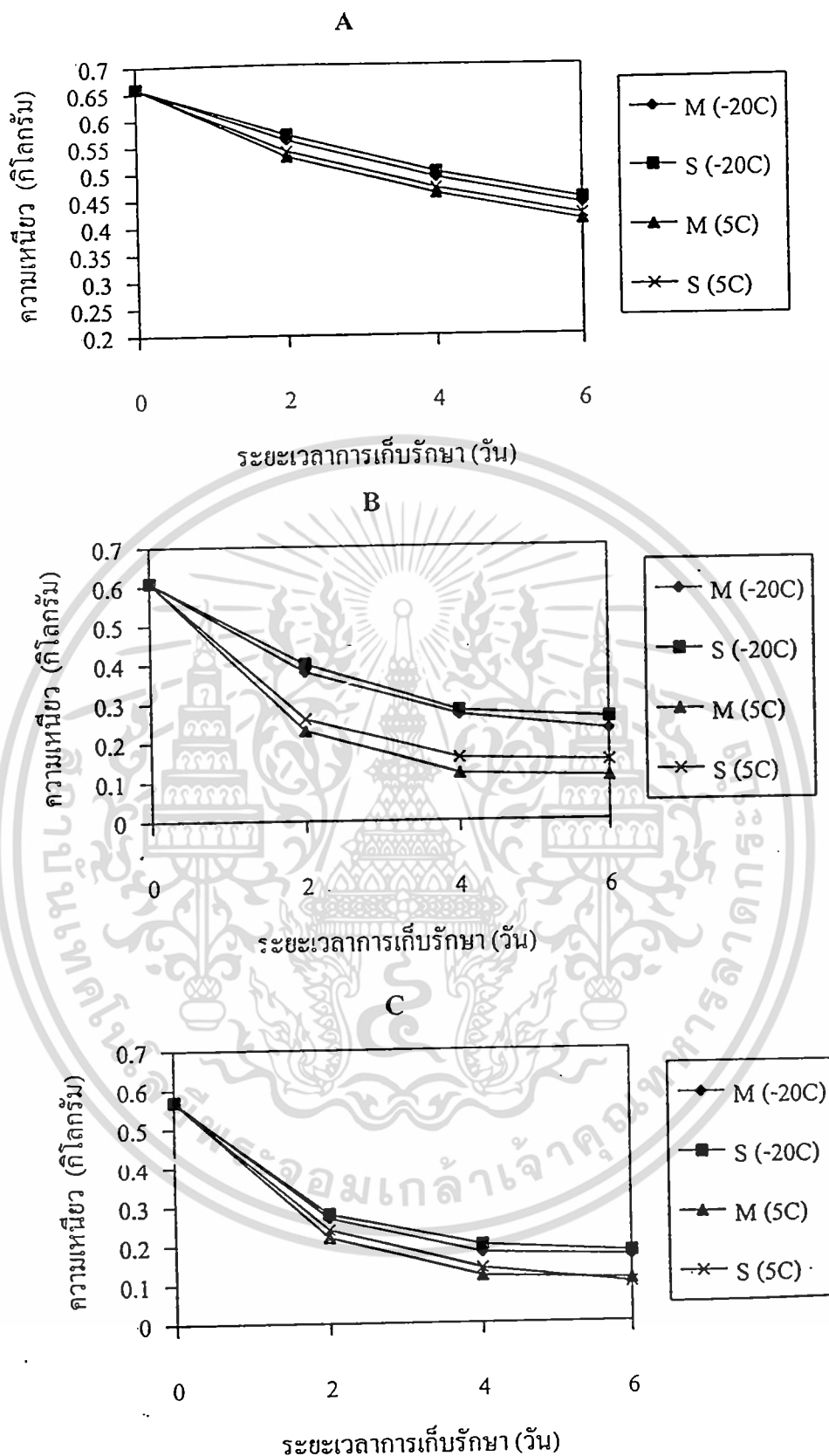
ดังนั้นจากผลการทดลองศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกที่เกิดรีโทรกราเดชัน หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ อาจกล่าวได้ว่าการอุ่นข้าวเจ้าสุกด้วยไมโครเวฟและไอน้ำจะช่วยลดความแข็งของข้าวเจ้าสุกลงได้ แต่ไม่ช่วยเพิ่มความเหนียวของข้าวเจ้าสุกมากนัก

**ตารางที่ 4.13** ความหนึ่ของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่างๆเมื่อเก็บรักษาที่สภาวะต่างๆ หลังจากนํามาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอนํ้าโดยใช้วิธีวัดแบบ Texture Profile Analysis

ข้าวตอกมะลิ105	-20°C		5°C	
	วิธีการอุ่น		วิธีการอุ่น	
	ข้าวสุกที่ผ่าน <sup>1)</sup> การเก็บรักษา	ไมโครเวฟ <sup>2)</sup> ไอนํ้า <sup>2)</sup>	ข้าวสุกที่ผ่าน <sup>1)</sup> การเก็บรักษา	ไมโครเวฟ <sup>2)</sup> ไอนํ้า <sup>2)</sup>
0	0.66±0.005 <sup>A</sup>	0.56±0.034 <sup>bc</sup>	0.66±0.005 <sup>A</sup>	0.54±0.026 <sup>bc</sup>
2	0.53±0.040 <sup>cd</sup>	0.49±0.079 <sup>de</sup>	0.49±0.052 <sup>DE</sup>	0.47±0.045 <sup>ef</sup>
4	0.48±0.030 <sup>EF</sup>	0.44±0.026 <sup>ef</sup>	0.41±0.010 <sup>FG</sup>	0.42±0.017 <sup>fg</sup>
6	0.40±0.025 <sup>FO</sup>	0.38±0.122 <sup>f</sup>	0.36±0.036 <sup>GH</sup>	0.26±0.026 <sup>gh</sup>
สุพรรณบุรี60				
0	0.61±0.020 <sup>AB</sup>	0.27±0.010 <sup>hi</sup>	0.61±0.020 <sup>AB</sup>	0.16±0.062 <sup>lmn</sup>
2	0.33±0.030 <sup>HI</sup>	0.27±0.010 <sup>hi</sup>	0.27±0.043 <sup>I</sup>	0.15±0.017 <sup>lmn</sup>
4	0.21±0.043 <sup>K</sup>	0.23±0.003 <sup>hij</sup>	0.13±0.043 <sup>LMN</sup>	0.26±0.026 <sup>lmn</sup>
6	0.20±0.020 <sup>K</sup>	0.18±0.043 <sup>klm</sup>	0.12±0.043 <sup>mn</sup>	0.11±0.026 <sup>nm</sup>
ขาวตาแห้ง				
0	0.57±0.010 <sup>bc</sup>	0.17±0.020 <sup>klm</sup>	0.57±0.010 <sup>bc</sup>	0.24±0.060 <sup>hi</sup>
2	0.30±0.060 <sup>U</sup>	0.17±0.020 <sup>klm</sup>	0.21±0.052 <sup>K</sup>	0.14±0.036 <sup>lmn</sup>
4	0.17±0.045 <sup>KL</sup>	0.17±0.020 <sup>klm</sup>	0.10±0.026 <sup>MN</sup>	0.11±0.017 <sup>nm</sup>
6	0.15±0.010 <sup>KLM</sup>	0.17±0.020 <sup>klm</sup>	0.08±0.026 <sup>N</sup>	0.11±0.017 <sup>nm</sup>

หมายเหตุ : <sup>1)</sup> ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05)

<sup>2)</sup> ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05)



ภาพที่ 4.10 ความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ โดยใช้วิธีวัดแบบ Texture Profile Analysis (A) ข้าวดอกมะลิ105 (B) สุพรรณบุรี60 และเอกสารนี้เป็นเอกสุ (C) ข้าวตาแห้ง (M = ไมโครเวฟ และ S = ไอน้ำ) ไม่นอนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.9 การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวเจ้าสุกหลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 สุพรรณบุรี 60 และขาวตาแห้ง เมื่อเก็บรักษาที่สภาวะต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ โดยทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคโดยใช้การชิมแล้วให้คะแนน ในด้านลักษณะปรากฏ ความแข็ง ความเหนียว และการยอมรับรวมของข้าวเจ้าสุกในวันที่ 2 4 และ 6 วันของการเก็บรักษาเปรียบเทียบกับข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา โดยใช้วิธี Scoring test ซึ่งแบบทดสอบที่ใช้เป็นแบบ Descriptive Scoring (แสดงในภาคผนวก จ) ได้ผลการทดลองดังนี้

##### 4.9.1 ลักษณะปรากฏ

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ ในด้านลักษณะปรากฏ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ ในวันที่ 2 4 และ 6 วันของการเก็บรักษา แสดงดังตารางที่ 4.14 เมื่อเปรียบเทียบพันธุ์ข้าว พบว่าข้าวพันธุ์ขาวตาแห้งซึ่งเป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูง หลังจากนำมาอุ่นจะมีคะแนนเฉลี่ยด้านลักษณะปรากฏและความชุ่มของข้าวมากกว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี 60 และขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวอะไมโลสปานกลางและต่ำ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน พบว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้งมีคะแนนลักษณะปรากฏเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเก็บนาน 6 วัน โดยมีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ  $4.25 \pm 0.71$  ซึ่งข้าวเจ้าสุกมีลักษณะชุ่มเกือบทั้งเมล็ดถึงชุ่มทั้งเมล็ด ในขณะที่ข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี 60 มีคะแนนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ  $3.45 \pm 0.68$  ซึ่งเป็นลักษณะข้าวชุ่มครึ่งเมล็ดถึงชุ่มเกือบทั้งเมล็ด และข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีคะแนนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ  $2.65 \pm 0.48$  ซึ่งข้าวเจ้าสุกมีลักษณะชุ่มเล็กน้อยถึงชุ่มครึ่งเมล็ด

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิการเก็บรักษา พบว่าการเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  จะทำให้คะแนนเฉลี่ยด้านลักษณะปรากฏของข้าวเจ้าสุกต่ำกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  นั่นคือข้าวเจ้าสุกมีความใกล้เคียงกับข้าวปกติหรือมีความชุ่มน้อยกว่านั่นเอง และจากการทดลองพบว่าวิธีการอุ่นทั้ง 2 วิธีไม่ทำให้เกิดความแตกต่างของข้าวเจ้าสุกในด้านลักษณะปรากฏ เมื่อเปรียบเทียบที่พันธุ์ข้าว อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน

ตารางที่ 4.14 คะแนนเฉลี่ยทางด้านลักษณะปรากฏของข้าวเจ้าสุกพันธ์ต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ ในวันที่ 2 4 และ 6 วันของการเก็บรักษา

ระยะเวลา การเก็บ (วัน)	คะแนนเฉลี่ยค่าเชิงเบเนมตรฐาน*											
	ข้าวดอกมะลิ105				สุพรรณบุรี60				ขาวตาแห้ง			
	-20°C		5°C		-20°C		5°C		-20°C		5°C	
	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ
2	1.20±0.41 <sup>a</sup>	1.20±0.41 <sup>a</sup>	2.20±0.52 <sup>b</sup>	2.10±0.67 <sup>b</sup>	1.30±0.47 <sup>a</sup>	1.45±0.51 <sup>a</sup>	2.35±0.58 <sup>b</sup>	2.50±0.60 <sup>b</sup>	2.45±0.68 <sup>b</sup>	2.45±0.75 <sup>b</sup>	3.55±0.60 <sup>b</sup>	3.45±0.82 <sup>b</sup>
4	1.25±0.44 <sup>a</sup>	1.30±0.47 <sup>a*</sup>	1.95±0.68 <sup>a</sup>	1.30±0.47 <sup>a*</sup>	2.50±1.05 <sup>b</sup>	3.25±1.51 <sup>b</sup>	4.05±0.88 <sup>b</sup>	4.00±0.79 <sup>b</sup>	2.50±0.60 <sup>a</sup>	2.55±0.51 <sup>a</sup>	4.40±0.50 <sup>b</sup>	4.35±0.58 <sup>b</sup>
6	1.50±0.51 <sup>a</sup>	1.65±0.48 <sup>a</sup>	2.45±0.60 <sup>a</sup>	2.65±0.48 <sup>a</sup>	2.75±0.96 <sup>b</sup>	2.35±1.04 <sup>b</sup>	3.45±0.68 <sup>b</sup>	3.45±0.82 <sup>b</sup>	2.30±0.57 <sup>a</sup>	2.40±0.69 <sup>a</sup>	4.25±0.71 <sup>b</sup>	4.10±0.59 <sup>b</sup>

หมายเหตุ ① ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) เป็นการเปรียบเทียบลักษณะปรากฏของข้าวเจ้าสุกพันธ์ต่าง ๆ เมื่อผ่านการเก็บรักษาต่างกัน  
 ② ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) เป็นการเปรียบเทียบลักษณะปรากฏของข้าวเจ้าสุกพันธ์ต่าง ๆ เมื่อวิธีการอุ่นและอุณหภูมิการเก็บรักษาต่างกัน  
 \* 1=ไม่เสียดข้าวสวยลักษณะปกติ 2=เมล็ดข้าวุ่นเล็กน้อย 3=ุ่นเล็กน้อย 4=ุ่นเกือบทั้งหมด และ 5=ุ่นทั้งหมด

#### 4.9.2 ความแข็ง

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสในด้านความแข็งของข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ ในวันที่ 2 4 และ 6 วันของการเก็บรักษา แสดงดังตารางที่ 4.15 เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน พบว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้งมีคะแนนเฉลี่ยด้านความแข็งสูงสุด โดยมีคะแนนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ  $6.15 \pm 0.36$  ซึ่งข้าวเจ้าสุกจะมีลักษณะค่อนข้างแข็งมาก ในขณะที่ข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุวรรณบุรี 60 มีคะแนนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ  $5.30 \pm 0.73$  เมล็ดข้าวจะมีลักษณะค่อนข้างแข็ง และข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีคะแนนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ  $2.75 \pm 0.55$  ซึ่งข้าวเจ้าสุกจะมีลักษณะค่อนข้างนุ่มมากถึงค่อนข้างนุ่ม ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองวัดความแข็งของข้าวเจ้าสุกด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการเก็บรักษา พบว่าการเก็บที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  คะแนนเฉลี่ยด้านความแข็งของข้าวเจ้าสุกจะสูงกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) กล่าวคือเมล็ดข้าวเจ้าสุกจะมีความแข็งมากกว่านั่นเอง และจากการทดลองพบว่า วิธีการอุ่นที่แตกต่างกัน ไม่มีผลต่อความแข็งของข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเก็บรักษาเมื่อเปรียบเทียบที่พันธุ์ข้าว อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน

#### 4.9.3 ความเหนียว

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความเหนียวของข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ ในวันที่ 2 4 และ 6 วันของการเก็บรักษา ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.16 พบว่าคะแนนเฉลี่ยด้านความเหนียวมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น โดยข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีคะแนนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ  $4.65 \pm 0.48$  ซึ่งข้าวเจ้าสุกมีลักษณะค่อนข้างเหนียวถึงไม่เหนียวหรือร่วนจนเกินไป ในขณะที่ข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุวรรณบุรี 60 และขาวตาแห้งมีคะแนนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ  $5.45 \pm 0.68$  และ  $5.45 \pm 0.75$  ตามลำดับ เมล็ดข้าวเจ้าสุกจะมีลักษณะค่อนข้างร่วนถึงค่อนข้างร่วนมาก และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิการเก็บรักษา พบว่าการเก็บที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  จะมีคะแนนเฉลี่ยสูงกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  แสดงว่าเมล็ดข้าวเจ้าสุกมีลักษณะค่อนข้างร่วนมากกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีลักษณะค่อนข้างเหนียว และจากการทดลองพบว่าวิธีการอุ่นที่แตกต่างกัน ไม่มีผลต่อความเหนียวของข้าวเจ้าสุกเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.15 คะแนนเฉลี่ยทางด้านความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ หลังจกนึ่งมาอยู่ในถ้วยไมโครเวฟและไอน้ำ ในวันที่ 2 4 และ 6 วันของการเก็บรักษา

ระยะเวลา การเก็บ (วัน)	คะแนนเฉลี่ยค่าแข็งบนมาตรฐาน*										
	ข้าวดอกมะลิ105			สุพรรณบุรี60							
	5°C		-20°C	5°C		-20°C					
ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ				
2	<sup>a</sup> 1.55±0.51 <sup>c</sup>	<sup>a</sup> 1.85±0.48 <sup>c</sup>	<sup>a</sup> 2.60±0.50 <sup>d</sup>	<sup>a</sup> 2.75±0.55 <sup>d</sup>	<sup>a</sup> 2.80±0.41 <sup>d</sup>	<sup>b</sup> 3.35±0.48 <sup>c</sup>	<sup>b</sup> 4.50±0.51 <sup>a</sup>	<sup>b</sup> 3.50±0.60 <sup>c</sup>	<sup>b</sup> 3.30±0.57 <sup>c</sup>	<sup>b</sup> 3.90±0.64 <sup>b</sup>	<sup>b</sup> 3.45±0.60 <sup>c</sup>
4	<sup>a</sup> 1.65±0.67 <sup>c</sup>	<sup>a</sup> 1.40±0.50 <sup>c</sup>	<sup>b</sup> 1.75±0.44 <sup>c</sup>	<sup>b</sup> 1.80±0.41 <sup>c</sup>	<sup>a</sup> 4.35±0.48 <sup>b</sup>	<sup>a</sup> 3.95±0.60 <sup>cd</sup>	<sup>ab</sup> 4.85±1.08 <sup>a</sup>	<sup>ab</sup> 3.75±0.63 <sup>d</sup>	<sup>b</sup> 4.80±0.69 <sup>a</sup>	<sup>ab</sup> 5.10±0.64 <sup>a</sup>	<sup>b</sup> 4.85±0.48 <sup>b</sup>
6	<sup>b</sup> 1.25±0.44 <sup>c</sup>	<sup>a</sup> 1.75±0.44 <sup>c</sup>	<sup>b</sup> 2.20±0.52 <sup>d</sup>	<sup>b</sup> 2.20±0.64 <sup>d</sup>	<sup>b</sup> 3.85±0.74 <sup>c</sup>	<sup>a</sup> 4.00±0.72 <sup>c</sup>	<sup>a</sup> 5.10±0.78 <sup>b</sup>	<sup>a</sup> 4.15±0.93 <sup>c</sup>	<sup>a</sup> 5.05±0.69 <sup>b</sup>	<sup>a</sup> 5.80±0.69 <sup>a</sup>	<sup>a</sup> 6.15±0.36 <sup>b</sup>

- หมายเหตุ
- ① ตัวอักษรที่ต่างกันแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) เป็นการเปรียบเทียบความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่ออายุการเก็บรักษาต่างกัน
  - ② ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) เป็นการเปรียบเทียบความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อวิธีการลุ่มและอุณหภูมิการเก็บรักษาต่างกัน
- \* 1=นุ่มหรือละเอียดเกินไป 2=ค่อนข้างนุ่มมาก 3=ค่อนข้างนุ่ม 4=ไม่แข็งหรือนุ่มจนเกินไป 5=ค่อนข้างแข็ง 6=ค่อนข้างแข็งมาก และ 7=แข็งมากเกินไป

①	②
---	---

ตารางที่ 4.16 คะแนนเฉลี่ยทางด้านความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพ่นรู้ต่าง ๆ หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ ในวันที่ 2 4 และ 6 วันของการเก็บรักษา

คะแนนเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน\*

ระยะเวลา	ข้าวดอกมะลิ105						ข้าวหอมมะลิ60					
	-20°C		5°C		-20°C		5°C		-20°C		5°C	
การเก็บ (วัน)	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ
2	3.45±0.60 <sup>a</sup>	3.40±0.50 <sup>a</sup>	4.35±0.48 <sup>b</sup>	4.20±0.61 <sup>b</sup>	3.60±0.68 <sup>c</sup>	3.45±0.51 <sup>c</sup>	5.25±0.55 <sup>d</sup>	5.20±0.69 <sup>d</sup>	3.50±0.60 <sup>e</sup>	4.20±0.90 <sup>f</sup>	5.15±0.67 <sup>g</sup>	5.45±0.75 <sup>h</sup>
4	3.45±0.60 <sup>a</sup>	3.35±0.75 <sup>a</sup>	4.50±0.51 <sup>bc</sup>	4.65±0.48 <sup>bc</sup>	4.40±0.88 <sup>cd</sup>	4.00±0.79 <sup>d</sup>	4.80±0.83 <sup>de</sup>	4.65±1.04 <sup>e</sup>	4.00±0.64 <sup>f</sup>	4.05±0.68 <sup>f</sup>	5.30±0.81 <sup>g</sup>	5.00±0.97 <sup>h</sup>
6	3.65±0.48 <sup>cd</sup>	3.60±0.50 <sup>d</sup>	4.50±0.51 <sup>b</sup>	4.45±0.60 <sup>b</sup>	4.45±0.88 <sup>b</sup>	4.30±0.80 <sup>b</sup>	5.45±0.68 <sup>e</sup>	5.20±0.76 <sup>e</sup>	4.05±0.68 <sup>bc</sup>	4.10±0.91 <sup>bc</sup>	5.20±0.83 <sup>g</sup>	5.20±0.89 <sup>g</sup>

หมายเหตุ ① ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละวัน หมายถึงมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) เป็นการเปรียบเทียบความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพ่นรู้ต่าง ๆ เมื่ออายุ

การเก็บรักษาต่างกัน

②

② ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละวัน หมายถึงมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) เป็นการเปรียบเทียบความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพ่นรู้ต่าง ๆ เมื่อวิถี

การอุ่นและอุณหภูมิการเก็บรักษาต่างกัน

\* 1=เหนียวมากเกินไป 2=ค่อนข้างเหนียวมาก 3=ค่อนข้างเหนียว 4=ไม่เหนียวหรืออ่อนเกินไป 5=ค่อนข้างอ่อน และ 7=อ่อนมากเกินไป

#### 4.9.4 การยอมรับรวม

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านการยอมรับรวมของข้าวเจ้าสุกหลังจากนำมาอุ่นพบว่าผู้บริโภคให้การยอมรับรวมข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มากกว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 และ ขาวตาแห้งทั้ง 2 อุณหภูมิการเก็บรักษา ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.17 และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิการเก็บรักษา พบว่าการเก็บที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  คะแนนเฉลี่ยด้านการยอมรับรวมสูงกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) แสดงว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิเยือกแข็งผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับมากกว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิแช่เย็นอย่างชัดเจน และจากการทดลองพบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษาและวิธีการอุ่นทั้ง 2 วิธีไม่ทำให้เกิดความแตกต่างด้านการยอมรับรวมของผู้บริโภค หรืออาจสรุปได้ว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิเยือกแข็งและอุณหภูมิแช่เย็น เมื่อนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟข้าวเจ้าสุกจะมีคุณภาพใกล้เคียงกับการอุ่นด้วยวิธีหนึ่งหรือการใช้ไอน้ำ ดังนั้นการลดการเกิดรีโทกราคะชันของข้าวเจ้าสุกเมื่อเก็บรักษาที่สภาวะต่าง ๆ สามารถใช้วิธีการอุ่นด้วยไมโครเวฟหรือไอน้ำก็ได้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม

ตารางที่ 4.17 คะแนนเฉลี่ยทางด้านกายกรรมรับรวมของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ หลังจกานำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ ในวันที่ 2 4 และ 6 วันของการเก็บรักษา

ระยะเวลา การเก็บ (วัน)	คะแนนเฉลี่ยค่าเชิงเบเนนมาตรฐาน*											
	ข้าวดอกมะลิ 105				สุพรรณบุรี 60				ขาวตาแห้ง			
	-20°C		5°C		-20°C		5°C		-20°C		5°C	
ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	ไมโครเวฟ	ไอน้ำ	
2	5.65±0.67 <sup>a</sup>	5.00±0.91 <sup>b</sup>	5.35±0.93 <sup>b</sup>	5.70±0.65 <sup>a</sup>	4.85±0.81 <sup>bc</sup>	3.75±1.01 <sup>c</sup>	1.70±0.73 <sup>c</sup>	1.65±0.74 <sup>c</sup>	4.80±0.52 <sup>cd</sup>	4.45±0.51 <sup>d</sup>	1.70±0.80 <sup>c</sup>	1.65±1.04 <sup>d</sup>
4	5.85±0.67 <sup>a</sup>	4.50±0.51 <sup>bc</sup>	5.55±0.60 <sup>a</sup>	5.90±0.71 <sup>a</sup>	4.00±1.52 <sup>cd</sup>	3.60±1.23 <sup>d</sup>	2.20±0.89 <sup>c</sup>	2.30±1.12 <sup>c</sup>	4.60±0.68 <sup>b</sup>	4.35±0.58 <sup>bc</sup>	1.40±0.59 <sup>c</sup>	1.35±0.58 <sup>c</sup>
6	5.50±0.88 <sup>a</sup>	4.80±0.95 <sup>bc</sup>	5.25±1.01 <sup>ab</sup>	5.55±0.88 <sup>ab</sup>	3.70±1.03 <sup>d</sup>	3.90±0.91 <sup>d</sup>	1.80±0.76 <sup>c</sup>	1.80±0.89 <sup>c</sup>	4.80±0.69 <sup>bc</sup>	4.62±0.82 <sup>c</sup>	1.70±0.73 <sup>c</sup>	1.40±0.68 <sup>c</sup>

หมายเหตุ ① ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึงมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) เป็นการเปรียบเทียบการยอมรับรวมของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่ออายุการเก็บรักษาต่างกัน  
 ② ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึงมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) เป็นการเปรียบเทียบการยอมรับรวมของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อวิถีการอุ่นและอุณหภูมิการเก็บรักษาต่างกัน  
 \* 1=ไม่ชอบมากที่สุด 2=ไม่ชอบปานกลาง 3=ไม่ชอบเล็กน้อย 4=บอกไม่ได้ว่าชอบหรือไม่ชอบ 5=ชอบเล็กน้อย 6=ชอบมาก และ 7=ชอบมากที่สุด

## สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 สุพรรณบุรี60 และข้าวตาแห้ง เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  นาน 7 วัน ด้วยวิธี Differential Scanning Calorimeter (DSC) การศึกษาระดับการเกิดเจลลาตินในเซชัน และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกด้วย Texture Analyser โดยใช้วิธีวัดแบบ Back Extrusion (BE) และ Texture Profile Analysis (TPA) ตลอดจนศึกษาการลดการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชัน โดยใช้วิธีอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ พบว่า

1. การเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกในระหว่างการเก็บรักษามีผลทำให้ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันและความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณความชื้น ระดับการเกิดเจลลาตินในเซชันและความเหนียวของข้าวเจ้าสุกลดลง โดยพบว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวตาแห้งซึ่งเป็นข้าวชนิดที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันสูงที่สุด รองลงมาคือข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 และข้าวดอกมะลิ105 ซึ่งเป็นข้าวชนิดอะไมโลสปานกลางและต่ำ ตามลำดับ ยกเว้นข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันสูงกว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวตาแห้ง เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$
2. การเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันจะต่ำกว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$
3. ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวตาแห้งและสุพรรณบุรี60 ซึ่งเป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงและปานกลางจะมีอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรกของการเก็บรักษา และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเก็บรักษานาน 7 วัน หลังจากนั้นมีความโน้มถ่วงที่ ในขณะที่ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 ซึ่งเป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ อัตราการเกิดรีโทรกราเดชันจะต่ำมากในช่วง 2 วันแรกของการเก็บรักษา และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและคาดว่าอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันจะคงที่เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น

จากข้อมูลค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชัน พบว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 และข้าวตาแห้งจะมีค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันสูงที่สุดในช่วง 5-6 วันแรกของการเก็บรักษา ในขณะที่ข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 อัตราการเกิดรีโทรกราเดชันจะต่ำมากในช่วงแรกของการเก็บรักษา และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเก็บข้าวเจ้าสุกเป็นเวลานาน 7 วัน ทำให้ไม่สามารถทำนายระยะเวลาการเก็บรักษาที่ทำให้ข้าวเจ้าสุกมีค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันสูงสุดได้

4. จากการวิเคราะห์ที่มเมเมัมพันธ์ระหว่างตัวแปร พบว่าค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ มีความสัมพันธ์อย่างสูงในเชิงบวกกับค่าความแข็งในทุก ๆ อุณหภูมิเมื่อวัดด้วยวิธี Texture Profile Analysis และ Back Extrusion โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุดเท่ากับ 1.000 และ 0.947 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์อย่างสูงในเชิงลบกับค่าความเหนียว โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุดเท่ากับ -0.976 และมีความสัมพันธ์ปานกลางในเชิงลบกับระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเจ้าสุก แสดงว่าถ้าค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาจะมีผลทำให้ค่าความแข็งของข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเหนียวและระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวเจ้าสุกจะลดลง

5. เมื่อนำข้าวเจ้าสุกทั้ง 3 พันธุ์ ที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชันมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ พบว่าจะมีปริมาณความชื้นสูงกว่าข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการอุ่น แต่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา โดยข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้งจะมีปริมาณความชื้นสูงกว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี 60 และขาวดอกมะลิ 105 และการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  จะมีปริมาณความชื้นสูงกว่าการเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  นอกจากนี้พบว่าการอุ่นข้าวเจ้าสุกด้วยไมโครเวฟและไอน้ำจะมีปริมาณความชื้นไม่แตกต่างกัน

6. การอุ่นข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการเกิดรีโทรกราเดชันด้วยไมโครเวฟและไอน้ำจะช่วยลดความแข็งของข้าวเจ้าสุกได้ โดยข้าวเจ้าสุกจะมีค่าความแข็งต่ำกว่าข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการอุ่น แต่การอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำไม่ทำให้ค่าความเหนียวของข้าวเจ้าสุกเพิ่มขึ้นมากนัก นอกจากนี้การเก็บข้าวเจ้าสุกที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  ค่าความเหนียวของข้าวเจ้าสุกจะสูงกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  แต่มีค่าความแข็งต่ำกว่า และการอุ่นข้าวเจ้าสุกด้วยไมโครเวฟทำให้มีค่าความแข็งสูงกว่าการอุ่นด้วยไอน้ำเล็กน้อย

7. จากการศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อคุณภาพข้าวเจ้าสุก หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟและไอน้ำ พบว่าผู้บริโภคให้การยอมรับข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มากกว่าข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี 60 และขาวตาแห้ง ในขณะที่การอุ่นข้าวเจ้าสุกด้วยไมโครเวฟและไอน้ำจะไม่มีผลแตกต่างต่อการยอมรับรวมของผู้บริโภค ดังนั้นการลดการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิเยือกแข็งและแช่เย็น สามารถใช้วิธีการอุ่นด้วยไมโครเวฟหรือไอน้ำก็ได้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม

## ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 เป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันจึงต่ำมากในช่วงแรกของการเก็บรักษา ทำให้ไม่สามารถศึกษาระยะเวลาการเก็บรักษาที่ทำให้ข้าวเจ้าสุกมีอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันสูงสุดได้ ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไป ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวเจ้าสุกควรมากกว่า 7 วัน เพื่อให้สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงการเกิดรีโทรกราเดชันได้อย่างชัดเจน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2542. เทคโนโลยีของแป้ง. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรม  
เกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กิตติชัย บรรจง. 2534. “การวัดความแข็งของข้าวสุกด้วยวิธี Back Extrusion.” เกษตรพระจอม  
เกล้า. 9(3) : 21-23.
- งามชื่น คงเสรี. 2536. “ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการหุงต้มข้าวสาร.” ในรายงานสัมมนาวิชาการ  
ประจำปี 2536 กรมวิชาการเกษตร, 23-25 มีนาคม. โรงแรมมารวยการ์เด็น, กรุงเทพฯ.
- งามชื่น คงเสรี. 2540. “คุณภาพข้าวสุก.” วารสารจารย์พา. 38 : 41-44.
- จรรย์ พานิชยกุล. 2537. “แป้ง (starch) – การเปลี่ยนแปลงระหว่างการทำให้แป้งสุก.”  
วารสารจารย์พา. 11 : 22-24.
- ณรงค์ นิยมวิทย์ และ อัญชนีย์ อุทัยพัฒนาชีพ. 2528. วิทยาศาสตร์การประกอบอาหาร. ภาควิชา  
คหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปาริชาติ สุจิตานนท์ และ สุธี พรสวรรค์วงศ์. 2537. “การเปลี่ยนแปลงคุณภาพหุงต้มข้าวเมื่อเก็บ  
รักษาที่อุณหภูมิห้อง.” ปัญหาพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร,  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- รังสิตา สีมารรพ์. 2540. “ผลของพันธุ์ข้าวและอุณหภูมิในการเกิดรีโทรกราเคชั่นต่อคุณสมบัติ  
ทางกายภาพของเจลจากแป้งข้าว.” ปัญหาพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การ  
อาหาร, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- รุ่งนภา พงษ์สวัสดิ์มานิต. 2541. วิศวกรรมอาหาร : หน่วยปฏิบัติการในอุตสาหกรรม.  
พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตร  
ศาสตร์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมจินตนา สุमितสุวรรณค์. 2542. การใช้เครื่องมือวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร. ภาควิชาเทคโนโลยี  
อาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- อรพิน ภูมิภมร. 2532. เทคโนโลยีของแป้ง : เคมีของแป้งและเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์จากแป้งบาง  
ชนิดที่ผลิตในประเทศไทย. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- Anonymous. 1994. “A texture analysis study on boiled rice” *International Food Marketing  
and Technology*. 8(5) : 53-55.
- Anonymous. 2537. “Texture Profile Analysis.” *วารสารจารย์พา*. 4 : 16-17, 6 : 10-13.

- AOAC. Official Method of Analysis. 1995. 16th<sup>ed</sup>. The Association of Analysis Chemists. Arlington, Virginia.
- Atwell, W.A., Hood, L.F., Lineback D.R., Varriano-Marston, E. and Zobel, H.F. 1988. "The terminology and methodology associated with basic starch phenomena." *Cereal Food World*. 33 : 306-311.
- Birch, G.G. and Priestley, R.J. 1973. "Degree of gelatinization of cooked rice" *J. of Die Starke*. 25 : 98-100.
- Birch, G.G., Brennan, J.G., Priestley, R.J. and Sodah-Ayernor, G. 1973. The molecular basis of starch technology in new food products. *In* Molecular structure and functional of food carbohydrate. (Birch, G.G. and Green, L.F.) London : Applied science publishers.
- Borchard, W. 1996. "Rheologische untersuchungen zum einfluß von hydrokolloiden auf die Gefrier-tau-stabilitat von starkek leistem." *Starch/Starke*. 48 : 52-57.
- Buttery, R.G., Ling, L.C. and Mon, T.R. 1986. "Quantitative analysis of 2-acetyl-1-pyrrolines in rice." *J. Agric Food Chem*. 34 : 112-114.
- Champagne, E.T., Lyon, B.G., Min, B.K., Vinyard, B.T., Bett, K.L., Barton II, F.E., Webb, B.D., McClung, A.M., Moldenhauer, K.A., Linscombe, S., McKenzie, K.S. and Kohlwey, D.E. 1998. "Effects of postharvest processing on texture profile analysis of cooked rice." *Cereal Chem*. 75(2) : 181-186.
- Chang, S.M. and Liu, L.C. 1991. "Retrogradation of rice starches studied by differential scanning calorimetry and influence of sugars, NaCl Lipids." *J. of Food Sci*. 56(2) : 564-570.
- Dai, R.C., Chen, J.W., Lai, Y.C., Pai, Y.Y. and Chein, J.T. 1997. "Retrogradation kinetics and thermal properties of rice starch-lauryl alcohol complexes" (Abstract). *Food Sci, Taiwan*. 24(1) : 32-43.
- Datta, S.K. and Duggal, S.K. 1978. **Principles and practices of Rice Production**. New York : John Wiley and Son, Inc., U.S.A.
- del Mundo, A.M. 1979. **Sensory assessment of cooked milled rice**. *In* Proceeding of the workshop on Chemical Aspects of Rice Grain Quality. IRRI, Los Banos, Laguna, Philippines.

- Dollimore, D. 1997. **Thermoanalytical instrumentation and application.** *In* Analytical Instrumentation Handbook. (Ewing, G.W.) 2<sup>nd</sup> New York : Marcel Dekker, Inc.
- Eliasson, A.C. 1996. **Carbohydrates in Food.** London : Marcel Dekker, Inc.
- Eliasson, A.C. and Gudmundsson, M. 1996. **Starch : Physicochemical and functional aspects.** *In* Carbohydrates in Food (Eliasson, A.C.) New York : Marcel Dekker, Inc.
- Fan, J. and Marks, B.P. 1998. "Retrogradation kinetics of rice flours as influenced by cultivar." *Cereal Chem.* 75(1) : 153-155.
- Friedman, H.H., Whitney, J.E. and Szczesniak, A.S. 1963. "The texturometer a new instrument for objective texture measurement. *J. of Food Sci.* 28 : 390-396.
- Hizukuri, S. 1986. "Polymodal distribution of the chain length of amylopectin and its significant." *Carbohydrate Res.* 147 : 342.
- Hogan, J.T. and Deobald, H.J. 1961. "Note on a method of determining the degree milling of whole milled rice." *Cereal Chem.* 38 : 291.
- Hori, K., Purboyo, R.B.R.A., Jo, M., Akinaga, Y. and Okita, T. 1995. "Sensory evaluation of aromatic rice by japanese consumers." *ASEAN Food Journal.* 10(1) : 15-18.
- Hsu, C.L. and Heldman, D.R. 1998. "Influence of cooling rate on glass transition temperature and starch retrogradation during low temperature storage." (Abstract) [Online]. Available : <http://www.comex2.com/m/98annual/accepted/296.htm>.
- Ikeda, H., Kimura, T, Saiki, Y., Ogawa, K., Tomada, K. and Kuchiba, N. 1996. "Relation between the physicochemical properties and the structures of cooked rice (part 1)." (Abstract) *J. Home Econ. Jpn.* 49(9) : 877-887.
- Jacobson, M.R. and Bemiller, J.N. 1998. "Method for determining the rate and extent of accelerated starch retrogradation." *Cereal Chem.* 75(1) : 22-29.
- Jowitt, R. 1974. "The terminology of food texture." *J. of Texture Studies.* 5 : 351-358.
- Juliano, B.O., Onate, L.U. and del Mundo, A.M. 1965. "Relation of starch composition protein content and gelatinization temperature to cooking and eating qualities of milled rice." *Food Tech.* 19 : 1006-1011.
- Juliano, B.O. 1971. "A simplified assay for milled-rice amylose." *Cereal Sci. Today.* 16(10) : 334-360.

- Juliano, B.O., Blankeney, A.B., Breckenridge, C., Casstillo, T.D., Choudhury, N.H., Kongseree, N., Laignelet, B., Merca, F.E., Paule, C.M. and Webb, B.D. 1980. "Report of the international cooperative testing on the gel consistency of milled rice." *Riso*. 29 : 233-237.
- Juliano, B.O., Perez, C.M., Blankeney, A.B., Twasaki, T., Shibuya, N., Kuwaster, K.K., Chang, S., Laignelet, B., Lananay, B., del Mundo, A.M., Suzuki, H.I., Tsuji, S., Tokoyam, J., Takumi, K. and Webb, B.D. 1981. "International cooperative comparison of instrument methods for cooked rice texture." *J. of Texture Studies*. 12 : 17-38.
- Juliano, B.O. and Perez, C.M. 1984. "Results of collaborative test on the measurement of grain elongation of milled rice during cooking." *Cereal Sci*. 2 : 231-292.
- Kim, J.O., Kim, W.S. and Shin, M.S.K. 1997. "A comparative study on retrogradation of rice starch gels by DSC, x-ray and  $\alpha$ -amylase methods." *Starch/Starke*. 49(2) : 71-75.
- Kluciniec, J.D. and Thomson, D.B. 1999. "Amylose and amylopectin interact in retrogradation of dispersed high-amylose starch." *Cereal Chem*. 76(2) : 282-291.
- Kongseree, N. 1979. "Quality test for waxy (glutinous) rice : Proceeding of the workshop on chemical aspects of rice grain quality." *IRRI*. 303-311.
- Kum, J.S., Han, O. and Kim, Y.H. 1996. "Effect of microwave reheating on the quality of cooked rice." (Abstract). *J. of the Korean Society of Food and Nutrition*. 25(3) : 504-512.
- Levine, H. and Slade, L. 1987. *Water as a plasticizer : physicochemical aspects of low-moisture polymeric system*. In *Water Science Reviews* (Franks, F) Vol.3 Eds. Cambridge University Press.
- Lima, I. and Singh, R.P. 1993. "Objective measurement of retrogradation in cooked rice during storage." *J. of Food Quality*. 16 : 321-337.
- Lund, D.B. 1983. *Applications of differential scanning calorimetry in foods*. In *Physical Properties of food*. Westport : The AVI Publishing company, Inc.
- Lyon B.G., Champagne, E.T., Vinyard, B.T., Windham, W.R., Barton II, F.E., Webb, R.D., McClung, A.N., Moldenhauer, K.A., Linscombe, S., McKenzie, K.S. and Kohlwey, D.E. 1999. "Effects of degree of milling, drying condition, and final moisture content on sensory texture of cooked rice." *Cereal Chem*. 76(1) : 56-62.

- Lyon, B.G., Champagne, E.T., Vinyard, B.T. and Windham, W.R. 2000. "Sensory and instrumental relationships of texture of cooked rice from selected cultivars and postharvest handling practices." *Cereal Chem.* 77(1) : 64-69.
- Marchant, J.L. and Blanshard, J.M.V. 1978. "Studies of the dynamics of the gelatinization of starch granules employing a small angle light scattering system. *Starch/Starke.* 30 : 257-264.
- Marshall, W.E. 1993. *Starch gelatinization in brown and milled rice : a study using differential scanning calorimetry.* In Rice Science and Technology (Marshall, W.E. and Wadsworth, J.I.) New York : Marcel Dekker, Inc.
- Matsuo, T. and Hoshikawa, K. 1993. *Quality and shape of rice grains.* In Science of the rice plant. Vol 1. Japan : Minatoku Tokyo.
- Meullenet, J.F., Marks, B.P., Hankins, J.A., Griffin, V.K. and Daniels, M.J. 2000. "Sensory quality of cooked long-grain rice as affected by rough rice moisture content, temperature, and storage duration." *Cereal Chem.* 77(2) : 259-263.
- Mun, S.H., Kim, J.O., Lee, S.K. and Shin, M.S. 1996. "Retrogradation of sucrose fatty acid ester and soybean oil added rice flour gels." (Abstract) *Korean J. of Food Sci and Tech.* 28 (2) : 305-310.
- Noel, T.R., Ring, S.G. and Whittam, M.A. 1993. *Physical properties of starch products : structure and function.* In Food colloids and polymer : stability and mechanical properties. (Dickinson, E. and Walstra, P). Redwood Press Ltd, Malksham, Wiltshire. (or The Royal Society Of Chemistry)
- Normand, F.L. and Marshall, W.E. 1989. "Differential scanning calorimetry of whole grain milled rice and milled rice flour." *Cereal Chem.* 66(4) : 317-320.
- Oates, C.G. 1997. "Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis." *Trends in Food Science and Technology.* 8 : 375-382.
- Okabe, M. 1979. "Texture measurement of cooked rice and its relationship to the eating quality. *J. of Texture Studies.* 10 : 131-152.
- Perdon, A.A., Siebenmorgen, T.J., Buescher, R.W. and Gbur, E.E. 1999. "Starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage." *J. of Food Sci.* 64(5) : 828-832.

- Perez, C.M. and Juliano, B.O. 1981. "Texture changes and storage of rice." *J. of Texture Studies*. 12 : 321-333.
- Percz, C.M., Villareal, C.P., Juliano, B.O. and Biliaderis, C.G. 1993. "Amylopectin-staling of cooked nonwaxy milled rices and starch gels." *Cereal Chem.* 70(5) : 567-571.
- Robin, J.P., Mercier, C., Charbonniere, R. and Guilbot, J.A. 1974. "Lintnerized starches, gel filtration and enzymatic studies of insoluble residues from prolonged acid treatment of potato starch." *Cereal Chem.* 51 : 389-406.
- Schutz, H.G. and Damrell, J.D. 1974. "Prediction of hedonic ratings of rice by sensory analysis." *J. of Food Sci.* 39 : 203-206.
- Slade, L. and Levine, H. 1991. "Beyond water activity : recent advances based on an alternative approach to the assessment of food quality and safety." *Crit. Rev. Food Sci. Nutri.* 30 : 115-360.
- Szczesniak, A.S., Brandt, M.A. and Friedman, H.H. 1963. "Development of standard rating scales for mechanical parameters of texture and correlation between the objective and sensory methods of texture evaluation." *J. of Food Sci.* 28 : 397-403.
- Tako, M. and Hizukuri, S. 2000. "Retrogradation mechanism of rice starch." *Cereal Chem.* 77(4) : 473-477.
- Teo, C.H. and Seow, C.C. 1992. "A pulsed NMR method for the study of starch retrogradation." *Starch/Starke.* 44(8) : 288-292.
- Tsuji, S. 1981. "Texture measurement of rice kernels using the multiple point mensuration method." *J. of Texture Studies.* 12 : 93-105.
- Whistler, R.L. and Deniel, J.R. 1984. *Molecular structure of starch.* In *Starch : Chemistry and Technology.* (Whistler, R.L., Bemiller, J.N. and Paschall (eds), E.F.) 2<sup>nd</sup> E.D. Florida : Academic Press, Inc.
- Yrjo, R. 1995. *Phase Transition in Foods.* London : Academic Press.
- Yook, C., Pea, U.H. and Park, K.H. 1993. "Gelatinization and retrogradation characteristics of hydroxypropylated and cross-linked rice." *J. of Food Sci.* 58(2) : 405-407.
- Zheng, G.H. and Sosulski, F.W. 1998. "Determination of water separation from cooked starch and flour pastes after refrigeration and freeze-thaw." *J. of Food Sci.* 63(1) : 134-139.

## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ปริมาณอะไมโลส และระดับการขัดสี

#### 1. การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น (AOAC. Method no.32.1.03, 1995)

##### 1.1 อุปกรณ์

- 1.1.1 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
- 1.1.2 ถ้วยอลูมิเนียม
- 1.1.3 โถดูดความชื้น (Air-tight desiccator)
- 1.1.4 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

##### 1.2 วิธีวิเคราะห์

1.2.1 ชั่งน้ำหนักถ้วยอลูมิเนียมพร้อมฝา ซึ่งทำการอบที่อุณหภูมิ  $130 \pm 3^{\circ}\text{C}$  แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก นำไปอบหลายๆ ครั้งจนได้น้ำหนักคงที่

1.2.2 ชั่งตัวอย่าง 2 กรัม ใส่ถ้วยอลูมิเนียมที่ชั่งไว้แล้ว นำไปอบที่ตู้อบที่อุณหภูมิ  $130 \pm 3^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เปิดฝาชะอบ นำออกจากตู้อบและปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก นำไปอบหลายๆ ครั้งจนได้น้ำหนักคงที่

ปริมาณความชื้น(ร้อยละ) =  $\frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างและภาชนะบรรจุหลังอบ} - \text{น้ำหนักภาชนะบรรจุ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}}$

#### 2. การวิเคราะห์หาปริมาณอะไมโลส (Juliano, 1971)

##### 2.1 เครื่องมือและสารเคมี

- 2.1.1 ขวดแก้วพร้อมจุก (Volumetric flask) ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 2.1.2 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)
- 2.1.3 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) 95%
- 2.1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1 นอร์มัล
- 2.1.5 กรดอะซิติก (Glacial acetic acid) เข้มข้น 1 นอร์มัล
- 2.1.6 ไอโอดีน (Iodine)
- 2.1.7 โปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI)
- 2.1.8 โปเตโตอะไมโลส (Potato amylose)

## 2.2 การเตรียมสารเคมี

2.2.1 สารละลายไอโอดีน : ชั่งไอโอดีน 1 กรัม และโปแตสเซียมไอโอไดด์ 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับให้มีปริมาตร 500 มิลลิลิตร

2.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.09-1 นอร์มัล : ชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

2.2.3 กรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มัล : ละลายกรดอะซิติก 5.8 มิลลิลิตรในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

2.2.4 ชั่งโปเตโตอะไมโลส 0.0400 กรัม

2.2.5 ชั่ง Defatted sample 0.1000 กรัม

## 2.3 วิธีวิเคราะห์

2.3.1 การละลายแป้ง ชั่งแป้ง 0.100 กรัม ใส่ในขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร ปิดเตปเทอริลแอลกอฮอล์ 1 มิลลิลิตร เติมน้ำตัวอย่าง เขย่าเบา ๆ เพื่อเกลี่ยแป้งให้กระจายออก ระวังอย่าให้แป้งขึ้นมาเกาะตามผนังขวด ปิดเตปเตปสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล เติมลงไป 9 มิลลิลิตร พร้อมทั้งล้างแป้งที่เกาะอยู่ตามผนังขวด นำไปต้มในน้ำเดือดนาน 10 นาที แล้วจึงเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.3.2 ปิดเตปสารละลายแป้ง ปริมาตร 5 มิลลิลิตรลงในขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นประมาณ 50 มิลลิลิตร ปิดเตปกรดอะซิติก 1 นอร์มัล 1 มิลลิลิตร แล้วปิดเตปสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้

2.3.3 ทำเช่นเดียวกับข้อ 2 แต่ไม่ใส่สารตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นแบลนค์ (Blank)

2.3.4 วัดความเข้มข้นของสีสารละลายด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร อ่านค่าเป็นแอบซอร์เบ้นซ์ (Absorbance) โดยปรับค่าแบลนค์เป็นศูนย์

2.3.5 การเขียนกราฟมาตรฐาน

2.3.5.1 ชั่งโปเตโตอะไมโลส 0.400 กรัม ใส่ในขวดแก้วมีจุกขนาด 100 มิลลิลิตร และดำเนินการเช่นเดียวกับข้อ 1 เป็นสารละลายมาตรฐาน

2.3.5.2 ปิดเตปสารละลายมาตรฐาน 1 2 3 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นประมาณ 50 มิลลิลิตร ปิดเตปเติมกรดอะซิติก 1 นอร์มัล ปริมาณ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแก้วที่มีสารละลายมาตรฐาน ตามลำดับ แล้วปิดเตปเติมสารละลายไอโอดีน 2.0 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ครบ 100 มิลลิลิตร

2.3.5.3 วัดค่าแอบซอร์เบ้นซ์ตามข้อ 2.3.4

2.3.5.4 เขียนกราฟระหว่างค่าปริมาณอะไมโลส (เป็นร้อยละ 0 8 16 24 และ 32) กับค่าแอบซอร์เบ้นซ์ของสารละลายมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

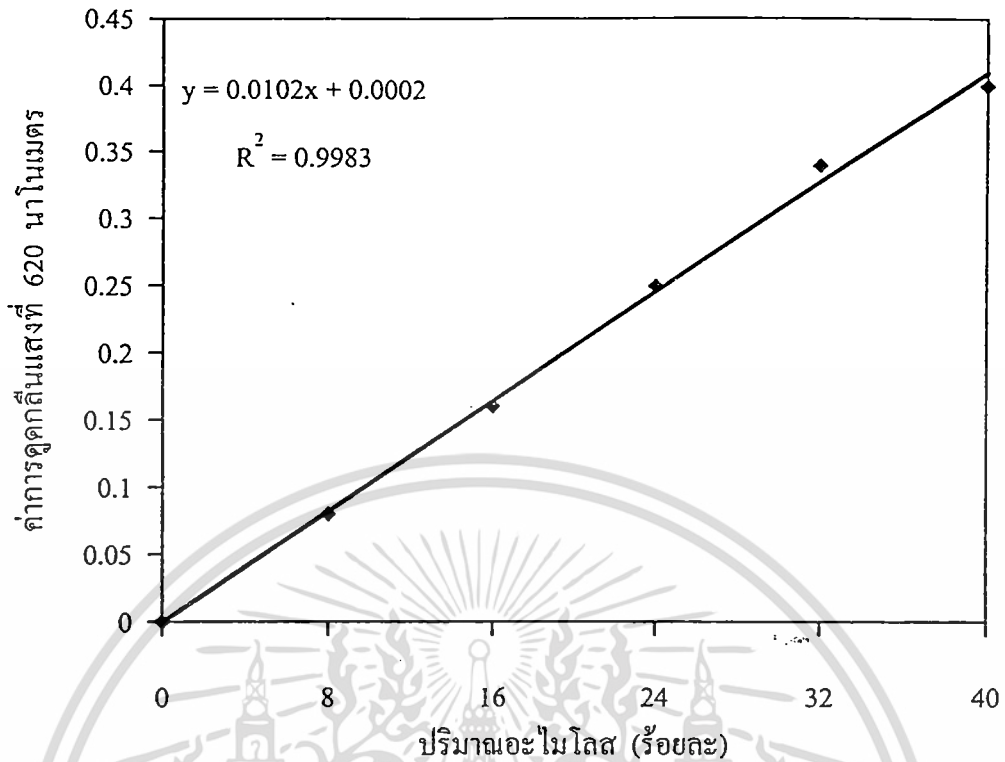
### 2.3.6 การแปลงค่าแอมพลิจูดเป็นปริมาณอะไมโลส (ร้อยละ)

นำค่าแอมพลิจูดของแต่ละตัวอย่างมาเทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วแปลงเป็นปริมาณอะไมโลส (การแปลงค่าแอมพลิจูดเป็นปริมาณอะไมโลสอาจใช้วิธีคำนวณหาสมการ Correlation regression ก็ได้)

- หมายเหตุ**
1. ในการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส ไขมันที่มีอยู่ในตัวอย่างจะทำให้ปริมาณที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงควรสกัดไขมันออกก่อน โดยใช้ปิโตรเลียมอีเธอร์หรือแอลกอฮอล์
  2. ข้าวที่นำมาวิเคราะห์ต้องนำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช ก่อน
  3. ตัวอย่างข้าวที่สกัดไขมันแล้วก่อนนำมาวิเคราะห์ควรหาความชื้นก่อน

ตารางที่ ก1 ค่ามาตรฐานการดูดกลืนแสงการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ

อะไมโลส (ร้อยละ)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
Blank	0	0	0	0
8	0.08	0.08	0.08	0.08
16	0.16	0.16	0.15	0.16
24	0.25	0.25	0.25	0.25
32	0.33	0.34	0.34	0.34
40	0.40	0.41	0.40	0.40



ภาพที่ ก1 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส

ตารางที่ ก2 ค่าการดูดกลืนแสงในการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสของข้าวพันธุ์ต่างๆ

พันธุ์ข้าว		ค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร			ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	
ขาวดอกมะลิ 105	1	0.1525	0.1543	0.1549	0.1539
	2	0.1561	0.1567	0.1552	0.1560
	3	0.1544	0.1530	0.1538	0.1537
สุพรรณบุรี 60	1	0.2325	0.2341	0.2341	0.2335
	2	0.2345	0.2345	0.2350	0.2346
	3	0.2332	0.2340	0.2328	0.2333
ขาวตาแห้ง	1	0.2972	0.2984	0.2987	0.2981
	2	0.3064	0.3053	0.3071	0.3062
	3	0.2946	0.2983	0.2976	0.2968

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก3 ปริมาณอะไมโลสของข้าวพันธุ์ต่าง ๆ

พันธุ์ข้าว	ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละ)			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
ขาวดอกมะลิ 105	15.06	15.27	15.04	15.12
สุพรรณบุรี 60	22.87	22.98	22.85	22.90
ขาวตาแห้ง	29.20	30.00	29.07	29.42

### 3. การหาคุณภาพในการขัดสี (Milling Quality)

เป็นคุณภาพของเมล็ดข้าวที่จะบอกให้ทราบว่าเมื่อนำข้าวมาขัดสีแล้วจะได้ข้าวเต็มเมล็ด (Head rice) มากน้อยเพียงใด ปริมาณ (Milling yield) สูงหรือต่ำ ข้าวที่มีคุณภาพในการขัดสีคือ เมื่อนำมาขัดสีแล้วควรได้ข้าวที่เต็มเมล็ดประมาณร้อยละ 80 ของผลผลิตที่ได้ทั้งหมด (Datta, 1978)

$$\text{ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการขัดสี (ร้อยละ)} = \frac{\text{ปริมาณของข้าวสารที่ได้} \times 100}{\text{ปริมาณของข้าวเปลือกที่นำมาขัดสี}}$$

$$\text{ปริมาณข้าวเต็มเมล็ด (ร้อยละ)} = \frac{\text{ปริมาณของข้าวเต็มเมล็ด} \times 100}{\text{ปริมาณของข้าวเปลือกที่นำมาขัดสี}}$$

$$\text{ระดับของการขัดสี (Degree of milling)} = \frac{\text{น้ำหนักของรำข้าวที่ได้จากการขัดสี} \times 100}{\text{น้ำหนักของข้าวกล้องที่นำมาขัดสี}}$$

ตารางที่ ก4 ระดับการขัดสี และปริมาณผลผลิตของข้าวเจ้าพันธุ์ต่าง ๆ

	ร้อยละ		
	ขาวดอกมะลิ 105	สุพรรณบุรี 60	ขาวตาแห้ง
ระดับการขัดสี	31.90	31.70	32.00
ปริมาณผลผลิตที่ได้จากการขัดสี	69.49	70.83	70.83
ปริมาณข้าวเต็มเมล็ด	55.75	56.94	56.66

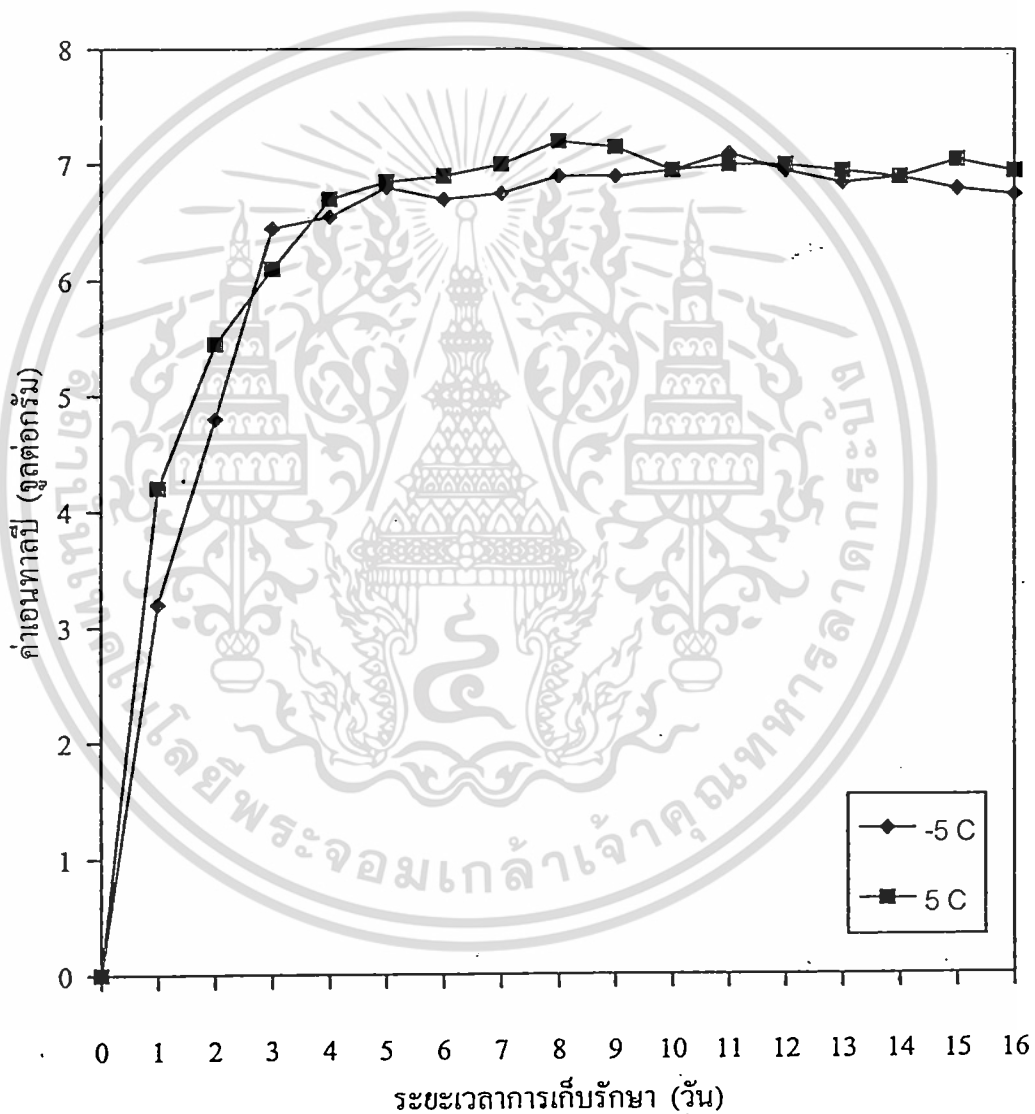
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การทดลองเบื้องต้น (Preliminary Test) ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชัน

#### 1. การทดลองเบื้องต้น (Preliminary Test) ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชัน

การทดลองเบื้องต้นเพื่อหาค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชัน ใช้ตัวอย่างข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $-5^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  นาน 16 วัน ผลการทดลองแสดงภาพที่ ข1

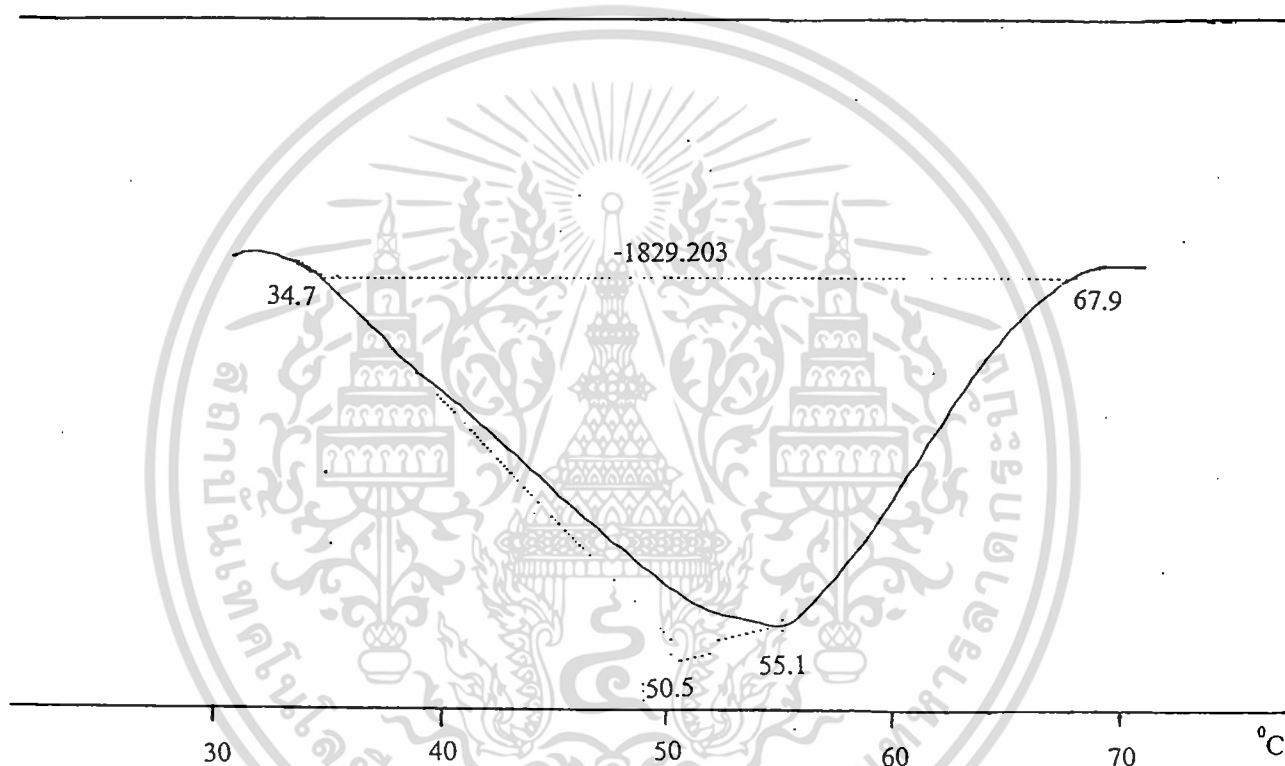


ภาพที่ ข1 ค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ  $-5^{\circ}\text{C}$  และ  $5^{\circ}\text{C}$  นาน 16 วัน

==== THERMAL ANALYSIS REPORT =====

FILE NAME <<RET.000>>

DATE ( y/m/d) : 43/08/12                      ● TEMPERATURE PROGRAM ●  
 SAMPLE NAME : 351                      dT/dt T(hold) τ(hold) ΔT(add)x n(repeat)  
 COMMENT :                      1: 10      80      0      0      0  
 SAMPLE Q'TITY : 2.5 mg                      2: -10      40      0      0      0  
 MODULE TYPE : DSC                      3: 0      0      0      0      0  
 SAMPLING INT : 1 SEC                      4: 0      0      0      0      0



[TEMP.]	TEMP (°C)	Heat Flow (mW)
1	34.7	-14.1902
2	67.9	-14.1049
3	55.1	-30.5221

[HEAT]	Ti (°C)	Tf (°C)	Heat (mJ)
1	34.7	67.9	-1829.203

[TANGANT]	Ti (°C)	Tf (°C)	Intersection (°C)
1	54.9	34.8	50.5

ภาพที่ ข2 DSC endotherm peak ของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C

นาน 3 วัน โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC-50)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

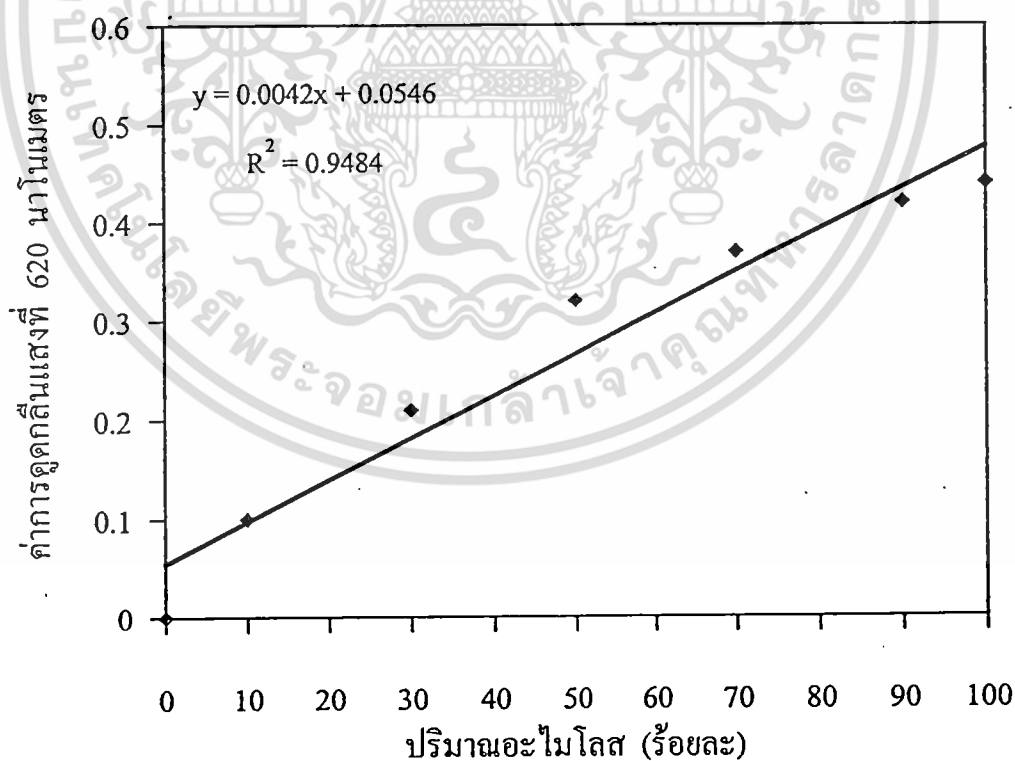
## ภาคผนวก ก

## ค่ามาตรฐานระดับการเกิดเงลาติในเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ต่าง ๆ

## 1. ค่ามาตรฐานระดับการเกิดเงลาติในเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ105

ตารางที่ ค1 ค่ามาตรฐานระดับการเกิดเงลาติในเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ105

ระดับการเกิดเงลาติในเซชัน (ร้อยละ)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	0	0	0	0
10	0.11	0.10	0.10	0.10
30	0.21	0.22	0.21	0.21
50	0.32	0.32	0.33	0.32
70	0.37	0.37	0.37	0.37
90	0.42	0.42	0.42	0.42
100	0.44	0.44	0.43	0.44



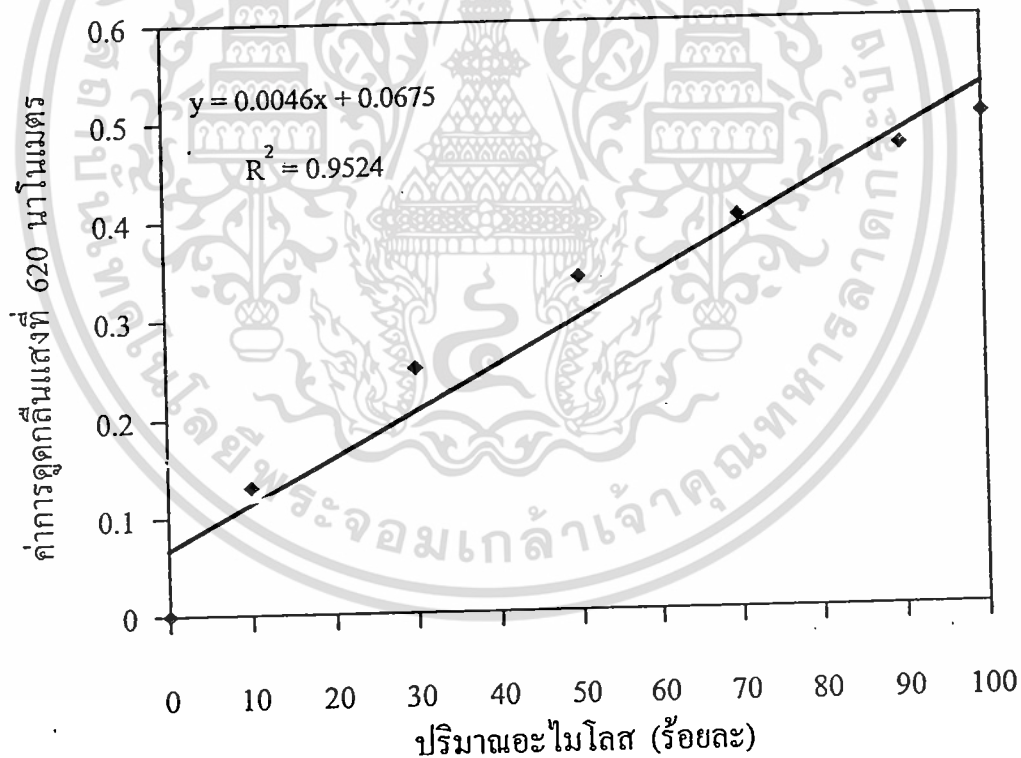
ภาพที่ ค1 กราฟมาตรฐานระหว่างระดับการเกิดเงลาติในเซชันกับค่าการดูดกลืนแสงของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ค่ามาตรฐานระดับการเจลาติไนเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี 60

ตารางที่ ค2 ค่ามาตรฐานระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี 60

ระดับการเจลาติไนเซชัน (ร้อยละ)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	0	0	0	0
10	0.13	0.13	0.13	0.13
30	0.24	0.25	0.25	0.25
50	0.34	0.33	0.35	0.34
70	0.40	0.40	0.40	0.40
90	0.47	0.47	0.46	0.47
100	0.50	0.51	0.50	0.50



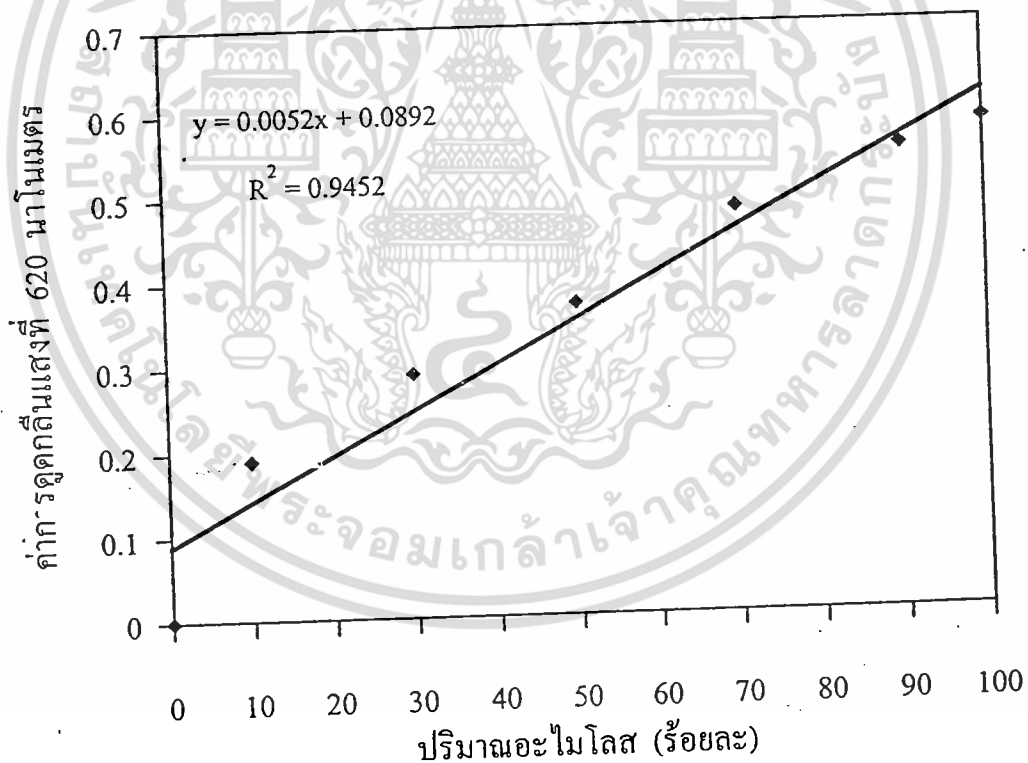
ภาพที่ ค2 กราฟมาตรฐานระหว่างระดับการเกิดเจลาติไนเซชันกับค่าการดูดกลืนแสงของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ค่ามาตรฐานระดับการเจลาตินในเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวตาแห้ง

ตารางที่ ๓3 ค่ามาตรฐานระดับการเกิดเจลาตินในเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวตาแห้ง

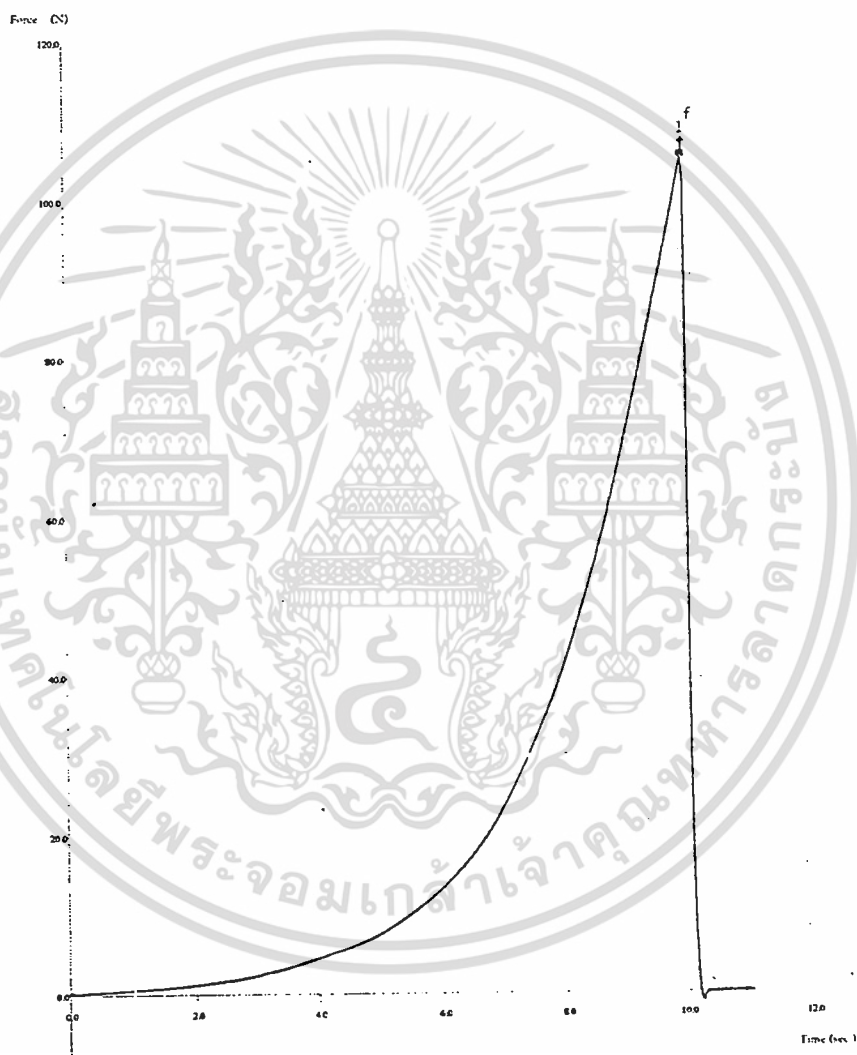
ระดับการเจลาตินในเซชัน (ร้อยละ)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	0	0	0	0
10	0.19	0.19	0.18	0.19
30	0.29	0.29	0.29	0.29
50	0.37	0.38	0.37	0.37
70	0.48	0.48	0.49	0.48
90	0.55	0.55	0.55	0.55
100	0.58	0.60	0.58	0.58



ภาพที่ ๓3 กราฟมาตรฐานระหว่างระดับการเกิดเจลาตินในเซชันกับค่าการดูดกลืนแสงของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวตาแห้ง

## ภาคผนวก ง

ลักษณะกราฟที่ได้จากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกด้วยวิธี Back Extrusion (BE) และ Texture Profile Analysis (TPA)



ภาพที่ ง1 ลักษณะกราฟที่ได้จากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 5°C ด้วยวิธี Back Extrusion (BE)  
 หมายเหตุ : 1 แสดงถึง ค่าความแข็ง (Hardness) คือ Peak force หรือแรงสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ๖2 ลักษณะกราฟที่ได้จากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 5<sup>o</sup>C ด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA)

หมายเหตุ : 1 แสดงถึง ค่าความแข็ง (Hardness) คือ Peak force (+ve Peak force) หรือแรงสูงสุดของการกดครั้งแรก (First compression cycle) ซึ่งหมายถึง การกัดครั้งแรก (First bite)

2 แสดงถึง ค่าความเหนียว (Stickiness) คือ Peak force ที่เป็นลบ (-ve Peak force) ของการกดครั้งแรก ซึ่งหมายถึง แรงที่ต้องใช้ในการดึงหัววัดออกจากตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

## แบบประเมินผลทางประสาทสัมผัส (Scoring Test)

ชื่อผู้ทดสอบ.....วันที่.....

ผลิตภัณฑ์.....

## คำแนะนำ

กรุณาทดสอบตัวอย่างข้าวเจ้าสุกจากซ้ายไปขวา ในด้านลักษณะปรากฏ ความแข็ง ความเหนียว และการยอมรับรวม โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมและให้คะแนนตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้

คุณภาพ	ตัวอย่าง			
<b>ลักษณะปรากฏ</b> 1. เมล็ดข้าวสวยลักษณะปกติ ไม่ขุ่น 2. เมล็ดข้าวขุ่นเล็กน้อย 3. ขุ่นครึ่งเมล็ด 4. ขุ่นเกือบทั้งเมล็ด 5. ขุ่นทั้งเมล็ด				
<b>ความแข็ง</b> 1. นุ่มหรือละเกินไป 2. ค่อนข้างนุ่มมาก 3. ค่อนข้างนุ่ม 4. ไม่แข็งหรือนุ่มจนเกินไป 5. ค่อนข้างแข็ง 6. ค่อนข้างแข็งมาก 7. แข็งมากเกินไป				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพ	ตัวอย่าง			
<u>ความเหนียว</u> 1. เหนียวมากเกินไป 2. ค่อนข้างเหนียวมาก 3. ค่อนข้างเหนียว 4. ไม่เหนียวหรือร่วนเกินไป 5. ค่อนข้างร่วน 6. ค่อนข้างร่วนมาก 7. ร่วนมากเกินไป				
<u>การยอมรับรวม</u> 1. ไม่ชอบมากที่สุด 2. ไม่ชอบปานกลาง 3. ไม่ชอบเล็กน้อย 4. บอกไม่ได้ว่าชอบหรือไม่ชอบ 5. ชอบเล็กน้อย 6. ชอบมาก 7. ชอบมากที่สุด				

ข้อเสนอแนะ.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

### การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ตารางที่ ฉ1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์  
ขาวดอกมะลิ105 ด้วยวิธี Multiple regression analysis

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-value
Constant	0.124278	0.123193	1.0088	0.3594
X	0.339396	0.0838838	4.04603	0.0099
Y	0.0102537	0.00731152	1.4024	0.2197
X <sup>2</sup>	-0.0028301	0.0115134	-0.245808	0.8156
XY	0.00287073	0.00178383	1.60931	0.1685

R-SQ.(ADJ) = 0.956    SEE = 0.180    MAE = 0.109    และ DurbWat = 2.26

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน) และ Y = อุณหภูมิ (°C)

ตารางที่ ฉ2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติค่าเอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์  
สุพรรณบุรี60 ด้วยวิธี Multiple regression analysis

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-value
Constant	0.331405	0.267844	1.23731	0.2709
X	2.06691	0.182378	11.3331	0.0001
Y	0.0167805	0.0158965	1.05561	0.3395
X <sup>2</sup>	-0.185329	0.0250322	-7.40363	0.0007
XY	0.0027561	0.00387835	0.710636	0.5091

R-SQ.(ADJ) = 0.971    SEE = 0.392    MAE = 0.246    และ DurbWat = 2.94

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน) และ Y = อุณหภูมิ (°C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติค่าแอนทาลปีการเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์  
ขาวตาแห้ง ด้วยวิธี Multiple regression analysis

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-value
Constant	0.49194	0.426976	1.15109	0.3017
X	2.3689	0.290733	8.14801	0.0005
Y	0.0192195	0.025341	0.758435	0.4824
X <sup>2</sup>	-0.21595	0.0399044	-5.41167	0.0029
XY	0.0062439	0.00618258	1.00992	0.3589

R-SQ.(ADJ) = 0.942 SEE = 0.625 MAE = 0.403 และ DurWat = 2.82

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน) และ Y = อุณหภูมิ (°C)

ตารางที่ ๔ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติระดับการเกิดเจลาตินในเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์  
ขาวดอกมะลิ105 ด้วยวิธี Multiple regression analysis

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-value
Constant	72.5638	0.404774	179.27	0.0000
X	-1.54052	0.275615	-5.58937	0.0000
Y	-0.029252	0.0240233	-1.21765	0.2347
X <sup>2</sup>	0.00361783	0.0378294	0.0956353	0.9246
XY	-0.00875041	0.00586109	-1.49297	0.1480

R-SQ.(ADJ) = 0.933 SEE = 1.027 MAE = 0.800 และ DurWat = 1.18

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน) และ Y = อุณหภูมิ (°C)

ตารางที่ ๑5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติระดับการเกิดเงลาติโนเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์  
สุพรรณบุรี60 ด้วยวิธี Multiple regression analysis

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-value
Constant	76.7619	0.287391	267.099	0.0000
X	-3.88635	0.195688	-19.8599	0.0000
Y	-0.00509593	0.0170567	-0.298765	0.7676
X <sup>2</sup>	0.269828	0.0268591	10.0461	0.0000
XY	-0.0155325	0.0041614	-3.73252	0.0010

R-SQ.(ADJ) = 0.980 SEE = 0.729 MAE = 0.546 และ DurWat = 0.99

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน) และ Y = อุณหภูมิ (°C)

ตารางที่ ๑6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติระดับการเกิดเงลาติโนเซชันของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้ง  
ด้วยวิธี Multiple regression analysis

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-value
Constant	82.4883	0.164491	501.476	0.0000
X	-4.7408	0.112004	-42.3271	0.0000
Y	-0.0293171	0.00976254	-3.00302	0.0060
X <sup>2</sup>	0.365057	0.015373	23.7466	0.0000
XY	-0.0159634	0.00238182	-6.70221	0.0000

R-SQ.(ADJ) = 0.994 SEE = 0.417 MAE = 0.322 และ DurWat = 2.01

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน) และ Y = อุณหภูมิ (°C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๗ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 ด้วยวิธี

Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Back Extrusion (BE)

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-value
Constant	4.8801	0.148875	32.7799	0.0000
X	-0.0083292	0.10137	-0.0821659	0.9352
Y	0.0151967	0.00883571	1.71992	0.0978
X <sup>2</sup>	0.0695728	0.0139136	5.00036	0.0000
XY	0.00419268	0.00215569	1.94494	0.0631

R-SQ.(ADJ) = 0.917 SEE = 0.378 MAE = 0.294 และ DurWat = 0.68

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน) และ Y = อุณหภูมิ (°C)

ตารางที่ ๘ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์สุพรรณบุรี60 ด้วยวิธี

Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Back Extrusion (BE)

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-value
Constant	6.8644	0.364216	18.8471	0.0000
X	2.34716	0.247999	9.46441	0.0000
Y	0.0641431	0.0216162	2.96736	0.0065
X <sup>2</sup>	-0.155364	0.0340389	-4.56431	0.0001
XY	0.0185886	0.00527381	3.5247	0.0017

R-SQ.(ADJ) = 0.933 SEE = 0.924 MAE = 0.670 และ DurWat = 0.80

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน) และ Y = อุณหภูมิ (°C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑๑ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตมแห้ง ด้วยวิธี

Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Back Extrusion (BE)

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-value
Constant	9.02557	0.301939	29.892	0.0000
X	2.72537	0.205594	13.2561	0.0000
Y	0.0833951	0.0179201	4.65372	0.0001
X <sup>2</sup>	-0.211632	0.0282187	-7.49972	0.0000
XY	0.00977236	0.00437205	2.23519	0.0346

R-SQ.(ADJ) = 0.956 SEE = 0.766 MAE = 0.609 และ DurWat = 0.86

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน) และ Y = อุณหภูมิ (°C)

ตารางที่ ๑๑๐ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยวิธี

Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Texture Profile Analysis (TPA)

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-value
Constant	3.1148	0.0882502	35.2951	0.0000
X	0.50972	0.0600906	8.48252	0.0000
Y	0.0192748	0.00523765	3.68005	0.0011
X <sup>2</sup>	-0.00264506	0.00824771	-0.320702	0.7511
XY	0.011635	0.00127786	9.10506	0.0000

R-SQ.(ADJ) = 0.972 SEE = 0.224 MAE = 0.179 และ DurWat = 1.08

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน) และ Y = อุณหภูมิ (°C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวสุพรรณบุรี60 ด้วยวิธี

Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Texture Profile Analysis (TPA)

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-value
Constant	3.76109	0.217536	17.2895	0.0000
X	3.42057	0.148123	23.0928	0.0000
Y	0.0255024	0.0129107	1.97529	0.0594
X <sup>2</sup>	-0.277261	0.0203305	-13.6377	0.0000
XY	0.0211805	0.0031499	6.72418	0.0000

R-SQ.(ADJ) = 0.981    SEE = 0.552    MAE = 0.404    และ    DurWat = 0.73

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน) และ Y = อุณหภูมิ (°C)

ตารางที่ ๑12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความแข็งของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ข้าวตาแห้ง ด้วยวิธี Multiple

regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Texture Profile Analysis (TPA)

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-value
Constant	6.38433	0.112605	56.6969	0.0000
X	2.91999	0.0766738	38.0832	0.0000
Y	0.0287252	0.00668308	4.2982	0.0002
X <sup>2</sup>	-0.233715	0.0105238	-22.2082	0.0000
XY	0.012365	0.0016305	7.58357	0.0000

R-SQ.(ADJ) = 0.993    SEE = 0.285    MAE = 0.218    และ    DurWat = 0.88

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน) และ Y = อุณหภูมิ (°C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความเหนียวของข้าวเจ้าสุกพันธุ์ขาวตาแห้ง ด้วยวิธี

Multiple regression analysis เมื่อวัดโดยใช้วิธี Texture Profile Analysis (TPA)

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	p-value
Constant	0.510833	0.0419104	12.1887	0.0001
X	-0.169575	0.0285373	-5.94224	0.0019
Y	-0.00180488	0.00248738	-0.725614	0.5006
X <sup>2</sup>	0.0156552	0.00391687	3.99687	0.0104
XY	-0.000260976	0.000606859	-0.430043	0.6851

R-SQ.(ADJ) = 0.893    SEE = 0.061    MAE = 0.036    และ DurbWat = 1.81

X = ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน) และ Y = อุณหภูมิ (°C)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้