



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

ความคงตัวของเจลจากสตาร์ชข้าวที่ผ่านการแช่แข็งและแช่แข็ง-ละลาย

Frozen Storage and Freeze-thaw Stability of Rice Starch Gels

โดย ผศ. ดร. จันทนี อูริยะพงศ์สรรค์

มีนาคม 2552

สัญญาเลขที่ MRG4680170

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

ความคงตัวของเจลจากสตาร์ชข้าวที่ผ่านการแช่แข็งและแช่แข็ง-ละลาย

Frozen Storage and Freeze-thaw Stability of Rice Starch Gels

ผู้วิจัย ผศ. ดร. จันทน์ อริยะพงศ์สรรค์

สังกัดภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงไปด้วยดีเพราะความกรุณาอย่างยิ่งและขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้

ผศ.ดร. จันทน์ อูริยพงศ์สรรค์

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญตาราง	ค
สารบัญภาพ	ณ
บทคัดย่อภาษาไทย	2
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	3
วัตถุประสงค	4
วิธีการทดลอง	4
1. วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือ	4
2. วิธีการทดลองงานวิจัยส่วนที่ 1	6
3. วิธีการทดลองงานวิจัยส่วนที่ 2	11
ผลการทดลอง	15
1. ผลการทดลองงานวิจัยส่วนที่ 1	15
2. ผลการทดลองงานวิจัยส่วนที่ 2	61
สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	89
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	91
เอกสารอ้างอิง	93
ภาคผนวก	98

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1	16
ตารางที่ 2	20
ตารางที่ 3	24
ตารางที่ 4	27
ตารางที่ 5	29
ตารางที่ 6	35
ตารางที่ 7	36
ตารางที่ 8	38
ตารางที่ 9	49
ตารางที่ 10	50

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 11	ความสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ปริมาณแอมิโลส ค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดสุดท้าย ค่าการคั่วกับสมบัติทางความร้อนของเจลสตาร์ช จากข้าว โดยใช้ Pearson correlation coefficients	53
ตารางที่ 12	ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวชัณษา 1	57
ตารางที่ 13	สมบัติการเกิดเจลในเซชันและความหนืดของเพสต์ ของสตาร์ชจากข้าวไม่เต็มและเต็มสารเจือปนอาหารชนิดต่าง ๆ	63
ตารางที่ 14	ผลของชนิดและปริมาณสารเจือปนอาหารที่เติมในเจลสตาร์ชจากข้าว ต่อคุณสมบัติการเกิดเจลในเซชัน โดยใช้เครื่อง DSC	65
ตารางที่ 15	ผลของชนิดและความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารที่เติมใน เจลสตาร์ชจากข้าวต่อค่าสมบัติทางความร้อนระหว่างการแช่เยือกแข็ง โดยใช้เครื่อง DSC	67
ตารางที่ 16	ผลของชนิดและความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารที่ไม่เต็มและ เต็มในสตาร์ชจากข้าวต่อสมบัติทางความร้อนของ เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวและได้รับความร้อนอีกครั้ง	69
ตารางที่ 17	ผลของชนิดและปริมาณความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารใน เจลสตาร์ชจากข้าวต่อการจับของเหลวออกจากเจล จากการคั่วรูปจากเยือกแข็ง จำนวน 5 รอบ	71
ตารางที่ 18	ผลของการคั่วรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบของเจลสตาร์ชจากข้าว ที่ไม่เต็มและเต็มสารเจือปนอาหารต่อค่าความแข็งโดย เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) ที่แรงกดร้อยละ 15 ของความหนาเจลสตาร์ช	73
ตารางที่ 19	ผลของการคั่วรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบของเจลสตาร์ชจากข้าว ที่ไม่เต็มและเต็มสารเจือปนอาหารต่อค่าความแข็งโดย เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) ที่แรงกดร้อยละ 70 ของความหนาเจลสตาร์ช	75

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 20	77
ผลของการเปลี่ยนแปลงการจับของเหลวออกจากเจลใน เจลสตาบิลแซ่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เต็มและเต็มสารเจือปนอาหาร ของสองปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ชนิดและปริมาณสารเจือปนอาหาร ที่ระยะเวลาการเก็บขณะแซ่เยือกแข็ง 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน	
ตารางที่ 21	88
การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดสุดท้าย ค่าการคืนตัว ค่าความแข็ง อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลาคิไนซ์ (T_o) อุณหภูมิฟิค (T_p) อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการแซ่เยือกแข็ง (T_{gt}) อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเจลแซ่เยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง (T_g) โดยใช้ Pearson correlation coefficients	

		หน้า
ภาพที่ 1	กราฟความหนืด (Pasting curve) ของสตาร์ชจากข้าวแต่ละพันธุ์	19
ภาพที่ 2	DSC เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวและให้ความร้อนอีกครั้ง ที่ความเข้มข้นของเจล 30 % w/w	32
ภาพที่ 3	ผลของความเข้มข้นของเจลสตาร์ชจากข้าวต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวพันธุ์ชยันนาท1 และให้ความร้อนอีกครั้ง (T_d = exothermic peak)	33
ภาพที่ 4	ผลของพันธุ์ข้าวต่อการขับของเหลวออกจากเจลระหว่าง การคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ	39
ภาพที่ 5	ผลของค่าความแข็งของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเก็บ 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน หลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง ทดสอบที่แรงกดเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง รูปร่างร้อยละ 15 ของความหนาเจลสตาร์ช	40
ภาพที่ 6	ผลของค่าความแข็งของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเก็บ 0 (fresh gel) 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน หลังการคืนรูปจากเยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง ทดสอบที่แรงกด เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างร้อยละ 15 ของความหนาเจลสตาร์ช	42
ภาพที่ 7	ผลของค่าความแข็งของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเก็บ 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน หลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง ทดสอบที่แรงกดเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง รูปร่างร้อยละ 70 ของความหนาเจลสตาร์ช	44

	หน้า
ภาพที่ 8 ผลของค่าความแข็งของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเก็บ 0 (fresh gel) 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน หลังการคืนรูปจากเยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง ทดสอบที่แรงกด เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างร้อยละ 70 ของความหนาเจลสตาร์ช	46
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมิโลสกับค่าความแข็งของ เจลแช่เยือกแข็งจากข้าวที่เก็บนาน 30 วัน ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง ทดสอบแรงกดที่ร้อยละ 15 ของความหนาเจลสตาร์ช	51
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมิโลสกับค่าความแข็งของ เจลแช่เยือกแข็งจากข้าวที่เก็บนาน 30 วัน ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง ทดสอบแรงกดที่ร้อยละ 70 ของความหนาเจลสตาร์ช	51
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมิโลสกับอุณหภูมิฟิค ของการเกิดเจลาทีโนเซชัน	54
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมิโลสกับอุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็ง	54
ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลาทีโนเซชันกับอุณหภูมิฟิค	55
ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลาทีโนเซชันกับ อุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็ง	55
ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิฟิคของการเกิดเจลาทีโนเซชันกับ อุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็ง	56
ภาพที่ 16 โครมาโตแกรมของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวชัณนาท1 ระยะเวลาการเก็บที่ 1 วัน	58
ภาพที่ 17 โครมาโตแกรมของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวชัณนาท1 ระยะเวลาการเก็บที่ 15 วัน	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 18 โครมาโตแกรมของเจลสตาρχแซ่เยือกแข็งจากข้าวชัณนาท1 ระยะเวลาการเก็บที่ 30 วัน	59
ภาพที่ 19 โครมาโตแกรมของเจลสตาρχแซ่เยือกแข็งจากข้าวชัณนาท1 ระยะเวลาการเก็บที่ 1 ปี	59
ภาพที่ 20 เปรียบเทียบกราฟความหนืด (Pasting Curve) ของสตาρχจากข้าวชัณนาท1 ความเข้มข้นร้อยละ 30 ที่ไม่เค็มและเค็มสารเจือปนอาหาร ความเข้มข้นของ สารเจือปนอาหารร้อยละ 0.0, 0.2, 0.4 และ 0.6 (A= อัลจิเนต, B= กัวกัม, C= ทรีฮาโลส, D= ไฮเมทอกซีเพกทิน)	62
ภาพที่ 21 ผลของชนิดสารเจือปนอาหารที่เค็มในสตาρχจากข้าวชัณนาท1 ต่อการเปลี่ยนแปลงกลาสทรานซิชันระหว่างการเกิดเจลทาทีโนเซชัน (A = เจลสตาρχจากข้าวชัณนาท1, B = สตาρχจากข้าวชัณนาท1 + อัลจิเนต 0.2 %, C = สตาρχจากข้าวชัณนาท1 + กัวกัม 0.2 %, D = สตาρχจากข้าวชัณนาท1 + ไฮเมทอกซีเพกทิน 0.2 %, E = สตาρχจากข้าวชัณนาท1 + ทรีฮาโลส 0.2 %)	66
ภาพที่ 22 เปรียบเทียบปริมาณอัลจิเนต (ร้อยละ 0.0 ถึง 0.6) ที่เค็มใน เจลสตาρχจากข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงกลาสทรานซิชันระหว่าง การเกิดเจลทาทีโนซ (A = เจลสตาρχจากข้าวชัณนาท1, B = เจลสตาρχจากข้าวชัณนาท1+อัลจิเนต 0.2 %, C = เจลสตาρχจากข้าวชัณนาท1+อัลจิเนต 0.4 %, D = เจลสตาρχจากข้าวชัณนาท1+อัลจิเนต 0.6 %)	66
ภาพที่ 23 ผลของความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารต่อเจลสตาρχแซ่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคั้นรูปจากเยือกแข็ง วัดความแข็งที่แรงกดร้อยละ 15 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (A =อัลจิเนต, B = กัวกัม, C = ไฮเมทอกซีเพกทิน, D=ทรีฮาโลส)	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 24 ผลของระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง วัดความแข็งที่แรงกดร้อยละ 15 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (CNT1= ชัยนาท1, HMP = ไฮเมทอกซีเพกทิน)	80
ภาพที่ 25 ผลของความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารต่อเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง วัดความแข็งที่ แรงกดร้อยละ 15 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (A =อัลจิเนต, B = กวักม, C = ไฮเมทอกซีเพกทิน, D=ทรีฮาโลส)	81
ภาพที่ 26 ผลของระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง วัดความแข็งที่ แรงกดร้อยละ 15 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (CNT1= ชัยนาท1, HMP = ไฮเมทอกซีเพกทิน)	82
ภาพที่ 27 ผลของความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารต่อเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง วัดความแข็งที่แรงกดร้อยละ 70 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (A =อัลจิเนต, B = กวักม, C = ไฮเมทอกซีเพกทิน, D = ทรีฮาโลส)	83
ภาพที่ 28 ผลของระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง วัดความแข็งที่แรงกดร้อยละ 70 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (CNT1= ชัยนาท1, HMP = ไฮเมทอกซีเพกทิน)	84
ภาพที่ 29 ผลของความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารต่อเจลแซ่เยือกแข็ง ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง และให้ความร้อนอีกครั้ง วัดความความแข็ง ที่แรงกดร้อยละ 70 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (A =อัลจิเนต, B = กวักม, C = ไฮเมทอกซีเพกทิน, D=ทรีฮาโลส)	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ 30 ผลของระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว
ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง วัดความความแข็ง
ที่แรงกดร้อยละ 70 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2)
(CNT1= ชัยนาท1, HMP = ไฮเมทอกซีเพกทิน)

Project Code : MRG4680170

(รหัสโครงการ)

Project Title : Frozen Storage and Freeze-thaw Stability of Rice Starch Gels

(ชื่อโครงการวิจัย) : ความคงตัวของเจลจากสตาร์ชข้าวที่ผ่านการแช่แข็งและแช่แข็ง-ละลาย

Investigator : Asst. Prof. Dr. Juntanee Uriyapongson

(ชื่อนักวิจัย) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทนี อูริยะพงศ์สรณ์

E-mail Address : juntanee@kku.ac.th

uriyapongson@yahoo.com

Project Period : 2 years

(ระยะเวลาโครงการ): 2 ปี

ศึกษาคุณลักษณะ คุณสมบัติทางวิทยากระแส และความร้อนของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว

ผศ. ดร. จันทน์ อริยะพงศ์สรรค์ กรรมการ ห้วยแสน Professor Dr. Inteaz Alli

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสตาร์ชจากข้าว 9 พันธุ์ ได้แก่ ขาวดอกมะลิ105 หอมสุพรรณบุรี หอมคลองหลวง1 ขาวตาแห้ง17 สุพรรณบุรี2 สุพรรณบุรี60 เหลืองประทิว123 ชัยนาท1 และพลาขามปราจีนบุรี โดยศึกษาคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของสตาร์ชและเจลสตาร์ชของข้าวเหล่านี้ รวมทั้งวิเคราะห์ผลของการเติมสารเจือปนอาหารต่อคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ ลักษณะเนื้อสัมผัส คุณสมบัติทางความร้อนและทางวิทยากระแสของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวพันธุ์ชัยนาท1 ได้จัดกลุ่มสตาร์ชจากข้าวโดยใช้ปริมาณแอมิโลส เป็น แอมิโลสต่ำ (12-20 %) แอมิโลสปานกลาง (20-25 %) และแอมิโลสสูง (>25%) สตาร์ชกลุ่มแอมิโลสสูงมีค่าความหนืดที่จุดสูงสุดและค่าการแตกตัวต่ำที่สุด ($P \leq 0.05$) มีค่าความหนืดสุดท้ายและค่าการคืนตัวสูงสุด ส่วนความคงตัวในการคืนรูปจากแช่เยือกแข็งเปรียบเทียบกับเจลสดและเจลแช่เยือกแข็งที่ให้ความร้อนอีกครั้ง พบว่าเจลสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี2 (แอมิโลสปานกลาง) มีความคงตัวต่อการคืนรูปจากแช่เยือกแข็งมากที่สุด ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลจากข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำมีการเปลี่ยนแปลงไม่ต่างกับเจลจากข้าวกลุ่มอื่นๆ และเจลที่ให้ความร้อนอีกครั้งที่ระยะเวลาการเก็บ 1 ถึง 120 วัน แต่เจลในกลุ่มแอมิโลสสูงและปานกลางพบว่าพันธุ์ข้าวและระยะเวลาการเก็บมีผลทำให้ค่าความแข็งแตกต่างกัน โดยเจลจะมีค่าความแข็งสูงสุดที่ระยะเวลา 30 วัน อย่างไรก็ตามเจลในกลุ่มแอมิโลสสูงที่ระยะการเก็บหลังจาก 30 วัน ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาการเก็บจนถึง 120 วัน การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจากข้าว 9 พันธุ์ ที่ระดับความเข้มข้นของสตาร์ช 4 ระดับ (ร้อยละ 20 -50) ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) พบว่าพันธุ์ข้าวและความเข้มข้นของสตาร์ชมีผลต่ออุณหภูมิเริ่มต้น (T_o) อุณหภูมิฟิว (T_p) และค่าเอนทัลปี (ΔH_c) เจลในกลุ่มแอมิโลสสูงให้ค่า G' (storage modulus) สูงกว่าเจลกลุ่มแอมิโลสปานกลางและต่ำ สำหรับการศึกษาการเติมสารเจือปนอาหาร 4 ชนิด (อัลจินต กว๊าม ไสเมทอกซีเพกทิน และทรีฮาโลส) ที่ความเข้มข้น 4 ระดับ (ร้อยละ 0 ถึง 0.6) ในเจลจากข้าวพันธุ์ชัยนาท1 ที่ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 30 โดยน้ำหนักแห้ง พบว่าชนิดและสารเจือปนอาหารทั้ง 4 ชนิด มีผลต่อคุณสมบัติการเกิดเฟส ($P \leq 0.05$) ซึ่งการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์ ให้ค่าความหนืดที่จุดสูงสุด ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าการคืนตัวเพิ่มขึ้น แต่ค่าการแตกตัว ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าการคืนตัว ไม่แตกต่างจากข้าวชัยนาท1 สำหรับเจลแช่เยือกแข็งที่เติมและไม่เติมสารเจือปนอาหารทั้ง 4 ชนิด มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงของการแช่เยือกแข็งที่เวลา 30 ถึง 45 วัน หลังจากนั้นค่าความแข็งของเจลก็จะลดลงอย่างรวดเร็วที่ 60 วัน และจะคงที่จนถึงการแช่เยือกแข็งที่ 120 วัน โดยที่ความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0.2 ถึง 0.6 ของสารเจือปนอาหารทั้ง 4 ชนิด ส่งผลให้ค่า T_{gr} และ T_{cc} สูงขึ้น ชนิดและปริมาณสารเจือปนอาหารมีผลทำให้ค่า G' แตกต่างกัน แต่มีผลต่อค่า G'' และ $\tan \delta$

(คำหลัก): สตาร์ชจากข้าว เจล ความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง เนื้อสัมผัส คุณสมบัติด้านความร้อน

Characterization, Rheological and Thermal Properties of Frozen Rice Starch Gel

Juntanee Uriyapongson^a, Kannika Huaisan^a, and Inteaz Alli^b

^aDepartment of Food Technology, Khon Kaen University, Thailand

^b Department of Food Science and Agricultural Chemistry, McGill University, Canada

ABSTRACT

The starch from nine rice varieties grown in Thailand (KaoDokmali105, KDML105; Homsupanbure, HSPR; HomklongLaung1, HKLG1; KaoTaHang17, KTH17; Supanbure2, SPR2; Supanburi60, SPR60; LeungPraTew123, LPT123; Chainat1, CNT1; and PlaiNgramPrajeenBuri, PNPCR) were studied. The physicochemical properties of their isolated starch and their gels were characterized. The effects of food additives on the physicochemical properties of rice starch, textural, thermal and rheological properties of frozen rice gels produced from CNT1 were also studied. The rice varieties were classified as low (12-20 %), medium (20-25 %), and high (>25 %) amylose content. High amylose rice starches had the lowest peak viscosity and breakdown and the highest final viscosity and setback. Freeze-thawing cycles produced softer texture gels compared to the fresh gels and SPR2 gel (medium amylose content) showed the highest freeze-thawed stability. The low amylose gels showed no significant changes in texture for all frozen and reheated gels. For high and medium amylose gels, rice varieties and frozen storage time affected hardness of frozen and reheated gels. Higher gel texture was observed for high and medium amylose gels and at 30 days of frozen storage time. Overall, high amylose gels showed the highest hardness at 30 days of frozen storage and decreased from 30 to 120 days. Thermal properties of starch from the nine rice varieties and 4 levels of starch concentration (20 to 50%) were studied by differential scanning calorimetry. Rice variety and starch concentration affected the thermal properties of the gels (T_o , T_p and ΔH_G). High amylose gels were more solid-like, higher storage modulus (G'), than medium and low amylose gels. Four food additives (alginate, guar gum, high methoxyl pectin and trehalose) at 4 levels of concentration (0 to 0.6 %) in 30 % (w/w) in CNT1 starch were studied. Pasting properties of CNT1 starch were affected by types and levels of food additives. All hydrocolloid increased peak viscosity, final viscosity, and setback of starch suspension but trehalose showed similar properties to the control CNT1 starch. The effect of additives and levels on gel hardness during frozen storage can be summarized as increasing from 30 to 45 days, decreasing up to 60 days followed by no change until 120 days. All additives at 0.2 to 0.6% increased T_{gf} , and T_{cc} . The types and levels of additives affected G' but not G'' and $\tan \delta$.

Keywords : Rice starch, gel, freeze-thaw stability, texture, DSC

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณแอมิโลสในแป้งข้าวต่อคุณลักษณะของเนื้อสัมผัสของเจลสด และเจลแช่แข็ง
2. เพื่อศึกษาถึงความคงตัวของเจลจากแป้งข้าวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง
3. เพื่อศึกษาถึงความคงตัวของเจลจากแป้งข้าวเมื่อแช่เยือกแข็งระยะเวลาต่าง ๆ กัน
4. เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของแป้งข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass Transition temperature)
5. เพื่อศึกษาผลกระทบของสารเจือปนอาหาร (food additives) ต่อคุณลักษณะของเจลจากแป้งข้าวการแช่แข็งที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ในการการแช่เยือกแข็ง
6. เพื่อศึกษาผลกระทบสารเจือปนอาหาร(food additives) ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass Transition temperature)

วิธีการทดลอง

1. วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1.1 สารเคมี
 - 1.1.1 แอมิโลสบริสุทธิ์ (Amylose from Potatoes) AR Grade ของบริษัท Fluka ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
 - 1.1.2 แอมิโลเพกทิน (Amylopectin from Potato Starch) AR Grade ของบริษัท Fluka ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
 - 1.1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide; NaOH) AR Grade ของบริษัท Merck ประเทศเยอรมันนี
 - 1.1.4 ปีโตเลียมอีเธอร์ (Petroleum ether) AR Grade ของบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
 - 1.1.5 แอลกอฮอล์บริสุทธิ์ (Absolute ethanol; C₂H₅OH) AR Grade ของบริษัท Merck ประเทศเยอรมันนี
 - 1.1.6 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium Iodide; KI) AR Grade ของบริษัท Merck ประเทศเยอรมันนี
 - 1.1.7 ไอโอไดน (Iodine; I₂) AR Grade ของบริษัท Merck ประเทศเยอรมันนี
 - 1.1.8 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid 37 %; HCl) AR Grade ของบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน

1.1.9 กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid; H₂SO₄) AR Grade ของบริษัท Merck ประเทศเยอรมันนี

1.1.10 สารป้องกันการเกิดฟอง (Silicone antifoam) AR Grade ของบริษัท Fluka ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

1.1.11 ทรีฮาโลส (Trehalose) AR Grade ของบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมันนี

1.1.12 กวักกัม (Guar gum) AR Grade ของบริษัท Sigma ประเทศอินเดีย

1.1.13 อัลจิเนต (Alginate) AR Grade ของบริษัท Fluka ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

1.1.14 ไฮเมทอกซีเพกทิน (High Methoxyl Pectin) Food Grade ของบริษัท Billion Rich Gold Co., Ltd., ประเทศไทย

1.1.15 Dimethyl Sulfoxide (DMSO) ของบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมันนี

1.1.16 สารมาตรฐานแดร็กแตรน (Dextran Standards) ของบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศเยอรมันนี ที่มีน้ำหนักโมเลกุลดังนี้ 8,500-11,500; 64,000-76,000; 2,000,000 และมากกว่า 5,000,000

1.2 อุปกรณ์และสารเคมี

1.2.1 ชุดเครื่องกลั่น (Kjeltec System) รุ่น 1022 Distilling unit ของบริษัท Tecator ประเทศเนเธอร์แลนด์

1.2.2 ชุดเครื่องสกัดไขมัน (Extraction unit) รุ่น Soxtec system HT6 ของบริษัท Tecator ประเทศเนเธอร์แลนด์

1.2.3 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace) รุ่น ELF 10/14 ของบริษัท Carbolite ประเทศอังกฤษ

1.2.4 เตาอบลมร้อน (Hot Air Oven)

1.2.5 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) รุ่น Lampda 2 ของบริษัท Perkin-Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา

1.2.6 เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) รุ่น TA-XT2 ของบริษัท Stable Micro System ประเทศอังกฤษ

1.2.7 เครื่องวัดความหนืดของแป้ง (Rapid Visco™ Analyser ; RVA) รุ่น RVA ของบริษัท Newport Scientific Pty. Ltd. Warriewood ประเทศออสเตรเลีย

1.2.8 เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกสารที่อุณหภูมิต่ำ (Refrigerate Centrifuge) รุ่น Avanti™ J-25 ของบริษัท Beckman ประเทศสหรัฐอเมริกา

1.2.9 เครื่องวัด Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น DSC Q100 ของบริษัท TA Instruments, Newcastle, DE, ประเทศสหรัฐอเมริกา

1.2.10 เครื่องชั่งละเอียด (Balance) รุ่น AB104 ของบริษัท Metler Toledo ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

1.2.11 ตู้อบแบบลมร้อน (Tray drier) ของบริษัท OFM ผลิตในประเทศไทย

1.2.12 ตู้ดูดความชื้น (Damp-proof Cabinet) ยี่ห้อ Bossmen รุ่น SMK106 (A)

1.2.13 เครื่อง HPSEC (High Performance Size Exclusion Chromatography) ของบริษัท Water Associates (Milford, MA) ประกอบด้วย เครื่องควบคุม (Water 600 Controller) เครื่องตรวจจับ (Water 410 Differential Refractometer) เครื่องฉีดตัวอย่างอัตโนมัติ (Water 717 plus Autosampler) พร้อมเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน

1.2.14 ชุดคอลัมน์ (Column) ของบริษัท Water Associates (Milford, MA) ประกอบด้วย Ultrahydrogel linear, Ultrahydrogel 120

1.2.15 เครื่อง Ultrasonic

1.3 การวิเคราะห์และประมวลผลทางสถิติ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทำการวิเคราะห์และประมวลผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAS Version 9.1 (SAS Institute, Cary, NC)

วิธีการทดลองงานวิจัยส่วนที่ 1

ผลของระยะเวลาการแช่เยือกแข็งและความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลสตาร์ชจากข้าว

1. วัตถุดิบ

1.1 ตัวอย่างสตาร์ชข้าวจากเมล็ดพันธุ์ข้าวเจ้า 9 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวดอกมะลิ 105 (KDML105) จากการเพาะปลูกนอกเขตทุ่งกุลาร้องไห้ จังหวัดร้อยเอ็ด ผลิตในปี 2545 หอมสุพรรณบุรี (HSPR) หอมคลองหลวง1 (HKL1) ข้าวตาแห้ง17 (KTH17) สุพรรณบุรี2 (SPR2) สุพรรณบุรี60 (SPR60) เหลืองประทิว123 (LPT123) ชัยนาท 1 (CNT1) พลายงามปราจีนบุรี (PNPCR) ข้าวพันธุ์หลักที่ผลิตในฤดูฝนปี 2545 จากสถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร จังหวัดปทุมธานี

1.2 การเตรียมตัวอย่างสสารจากข้าว

ตัวอย่างสสารจากเมล็ดพันธุ์ข้าวเจ้า 9 สายพันธุ์ นำไปผ่านขั้นตอนการสกัดสสารจากข้าวโดยวิธีการโม่เปียก (wet milling) คัดแปลงตามวิธีของ Juliano (1985) ; Puchongkavarin and others (2003) โดยนำข้าวสารแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ใช้อัตราส่วนข้าวสารต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:5 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) หลังจากนั้นนำไปผ่านการโม่เปียกด้วยเครื่องโม่หิน นำน้ำแป้งที่ได้ไปกรองด้วยตะแกรงขนาด 200 เมช (mesh) แล้วนำไปเหวี่ยงแยกสารละลายต่างออกด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกอุณหภูมิต่ำ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 1000xg นาน 20 นาที และแยกส่วนของโปรตีนออกจากสสารเปียก แล้วนำสสารเปียกผสมกับน้ำประปา อัตราส่วน 1:2 (ปริมาตรต่อปริมาตร) นำน้ำสสารจากข้าวไปเข้าเครื่องเหวี่ยงแยกอุณหภูมิต่ำ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 1000xg นาน 20 นาที และแยกส่วนของโปรตีนออกจากสสารเปียก ทำเช่นนี้ 3 ครั้ง ต่อจากนี้นำน้ำสสารปรับให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 จนกระทั่งน้ำสสารมีค่าพีเอช 7 หลังจากนั้นนำน้ำสสารจากข้าวไปเข้าเครื่องเหวี่ยงแยกอุณหภูมิต่ำ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 4250xg นาน 10 นาที และแยกโปรตีนออกจากสสารเปียก ทำเช่นเดียวกันนี้อีก 2 ครั้ง แล้วนำสสารเปียกวางไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งน้ำระเหยไปบางส่วน แล้วจึงนำสสารไปผ่านอบแห้งด้วยตู้อบแบบลมร้อน ที่อุณหภูมิไม่เกิน 38 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง สสารจากข้าวที่ได้ใส่ถุงซิปล็อค และเก็บตัวอย่างสสารจากข้าวที่ได้ในอุณหภูมิความเย็น จนกระทั่งศึกษาและวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสสารจากข้าว

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสสารจากข้าว ได้แก่ ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เกลือและแอมิโนส โดยวิธีของ AACC Approved Methods 44-19, 46-13, 30-25 08-01 (1995) และ AACC Approved Methods 61-03 (2003) ตามลำดับ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

1.4 วิเคราะห์คุณสมบัติความหนืดของสตาร์ชข้าว (Pasting properties)

คุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันและความหนืดของสตาร์ชข้าว โดยใช้เครื่อง Rapid Visco™ Analyser (RVA) (Newport Scientific Pty. Ltd. Warriewood Australia) AACC Approved Methods 61-02 (1995) โดยศึกษาตัวอย่างสตาร์ชจากข้าวทุกสายพันธุ์ โดยเตรียมตัวอย่างสตาร์ชจากข้าวให้มีปริมาณความชื้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักแห้ง (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) ทำการวัดค่าต่าง ๆ จากการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์โดยให้ความร้อนและความเย็นจากอัตราแรงเฉือนที่คงที่ดังนี้ เตรียมตัวอย่างสตาร์ชในน้ำกลั่น นำตัวอย่างที่เตรียมไปใส่ในเครื่องและใส่หัวพายติดตั้ง โปรแกรมการทำงานดังนี้ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กวนตัวอย่างด้วยความเร็วรอบ 960 rpm และลดลงเหลือ 160 rpm รวมระยะเวลา 1 นาที ทำการเพิ่มอุณหภูมิตัวอย่างจาก 50 องศาเซลเซียส จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ในอัตราอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 12.9 องศาเซลเซียสต่อนาที ระยะเวลา 4.48 นาที และคงที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 7.18 นาที ต่อจากนี้ให้ความเย็นแก่ตัวอย่าง จนกระทั่งอุณหภูมิลดลง ถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในอัตราที่อุณหภูมิลดลง 11.6 องศาเซลเซียสต่อนาที รวมระยะเวลาการวิเคราะห์ 12 นาที 30 วินาที

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

1.5 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจากข้าว วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น DSC Q100 (TA Instruments Newcastle, DE, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ถ้วยอะลูมิเนียม (sample pan) เบอร์ 900793.901 T20109 ฝาปิดเบอร์ 900794.901 T11102 น้ำหนักตัวอย่างสตาร์ชผสมน้ำกลั่น 10-15 มิลลิกรัม และปิดฝาให้สนิท หลังจากนั้นวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 1 ชั่วโมง ทำการทดสอบดังนี้ ให้ความร้อนเพื่อให้สตาร์ชเกิดเจลลิตีในเซชัน โดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 90 องศาเซลเซียส แล้วลดอุณหภูมิลงจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส ที่อัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ต่อจากนี้เพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งจนกระทั่งอุณหภูมิถึง 20 องศาเซลเซียส ที่อัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้ววิเคราะห์ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature; T_o) อุณหภูมิพีก (peak temperature; T_p) และค่าเอนทัลปี (enthalpy; ΔH_G) ของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (gelatinization) วิเคราะห์การแช่เยือกแข็ง (freezing) ได้แก่ ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการแช่เยือกแข็ง (T_{gf} = glass transition temperature of freezing) อุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็งระหว่างการแช่เยือกแข็ง (T_{cc} =

cold-crystallization) ค่าเอนทัลปีของการแช่เยือกแข็ง (enthalpy of freezing, ΔH_f) และให้ความร้อนอีกครั้ง (reheating) ของเจลสตาร์ชจากข้าว ได้แก่ อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการให้ความร้อนอีกครั้ง (glass transition temperature of reheating, T_g) อุณหภูมิการหลอมละลายของการให้ความร้อนอีกครั้ง (melting temperature of reheating หรือ ice melting temperature, T_m) และค่าเอนทัลปีของการให้ความร้อนอีกครั้ง (enthalpy of reheating; ΔH) คัดแปลงตามวิธีของ Huang and others (1994); Chung and others (2002)

การวางแผนการทดลองแบบ 9x4 Factorial in Completely Randomized Design ปัจจัยที่ศึกษามี 2 ปัจจัยดังนี้ ปัจจัยที่ 1 คือ พันธุ์ข้าวเจ้า 9 พันธุ์ ปัจจัยที่ 2 คือ ความเข้มข้นของสตาร์ชจากข้าว 4 ระดับ (ร้อยละ 20 30 40 และ 50) วิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

1.6 ศึกษาคุณสมบัติการคืนรูปจากเยือกแข็ง

1.6.1 การเตรียมเจลสตาร์ชจากข้าวเพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติการคืนรูปจากเยือกแข็ง และผลกระทบของระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง โดยคัดเลือกระดับความเข้มข้นของสตาร์ชจากผลการศึกษาในส่วนที่ 1 ข้อ 1.5 วิธีการเตรียมเจลสตาร์ชจากข้าวแต่ละสายพันธุ์ โดยนำสตาร์ชผสมรวมกับน้ำกลั่น ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักแห้ง แล้วดูดสารแขวนลอยน้ำสตาร์ชที่เตรียมไว้ด้วยไซริงค์จำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในเพตติดิส (Petri-dishes) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร สูง 15 มิลลิเมตร ปิดฝาเพตติดิส และนึ่งเจลสตาร์ชจากข้าวที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที วางทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที นำเจลสตาร์ชไปแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส จนกระทั่งอุณหภูมิใจกลางเจลสตาร์ชมีอุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส นำเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งบรรจุใส่ในถุงพลาสติกซิปล (Ziploc plastic bag) ชนิดพอลิเอทิลีน ขนาด 7 คูณ 10 เซนติเมตร แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

1.6.2 ศึกษาผลกระทบจากการคืนรูปจากเยือกแข็ง จำนวน 5 รอบ (Freeze-thaw 5 cycles) ของเจลสตาร์ชจากข้าว โดยทำการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 20 ชั่วโมง และทำการคืนรูปจากเยือกแข็งติดต่อกัน 5 รอบ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง คัดแปลงตามวิธีของ Lee and others (2002) วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ นำตัวอย่างเจลสตาร์ชไปวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสและการขับของเหลวออกจากเจล ดังนี้

(1) วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากข้าว โดยใช้เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer รุ่น TA-XT2 ของบริษัท Stable Micro System ประเทศอังกฤษ) โดยทำการทดสอบเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช 2 แบบคือ แบบแรกใช้การทดสอบวัดค่าแรงกด (Compression) เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง (deformation) ที่ร้อยละ 15 และ ร้อยละ 70 ของความหนาของเจลสตาร์ช โดยกำหนดค่าการวัดดังนี้ ค่าความเร็วหัววัดก่อนทดสอบเท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที และความเร็วหัววัดระหว่างทดสอบ เท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วหัววัดหลังการทดสอบ เท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ใช้หัวกดรูปทรงกระบอกดันเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร หน่วยที่ใช้วัดเป็น กรัมแรง คำนวณค่าความแข็งของเจลสตาร์ช (Hardness) คัดแปลงตามวิธีของ Bejosano and Corke (1999) ซึ่งทำการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช ดังนี้

(1.1) เจลที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง แล้วทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง (freeze-thaw gels) ติดต่อกัน 5 รอบ

(1.2) เจลที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง แล้วทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง (freeze-thaw gels) ติดต่อกัน 5 รอบ และให้ความร้อนอีกครั้ง (freeze-thaw 5 cycles-reheat gels)

(2) วิเคราะห์ผลการจับของเหลวออกจากเจล (Syneresis) โดยนำเจลสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและคืนรูปจากเยือกแข็งที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักเจลสตาร์ช โดยชั่งน้ำหนักเจลสตาร์ชบนกระดาษกรองเบอร์ 1 (Whatman No.1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ใช้ตุ้มน้ำหนัก (stainless steel cylinder) ขนาด 1 กิโลกรัม วางทับบนเจลสตาร์ช นาน 15 วินาที ทำการชั่งน้ำหนักกระดาษกรองที่ดูดซับน้ำที่แยกตัวออกจากเจล คัดแปลงตามวิธีของ Lee and others (2002) คำนวณร้อยละการจับของเหลวออกจากเจล ดังนี้ การจับของเหลวออกจากเจล (ร้อยละ) เท่ากับ (น้ำหนักเจลสตาร์ชก่อนแช่เยือกแข็ง ลบด้วย น้ำหนักเจลสตาร์ชหลังการละลาย) หารด้วย น้ำหนักเจลสตาร์ชก่อนแช่เยือกแข็ง คูณ 100

1.7 ศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว

1.7.1 ทำการเตรียมตัวอย่างเจลสตาร์ชจากข้าวเช่นเดียวกันกับข้อที่ 1.6.1

1.7.2 นำเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง (thawing) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง แล้วนำมาวัดลักษณะเนื้อสัมผัส และการจับของเหลวออกจากเจล ด้วยวิธีการเดียวกันกับส่วนที่ 1 ข้อ 2.6.2 (1) – 2.6.2 (2) โดยวางแผนการทดลองแบบ 9x7 Factorial in Completely Randomized Design (CRD) มี 2 ปัจจัย ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 คือ ชนิดสตาร์ชจากข้าว จำนวน 9 พันธุ์ ปัจจัยที่ 2 คือ ระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชจากข้าว (1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน)

วิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

1.7.3 นำเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง และทำการให้ความร้อนอีกครั้ง (reheat) โดยก่อนทำการทดสอบ ให้นำเจลสตาร์ชไปนึ่งในลังถึงที่อุณหภูมิน้ำเดือด นาน 20 นาที วางให้เย็นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที การวัดลักษณะเนื้อสัมผัสวิธีการเดียวกันกับส่วนที่ 1 ข้อ 1.6.2 โดยวางแผนการทดลองแบบ 9x8 Factorial in Completely Randomized Design (CRD) มี 2 ปัจจัย ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 คือ ชนิดสตาร์ชจากข้าว จำนวน 9 พันธุ์ ปัจจัยที่ 2 คือ ระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชจากข้าว 0 (เจลสด) 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน วิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

1.8 การวิเคราะห์ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) กับ กรดแอสคอร์บิก โดยวิธีของ Biliaderis et al. (1999) การวิเคราะห์ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) กับ กรดแอสคอร์บิก ซึ่งจากทำการทดลอง oxidation เบื้องต้น พบว่าวิธีการนี้ไม่เหมาะในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดลองไม่สามารถแยกความแตกต่างของการเกิดออกซิเดชันได้ ซึ่งอาจจะเป็นเพราะการเกิดปฏิกิริยานี้มีน้อยมาก จึงได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดโมเลกุลของสตาร์ชแทนโดยใช้วิธี HPSEC (High Performance Size Exclusion Chromatography) ดัดแปลงตามวิธีของ Miladinov and Hanna (2000) ตัวอย่างเจลสตาร์ชที่เตรียมไว้ นำมาฉีดเข้าเครื่อง HPSEC ที่ประกอบคอลัมน์ 3 คอลัมน์ต่อกันดังนี้ Ultrahydrogel linear, Ultrahydrogel 120 และ Ultrahydrogel 120 โดยมีปริมาตรของตัวอย่างที่ฉีด 20 ไมโครลิตร ใช้ น้ำดีอออน เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) และใช้อัตราการไหล (flow rate) 1 มิลลิลิตรต่อนาที ตรวจจับสารละลายตัวอย่างด้วยเครื่อง Differential refractometer detector ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์

วิธีการทดลองงานวิจัยส่วนที่ 2

ผลการเติมสารเจือปนอาหารในเจลสตาร์ชจากข้าว (เจลสด และเจลแช่แข็ง)

2.1 การเตรียมสตาร์ชจากข้าว เมล็ดข้าวพันธุ์หลักที่ผลิตในฤดูฝนปี 2545 จากสถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร จำนวน 1 พันธุ์ (จากผลการศึกษาในส่วนที่ 1) ผ่านขั้นตอนการสกัดสตาร์ชจากข้าวเช่นเดียวกับการศึกษาในส่วนที่ 1 ดัดแปลงตามวิธีของ Juliano (1985) ; Puchongkavarin and others (2003)

2.2 นำสารเจือปนอาหาร 4 ชนิด ได้แก่ ทรีฮาโรส (Trehalose) อัลจิเนต (Alginate) กวักกัม (Guar Gum) และ ไฮเมทอกซีเพกทิน (High Methoxyl Pectin) ศึกษาปริมาณสารเจือปนอาหาร ร้อยละ 0.0 0.2 0.4 และ 0.6 โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง

การเตรียมสารเจือปนอาหาร โดยชั่งสารเจือปนอาหารร้อยละ 0.2 0.4 และ 0.6 โดยน้ำหนัก สตาร์ชแห้งไปละลายในน้ำกลั่น (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) ในบีกเกอร์ แล้วนำบีกเกอร์ที่มีสารละลายวาง บนเครื่องให้ความร้อนที่มีการกวนตลอดเวลา (hot plate-magnetic stirrer) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที หลังจากนั้นวางทิ้งไว้ให้เย็นจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิห้อง ถ้าปริมาณน้ำ ลดลงให้เติมน้ำให้ได้น้ำหนักเท่าเดิม

2.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากข้าว

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากข้าว ได้แก่ ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เกลือและแอมิโนส โดยวิธีของ AACC Approved Methods 44-19, 46-13, 30-25 08-01 (1995) และ AACC Approved Methods 61-03 (1999) ตามลำดับ

2.4 วิเคราะห์คุณสมบัติของความหนืด (Pasting properties)

คุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันและความหนืดของเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เติมและเติม สารเจือปนอาหารชนิดต่าง ๆ ตามข้อ 1.4 โดยใช้เครื่อง Rapid Visco™ Analyser (RVA) (Newport Scientific Pty. Ltd. Warriewood Australia) AACC Standard method Approved Methods (1995) 61-02 ทำการวางแผนแบบ 4x4 Factorial in Completely Randomized Design ปัจจัยที่ศึกษามี 2 ปัจจัยดังนี้ ปัจจัยที่ 1 คือ สารเจือปนอาหาร 4 ชนิด (ทรีฮาโรส อัลจิเนต กวักกัม และ ไฮเมทอกซีเพกทิน) ปัจจัยที่ 2 คือ ปริมาณสารเจือปนอาหาร 4 ระดับ (ร้อยละ 0, 0.2, 0.4 และ 0.6)

2.5 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางความร้อนของเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหาร ทำการวางแผนแบบ 4x4 Factorial in Completely Randomized Design ปัจจัยที่ศึกษามี 2 ปัจจัยดังนี้ ปัจจัยที่ 1 คือ สารเจือปนอาหาร 4 ชนิด (ทรีฮาโรส อัลจิเนต กวักกัม และ ไฮเมทอกซีเพกทิน) ปัจจัยที่ 2 คือ ปริมาณสารเจือปนอาหาร 4 ระดับ (ร้อยละ 0 0.2 0.4 และ 0.6) วิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์หัตถ์อย่างโดยใช้เครื่อง Differential Scanning

Calorimeter (DSC) รุ่น DSC Q100 (TA Instruments Newcastle, DE, ประเทศสหรัฐอเมริกา) เช่นเดียวกันกับงานวิจัยในส่วนที่ 1 ข้อ 1.5

2.6 ศึกษาผลกระทบจากการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ (Freeze-thaw 5 cycles)

2.6.1 การเตรียมเจลสตาร์ชจากข้าวที่เต็มและไม่เต็มสารเจือปนอาหาร เพื่อใช้ศึกษาการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ (Freeze-thaw 5 cycles) และผลกระทบของระยะเวลาการเก็บ ดังนี้ การเตรียมสารเจือปนอาหาร โดยชั่งสารเจือปนอาหารร้อยละ 0.2 0.4 และ 0.6 โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้งไปละลายในน้ำกลั่น (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) ใส่ในบีกเกอร์ แล้วนำบีกเกอร์ที่มีสารละลายวางบนเครื่องให้ความร้อนที่มีการควบคุมเวลาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที หลังจากนั้นวางทิ้งไว้ให้เย็นจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิห้อง ถ้าปริมาณน้ำลดลงให้เติมน้ำ ให้ได้น้ำหนักเท่าเดิม หลังจากนั้นค่อย ๆ เติมสตาร์ชจากข้าวลงไป แล้วคนให้เข้ากัน คัดตัวอย่างสารแขวนลอยน้ำสตาร์ชที่เตรียมไว้ด้วยไซริงค์จำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในเพตริดิส (Petri-dishes) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร สูง 15 มิลลิเมตร ปิดฝาเพตริดิส และนำเจลสตาร์ชจากข้าวที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 20 นาที วางทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที นำเจลสตาร์ชไปแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส จนกระทั่งอุณหภูมิใจกลางเจลสตาร์ชมีอุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส นำเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งบรรจุใส่ในถุงพลาสติกซิปล็อค (Ziploc plastic bag) ชนิดพอลิเอทิลีน ขนาด 7 ลูก 10 เซนติเมตร แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

2.6.2 ศึกษาผลกระทบจากการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ ของเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เต็มและเต็มสารเจือปนอาหาร ที่ความเข้มข้นของสตาร์ช 1 ระดับ ทำการวางแผนการทดลองแบบ 4x4 Factorial in Completely Randomized Design ปัจจัยที่ศึกษามี 2 ปัจจัยดังนี้ ปัจจัยที่ 1 คือ สารเจือปนอาหาร 4 ชนิด (ทรีฮาโรส อัลจิเนต กัวกัม และ ไฮเมทอกซีเพกทิน) ปัจจัยที่ 2 คือ ปริมาณสารเจือปนอาหาร 4 ระดับ (ร้อยละ 0 0.2 0.4 และ 0.6) วิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ทำการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสและการจับของเหลวออกจากเจล เช่นเดียวกับส่วนที่ 1 ข้อ 1.6.2 (1) – 1.6.2 (2)

2.7 ศึกษาผลกระทบจากระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว เก็บที่อุณหภูมิ – 18 องศาเซลเซียส

2.7.1 การเตรียมเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เต็มและเต็มสารเจือปนอาหาร เช่นเดียวกันกับส่วนการศึกษาที่ 2 ข้อ 3.6.1

2.7.2 ตัวอย่างเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เต็มและเต็มสารเจือปนอาหาร ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ทำการหลอมละลาย ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสและการจับของเหลวออกจากเจล เช่นเดียวกับส่วนที่ 1 ข้อ 1.6.2 (1) – 1.6.2 (2) วางแผนการทดลองแบบ 4x4x7 Factorial in Completely Randomized Design ปัจจัยที่ศึกษามี 3 ปัจจัยดังนี้ ปัจจัยที่ 1 คือ สารเจือปนอาหาร 4 ชนิด (ทรีฮาไรส อัลจินต กัวกัม และ ไฮเมทอกซีเพกทิน) ปัจจัยที่ 2 คือ ปริมาณสารเจือปนอาหาร 4 ระดับ (ร้อยละ 0 0.2 0.4 และ 0.6) ปัจจัยที่ 3 คือ ระยะเวลาการเก็บที่ 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน วิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

2.7.3 ตัวอย่างเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เต็มและเต็มสารเจือปนอาหาร ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและเก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ทำการหลอมละลาย ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง และให้ความร้อนอีกครั้ง โดยการนำตัวอย่างไปนึ่งในลังถึงที่อุณหภูมิ น้ำเดือด นาน 20 นาที วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทำการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส เช่นเดียวกับส่วนที่ 1 ข้อ 1.6.2 (1) วางแผนการทดลองแบบ 4x4x8 Factorial in Completely Randomized Design ปัจจัยที่ศึกษามี 3 ปัจจัยดังนี้ ปัจจัยที่ 1 คือ สารเจือปนอาหาร 4 ชนิด (ทรีฮาไรส อัลจินต กัวกัม และ ไฮเมทอกซีเพกทิน) ปัจจัยที่ 2 คือ ปริมาณสารเจือปนอาหาร 4 ระดับ (ร้อยละ 0.0 0.2 0.4 และ 0.6) ปัจจัยที่ 3 คือ ระยะเวลาการเก็บที่ 0 (เจลสด) 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน วิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ผลการทดลอง

งานวิจัยส่วนที่ 1 ผลของระยะเวลาการแช่เยือกแข็งและความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลสตาร์ชจากข้าว

1.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากข้าว

จากตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติขององค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าวและปริมาณแอมิโลส จากข้าวสารเจ้า 9 พันธุ์ ที่ผ่านการสกัดด้วยสารละลายเบสที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.4 เพื่อแยกโปรตีนกลูเตลิน (glutelins) ออกจากตัวอย่างสตาร์ช พบว่าสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง ยังคงเหลือปริมาณโปรตีนสูงและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยสตาร์ชจากข้าวพันธุ์ชัยนาท1 (แอมิโลส 26.92 ± 1.03) มีปริมาณโปรตีนสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 0.43 ± 0.03 ซึ่ง Hagenimana and others (2005) กล่าวว่าโดยทั่วไปปริมาณโปรตีนของสตาร์ชที่ได้จากการสกัดสตาร์ชด้วยวิธีการแช่สารละลายเบส มีปริมาณโปรตีน ร้อยละ 0.07-0.42 ส่วนปริมาณไขมัน พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลางและแอมิโลสสูง มีปริมาณไขมันคงเหลือในสตาร์ชสูงกว่าสตาร์ชจากข้าวปริมาณแอมิโลสดำ (ขาวดอกมะลิ105 หอมสุพรรณบุรี และหอมคลองหลวง1) มีปริมาณไขมันระหว่างร้อยละ 0.06 ถึง 0.07 เพราะว่าสตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสสูงจะมีกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) และ lysophospholipids (LPL) ในปริมาณมากที่จับรวมเข้าด้วยกันเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไขมันกับแอมิโลส (Morrison 1995) จากการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าจะเห็นว่าตัวอย่างสตาร์ชจากข้าวมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นสตาร์ชจากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณเถ้าต่ำสุด เท่ากับ ร้อยละ 0.15 เนื่องจากในขั้นตอนการการเตรียมน้ำแป้งเพื่อนำมาสกัดแยกโปรตีน น้ำแป้งได้ผ่านการกรองเพื่อแยกกากและเอื้อโยออกไป ทำให้ในตัวอย่างสตาร์ชแห้งมีปริมาณเถ้าลดลง

ปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชข้าวสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่มตามวิธีของ International Rice Research Institute (IRRI) แบ่งกลุ่มของปริมาณแอมิโลส 3 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มแอมิโลสดำ กลุ่มแอมิโลสปานกลาง และกลุ่มแอมิโลสสูง มีปริมาณแอมิโลส เท่ากับ ร้อยละ 12-20 , 20-25 และสูงกว่าร้อยละ 25 ตามลำดับ จากการศึกษาปริมาณแอมิโลสจากสตาร์ชข้าวทั้ง 9 พันธุ์ พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ปริมาณแอมิโลสที่วิเคราะห์ได้ดังแสดงในตารางที่ 3 จะเห็นว่าสตาร์ชจากข้าวขาวดอกมะลิ105 มีปริมาณแอมิโลสดำที่ต่ำสุด เท่ากับ ร้อยละ 9.79 ± 0.71 เช่นเดียวกับสตาร์ชจากข้าวพันธุ์หอมสุพรรณบุรีและหอมคลองหลวง1 ที่มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 15.08 ± 0.69

และ 12.53 ± 0.86 ตามลำดับ ดังนั้นสสารจากข้าวทั้งสามพันธุ์จึงจัดอยู่ในกลุ่มแอมิโลสต่ำ ซึ่งค่าที่ได้แตกต่างจากการศึกษาปริมาณแอมิโลสจากข้าวโม (milled rice) ของ Limpisut and Jindel (2002) ได้ว่าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 และหอมคลองหลวง1 มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 16.0 - 17.2 และ 19.0 - 20.5 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสารจากข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี2 สุพรรณบุรี60 และ ข้าวตาแห้ง17 พบว่ามีปริมาณแอมิโลส เท่ากับ ร้อยละ 20.11 ± 1.11 , 21.12 ± 0.53 และ 23.47 ± 0.52 ตามลำดับ โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และได้จัดให้อยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง ซึ่งปริมาณแอมิโลสที่ได้มีค่าต่ำกว่าของการวิเคราะห์ของ Limpisut and Jindel (2002) ในข้าวสุพรรณบุรี2 และ สุพรรณบุรี60 มีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 23.9 – 24.9 และ 27.0 – 28.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณแอมิโลสของสารจากข้าว 9 พันธุ์

พันธุ์ข้าว	ความชื้น (ร้อยละ)	โปรตีน (ร้อยละ)	ไขมัน (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	ปริมาณ แอมิโลส (ร้อยละ)
ข้าวดอกมะลิ105	$12.39 \pm 0.72b$	$0.11 \pm 0.02d$	$0.07 \pm 0.02bc$	$0.15 \pm 0.06c$	$9.79 \pm 0.71i$
หอมสุพรรณบุรี	$13.35 \pm 0.71a$	$0.11 \pm 0.02d$	$0.06 \pm 0.02c$	$0.25 \pm 0.02b$	$15.08 \pm 0.69g$
หอมคลองหลวง1	$12.88 \pm 0.33ab$	$0.10 \pm 0.01d$	$0.06 \pm 0.03c$	$0.26 \pm 0.02b$	$12.53 \pm 0.86h$
ข้าวตาแห้ง17	$12.93 \pm 0.77ab$	$0.21 \pm 0.02b$	$0.09 \pm 0.02ab$	$0.25 \pm 0.01b$	$23.47 \pm 0.52d$
สุพรรณบุรี 2	$12.44 \pm 0.72b$	$0.16 \pm 0.03c$	$0.10 \pm 0.02a$	$0.26 \pm 0.10b$	$20.11 \pm 1.11f$
สุพรรณบุรี 60	$13.13 \pm 0.72ab$	$0.16 \pm 0.01c$	$0.10 \pm 0.02a$	$0.25 \pm 0.02b$	$21.12 \pm 0.53e$
เหลื่องประทิว123	$12.61 \pm 0.65ab$	$0.41 \pm 0.03a$	$0.10 \pm 0.03a$	$0.28 \pm 0.04ab$	$25.41 \pm 0.68c$
ชัยนาท1	$12.57 \pm 0.57ab$	$0.43 \pm 0.03a$	$0.09 \pm 0.02ab$	$0.26 \pm 0.01b$	$26.92 \pm 1.03b$
พลาขาม	$12.91 \pm 0.56ab$	$0.41 \pm 0.03a$	$0.10 \pm 0.02a$	$0.35 \pm 0.03a$	$27.90 \pm 0.44a$
ปราจีนบุรี					
Pr > F	0.1648	0.0001	0.0001	0.008	0.0001

หมายเหตุ a,b... ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ โดยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) ค่าที่ได้จากการคำนวณค่าน้ำหนักแห้ง (dry basis)

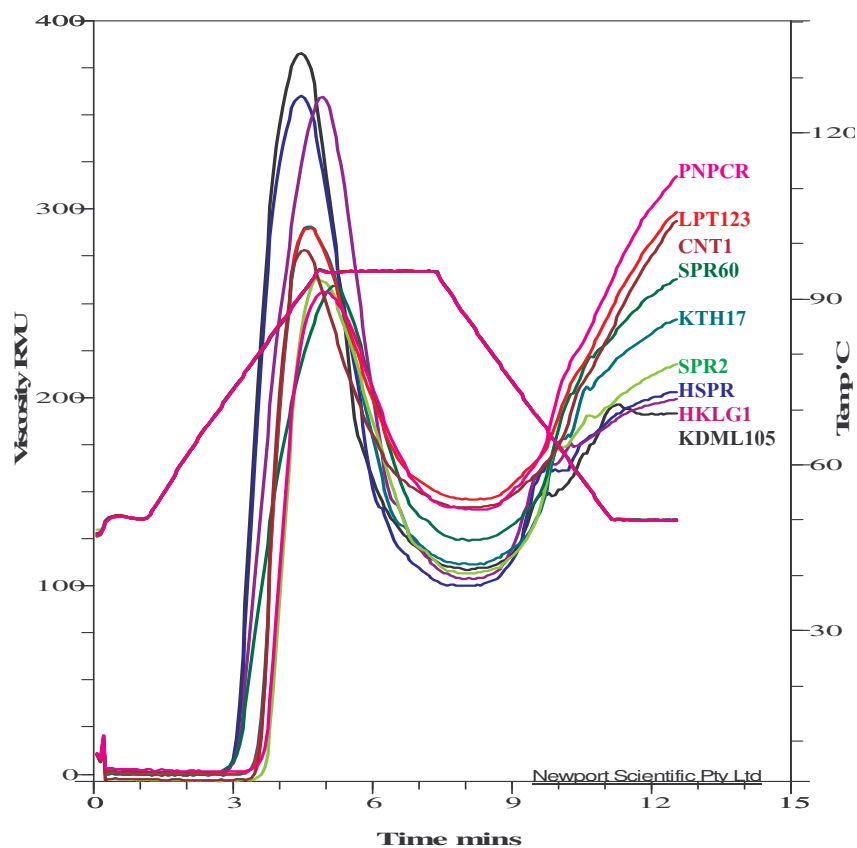
และ Pr > F = P value of the F test

นอกจากนี้จากการศึกษาตัวอย่างข้าวครั้งนี้พบว่าสสารจากข้าวพลาขามปราจีนบุรี มีปริมาณแอมิโลสสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 27.90 ± 0.44 รองลงมาได้แก่ ชัยนาท1 (26.92 ± 1.03) และ เหลืองประทิว123 (25.41 ± 0.68) ตามลำดับ ซึ่งได้จัดให้อยู่ในกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูง ซึ่งค่าที่ได้นี้ในสสารจากข้าวพันธุ์พลาขามปราจีนมีค่าที่สูงกว่าการศึกษาของ Varavinit and others (2003) ที่ได้ปริมาณแอมิโลสร้อยละ 26.02 ± 0.37 แต่มีค่าต่ำกว่าของ Yoenyongbuddhagal and Noomhorm (2002) ที่ได้ปริมาณแอมิโลสร้อยละ 32.90 ส่วนสสารจากข้าวพันธุ์ชัยนาท1 มีค่าต่ำกว่าการศึกษาของ Limpisut and Jindel (2002) และ Yoenyongbuddhagal and Noomhorm (2002) ที่ได้ปริมาณแอมิโลสร้อยละ 31.2-32.3 และ 35.20 ตามลำดับ แต่มีค่าสูงกว่าการศึกษาของ Varavinit and others (2003) ที่ได้ปริมาณแอมิโลส ร้อยละ 23.98 ± 0.28 นอกจากนี้สสารจากข้าวเหลืองประทิว123 มีค่าวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสต่ำกว่าของ Limpisut and Jindel (2002) พบว่าข้าวเหลืองประทิว123 มีปริมาณแอมิโลส ร้อยละ 30.9-31.5 การที่ค่าแอมิโลสในการศึกษาครั้งนี้มีค่าที่แตกต่างกัน อาจเป็นเพราะปีการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน ดังนั้นจะเห็นว่าในข้าวพันธุ์เดียวกันมีปริมาณแอมิโลสแตกต่างโดยตัวอย่างข้าวของ Limpisut and Jindel (2002) เป็นข้าวผลิตในปี 1998 ส่วนตัวอย่างข้าวในงานวิจัยครั้งนี้ผลิตในปี 2001 สภาพแวดล้อมการปลูกและแหล่งที่ปลูก ส่งผลต่อปริมาณแอมิโลส ถ้าอุณหภูมิของฤดูการเพาะปลูกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ได้ปริมาณแอมิโลสในข้าวลดลง มีการเพิ่มจำนวนความยาวพันธะของแอมิโลเพกทิน (the amount of amylopectin chains) และเมื่อสสารมีความยาวพันธะสั้นลง (the short chain length) (Tester and Karkalas 2001; Dang and Copeland 2004; Aboubacar and others 2006) นอกจากนี้ปริมาณไขมันจะรบกวน (interference) ในการวิเคราะห์แอมิโลส (Juliano 1984) อย่างไรก็ตามจากการเปรียบเทียบปริมาณแอมิโลสของสสารจากข้าวที่ผ่านการสกัดไขมันกับสสารที่ไม่ผ่านการสกัดไขมันก่อนการวิเคราะห์สสารจากข้าว 7 พันธุ์ ของประเทศอาร์เจนตินา พบว่าสสารส่วนมากที่มีการสกัดไขมัน จะมีปริมาณแอมิโลสสูงกว่า แต่มีสสารจากข้าวที่ไม่ได้สกัดไขมันบางพันธุ์ มีปริมาณแอมิโลสสูงกว่าสสารที่สกัดไขมันออก (Iturriaga and others 2004) หรือเป็นเพราะความสามารถในการจับกับสารไอโอดีนของสสาร (iodine affinity) โดยความสามารถในการจับกับสารไอโอดีนมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับจำนวนของความยาวพันธะกิ่งก้านของแอมิโลเพกทิน (Jane and others 1999)

1.2 ผลของการศึกษาคุณสมบัติความหนืดของสสารจากข้าว

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติความหนืดของสสารและการเกิดเจลาติโนเซชันของสสารจากข้าว 9 พันธุ์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyser, RVA) จากผลการศึกษาค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) คือจุดสมดุลระหว่างการพองตัวที่ทำ

ให้ความหนืดเพิ่มขึ้นกับการทำลายเม็ดสตาโรนของเครื่องกวนที่ทำให้ความหนืดลดลง วัดค่าเป็น อุณหภูมิที่ความหนืดสูงสุด (peak temperature) และเวลาที่ความหนืดสูงสุด (peak time) ที่เกิดขึ้นใน ขณะที่ความหนืดสูงสุด (อรอนงค์ นัยวิกุล และ Elliott B 2544) ซึ่งบอกถึงความสามารถในการ จับน้ำของสตาโรนและเม็ดสตาโรนพองตัวมากที่สุด (ตารางที่ 2) พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยสตาโรนจากข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำให้ค่าความหนืดสูงสุดสูง กว่ากลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลางและปริมาณแอมิโลสสูง เห็นได้จากสตาโรนจากข้าวขาว ดอกมะลิ 105 ให้ค่านี้สูงสุด เท่ากับ 388.66 ± 39.92 RVU (ภาพที่ 1) เนื่องจากการเกิดจากอันตรกิริยา ระหว่างโมเลกุลกึ่งกันของแอมิโลเพกทิน ทำให้ความหนืดของข้าวแอมิโลสต่ำมีความหนืดสูงกว่า ข้าวแอมิโลสสูง (Jane and Chen 1992) จากการศึกษาของ Varavinit and others (2003) สรุปว่า สตาโรนจากข้าวที่มีแอมิโลสต่ำ จะให้ค่าความหนืดสูงสุดและค่าการแตกตัว (Breakdown) สูงสุด และมีค่าเซตแบคต่ำสุด ทั้งนี้ ออรอนงค์ นัยวิกุล และ Elliott B (2544) รายงานว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ให้ค่าความหนืดสูงสุดและสูงกว่าข้าวหอมคลองหลวง1 โดยความหนืดของสตาโรนขึ้นกับขนาด เม็ดสตาโรน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ปริมาณผลึกภายในเม็ดสตาโรน ขนาดโมเลกุลของแอมิโลสและความยาวกึ่งกันของแอมิโลเพกทิน ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติความหนืด (Jane and Chen 1992) นอกจากนี้ถ้าสตาโรนมีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหนืดสูงสุดที่ได้มีค่าลดลง จะสังเกตได้จากตารางที่ 2 สตาโรนจากข้าวกลุ่มแอมิโลสสูง ซึ่งมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าข้าวที่มี ปริมาณแอมิโลสปานกลางและต่ำ



ภาพที่ 1 กราฟความหนืด (Pasting curve) ของสตาร์ชจากข้าวแต่ละพันธุ์ (KDML105 = ข้าวดอกมะลิ105, HSPR = หอมสุพรรณบุรี, HKLG1 = หอมคลองหลวง1, KTH17 = ข้าวตาแห้ง17, SPR2 = สุพรรณบุรี2, SPR60 = สุพรรณบุรี60, LPT123 = เหลืองประทิว123, CNT1 = ชัยนาท1, PNPCR = พลายงามปราจีนบุรี)

ตารางที่ 2 ค่าอุณหภูมิการเกิดเจลที่ในเซชันและความหนืดของเพสต์ของสตาร์ชจากข้าว 9 พันธุ์

พันธุ์ข้าว (Rice Varieties)	ค่าความหนืด (Viscosity)					
	ค่าความหนืดสูงสุด	ค่าความคงทนต่อ	ค่าการแตกตัว	ค่าความหนืดสุดท้าย	ค่าการคืนตัว	Pasting
	(Peak Viscosity)	การกวน (Trough1)	(Breakdown)	(Final Viscosity)	(Set Back)	Temperature
	(RVU)	(RVU)	(RVU)	(RVU)	(RVU)	(°ซ)
ข้าวดอกมะลิ105	388.66±39.92 ^a	118.57±14.44 ^{bc}	270.09±52.06 ^a	192.13±11.80 ^d	-196.53 ±51.60 ^c	73.00±0.15 ^b
หอมสุพรรณบุรี	357.57±43.08 ^a	113.69±14.41 ^c	243.88±54.86 ^{ab}	216.08±10.81 ^{cd}	-141.49 ±44.07 ^c	73.14±0.92 ^b
หอมคลองหลวง1	366.61 ±55.84 ^a	114.99±21.04 ^{bc}	251.62±71.95 ^a	213.94±14.04 ^{cd}	-152.68 ±58.88 ^c	73.13±0.65 ^b
ขาวตาแห้ง17	286.54±6.17 ^b	106.71±7.90 ^c	179.83±8.49 ^{bc}	224.96±14.97 ^{bc}	-61.58±12.80 ^b	78.68±0.41 ^a
สุพรรณบุรี 2	260.55±16.99 ^b	100.88 ±7.73 ^c	159.67±10.17 ^c	203.11±16.82 ^{cd}	-57.44 ±7.67 ^b	80.22±0.13 ^a
สุพรรณบุรี 60	264.45±28.17 ^b	118.47±12.00 ^c	145.99±39.96 ^c	250.62±22.34 ^b	-13.83±50.20 ^{ab}	73.19±1.32 ^b
เหลืองปะทิว123	288.83±10.66 ^b	157.50±19.30 ^a	131.33±29.78 ^c	311.57±18.13 ^a	22.75±12.92 ^a	78.94±1.09 ^a
ชัยนาท 1	279.91±15.23 ^b	143.36 ±2.10 ^a	136.55±16.73 ^c	298.74±15.14 ^a	18.83±30.12 ^a	79.10±0.93 ^a
พลาญงามปราจีนบุรี	249.44±13.87 ^b	138.81±9.03 ^{ab}	110.64±21.99 ^c	306.01±12.43 ^a	56.57±22.21 ^a	79.53 ±0.98 ^a
Pr > F	0.0001	0.0008	0.0005	0.0001	0.0001	0.0001

หมายเหตุ a,b...ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ โดยตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) และ Pr > F = P value of the F test

ค่าความคงทนต่อการกวน (Trough หรือ hot paste viscosity หรือ shear thinning) เป็นผลมาจากเมื่ออุณหภูมิสูงไ้ระยะหนึ่ง จะมีผลให้ความหนืดลดลง เนื่องจากอุณหภูมิ อัตราการกวน แรงที่ใช้ในการกวนและคุณสมบัติของเมล็ดสตาร์ช ซึ่งจากตารางที่ 2 และภาพที่ 1 พบว่า สตาร์ชจากข้าวแต่ละพันธุ์ให้ค่าความคงทนต่อการกวน โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ซึ่งสตาร์ชจากข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสสูง มีค่าความคงทนต่อการกวนเพิ่มขึ้นและ สตาร์ชจากข้าวเหลืองประทิว 123 ให้ค่าความคงทนต่อการกวนสูงที่สุด เท่ากับ 157.50 ± 19.30 RVU อาจเนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโมเลกุลแอมิโลสกับไขมัน ทำให้เจลสตาร์ชจากข้าวกลุ่มที่มีแอมิโลสสูงมีความทนต่อการกวน (resistance to shear-thinning) (Jane and others 1999) เช่นเดียวกับค่าการแตกตัว (Breakdown) หรือช่วงความหนืดลดลง เป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสูงสุดกับค่าความคงทนต่อการกวน ใช้ในการอธิบายถึงความสามารถในการคงตัวของเพสต์ ระหว่างการทำให้สุก จากการศึกษาพบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยสตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำให้ค่าการแตกตัวสูงกว่ากลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง และกลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง โดยเฉพาะสตาร์ชจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 ให้ค่าการแตกตัวสูงสุด เท่ากับ 270.09 ± 52.06 RVU การที่ข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำให้ค่าความคงทนต่อการกวนและค่าการแตกตัวสูง เนื่องจากแอมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างกิ่งก้าน (branched chain) และน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าแอมิโลส ทำให้ทนต่อแรงเฉือน และอาจเป็นไปได้ว่าแอมิโลเพกทินที่มีความยาวพันธะกิ่งก้าน (very long branch-chain) เกิดลักษณะเช่นเดียวกับแอมิโลสกล่าวคือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับลิพิดได้เป็นโครงสร้างเกลียว (helical complexes) ทำให้โมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชเกิดการจับกันอย่างเหนียวแน่น จึงทนต่อแรงเฉือนในระหว่างการให้ความร้อนแก่เพสต์ (Jane and others 1999) จากการศึกษาของ Varavinit and others (2003) กล่าวว่าข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำหรือข้าวเหนียว ให้ค่าการแตกตัวสูงกว่าข้าวกลุ่มแอมิโลส ปานกลางถึงสูง แต่ขัดแย้งกับการศึกษาของ Noda and others (2003) เกี่ยวกับคุณสมบัติของสตาร์ชจากข้าวในประเทศญี่ปุ่น พบว่าข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ จะให้ค่าการแตกตัว (165 ± 54 RVU) ต่ำกว่าข้าวกลุ่ม Normal rice ได้แก่พันธุ์ Nipponbare และ Hinohikari (285 ± 37 RVU) และจากการศึกษาของ Lai (2001) ข้าวจาปอนิกาที่มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 18.62 ให้ค่าการแตกตัวต่ำกว่าข้าวอินดิกาที่มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 30.18 ค่าความหนืดสุดท้าย (Final Viscosity) เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อทำการลดอุณหภูมิลงทำให้โมเลกุลสตาร์ชเกิดการจัดเรียงตัวอีกครั้ง (reassociation) ถ้ามีความเข้มข้นมากจะเกิดการรวมตัวกันเป็นเจล (gel) ให้ความหนืดสุดท้ายเพิ่มขึ้น คำนี้นี้ใช้ในการอธิบายลักษณะความหนืดหรือเจลที่จะเกิดขึ้น หลังการให้ความร้อนและทำให้เย็น (อรอนงค์ นัยวิกุล และ Elliott B 2544) จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าค่าความหนืดสุดท้าย แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยสตาร์ชจากข้าวกลุ่มแ

มิโลสสูง มีค่าความหนืดสุดท้ายสูงสุด อยู่ในช่วง 298.74 ถึง 311.57 RVU และสตาร์ชจากข้าวกลุ่ม แอมิโลสต่ำ โดยเฉพาะสตาร์ชจากข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่าความหนืดสุดท้ายต่ำสุด เท่ากับ 192.13 - 11.80 RVU สอดคล้องกับการศึกษาของ Lai (2001) ได้ว่าข้าวอินดิกาให้ค่าความหนืดสุดท้ายสูงกว่าข้าวจาปอนิกา จากช่วงเส้นโค้งของความหนืดสุดท้าย จะได้ค่าการคืนตัว (setback) หรือ cold paste viscosity ได้จากความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) กับค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เป็นค่าที่บอกละการความหนืดปรากฏของเพสต์หลังการทำให้เย็นและการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยมีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช เช่น การจับของเหลวออกจากเจล (syneresis หรือ sweeping) การคืนรูปจากเยือกแข็ง (freeze-thaw cycle) ซึ่งค่าการคืนตัว ขึ้นกับชนิดของสตาร์ช หรือสภาวะการทดสอบ (อรอนงค์ นัยวิกุล และ Elliott B 2544) จากตารางที่ 2 และภาพที่ 1 พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ จะเกิดรีโทรเกรเดชันช้ากว่าสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลางถึงแอมิโลสสูง โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) คือสตาร์ชจากข้าวขาวดอกมะลิ105 ให้ค่าการคืนตัวต่ำสุด เท่ากับ -196.53 ± 51.60 RVU และสตาร์ชจากข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสสูง สามารถเกิดรีโทรเกรเดชันเร็วที่สุด และมีค่าการคืนตัวตามลำดับดังนี้ สตาร์ชจากข้าวพันธุ์พลาขามปราจีนบุรี เหลืองประทิว123 และ ชัยนาท1 เท่ากับ 56.57 ± 22.21 , 22.75 ± 12.92 และ 18.83 ± 30.12 RVU เช่นเดียวกับการศึกษาของ Varavinit and others (2002) จากค่าการคืนตัว สรุปลำดับของการเกิดรีโทรเกรเดชันจากมากไปหาน้อยดังนี้ แป้งข้าวที่มีแอมิโลสสูง > แป้งข้าวเจสมิน > แป้งข้าวเหนียว

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิต่ำสุดที่เมล็ดสตาร์ชเริ่มการเจลาติไนซ์ (Pasting Temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด จะวัดเมื่อเริ่มความหนืดที่ 2 RVU พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยสตาร์ชจากข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ มีอุณหภูมิต่ำสุดที่เมล็ดสตาร์ชเริ่มการเจลาติไนซ์ อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 73.00 ± 0.15 ถึง 73.19 ± 0.92 องศาเซลเซียส และต่ำกว่าข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลางและแอมิโลสสูง ที่ต้องการอุณหภูมิต่ำสุดที่เมล็ดสตาร์ชเริ่มการเจลาติไนซ์ อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 78.68 ± 0.41 ถึง 80.22 ± 0.13 องศาเซลเซียส และค่าที่ได้ในกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลางและสูง แตกต่างกันอย่างไม่เป็นนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เป็นไปได้ว่าเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโมเลกุลของแอมิโลสกับไขมัน ทำให้ได้โมเลกุลที่มีลักษณะเกลียวม้วนซับซ้อน (helical complexes) ส่งผลให้มีการจับกันภายในโครงสร้างของเจลสตาร์ชมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จึงทำให้กลุ่มแอมิโลสสูงมีอุณหภูมิที่เมล็ดสตาร์ชเริ่มการเจลาติไนซ์สูงกว่าสตาร์ชจากข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (Jane and others 1999) อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้พบว่า สตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลางบางพันธุ์ ได้แก่ ข้าวสุพรรณบุรี60 มีอุณหภูมิต่ำสุดที่

เมล็ดสตาร์ชเริ่มการเจลาติไนซ์ เท่ากับ 73.19 ± 1.32 องศาเซลเซียส โดยแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) กับสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ ซึ่งอาจเกิดจากสตาร์ชที่มีแอมิโลสใกล้เคียงกันลักษณะเมล็ดสตาร์ชมีความเป็นผลึกที่แตกต่างกัน ทำให้มีผลต่อการจับกับน้ำ การพองตัวและการเกิดเจลาติไนซ์ (Iturriaga and others 2004) การศึกษาของ Varavinit and others (2003) กล่าวว่าข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำหรือข้าวเหนียว มีอุณหภูมิต่ำสุดที่เมล็ดสตาร์ชเริ่มการเจลาติไนซ์อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 69.40-73.80 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาครั้งนี้แต่ข้าวกลุ่มแอมิโลสปานกลางและแอมิโลสสูง มีอุณหภูมิต่ำสุดที่เมล็ดสตาร์ชเริ่มการเจลาติไนซ์สูงกว่า 90 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ทำการศึกษานี้ แต่จากการศึกษาของ Lai (2001) สรุปว่าข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ ต้องการอุณหภูมิต่ำสุดที่เมล็ดสตาร์ชเริ่มการเจลาติไนซ์ต่ำกว่าข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง ซึ่งอุณหภูมิต่ำสุดที่เมล็ดสตาร์ชเริ่มการเจลาติไนซ์ที่แตกต่างกัน ขึ้นกับลักษณะการอัดแน่นของเมล็ดสตาร์ช (Juliano 1984) ปริมาณโปรตีนและการสกัดแยกสตาร์ชที่ทำให้เมล็ดสตาร์ชเกิดการเสียหาย (damaged starch) โดยส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการเกิดเจลาติไนเซชัน (Wang and Wang 2001) นอกจากนี้ความยาวพันธะของแอมิโลเพกทินที่มีขนาดสั้น คือในช่วง DP 6-9 มีผลไปลดอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน แต่ถ้ามีความยาวพันธะของแอมิโลเพกทินที่มีขนาดยาว คือในช่วง DP 12-22 อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้น (Vandeputte and others 2003)

1.3 ผลของการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจากข้าว

ผลการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางความร้อนของสตาร์ชจากข้าว โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) จัดการทดลองแบบ 9×4 Factorial in Completely Randomized Design มีปัจจัยที่ศึกษา 2 ปัจจัยดังนี้ ปัจจัยที่ 1 คือ สตาร์ชจากข้าวเจ้า 9 พันธุ์ ปัจจัยที่ 2 คือ ความเข้มข้นของสตาร์ชจากข้าว 4 ระดับ (ร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักแห้ง) ผลการศึกษการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของการเกิดเจลาติไนซ์ของสตาร์ชจากข้าวต่ออุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนซ์ (onset temperature; T_o) อุณหภูมิพีค (peak temperature = T_p) เอนทัลปีของการเจลาติไนเซชัน (ΔH_G = enthalpy of gelatinization) พบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมกันของสองปัจจัย แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ที่ปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัย (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชจากข้าว
โดยเครื่อง DSC

ปัจจัยการศึกษา		T_o (oC)	T_p (oC)	ΔH_G (J/g)
ปัจจัยที่ 1 Rice Varieties	KDML105	63.64e	68.17e	3.51bcd
	HSPR	63.03f	67.99ef	2.96d
	HKLG1	64.03e	67.92f	3.39bcd
	KTH17	69.58d	73.91d	4.63a
	SPR2	72.34a	76.02a	4.43ab
	SPR60	60.95g	65.97g	3.23cd
	LPT123	71.21b	75.13b	4.21abc
	CNT1	71.30b	75.12b	3.53bcd
	PNPCR	70.71c	74.52c	3.54bcd
	Pr > F	<.0001	<.0001	0.0167
ปัจจัยที่ 2 Starch Concentration	20	67.84a	72.05a	2.85c
	30	67.65a	71.77b	3.80b
	40	67.24b	71.43c	5.20a
	50	66.96b	71.30c	3.02c
	Pr > F	<.0001	<.0001	<.0001

หมายเหตุ a,b...ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งของแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษา (พันธุ์ข้าวและความเข้มข้นของสตาร์ช) แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) และเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลอง 2 ซ้ำ
 T_o = อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลลาทีโนเซชัน ; T_p = อุณหภูมิพีกหรืออุณหภูมิเจลลาทีโนเซชัน ;
 ΔH_G = เอนทัลปีของการเจลลาทีโนเซชัน และ Pr > F = P value of the F test,
 KDML105 = ข้าวดอกมะลิ105 , HSPR = หอมสุพรรณบุรี, HKLG1 = หอมคลองหลวง1,
 KTH17 = ข้าวตาแห้ง17, SPR2 = สุพรรณบุรี2, SPR60 = สุพรรณบุรี60,
 LPT123 = เหลืองประทิว123, CNT1 = ชัยนาท1, PNPCR = พลายงามปราจีนบุรี)

ผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลลาตินไนซ์ของสตาร์ชจากข้าวต่ออุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาตินไนซ์ (onset temperature; T_o) ผลของปัจจัยเกี่ยวกับพันธุ์ข้าว จะเห็นว่าพันธุ์ข้าวมีผลให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาตินไนซ์แตกต่างกันดังนี้ สตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำ มีอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาตินไนซ์ต่ำ (low gelatinization temperature) อยู่ในช่วง 63.03 ถึง 64.03 องศาเซลเซียส โดยสตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสสูง มีอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาตินไนซ์สูง (high gelatinization temperature) อยู่ในช่วง 70.71 ถึง 71.30 องศาเซลเซียส ทั้งนี้สตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสปานกลาง พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินไนซ์ไม่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 60 มีอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาตินไนซ์ต่ำสุด (60.95 องศาเซลเซียส) แต่สตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 2 ให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาตินไนซ์สูงสุด (72.34 องศาเซลเซียส) โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ซึ่งค่าที่ได้นี้สอดคล้องกับการวัดด้วยเครื่อง RVA (ตารางที่ 2) ที่พบว่าสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 60 มีค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่เมล็ดสตาร์ชเริ่มการเจลลาตินไนซ์ต่ำสุดและใกล้เคียงกับกลุ่มแอมิโลสต่ำ ส่วนสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 2 มีค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่เมล็ดสตาร์ชเริ่มการเจลลาตินไนซ์สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิพิก ซึ่งเป็นอุณหภูมิเจลลาตินไนซ์ของสตาร์ช ค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 3 พบว่ามีผลการศึกษาไปทิศทางเดียวกันกับอุณหภูมิเริ่มเจลลาตินไนซ์ ดังนั้น สตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำ มีอุณหภูมิเจลลาตินไนซ์ต่ำกว่าสตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสสูง และสตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสปานกลาง ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิเจลลาตินไนซ์ ไม่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับปริมาณแอมิโลส กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบสตาร์ชจากข้าวทั้ง 9 พันธุ์ พบว่าสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 2 ที่มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 20.11 ± 1.11 มีอุณหภูมิเจลลาตินไนซ์สูงสุด (76.02 องศาเซลเซียส) และสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 60 ปริมาณแอมิโลสร้อยละ 21.2 ± 0.53 มีอุณหภูมิเจลลาตินไนซ์ต่ำสุด (65.97 องศาเซลเซียส) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จากการเปรียบเทียบค่าเอนทัลปีของสตาร์ชจากข้าว 9 พันธุ์ (ตารางที่ 3) พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยสตาร์ชจากข้าวขาวตาแห้ง 17 มีค่าเอนทัลปีสูงสุด เท่ากับ 4.63 จูลต่อกรัม และสตาร์ชจากข้าวหอมสุพรรณบุรี มีค่าเอนทัลปีต่ำสุด เท่ากับ 2.96 จูลต่อกรัม จากการศึกษาครั้งนี้ปริมาณแอมิโลสที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าเอนทัลปี แต่จากผลการศึกษาของ Varavinit and others (2003) พบว่าปริมาณแอมิโลสมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลลาตินไนซ์ และอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินไนซ์และปริมาณแอมิโลสไม่มีความสัมพันธ์กับค่าเอนทัลปีของการเจลลาตินไนซ์ ซึ่งแตกต่างกับการศึกษาของ Noda and others (2003) พบว่าปริมาณแอมิโลสมีความสัมพันธ์เชิงลบกับอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลลาตินไนซ์ อุณหภูมิการเกิดเจลลาตินไนซ์และค่าเอนทัลปีของการเจลลาตินไนซ์ ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชจากข้าวที่มีค่าความเป็นผลึกสูง ค่าเอนทัลปีสูงขึ้นด้วย และค่าเอนทัลปีไม่มีความสัมพันธ์กันกับอุณหภูมิเจลลาตินไนซ์

โดยสตาร์ชที่มีค่าความเป็นผลึกสูงและการจัดเรียงโมเลกุลที่มีระเบียบสูง (high molecular order) ส่งผลให้อุณหภูมิเจลาติไนซ์สูงขึ้นและค่าเอนทัลปีเพิ่มขึ้นด้วย (Cooke and Gidley 1992; Iturriaga and others 2004) นอกจากนี้ผลจากลักษณะโครงสร้างของแอมิโลเพกทิน (amylopectin fine structure) เช่น การกระจาย ความยาวและการจัดเรียงของพันธะเส้นตรงมีผลต่อคุณสมบัติการเจลาติไนเซชัน ถ้าโครงสร้างแอมิโลเพกทินมีค่าเฉลี่ยของ degree polymerization (DPn) มากกว่า 10 จะเกิดโครงสร้างผลึกเพิ่มขึ้น ดังนั้นสตาร์ชจากข้าวมีอุณหภูมิเจลาติไนซ์สูงและค่าเอนทัลปีเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวที่เพาะปลูกในสภาวะอุณหภูมิสูงคืออุณหภูมิกลางวัน 31-35 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิกกลางคืน 22-24 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ได้โครงสร้างแอมิโลเพกทิน ประกอบด้วย DPn short chains (Aboubacar and others 2006) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าพันธุ์ข้าวมีผลต่ออุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลาติไนซ์และอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน ขึ้นกับโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช ขนาดของเม็ดสตาร์ช ลักษณะการอัดแน่นของเม็ดสตาร์ช และค่าความเป็นผลึก (Juliano 1984; Iturriaga and others 2004; Sidhi and Singh 2003)

เมื่อพิจารณาผลความเข้มข้นของสตาร์ชจากข้าวต่อค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนซ์ พบว่าเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนซ์เพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนซ์สูงสุดที่ปริมาณน้ำร้อยละ 80 (สตาร์ช 20 : น้ำ 80) เท่ากับ 67.84 องศาเซลเซียส โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับปริมาณน้ำร้อยละ 40 และร้อยละ 50 แต่เมื่อเปรียบเทียบสตาร์ชจากข้าวที่เติมปริมาณน้ำร้อยละ 70 ถึง 80 (สตาร์ชจากข้าว ร้อยละ 30 และ 20) พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) จากการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นสตาร์ชต่ออุณหภูมิเจลาติไนเซชัน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิเจลาติไนเซชันลดลงโดยที่ความเข้มข้นของสตาร์ชต่ำสุด (ร้อยละ 20) มีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันสูงสุด เท่ากับ 72.05 องศาเซลเซียส แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับความเข้มข้นร้อยละ 30 - 40 อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 40 และ 50 มีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Iturriaga and others (2004) และ Saif and others (2003) พบว่าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนซ์และอุณหภูมิเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ขึ้นกับค่าความเป็นผลึกของเม็ดสตาร์ช จากผลการศึกษานี้พบว่าปริมาณน้ำหรือความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้น ไม่สามารถบอกได้ว่าให้ค่าเอนทัลปีเพิ่มขึ้นหรือลดลง แต่พบว่าที่ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 40 ให้ค่าเอนทัลปีสูงสุด เท่ากับ 5.20 จูลต่อกรัม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และที่ความเข้มข้นสตาร์ชร้อยละ 20 ให้ค่าเอนทัลปีต่ำสุด เท่ากับ 2.85 จูลต่อกรัม อย่างไรก็ตามสตาร์ชจากข้าวที่ความเข้มข้น

ร้อยละ 40 และ 50 แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) อาจเนื่องจากปริมาณน้ำในระบบไม่เพียงพอในทำให้สสารเกิดการพองตัวและการเกิดเจลของสสาร

ตารางที่ 4 ผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของเจลสสารจากข้าวระหว่างการแช่เยือกแข็งโดยเครื่อง DSC

ปัจจัยการศึกษา		T_{gf} (oC)	T_{cc} (oC)	ΔH_f (J/g)
ปัจจัยที่ 1 Rice Varieties	KDML105	-47.45	-24.82c	56.17
	HSPR	-47.09	-21.33abc	110.62
	HKLG1	-46.50	-23.60bc	87.96
	KTH17	-47.55	-21.25abc	84.90
	SPR2	-48.22	-22.90bc	72.81
	SPR60	-47.80	-23.62bc	67.93
	LPT123	-47.64	-20.63ab	66.99
	CNT1	-47.52	-18.09a	108.26
	PNPC	-47.16	-20.65ab	59.00
	Pr > F	0.2134	0.0097	0.2896
ปัจจัยที่ 2 Starch Concentration	20	-47.24	-17.09a	129.59a
	30	-47.42	-19.17ab	87.07b
	40	-47.52	-21.20b	65.16bc
	50	-47.56	-28.67c	35.80c
	Pr > F	0.8461	<0.0001	<0.0001

หมายเหตุ a,b...ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่งของแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษา (พันธุ์ข้าวและความเข้มข้นของสสาร) แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\leq 0.05$) และเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลอง 2 ซ้ำ

(T_{gf} = glass transition temperature of freezing; T_{cc} = clod-crystallization

temperature; ΔH_f = Enthalpy of freezing และ Pr > F = P value of the F test,

KDML105 = ข้าวดอกมะลิ105, HSPR = หอมสุพรรณบุรี, HKLG1 = หอมคลองหลวง1,

KTH17 = ข้าวตาแห้ง17, SPR2 = สุพรรณบุรี2, SPR60 = สุพรรณบุรี60,

LPT123 = เหลืองประทิว123, CNT1 = ชัยนาท1, PNPCR = พลายงามปราจีนบุรี)

ผลการศึกษาการแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชจากข้าวโดยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter จากการลดอุณหภูมิตัวอย่างเจลสตาร์ชไปที่ -60 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดลง 20 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาวะกลาระหว่างการแช่เยือกแข็งอาหาร (glass transition in frozen foods) พบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสองปัจจัยแต่มีผลจากปัจจัยหลักทั้งสองที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) สามารถอธิบายได้ดังในตารางที่ 4 ค่าอุณหภูมิกลาทรานซิชันของการแช่เยือกแข็ง (T_{gf} = glass transition temperature of freezing) เจลสตาร์ชจากข้าวทั้ง 9 พันธุ์และความเข้มข้นของสตาร์ช พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยมีช่วงอุณหภูมิกลาทรานซิชันของการแช่เยือกแข็งระหว่างอุณหภูมิ -46.05 ถึง -48.22 องศาเซลเซียส และเจลสตาร์ชจากข้าวทั้ง 9 พันธุ์ มีค่าเอนทัลปีของการแช่เยือกแข็ง (enthalpy of freezing, ΔH_f) จาก 56.17 ถึง 110.62 จูลต่อกรัม แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่อุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็งระหว่างการแช่เยือกแข็ง (T_{cc} = cold-crystallization temperature) ของทั้งสองปัจจัยหลักคือพันธุ์ข้าวและความเข้มข้นของสตาร์ชแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยข้าวแอมิโลสสูงให้อุณหภูมิการสร้างผลึกน้ำแข็งลดลง เห็นได้จากเจลสตาร์ชข้าวชยันนาท1 มีอุณหภูมิการสร้างผลึกน้ำแข็งเท่ากับ -18.09 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 50 อุณหภูมิการสร้างผลึกน้ำแข็งลดลงจาก -17.09 ถึง -28.67 องศาเซลเซียส โดยค่าเอนทัลปีของการสร้างผลึกน้ำแข็งของเจลสตาร์ชจากข้าว แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ผลจากความเข้มข้นของสตาร์ชในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าความเข้มข้นของสตาร์ชจากข้าวลดลง (ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น) ที่ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 20 ทำให้ค่าเอนทัลปีของการสร้างผลึกน้ำแข็งเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Chang and Liu (1991) ได้ว่าเจลสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น มีค่าเอนทัลปีเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในการเปลี่ยนสภาวะจากน้ำให้กลายเป็นผลึกน้ำแข็ง

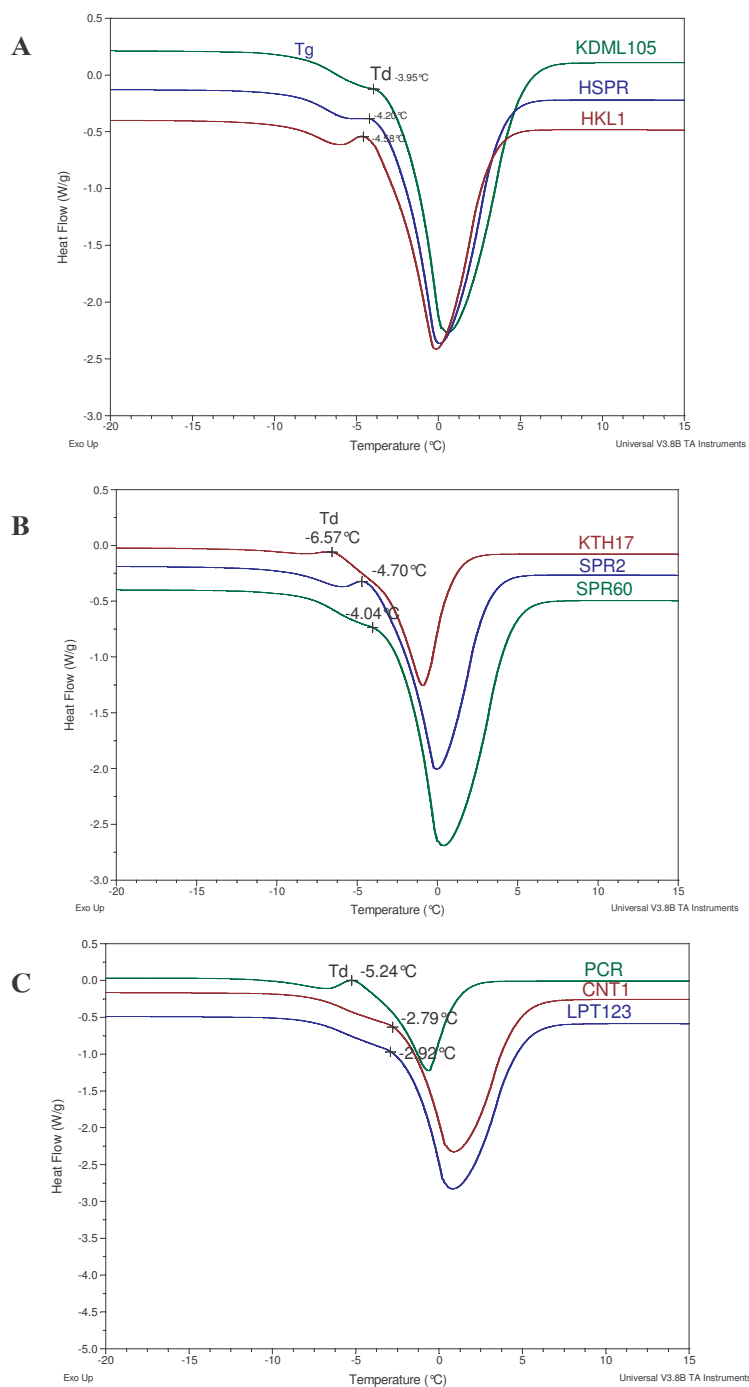
ตารางที่ 5 ผลของพันธุ์ข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนหลังการแช่เยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง (reheat) โดยเครื่อง DSC

ปัจจัยการศึกษา		$T_g (^{\circ}\text{C})$	$T_m (^{\circ}\text{C})$	$\Delta H (\text{J/g})$
ปัจจัยที่ 1 Rice Varieties	KDML105	-8.55	0.23	73.07
	HSPR	-8.60	0.12	124.91
	HKLG1	-8.20	0.30	104.64
	KTH17	-8.70	-0.10	93.52
	SPR2	-9.03	-0.17	81.03
	SPR60	-8.41	-0.57	81.11
	LPT123	-8.72	-0.21	70.86
	CNT1	-8.52	0.10	114.29
	PNPCR	-8.53	-0.40	67.25
Pr > F		0.9508	0.4097	0.2608
ปัจจัยที่ 2 Starch Concentration	20	-7.58a	0.14a	138.01a
	30	-8.44b	-1.02ab	90.61b
	40	-9.16b	-2.68b	82.17bc
	50	-9.15b	-1.44ab	49.51c
Pr > F		0.0004	0.0139	<.0001

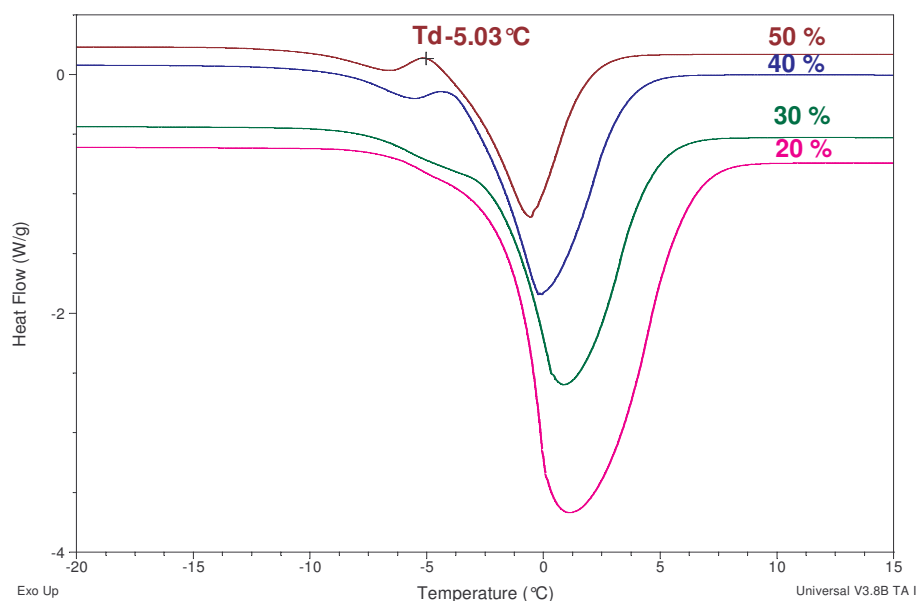
หมายเหตุ a,b...ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่งของแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษา (พันธุ์ข้าวและความเข้มข้นของสตาร์ช) แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) และเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลอง 2 ซ้ำ
 (T_g = glass transition temperature; T_m = melting temperature; (enthalpy of reheating; ΔH) และ $Pr > F$ = P value of the F test, KDML105 = ข้าวดอกมะลิ105, HSPR= หอมสุพรรณบุรี, HKLG1 = หอมคลองหลวง1, KTH17 = ข้าวตาแห้ง17, SPR2 = สุพรรณบุรี2, SPR60 = สุพรรณบุรี60, LPT123 = เหลืองประทิว123, CNT1 = ชัยนาท1, PNPCR = พลายงามปราจีนบุรี)

ผลการให้ความร้อนแก่เจลสตาร์จากข้าวอีกครั้ง (reheated) หลังจากเจลสตาร์จากข้าวแช่เยือกแข็ง พบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสองปัจจัย แต่มีผลจากปัจจัยหลักทั้งสองที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) พบว่าทั้งพันธุ์ข้าวและปริมาณแอมิโลสที่แตกต่างกัน ให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการให้ความร้อนอีกครั้ง (glass transition temperature of reheating, T_g) อุณหภูมิการหลอมละลายของการให้ความร้อนอีกครั้ง (melting temperature of reheating หรือ ice melting temperature, T_m) เป็นการหลอมละลายของน้ำแข็ง และค่าเอนทัลปี (enthalpy of reheating; ΔH) ของการให้ความร้อนอีกครั้ง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) มีช่วงอุณหภูมิ T_g -8.20 ถึง -9.03 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการหลอมละลายอยู่ในช่วง 0.10 ถึง -0.57 องศาเซลเซียส และมีค่าเอนทัลปีอยู่ในช่วง 67.26 ถึง 124.91 จูลต่อกรัม (ตารางที่ 5 และภาพที่ 2) อย่างไรก็ตาม T_g , T_m และค่าเอนทัลปีของการให้ความร้อนอีกครั้ง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ขึ้นกับปัจจัยของความเข้มข้นสตาร์ช โดยเมื่อปริมาณน้ำในเจลสตาร์ชจากข้าวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการให้ความร้อนอีกครั้ง อุณหภูมิการหลอมละลายของน้ำแข็ง และค่าเอนทัลปีเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Huang and others (1994) เกี่ยวกับปริมาณน้ำในระบบต่อสมบัติทางความร้อนของเจลแป้งและเจลสตาร์ชจากข้าว นำไปผ่านการแช่แข็งอย่างรวดเร็วจนกระทั่งอุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส แล้วให้ความร้อนอีกครั้งโดยการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิ -40 จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อปริมาณน้ำร้อยละ 50 ได้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน อยู่ระหว่างอุณหภูมิ -5 ถึง -10 องศาเซลเซียส และน้ำมีผลให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันสูงขึ้นเล็กน้อย และจากการศึกษาของ Chung and others (2002) พบว่าเจลสตาร์ชมีค่า T_g ช่วงอุณหภูมิ -7.7 ถึง -10.0 องศาเซลเซียส โดยเมื่อปริมาณน้ำในเจลสตาร์ชจากข้าวเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน อุณหภูมิการหลอมละลายและค่าเอนทัลปีเพิ่มขึ้นด้วย สอดคล้องกับการศึกษาของ Iturriaga and others (2004) ได้ว่าสตาร์ชจากข้าวทุกพันธุ์ที่ทำการศึกษามีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันอยู่ในช่วงอุณหภูมิ -10.6 ถึง -10.9 องศาเซลเซียส แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เช่นเดียวกันกับ Slade and Levine (1993) กล่าวว่าสารไบโอพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ที่ปริมาณน้ำเท่ากับหรือมากกว่าร้อยละ 30 ให้ค่า T_g ประมาณ -10.0 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ผลของการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็ว จะให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันเท่ากับ -7.5 และ -9.0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Hsu and others 2003; Hsu and Heldman 2005) และการเก็บเจลสตาร์ชจากข้าวความเข้มข้นร้อยละ 35 ไว้ที่อุณหภูมิต่ำ -5 และ -15 องศาเซลเซียส นาน 5 วัน พบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพิ่มขึ้น ดังนี้ การแช่แข็งแบบเร็วเก็บที่ -5 องศาเซลเซียส มีค่า T_g เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ -9 องศาเซลเซียส ไปที่อุณหภูมิ -6.1 องศาเซลเซียส และการเก็บที่ -15 องศาเซลเซียส ค่า T_g เพิ่มขึ้น จากอุณหภูมิ -9 องศาเซลเซียส ไปที่อุณหภูมิ -6.3 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างเจลที่แช่แข็งแบบช้าเก็บ -5 องศาเซลเซียส ค่า T_g เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ -7.5 องศาเซลเซียส ไปที่ อุณหภูมิ-7.0 องศาเซลเซียส และการเก็บที่ -15 องศาเซลเซียส ค่า T_g เพิ่มขึ้น จากอุณหภูมิ -7.5 องศาเซลเซียส ไปที่อุณหภูมิ-6.3 องศาเซลเซียส พบว่า การแช่เยือกแข็งแบบช้า มีค่า T_g สูงกว่า การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว เพราะมีปริมาณน้ำอิสระมากที่ต้องถูกแช่เยือกแข็ง (high frozen water) (Hsu and Heldman 2005) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ กลาสทรานซิชัน อุณหภูมิการหลอมละลาย และค่าเอนทัลปีของเจลสตาร์ชจากข้าวที่ให้ความร้อน อีกครั้ง อุณหภูมิของเจลสตาร์ชจากข้าวที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 มีอุณหภูมิการหลอมละลายของ น้ำแข็ง เท่ากับ 0.14 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิการแช่เยือกแข็งของน้ำ คือ 0 องศาเซลเซียส (Fennema 1996) ซึ่ง Liu and Lelievre (1992) พบว่าเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวที่ ความเข้มข้นร้อยละ 30 แล้วทำการให้ความร้อนอีกครั้ง ฟิสิกที่เกิดขึ้นนี้จะพบได้ที่อุณหภูมิเดียวกัน กับน้ำบริสุทธิ์ (pure water) แต่พื้นที่ของฟิสิกที่ได้จะมีขนาดเล็กและกว้างกว่าฟิสิกของน้ำบริสุทธิ์



ภาพที่ 2 DSC เทอร์โมแกรมของอนุกรมมิกลาสทรานซิสชัน (T_g) ของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง จากข้าวและให้ความร้อนอีกครั้ง ที่ความเข้มข้นของเจล 30 % w/w [T_d = exothermic peak, A= ปริมาณแอมิโลสต่ำ (KDML105=ข้าวดอกมะลิ105, HSPR = หอมสุพรรณบุรี, HKLG1 = หอมคลองหลวง1), B= ปริมาณแอมิโลสปานกลาง (KTH17 = ข้าวตาแห้ง17, SPR2 = สุพรรณบุรี2, SPR60 = สุพรรณบุรี60), C= ปริมาณแอมิโลสสูง (LPT123 = เหลืองประทิว123, CNT1 = ชัยนาท1, PNPCR = พลายงามปราจีนบุรี)]



ภาพที่ 3 ผลของความเข้มข้นของเจลสตาร์ชจากข้าวต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวพันธุ์ชัยนาท1 และให้ความร้อนอีกครั้ง (T_d = exothermic peak)

นอกจากนี้จากการศึกษาครั้งนี้ยังพบพีคการคายความร้อน (Exothermic peak; T_d) (ภาพที่ 2-3) ระหว่างอุณหภูมิ -2 ถึง -5 องศาเซลเซียส และพีคนี้ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจนที่ความเข้มข้นของเจลสตาร์ชสูงกว่าร้อยละ 40 ซึ่งเป็นพีคที่เกิดจากน้ำที่ไม่ถูกแช่แข็ง (unfrozen water) เนื่องจากการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วระหว่างการแช่แข็ง (rapid cooling) ทำให้เกิดการดึงความร้อนออกจากตัวอย่างอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ไม่มีการสร้างผลึกน้ำแข็งในตัวอย่างเจลสตาร์ชจากข้าวแต่เกิดการเปลี่ยนสถานะเข้าสู่ verification และน้ำส่วนนี้ยังคงอยู่ในสถานะกลาส (glassy state) หรือ เฟสกลาส (glass phase) ปรากฏให้เห็นเป็นพีคการคายความร้อน (Shafiur Rahman 1999; Huang and others 1994; Hsu and others 2003) โดยขนาดของพีคการคายความร้อนนี้ ถ้าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น จะได้พีคการคายความร้อนขนาดเล็กลงและไม่ปรากฏพีคนี้ในน้ำบริสุทธิ์ (Liu and Lelievre 1992)

1.4 ผลของการศึกษาผลกระทบจากการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ

1.4.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากข้าว

จากตารางที่ 6 ผลการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากข้าวหลังการทำให้สุก หรือในที่นี้เรียกว่า เจลสด ทำการเปรียบเทียบกับเจลที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง จำนวน 5 รอบ และเจลที่ให้ความร้อนอีกครั้ง ด้วยแรงกด (compression) ที่ระดับต่างกัน 2 ระดับ คือ ค่าแรงกด ร้อยละ 15 และ ร้อยละ 70 ของความหนาของเจลสตาร์ช จะเห็นได้ว่าลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสด ที่ค่าแรงกดร้อยละ 15 ของความหนาของเจลสตาร์ช ซึ่งใช้อธิบายลักษณะการติดเหนียวของเจล (stickiness) ที่มีน้ำอยู่บริเวณผิวหน้าของเจลสตาร์ช เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (fluctuate temperature) หรือการคืนรูปจากเยือกแข็ง พบว่าปริมาณแอมิโลสที่แตกต่างกัน ทำให้เจลสตาร์ชจากข้าวให้ค่าความแข็งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง ได้แก่ ข้าวพันธุ์เหลืองประทิว 123 ชัยนาท 1 และ พลายงามปราจีนบุรี ต้องใช้แรงกดมากกว่าข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลางและปริมาณแอมิโลสต่ำ ซึ่งจะเห็นได้จากค่าความแข็งของเจลสดที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยพันธุ์ข้าวที่มีค่าความแข็งสูงสุดและต่ำสุด คือ พันธุ์พลายงามปราจีนบุรี และข้าวดอกมะลิ 105 ให้ค่าความแข็ง เท่ากับ 52.29 และ 10.12 กรัมแรง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเจลสดกับเจลที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งและเจลที่ให้ความร้อนอีกครั้ง พบว่าสตาร์ชจากข้าวทุกพันธุ์ให้ค่าความแข็งลดลง (มีความนุ่มขึ้น) อย่างไรก็ตามค่าความแข็งที่ได้มีแนวโน้มเหมือนกับเจลสด กล่าวคือเจลที่มีปริมาณแอมิโลสสูง มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น

จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความแข็ง (ร้อยละ) ของเจลสตาร์ชจากข้าว จะเห็นว่ากลุ่มสตาร์ชจากข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำ มีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน และกลุ่มสตาร์ชจากข้าวปริมาณแอมิโลสปานกลางถึงสูง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นแตกต่างกันออกไป ขึ้นกับพันธุ์ข้าว โดยเจลสตาร์ชจากข้าวพลายงามปราจีน มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด (ร้อยละ 40.96) และเจลสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 2 มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด (ร้อยละ -0.87) สรุปได้ว่าเจลสตาร์ชจากข้าวแอมิโลสต่างกัน มีความทนต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบต่างกัน อาจเนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ช เช่น โครงสร้างแอมิโลเพกทินที่มีลักษณะโครงสร้างแบบมีกิ่งก้านและค่าความเป็นผลึกสูง จะทำให้สามารถจับน้ำไว้ในโครงร่างเจลได้ดีขึ้น

ตารางที่ 6 ผลการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบต่อค่าความแข็งของเจลสตาร์ชจากข้าวโดย
เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) ที่แรงกดร้อยละ 15 ของความหนาของ
เจลสตาร์ช

Rice varieties	Hardness (g force)			
	Fresh gels	Freeze/thaw and reheat gels	Change of hardness (%)	Freeze/thaw gels without reheat
KDML105	10.12g	7.19d	-28.95	168.81e
HSPR	15.22ef	11.01d	-27.66	308.87d
HKLG1	13.54f	10.32d	-23.78	275.36d
KTH17	23.03d	18.59c	-19.28	445.51c
SPR2	17.24e	17.39c	0.87	422.49c
SPR60	31.03c	20.30c	-34.58	409.16c
LPT123	52.92a	40.90a	-22.71	684.91a
CNT1	46.94b	41.59a	-11.40	752.21a
PNPCR	52.29a	30.87b	-40.96	537.20b
Pr > F	<0.0001	<0.0001	-	<0.0001

หมายเหตุ a,b...ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทาง
สถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) จากค่าเฉลี่ยของการทดลอง 3 ซ้ำ
(Pr > F = P value of the F test, KDML105 = ข้าวดอกมะลิ105, HSPR = หอมสุพรรณบุรี,
HKLG1 = หอมคลองหลวง1, KTH17 = ข้าวตาแห้ง17, SPR2 = สุพรรณบุรี2,
SPR60 = สุพรรณบุรี60, LPT123 = เหลืองประทิว123, CNT1 = ชัยนาท1,
PNPCR = พลายงามปราจีนบุรี)

ตารางที่ 7 ผลการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบต่อค่าความแข็งของเจลสตาร์ชจากข้าวโดย
เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) ที่แรงกดร้อยละ 70 ของความหนาของ
เจลสตาร์ช

Rice varieties	Hardness (g force)			
	Fresh gels	Freeze/thaw and reheat gels	Change of Hardness (%)	Freeze/thaw gels without reheat
KDML105	34.85f	21.02d	-39.68	196.98f
HSPR	46.48f	36.02de	-22.50	314.98e
HKLG1	70.95f	34.68de	-51.12	314.84e
KTH17	174.48de	81.61cd	-53.23	543.04c
SPR2	142.97e	109.41cd	-23.47	515.35cd
SPR60	190.12d	83.24cd	-56.22	452.28d
LPT123	360.27b	230.87a	-35.92	697.41b
CNT1	410.78a	194.14ab	-52.74	762.01a
PNPCR	360.27b	156.51b	-56.56	542.39c
Pr > F	<0.0001	<0.0001	-	<0.0001

หมายเหตุ a,b...ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ
ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) จากค่าเฉลี่ยของการทดลอง 3 ซ้ำ
(KDML105 = ข้าวดอกมะลิ105, HSPR = หอมสุพรรณบุรี, HKLG1 = หอมคลองหลวง1,
KTH17 = ข้าวตาแห้ง17, SPR2 = สุพรรณบุรี2, SPR60 = สุพรรณบุรี60, LPT123 =
เหลืองประทิว123, CNT1 = ชัยนาท1, PNPCR = พลายงามปราจีนบุรี, Pr > F = P value
of the F test)

จากตารางที่ 7 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากข้าว ทำการทดสอบด้วยแรงกดร้อยละ
70 ของความหนาของเจลสตาร์ช พบว่าค่าความแข็งเจลสตาร์ชจากข้าวแต่ละพันธุ์ แตกต่างกันอย่าง
มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ตามลำดับจากค่าความแข็งน้อยไปมากดังนี้ สตาร์ชจากข้าวที่มี
ปริมาณแอมิโลสต่ำ สตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลางและสูง โดยเจลสตาร์ชจากข้าวที่
มีปริมาณแอมิโลสสูงแต่ละพันธุ์ มีค่าความแข็งเช่นเดียวกับเจลสตาร์ชที่วัดแรงกดที่ร้อยละ 15

กล่าวคือการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบและให้ความร้อนอีกครั้ง พบว่าเจลสตาร์ชจากข้าวทุกพันธุ์ มีค่าความแข็งลดลงและมีค่าความแข็งต่ำกว่าเจลสด โดยสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงให้ค่าความแข็งสูงสุด และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้มีผลกระทบอย่างมากในเจลสตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสปานกลางและสูง ยกเว้นเจลสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี2 ที่มีการเปลี่ยนแปลงความแข็งลดลงร้อยละ 23.47 อย่างไรก็ตามเจลสตาร์ชจากข้าวหอมคลองหลวง1 กลับมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเจลสตาร์ชจากข้าวในกลุ่มแอมิโลสเดียวกัน ดังนั้นจากตารางที่ 7 สรุปได้ว่าเจลสตาร์ชจากข้าวหอมสุพรรณบุรี2 มีการเปลี่ยนแปลงของความแข็งน้อยที่สุด (ร้อยละ 22.50) และเจลสตาร์ชจากข้าวพลาขามปรานมีการเปลี่ยนแปลงของความแข็งมากที่สุด (ร้อยละ 56.56) เนื่องจากการคืนรูปจากเยือกแข็งทำให้น้ำส่วนมากที่อยู่ในโครงร่างเจล (matrix) จะออกไปอยู่นอกเซลล์ เมื่อทำการแช่เยือกแข็งอีกครั้ง น้ำส่วนนี้จะเปลี่ยนไปเป็นน้ำแข็ง ซึ่งถูกหุ้มด้วยเยื่อหุ้มเซลล์ (membrane) บาง ๆ ถ้ามีการคืนรูปจากเยือกแข็งหลายครั้ง ทำให้โครงร่างเจลที่จับน้ำไว้ถูกทำลาย (collapse) ดังนั้นน้ำที่อยู่ภายในโครงร่างจะแยกออกมาอยู่นอกเยื่อหุ้มเซลล์ เรียกว่า การขับน้ำออกจากเจล (syneresis) (Jeong and Lim 2003)

1.4.2 ผลการวิเคราะห์การขับของเหลวออกจากเจลของเจลสตาร์ชจากข้าวของการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ (Freeze-Thaw Stability by Syneresis)

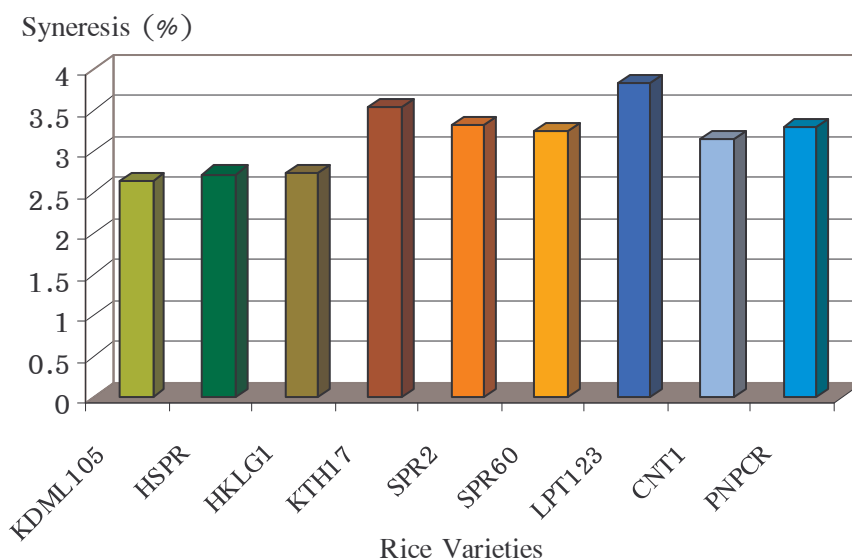
จากผลการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบต่อร้อยละการขับของเหลวออกจากเจลในเจลสตาร์ชจากข้าว ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 30 (ตารางที่ 8 และภาพที่ 4) พบว่าพันธุ์ข้าวและปริมาณแอมิโลสมีผลต่อร้อยละการขับของเหลวออกจากเจล แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เจลสตาร์ชจากข้าวแอมิโลสดำ มีร้อยละการขับของเหลวออกจากเจลต่ำกว่าเจลสตาร์ชจากข้าวแอมิโลสปานกลางและสูง โดยสตาร์ชจากข้าวที่อยู่ในกลุ่มแอมิโลสใกล้เคียงกันให้ร้อยละการขับของเหลวออกจากเจลใกล้เคียงกันและแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) จะเห็นได้จากเจลสตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสดำ ได้แก่ ข้าวดอกมะลิ105 หอมสุพรรณบุรี และหอมคลองหลวง1 ที่ให้ค่าการขับของเหลวออกจากเจลอยู่ในช่วงร้อยละ 2.64 ± 0.09 ถึง 2.73 ± 0.24 และค่าการคืนตัวต่ำสุด (ตารางที่ 2) แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มแอมิโลสปานกลางและสูง พบว่าการขับของเหลวออกจากเจลมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพันธุ์ โดยสตาร์ชจากข้าวพันธุ์เหลืองประทิว123 มีร้อยละการขับของเหลวออกจากเจลมากที่สุด (3.82 ± 0.08) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ซึ่งผลการศึกษาของ Varavinit and others (2002) ได้ว่าสตาร์ชจากข้าวปริมาณแอมิโลสสูง (ร้อยละ 28) ที่ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 6 หลังการหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว $1180 \times g$ นาน 15 นาที ให้ค่าร้อยละการขับของเหลวออกจากเจลสูงสุด

เท่ากับ ร้อยละ 54.50 ± 6.48 และจากการศึกษาของ Zheng and Sosulski (1998) พบว่าสตาร์ชจากข้าวปริมาณแอมิโลส ร้อยละ 16.9 ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 หลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง 4 รอบ มีร้อยละปริมาณสุทธิการจับของเหลวออกจากเจล (net syneresis) เท่ากับ ร้อยละ 69.5 ดังนั้นจากผลการทดลองเหล่านี้พอจะสรุปได้ว่าร้อยละการจับของเหลวออกจากเจลในเจลสตาร์ชจากการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสตาร์ชและอุณหภูมิของการคืนรูปจากเยือกแข็ง ถ้าใช้อุณหภูมิสูงในการคืนรูปจากเยือกแข็ง (60 และ 90 องศาเซลเซียส) เจลสตาร์ชจะมีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งได้ดีกว่าการคืนรูปจากเยือกแข็งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากเจลที่เกิดการรีโพรเกรเดชันเกิดการฝั่นกลับ (re-dissolved) ของโครงสร้างเจลระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง (Varavinit and others 2002) ทั้งนี้ปริมาณแอมิโลสในข้าวเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถบอกได้โดยตรงว่าจะมีผลให้เกิดการจับของเหลวออกจากเจลมากหรือน้อย แต่โดยทั่วไปถ้าปริมาณแอมิโลสต่ำ มีผลให้การจับของเหลวออกจากเจลต่ำ และถ้าสตาร์ชจากข้าวมีแอมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยพันธะกิ่งก้านที่ยาว (long branch chains) มีการเข้าจับที่โมเลกุลแอมิโลสมากกว่าโมเลกุลแอมิโลเพกทิน ดังนั้นถ้าสตาร์ชจากข้าวมีแอมิโลเพกทินมีพันธะกิ่งก้านยาว (long branch chains) จำนวนมาก มีผลให้การจับของเหลวออกจากเจลเพิ่มขึ้น (Jane and Chen 1992)

ตารางที่ 8 ผลของพันธุ์ข้าวต่อการจับของเหลวออกจากเจลระหว่างการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ ของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ที่ความเข้มข้นสตาร์ชร้อยละ 30

พันธุ์ข้าว	Syneresis (%)
ขาวดอกมะลิ105	$2.64 \pm 0.09c$
หอมสุพรรณบุรี	$2.72 \pm 0.05c$
หอมคลองหลวง1	$2.73 \pm 0.24c$
ขาวตาแห้ง17	$3.54 \pm 0.39ab$
สุพรรณบุรี2	$3.31 \pm 0.62abc$
สุพรรณบุรี60	$3.25 \pm 0.37abc$
เหลืองประทิว123	$3.82 \pm 0.08a$
ชัยนาท 1	$3.15 \pm 0.13bc$
พลาขามปราจีนบุรี	$3.29 \pm 0.35abc$
Pr > F = P value of the F test	0.0106

หมายเหตุ a,b,...ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) และ จากการทดลอง 3 ซ้ำ

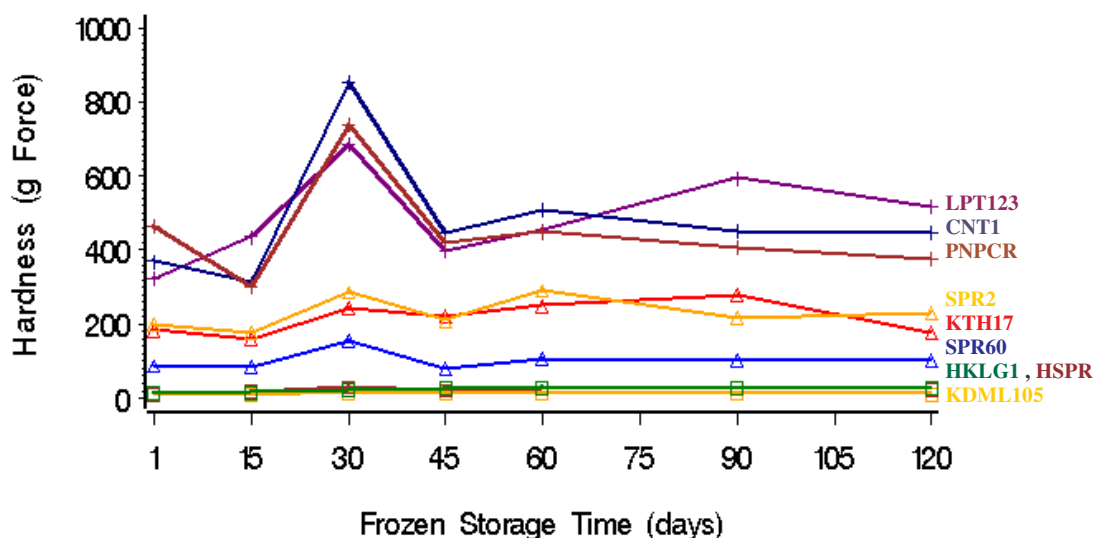


ภาพที่ 4 ผลของพันธุ์ข้าวต่อการจับของเหลวออกจากเจลระหว่างการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ
(KDML105 = ข้าวดอกมะลิ105, HSPR = หอมสุพรรณบุรี, HKLG1= หอมคลองหลวง1, KTH17 = ข้าวตาแห้ง17, SPR2 = สุพรรณบุรี2, SPR60 = สุพรรณบุรี60, LPT123 = เหลืองประทิว123, CNT1 = ชัยนาท1, PNPCR = พลายงามปราจีนบุรี)

1.5 ผลการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว

1.5.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากข้าว

(1) การวัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยการใช้แรงกดเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ร้อยละ 15 จากการวัดความแข็งของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเก็บนาน 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน พบว่าทั้งชนิดข้าวและระยะเวลาการเก็บ มีผลกระทบต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากข้าว 9 พันธุ์ โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลของค่าความแข็งของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาการเก็บ 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน หลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง

ทดสอบที่แรงกดเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างร้อยละ 15 ของความหนาเจลสตาร์ช

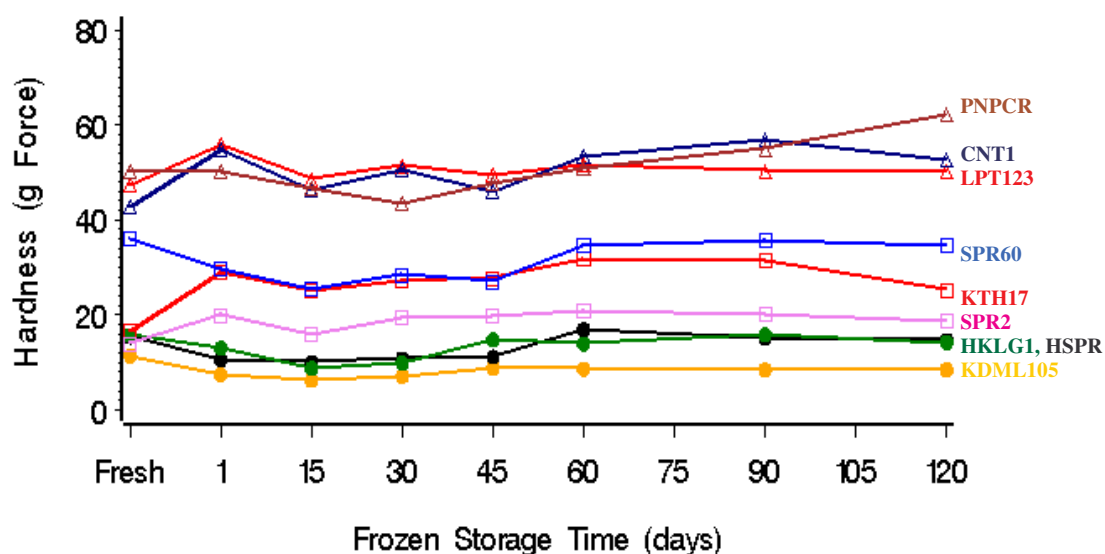
(KDML105 = ข้าวดอกมะลิ105, HSPR = หอมสุพรรณบุรี, HKLG1 = หอมคลองหลวง1,

KTH17 = ข้าวตาแห้ง17, SPR2 = สุพรรณบุรี2, SPR60 = สุพรรณบุรี60,

LPT123 = เหลืองประทิว123, CNT1 = ชัยนาท1, PNPCR = พลายงามปราจีนบุรี)

ผลของค่าความแข็งจากการใช้แรงกดให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างร้อยละ 15 ของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเก็บ 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน จากปัจจัยที่ทำการศึกษา 2 ปัจจัย คือ พันธุ์ข้าวและระยะเวลาการเก็บ พบว่ามีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสองปัจจัย แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาตามกลุ่มเอมิโลสเห็นว่าเจลสตาร์ชจากข้าวกลุ่มเอมิโลสต่ำ มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งตลอดระยะเวลาการเก็บ 1 ถึง 120 วัน แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ส่วนสตาร์ชจากข้าวกลุ่มเอมิโลสปานกลาง มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแตกต่างกัน โดยสตาร์ชจากข้าวขาวตาแห้ง17 ระยะเวลาการเก็บ 90 วัน เจลสตาร์ชให้ค่าความแข็งสูงสุด และระยะการเก็บที่ 1 วัน กับ 90 วัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แต่ระยะเวลาการเก็บ 30 วัน กับ 90 วัน แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยระยะเวลาการเก็บ 1 วัน กับ 120 วัน พบว่าค่าความแข็งของเจลสตาร์ชจากข้าวกลุ่มเอมิโลสปานกลาง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบสตาร์ชจากข้าวในกลุ่มเอมิโลสสูง พบว่าค่าความแข็งลดลงในช่วง 1 ถึง 15 วัน และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยมีค่าความแข็งสูงสุด ที่ระยะการเก็บนาน 30 วัน แตกต่างกัน

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ดังนั้นจากผลการศึกษาครั้งนี้ได้ว่าการเก็บเจลสตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสปานกลางและแอมิโลสสูงที่ 30 วัน เป็นเวลาวิกฤติของการแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ช (the critical time of frozen gels) หลังระยะเวลาการเก็บ 30 วัน จะเห็นว่าเจลสตาร์ชจากข้าวชัณนาท1 และพลาขามปราจีนบุรีให้ค่าความแข็งลดลง เนื่องจากโครงสร้างเจลเริ่มเกิดเสื่อมสภาพ (structure deterioration) (Mandala and others 2002) แต่ในสตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสสูงเมื่อเทียบกับการเก็บ 1 วัน กับ 120 วัน พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ยกเว้นเจลสตาร์ชจากข้าวเหลืองประทิว123 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จากการวัดค่าความแข็งสามารถบ่งชี้ถึงอัตราและระดับการเกิดรีโทรเกรเดชันตามลำดับดังนี้ สตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสสูงมากกว่ากลุ่มแอมิโลสปานกลางและกลุ่มแอมิโลสดำ ซึ่งจากผลการศึกษาของ Hagenimana and others (2005) ได้นำสตาร์ชจากข้าวของประเทศจีนที่มีปริมาณแอมิโลสต่างกัน ได้แก่ สตาร์ชจากข้าวเหนียวและสตาร์ชจากข้าวเจ้า ทำการผสมให้มีปริมาณแอมิโลสต่างกัน เตรียมส่วนผสมเจลสตาร์ชจากข้าวมีความเข้มข้นร้อยละ 16 และตัวอย่างเจลสตาร์ชเก็บที่อุณหภูมิแช่เยือกแข็ง 4 ± 0.5 องศาเซลเซียส นาน 3 และ 7 วัน ทำการวัดค่าความแข็งด้วยค่าแรงกดเป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นดัชนีการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ช พบว่าการผสมสตาร์ชจากข้าวเหนียวร้อยละ 25 ในสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสดำและปานกลาง ช่วยลดอัตราการเกิดความแน่นเนื้อ (rate of firmness) และความแข็งของเจลสตาร์ช

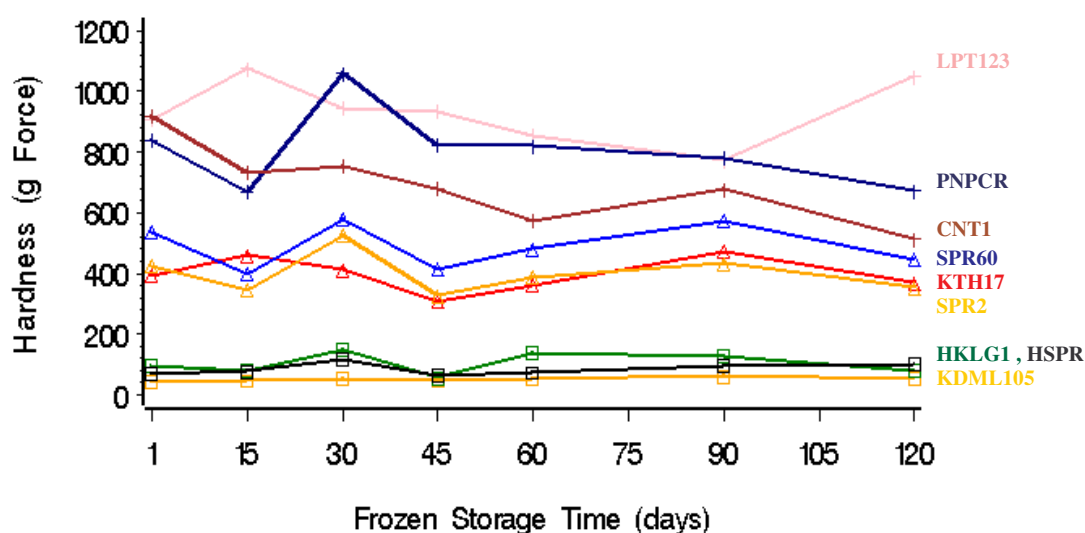


ภาพที่ 6 ผลของค่าความแข็งของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเก็บ 0 (fresh gels) 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน หลังการคืนรูปจากเยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง ทดสอบที่แรงกดเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างร้อยละ 15 ของความหนาเจลสตาร์ช (KDML105 = ข้าวดอกมะลิ105, HSPR = หอมสุพรรณบุรี, HKLG1 = หอมคลองหลวง1, KTH17 = ข้าวตาแห้ง 17, SPR2 = สุพรรณบุรี2, SPR60 = สุพรรณบุรี60, LPT123 = เหลืองประทิว123, CNT1 = ชัยนาท1, PNPCR = พลายงามปราจีนบุรี)

จากภาพที่ 6 แสดงให้เห็นถึงค่าความแข็งจากการใช้แรงกดเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างร้อยละ 15 ของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเก็บนาน 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน และให้ความร้อนอีกครั้ง เปรียบเทียบกับเจลสด หรือที่ 0 วัน จากปัจจัยที่ทำการศึกษา 2 ปัจจัย คือ พันธุ์ข้าวและระยะเวลาการเก็บดังกล่าว พบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสองปัจจัย ($P > F = 0.16$) แต่เป็นผลมาจากปัจจัยหลัก (main effect) ทั้งสองปัจจัย ทำให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จากการเปรียบเทียบข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำ ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง จนกระทั่งที่อายุการเก็บ 45 วัน ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามตลอดระยะเวลาการเก็บจากการเปรียบเทียบการเก็บ 0 วัน กับการเก็บที่ 45 60 120 วัน และ 45 กับ 120 วัน และสตาร์ชจากข้าวในกลุ่มแอมิโลสต่ำทั้ง 3 พันธุ์ มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) จากการเปรียบเทียบข้าวกลุ่มแอมิโลสปานกลาง พบว่าเจลสตาร์ชจากข้าวขาวตาแห้ง17 และสุพรรณบุรี2 ในช่วงแรกการเก็บ 1 วัน มีแนวโน้มให้ค่า

ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งแรงที่ 0 วัน กับ 1 วัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และความแข็งแรงจะลดลงอีกครั้งที่ 15 วัน หลังจากนั้นค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอายุการเก็บ 120 วัน อย่างไรก็ตามเจลสตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสปานกลางเมื่อเทียบกับ 0 วัน กับการเก็บที่ 120 วัน พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) และการเก็บที่ 120 วัน พบว่าเจลสตาร์ชจากข้าวขาวตาแห้ง 17 กับสุพรรณบุรี 60 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อพิจารณากลุ่มแอมิโลสสูง พบว่าระยะการเก็บเจลสตาร์ชจากข้าวเหลืองประทิว 123 และชัยนาท 1 ให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นที่ 1 วัน หลังจากนั้นตลอดระยะเวลาการเก็บ 30 ถึง 120 วัน โดยเจลสตาร์ชจากข้าวเหลืองประทิว 123 มีการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงในระยะเวลาการเก็บ 0 ถึง 120 วัน แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ส่วนเจลสตาร์ชจากข้าวชัยนาท 1 แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะเดียวกันกับเจลสตาร์ชจากข้าวเหลืองประทิว 123 แต่ ระยะเวลาการเก็บที่ 0 วัน ถึง 1 วัน ให้ค่าความแข็งแรงลดลง และ ระยะเวลาการเก็บที่ 45 วัน ถึง 90 วัน ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และจากที่ระยะเวลา 90 วัน ถึง 120 วัน ให้ค่าความแข็งแรงลดลง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) สำหรับเจลสตาร์ชจากข้าวพลาญงามปราจีนบุรี พบว่าจากระยะเวลาการเก็บ 0 วัน ถึง 30 ให้ค่าความแข็งแรงแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่จากระยะเวลาการเก็บ 30 ถึง 120 วัน พบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จะเห็นว่าเจลสตาร์ชจากข้าวพลาญงามปราจีนบุรี มีการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและลดลงตลอดระยะเวลาการเก็บ 0 ถึง 120 วัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และที่ 120 วัน ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด เท่ากับ 62.12 กรัม เมื่อเปรียบเทียบการเก็บที่ 120 วัน กับเจลสดจากสตาร์ชข้าวเหลืองประทิว 123 กับข้าวพลาญงามปราจีนบุรี มีความแข็งแรงของเจลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จากการศึกษาครั้งนี้ได้ว่าช่วงระยะเวลาการเก็บ 30 ถึง 45 วัน เป็นเวลาวิกฤติในการเก็บเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว โดยผลจากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากข้าวด้านความแข็งแรง ได้ว่าปริมาณแอมิโลสอย่างเดียว ไม่สามารถอธิบายบอถึงเกิดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ชัดเจน เพราะว่าสตาร์ชจากข้าวพันธุ์เดียวกันหรือมีปริมาณแอมิโลสใกล้เคียงกันอาจมีความแตกต่างของความยาวกิ่งก้านของแอมิโลเพกทิน (branch chain length distribution of amylopectins) ขนาดโมเลกุลของแอมิโลส และค่าดีกรีความเป็นผลึกที่แตกต่าง โดยเฉพาะสตาร์ชข้าวที่มีพันธะของแอมิโลเพกทินขนาด 92-98 (long amylopectin chains DP 92-98) และความสามารถในการละลายในน้ำของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน โดยจะเกี่ยวข้องกับการพองของเม็ดสตาร์ชและการเกิดโครงร่างเจล (gel network) ซึ่งส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชจากข้าวมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Jane and Chen 1992; Ong and Blanshard 1995; Tomasik 2002)

(2) การวัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยแรงกดร้อยละ 70 จากการศึกษาผลวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าว ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเก็บนาน 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน

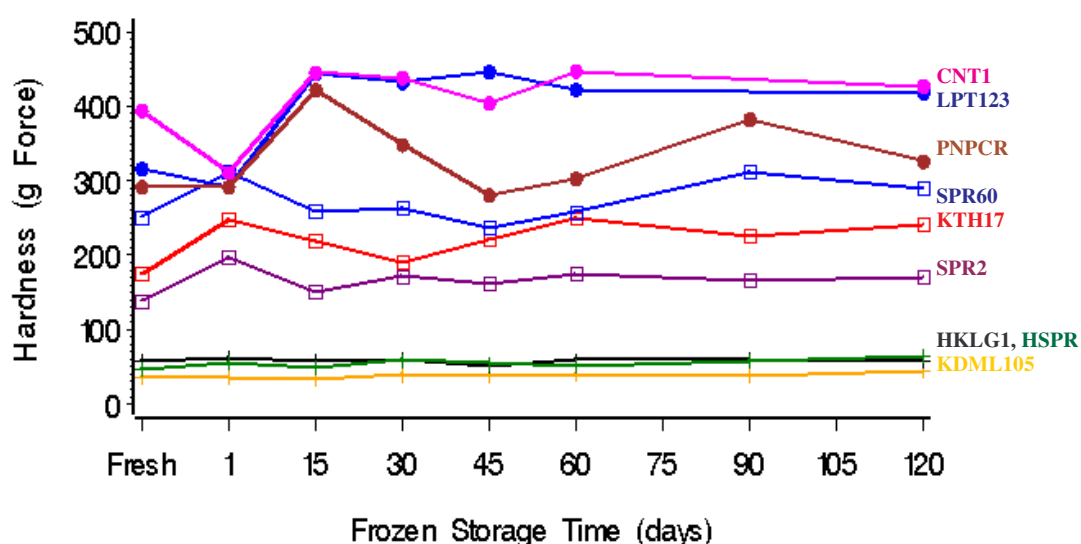


ภาพที่ 7 ผลของค่าความแข็งของเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าว ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเก็บ 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน หลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง ทดสอบที่แรงกดเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ร้อยละ 70 ของความหนาเจลสตาร์ช (KDML105 = ข้าวดอกมะลิ105, HSPR = หอมสุพรรณบุรี, HKLG1 = หอมคลองหลวง1, KTH17 = ข้าวตาแห้ง17, SPR2 = สุพรรณบุรี2, SPR60 = สุพรรณบุรี60, LPT123 = เหลืองประทิว123, CNT1 = ชัยนาท1, PNPCR = พลายงามปราจีนบุรี)

จากภาพที่ 7 แสดงให้เห็นการใช้แรงกดให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างร้อยละ 70 ของเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าว ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเก็บ 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน จากปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ 2 ปัจจัย คือ ชนิดข้าวและระยะเวลาการเก็บ พบว่ามีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสองปัจจัยและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และปริมาณแอมิโลสที่แตกต่างกันในแต่ละกลุ่มมีผลต่อค่าความแข็งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จากการเปรียบเทียบสตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสต่ำ เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งตลอดระยะเวลาการเก็บ พบว่าการเก็บที่ 1 กับ 30 วัน การเก็บที่ 30 กับ 60 วัน และการเก็บที่ 60 กับ 120 วัน แตกต่างกันอย่างไม่มีความนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เช่นเดียวกันกับการเปรียบเทียบความแข็ง

ระหว่างพันธุ์ข้าวในกลุ่มเอมิโลสต่ำ พบว่าค่าความแข็งตลอดระยะเวลาการเก็บ 120 วัน พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยการเก็บที่ 30 วัน และ 60 วัน เป็นเวลาวิกฤติของการแช่เยือกแข็ง (the critical time of frozen gels) ของเจลสตาร์ชจากข้าวกลุ่มเอมิโลสต่ำ เมื่อเปรียบเทียบสตาร์ชจากข้าวกลุ่มเอมิโลสปานกลาง ให้ลักษณะกราฟของค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 30 วัน และแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเจลสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 2 และสุพรรณบุรี 60 และหลังระยะเวลาการเก็บ 30 วัน ถึง 45 วัน ค่าความแข็งลดลง และเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงระยะเวลาการเก็บได้ 90 วัน ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงอีกครั้ง เช่นเดียวกันกับเจลสตาร์ชจากข้าวขาวตาแห้ง 17 แม้ว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นที่ 15 วัน และค่าความแข็งลดลงจนกระทั่งถึง 45 วัน ต่อจากนี้ค่าความแข็งกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงระยะเวลาการเก็บที่ 90 วัน และ ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงอีกครั้งจนถึงระยะเวลาการเก็บที่ 120 วัน ซึ่งจะเห็นว่าตลอดระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชจากข้าวกลุ่มเอมิโลสปานกลางจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและลดลง เช่นการเก็บที่ 1 กับ 15 วัน การเก็บที่ 15 กับ 30 วัน การเก็บที่ 30 กับ 45 วัน การเก็บที่ 45 กับ 90 วัน และการเก็บที่ 1 กับ 120 วัน แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยการเก็บที่ 30 วัน และ 60 วัน เป็นเวลาวิกฤติของการแช่เยือกแข็ง (the critical time of frozen gels) ของเจลสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี 2 และสุพรรณบุรี 60 ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบพันธุ์ข้าวในกลุ่มเอมิโลสปานกลาง พบว่าการเก็บตัวอย่างเจลสตาร์ชที่ 30 วัน และ 60 วัน มีค่าความแข็งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) จากผลการศึกษาเจลสตาร์ชจากข้าวกลุ่มเอมิโลสสูง พบว่าปริมาณเอมิโลสมีผลกระทบอย่างมากต่อค่าความแข็ง และให้ค่าความแข็งแตกต่างกัน โดยเจลสตาร์ชจากข้าวเหลืองประทิว 123 ระยะเวลาการเก็บ 1 วันถึง 15 วัน ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและมีค่าความแข็งสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) ต่อจากนี้ค่าความแข็งลดลงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) จนกระทั่งระยะเวลาการเก็บที่ 90 วัน ให้ค่าความแข็งต่ำสุด หลังจากนั้นค่าความแข็งกลับเพิ่มขึ้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) อย่างไรก็ตามการเก็บที่ 1 และ 120 วัน พบว่าค่าความแข็งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เมื่อเปรียบเทียบเจลสตาร์ชจากข้าวชัยนาท 1 จะเห็นว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งระยะเวลาการเก็บที่ 60 วัน และแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยระยะเวลาการเก็บที่ 1 วันกับ 120 วัน ให้ค่าความแข็งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบเจลสตาร์ชจากข้าวพลาขามปราจีนบุรี วัดค่าความแข็งได้สูงสุด ที่ระยะเวลาการเก็บ 30 วัน หลังการเก็บเจลสตาร์ชจากข้าวไว้ถึง 120 วัน ให้ค่าความแข็งลดลงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) ดังนั้นจากการศึกษาครั้งนี้พบว่าการเก็บที่ 30 วัน เป็นเวลาวิกฤติของการแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ช (the critical time of frozen gels) ซึ่งจากการศึกษาของ Hagenimana and others (2005) พบว่าเจล

สตาร์ชจากข้าวที่เก็บไว้นาน 7 วัน ให้ค่าความแข็งมากกว่าเจลดสตาร์ชจากข้าวที่เก็บไว้ 3 วัน และสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะให้ค่าความแข็งสูงสุด



ภาพที่ 8 ผลของค่าความแข็งของเจลดสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาการเก็บ 0 (fresh gel) 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน หลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง และให้ความร้อนอีกครั้ง ทดสอบที่แรงกดเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างร้อยละ 70 ของความหนาเจลดสตาร์ช (KDML105 = ข้าวดอกมะลิ105, HSPR = หอมสุพรรณบุรี, HKLG1 = หอมคลองหลวง1, KTH17 = ข้าวตาแห้ง17, SPR2 = สุพรรณบุรี2, SPR60 = สุพรรณบุรี60, LPT123 = เหลืองประทิว123, CNT1= ชัยนาท1, PNPCR = พลายงามปราจีนบุรี)

จากผลการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลดสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว เก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเก็บนาน 0 (เจลดสด) 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน เปรียบเทียบกับเจลดกับเจลดสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง นำไปหลอมละลายและเจลดสตาร์ชจากข้าวที่หลอมละลายให้ความร้อนอีกครั้งก่อนทำการวัด โดยวัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยแรงกดให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างร้อยละ 70 พบว่ามีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสองปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ปริมาณแอมิโลสและระยะเวลาการเก็บ โดยส่งผลกระทบต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ในภาพที่ 8 พบว่าเจลดสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเจลดสตาร์ชจากข้าวพันธุ์ชัยนาท1 ให้ค่า

ความแข็งสูงกว่าเจลสตาร์ชจากข้าวทุกพันธุ์ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลสด (ที่ 0 วัน) กับเจลสตาร์ชแช่แข็งจากข้าว จะเห็นว่าเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวและให้ความร้อนอีกครั้ง มีแนวโน้มให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของปริมาณแอมิโลส พบว่าเจลสตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสสูง วัดค่าความแข็งได้สูงสุดและสูงกว่าเจลสตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสปานกลาง และกลุ่มแอมิโลสต่ำ และจะเห็นว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 15 วันของการเก็บ และมีความแข็งเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงระยะเวลาการเก็บที่ 120 วัน ดังนั้นการเก็บเจลสตาร์ชจากข้าวแอมิโลสสูงที่ 15 วัน เป็นเวลาวิกฤติของการแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ช (the critical time of frozen gels) เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวชัยนาท1 และเหลืองประทิว123 มีค่าความแข็งที่ 120 วัน สูงกว่าที่ 1 วัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากการรวมตัวกันของแอมิโลสเพิ่มขึ้น และการเก็บที่ 45 60 และ 120 วัน พบว่าความแข็งของเจลสตาร์ชจากข้าวเหลืองประทิว123 กับพลาซามปราจีนบุรี มีความแข็งของเจลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามถ้าเปรียบเทียบพันธุ์ข้าวในกลุ่มแอมิโลสสูง พบว่าปริมาณแอมิโลสสูงสุด ไม่ได้ทำให้เจลที่แข็งที่สุด ดังนั้นความแข็งของเจลไม่ได้ขึ้นกับปริมาณแอมิโลสอย่างเดียว และเจลแช่เยือกแข็งจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง ซึ่งพบว่าที่ 1 วัน และ 120 วัน แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) อย่างไรก็ตามเจลสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำตลอดระยะเวลาการเก็บ (1 ถึง 120 วัน) พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แสดงว่าเจลสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ มีความสามารถในการจับน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดี เพราะว่าโครงสร้างของแอมิโลเพกทินที่มีลักษณะกึ่งก้อน ที่สามารถจับน้ำไว้ในโครงร่างได้ดี ซึ่ง Bejosano and Corke (1999) กล่าวว่าเจลสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสเพิ่มขึ้น มีผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้น เพราะว่าความแข็งแรงของโครงสร้างเจลโดยมากขึ้นกับมวลต่อปริมาตร (density) ในโครงร่างสามมิติของแอมิโลส อาจเกิดจากเจลสตาร์ชจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงให้โครงสร้างเจลมีความแน่นเหนียว ไม่มีความยืดหยุ่น จึงยากต่อการทำลายโครงสร้างของเจล นอกจากนี้โครงสร้างผลึกของแอมิโลส และแอมิโลเพกทินยังมีส่วนสำคัญต่อความแข็งของข้าวหุงสุก (hard cooking properties) โดยเฉพาะถ้าโครงสร้างแอมิโลเพกทินมีพันธะขนาดยาวจำนวนมาก จะให้ข้าวหุงสุกมีเนื้อสัมผัสที่มีความแน่นเหนียว (firmness) แห้งและไม่เหนียว (Ong and Blanshard 1995; Radhika and others 1993) อาจเกิดจากการจับกันระหว่างโมเลกุลของแอมิโลเพกทินที่มีพันธะขนาดยาวกับโมเลกุลแอมิโลส ทำให้เกิดการจัดเรียงเป็นผลึกและเกิดลักษณะกลุ่มจำนวนมาก (clusters) มีโครงสร้างเกลียวคู่ (double helical) (Ong and Blanshard, 1995)

1.5.2 ผลการศึกษาการจับของเหลวออกจากเจลในเจลสตาร์ชจากข้าวระหว่างการเก็บจากการศึกษาการจับของเหลวออกจากเจลระหว่างการเก็บเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว โดยวางแผนการทดลองแบบ 9x7 Factorial in Completely Randomized Design (CRD) มี 2 ปัจจัย ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 คือ ชนิดสตาร์ชจากข้าว จำนวน 9 พันธุ์ ปัจจัยที่ 2 คือ ระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชจากข้าว (1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน) พบว่าทั้งสองปัจจัยไม่มีอิทธิพลร่วมกันและแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) จากการเปรียบเทียบพันธุ์ข้าวต่อการจับของเหลวออกจากเจลในเจลสตาร์ชจากข้าว ระหว่างการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 9) แสดงให้เห็นว่าปริมาณแอมิโลสมีผลกระทบต่อร้อยละการจับของเหลวออกจากเจล แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Singh and others (2006) เจลสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 5 ถ้า เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ที่ 24, 72, 120 และ 168 ชั่วโมง ทำการเหวี่ยงแยกที่ 3200x g นาน 15 นาที พบว่าการจับของเหลวออกจากเจลไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณแอมิโลส ($r = 0.022$, $P\leq 0.05$) ขึ้นกับการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลแอมิโลสที่ถูกออกมาจากเมล็ดสตาร์ชกับพันธะแอมิโลเพกทิน ซึ่งจะพัฒนาไปเป็นส่วน junction zones การศึกษาครั้งนี้ผลของระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส (1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน) พบว่าเจลสตาร์ชจากข้าวทุกพันธุ์ ตลอดระยะเวลาการเก็บ มีการจับของเหลวออกจากเจล แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งการศึกษาของ Sodhi and Singh (2003) ที่ได้เก็บเจลสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 5 ไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 24, 72, 120 และ 168 ชั่วโมง ทำการหมุนเหวี่ยงที่ 5000 rpm นาน 15 นาที พบว่าระยะเวลาการเก็บนานขึ้น ให้การจับของเหลวออกจากเจลเพิ่มขึ้น ยกเว้นข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 7.83 การจับของเหลวออกจากเจลต่ำสุด โดยระยะเวลาการเก็บไม่มีผลต่อการจับของเหลวออกจากเจลที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาครั้งนี้จะเห็นว่าการจับของเหลวออกจากเจลขึ้นกับพันธุ์ข้าว ไม่ได้ขึ้นกับปริมาณแอมิโลสอย่างเดียว เนื่องจากผลการเก็บเจลสตาร์ชไว้ระยะเวลานานๆ อาจเกิดอันตรกิริยาระหว่างพันธะแอมิโลสกับแอมิโลเพกทิน ซึ่งจะพัฒนาไปเป็น Junction zones (elastic structure) (Chien and others 1999; Perera and Hoover 1999; Singh and others 2005) ในช่วงแรกเกิดการจับกันระหว่างโมเลกุลของแอมิโลสและเกิดผลึกของแอมิโลส หลังจากเก็บเจลระยะเวลานานขึ้น ส่วนของแอมิโลเพกทินมีบทบาทสำคัญในการจับกันของโมเลกุลและการเกิดผลึกของเจล (Miles and others 1985) นอกจากนี้โมเลกุลขนาดเล็กของแอมิโลส จะช่วยให้เกิดการรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้น ขนาดความยาวกิ่งก้านของแอมิโลเพกทินและโมเลกุลขนาดกลางของแอมิโลส จะมีผลให้การจับของเหลวออกจากเจลเพิ่มขึ้น (Jane and Chen 1992)

ตารางที่ 9 ผลของพันธุ์ข้าวและระยะเวลาการเก็บต่อการจับของเหลวออกจากเจล
เก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน

ปัจจัยการศึกษา (พันธุ์ข้าวและระยะเวลาการเก็บ)		Syneresis (%)
พันธุ์ข้าว	ขาวดอกมะลิ105	2.70 ±0.28
	หอมสุพรรณบุรี	2.51±0.32
	หอมคลองหลวง1	2.50±0.29
	ขาวตาแห้ง17	2.63±0.42
	สุพรรณบุรี2	2.53±0.44
	สุพรรณบุรี60	2.80±0.26
	เหลืองประทิว123	2.62±0.20
	ชัยนาท1	2.65±0.26
	พลาญงามปราจีนบุรี	2.53±0.26
Pr > F = P value of the F test		0.0726
ระยะเวลาการเก็บ (วัน)	1	2.54±0.32
	15	2.60 ±0.25
	30	2.60 ±0.24
	45	2.61±0.33
	60	2.62 ±0.45
	90	2.66±0.36
	120	2.62 ±0.30
Pr > F = P value of the F test		0.9555

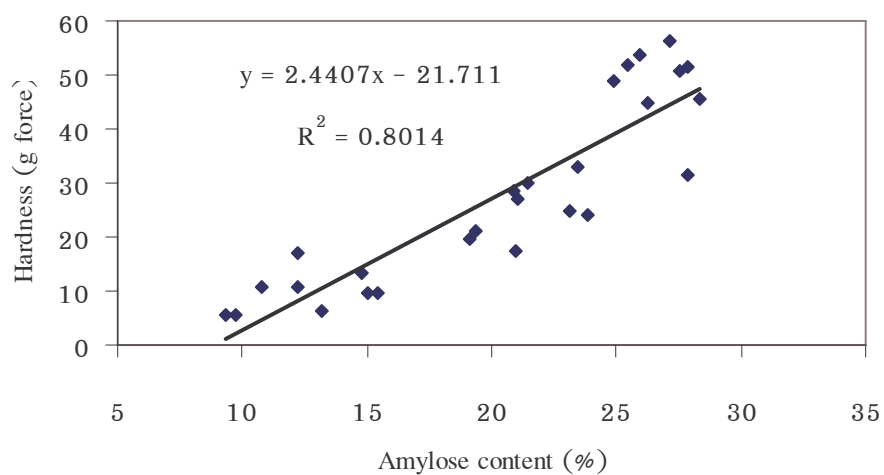
หมายเหตุ จากปัจจัยการศึกษา (พันธุ์ข้าวและระยะเวลาการเก็บ) แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) และจากการทดลอง 3 ซ้ำ

1.6 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (Correlation Analysis)

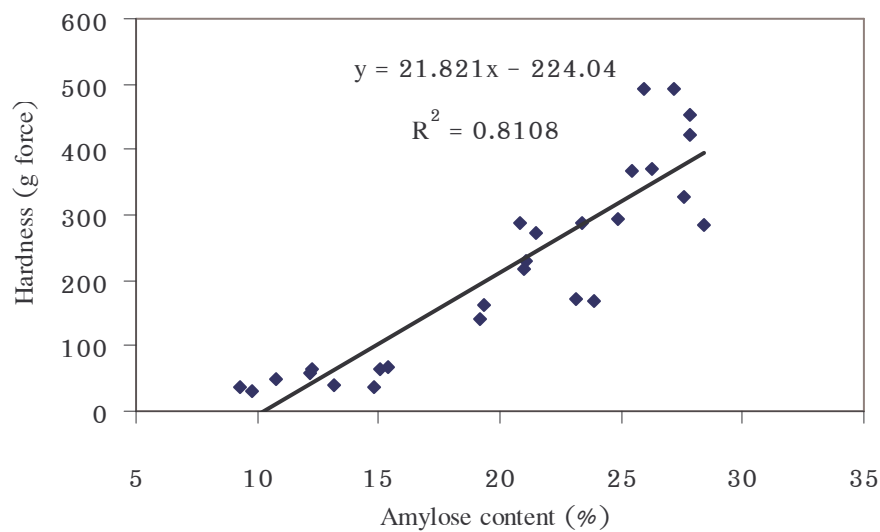
ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมิโลส ค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดสุดท้าย ค่าการคืนตัวกับค่าความแข็งของเจลสดและเจลแช่เยือกแข็งจากข้าว นาน 30 วัน โดยใช้ Pearson correlation coefficients

	Hardness of fresh gel at 15 %	Hardness of fresh gel at 70 %	Hardness of frozen and reheat gel at 15 %	Hardness of frozen and reheat gel at 70 %
Amylose content	0.77***	0.89***	0.90***	0.90***
Peak Viscosity (RVU)	-0.56**	-0.66**	-0.59***	-0.65***
Final Viscosity (RVU)	0.84***	0.85***	0.89***	0.81***
Setback (RVU)	0.78***	0.85***	0.82***	0.82***
Hardness of fresh gel at 15 %	1.00	0.78***	0.84***	0.79***
Hardness of fresh gel at 70 %	-	1.00	0.94***	0.92***
Hardness of freeze gel at 15 %	-	-	1.00	0.92***
Hardness of freeze gel at 70 %	-	-	-	1.00

หมายเหตุ * แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$), ** แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ($P \leq 0.01$) และ *** แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99.99 ($P \leq 0.001$) ตัวอย่างเจลสดและเจลแช่เยือกแข็งจากข้าวที่เก็บนาน 30 วัน ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง และให้ความร้อนอีกครั้ง ทดสอบแรงกดที่ร้อยละ 15 และ 70 ของความหนาของเจล



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมิโลสกับค่าความแข็งของเจลแซ่เยือกแข็งจากข้าว
ที่เก็บนาน 30 วัน ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง
ทดสอบแรงกดที่ร้อยละ 15 ของความหนาเจลสตาร์ช



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมิโลสกับค่าความแข็งของเจลแซ่เยือกแข็งจากข้าว
ที่เก็บนาน 30 วัน ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง
ทดสอบแรงกดที่ร้อยละ 70 ของความหนาเจลสตาร์ช

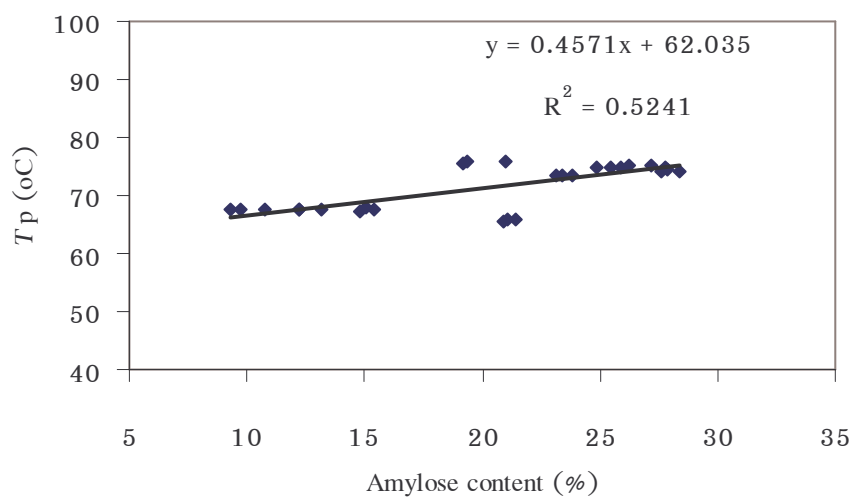
จากตารางที่ 10 ภาพที่ 9 และ 10 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอมิโลส ค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดสุดท้าย ค่าการกินตัว กับค่าความแข็งแรงของเจลสดและเจลแช่เยือกแข็งจากข้าว พบว่าปริมาณเอมิโลสมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างยิ่ง (high positive correlation) กับค่าความแข็งแรงของเจลสดที่แรงกดร้อยละ 15 ($r = 0.77, P \leq 0.001$) เจลสดที่แรงกดร้อยละ 70 ($r = 0.89, P \leq 0.001$) เจลแช่เยือกแข็งจากข้าวที่แรงกดร้อยละ 15 และเจลแช่เยือกแข็งจากข้าวที่แรงกดร้อยละ 70 ($r = 0.90, P \leq 0.001$) เช่นเดียวกันกับค่าความหนืดสุดท้ายและค่าการกินตัว ได้ว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างยิ่งกับค่าความแข็งแรง แต่ค่าความแข็งแรงดังกล่าวมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่าความหนืดสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของเจลสดที่แรงกดร้อยละ 15 กับเจลแช่เยือกแข็งจากข้าวที่แรงกดร้อยละ 15 และความแข็งแรงของเจลสดที่แรงกดร้อยละ 70 กับเจลแช่เยือกแข็งจากข้าวที่แรงกดร้อยละ 70 พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างยิ่ง ($r = 0.84, P \leq 0.001$ และ $r = 0.92, P \leq 0.001$) ดังนั้นจะเห็นว่าเมื่อปริมาณเอมิโลสเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงของเจลสดและเจลแช่เยือกแข็งจากข้าวเพิ่มขึ้นด้วย เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Singh and others (2005) พบว่าลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกขึ้นกับปริมาณเอมิโลสและความแตกต่างของโครงสร้างเม็ดสตาร์ช โดยข้าวหุงสุกที่มีปริมาณเอมิโลส จะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความแข็ง ซึ่ง Singh and others (2003) รายงานว่าเม็ดสตาร์ชจากข้าวที่มีขนาดเล็กจะให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 11 การวิเคราะห์ Pearson Correlation coefficient เปรียบเทียบกลุ่มของเอมิโลส 3 กลุ่มและปริมาณเอมิโลสของข้าวแต่ละพันธุ์กับสมบัติทางความร้อนของเจลสตาร์ชจากข้าว พบว่ากลุ่มของเอมิโลสและปริมาณเอมิโลสมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างยิ่ง ($P \leq 0.001$) กับอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลในเซชัน ($r = 0.71, 0.65$) อุณหภูมิฟิค ($r = 0.76, 0.72$) (ภาพที่ 11) และอุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็ง ($r = 0.78, 0.71$) (ภาพที่ 12) โดยอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลในเซชันมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างยิ่ง ($P \leq 0.001$) กับอุณหภูมิฟิค ($r = 0.99$) (ภาพที่ 13) ส่วนอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลในเซชันและอุณหภูมิฟิคมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างยิ่งกับอุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็ง ($r = 0.85$ และ $0.86, P \leq 0.001$) (ภาพที่ 14 และ 15) และค่าเอนทัลปีของการแช่เยือกแข็ง ($r = 0.63$ และ $0.63, P \leq 0.01$) ทั้งนี้ปริมาณเอมิโลสไม่มีความสัมพันธ์กับค่าเอนทัลปีในการเกิดเจลในเซชัน อุณหภูมิกลาทรานซิชันของการแช่เยือกแข็ง ค่าเอนทัลปีของการแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิกลาทรานซิชันของการแช่เยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง อุณหภูมิการหลอมละลาย ค่าเอนทัลปีของการแช่เยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง ($P > 0.05$)

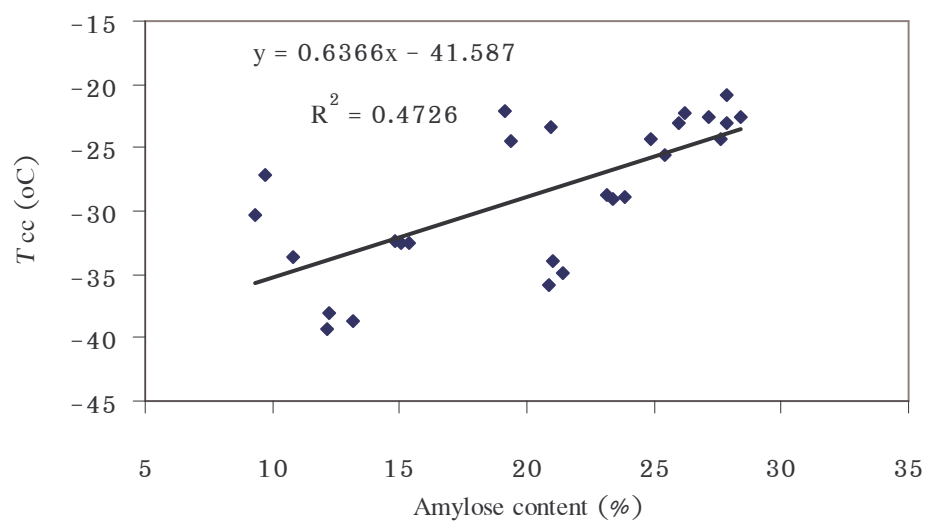
ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว ปริมาณแอมิโลส ค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดสุดท้าย ค่าการคืนตัว กับสมบัติทางความร้อนของ
เจลสตาซ์จากข้าว โดยใช้ Pearson correlation coefficients

	GAM	AM	PV	FV	setback	T_o	T_p	ΔH_G	T_{gf}	T_{cc}	ΔH_f	T_g	T_m	ΔH
AM	0.95***	1.00												
PV	-0.73***	-0.78***	1.00											
FV	0.86***	0.81***	-0.55**	1.00										
setback	0.90***	0.90***	-0.90***	0.86***	1.00									
T_o	0.71***	0.65**	-0.54*	0.43	0.57*	1.00								
T_p	0.76***	0.72***	-0.59**	0.46	0.62**	0.99***	1.00							
ΔH_G	0.21	0.33	-0.31	-0.13	0.13	0.47*	0.51*	1.00						
T_{gf}	-0.03	0.01	-0.006	0.24	0.12	-0.08	-0.12	-0.22	1.00					
T_{cc}	0.78***	0.71**	-0.70**	0.55*	0.73***	0.85***	0.86***	0.25	-0.18	1.00				
ΔH_f	0.33	0.44	-0.41	0.09	0.31	0.63**	0.63**	0.14	-0.16	0.61**	1.00			
T_g	-0.16	-0.27	0.007	-0.01	-0.01	-0.34	-0.37	-0.26	0.13	-0.23	-0.21	1.00		
T_m	-0.26	-0.25	0.33	0.05	-0.19	-0.36	-0.36	-0.34	0.20	-0.33	-0.47*	0.01	1.00	
ΔH	0.49*	0.44	-0.34	0.41	0.42	0.47*	0.49	-0.10	-0.12	0.58	0.65**	-0.05	-0.006	1.00

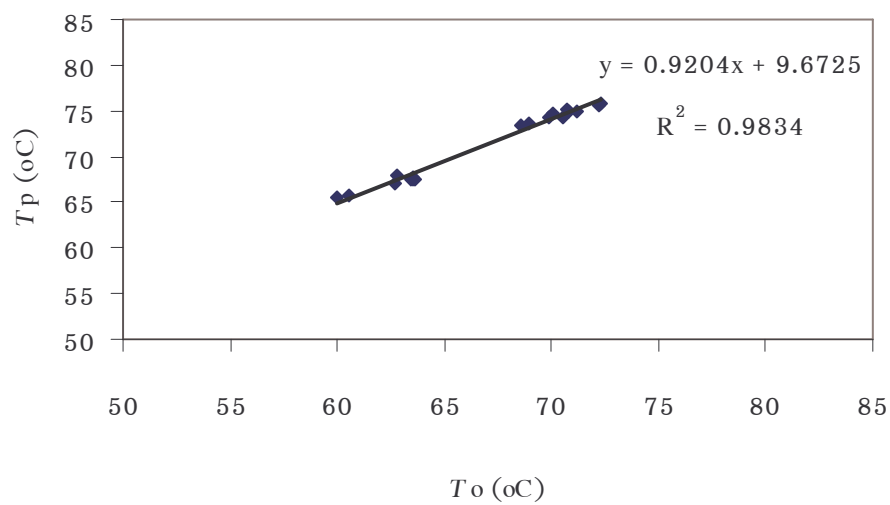
หมายเหตุ * แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$), ** แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ($P \leq 0.01$) และ *** แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99.99 ($P \leq 0.001$) (GAM = กลุ่มของแอมิโลส 3 กลุ่ม, AM=ปริมาณแอมิโลส, PV=ค่าความหนืดสูงสุด, FV=ค่าความหนืดสุดท้าย, T_o = อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลลาทีไนซ์, T_p = อุณหภูมิพีค, ΔH_G = ค่าเอนทัลปี T_{gf} = อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการแช่เยือกแข็ง, T_{cc} = อุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็ง, ΔH_f = ค่าเอนทัลปีของการแช่เยือกแข็ง, T_g = อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการแช่เยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง, T_m = อุณหภูมิการหลอมละลาย, ΔH = ค่าเอนทัลปีของการแช่เยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง)



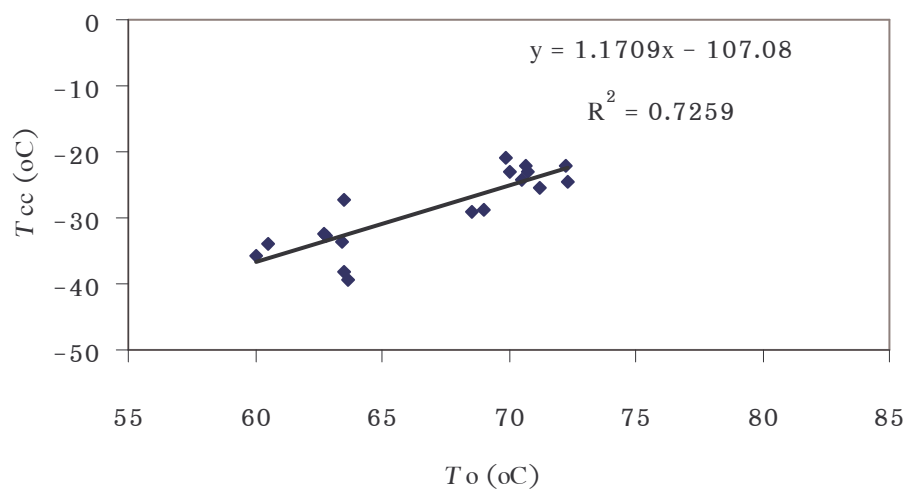
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมิโลสกับอุณหภูมิพีคของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน



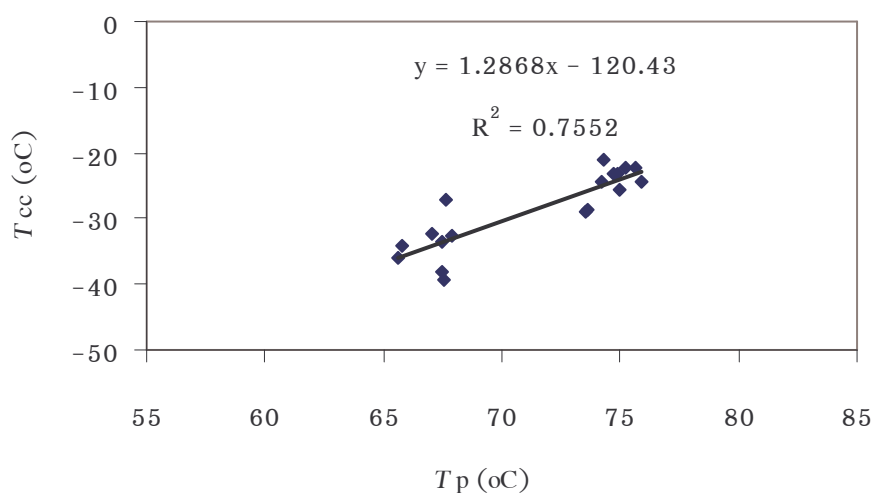
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมิโลสกับอุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็ง



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลที่ไนเซชันกับอุณหภูมิฟิค



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลที่ไนเซชันกับอุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็ง

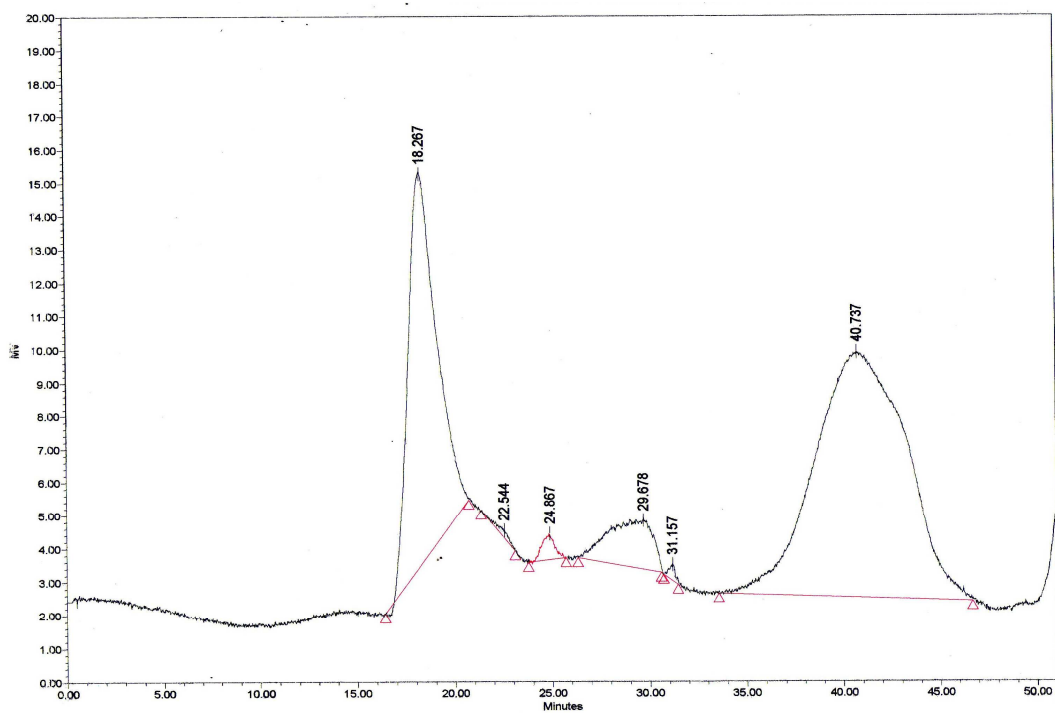


ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิฟิคของการเกิดเจลที่ในเซชันกับ อุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็ง

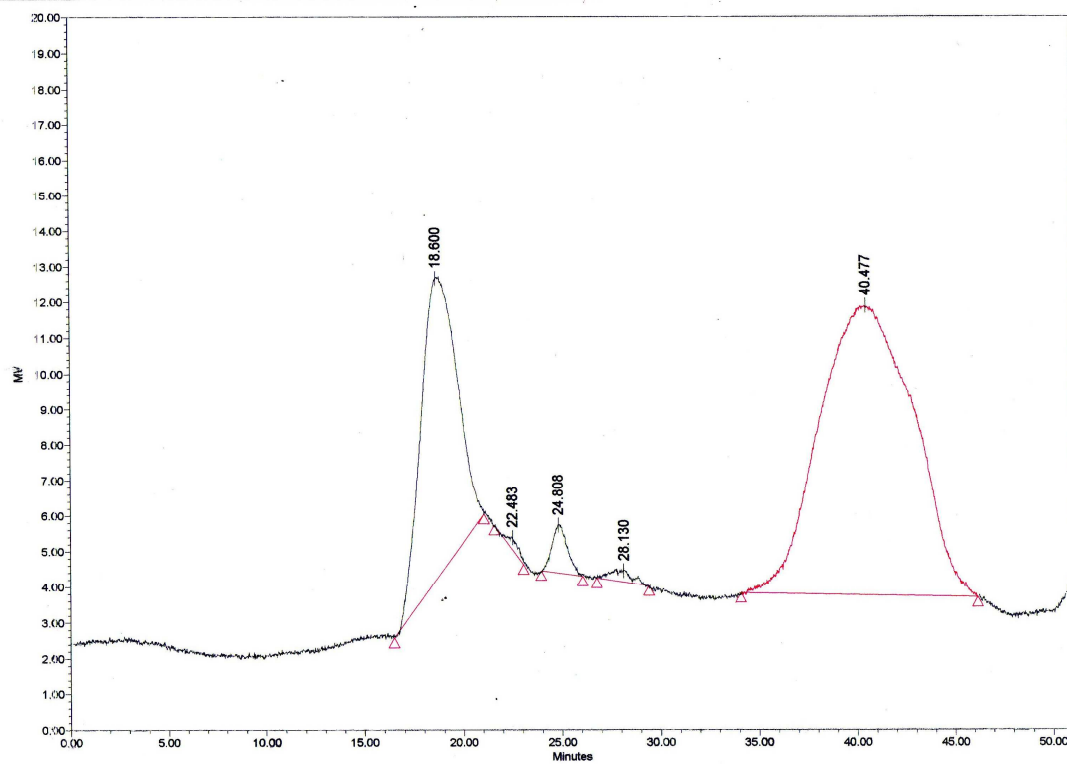
จากข้อสมมุติฐานที่ว่า เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวระหว่างการเก็บอาจมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) ของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ซึ่งส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสโดยเฉพาะค่าความแข็งของเจลสตาร์ชจากข้าว ซึ่งจากผลการศึกษาเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวชัณษาท1 ที่ระยะเวลาการเก็บ 1 15 30 วัน และ 1 ปี โดยใช้วิธี HPSEC ของเจลจากข้าวพันธุ์ชัณษาท1 ตารางที่ 12 และ ภาพที่ 16 ถึง ภาพที่ 19) พบว่าเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวในระหว่างการเก็บ 1 15 30 วันและ 1 ปี มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดโมเลกุล ซึ่งอาจจะเกิดจากกิจกรรมของเอนไซม์แอมิเลส ที่เข้าย่อยโมเลกุลแอมิโลเพกทินให้มีขนาดเล็กลง หรืออาจจะเกิดจากการทำลายโมเลกุลโดยการขยายตัวของเกล็ดน้ำแข็ง (ice crystal growth) ซึ่งจะเห็นว่าฟิคแรกเวลาประมาณ 18-19 นาที ลักษณะของโมเลกุลขนาดใหญ่ คือ มากกว่า 5,000,000 Da โดยเฉพาะที่ฟิคหลังสุดที่เวลา 40-41 นาที และเมื่อระยะเวลาการเก็บนานขึ้น สามารถตรวจวัดจำนวนของโมเลกุลที่มีขนาดเล็กเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของขนาดโมเลกุลของเจลาตารัสแซ่เยือกแข็งจากข้าวชัณนาท1 โดยใช้ HPSEC

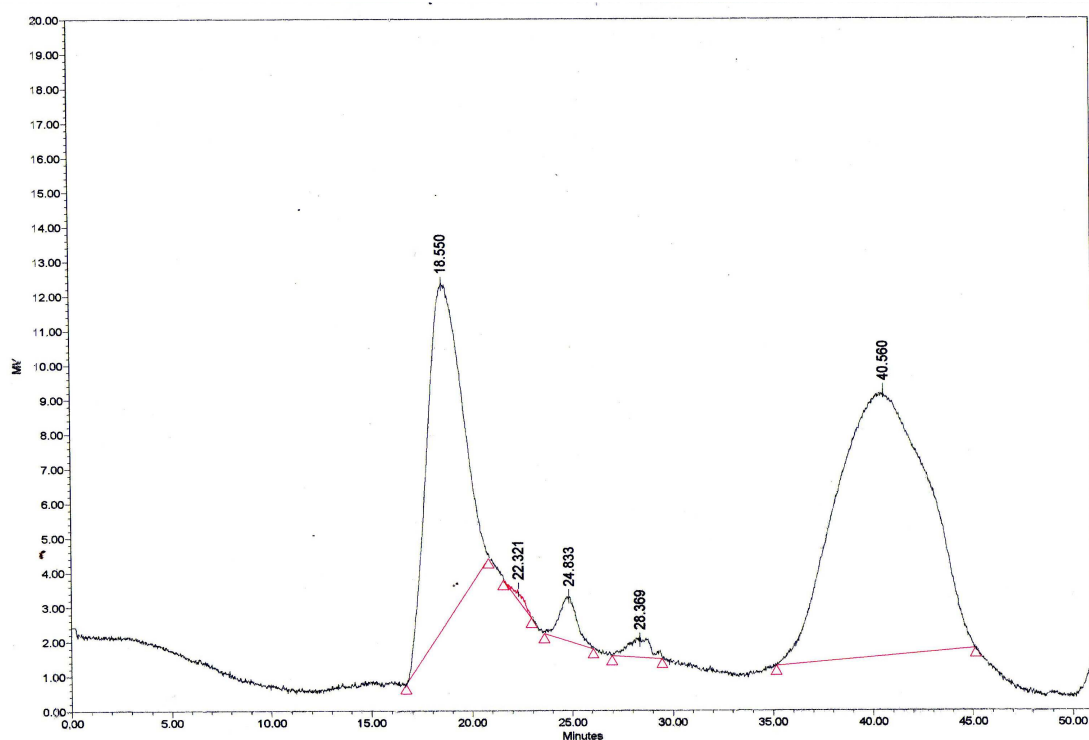
Time	Retention Time (min)	Area	%Area
1 day	18	1467212	38
	23	7213	0
	25	17653	1
	29	130255	3
	31	9230	0
	41	2232078	57
15 days	19	1282728	34
	22	11439	0
	24	64568	2
	28	22918	1
	40	2448111	64
30 days	19	1225180	32
	22	10123	1
	25	74176	2
	28	40617	1
	41	2432015	64
1 year	19	1253012	34
	22	5572	0
	25	43564	1
	28	42034	1
	40	2412069	69



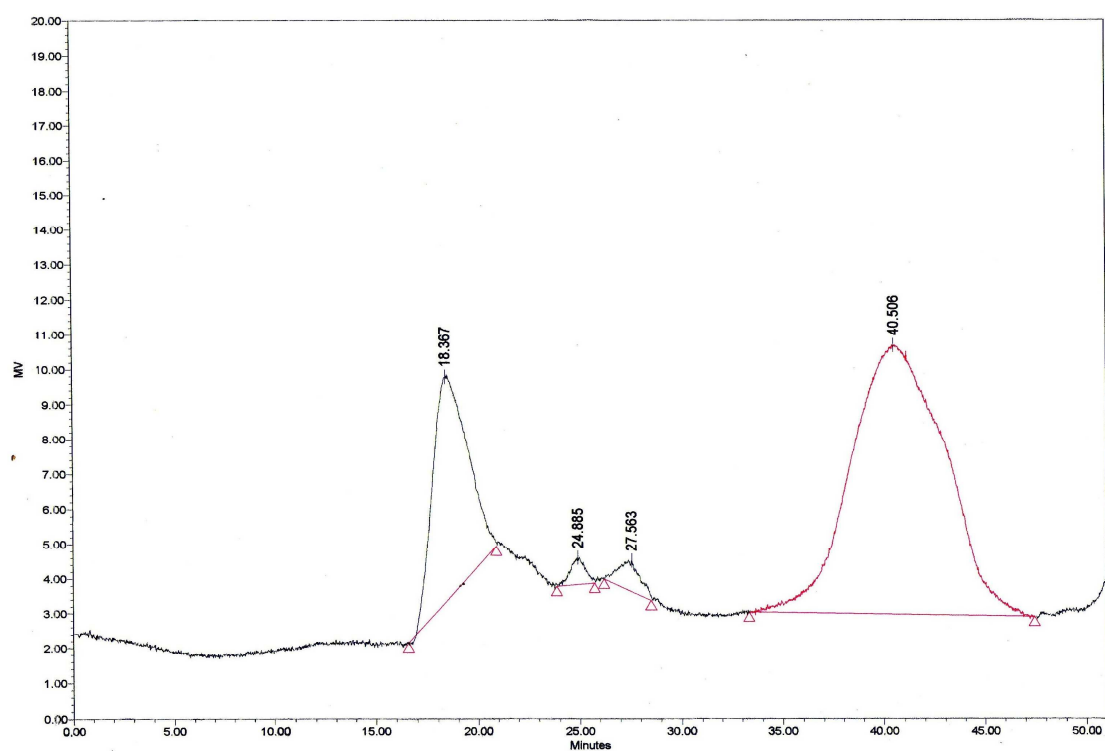
ภาพที่ 16 โครมาโตแกรมของเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวชัณนาท1 ระยะเวลาการเก็บที่ 1 วัน



ภาพที่ 17 โครมาโตแกรมของเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวชัณนาท1 ระยะเวลาการเก็บที่ 15 วัน



ภาพที่ 18 โครมาโตแกรมของเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวชัณนาท1 ระยะเวลาการเก็บที่ 30 วัน



ภาพที่ 19 โครมาโตแกรมของเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวชัณนาท1 ระยะเวลาการเก็บที่ 1 ปี

จากผลการวิจัยในส่วนที่ 1 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง จากข้าว 9 พันธุ์ ที่ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 20 30 40 และ 50 ได้ทำการคัดเลือกพันธุ์ข้าว 1 พันธุ์ และความเข้มข้นของสตาร์ช 1 ระดับ เพื่อทำการศึกษาผลของสารเจือปนอาหารในเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวในส่วนการวิจัยส่วนที่ 2 ต่อไป โดยได้พิจารณาจากผลการวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสรานชี้นของการแช่เยือกแข็ง (T_g) ที่มีค่า T_g สูง พบว่าอุณหภูมิกลาสรานชี้นของการแช่เยือกแข็ง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) อย่างไรก็ตามเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง จากข้าวพันธุ์ชยันนาท1 ซึ่งอยู่ในกลุ่มเอมิโลสสูง มีอุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็งระหว่างการแช่เยือกแข็ง และค่าเอนทัลปีของการแช่เยือกแข็งสูงกว่าทุกพันธุ์ที่ทำการศึกษา ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโมเลกุลของ สตาร์ชจากข้าวชยันนาท1 มีความสามารถจับน้ำต่ำ จึงทำให้มีปริมาณอิสระสูง เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของเจลสตาร์ชร้อยละ 20 และ 30 พบว่าอุณหภูมิกลาสรานชี้นของการแช่เยือกแข็ง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ดังนั้นจึงเลือกที่ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 30 นอกจากนี้จากรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ในปีเพาะปลูก 2547 (2550) ของข้าวนาปรัง รายงานว่าข้าวชยันนาท1 มีร้อยละเนื้อที่เพาะปลูก เท่ากับ ร้อยละ 20.52 ผลผลิตต่อไร่ 628 กิโลกรัมต่อไร่ (สมาคมผู้ส่งข้าวออกต่างประเทศ, 2550) ดังนั้นจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วจึงเลือก ข้าวพันธุ์ชยันนาท1 เพื่อนำไปศึกษาต่อในการวิจัยส่วนที่ 2 เพื่อทราบถึงชนิดและปริมาณสารเจือปนอาหาร ที่จะช่วยให้อุณหภูมิกลาสรานชี้นของการแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้น เจลมีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งและการเก็บที่อุณหภูมิแช่เยือกแข็ง -18 องศาเซลเซียส

งานวิจัยในส่วนที่ 2 ผลการเติมสารเจือปนอาหารในเจลสตาร์ชจากข้าว (เจลสด และ เจลแช่แข็ง)

2.1 ผลของการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากข้าวพันธุ์ชยันนาท1

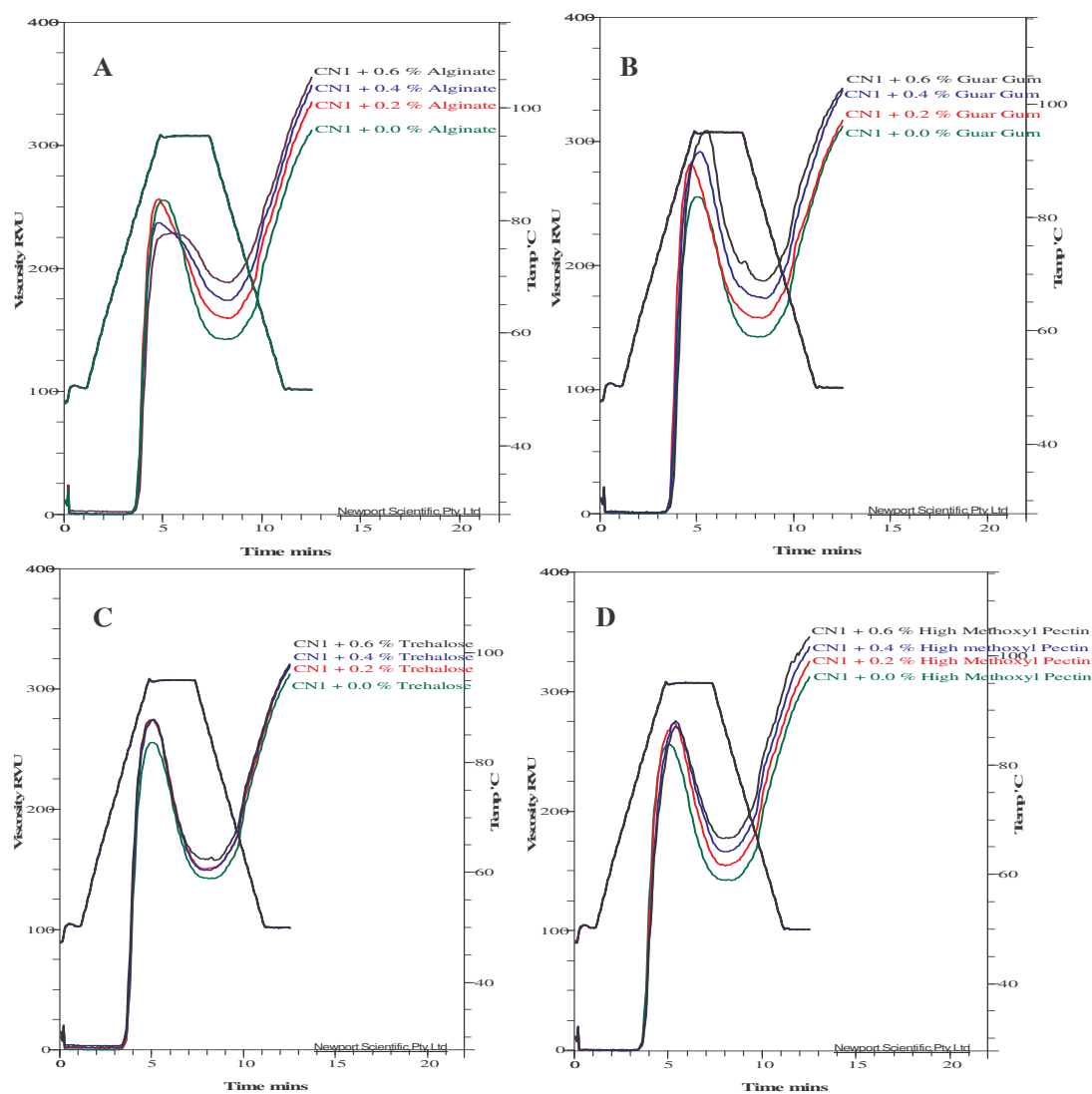
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชจากข้าวพันธุ์ชยันนาท1 (Chainat1) มีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้าและปริมาณอะมิโลส ตามลำดับดังนี้ ร้อยละ 12.73, 0.35 ± 0.02 , 0.03 ± 0.01 , 0.20 ± 0.01 และ 26.44 ± 1.11 (โดยน้ำหนักแห้ง)

2.2 ผลของการศึกษาคุณสมบัติความหนืด

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติการเกิดเจลในเซชัน และความหนืดของสตาร์ชจากข้าวพันธุ์ชยันนาท1 (ไม่เติมสารเจือปนอาหาร) และสตาร์ชจากข้าวชยันนาท1 ที่เติมสารเจือปนอาหาร 4 ชนิด ได้แก่ ทรีฮาโลส (Trehalose) อัลจิเนต (Alginate) กวักัม (Guar Gum) และ ไฮเมทอกซีเพกทิน (High Methoxyl Pectin) โดยให้มีส่วนผสมของสารเจือปนอาหาร ร้อยละ 0.0, 0.2, 0.4 และ 0.6 โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง การทดลองแบบ 4×4 Factorial in Completely Randomized Design มี 2 ปัจจัยดังนี้ ปัจจัยที่ 1 คือ สารเจือปนอาหาร 4 ชนิด (ทรีฮาโลส อัลจิเนต กวักัม และ ไฮเมทอกซีเพกทิน) ปัจจัยที่ 2 คือ ปริมาณสารเจือปนอาหาร 4 ระดับ (ร้อยละ 0, 0.2, 0.4 และ 0.6) พบว่ามีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสองปัจจัยคือ ชนิดและปริมาณของสารเจือปนอาหาร มีผลต่อคุณสมบัติการเกิดเจลในเซชันและความหนืดของสตาร์ชจากข้าวที่เติมและไม่เติมสารเจือปนอาหาร และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

จากภาพที่ 20 และตารางที่ 13 พบว่าเจลสตาร์ชจากข้าวที่เติมกวักัมร้อยละ 0.2 ถึง 0.6 ให้ค่าความหนืดที่จุดสูงสุด (peak viscosity; RVU) และค่าการแตกตัว (breakdown) สูงที่สุดและให้ค่าคืนตัว (setback) ต่ำที่สุด แต่การเติมอัลจิเนตร้อยละ 0.6 ช่วยให้เจลสตาร์ชจากข้าวมีความทนต่อการกวนสูงสุด และค่าการแตกตัว (breakdown) ต่ำที่สุด จะเห็นว่าการเติมสารกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์ในระดับที่สูงขึ้น ช่วยเพิ่มความหนืดและความทนต่อแรงเฉือนระหว่างได้รับความร้อนและลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชจากข้าว เนื่องจากสารไฮโดรคอลลอยด์ มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ เช่น การเกิดเจล (gelling agent) สารให้ความข้น (thickening agent) และสารให้ความคงตัว (stabilizer)(Williams and Phillips2000) ซึ่งการเติมกวักัมหรือไฮเมทอกซีเพกทินจะช่วยให้เจลสตาร์ชมีความทนต่อการกวน (high trough) เนื่องจากสารเจือปนอาหารทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติทนต่อแรงเฉือน (strongly shear thinning) และกวักัมซึ่งเป็นส่วนของเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) มีผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น (Sudhakar and others 1996) แต่ผลการเติมอัลจิเนต จะให้ค่าการแตกตัว

สูงสุด บ่งชี้ว่าไม่ทนต่อแรงเฉือน เพราะว่าในระบบของเหลว (liquid phase) อัลจิเนตมีคุณสมบัติเป็นสารที่มีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning (Draget 2000)



ภาพที่ 20 เปรียบเทียบกราฟความหนืด (Pasting Curve) ของสตาร์ชจากข้าวชัยนาท1

ความเข้มข้นร้อยละ 30 ที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหาร ความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารร้อยละ 0.0, 0.2, 0.4 และ 0.6 (A = อัลจิเนต, B = กัวกัม, C = ทรีฮาโลส, D = ไฮเมทอกซีเพกทิน)

ตารางที่ 13 สมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชันและความหนืดของเพคต์ของสตาร์ชจากข้าวไม่เต็มและเต็มสารเจือปนอาหารชนิดต่าง ๆ *

ชนิดและปริมาณ ของสารเจือปนอาหาร (ร้อยละ)		ค่าความหนืด สูงสุด (Peak Viscosity) (RVU)	ค่าความคงทน ต่อการกวาน (Trough1) (RVU)	ค่าการแตกตัว (Breakdown) (RVU)	ค่าความหนืดสุดท้าย (Final Viscosity) (RVU)	ค่าการคืนตัว (Set Back) (RVU)	อุณหภูมิเริ่มต้นของ การเกิดเจลลาทีโนซ์ (Pasting Temperature, °C)
สตาร์ชจากข้าวชัณนาท1		256.630±4.53 ^{de}	137.97±4.90 ^g	118.64±2.93 ^a	300.96±9.40 ^f	44.34±8.14 ^{cd}	79.80 ±0.09 ^{bc}
ชัณนาท1+อัลจินต	0.2	254.95±2.56 ^c	163.42±5.31 ^{de}	91.53±4.87 ^b	336.06±6.47 ^{bcd}	81.11±4.48 ^b	80.10 ±0.10 ^b
	0.4	236.33±2.66 ^f	175.61±5.45 ^{bc}	60.72±3.59 ^c	350.94±9.67 ^{ab}	128.11±7.77 ^a	80.27±0.34 ^b
	0.6	229.58 ±2.30 ^f	189.64±5.16 ^a	39.94±2.88 ^d	357.69±10.06 ^a	128.11±7.77 ^a	80.90±0.44 ^a
ชัณนาท1+ถั่วลิสง	0.2	282.39±2.59 ^b	157.72±7.04 ^{ef}	124.67±4.66 ^a	322.25±12.74 ^{de}	39.86±10.14 ^{cd}	79.11±0.08 ^c
	0.4	301.28±15.24 ^a	175.64±10.37 ^{bc}	125.64±6.92 ^a	336.83±7.15 ^{bcd}	35.55±13.76 ^d	79.72±0.49 ^{bc}
	0.6	300.00±7.58 ^a	182.28±4.52 ^{ab}	117.72 ±3.16 ^a	339.89±4.32 ^{bc}	39.89±5.58 ^{cd}	79.95±0.75 ^b
ชัณนาท1+ไฮเมทอกซีเพกทิน	0.2	269.22 ±9.23 ^{bcd}	156.78±2.19 ^{ef}	112.45±10.49 ^a	324.03±9.20 ^{cde}	54.81±3.49 ^c	80.10±0.05 ^b
	0.4	265.50±12.81 ^{cde}	169.48±7.58 ^{cd}	96.03±20.11 ^b	337.92±0.66 ^{bcd}	72.41±13.47 ^b	79.80±0.61 ^{bc}
	0.6	261.09±11.68 ^{de}	176.78±1.41 ^{bc}	84.30±10.44 ^b	340.22±8.40 ^{bc}	79.14±3.78 ^b	79.77±0.53 ^{bc}
ชัณนาท1+ทรีฮาโลส	0.2	276.58±6.92 ^{bc}	151.610±5.50 ^f	124.97±1.56 ^a	314.44±15.70 ^{ef}	43.34 ±3.41 ^{cd}	79.97±0.11 ^b
	0.4	274.58±3.96 ^{bc}	151.307±2.63 ^f	123.28±2.84 ^a	313.94±9.06 ^{ef}	39.45±5.78 ^{cd}	79.98±0.06 ^b
	0.6	276.30±2.09 ^{bc}	157.667±2.30 ^{ef}	118.64±3.80 ^a	316.86±3.46 ^{ef}	40.55±5.00 ^{cd}	80.07±0.63 ^b
Pr > F		0.0001	0.001	0.0001	0.0485	0.0001	0.0001

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และ Pr > F = P value of the F test.

2.3 ผลของการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางความร้อนของเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหาร

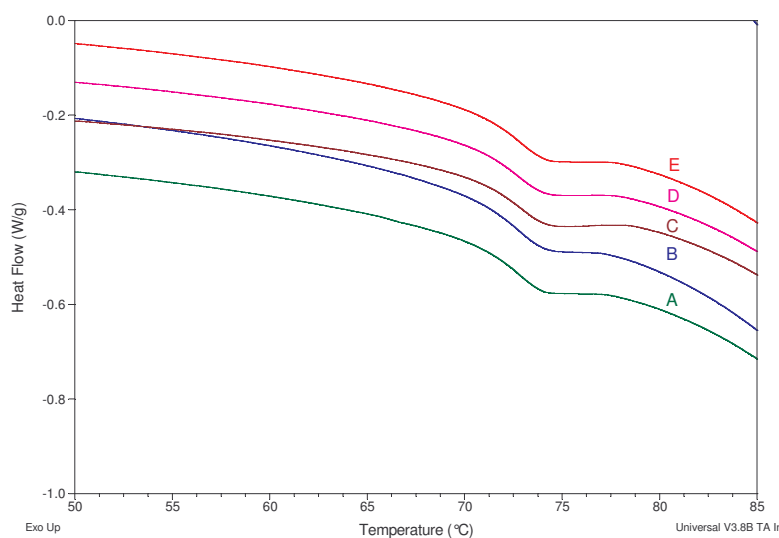
จากการศึกษาสมบัติความร้อนของสตาร์ชจากข้าวชัณนาท1 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 และเติมสารเจือปนอาหาร 4 ชนิด ที่ระดับของสารเจือปนอาหาร 4 ระดับ พบว่าค่าอุณหภูมิเริ่มต้นการเจลลาคีไนซ์ ค่าอุณหภูมิฟิค (องศาเซลเซียส) และ ค่าเอนทัลปี (จูลต่อกรัม) ของทั้ง 2 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดสารเจือปนอาหารและปริมาณสารเจือปนอาหาร (ร้อยละ 0.0-0.6) พบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมกันระหว่างชนิดของสารเจือปนอาหารกับปริมาณสารเจือปนอาหารที่ทำการศึกษา แต่มีผลมาจากปัจจัยหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลจากระดับของสารเจือปนอาหาร พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

จากตารางที่ 14 และภาพที่ 21 ผลของชนิดสารเจือปนอาหารที่เติมในเจลสตาร์ชจากข้าวต่อคุณสมบัติการเกิดเจลลาคีไนซ์ พบว่าค่าอุณหภูมิเริ่มต้นการเจลลาคีไนซ์ ค่าอุณหภูมิฟิค (องศาเซลเซียส) และค่าเอนทัลปี (จูลต่อกรัม) แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยอยู่ในช่วง 72.14 ถึง 72.38 องศาเซลเซียส 74.16 ถึง 74.52 องศาเซลเซียส และ 1.40 ถึง 1.89 จูลต่อกรัม ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับผลของปริมาณสารเจือปนอาหารที่เติมในเจลสตาร์ชจากข้าวต่อคุณสมบัติการเกิดเจลลาคีไนซ์ (ตารางที่ 14 และภาพที่ 22) พบว่าเมื่อปริมาณสารเจือปนอาหารเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.2 ถึง 0.6 ตัวอย่างเจลมีอุณหภูมิเริ่มต้นการเจลลาคีไนซ์และค่าเอนทัลปี (จูลต่อกรัม) พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่ค่าอุณหภูมิฟิคของเจลที่เติมสารเจือปนอาหารกับเจลตัวอย่างที่ไม่เติมสารเจือปนอาหาร แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

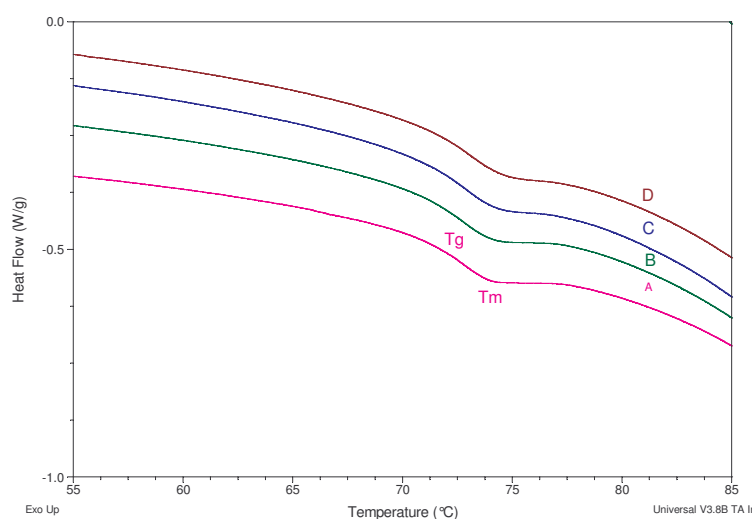
ตารางที่ 14 ผลของชนิดและปริมาณสารเจือปนอาหารที่เติมในเจลสตาร์ชจากข้าวต่อ
สมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลลาทีไนซ์ โดยใช้เครื่อง DSC

ชนิดและความเข้มข้นของสารเจือปนอาหาร		T_o (°C)	T_p (°C)	ΔH_G (J/g)
ชนิดของ	อัลจินต	72.38	74.52	1.59
สารเจือปนอาหาร	กัวกัม	72.29	74.16	1.89
	ไฮเมทอกซีเพกทิน	72.34	74.34	1.77
	ทรีฮาโลส	72.14	74.17	1.40
	Pr>F= P value of the F test	0.5475	0.1252	0.2009
ความเข้มข้นของ	0.0	72.04	74.05b	1.64
สารเจือปนอาหาร	0.2	72.50	74.66a	1.54
	0.4	72.34	74.23ab	1.97
	0.6	72.26	74.43ab	1.67
	Pr>F = P value of the F test	0.1048	0.0435	0.1168

หมายเหตุ a,b....ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งของแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษา (ชนิดของ
สารเจือปนอาหารและ ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือปนอาหาร) แสดงถึงความ
แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)
และ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ [T_o = อุณหภูมิเริ่มต้นการเจลลาทีไนซ์ (onset temperature
of gelatinization), T_p = อุณหภูมิพีค (peak temperature) และ ΔH_G = เอนทัลปี
(enthalpy of gelatinization)]



ภาพที่ 21 ผลของชนิดสารเจือปนอาหารที่เติมในสตาร์ชจากข้าวชัยนาท1 ต่อการเปลี่ยนแปลงกลาสทรานซิชันระหว่างการเกิดเจลในเซชัน (A = เจลสตาร์ชจากข้าวชัยนาท1, B = สตาร์ชจากข้าวชัยนาท1 + อัลจิเนต 0.2 %, C = สตาร์ชจากข้าวชัยนาท1 + กัวกัม 0.2 %, D = สตาร์ชจากข้าวชัยนาท1 + ไฮเมทอกซีเพกทิน 0.2 %, E = สตาร์ชจากข้าวชัยนาท1 + ทรีฮาโลส 0.2 %)



ภาพที่ 22 เปรียบเทียบปริมาณอัลจิเนต (ร้อยละ 0.0 ถึง 0.6) ที่เติมในเจลสตาร์ชจากข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงกลาสทรานซิชันระหว่างการเกิดเจลในเซชัน (A = เจลสตาร์ชจากข้าวชัยนาท1, B = เจลสตาร์ชจากข้าวชัยนาท1+อัลจิเนต 0.2 %, C = เจลสตาร์ชจากข้าวชัยนาท1+อัลจิเนต 0.4 %, D = เจลสตาร์ชจากข้าวชัยนาท1+อัลจิเนต 0.6 %)

ตารางที่ 15 ผลของชนิดและความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารที่เติมในเจลสตาร์ชจากข้าว
ต่อค่าสมบัติทางความร้อนระหว่างการแช่เยือกแข็งโดยใช้เครื่อง DSC

ชนิดและความเข้มข้นของสารเจือปนอาหาร		T_{gf} (oC)	T_{cc} (oC)	ΔH_f (J/g)
ชนิดของ	อัลจินต	-29.26a	-14.44a	109.26
สารเจือปนอาหาร	กัวกัม	-31.19b	-16.32b	112.96
	ไฮเมทอกซีเพกทิน	-31.04b	-16.54b	117.54
	ทรีฮาโลส	-30.75b	-16.25b	101.89
	Pr>F	0.0137	0.0500	0.1475
ความเข้มข้นของ	0.0	-32.92b	-17.62b	103.90
สารเจือปนอาหาร	0.2	-30.29a	-15.45a	108.08
	0.4	-29.32a	-15.45a	118.17
	0.6	-29.71a	-15.02a	111.50
	Pr>F	0.0001	0.0152	0.2058

หมายเหตุ a,b....ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งของแต่ละปัจจัยการศึกษา (ชนิดสารเจือปนอาหารและความเข้มข้นของสารเจือปนอาหาร) แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) และจากการทดลอง 2 ซ้ำ (T_{gf} = อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการแช่เยือกแข็ง, T_{cc} = อุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็งระหว่างการแช่เยือกแข็ง และ ΔH_f = ค่าเอนทัลปีของการแช่เยือกแข็ง, และ $Pr>F$ = P value of the F test)

เมื่อนำเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหาร ให้ความเย็นอย่างรวดเร็ว อัตราที่ลดลง 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ไปที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสถานะกลาสระหว่างการแช่เยือกแข็งอาหาร (glass transition in frozen foods) ในอาหารที่มีความชื้นสูงนั้นการเกิดผลึกน้ำแข็งต้องเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า -0 องศาเซลเซียส (Hatakeyama and others 2004) จากการวัดค่า super cold ของเจลสตาร์ชแต่ละตัวอย่างครั้งนี้ พบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมกันระหว่างชนิดสารเจือปนอาหารกับปริมาณสารเจือปนอาหารที่ทำการศึกษา (ร้อยละ 0.0, 0.2, 0.4 และ 0.6) ผลการศึกษาในตารางที่ 21 พบว่าชนิดสารเจือปนอาหารที่เติมในเจลสตาร์ชจากข้าว มีผลให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการแช่เยือกแข็ง มีความแตกต่างกัน

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยการเติมอัลจินต์ให้อุณหภูมิกลาสรานชีชั้นของการแช่เยือกแข็ง (T_c) และอุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็งระหว่างการแช่เยือกแข็ง (T_{cc}) สูงสุด คือที่อุณหภูมิ -29.26 องศาเซลเซียส และ -14.44 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยค่าเอนทัลปีของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งแต่ละตัวอย่าง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) มีค่าเอนทัลปีระหว่าง 101.89 ถึง 117.54 จูลต่อกรัม เมื่อปริมาณสารเจือปนอาหารเพิ่มขึ้น มีผลไปลดอุณหภูมิกลาสรานชีชั้นของการแช่เยือกแข็งและอุณหภูมิการสร้างผลึกน้ำแข็งระหว่างการแช่เยือกแข็ง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ซึ่งระดับการเติมสารเจือปนอาหารตั้งแต่ร้อยละ 0.2 ถึง ร้อยละ 0.6 แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับค่าของเจลที่ไม่เติมสารเจือปนอาหาร โดยที่อุณหภูมิกลาสรานชีชั้นของการแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้น จากอุณหภูมิ -32.92 องศาเซลเซียส ไปที่อุณหภูมิ -29.71 ถึง -30.29 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการสร้างผลึกน้ำแข็งระหว่างการแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ -17.62 องศาเซลเซียส ไปที่อุณหภูมิ -15.02 ถึง -15.45 องศาเซลเซียส ส่วนค่าเอนทัลปีของการแช่เยือกแข็ง เท่ากับ 111.50-118.17 จูลต่อกรัม แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) จะเห็นได้ว่าการเติมสารเจือปนอาหาร ช่วยเพิ่มอุณหภูมิกลาสรานชีชั้นของการแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชจากข้าวเกิดจากอันตรกิริยา (interaction) ของน้ำกับสารเจือปนอาหาร ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างของน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารไฮโดรคอลลอยด์ เนื่องจากคุณสมบัติของไฮโดรคอลลอยด์ ที่มีความสามารถในการจับน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดี ทำให้มีปริมาณน้ำอิสระ (free water) และเกิดการเคลื่อนย้ายของโมเลกุล (molecular mobility) ลดลง ดังนั้นระหว่างการแช่เยือกแข็งระบบเจลสตาร์ชที่มีไฮโดรคอลลอยด์ จึงเข้าสู่สภาวะ rubbery state และ glassy state ได้เร็วกว่าตัวอย่างเจลสตาร์ชที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ (Hatakeyama and others 2004; Huang and others 1994; Shafiur Rahman 1999) และสารไฮโดรคอลลอยด์จะเพิ่มความหนืดของ unfrozen matrix (Ferrero and others 1996) นอกจากนี้การเติมสารเจือปนอาหารเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของตัวละลาย (solute concentration) ทำให้เกิดการสร้างนิวเคลียส (nucleation) แบบ heterogeneous เพิ่มขึ้น (Shafiur Rahman 1999; Welti-Chanes and others 2004)

ตารางที่ 16 ผลของชนิดและความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารที่ไม่เติมและเติมในสตาร์ชจากข้าวต่อสมบัติทางความร้อนของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวและให้ความร้อนอีกครั้ง

Types and concentration (%)		T_g ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH (J/g)
CNT1 (control)		-7.53	0.85cde	116.20
CNT1+ Alginate	0.2	-6.35	0.77def	119.10
	0.4	-7.03	0.72def	131.55
	0.6	-6.35	0.92bcd	120.90
CNT1+ Guar gum	0.2	-6.37	1.07abc	126.35
	0.4	-6.12	1.05abc	152.45
	0.6	-7.23	1.16ab	157.60
CNT1+ HMP	0.2	-6.46	0.70def	131.30
	0.4	-6.60	0.93bcd	126.10
	0.6	-6.74	1.29a	151.50
CNT1+ Trehalose	0.2	-7.67	0.64ef	115.05
	0.4	-6.71	0.72def	125.35
	0.6	-6.89	0.58f	111.90
Pr>F = P value of the F test		0.1863	0.0082	0.3793

หมายเหตุ a,b....ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) และจากการทดลอง 2 ซ้ำ (CNT1 = ชัยนาท1, HMP = ไฮเมทอกซิลเพกทิน, T_g = อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวและให้ความร้อนอีกครั้ง, T_m = อุณหภูมิการหลอมละลายของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวและให้ความร้อนอีกครั้ง และ ΔH = ค่าเอนทัลปีของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวและให้ความร้อนอีกครั้ง)

ผลการเปรียบเทียบเจลสตาร์ชจากข้าวหลังการแช่เยือกแข็งให้ความร้อนอีกครั้ง แสดงค่าในตารางที่ 16 พบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสองปัจจัยคือ ชนิดและปริมาณของสารเจือปนอาหารต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature of reheating; T_g)

และค่าเอนทัลปีของเจลสตาร์ชให้ความร้อนอีกครั้ง (enthalpy of reheating; ΔH) แต่มีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสองปัจจัยที่อุณหภูมิการหลอมละลายของการให้ความร้อนอีกครั้ง (melting temperature of reheating; T_m)

เมื่อพิจารณาผลของชนิด และปริมาณสารเจือปนอาหารต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสรานชิชันของเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหารทุกชนิดและความเข้มข้นที่ทำการทดลอง พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยมีอุณหภูมิกลาสรานชิชันในช่วงอุณหภูมิ -6.12 ถึง -7.79 องศาเซลเซียส และค่าเอนทัลปีในช่วง 111.90 ถึง 157.60 จูลต่อกรัม โดยทั้งชนิดและความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารที่ทำการทดลองในครั้งนี้ มีผลกระทบต่ออุณหภูมิการหลอมละลาย พบว่าการเติมไฮเมทอกซีเพกทินร้อยละ 0.6 ต้องการอุณหภูมิสูงกว่าในการหลอมละลายน้ำแข็ง เท่ากับ 1.29 องศาเซลเซียส โดยแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) กับเจลตัวอย่างเจลสตาร์ชที่เติมกัม ร้อยละ 0.2 ถึง 0.6 และตัวอย่างเจลสตาร์ชที่เติมทรีฮาโลส ร้อยละ 0.6 ช่วยลดอุณหภูมิการหลอมละลาย ($T_m = 0.58$ องศาเซลเซียส) เนื่องจากสารทรีฮาโลสเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (low molecular weight) เช่นเดียวกับน้ำตาลชนิดอื่น เช่น กลูโคส ซูโครส และมอลโตส ดังนั้นจึงส่งผลให้อุณหภูมิการหลอมละลายของน้ำแข็งลดลง (Wang and Jane 1994)

2.4 ผลของการศึกษาผลกระทบจากการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบของเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหาร

2.4.1 ผลการวิเคราะห์การจับของเหลวออกจากเจลของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหาร หลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ ผลการวิเคราะห์การจับของเหลวออกจากเจล หลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ พบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมกันของสองปัจจัยที่ทำการศึกษาระหว่างชนิดและปริมาณสารเจือปนอาหารที่เติมในเจลสตาร์ชจากข้าว เช่นเดียวกันผลต่อปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัย พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) (ตารางที่ 17) อาจเกิดจากความเข้มข้นของเจลสตาร์ชจากข้าวที่ทำการศึกษานี้มีความเข้มข้นสูง คือ ร้อยละ 30 ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง ดังนั้นอาจส่งผลให้การจับของเหลวออกจากเจลค่อนข้างยาก เพราะว่าน้ำที่แยกออกมาเป็นส่วนนี้น้ำอิสระ (free water) อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่ำจากตัวอย่างเจลจากสตาร์ชมันเทศ ความเข้มข้นร้อยละ 6.4 เติมกัม (alginate, K-carrageenan, CMC, curdian, gellan, guar gum, gum arabic, locust bean gum และ xanthan gum) ร้อยละ 0.6 หลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ พบว่าการเติม K-carrageenan, curdian, gellan ทำให้ร้อยละการจับของเหลวออกจากเจลเพิ่มขึ้น โดยสูงกว่าตัวอย่างเจลที่ไม่เติมกัม แต่การเติม alginate, CMC,

guar gum, gum arabic, locust bean gum และ xanthan gum ช่วยให้การจับของเหลวออกจากเจลลดลงและต่ำกว่าตัวอย่างเจลที่ไม่เติมกัม โดยกัมทำให้ร้อยละการจับของเหลวออกจากเจลดำที่สุดเท่ากับ 21.8 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Lee and others 2002) อาจเนื่องจากคุณสมบัติของกัมที่มีความสามารถในการจับน้ำไว้ในโครงสร้างและมีความสามารถทนต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง (Wielinga 2000) ดังนั้นจะเห็นว่าผลการคืนรูปจากเยือกแข็งต่อร้อยละการจับของเหลวออกจากเจล ขึ้นกับความเข้มข้นของเจล ชนิดและปริมาณของสารเจือปนอาหาร

ตารางที่ 17 ผลของชนิดและปริมาณความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารในเจลสตาร์ชจากข้าวต่อการจับของเหลวออกจากเจล จากการคืนรูปจากเยือกแข็ง จำนวน 5 รอบ

ชนิดและปริมาณของสารเจือปนอาหาร (ร้อยละ)		การจับของเหลวออกจากเจล (ร้อยละ)
CNT1 (control)		2.26±0.31
CNT1+ Alginate	0.2	2.55±0.46
	0.4	2.73±0.80
	0.6	2.19±0.18
CNT1+ Guar gum	0.2	2.58±0.52
	0.4	2.42±0.46
	0.6	2.32±0.41
CNT1+ High methoxy pectin	0.2	2.19±0.13
	0.4	2.52±0.33
	0.6	2.40±0.32
CNT1+ Trehalose	0.2	2.19±0.09
	0.4	2.13±0.03
	0.6	2.86±0.49
Pr>F = P value of the F test		0.29

หมายเหตุ a,b...ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) และจากการทดลอง 3 ซ้ำ (CNT1 = ชัยนาท1)

2.4.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เต็มและเต็มสารเจือปนอาหาร หลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง จำนวน 5 รอบของเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เต็มและเต็มสารเจือปนอาหารในปริมาณที่แตกต่างกัน จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสเจลสตาร์ชจากข้าวดังนี้ (1) เจลสตาร์ชสด (fresh gel) (2) เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง จำนวน 5 รอบ และให้ความร้อนอีกครั้ง (Freeze-thaw 5 cycles and reheat gels) และ (3) เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง จำนวน 5 รอบ และไม่ให้ความร้อน (Freeze-thaw 5 cycles without reheat) หลังจากนั้นทำการวัดค่าความแข็งที่แรงกดร้อยละ 15 และ 70

จากผลการทดสอบค่าความแข็งที่แรงกดร้อยละ 15 ของ (1) เจลสตาร์ชสด (2) เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง จำนวน 5 รอบ และให้ความร้อนอีกครั้ง และ (3) เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง จำนวน 5 รอบและไม่ให้ความร้อน พบว่ามีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสองปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ชนิดและปริมาณสารเจือปนอาหาร แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ค่าความแข็งที่วัดได้แสดงดังในตารางที่ 18 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลสตาร์ชสด (fresh gel) กับ Freeze-thaw 5 cycles and reheat gel จะเห็นว่าค่าความแข็งของ Freeze-thaw 5 cycles and reheat gel ลดลง และค่าความแข็งที่ลดลงแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของสารเจือปนอาหาร กล่าวคือการเติมกัวกัม จะให้เจลสตาร์ชที่นุ่มกว่าการเติมอัลจินต ไสเมทอกซีเพกทินและทรีฮาโลส เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงความแข็งของเจลสตาร์ช พบว่าการเติมกัวกัมร้อยละ 0.2 ถึง 0.4 มีการเปลี่ยนแปลงความแข็งน้อยกว่าทุกตัวอย่างที่ทำการศึกษาเพราะการใช้แรงกดร้อยละ 15 ในการวัดเจลสตาร์ชเป็นการวัดเพื่อต้องการทราบถึงลักษณะเนื้อสัมผัสที่ผิวหน้าของเจล จะเห็นว่าผลการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบและให้ความร้อนอีกครั้งของเจลสตาร์ชจากข้าวที่เติมกัวกัมหรืออัลจินต ช่วยในการจับน้ำไว้ในโครงสร้างเจล แต่การเติมไฮเมทอกซีเพกทินและทรีฮาโลส ทำให้เจลสตาร์ชมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างเจลสตาร์ชถูกทำลายในระหว่างการคืนรูปจากเยือกแข็ง ส่งผลให้น้ำถูกขับออกนอกเซลล์และสารทั้งสองชนิดไม่สามารถจับน้ำไว้ในโครงสร้างเจล

ตารางที่ 18 ผลของการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบของเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหารต่อค่าความแข็งโดยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) ที่แรงกดร้อยละ 15 ของความหนาเจลสตาร์ช

Type and concentration of food additives (%)		Hardness (g force)			
		Fresh gels	Freeze-thaw and reheat gels	Change of hardness (%)	Freeze-thaw without reheat
CNT1		78.93ab	96.86ab	22.72	1347.01bc
CNT1+Alginate	0.2	72.13bcd	100.17ab	38.87	1394.24b
	0.4	62.92de	70.32cd	11.76	937.97e
	0.6	64.18de	68.95cd	7.43	642.64hg
CNT1+Guar Gum	0.2	67.35cd	65.01cd	-3.47	1067.43d
	0.4	56.20e	58.99d	4.96	737.64fg
	0.6	54.21e	60.99d	12.51	572.60hi
CNT1+HMP	0.2	80.77ab	100.07ab	23.90	531.84i
	0.4	75.94bc	99.42ab	30.92	1420.02b
	0.6	77.14abc	95.84ab	24.24	1536.97a
CNT1+Trehalose	0.2	87.30a	81.96bc	6.12	756.63f
	0.4	67.12cd	100.01ab	49.00	1375.39b
	0.6	77.14abc	113.64a	47.32	1243.13c
Pr>F		0.0296	<.0001	-	<.0001

หมายเหตุ a,b....ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) และจากการทดลอง 3 ซ้ำ (CNT1= ซัมนาท1, HMP = ไฮเมทอกซีเพกทิน และ Pr>F = P value of the F test)

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหาร วัดค่าความแข็งที่แรงกดร้อยละ 70 เป็นการวัดเพื่อทำลายโครงสร้างเจล โดยศึกษาเจลสตาร์ชจากข้าว 3 ลักษณะดังนี้ (1) เจลสตาร์ชสด (2) เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง จำนวน 5 รอบ และให้ความร้อนอีกครั้ง และ (3) เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง จำนวน 5 รอบและไม่ให้ความร้อน พบว่ามีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสองปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ชนิดและปริมาณสารเจือปนอาหาร โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ค่าความแข็งที่วัดได้แสดงดังในตารางที่ 19 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Fresh gel กับ Freeze-thaw and reheat gels ผลของค่าความแข็งมีแนวโน้มทิศทางเดียวกับการทดสอบที่แรงกดร้อยละ 15 (ตารางที่ 18) โดยเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เติมสารเจือปนอาหารให้เจลที่มีความแข็งสูงสุด แม้ว่าจะมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงความแข็งต่ำสุด ชนิดของสารเจือปนช่วยให้ความแข็งของเจลลดลงแตกต่างกัน และปริมาณสารเจือปนอาหารทุกชนิดที่เพิ่มขึ้น จะไปช่วยให้ความแข็งลดลง การทดสอบโดยแรงกดร้อยละ 70 เป็นตรวจวัดความแข็งของโครงสร้างภายในเจลสตาร์ช โดยเจลสตาร์ชที่เติมทรีฮาโลสเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งใกล้เคียงกับตัวควบคุมจะเห็นว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แสดงว่าโครงสร้างเจล (network structure of gel) ไม่สามารถจับน้ำไว้ในโครงร่างเจลสตาร์ชจากข้าว

ตารางที่ 19 ผลของการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบของเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหารต่อค่าความแข็งโดยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) ที่แรงกดร้อยละ 70 ของความหนาเจลสตาร์ช

Type and concentration of food additives (%)		Hardness (g force)			
		Fresh gels	Freeze-thaw and reheat gels	Change of hardness (%)	Freeze-thaw without reheat
CNT1		745.42 a	747.13a	0.23	2279.4a
CNT1+Alginate	0.2	575.83bc	592.15c	2.83	2043.1abc
	0.4	392.66d	329.54g	-16.07	1001.6fg
	0.6	308.80ed	285.65h	-7.5	827.5g
CNT1+Guar Gum	0.2	550.20c	373.74f	-32.07	1370.0def
	0.4	339.91ed	283.98h	-16.45	951.0fg
	0.6	270.50e	251.08h	-7.18	899.0g
CNT1+HMP	0.2	663.49abc	623.99c	-5.95	1722.0bcd
	0.4	645.50abc	613.92c	-4.89	1615.7cde
	0.6	544.96c	456.62e	-16.21	1998.1abc
CNT1+Trehalose	0.2	677.20ab	534.13d	-21.13	1232.6efg
	0.4	359.47ed	635.33bc	76.74	2154.6ab
	0.6	356.03ed	673.37b	89.13	2084.6ab
Pr>F		0.0018	<.0001	-	<.0001

หมายเหตุ a,b....ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) และจากการทดลอง 3 ซ้ำ (CNT1=ชันนาท1, HMP = ไฮเมทอกซีเพกทิน และ Pr>F = P value of the F test)

2.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงเจลดาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เต็มและเต็มสารเจือปนอาหาร ระยะเวลาการเก็บ 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน

2.5.1 ผลการจับของเหลวออกจากเจลดของเจลดาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เต็มและเต็มสารเจือปนอาหาร ระยะเวลาการเก็บ 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน

ผลของระยะเวลาการเก็บต่อการจับของเหลวออกจากเจลดระหว่างการเก็บเจลดาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าว จากการศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดของสารเจือปนอาหาร ปริมาณของสารเจือปนอาหาร และระยะเวลาการเก็บ พบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสามปัจจัย ($P>0.05$) แต่กลับพบว่ามีอิทธิพลร่วมกันระหว่างสองปัจจัยคือ ชนิดและปริมาณของสารเจือปนอาหาร แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) ดังนั้นจากผลอิทธิพลร่วมของสองปัจจัยหลักของชนิดกับปริมาณสารเจือปนอาหารต่อการจับของเหลวออกจากเจลดในเจลดาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าว (ตารางที่ 20) พบว่าเจลดาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวชัชนาท1 ที่เต็มชนิดและปริมาณสารเจือปนอาหารมีผลต่อการจับของเหลวออกจากเจลดระหว่างการเก็บ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) ดังนั้นการเติมอัลจินตและกัวกัม ร้อยละ 0.2 ถึง 0.6 ไฮเมทอกซีเพกทิน ร้อยละ 0.2 ทรีฮาโลส ร้อยละ 0.2 ถึง 0.4 เกิดการจับของเหลวออกจากเจลด แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แต่การเติมไฮเมทอกซีเพกทิน ร้อยละ 0.4 ถึง 0.6 และทรีฮาโลส ร้อยละ 0.6 มีการจับของเหลวออกจากเจลดสูงสุด อยู่ในช่วงร้อยละ 2.53 ± 0.10 ถึง 2.58 ± 0.14 และทรีฮาโลสร้อยละ 0.2 มีการจับของเหลวออกจากเจลดต่ำสุด เท่ากับ ร้อยละ 2.08 ± 0.17 จากผลของระยะการเก็บ (ปัจจัยที่ 3) ในตารางที่ 20 พบว่าหลังจากเก็บเจลดาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวไว้นาน 15 วัน เกิดการจับของเหลวออกจากเจลดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และ ที่การเก็บนาน 45 วัน มีร้อยละการจับของเหลวออกจากเจลด เท่ากับ 2.40 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$)

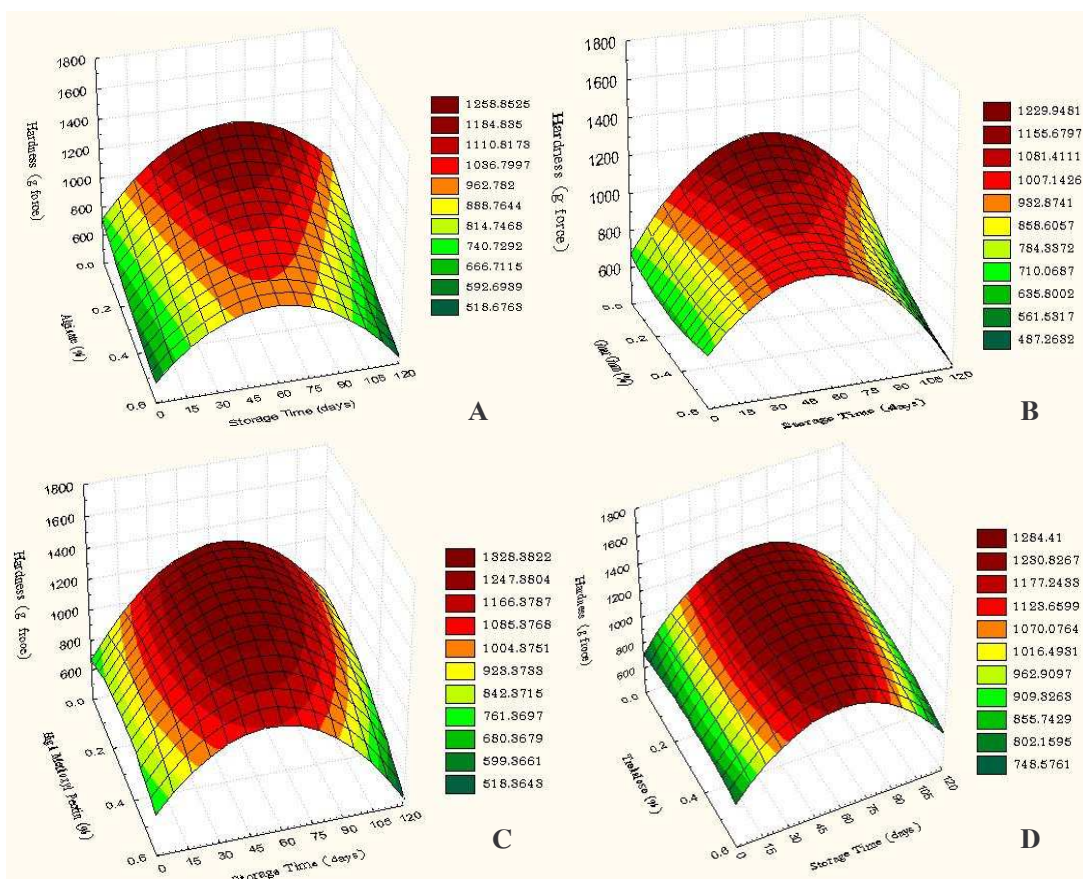
ตารางที่ 20 ผลของการเปลี่ยนแปลงการจับของเหลวออกจากเจลในเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง จากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหารของสองปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ชนิดและปริมาณสารเจือปนอาหาร ระยะเวลาการเก็บขณะแช่เยือกแข็ง 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน

Type and concentration of food additives (%)		Storage time (days)	Syneresis (%)
CNT1			2.24±0.10cd
CNT1+Alginate	0.2		2.25±0.17cd
	0.4		2.32±0.10bcd
	0.6		2.19±0.10cde
CNT1+Guar Gum	0.2		2.33±0.12bc
	0.4		2.33±0.14bc
	0.6		2.28±0.12cd
CNT1+High Methoxyl Pectin	0.2		2.16±0.11de
	0.4		2.53±0.10a
	0.6		2.58±0.14a
CNT1+Trehalose	0.2		2.08±0.17e
	0.4		2.16±0.12cde
	0.6		2.45±0.26ab
Pr>F = P value of the F test		<.0001	
		1	2.30ab
		15	2.18b
		30	2.23ab
		45	2.39a
		60	2.24ab
		90	2.36a
		120	2.32ab
Pr>F = P value of the F test		0.0474	

หมายเหตุ a,b....ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$) และจากการทดลอง 3 ซ้ำ (CNT1=ชัณนาท 1)

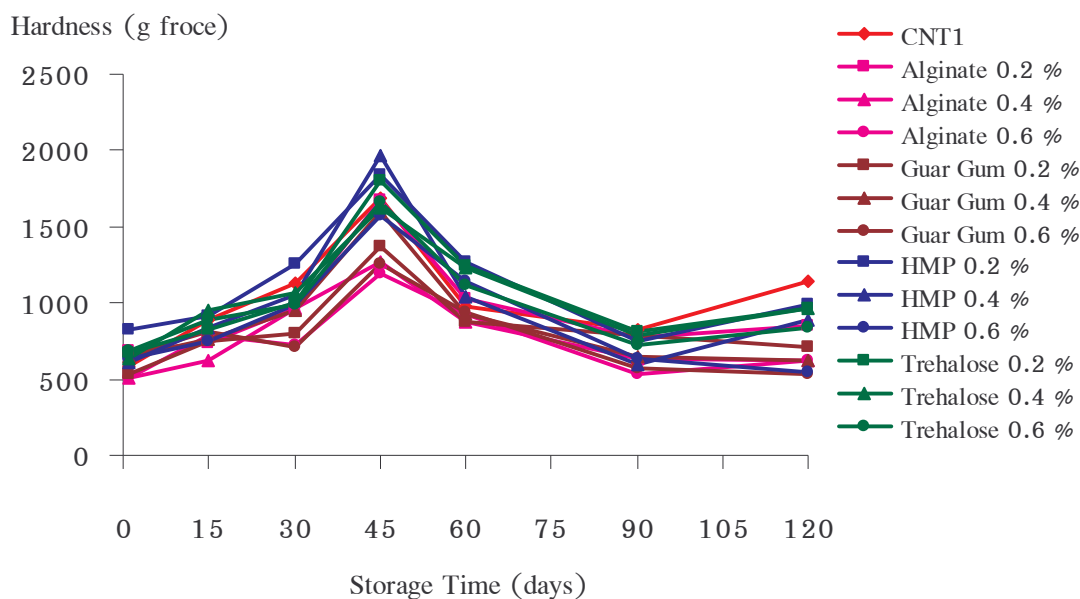
2.5.2 ผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหาร ระยะเวลาการเก็บ 1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน

(1) ผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหาร ทำการทดสอบความแข็งที่แรงกดร้อยละ 15



ภาพที่ 23 ผลของความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารต่อเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าว และทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง วัดความแข็งที่แรงกดร้อยละ 15 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (A = อัลจินต, B = กัวกัม, C = ไฮเมทอกซีเพกทิน, D = ทรีฮาโลส)

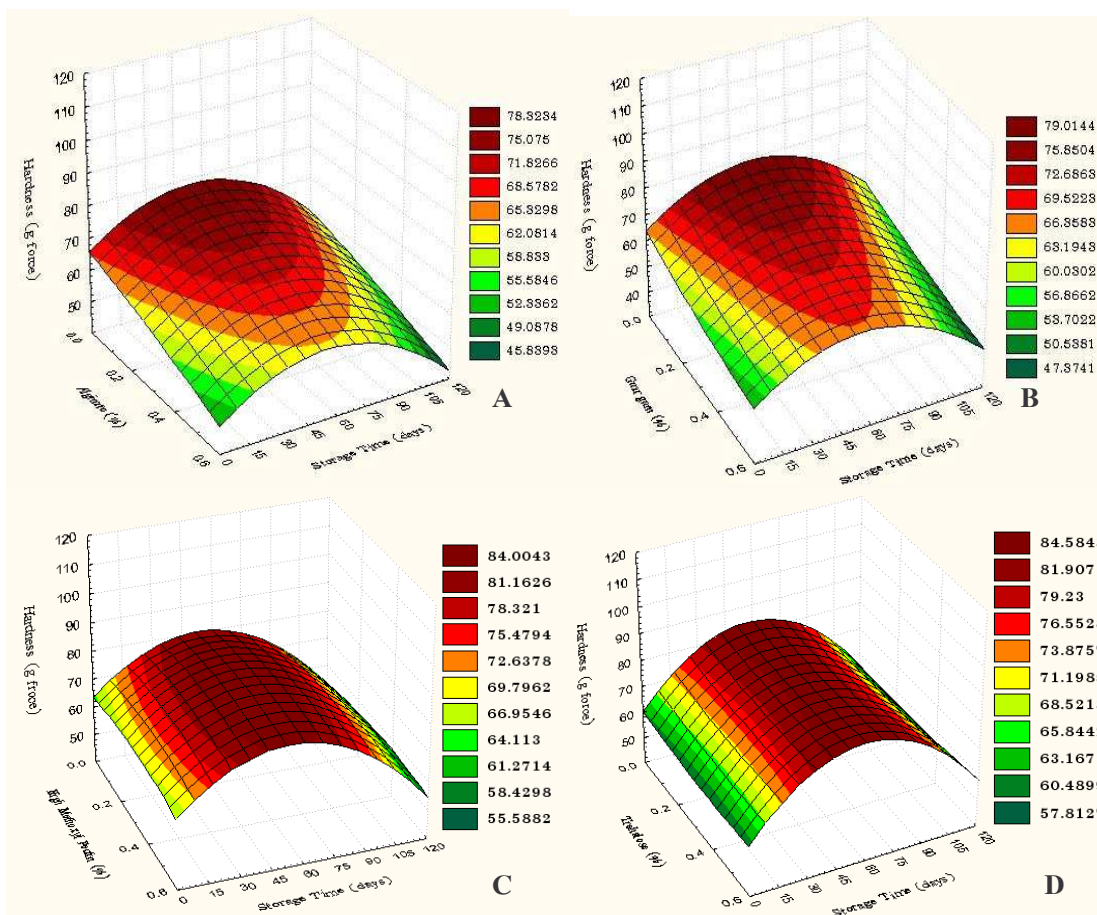
ผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหาร ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งและไม่ให้ความร้อน (Freeze-thaw without reheat) ทดสอบความแข็งที่แรงกดร้อยละ 15 จากปัจจัยในการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดสารเจือปนอาหาร ปริมาณสารเจือปนอาหาร และระยะเวลาการเก็บ (1 15 30 45 60 90 และ 120 วัน) พบว่ามีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสามปัจจัย แสดงดังในภาพที่ 23 (A) (B) (C) (D) ผลการเติมสารเจือปนอาหาร (ถั่วกัม ไสเมทอกซีเพกทิน และทรีฮาโลส) ทุกระดับที่ทำการศึกษเปรียบเทียบกับเจลจากสตาร์ชข้าว จะเห็นว่าทำให้เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวมีความแข็งลดลงแตกต่างกัน ผลการเติมอัลจินต และถั่วกัม จะให้เจลสตาร์ชที่มีความนุ่มมากกว่าการเติมทรีฮาโลสและไสเมทอกซีเพกทิน และจากการทดสอบที่แรงกดร้อยละ 15 แสดงให้เห็นว่าผิวหน้าของเจลที่เติมอัลจินตและถั่วกัมในทุกระดับ ให้ลักษณะผิวหน้าเจลที่มีความนุ่มมากกว่าการเติมทรีฮาโลสและไสเมทอกซีเพกทิน จากการเติมสารเจือปนอาหารในปริมาณเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.0 ถึง 0.6 พบว่าปริมาณสารเจือปนอาหารเพิ่มขึ้น ทำให้เจลมีความแข็งลดลง จากภาพที่ 19 (A) (B) (C) (D) เมื่อเก็บเจลสตาร์ชทุกตัวอย่างไว้นาน 120 วัน จะเห็นว่าเจลสตาร์ชทุกตัวอย่างจากการเก็บที่ 1 วัน เจลสตาร์ชมีแนวโน้มให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น จนกระทั่งระยะเวลาการเก็บ 45 วัน มีค่าความแข็งสูงสุดและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แล้วเมื่อทำการเก็บเจลแช่เยือกแข็งนานขึ้นจาก 45 วัน จนถึง 120 วัน ความแข็งลดลง และจากการทดสอบพบว่าเจลสตาร์ชจากข้าวแช่เยือกแข็งเติมอัลจินตร้อยละ 0.6 มีค่าความแข็งต่ำสุด เท่ากับ 1191 กรัมแรง ดังนั้น จะเห็นว่าเจลสตาร์ชที่เติมสารเจือปนอาหาร หลังจากทำการเก็บที่ 45 วัน ถึง 120 วัน ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แต่ตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่เติมสารเจือปนอาหาร พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีความนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) และมีจุดวิกฤติการแช่เยือกแข็งที่ 45 วัน เช่นเดียวกันกับเจลที่เติมสารเจือปน อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลการเก็บที่ 1 วัน กับที่ 120 วัน พบว่าการเติมสารเจือปนอาหารทุกชนิดและระดับ ที่ทำการศึกษาให้ค่าความแข็งใกล้เคียงกันกับเจลสด และแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ยกเว้นเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เติมสารเจือปนอาหาร พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และการเก็บที่ 120 วัน มีค่าความแข็งสูงสุด นอกจากนี้เจลสตาร์ชที่ 120 วัน ถ้ามีการเติมสารเจือปนอาหารในปริมาณเพิ่มขึ้น จะให้เจลสตาร์ชที่มีความแข็งลดลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าผิวหน้าของเจลมีความนุ่มเพิ่มขึ้น จากการศึกษาเจลแช่เยือกแข็ง หลังการหลอมละลาย และทดสอบความแข็งของเจลที่แรงกดร้อยละ 15 พบว่าเจลจะเริ่มมีค่าความแข็งสูงสุดในช่วงระยะเวลาการเก็บ 30 ถึง 60 วัน และเจลทุกตัวอย่างจากการทดสอบจะเห็นว่าอายุการเก็บที่ 45 วัน เป็นเวลาวิกฤติของการแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ช (the critical time of frozen gels) (ภาพที่ 24)



ภาพที่ 24 ผลของระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง วัดความแข็งที่แรงกดร้อยละ 15 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (CNT1= ชัยนาท1, HMP = ไฮเมทอกซีเพกทิน)

ผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหารของเจลสตาร์ชที่ให้ความร้อนอีกครั้งโดยเปรียบเทียบกับเจลสด ทำการทดสอบที่แรงกดร้อยละ 15 จากปัจจัยในการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดสารเจือปนอาหาร ปริมาณสารเจือปนอาหาร และระยะเวลาการเก็บ พบว่ามีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสามปัจจัย แสดงดังในภาพที่ 25 (A) (B) (C) (D) เมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดสารเจือปนอาหาร จะเห็นว่าการเติมอัลจินตจะให้เจลสตาร์ชที่มีความนุ่มกว่าการเติมกัวกัม ไฮเมทอกซีเพกทินและทรีฮาโลส อาจเป็นเพราะอัลจินตเป็นสาร thermally irreversible gelling agents และมีความคงตัวขณะได้รับความร้อน (heat stable) (Draget 2000) และกัวกัมซึ่งมีโครงสร้างของ $\beta(1\rightarrow4)$ D-mannan สามารถเกิดรูปผลึกที่คงตัวได้ (stable crystalline regions) (Fox 1992) จากผลการศึกษาการเติมสารเจือปนอาหารที่ พบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชจากข้าวเพิ่มขึ้นจาก 1 วัน ถึง 45 วัน เจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหาร มีแนวโน้มให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและสูงสุดที่ 45 วัน โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) หลังจากนั้นค่าความแข็งลดลงและลดลงจนกระทั่งการเก็บที่ 120 วัน จากการเปรียบเทียบการเก็บที่ 0 (เจลสด) กับ 120 วัน และ 1 กับ 120 วัน พบว่าค่าความแข็งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) จะเห็นว่าเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวไม่เติมและเติมสารเจือปนอาหาร วัดค่าความแข็ง ด้วยแรงกดร้อยละ 15 ได้ว่าอายุการเก็บที่ 45

วัน เป็นเวลาวิกฤติของการแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ช์ (the critical time of frozen gels) (ภาพที่ 26) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบเจลไม่เติมสารเจือปนอาหารและเจลที่เติมสารเจือปนอาหาร พบว่าเจลที่ไม่เติมสารเจือปนอาหาร ให้เจลที่มีความแข็งมากกว่าเจลที่เติมสารเจือปนอาหาร แสดงให้เห็นว่าการเติมสารเจือปนอาหารช่วยให้เจลมีคงตัวได้ดีระหว่างการเก็บ (Mandala 1992)

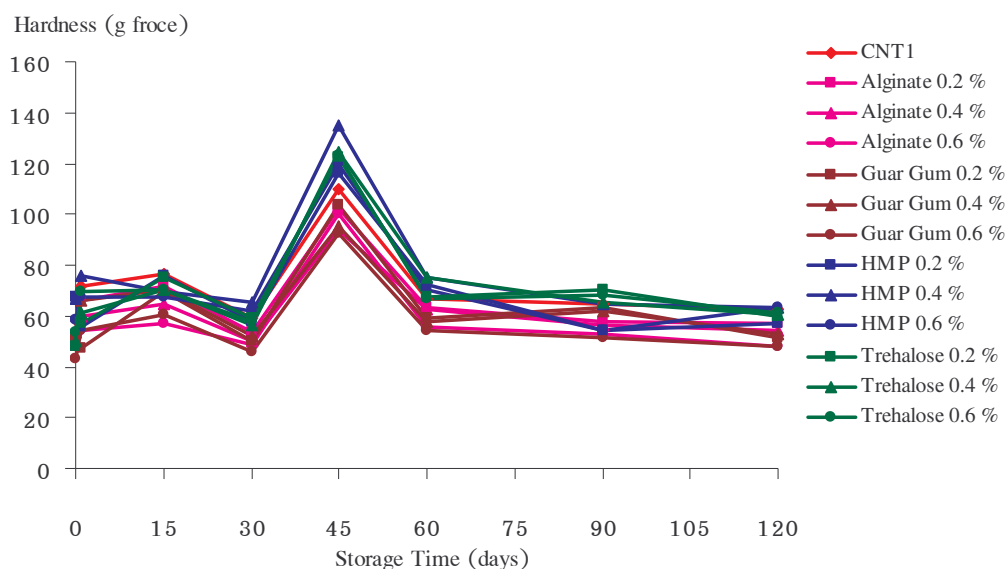


ภาพที่ 25 ผลของความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารต่อเจลสตาร์ช์แช่เยือกแข็งจากข้าว

ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง วัดความแข็งที่แรงคร้อยละ 15

ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (A = อัลจินต, B = กัวกัม,

C = ไฮเมทอกซีเพกทิน, D = ทรีฮาโลส)

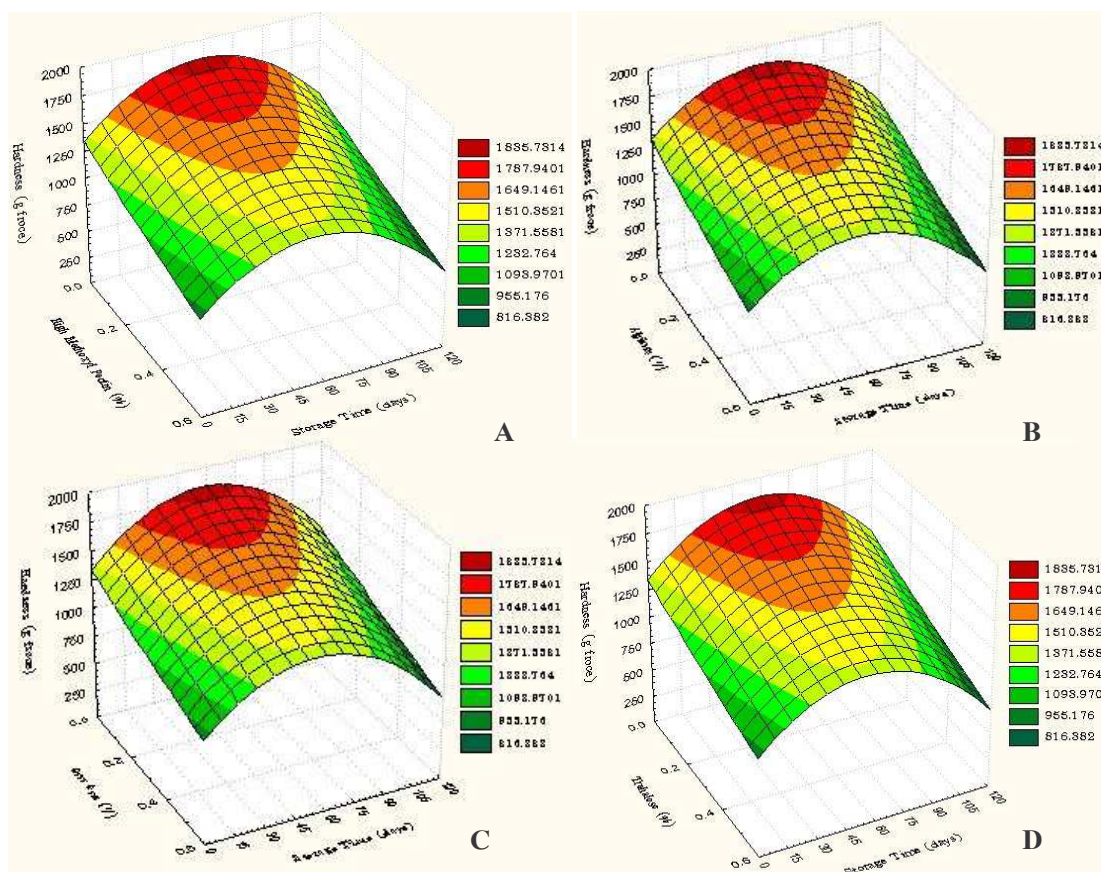


ภาพที่ 26 ผลของระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง และให้ความร้อนอีกครั้ง วัดความแข็งที่แรงกดร้อยละ 15 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (CNT1= ชัยนาท1, HMP = ไฮเมทอกซีเพกทิน)

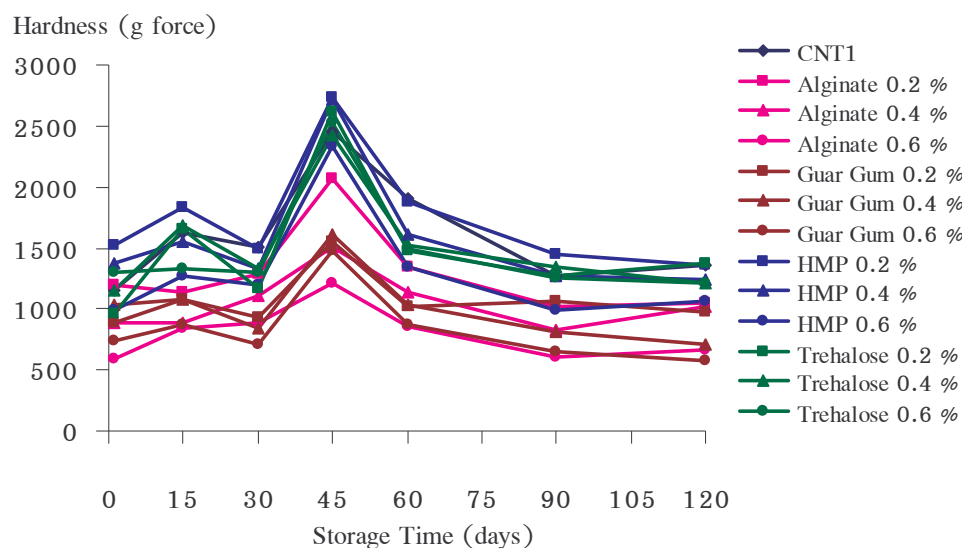
(2) ผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เค็ม และเติมสารเจือปนอาหาร ทำการทดสอบความแข็งที่แรงกดร้อยละ 70

จากการวัดตัวอย่างเจลสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งและทดสอบแรงกดที่ร้อยละ 70 จากปัจจัยในการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดสารเจือปนอาหาร ปริมาณสารเจือปนอาหาร และระยะเวลาการเก็บ พบว่ามีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสามปัจจัย ดังนั้นปัจจัยที่ทำการศึกษทั้งสามปัจจัยมีผลกระทบต่อค่าความแข็งที่วัดได้แตกต่างกัน จากภาพที่ 27 (A) (B) (C) (D) การเก็บตัวอย่างเจลสตาร์ชตลอดระยะเวลาการเก็บ 120 วัน พบว่าการเติมสารเจือปนอาหารทุกระดับและตัวอย่างเจลสตาร์ชที่ไม่ได้เติมสารเจือปนอาหาร จากการเก็บที่ 1 วัน มีค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งระยะเวลาเก็บที่ 45 วัน จะให้ค่าความแข็งสูงสุด แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) หลังจากการเก็บที่ 45 วัน ค่าความแข็งจะมีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาการเก็บ เมื่อเปรียบเทียบเจลสตาร์ชที่ 1 วัน กับ 120 วัน จะเห็นว่าเจลสตาร์ชที่ 120 วัน มีค่าความแข็งสูงกว่าเจลสตาร์ชที่ 1 วัน และที่อายุการเก็บ 120 วัน เปรียบเทียบเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เติมสารเจือปนอาหาร เจลสตาร์ชที่เติมไฮเมทอกซีเพกทินร้อยละ 0.2 เจลสตาร์ชที่เติมทรีฮาโลสร้อยละ 0.2 พบว่ามีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบชนิดสารเจือปนอาหาร พบว่าการเติมอัลจินตและกัวกัม มีค่าความแข็งต่ำกว่าการเติมไฮเมทอกซีเพกทินและทรี

ฮาโลส จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเจลสตาร์ชเช่นเดียวกันกับการทดสอบที่แรงกดร้อยละ 15 และอายุการแช่เยือกแข็งที่ 45 วัน เป็นเวลาวิกฤติของการแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ช (the critical time of frozen gels) (ภาพที่ 28) หลังจากนั้นเจลทุกตัวอย่างที่ทำการศึกษาให้ค่าความแข็งลดลง ซึ่งอาจมีสาเหตุจากโครงสร้างเจลเริ่มเสื่อมสภาพ (Mandala and others 2002)



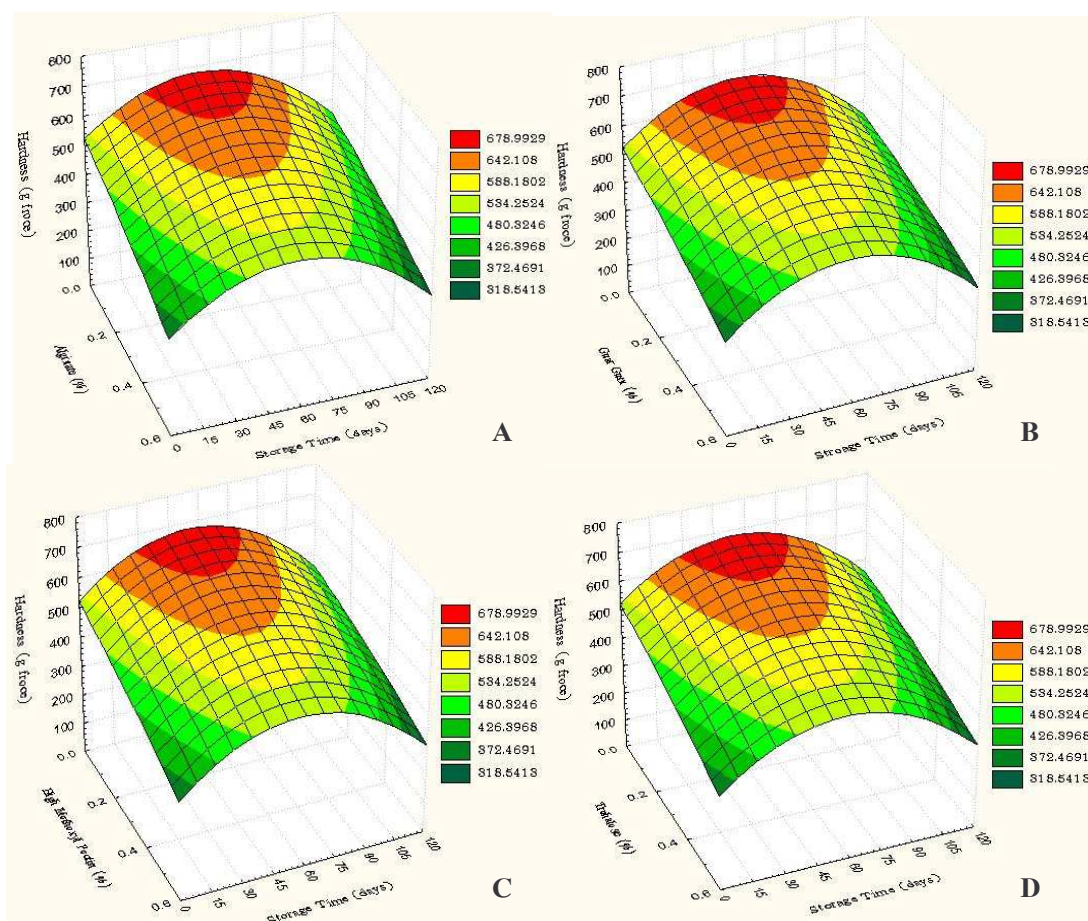
ภาพที่ 27 ผลของความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารต่อเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าว และทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง วัดความแข็งที่แรงกดร้อยละ 70 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (A = อัลจินต, B = กัวกัม, C = ไฮเมทอกซีเพกทิน, D = ทรีฮาโลส)



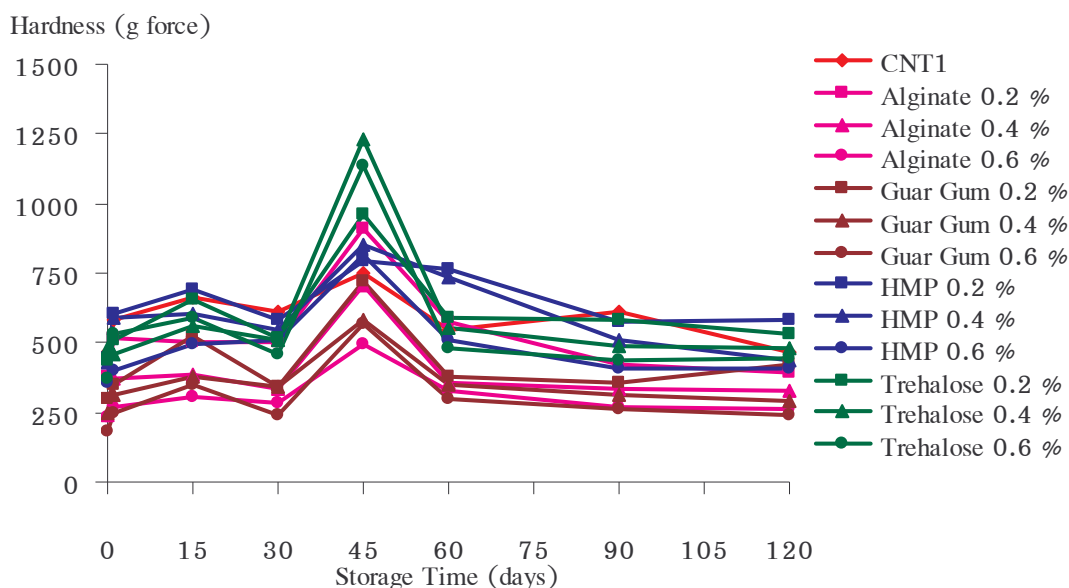
ภาพที่ 28 ผลของระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง วัดความแข็งที่แรงกดร้อยละ 70 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (CNT1= ชัยนาท1, HMP = ไฮเมทอกซีเพกทิน)

จากภาพที่ 29 (A) (B) (C) (D) ผลของความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารต่อเจลแซ่เยือกแข็ง ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง การวัดด้วยค่าแรงกดร้อยละ 70 จากปัจจัยในการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดสารเจือปนอาหาร ปริมาณสารเจือปนอาหาร และระยะเวลาการเก็บ พบว่ามีอิทธิพลร่วมกันของทั้งสามปัจจัย การเติมอัลจินตทุกระดับ (ร้อยละ 0.2 ถึง 0.6) ช่วยให้ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชลดลงต่ำกว่าเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เติมอัลจินต ผลของระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชทุกตัวอย่าง พบว่าระยะเวลาการเก็บนานขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและลดลงต่างกัน โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ผลของระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าวที่ไม่เติมและเติมอัลจินตร้อยละ 0.2 ถึง 0.6 จากการเก็บที่ 0 วัน ถึง 45 วัน มีความแข็งเพิ่มขึ้น แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และมีค่าความแข็งสูงสุด หลังจากนั้นค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง จนกระทั่งระยะเวลาการเก็บที่ 120 วัน แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ทั้งนี้ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชจากข้าวที่ไม่เติมและเติมอัลจินต กัวกัมและไฮเมทอกซีเพกทินทุกระดับ การเก็บแซ่เยือกแข็งที่ 0 วัน (เจลสด) และ 120 วัน พบว่าค่าความแข็งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) อาจเนื่องจากคุณสมบัติของอัลจินต กัวกัมและไฮเมทอกซีเพกทิน มีลักษณะเจล แบบ physical hydrogels คือโมเลกุลที่จับกันในโครงร่างของเจล มีการจับกันอย่างไม่มีระเบียบ (molecular entanglements) ดังนั้นหลังการเกิด

อันตรกิริยากับแอมิโลส เจลแบบนี้จะมีลักษณะผันกลับได้ (reversible) และสามารถถูกทำให้เกิดการแตก (disrupt) โดยอุณหภูมิ (Hoffman n.d)



ภาพที่ 29 ผลของความเข้มข้นของสารเจือปนอาหารต่อเจลแซ่เยือกแข็ง ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง วัดความแข็งที่แรงกดร้อยละ 70 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (A = อัลจินต, B = กวักม, C = ไฮเมทอกซีเพกทิน, D = ทรีฮาโลส)



ภาพที่ 30 ผลของระยะเวลาการเก็บเจลสตาร์ชแซ่เยือกแข็งจากข้าว ทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง และให้ความร้อนอีกครั้ง วัดความแข็งที่แรงกดร้อยละ 70 ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (TA-XT2) (CNT1= ชัยนาท1, HMP = ไฮเมทอกซีเพกทิน)

เมื่อพิจารณาผลการเติมทรีฮาโลสทุกระดับ พบว่าเจลสดมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน และค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนกระทั่งการเก็บที่ 45 วัน ให้ค่าความแข็งสูงสุด แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยเจลสดมีความแข็งสูงกว่าเจลสตาร์ชที่เติมอัลจินต กวักกัมและไฮเมทอกซีเพกทิน หลังจากนั้นเจลที่เติมทรีฮาโลสความแข็งมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณทรีฮาโลสจากร้อยละ 0.2 ถึง 0.6 จะส่งผลให้เจลมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหลังจากการเก็บที่ 45 วัน ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งถึง 120 วัน ถ้าเปรียบเทียบระหว่างเจลสดและเจลแซ่เยือกแข็งที่เก็บ 120 วัน พบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ยกเว้นเจลที่เติมกวักกัม ไฮเมทอกซีเพกทิน ทรีฮาโลส ร้อยละ 0.2 และเจลที่เติมอัลจินตร้อยละ 0.4 ที่มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และจากภาพที่ 30 จะเห็นว่าการเก็บที่ 45 วัน เป็นจุดวิกฤติของการแซ่เยือกแข็งเจลสตาร์ช

2.6 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (Correlation Analysis)

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดสุดท้าย ค่าการคืนตัว ค่าความแข็ง อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลลาทีไนซ์ (T_0) อุณหภูมิฟิค (T_p) อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการแช่เยือกแข็ง (T_{gp}) อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเจลแช่เยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง (T_g) โดยใช้ Pearson correlation coefficients ดังในตารางที่ 21 จะเห็นว่าค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าการคืนตัว มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างยิ่ง ($P \leq 0.001$) กับอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลลาทีไนซ์ อุณหภูมิฟิค อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเจลแช่เยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง ($r=0.99$) โดยอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลลาทีไนซ์มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างยิ่งกับอุณหภูมิฟิค ($r=0.99$) และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการแช่เยือกแข็ง ($r=0.99$) อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเจลแช่เยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง ($r=0.98$) จากผลของการทดสอบค่าความแข็งของเจลที่เดิมและไม่เดิมสารเจือปนอาหาร จะเห็นว่าเจลสดที่ใช้แรงกดร้อยละ 70 ของความหนาเจล มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างยิ่ง ($P \leq 0.001$) กับค่าความแข็งของเจลที่เก็บไว้นาน 30 และ 45 วัน ($r=0.86$ และ $r=0.66$ ตามลำดับ) นั่นคือการเก็บเจลที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเก็บนานขึ้นจาก 1 ถึง 45 วัน ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 21 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดสูงสุด ค่าความหนืดสุดท้าย ค่าการคืนตัว ค่าความแข็ง อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลลิตีไนซ์ (T_o) อุณหภูมิฟิค (T_p) อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการแช่เยือกแข็ง (T_{gf}) อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเจลแช่เยือกแข็งและให้ความร้อนอีกครั้ง (T_g) โดยใช้ Pearson correlation coefficients

	PV (RVU)	FV (RVU)	Setback (RVU)	Hardness (fresh) 15 %	Hardness (fresh) 70 %	Hardness (30days) 15 %	Hardness (30days) 70 %	Hardness (45days) 15 %	Hardness (45days) 70 %	T_o (°C)	T_p (°C)	T_{gf} (°C)	T_g (°C)
PV (RVU)	1.00												
FV (RVU)	0.99***	1.00											
Setback (RVU)	0.99***	0.99***	1.00										
Hardness (fresh) 15 %	-0.18	-0.18	-0.19	1.00									
Hardness (fresh) 70 %	0.05	0.04	0.02	0.47**	1.00								
Hardness (30days) 15 %	0.05	0.04	0.03	0.48**	0.69***	1.00							
Hardness (30days) 70 %	0.31	0.30	0.28	0.38*	0.86***	0.75***	1.00						
Hardness (45days) 15 %	0.29	0.28	0.25	0.21	0.66***	0.60***	0.67***	1.00					
Hardness (45days) 70 %	0.07	-0.58***	-0.34*	0.09	0.65***	0.48**	0.59***	0.67***	1.00				
T_o (°C)	0.99***	0.99***	0.99***	-0.21	0.05	0.07	0.34	0.32	0.05	1.00			
T_p (°C)	0.99***	0.99***	0.99***	-0.21	0.05	0.07	0.34	0.32	0.07	0.99***	1.00		
T_{gf} (freezing) (°C)	0.99***	0.99***	0.99***	-0.22	0.02	0.01	0.30	0.30	-0.04	0.99***	0.99***	1.00	
T_g (reheating) (°C)	0.98***	0.98***	0.98***	-0.16	0.04	0.04	0.30	0.30	-0.11	0.98***	0.98***	0.98***	1.00

หมายเหตุ * แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$), ** แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ($P \leq 0.01$) และ *** แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99.99 ($P \leq 0.001$) (PV=ค่าความหนืดสูงสุด, FV=ค่าความหนืดสุดท้าย)

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

สตาร์ชจากข้าวกลุ่มแอมิโลสสูงมีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงกว่าสตาร์ชจากข้าวแอมิโลสต่ำและปริมาณแอมิโลส มีผลต่อคุณสมบัติการเกิดเจลที่ไนซ์และความหนืด โดยสตาร์ชจากข้าวแอมิโลสสูง ให้ความหนืดสูงสุดและค่าการแตกตัวต่ำสุด และมีความหนืดสุดท้ายและค่าการคืนตัวสูงสุด ซึ่งอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลที่ไนซ์ ไม่ได้ขึ้นกับปริมาณแอมิโลสเพียงอย่างเดียว สอดคล้องกับอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลที่ไนซ์ จากการวัดด้วยเครื่อง DSC ปริมาณน้ำในเจล สตาร์ชมีผลต่ออุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลที่ไนซ์ (T_g) และอุณหภูมิฟิค (T_p) ของการ ทำให้เจลสุก ปริมาณน้ำในเจลจากข้าวต่างสายพันธุ์ ไม่มีผลต่อค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการแช่เยือกแข็ง (T_{gf}) ซึ่งค่า T_{gf} ประมาณ -47 องศาเซลเซียส แต่การเพิ่มปริมาณน้ำในเจลมีผลให้อุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็ง (T_{cc}) เพิ่มขึ้น จากอุณหภูมิ -28.67 ไปที่ -17.09 องศาเซลเซียส การเพิ่มความร้อนให้กับเจลแช่เยือกแข็ง ทำให้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) อยู่ในช่วง T_g ช่วง -7.20 ถึง -8.09 อุณหภูมิการหลอมละลาย (T_m) ช่วง 0.10 ถึง -0.57 องศาเซลเซียส และค่าเอนทัลปี (ΔH) อยู่ในช่วง 67.25-124.91 จูลต่อกรัม ความนุ่มหรือความแข็งของเจลที่ผิวหน้า (ที่แรงกดร้อยละ 15 ของความหนาเจล) พบว่าเจลจากข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ ไม่มีผลต่อค่าความแข็งที่ผิวของเจลตลอดระยะเวลาการเก็บที่แช่เยือกแข็งถึง 120 วัน แต่เจลจากข้าวกลุ่มแอมิโลสปานกลางและสูง จะมีผลต่อความนุ่มที่ผิวหน้าต่างกันตามสายพันธุ์ โดยที่มีความแข็งที่สุดที่ระยะการเก็บแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 30 วัน หลังจากนั้นเจลมีความแข็งลดลง แต่เมื่อนำเจลไปให้ความร้อนอีกครั้งจะพบว่าความแข็งของเจลภายในพันธุ์เดียว ระยะเวลาการเก็บไม่แตกต่างกันแต่จะแตกต่างกันจากเจลแต่ละสายพันธุ์ แต่ถ้าพิจารณาความแข็งของเนื้อเจล (แรงกดร้อยละ 70 ของความหนาเจล) พบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความแข็งของเจลคล้ายกับแรงกดร้อยละ 15 ของความหนาเจล แต่ถ้าให้ความร้อนอีกครั้ง จะให้ค่าความแข็งที่แตกต่างจากความแข็งที่ผิว โดยความแข็งของเจลมีความแข็งสูงสุด เมื่อเก็บที่การแช่เยือกแข็ง 15 วัน หลังจาก 15 วัน จนถึง 120 วัน ค่าความแข็งจะคงที่หรือลดลง ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวของกลุ่มแอมิโลสปานกลางและแอมิโลสสูง โดยที่ข้าวในกลุ่มแอมิโลสสูงมี 2 พันธุ์ คือ ชัยนาท1และเหลืองประทิว123 มีความแข็งของเจลสูงสุดที่ 15 วันและไม่แตกต่างกับการเก็บที่ 120

เจลที่มีส่วนผสมของสารเจือปนอาหารชนิดต่าง ๆ คือ อัลจินต กัวกัม ไฮเมทอกซีเพกทิน และทรีฮาโลส ที่ระดับร้อยละ 0.2 0.4 และ 0.6 มีคุณสมบัติความหนืดและการเกิดเจลที่ไนซ์แตกต่างกัน การเติมอัลจินต ช่วยเพิ่มอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของการแช่เยือกแข็งและอุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็งระหว่างการแช่เยือกแข็งให้กับเจลและการเติมทรีฮาโลสร้อยละ 0.6 ช่วยลดอุณหภูมิการหลอมละลายจากการเป็นน้ำแข็งของเจล ผลการเติมทรีฮาโลสร้อยละ 0.2 ในเจลจะให้

ความคงทนต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งมากที่สุด แต่อัลจินตและกัวกัมจะให้เจลที่มีการเปลี่ยนแปลงหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งน้อยที่สุด ส่วนระยะเวลาการเก็บเจลขณะแช่เยือกแข็งนั้น ทำให้ความแข็งของเจลทั้งที่เดิมและไม่เติมสารเจือปนอาหาร มีความแข็งเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 45 ถึง 90 วัน ซึ่งเป็นช่วงจุดวิกฤติทางด้านคุณภาพความแข็งของเจลแช่เยือกแข็ง และความแข็งจะลดลงหลังการเก็บที่ 90 วัน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่มีรูปแบบคล้ายกันของเจลที่เติมสารเจือปนอาหารทั้ง 4 ชนิด

ในเจลจากข้าวสาลีพันธุ์ต่าง ๆ นั้น ปริมาณเอมิโลสและค่าคุณลักษณะทางเพสต์ (paste) ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความหนืดแป็ง มีความสัมพันธ์อย่างยิ่งกับค่าเนื้อสัมผัส (ความแข็ง) ของเจลทั้งที่ผิวหน้าและเนื้อโดยรวมของเจลสด และเจลแช่เยือกแข็งที่ได้รับการให้ความร้อนอีกครั้ง ส่วนในเจลจากข้าวพันธุ์ชัยนาท1 ที่เติมสารเจือปนอาหารนั้น ค่าจากการวัดด้วยเครื่องวัดความหนืดแป็ง ไม่มีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัส (ความแข็ง) ของเจลสดและเจลแช่เยือกแข็งที่ให้ความร้อนอีกครั้ง อย่างไรก็ตามค่าจากเครื่องวัดความหนืดแป็งมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างยิ่งกับค่าที่วัดได้จากเครื่อง DSC (T_p , T_{gr} และ T_g) ยกเว้นค่า T_g ที่มีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่าการคืนตัว และค่า T_g ยังมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งของเจลที่ใช้แรงกดร้อยละ 15 และ 70 ของความหนาเจล ทั้งของเจลสดและเจลแช่เยือกแข็งจากข้าว

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. จากการศึกษาคุณสมบัติของเจลแซ่เยือกแข็งจากข้าว มีความสำคัญและสัมพันธ์อย่างยิ่งต่อคุณภาพของอาหารแซ่เยือกแข็งที่ใช้แป้งข้าวเป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งอาหารแซ่เยือกแข็งนั้นต้องมีการเก็บเกิน 3 เดือน จึงจะสามารถเป็นอาหารที่พัฒนาสู่อุตสาหกรรมและคุ้มค่าในเชิงการค้า แต่จากการศึกษาของนักวิจัยอื่น ๆ นั้น ได้ศึกษาระยะเวลาการเก็บรักษาเจลแซ่เยือกแข็งในระยะเวลาสั้นไม่เกิน 1 เดือน ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้ ทำให้ทราบความเปลี่ยนแปลงของคุณภาพในระหว่างการเก็บที่นานขึ้น และพบว่าผลการวิจัยนี้ได้ให้ผลที่มีการเปลี่ยนแปลงที่จะต้องศึกษาคิดตามต่อไปว่า เมื่อเก็บนานเกินกว่า 90 วันนั้น มีสาเหตุมาจากอะไร โดยอาจจะต้องศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุล เช่น ความยาวของสายโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ปริมาณการเพิ่มหรือลดของน้ำตาลโมเลกุลเล็ก และอื่น ๆ เป็นต้น

2. จากการศึกษาการเติมสารเจือปนอาหารชนิดต่าง ๆ ที่ระดับต่างกัน ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 นั้น ทำให้คุณสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัส (ความแข็ง) ที่ผิวหน้าและในเนื้อเจลต่างกัน ความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งและระยะเวลาการเก็บขณะแซ่เยือกแข็งนั้นหรือความแข็งที่ใช้สารเจือปนอาหารต่างกัน มีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างกันนี้ไม่สามารถบอกได้ว่าการเติมสารเจือปนอาหารชนิดไหนให้คุณภาพเจลดีกว่ากัน แต่ข้อมูลที่ได้นี้น่าจะมีการนำไปศึกษาต่อจนถึงผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือ ชนิดอาหารแซ่เยือกแข็ง ประเภทหรือรูปแบบไหนเฉพาะเจาะจง เพื่อให้ทราบสารเจือปนอาหารที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แซ่เยือกแข็งนั้น ๆ ต่อไป

3. จากการศึกษาในครั้งนี้ถึงค่ากลาสทรานซิชั่นและค่าอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลแซ่เยือกแข็งนั้น ทำให้ทราบเพียงข้อมูลทดสอบจากเจลข้าวเท่านั้น ดังนั้นเมื่อทำผลิตภัณฑ์อาหารแซ่เยือกแข็งที่ต้องการแล้ว ก็ควรมีการทดสอบกลับถึงค่าเหล่านี้ในผลิตภัณฑ์อาหารอีกครั้ง เพื่อเพิ่มความมั่นใจต่อความคงตัวของผลิตภัณฑ์อาหารแซ่เยือกแข็งจากเจลข้าวเหล่านี้ยิ่งขึ้น

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับมีดังนี้คือ

1. ผลประโยชน์ในเชิงงานวิจัย

ได้ข้อมูลที่ใช้เป็นพื้นฐานการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งที่ทำมาจากข้าว เช่น

- จะทราบถึงผลกระทบของการแช่แข็งต่อคุณสมบัติของสตาร์ชและเจลจากข้าวชนิดต่างๆ
- ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ทางกายภาพ เช่น เนื้อสัมผัส และคุณสมบัติทางเคมี เช่น ปฏิกิริยา Oxidation เพื่อใช้ประเมินค่าความคงตัว และพฤติกรรมของอาหารแช่แข็ง
- ทราบถึงแนวโน้มของวิธีการปรับปรุงคุณภาพอาหารแช่แข็งประเภทผลิตภัณฑ์ข้าว โดยการเลือกเติมวัตถุเจือปนอาหารที่เหมาะสม

2. ผลประโยชน์ในเชิงวิชาการและการเรียนการสอน

- สามารถบริการและถ่ายทอดผลการวิจัยให้แก่ผู้ผลิตในท้องถิ่นและระดับประเทศซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนาการผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป
- ทำให้มีประสบการณ์ในการทำวิจัย ในห้องปฏิบัติการด้านเคมีอาหารเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการเรียนและการสอนแก่นักศึกษาทั้งระดับปริญญาตรี โทและเอก

3. ผลประโยชน์ด้านชื่อเสียง

- จะทำให้ผู้ดำเนินการวิจัยและผู้เกี่ยวข้องเป็นที่รู้จักและเพิ่มความสัมพันธ์ด้านวิชาการระหว่างมหาวิทยาลัยทั้งภายในและต่างประเทศที่มีการเรียน การสอนและการวิจัยด้านวิทยาศาสตร์การอาหาร
- ผู้สนับสนุนโครงการ (สกว) มหาวิทยาลัยขอนแก่นและผู้ร่วมโครงการ จะได้ชื่อเสียงในการตีพิมพ์ผลงานวิจัยที่เป็นที่ยอมรับในวารสารต่างประเทศ โดยคาดว่าจะเมื่อเสร็จสิ้นโครงการจะมีผลงานตีพิมพ์ทั้งสิ้นไม่น้อยกว่า 2 เรื่อง โดยมีผลงานวิจัยในปีที่ 1 คือ Frozen storage and freeze-thaw stability of rice starch gels และผลงานวิจัยในปีที่ 2 คือ Effects of additives on frozen stability of rice starch gels ซึ่งคาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสาร Food Chemistry หรือ Cereal Chemistry ของประเทศสหรัฐอเมริกา

เอกสารอ้างอิง

- อรอนงค์ นัยวิกุล และ Elliott, B. 2544. การสัมมนา เรื่อง การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (ความหนืด) ของข้าวด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA) วันที่ 13 กรกฎาคม 2544. บริษัท จาร์พา เทคโนโลยี จำกัด, กรุงเทพฯ. 59 น.
- American Association of Cereal Chemists. 1995. Approved Methods of the AACC. 9 th ed. Method 44-19, 46-13, 30-25, 08-01, 61-02. The Association:St. Paul, Minnesota.
- American Association of Cereal Chemists. 2003. Method 61-03 Amylose content of milled rice. Available from: www.aacnnettest.org/ApprovedMethods/methods/61-03.pdf. Accessed from October 17, 2003
- Bejosano FP, Corke H. 1999. Effect of Amaranthus and buckwheat proteins on the rheological properties of maize starch. Food Chem 65(4): 493-501.
- Biliaderis CG, Swan R, Arvanitoyannis I. 1999. Physicochemical properties of commercial starch hydrolyzate in the frozen state. Food Chem 64: 537-546.
- Chang S-M, Liu L-C. 1991. Retrogradation of rice starches studied by differential scanning calorimetry and influence of sugars, NaCl and lipids. J Food Sci 56(2):564-
- Chien JT, Lien Y-Y, Shoemaker CF. 1999. Effect of polarity of complexing agents on thermal and rheological properties of rice starch gels. Cereal Chem 76(6): 837-842.
- Chung H-J, Lee E-J, Lim S-T. 2002. Comparison in glass transition and enthalpy relaxation between native and gelatinized rice starches. Carbohydrate Polymers, 48(3): 287-298.
- Draget KI. 2000. Alginates. In: Phillips GO, Williams PA, editors. Handbooks of hydrocolloids. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. p 379-395.
- Ferrero C, Martino M, Zaritzky NE. 1996. Effect of hydrocolloids on starch thermal transitions as measured by DSC. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 47(5): 1247-1266.

- Fennema OR. 1996. Water and Ice. In: Fennema OR, editor. Food Chemistry. 3rd ed. New York: Marcel Dekker, Inc. p 17- 94.
- Hagenimana A, Pu P, Ding X. 2005. Study on thermal and rheological properties of native rice starches and their corresponding mixtures. Food Res Int 38(3): 257-266.
- Hoffman AS. n.d. Hydrogels for biomedical applications. Annals New York Academy of Science: 62-73.
- Hsu C-L, Heldman DR. 2005. Influence of glass transition temperature on rate of rice starch retrogradation during low-temperature storage. J Food Process Eng 28(5): 506-525.
- Huang R-M, Chang W-H, Chang Y-H, Lii C-Y. 1994. Phase transition of rice starch and flour gels. Cereal Chem 71(2): 202-207.
- Iturriaga L, Lopez B, Anon M. 2004. Thermal and physicochemical characterization of seven argentine rice flours and starches. Food Res Int 37(5): 439-447.
- Jane J-L, Chen J-F. 1992. Effect of amylose molecular size and amylopectin branch chain length on paste properties of starch. Cereal Chem 69(1): 60-65.
- Jane J, Chen, YY, Lee LF, McPherson AE, Wong KS, Radosavljevic M, Kasemsuwan T. 1999. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. Cereal Chem 76(5): 629-637.
- Jeong H-Y, Lim, S-T. 2003. Crystallinity and pasting properties of freeze-thawed high amylose maize starch. Starch 55(11): 511-517.
- Juliano BO. 1985. Rice: chemistry and technology. St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists. 774 p.
- Lai H-M. 2002. Effects of rice properties and emulsifiers on the quality of rice pasta. J Sci Food Agric 82(2): 203-216.
- Lee MH, Baek MH, Cha DS, Park HJ, Lim ST. 2002. Freeze-thaw Stabilization of sweet potato starch gel by polysaccharide gums. Food Hydrocolloids 16(4): 345-352.
- Limpisut P, Jindal VK. 2002. Comparison of rice flour pasting properties using brabender viscoamylograph and rapid visco analyzer for evaluating cooked rice texture. Starch 54 (8): 350-357.
- Mandala IG, Palogou ED, Kostaropoulos AE. 2002. Influence of preparation and storage conditions on texture of xanthan-starch mixtures. J Food Eng 53(1):27-38.

- Miles MJ, Morris VJ, Orford PD, Ring SG. 1985. The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. *Carbohydrate Research* 135(2): 271-281.
- Morrison WR. 1995. Starch lipids and how they relate to starch granule structure and functionality. *Cereal Foods World* 40(6): 437-438, 440-441, 443-446.
- Noda T, Nishiba Y, Sato T, Suda I. 2003. Properties of starches from several low-amylose rice cultivars. *Cereal Chem* 80(2): 193-197.
- Ong MH, Blanshard JMV. 1995. Texture determinants in cooked, parboiled rice, I: Rice starch amylose and the fine structure of amylopectin. *J Cereal Sci* 21(3): 251-260.
- Perera C, Hoover R. 1999. Influence of hydroxypropylation on retrogradation properties of native, defatted and heat-moisture treated potato starches. *Food Chem* 64(3): 361-375.
- Puchongkavarin H, Varavinit S, Bergthaller W. 2003. Comparative study of pilot scale rice starch production in an alkaline and an enzymatic process. *Biothailand Technology for Life* 2003, 17-20 July, Pattaya, Thailand
- Radhika Reddy K, Zakiuddin Ali S, Bhattacharya KR. 1993. The fine structure of rice starch amylopectin and its relation to the texture of cooked rice. *Carbohydrate Polymers* 22(4): 267-275.
- Shafiur Rahman M. 1999. *Handbook of Food Preservation*. New York: Marcel Dekker, Inc. 809 p.
- Saif SMH, Lan Y, Sweat VE. 2003. Gelatinization Properties of Rice Flour. *Int J Food Prop* 6(3): 531-542.
- Schiradi C, Lernia ID, Rosa MD. 2002. Trehalose production: exploiting novel approaches. *Trends in Biotechnology* 20(10): 420-425.
- Sharma SC. 1981. Gums and hydrocolloids in oil-water emulsions. *Food Technology* 34(1): 59-67.
- Singh K J, Roos YH. 2005. Frozen state transition of sucrose-protein-cornstarch mixtures. *J Food Sci* 70(3): E198-E204.
- Singh N, Singh J, Kaur L, Sodhi NS, Gill BS. 2003. Review: morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chem* 80(2): 219-231.

- Singh N, Singh J, Kaur L, Sodhi NS, Saxena SK. 2003. Physicochemical, morphology, thermal, cooking and textural properties of chalky and translucent rice kernels. *Food Chem* 82(3): 433-439.
- Singh N, Singh J, Kaur L, Sodhi NS, Sekhon KS. 2005. Physicochemical cooking and textural properties of milled rice from different Indian rice cultivars. *Food Chem* 89(2): 253-259.
- Singh N, Kaur L, Sandhu KS, Kaur J, Nishinari K. 2006. Relationships between physicochemical, morphological, thermal, rheological properties of rice starches. *Food Hydrocolloids* 20(6): 532-42.
- Slade L, Levine H. 1993. Water relationship in starch transitions. *Carbohydrate Polymer* 21(2-3): 105-131.
- Sodhi NS, Singh N. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches separated from rice cultivars grown in India. *Food Chem* 80(1): 99-108.
- Sudhakar V, Singhal RS, Kulkarni PR. 1996. Starch-galactomannan interaction: functionality and rheological aspects. *Food Chem* 55(3): 259-264.
- Tester RF, Karkalas J. 2001. The effects of environmental conditions on the structural features and physico-chemical properties of starches. *Starch* 53(10): 513-519.
- Tomasik P. 2002. Saccharides. In: Sikorski ZE, editor. *Chemical and functional properties of food components*. 2nd ed. Florida: CRC Press. p 81-114.
- Vandeputte GE, Vermeylen R, Geeroms J, Delcour JA. 2003. Rice starches. I. Structural aspects provide insight into crystallinity characteristics and gelatinization behaviour of granular starch. *J Cereal Sci* 38(1): 43-52.
- Vandeputte GE, Vermeylen R, Geeroms J, Delcour JA. 2003. Rice starches. III. Structural aspects provide insight in amylopectin retrogradation properties and gel texture. *J Cereal Sci* 38(1):61-68.
- Varavinit S, Shobsngob S, Varayanond W, Chinachoti P, Naivikul O. 2002. Freezing and thawing conditions affect the gel stability of different varieties of rice flour. *Starch* 54(1): 31-36.

- Varavinit S, Shobsngob S, Varayanond W, Chinachoti P, Naivikul O. 2003. Effect of amylose content on gelatinization retrogradation and pasting properties of flours from different cultivars of Thai rice. *Starch* 55(9): 410-415.
- Wang Y-J, Jane J. 1994. Correlation between glass transition temperature and starch retrogradation in the presence of sugars and maltodextrin. *Cereal Chem* 71(6): 527-531.
- Walti-Chanes J, Bermudez D, Valdez-Fragoso A, Mujica-Paz H, Alzamora S M. 2004. Principles of freeze-concentration and freeze-drying . In: Hui YH, Cornillon P, Legaretta IG, Lim MH, Murrel KD, Nip W-K, editors. *Handbook of Frozen Foods*. New York: Marcel Dekker, Inc. p 13-24.
- Wielinga WC. 2000. Galactomannans. In: Phillips GO, Williams PA, editors. *Handbooks of hydrocolloids*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. p 137-154.
- Williams PA, Phillips GO. 2000. Introduction to food hydrocolloids. In: Phillips GO, Williams PA, editors. *Handbooks of hydrocolloids*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. p 1-19.
- Yoenyongbuddhagal S and Noomhorm A. 2002. Effect of physicochemical properties of high-amylose Thai rice flours on vermicelli quality. *Cereal Chem* 79(4): 481-485.
- Zheng GH, Sosulski FW. 1998. Determination of water separation from cooked starch and flour pastes after refrigeration and freeze-thaw. *J Food Sci* 63(1): 134-139.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ทางเคมี

1. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AACC 1995 method 44-19)

1.1 อุปกรณ์

- 1.1.1 ตู้อบลมร้อน (Forced-draft Hot air oven)
- 1.1.2 เครื่องชั่ง ที่ชั่งละเอียดถึง 0.0001 กรัม
- 1.1.3 โถดูดความชื้น (desiccator)
- 1.1.4 ถ้วยอะลูมิเนียมที่มีฝาปิด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร

1.2 วิธีวิเคราะห์

ซึ่งตัวอย่างมาตรฐานน้ำหนักประมาณ 2 กรัม (± 1 มิลลิกรัม) ใส่ลงในถ้วยอะลูมิเนียมที่มีฝาปิด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร นำเข้าอบในตู้อบลมร้อน (forced-draft Hot air oven) อุณหภูมิ 135°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) เวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น นาน 30-45 นาที นำไปชั่งน้ำหนักและ คำนวณร้อยละปริมาณความชื้นดังนี้

$$\text{ร้อยละของความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักหลังอบ}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100$$

2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน โดยเครื่อง Kjelttec 1 (AACC 1995 method 08-01)

2.1 อุปกรณ์

- 2.1.1 เครื่องกลั่นรุ่น 1002
- 2.1.2 เครื่องย่อยรุ่น 1007 พร้อมอุปกรณ์ย่อย (digestor) และหลอดย่อย (digestion tube)
- 2.1.3 Exhaust Manifold และ aspirator
- 2.1.4 Tube stand
- 2.1.5 ขวดปริมาตรรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.2 สารเคมีที่ใช้

- 2.2.1 กรดซัลฟูริกเข้มข้น
- 2.2.2 Kjeltabs 1 เม็ด ประกอบด้วยโพแทสเซียมซัลเฟต 3.5 กรัม และซีเรเนียม 3.5 กรัม

2.2.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 55 เตรียมโดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 กรัม และโซเดียมไทโอซัลเฟต 5 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2.2.4 สารละลายกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 4 เตรียมโดยชั่งกรดบอริก 40 กรัม ละลายในน้ำกลั่น เติมอินดิเคเตอร์ Bromogresol Green/methyl red (ในข้อ 2.2.5) ในสารละลายกรดบอริก ปรับสีของกรดบอริกให้ออกเป็นสีม่วงแดง แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตร

2.2.5 สารละลายอินดิเคเตอร์ เตรียมโดยชั่ง bromocresol green 0.2 กรัม ละลายในเอทานอล 100 มิลลิลิตร และชั่ง methyl red 0.2 กรัม ละลายในเอทานอล 100 มิลลิลิตร แล้วนำสารละลายทั้งสองชนิดมาผสมรวมกันในสัดส่วนสารละลาย bromocresol green จำนวน 5 ส่วน ผสมรวมกับสารละลาย methyl red จำนวน 1 ส่วน ผสมให้เข้ากันแล้ว เทใส่ขวดสีชาที่มีฝาปิด

2.2.6 สารละลายมาตรฐานกรดเกลือ 0.02 โมลาร์ เตรียมโดยตวงสารละลายกรดเกลือเข้มข้น จำนวน 1.7 มิลลิลิตร ละลายในน้ำกลั่น จำนวน 1000 มิลลิลิตร ชั่งสารโซเดียมคาร์บอเนตที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จำนวน 0.013 กรัม (ทราบน้ำหนักที่แน่นอน) ละลายในน้ำกลั่น หยดสารละลายอินดิเคเตอร์ในข้อ 2.2.5 จำนวน 5 หยด ไตเตรทกับสารละลายกรดเกลือที่เตรียมไว้ จนกระทั่งถึงจุดยุติ สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู คำนวณความเข้มข้นที่แท้จริงของสารละลายมาตรฐานกรดเกลือ ดังนี้

$$\text{ความเข้มข้นของกรดเกลือ (โมลต่อลิตร) เท่ากับ } \frac{2000 \times \text{น้ำหนักของโซเดียมคาร์บอเนต}}{\text{น้ำหนักโมเลกุลของโซเดียมคาร์บอเนต}}$$

2.3 วิธีวิเคราะห์

ชั่งตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม (ทราบน้ำหนักแน่นอน) ใส่ลงในหลอดย่อย เติม Kjeltabs1 เม็ด เติมสารป้องกันการเกิดฟอง (antifoaming agent) ประมาณ 1 มิลลิลิตร และกรดซัลฟูริกเข้มข้น ประมาณ 8-10 มิลลิลิตร เขย่าเบา ๆ เติมลูกแก้วกันเดือด นำหลอดต่อเข้ากับชุดเครื่องย่อย ทำการย่อยที่อุณหภูมิ 420 °C เวลา 1 ชั่วโมงหรือจนได้สารละลายสีใส ทั้งหลอดไว้ให้เย็น แล้วค่อย ๆ เติมน้ำกลั่น 36 มิลลิลิตร หรือ 2 เท่าของกรดซัลฟูริกเข้มข้น นำหลอดตัวอย่าง 1 หลอด ต่อเข้ากับชุดกลั่น แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 55 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยนำพลาสติกซึ่งบรรจุสารละลายกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 4 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ไปรองรับสารที่กลั่นได้ โดยให้ปลายแท่งแก้วของชุดกลั่นจุ่มอยู่ในสารละลาย ทำการกลั่นเป็นเวลา 4 นาที หรือสารที่กลั่นได้ปริมาตรประมาณ 150 มิลลิลิตร นำสารที่กลั่นได้นี้ไปไตเตรทกับสารละลายกรดเกลือมาตรฐาน 0.02 นอร์มัล จนกระทั่งได้สารละลายสีเทา (ถึงจุดยุติ) คำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{ร้อยละปริมาณไนโตรเจน} = \frac{1.401 \times (V_1 - V_2) \times C}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเป็นกรัม}}$$

V_1 = ปริมาณกรดเกลือมาตรฐานที่ใช้ไตเตรทกับตัวอย่าง

V_2 = ปริมาณกรดเกลือมาตรฐานที่ใช้ไตเตรท กับ blank

C = ความเข้มข้นของกรดเกลือมาตรฐานหน่วยเป็นโมลาร์ หรือ นอร์มัล

$$\text{ร้อยละปริมาณโปรตีน} = \text{ร้อยละปริมาณไนโตรเจน} \times 5.95$$

หมายเหตุ ให้ทำ blank ควบคู่ไปด้วยโดยไม่มีตัวอย่างในหลอดย่อยและหลอดกลั่น

3. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน โดยเครื่อง Soxtec system HT6 (AACC 1995 Method 30-25)

3.1 สารเคมีที่ใช้ ปีโตรเลียม อีเทอร์ จุดเดือด $35-60^{\circ}\text{C}$

3.2 วิธีวิเคราะห์ปริมาณไขมัน ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ซึ่งตัวอย่างจำนวน 3 กรัม (± 0.1 มิลลิกรัม) นำเข้าเครื่องสกัดที่มีถ้วยอะลูมิเนียมรองรับน้ำมัน สกัดด้วยปีโตรเลียมอีเทอร์ ปริมาตร 40-50 มิลลิลิตร เวลาในการสกัดคือ ระยะเวลาการต้ม (boiling) 35 นาที ระยะเวลาการชะล้าง 60 นาที หลังจากนั้นให้นำถ้วยอะลูมิเนียมที่มีไขมันไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 30 นาที ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น นาน 30 นาที และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำมาคำนวณหาปริมาณไขมัน

$$\text{ปริมาณไขมัน} = \frac{W_3 - W_2}{W_1} \times 100$$

W_1 = น้ำหนักตัวอย่าง เป็น กรัม

W_2 = น้ำหนักถ้วยสกัดที่สะอาดผ่านการอบและทราบน้ำหนักที่แน่นอน เป็น กรัม

W_3 = น้ำหนักถ้วยหลังจากสกัดไขมันและทำให้เย็นในโถดูดความชื้น เป็น กรัม

4. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (AACC 1995 Method 08-01)

4.1 อุปกรณ์

- 1.1.1 เตาเผา (Electric muffle furnace)
- 1.1.2 เครื่องชั่ง ที่ชั่งละเอียดถึง 0.0001 กรัม
- 1.1.3 โถดูดความชื้น (desiccator)
- 1.1.4 ถ้วยสำหรับหาเถ้า (crucible)

4.2 วิธีวิเคราะห์

ชั่งตัวอย่างสตาร์ชน้ำหนักประมาณ 3-5 กรัม (± 1 มิลลิกรัม) ทราบน้ำหนักที่แน่นอน ลงในถ้วยสำหรับหาเถ้า (crucible) นำตัวอย่างไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 °C เตาตัวอย่างจนกระทั่งเป็นสีเทาหรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น นำไปชั่งน้ำหนักและ คำนวณร้อยละปริมาณเถ้าดังนี้

$$\text{ร้อยละของเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักหลังเผา}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100$$

5. การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส (AACC 1999 Method 61-03)

5.1 การเตรียมตัวอย่างสตาร์ชจากข้าว

เตรียมโดยชั่งตัวอย่างสตาร์ช ประมาณ 2 กรัม สกัดแยกไขมัน โดยเครื่องสกัดไขมัน ด้วยสารละลายเมทานอล (methanol) 85 % นาน 16 ชั่วโมง เกลี่ยสตาร์ชให้บาง ๆ วางไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อระเหยเมทานอล นาน 2 วัน

5.2 เครื่องมือ

- 5.2.1 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer)
- 5.2.2 เครื่องชั่ง ที่ชั่งได้ละเอียดถึง 0.0001 กรัม
- 5.2.3 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)

5.3 สารเคมีที่ใช้

5.3.1 แอมิโลส (amylose) เตรียมโดยนำแอมิโลสสกัดแยกไขมัน โดยเครื่องสกัดไขมัน ด้วยสารละลายเมทานอล (methanol) 85 % นาน 16 ชั่วโมง เกลี่ยแอมิโลสให้บาง ๆ วางไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อระเหยเมทานอล นาน 2 วัน

5.3.2 แอมิโลเพกทิน (amylopectin)

5.3.3 เมทานอล (methanol) 85 % ปริมาตรต่อปริมาตร เตรียมโดยดูดสารละลายเมทานอล จำนวน 85 มิลลิลิตร ใส่ในน้ำกลั่นจำนวน 15 มิลลิลิตร

5.3.4 เอทิลแอลกอฮอล์ 95 % เตรียมโดยดูดสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ (Absolute ethyl alcohol) จำนวน 95 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จำนวน 100 มิลลิลิตร

5.3.5 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1 นอร์มัล เตรียมโดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 40 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จำนวน 1000 มิลลิลิตร

5.3.6 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.09 นอร์มัล เตรียมโดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 3.6 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จำนวน 1000 มิลลิลิตร

5.3.7 กรดกลีเซอริก (glacial acetic acid; CH_3COOH , MW 60.05 g/mol) เข้มข้น 1 นอร์มัล เตรียมโดยดูดกรดกลีเซอริก ปริมาตร 58 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จำนวน 1000 มิลลิลิตร

5.3.8 สารละลายของไอโอดีน (I_2) ร้อยละ 0.2 และ โพแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) ร้อยละ 2.0 เตรียมโดยชั่งโพแตสเซียมไอโอไดด์ จำนวน 2 กรัม ละลายในน้ำกลั่นเล็กน้อย เขย่าให้เข้ากัน จึงเติมไอโอดีน จำนวน 0.2 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จำนวน 100 มิลลิลิตร

5.3 วิธีวิเคราะห์

5.3.1 ชั่งตัวอย่างสตาร์ชที่เตรียมไว้ จำนวน 100 มิลลิกรัม ใส่ในขวดไวแอล (Vial) ที่มีฝาปิด ขนาด 100 มิลลิลิตร

5.3.2 เติมสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ 95 % ปริมาตร 1 มิลลิลิตร

5.3.3 เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล ปริมาตร 9 มิลลิลิตร

5.3.4 วางขวดตัวอย่างสตาร์ช ที่อุณหภูมิห้อง นาน 10 นาที แล้วนำไปต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที และวางให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นาน 2 ชั่วโมง หรือสามารถเก็บข้ามคืน

5.3.5 นำตัวอย่างสตาร์ชในข้อ 5.3.4 ใส่ในขวดแก้วปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร

5.3.6 ดูดสารตัวอย่างสตาร์ชในข้อ 5.3.5 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดแก้วปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และสารละลายกรดกลีเซอริก เข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วเติมสารละลายไอโอดีนในข้อ 5.2.8 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ 20 นาที ก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง

5.3.7 วัดความเข้มของสีของสารละลายตัวอย่างในข้อ 5.3.6 ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยอ่านค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance) ที่ความยาวคลื่นแสง 620 นาโนเมตร (nm.) หลังปรับเครื่องด้วยเบงส์ (blank) ให้ได้ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง เท่ากับ 0 (ศูนย์)

5.3.8 การทำเบงส์ โดยดูดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.09 นอร์มัล ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และสารละลายกรดเกลืออะซิติก เข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วเติมสารละลายไอโอดีนในข้อ 5.2.8 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ 20 นาที วัดความเข้มของสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยอ่านค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance) ที่ความยาวคลื่นแสง 620 นาโนเมตร (nm.)

5.3.9 นำค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance) ของตัวอย่างสตาร์ช ไปหาปริมาณแอมิโลส (ร้อยละ) โดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน

5.3.10 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

(1) ชั่งแอมิโลส 100 มิลลิกรัม (0.1000 กรัม) และแอมิโลสเพกทิน 100 มิลลิกรัม ใส่ในขวดไวแอล (vial) ที่มีฝาปิด แล้วปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 5.3.2 ถึงข้อ 5.3.6

(2) เตรียมสารละลายผสมของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน (ตารางที่ 25)

(3) เตรียมขวดแก้วปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด แล้วดูดสารแต่ละขวด แล้วเขย่าให้เข้ากัน ดูดสารละลายแต่ละขวด ในข้อ 5.3.10 (2) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดแก้วปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 5.3.6 ถึง ข้อ 5.3.7

(4) นำค่าการดูดกลืนคลื่นแสงกับปริมาณแอมิโลส มาเขียนเส้นกราฟมาตรฐาน (Standard curve)

ตารางที่ 25 อัตราส่วนสารละลายผสมของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน

ปริมาณ แอมิโลส (ร้อยละ)	อัตราส่วนปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร/100 มิลลิลิตร)		
	แอมิโลส (1 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)	แอมิโลเพกทิน (1 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)	สารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.09 นอร์มัล
0	0	7.0	3
10	1.0	6.0	3
20	2.0	5.0	3
25	2.5	4.5	3
30	3.0	4.0	3

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ทางกายภาพ

1. การวัดความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer (RVA) (AACC 1995Methods61-02)

1.1 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่บดละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มม. คำนวณหาปริมาณน้ำหนักตัวอย่างและปริมาณน้ำกลั่นที่ถูกต้อง ซึ่งใช้ที่ความชื้นร้อยละ 12 โดยใช้สูตร

$$S = \frac{(100-12) \times A}{100 - M} = \frac{88 \times A}{100 - M}$$

$$w = 25.0 + (A - S)$$

เมื่อ S = น้ำหนักตัวอย่างที่ถูกต้อง (กรัม)

A = น้ำหนักตัวอย่างที่ความชื้น 12 %

M = ปริมาณความชื้นของตัวอย่าง (% as is)

W = น้ำหนักน้ำที่ถูกต้อง

1.2 ชั่งน้ำหนักที่ถูกต้องแล้วเทลงในภาชนะที่ใช้ทดสอบ (test canister) แล้วจึงเทตัวอย่างลงในภาชนะที่น้ำอยู่แล้ว คนตัวอย่างและน้ำด้วยพายที่ใช้ติดตั้งลงในภาชนะขึ้นลง 10 ครั้ง ถ้ายังไม่ทั่วถึงก็ให้คนซ้ำ

1.3 ใส่พายลงในเครื่องให้อยู่ตรงกลาง

1.4 เดินเครื่องตามโปรแกรม Rice1 ดังนี้

PROFILE _Rice1

Time	Type	Value
00:00:00	Temp	50 °C
00:00:00	Speed	960 rpm
00:00:10	Speed	160 rpm
00:01:00	Temp	50 °C
00:04:48	Temp	95 °C
00:07:18	Temp	95 °C
00:11:06	Temp	50 °C

Idle temperature: 50 ± 1 °C

End of test: 12 min. 30 sec.

Time between readings: 4 sec.

1.5 เมื่อวิเคราะห์เสร็จแล้ว เครื่องจะหยุดโดยอัตโนมัติ นำภาชนะออกจากเครื่อง และทำความสะอาดถ้วยตัวอย่าง

1.6 ผลที่อ่านได้จากการวิเคราะห์เส้นกราฟที่เครื่องบันทึกไว้ดังนี้

- 1.6.1 อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (Pasting temperature) วัดเมื่อเริ่มความหนืดที่ 2 อาร์วียู (RVU) หน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$
- 1.6.2 ความหนืดสูงสุด(Peak viscosity) หน่วยเป็น อาร์วียู
- 1.6.3 เวลาที่ความหนืดสูงสุด (Peak time) หน่วยเป็น นาที
- 1.6.4 อุณหภูมิที่ความหนืดสูงสุด (Peak temperature) หน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$
- 1.6.5 ความคงทนต่อการกวน (holding strength) เป็นค่าความหนืดต่ำสุดหลังจากการเกิดความหนืดสูงสุดมักเกิดในช่วงที่ลดอุณหภูมิให้เย็นลง มีหน่วยเป็น อาร์วียู
- 1.6.6 เบรคดาวน์ (Breakdown) หรือช่วงความหนืดลดลง เป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสูงสุดกับค่าความคงทนต่อการกวน มีหน่วยเป็น อาร์วียู
- 1.6.7 ความหนืดสุดท้ายของการทดสอบ (Final viscosity) มีหน่วยเป็น อาร์วียู
- 1.6.8 ความหนืดกลับคืนจากความหนืดสูงสุด (Setback from Peak) เป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด มีหน่วยเป็น อาร์วียู
- 1.6.9 ความหนืดกลับคืนจากความคงทนต่อการกวน (Setback from Trough) เป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่คงทนต่อการกวน มีหน่วยเป็น อาร์วียู

2. การวัดเนื้อสัมผัสเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจากข้าวด้วยเครื่อง Texture Analyzer TA-XT2

ทำการทดสอบ 2 แบบคือ แบบแรกใช้การทดสอบวัดค่าแรงกด (Compression) เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง (deformation) ร้อยละ 15 และ ร้อยละ 70 ของความหนาเจลสตาร์ช โดยกำหนดค่าการวัดดังนี้ ค่าความเร็วหัววัดก่อนทดสอบเท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที และความเร็วหัววัดระหว่างทดสอบ เท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วหัววัดหลังการทดสอบ เท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ใช้หัวกดรูปทรงกระบอกตันเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร หน่วยที่ใช้วัดเป็น กรัมแรง คำนวณค่าความแข็งของเจลสตาร์ช (Hardness) ดัดแปลงตามวิธีของ Bejosano and Corke (1999)

3. วัดการขับของเหลวออกจากเจล (syneresis) ดัดแปลงตามวิธีของ Lee and others (2002)

วิเคราะห์ผลการขับของเหลวออกจากเจล (Syneresis) โดยนำเจลสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและหลอมละลายที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักเจลสตาร์ช โดยชั่งน้ำหนักเจลสตาร์ชบนกระดาษกรองเบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ใช้ตุ้มน้ำหนัก (stainless steel cylinder) ขนาด 1 กิโลกรัม วางทับบนเจลสตาร์ชนาน 15 วินาที ทำการชั่งน้ำหนักกระดาษกรองที่ดูดซับน้ำที่แยกตัวออกจากเจล คำนวณร้อยละการขับของเหลวออกจากเจล ดังนี้

$$\text{การขับของเหลวออกจากเจล (ร้อยละ)} = \frac{W_3 - W_2}{W_1} \times 100$$

W_1 = น้ำหนักเจลสตาร์ชก่อนแช่เยือกแข็ง เป็น กรัม

W_2 = น้ำหนักเจลสตาร์ชหลังการละลาย เป็น กรัม

W_3 = น้ำหนักเจลสตาร์ชก่อนแช่เยือกแข็ง เป็น กรัม

4. การวัดสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC

4.1 การเตรียมตัวอย่าง

4.1.1 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างสตาร์ช ที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช คำนวณหาปริมาณน้ำหนักตัวอย่างสตาร์ชและปริมาณน้ำกลั่นที่ถูกต้อง ใส่ในถ้วยตัวอย่าง โดยให้ความเข้มข้นของสตาร์ชร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักแห้ง (น้ำหนักต่อน้ำหนัก)

4.1.2 ปิดฝาถ้วยตัวอย่าง แล้ววางไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง

4.2 การเตรียมเครื่อง DSC

4.2.1 เปิดวาล์วถึงแก๊สไนโตรเจน หมุนปรับความดันไปที่ 20 psi

4.2.2 เปิดสวิตช์ Power ของ RCS (Refrigerated Cooling System)

4.2.3 เปิดสวิตช์ Power ของ DSC ที่ด้านหลังเครื่อง

4.2.4 เปิดโปรแกรม DSC จาก Q-Series window

4.2.5 Control menu -> Event -> On

4.2.6 ก่อนวัดตัวอย่าง ให้เปิดเครื่องและรอประมาณ 30 นาที

4.3 การ Calibration

4.3.1 Step 1: Empty plate form Calibration (about 1 hr)

4.3.2 Step 2: Sapphire Calibration (About 1 hr)

4.3.3 Step 3: Indium Calibration (About 15 min)

1) Control -> Lip->Open

2) Remove Sapphire sample

3) Place Indium with known weigh at Sample position plate form

4) Place Empty cell at reference plate from

5) In Setting:

Standard: Indium

Weight: e.g. 12.2 mg

- 6) The temperature setting leaves same as:
 Check the box Conduct Experiment
 Start temperature: 100 °C
 Heating rate: 10 °C/min
 Final Temperature: 180 °C
 Purge Gas: #1 Nitrogen
 Flow Rate: 50 ml/min
- 7) Click Next and then Click Start Experiment
- 8) Click Next and Check Graph

4.4 การปิดเครื่อง DSC (Shutting Down DSC)

4.4.1 ก่อนปิดเครื่อง DSC ต้องแน่ใจว่าไม่มีตัวอย่างที่กำลังตรวจวัดหรือไม่มีตัวอย่างที่วางไว้ที่วางตัวอย่าง

- 4.4.2 รอจนกระทั่ง อุณหภูมิของเครื่องไปที่ Standby temperature
- 4.4.3 Control -> Event -> Off
- 4.4.4 ทำการปิดโปรแกรม DSC
- 4.4.5 ปิดสวิตช์เครื่อง DSC
- 4.4.6 ปิดสวิตช์เครื่อง RSC unit
- 4.4.7 ปิดแก๊สไนโตรเจน

4.5 การวัดตัวอย่าง

- 4.5.1 เปิดเครื่อง DSC ตามข้อ 4.2
- 4.5.2 นำถ้วยตัวอย่าง (sample pan) ที่เตรียมไว้และทราบน้ำหนักตัวอย่างที่แน่นอน
- 4.5.3 วางถ้วยตัวอย่าง และถ้วยอ้างอิง (reference pan) ที่ถาดตัวอย่าง
- 4.5.4 ตั้งโปรแกรมในการวัดตัวอย่าง ดังนี้

1) Summary:

Mode: Standard

Test name: name

Sample size: as weight (in mg 10–15 mg)

Pan: 1 (ตำแหน่งของถ้วยตัวอย่าง)

Ref: 1 (ตำแหน่งของถ้วยอ้างอิง)

Comments: comments

Date File Name: Give a suitable file name

2) Procedure:

Test: Custom

Name: name

Click Edit และเลือกขั้นตอนการวัด เช่น

i) Equilibrium at 30 °C

ii) Ramp 10 °C/min to 120 °C

3) Note เลือกชนิดถ้วยที่ใช้ในการทดสอบ เช่น Aluminum Hermetic Pan

Purge Gas:#1 Nitrogen at 50 ml/min

4.5.6 Click Apply

4.5.7 Click Append ถ้าต้องการเพิ่มตัวอย่างในการวัด

4.5.8 วิเคราะห์กราฟโดยใช้ Universal Analysis

4.5.9 ปิดระบบตามขั้นตอนในข้อ 4.4

5. การวัดสมบัติทางวิทยากระแสด้วยเครื่อง Rheometer

5.1 การเปิดเครื่อง Rheometer

5.1.1 เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์

5.1.2 เปิดก๊อก air supply (จากขวาง closed หมุนตรง open) ดูระดับความดัน psi ของ AR 1000 : 25 psi

5.1.3 หมุนฝาครอบสีดำที่หัววัด (adapter) ออก (จับด้านบนให้แน่นหมุนด้านล่างตามเข็มนาฬิกา)

5.1.4 เปิดปุ่ม switch ของเครื่อง Rheometer ซึ่งจะอยู่ด้านหลังเครื่อง รอสักครู่เพื่อให้เครื่องทดสอบระบบ

5.1.5 เสียบปลั๊ก pump water supply (น้ำในปั๊มควรสะอาด-น้ำกลั่น ระดับน้ำประมาณครึ่งถัง)

5.1.6 เมื่อระบบทุกอย่างพร้อม ให้เปิด instrument control software ดังนี้

Start > Programs> TA Rheology Advantage> AR Instrument control

5.1.7 Instrument Inertia ดังนี้

Option > Instrument > Inertia > Calibrate > Next > finish > closed

ต้องแน่ใจว่าไม่ใส่หัววัด ไม่มีตัวอย่าง ค่าที่ยอมรับได้ประมาณ 14-16 μNms^2 และค่าไม่มากกว่า 15 % ของ original inertia value

5.1.8 Geometry ให้เลือกหัววัดที่ใช้ทดสอบ (40 mm stainless steel) โดยนำประกอบเข้ากับ adapter ที่เครื่อง

5.1.9 Geometry Inertia หลังจากประกอบหัววัด ให้เติมน้ำกลั่นในร่องของหัววัด

5.1.10 Zero the Geometry Gap เลือก icon หรือ Instrument > Gap > Zero Gap จะปรากฏสัญลักษณ์  Click ให้หัววัดเคลื่อนที่ลงให้ใกล้ฐานมากที่สุด แล้วเลือก Continue เครื่องจะส่งสัญญาณไปที่ TA Instrument รอจนกระทั่งเครื่องทำงานเสร็จ เครื่องจะถามว่า *Head Zero complete. Do you want to raise the head to the back off distance* ให้ตอบ yes

5.1.11 นำตัวอย่างเจลสตาร์ชจากข้าววางบน Plate และ Click เครื่องหมาย  เป็นการเลื่อนหัววัดลงมาที่ตัวอย่าง ทำการ trim ตัวอย่าง

5.1.12 Click Run

5.1.13 เครื่องจะให้ตั้งชื่อไฟล์ ใน folder ของตัวเองเพื่อเก็บข้อมูล เมื่อทุกอย่างพร้อม click OK 

5.1.14 เมื่อวัดตัวอย่างเสร็จแล้ว click เครื่องหมาย  เป็นการเลื่อนหัววัดขึ้น นำตัวอย่างออก แล้ววัดตัวอย่างต่อไปโดยเริ่มจากข้อ 5.1.11

5.2 ขั้นตอนการปิดเครื่อง

5.2.1 เมื่อใช้เสร็จเรียบร้อยแล้ว click เลื่อนหัววัดขึ้น

5.2.2 File Exit

5.2.3 ถอดปลั๊ก pump

5.2.4 ปิดเครื่อง TA (สวิสซ์ที่ด้านหลัง)

5.2.5 ถอดหัววัดออก แล้วใส่หัวครอบสีดำกลับเข้าที่เดิม

5.2.6 ปิด air pump

5.3 วัดค่า LVR (Linear Viscoelastic Region)

5.4 วิเคราะห์ผลเพื่อคำนวณ LVR

5.4.1 ทำการสร้างกราฟ โดย click พื้นที่ข้อมูล ต้องการสร้างกราฟ เลือกกราฟ xy(scatter) ตั้งชื่อ chart title , value x , y

5.4.2. เลือก As new sheet จะได้ sheets เพิ่มอีก 1 sheets ซึ่งเป็นกราฟ ต่อจากนี้ double click แกน x ก่อน

แก้ไขโดย Click ☒ ออกไป ตั้งค่าใหม่

Minimum	0.01
Maximum	100
Major unit	10
Minor unit	10

Cross at Y 0.01

Click เลือก ☒ logarithmic Scale

แก้ไข ที่แกน Y เช่นเดียวกัน

Minimum 1

Maximum

Major unit

Minor unit

} ไม่ต้องเปลี่ยน

Cross at X 1

Click เลือก ☒ logarithmic Scale

เมื่อได้ค่า G' , G'' เป็นเส้นตรง ; Click ลากเส้นตรง ผ่าน 5 จุด