



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปรัชญาคุษฎีบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์การอาหาร

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การดัดแปรแป้งข้าวโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้นและการประยุกต์ใช้ในอาหาร

Hydrothermal Modification of Rice Flour and its Application in Food

นามผู้วิจัย นางสาวดี แซ่ม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ปริศนา สุวรรณภรณ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์น้ำฝน ลำดับวงศ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรัณวี จิระภักย์กุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การดัดแปรแป้งข้าวโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้นและการประยุกต์ใช้ ในอาหาร

Hydrothermal Modification of Rice Flour and its Application in Food

โดย

นางสุภาวดี แซ่ม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุภาวดี แซ่ม 2556: การดัดแปรแป้งข้าวโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้นและการประยุกต์ใช้ในอาหาร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร) สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชา
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์
ปริศนา สุวรรณารักษ์, Ph.D. 117 หน้า

Heat moisture treatment (HMT) และ Annealing (ANN) เป็นการดัดแปรแป้งโดยใช้ความร้อน
ร่วมกับความชื้นเพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการดัดแปร
แป้งข้าวแอมิโลสสูง (พันธุ์ชัยนาท1; CN1) และแอมิโลสปานกลาง (พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105; KDML105) ด้วยวิธี
HMT และ ANN เพื่อพัฒนาคุณภาพแป้งให้สามารถนำไปใช้ในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวและเป็นสารให้ความชื้นหนืด
ในอาหาร โดยใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ศึกษาสภาวะในการดัดแปรแป้งข้าว คือ ปริมาณความชื้น (18 22.5 และ
27%) อุณหภูมิ (90 105 และ 120 °C) และเวลา (1 2 และ 3 h) ต่อคุณสมบัติด้านความหนืด วิทยากระแส และ
ลักษณะเนื้อสัมผัส ค่าตอบสนองที่ได้จากสมการถดถอยแบบพหุมีความเหมาะสมในการทำนายโดยมีค่า $R^2 > 0.85$
คือ Final viscosity, Set back, Storage modulus (G') ที่ 95 °C และ 25 °C, Hardness, Springiness, To และ ΔH ถูก
นำมาใช้เป็นสมการในการหาสภาวะที่เหมาะสม พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของแป้ง CN1 และแป้ง KDML105 ดัด
แปรด้วยวิธี HMT ที่ความชื้น 22.5 % อุณหภูมิ 105 °C เวลา 2 h มีคุณภาพไม่แตกต่างจากแป้งข้าวที่เก็บรักษาเป็น
เวลา 4 เดือน ($p > 0.05$) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการทำเส้นก๋วยเตี๋ยว สภาวะที่เหมาะสม ในการดัดแปรแป้งข้าวพันธุ์
CN1 แบบ ANN ที่อุณหภูมิ 65 °C ความชื้น 60 % เวลา 24 h แบบ HMT ที่อุณหภูมิ 105 °C ความชื้น 22.5% นาน
2 h และ แบบ HMT ที่อุณหภูมิ 105 °C ความชื้น 27 % เป็นเวลา 2 h ได้แป้งที่เหมาะสมสำหรับทำก๋วยเตี๋ยวเส้นสด
เส้นเล็กกึ่งแห้ง และเส้นเล็กอบแห้ง ตามลำดับ โดยใช้แป้งการค้า PS1[®] PS2[®] และ PS3[®] (บริษัท เนชั่นเนลสตาร์ช
แอนด์ เคมีเคิลไทยแลนด์ จำกัด) เป็นค่าตอบสนองเป้าหมาย นอกจากนี้การดัดแปรแป้งข้าวเพื่อใช้เป็นสารให้ความ
ชื้นหนืดในผลิตภัณฑ์ ซอสมะเขือเทศ น้ำสลัด และคัสตาร์ดครีม พบว่าการดัดแปรแป้งข้าว KDML105 ด้วยวิธี
HMT ที่อุณหภูมิ 120 °C ความชื้น 27% เวลา 2 h ให้ค่าตอบสนองที่ไม่แตกต่างจากแป้งดัดแปรทางการค้า (NL[®];
บริษัท เนชั่นเนลสตาร์ชแอนด์ เคมีเคิลไทยแลนด์ จำกัด) การใช้แป้งข้าวดัดแปรทางกายภาพสามารถพัฒนาคุณภาพ
ของแป้งให้ใกล้เคียงกับแป้งการค้าอย่างไรก็ตามสภาวะในการดัดแปรขึ้นกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แป้ง
ดัดแปรแบบความร้อนร่วมกับความชื้น มีความปลอดภัยและถูกกว่าแป้งดัดแปรทางเคมี

Supawadee Cham 2013: Hydrothermal Modification of Rice Flour and its Application in Food.

Doctor of Philosophy (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Associate Professor Prisana Suwannaporn, Ph.D. 117 pages.

Heat-moisture treatment (HMT) and annealing (ANN) are hydrothermal treatments used in modifying the physicochemical properties of flour. This research studied the effects of HMT and ANN on high amylose (Chai Nat 1 variety; CN1) and medium amylose (Khaw Dawk Mali 105 variety; KDML 105) rice flour. The research aimed to improve rice flour quality in order to apply in rice noodle making and thickening agent in foods. Response surface methodology (RSM) was applied to optimize the hydrothermal treatment conditions – moisture content (18 22.5 and 27%); heating temperature (90 105 and 120 °C) and heating time (1 2 and 3 h.) on pasting; rheology; and textural properties. The responses studied were better explained by a second-order model. Predictive model with high fitting ($R^2 > 0.85$), final viscosity, setback, hardness, springiness, G' 95 °C, G' 25 °C, T_o and ΔH , were selected for optimization. Result showed that the optimization for KDML105 and CN1 by HMT at 105 °C, 22.5% moisture content for 2 h. gave similar responses to those of 4 months old rice flour ($p > 0.05$) which was suitable for rice noodle making. The optimum condition for CN1 by ANN at 65 °C 60% moisture content for 24 h was suitable for fresh rice noodle making. The optimum condition for HMT at 105 °C 22.5% moisture content for 2 h and 105 °C 27% moisture content for 2 h were suitable for semi-dry and dry rice noodle making respectively. Those flours gave responses which were not significant different from those of commercial flours (PS1[®], PS2[®] and PS3[®]; National Starch and Chemical Thailand Co., Ltd). Moreover, rice flour was also modified to be used as thickening agent in tomato sauce, salad cream and custard cream. Result showed that rice flour (KDML105) which was HMT at 120 °C 27% moisture content for 2 h obtained responses which were not significantly different from commercial flour (NL[®], National Starch and Chemical Thailand Co., Ltd) ($p > 0.05$). The hydrothermal modified rice flour could improve native rice flour's quality, however its modifying conditions depended on products' quality requirement. Hydrothermal treated rice flour was safer and cheaper than chemically modification.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ปรีศนา สุวรรณภรณ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก และ ผศ.ดร. น้ำฝน ลำดับวงศ์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา
ในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และขอกราบ
ขอบพระคุณประธานควบคุมการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย และ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ผู้แทนบัณฑิต
วิทยาลัย ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสาทวิชาความรู้และให้คำแนะนำที่ดี
ทั้งด้านวิชาการ และประสบการณ์ชีวิต ที่ล้วนแต่มีประโยชน์ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาของ
การศึกษา และการทำวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่อนุมัติทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ โดย
ทุนที่ได้รับ คือ ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติและ
ระดับนานาชาติ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี พ.ศ. 2550

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ สามี และน้องสาว ที่คอยเป็นกำลังใจในการ
เรียนให้สำเร็จ และขอบใจน้องๆ ในภาควิชาทุกคนที่ให้กำลังใจ

สุภาวดี แซ่ม

มีนาคม 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	21
อุปกรณ์	21
วิธีการ	22
ผลและวิจารณ์	34
สรุปและข้อเสนอแนะ	64
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	65
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์สมบัติของแป้งข้าว และแป้งข้าวคัดแปร	75
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์	78
ภาคผนวก ค สูตรการทำผลิตภัณฑ์	81
ภาคผนวก ง สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวคัดแปร HMT และ ANN	83
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ทางสถิติ	96
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	117

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สภาวะที่ใช้ในการตัดแปรร่วมด้วยความร้อนร่วมกับความชื้นในวัตถุดิบต่างๆ	4
2	สภาวะที่ใช้ในการตัดแปรร่วมวิธี Annealing ที่ปริมาณความชื้นมากกว่า 60 % ในวัตถุดิบต่างๆ	10
3	การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณแอมิโลส	16
4	อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน อุณหภูมิเจลาไทไนเซชัน และอุณหภูมิหลอมเหลวของ แป้งข้าว	26
5	ค่ารหัสแผนการทดลองแบบ FCCD ของอุณหภูมิ เวลา และความชื้นที่ใช้ กำหนดสิ่งทดลองในการตัดแปรร่วมแป้งข้าวทั้งสองพันธุ์ด้วยวิธี HMT	27
6	ค่ารหัสแผนการทดลองแบบ FCCD ของอุณหภูมิ และเวลา ที่ใช้กำหนด สิ่งทดลองในการตัดแปรร่วมทางกายภาพของแป้งข้าวด้วยวิธี ANN	28
7	ค่าสัมประสิทธิ์และค่า R^2 ของสมการถดถอยของแป้ง KDML 105 ตัดแปรร่วมด้วยวิธี HMT	35
8	ค่าสัมประสิทธิ์และค่า R^2 ของสมการถดถอยของแป้งข้าว CN1 ตัดแปรร่วม ด้วยวิธี HMT	36
9	ค่าสัมประสิทธิ์และค่า R^2 ของสมการถดถอยของแป้งข้าว KDML 105 ตัดแปรร่วม ด้วยวิธี ANN	44
10	ค่าสัมประสิทธิ์และค่า R^2 ของสมการถดถอยของแป้งข้าว CN 1 ตัดแปรร่วมด้วยวิธี ANN	45
11	คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง KDML105 และ แป้ง CN1 ที่อายุการเก็บ 4 เดือน	52
12	ค่าตอบสนองของแป้งข้าวตัดแปรร่วม HMT ในสภาวะการตัดแปรร่วมที่เหมาะสม	54
13	ค่าคุณลักษณะทางกายภาพของแป้งตัดแปรร่วมทางการค้าเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์เส้น ก๋วยเตี๋ยว	55
14	การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการการทำนายและค่าจากการตรวจสอบจริง โดย ใช้ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ของแป้งตัดแปรร่วมที่ใช้ผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว	58

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
15	คุณภาพการหุงต้ม และคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวชนิดต่างๆ ที่ผลิตจากแป้งข้าวคั่วแปรรูปจากสภาวะการคัดแปรรูปจากสมการการทำนาย เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผลิตจากแป้งทางการค้า	59
16	ค่าตอบสนองของแป้งคัดแปรรูปในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากสมการการทำนาย และจากการตรวจสอบ เพื่อใช้เป็นสารให้ความข้นหนืด	62
17	คุณภาพทางเคมีกายภาพ ของผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้สารให้ความหนืดจากสภาวะคัดแปรรูปจากสมการการทำนาย เปรียบเทียบกับสารให้ความหนืดทางการค้า (NL [®])	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
1 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว KDML105 ดัดแปรด้วยวิธี HMT จากแผนการ ทดลองแบบ FCCD	84
2 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว KDML105 ดัดแปรด้วยวิธี ANN จากแผนการทดลองแบบ FCCD	88
3 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว CN1 ดัดแปรด้วยวิธี HMT จาก แผนการทดลองแบบ FCCD	90
4 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว CN1 ดัดแปรด้วยวิธี ANN จาก แผนการทดลองแบบ FCCD	94
5 การวิเคราะห์ ANOVA ของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว KDML105 ดัดแปรด้วยวิธี HMT	97
6 การวิเคราะห์ ANOVA ของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว CN1 ดัดแปรด้วยวิธี HMT	102
7 การวิเคราะห์ ANOVA ของ คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว KDML105 ดัดแปรด้วยวิธี ANN	107
8 การวิเคราะห์ ANOVA ของ คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว CN1 ดัดแปรด้วยวิธี ANN	112

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สภาวะการดัดแปรสสารวิธี Annealing และ Heat moisture treatment	3
2	ผลของการ Annealing ต่อการจัดเรียงตัวของเอมิโลเพกทินในสสารซ์เกรนูล	13
3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการดัดแปรแป้ง KDML 105 ด้วยวิธี HMT (a) Final viscosity (b) Setback (c) G' (95 °C) (d) G' (25 °C) (e) Hardness (f) Springiness (g) To (h) ΔH	39
4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการดัดแปรแป้งข้าว CN1 ด้วยวิธี HMT (a) Final viscosity (b) Setback (c) G' (95 °C) (d) G' (25 °C) (e) Hardness (f) Springiness (g) To (h) ΔH	41
5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการดัดแปรแป้งข้าว KDML 105 ด้วยวิธี ANN (a) Final viscosity (b) Setback (c) G' (95 °C) (d) G' (25 °C) (e) Hardness (f) Springiness (g) To (h) ΔH	48
6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการดัดแปรแป้งข้าว CN1 ด้วยวิธี ANN ต่อ (a) Final viscosity (b) Setback (c) G' (95 °C) (d) G' (25 °C) (e) Hardness (f) Springiness (g) To (h) ΔH	50
7	สภาวะดัดแปรที่เหมาะสม (optimization) ของแป้งข้าวดัดแปร (a) KDML105 (b) CN1 ที่มี ค่า response ของแป้งข้าวอายุ 4 เดือนเป็นค่าเป้าหมาย	53
8	สภาวะดัดแปรที่เหมาะสม (optimization) ของแป้งข้าวดัดแปร (a) กว๊านเตี้ยเส้นสด (b) กว๊านเตี้ยเส้นเล็กกึ่งแห้ง (c) กว๊านเตี้ยเส้นเล็กอบแห้ง ที่มีค่า response ของแป้งข้าวทางการค้า PS1 [®] , PS2 [®] และ PS3 [®] (บริษัท เนชั่นเนล สตาร์ช แอนด์ เคมีเคิลไทยแลนด์ จำกัด) เป็นค่าเป้าหมาย	57
9	สภาวะดัดแปรที่เหมาะสม (optimization) ของแป้งข้าวดัดแปร ใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดที่มีค่าตอบสนองของแป้งดัดแปรทางการค้า (NL [®] ; บริษัทบิรียัท เนชั่นเนล สตาร์ช แอนด์ เคมีเคิลไทยแลนด์ จำกัด) เป็นค่าเป้าหมาย	61

การดัดแปรแป้งข้าวโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้นและการประยุกต์ใช้ในอาหาร

Hydrothermal Modification of Rice Flour and its Application in Food

คำนำ

อุตสาหกรรมการผลิตอาหารจากแป้งข้าว มักประสบปัญหาข้อจำกัดเนื่องจากคุณสมบัติของแป้งข้าว เช่น คุณภาพเนื้อสัมผัส การไม่ทนต่อความร้อน แรงเฉือน และกรด ในกระบวนการผลิต ซึ่งคุณภาพของเจลขึ้นกับพันธุ์ข้าว ปริมาณเอมิลอส และ อายุการเก็บ (Pitiphunpong and Suwannaporn, 2009; Takahashi et al., 2005) ปัจจุบันมีการนำแป้งมาดัดแปรทางเคมี มาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพดังกล่าว ซึ่งมักมีปัญหาคงตัวของผู้บริโภค งานวิจัยนี้จึงมุ่งนำแป้งข้าวมาดัดแปรโดยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น (Hydrothermal Modification) ซึ่งเป็นการดัดแปรทางกายภาพ ไม่มีการใช้สารเคมีในขั้นตอนการดัดแปร ทำให้แป้งข้าวที่ได้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคและลดการใช้สารเคมี ซึ่งการดัดแปรโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้นมี 2 วิธี คือ Annealing (ANN) และ Heat moisture treatment (HMT) ปัจจัยการดัดแปร คือ ระดับความชื้นในสตาร์ชแกรนูล อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการดัดแปร เพื่อให้แป้งข้าวดัดแปรทั้งสองมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยสร้างแบบจำลองสมการการทำนายค่าสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าวดัดแปรที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารได้แก่ ลักษณะเนื้อสัมผัสที่เหนียว และยืดหยุ่น เส้นก๋วยเตี๋ยว และการใช้เป็นสารให้ความข้นหนืด และความคงตัว (Stability) แก่ผลิตภัณฑ์ซอสมะเขือเทศ น้ำสลัด และคัสตาร์ด

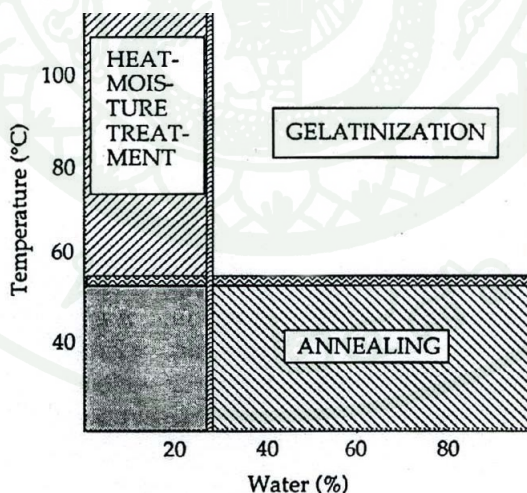
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการทำดัดแปรด้วยวิธี Annealing (ANN) และ Heat moisture treatment (HMT) ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ พันธุ์ชัยนาท 1
2. เพื่อหาสภาวะการดัดแปรที่เหมาะสมและใช้เป็นแบบจำลองสมการทำนายค่าตอบสนองของแป้งข้าวดัดแปรทางกายภาพ เพื่อใช้เปรียบเทียบคุณสมบัติแป้งข้าวที่อายุการเก็บ 4 เดือน
3. เพื่อหาสภาวะการดัดแปรที่เหมาะสมและใช้เป็นแบบจำลองสมการทำนายค่าตอบสนองของแป้งข้าวดัดแปรทางกายภาพที่ได้ และเปรียบเทียบกับคุณสมบัติแป้งข้าวดัดแปรทางการค้าที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวเส้นสด เส้นเล็กกึ่งแห้ง และเส้นเล็กอบแห้ง
4. เพื่อหาสภาวะการดัดแปรที่เหมาะสมและใช้เป็นแบบจำลองสมการทำนายค่าตอบสนองของแป้งข้าวดัดแปรทางกายภาพที่ได้และเปรียบเทียบกับคุณสมบัติแป้งข้าวดัดแปรทางการค้าที่ใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดในซอสมะเขือเทศ น้ำสลัด และไส้คัสตาร์ด

การตรวจเอกสาร

1. การดัดแปรโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น (Hydrothermal modification)

การดัดแปรโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น เป็นวิธีการดัดแปรทางกายภาพวิธีหนึ่งที่มีขั้นตอนการผลิตที่ไม่ใช้สารเคมีและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม มีผลทำให้สมบัติของสตาร์ชเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการจัดเรียงตัวภายในโมเลกุลของสตาร์ชแกรนูล (Lim *et al.*, 2001) โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของสตาร์ชแกรนูล (Stute, 1992 ; Jacobs and Delcour, 1998) การดัดแปรโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้นแบ่งได้ 2 วิธี คือ Annealing (ANN) และ Heat moisture treatment (HMT) ทั้ง ANN และ HMT มีความเกี่ยวข้องกับระดับความชื้นในสตาร์ชแกรนูล อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการทำดัดแปร Collado and Corke (1999) ได้อธิบายความหมายของ ANN ว่าเป็นการดัดแปรทางกายภาพของสตาร์ชแกรนูลในสถานะที่มีความชื้นมากเกินไป โดยใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าการเกิดเจลลิตีในเซชัน แต่ HMT เป็นการทำให้สตาร์ชแกรนูลที่ถูกจำกัดปริมาณความชื้นในช่วง 18-27 % ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งส่วนมากเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน โดยอุณหภูมิที่ใช้จะแตกต่างกันตามชนิดของสตาร์ช ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สถานะการดัดแปรสตาร์ชวิธี Annealing (ANN) และ Heat moisture treatment (HMT)

ที่มา: Eliasson and Gudmundsson (1996)

1.1 การดัดแปรด้วยวิธี Heat moisture treatment (HMT)

HMT เป็นการให้ความร้อนสตาร์ชมากกว่า 100°C ที่ระดับความชื้นประมาณ 18-27 % โดยใช้เวลานาน ซึ่งเวลาที่ใส่จะแปรผันกับอุณหภูมิ และปริมาณน้ำที่ใช้ สภาวะที่ใช้ในการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีนี้มีหลายสภาวะดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาวะที่ใช้ในการดัดแปรด้วยความร้อนร่วมกับความชื้นในวัตถุดิบต่างๆ

วัตถุดิบ	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา	ปริมาณความชื้น (%)
ข้าวโพด	100 – 120	2 h	30
	120	15 – 60 min	20
	120 – 130	–	13.5
	125	20 min.	-
	110	30 min.	-
	120	1 h	25 - 30
	120 - 130	20 min.	-
	121	1 min.	-
	100	16 h	18 – 27
	110	1 h	15 – 25
ข้าว	100 – 110	0.5 – 1.5 h	15 – 25
	100	16 h	18 – 27
	120	1h	20.6
	136 - 140	0.5 - 1 h	20
	105 -120	0.5 - 3 h	
	120	0.5 - 3 h	25
	100 - 121	10 - 20 min.	-
	100	10 h	30
มันสำปะหลัง	100	10 h	30

ตารางที่ 1 (ต่อ)

วัตถุดิบ	อุณหภูมิ (°C)	เวลา	ปริมาณความชื้น (%)
Canna	100	10 h	30
	110	3 – 16 h	18 – 24
	100	16 h	18 – 25
	120	1 h	20 - 25
	110	4 – 16 h	25
มันเทศ	110	3 h	27 - 30
	100	10 h	30
ถั่ว	100	16 h	18 - 27
เผือก	100	10 h	30
Borlotti bean	100	16 h	22
Chickpea	100	16 h	22
มะม่วงหิมพานต์	110	3 h	25–28

ที่มา: Elessandra and Alvaro (2011)

ผลของการดัดแปรด้วยวิธี HMT ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

1. ผลต่อสมบัติด้านความหนืด (pasting properties)

สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าว วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัด Rapid Visco Analyser (RVA) พบว่า การดัดแปรด้วยวิธี HMT มีผลทำให้ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ของสตาร์ชมันฝรั่ง (Stute, 1992) มันสำปะหลัง (Abraham, 1993) มันเทศ (Collado and Corke, 1999) แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวแอมิโลสต่ำ (Lai, 2001) มีค่าความหนืดสุดท้ายที่สูงขึ้น เป็นผลทำให้เจลเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากขึ้นและทำให้ค่าเซตแบคมีค่าสูงขึ้น (Stute, 1992; Abraham, 1993) Lai (2001) พบว่า การเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเหนียว (แอมิโลส 1.2 %) มีค่า final viscosity และ setback สูงขึ้น ซึ่งการที่ความหนืดสุดท้ายมีค่าสูงขึ้นแสดงว่าโมเลกุลภายในสตาร์ชแกรนูลถูกปรับเปลี่ยนในระหว่างการ HMT เป็นสาเหตุให้เกิดความสูญเสียความสมบูรณ์ของสตาร์ชแกรนูล

และโครงสร้างผลึกถูกทำลาย ส่งผลให้เกิดสมบัติการละลายได้ในน้ำเย็นทำให้แป้งข้าวแอมิโลสต่ำมีค่า final viscosity สูงขึ้น ส่วนแป้งข้าวแอมิโลสสูงจะมีค่า final viscosity สูงขึ้นเมื่อตัดแปรโดยใช้ระดับความชื้นสูงพร้อมให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน ค่า setback มีค่าสูงขึ้นในทุกระดับของการตัดแปร ซึ่งการที่ค่า final viscosity เพิ่มขึ้นในแป้งข้าวทั้งสองชนิด เป็นผลจากการที่โมเลกุลของแอมิโลส ถูกชะออกมา จึงทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้อย่างรวดเร็วภายหลังการเกิดเจลลิตีในเซชัน และระหว่างขั้นตอน HMT การยึดเกาะกันของโมเลกุลแอมิโลส ของแป้งข้าวที่เกิดเจลลิตีในเซชันนี้มีความแข็งแรงมาก แสดงให้เห็นว่าส่วนอสัณฐานของสตาร์ชแกรนูลเป็นส่วนแรกที่ได้รับผลกระทบจากการตัดแปร ส่วนที่สองที่เป็นไปได้คือโมเลกุลของแอมิโลส ซึ่งระดับของการยึดเกาะกันอีกครั้งของโมเลกุลแอมิโลส ช่วยเพิ่มความคงทนต่อแรงเฉือนของแกรนูลและทำให้ค่า setback สูงขึ้น การตัดแปรในระดับที่สูงขึ้น มีผลให้การพองตัวของแกรนูลถูกยับยั้ง ทำให้ค่า setback ต่ำลง (Stute, 1992) และพบว่า การตัดแปรแป้งข้าวจากปอนิกาด้วยวิธี HMT โดยใช้ตู้อบลมร้อน ทำให้ค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด และความหนืดสูงสุดมากขึ้นกว่าแป้งปกติ ในทุกช่วงความเป็นกรด-ด่าง ตั้งแต่ 2.8 ถึง 6.3 แสดงถึงความคงทนต่อความเป็นกรด ความร้อน และแรงเฉือนของแป้งตัดแปรสตาร์ช ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอาหารที่มีความเป็นกรดได้ (Takahashi *et al.*, 2005)

2. ผลต่อสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชัน

สมบัติทางความร้อนของการเกิดเจลลิตีในเซชัน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) พบว่า ในสตาร์ชข้าวสาลี มันฝรั่ง มันเทศ มันสำปะหลัง ข้าวโพด ถั่ว เผือก และแป้งข้าว มีค่า T_o (onset temperature), T_p (peak temperature) และ T_c (conclusion temperature) ของการเจลลิตีในเซชันสูงขึ้น (Collado and Corke, 1999; Takaya *et al.*, 2000; Lai, 2001; Lim *et al.*, 2001; Miyoshi, 2002; Gunaratne and Hoover, 2002) แป้งข้าวแอมิโลสต่ำ ปานกลาง และสูง ทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันสูงขึ้น แต่เอนทัลปีของการเกิดเจลลิตีในเซชันลดลง และความกว้างพีคมากขึ้น (พิณทิพย์, 2547; พัลลภ, 2549; Lai, 2001; Takahashi *et al.*, 2005) แป้งข้าวเหนียวตัดแปร (แอมิโลสต่ำ) มีระดับการเกิดเจลลิตีในเซชันมากกว่าแป้งข้าวเจ้าตัดแปร (แอมิโลสสูง) เนื่องจาก HMT ทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพของส่วนอสัณฐานที่อยู่ท่ามกลางโครงสร้างผลึก (intercrystalline amorphous regions) มาอยู่ในส่วนของอสัณฐานแทน ซึ่งอาจทำให้สายโซ่สั้นๆ ในโครงสร้างผลึกมีความเป็นอิสระมากขึ้น และเกิดการเรียงตัวใหม่ของผลึก (recrystallization) ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกกลุ่มเล็กๆนี้ทำให้สตาร์ชมีความคงตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงขึ้น (Lai, 2001)

นอกจากนี้ การตัดแปรรสตา์รซ์ในข้าวด้วยวิธีนี้ ยังพบฟิสิกที่บ่งบอกถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับลิปิด ที่อุณหภูมิสูงกว่าที่พบในตัวอย่างที่ไม่ผ่านการตัดแปรร จึงสันนิษฐานว่า การตัดแปรรวิธีนี้อาจทำให้เกิดการเรียงตัวกันใหม่ของสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับลิปิด (Takahashi *et al.*, 2005) ในตัวอย่างชนิดอื่นพบการเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่เหมือนกับที่พบในข้าว เช่น การตัดแปรรสตา์รซ์ข้าวฟ่าง ข้าวโพด มันฝรั่ง ถั่วบางชนิด มันเทศ และเผือก สตา์รซ์ตัดแปรรมีอุณหภูมิการเกิดเจลลาทิในซ้สูงซ้ขึ้น และเอนทัลปีของการเกิดเจลลาทิในซ้ต่ำลง (Takaya *et al.*, 2000; Lim *et al.*, 2001; Gunaratne and Hoover, 2002; Miyoshi, 2002; Adebawale and Lawal, 2003; Adebawale *et al.*, 2005; Vermeulen *et al.*, 2006) โดย HMT มีผลทำให้พลังงานเอนทัลปีที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกของสตา์รซ์มีค่าต่ำลง เนื่องจากบางส่วนของเกลียวคู่ในโครงสร้างผลึกและในส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างผลึกถูกทำลายไปภายใต้สภาวะของการทำ HMT จึงทำให้ในระหว่างการเกิดเจลลาทิในเซชันของสตา์รซ์ที่ผ่านการ HMT นั้น มีการคลายเกลียวและหลอมเหลวของเกลียวคู่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสตา์รซ์ที่ไม่ผ่านการตัดแปรร (Perera *et al.*, 1997; Gunaratne and Hoover, 2002)

3. ผลต่อสมบัติเนื้อสัมผัสของเจล

HMT มีผลต่อเนื้อสัมผัสของเจลสตา์รซ์ โดย Hormdok และ Noomhorm (2007) ทำการศึกษาผลของ HMT ในแป้งข้าว และได้ข้อสรุปว่าความแข็งของเจลเพิ่มขึ้น เมื่อตัดแปรรที่ความซ้ 15 และ 20% การเพิ่มขึ้นของความแข็งของเจลมีผลต่อโครงสร้างร่างแหของเจล โดยเฉพาะส่วนของแอมิโลส ส่งผลให้มีความแข็งของเจลสูงซ้ขึ้น (Liu *et al.*, 2001) Collado และ Corke (1999) ตัดแปรรแป้งมันด้วยวิธี HMT พบเจลของแป้งมีความคงทนต่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เจลมีลักษณะแข็งและแน่นเนื้อ Liu *et. al.* (2000) รายงานว่า การใช้อุณหภูมิสูงและความซ้ในการตัดแปรรทำให้สตา์รซ์แกรนูลมีความเป็นผลึกที่สมบูรณ์มากขึ้น ทำให้สตา์รซ์แกรนูลที่พองตัวได้น้อยลง และสมบัติวิทยากระเสดซ้ขึ้น แต่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะหรือการเสียรูปของสตา์รซ์แกรนูล และโครงร่างตาข่ายระหว่างแอมิโลสและแอมิโลเพกติน ดังนั้นหลังการตัดแปรรเจลจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Hoover and Manuel, 1996) การตัดแปรรสตา์รซ์ด้วย HMT สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัสของอาหารหลายชนิด เช่น เป็นสารดูดซ้บน้ำทำให้เกิดเจล ให้ความซ้หนืด และทดแทนไขมัน (Miyoshi, 2002) เส้นหมีจากสตา์รซ์มันฝรั่งตัดแปรรด้วยวิธี HMT ผสมกับแป้งข้าวโพด 50 % โดยปรับความซ้เป็น 27-30 % นำไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C นาน 3 h พบว่า เส้นหมีบแห้งที่ได้สามารถดูดน้ำเพิ่มขึ้นมากในระหว่างการคืนรูป และมีเนื้อสัมผัสแน่นแข็งกว่าเส้นหมีจากแป้งข้าวปกติ (Collado *et al.*, 2001)

4. ผลต่อลักษณะของสตาร์ชแกรนูล

HMT มีผลต่อรูปร่างลักษณะของสตาร์ชแกรนูล โดยสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการ HMT ที่ระดับความชื้น 18, 21, 24 และ 27 % อุณหภูมิ 100 °C นาน 16 h เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชแกรนูลทั้งขนาด รูปร่าง รอยแตก หรือ ลักษณะที่ผิวด้านนอกเดิม (Franco *et al.*, 1995) สตาร์ชมันสำปะหลัง ถูกดัดแปรโดยวิธีต่าง ๆ คือ ความร้อนชื้นภายใต้ความดัน ความร้อนแห้ง และความร้อนจากรังสีไมโครเวฟ พบว่า มีผลทำให้สตาร์ชแกรนูลเกิด เจลาติไนเซชันได้บางส่วน (9-24 %) แต่โครงสร้างภายนอกของแกรนูลสตาร์ช ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง (Abraham, 1993) สตาร์ชมันฝรั่งดัดแปรโดยการใช้ไอน้ำในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 °C นาน 30 min. และสตาร์ชข้าวโพดที่อุณหภูมิ 125 °C ระยะเวลา 5 หรือ 20 min. พบว่าสตาร์ชแกรนูลเกิดการเปลี่ยนแปลงคือ ลักษณะของไบรฟรินเจนซีไม่ชัดเจนเหมือนเดิม และเกิดสีดำบริเวณส่วนกลางของสตาร์ชแกรนูลจากการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจากโพลาไรเซชัน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าผิวหน้าของสตาร์ชมันฝรั่งมีรอยแตก และเกิดการยุบตัวที่บริเวณกึ่งกลางของสตาร์ชแกรนูลข้าวโพด จากภาพตัดขวาง แสดงให้เห็นว่ามีโพรงเกิดขึ้นบริเวณ ตรงกลาง ขนาดประมาณหนึ่งในสามของสตาร์ชแกรนูล (Kawabata *et al.*, 1994) การดัดแปรสตาร์ชถั่วพินธุ์มูนา (mucuna bean starch) ที่สภาวะความชื้น 18 21 24 และ 27 % อุณหภูมิ 100 °C 16 h ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง (Adebowale and Lawal, 2003) เช่นเดียวกับในสตาร์ชแกรนูลดัดแปรจากมันฝรั่ง (potato starch) (Perera *et al.*, 1997) ข้าวโพด (maize starch) (Liu *et al.*, 2000) และเมล็ดข้าวฟ่าง (finger millet starch) (Adebowale *et al.*, 2005)

5. ผลต่อความเป็นผลึก

สตาร์ชแป้งข้าวมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบเอ (A type) ซึ่งเป็นแบบที่พบบ่อยในสตาร์ชจากธัญพืชโดยจะพบตำแหน่งความเป็นผลึกจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (x-ray diffractometer) ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 15 องศา จำนวน 1 พีค ที่ 17-18 องศา จำนวน 2 พีค เชื่อมต่อกัน และ 23 องศา จำนวน 1 พีค แป้งข้าวแอมิโลสต่ำมีความเป็นผลึกมากกว่าแป้งข้าวเจ้า ซึ่งมีแอมิโลสสูงกว่า เนื่องจากโมเลกุลของแอมิโลเพกทินที่สามารถเกิดเป็นเกลียวคู่เป็นส่วนใหญ่ทำให้เกิดโครงสร้างผลึกของสตาร์ช HMT ทำให้แป้งข้าวมีโครงสร้างผลึกแบบเอ ในแป้ง KDML105 ซึ่งมีแอมิโลสปานกลาง และแป้งข้าวปทุมธานี 60 ซึ่งมีแอมิโลสสูง หลังจากผ่านการดัดแปรแล้วปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 13 และ 20 องศา ชัดเจนขึ้น แสดงถึงมีโครงสร้างผลึกแบบวี (V-type) เกิดขึ้น บ่งชี้การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับลิพิด (amylose lipid complex)

(พิณทิพย์, 2547) ในการทดลองดัดแปรสตาร์ชมันฝรั่ง โดยใช้อุณหภูมิสูงกว่า 120°C ทำให้มีความเป็นผลึกมากขึ้น และมีโมเลกุลสตาร์ชเสียหาย (danged starch) เพิ่มขึ้นด้วย จึงคาดว่า HMT ที่ใช้ ความร้อนที่สูงเกินไปจะไปทำลายพันธะโควาเลนต์ จนทำให้เอมิโลเพกทินเกิดการคลายเกลียวคู่เป็นจำนวนมากเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่มาเรียงตัวกันเป็นผลึกรูปแบบใหม่ที่ใหญ่ และมีความสมบูรณ์ขึ้น และภายหลังการทำ HMT พบว่ามีความหนาแน่นของผลึกเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากสตาร์ชชนิดนี้มีเอมิโลสในปริมาณสูง (86.5%) ทำให้เกิดการยึดเกาะกันของสายเอมิโลส ในระหว่างการทำ HMT และสายเกลียวคู่ในโครงสร้างผลึกเกิดการเคลื่อนที่ไปจัดเรียงตัวกันใหม่ได้ ทำให้เกิดมีผลึกมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของผลึกมีค่าสูงขึ้น (Hoover and Manuel, 1996; Vermeulen *et al.*, 2006)

1.2 การดัดแปรด้วยวิธี Annealing (ANN)

การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธี ANN โดยมีการควบคุมอุณหภูมิ และเวลา สภาวะที่ใช้ในการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีนี้มีหลายสภาวะดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ในการดัดแปรวิธี Annealing ที่ปริมาณความชื้นมากกว่า 60 % ในวัตถุดิบ
ต่างๆ

วัตถุดิบ	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (h)	ปริมาณน้ำต่อน้ำหนักวัตถุดิบ
มันฝรั่ง	50	24 h	1:2 (w/w)
	20 - 50	72 h	1:10 (w/w)
	48 - 53	24 h	1:2 (w/w)
ข้าวบาร์เลย์	29 - 31	0.5 - 4 h	มากเกินไป
	50	72 h	มากเกินไป
ข้าวโพด	30 - 50	72 h	มากเกินไป
	10 - 15	24 h	มากเกินไป
	25 - 65	72 h	มากเกินไป
ข้าวโพดข้าวเหนียว	55	168 h	มากเกินไป
มันปะหลังหมัก	50	72 - 240 h	1:5 (w/w)
มันสำปะหลัง	50	24 - 192 h	1:5 (w/w)
	50	24 h	1:2 (w/w)
เลซิน	10 - 15	24 h	มากเกินไป
ข้าว	45 - 55	16 h	1:3 (w/w)
	45 - 55	8 - 24 h	1:3 (w/w)
	55	24 h	1:2 (w/w)
ข้าวสาลี	45	24 h	1:2 (w/w)
	20 - 50	72 h	1:10 (w/w)
	48 - 53	24 h	1:2 (w/w)
	20 - 50	72 h	1:10 (w/w)
ถั่วแขก	50	24 h	1:2 (w/v)
ถั่วดำ	50	24 h	1:3 (w/w)
สาเก	60	5 h	1:5 (w/w)

ที่มา: Elessandra and Alvaro (2011)

ผลของการดัดแปรด้วยวิธี Annealing ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

1. ผลต่อสมบัติด้านความหนืด (pasting properties)

Yamamoto and Shirakawa (1999) เปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวที่ผ่านการ ANN ที่อุณหภูมิ 55 °C นาน 24 h ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ เป็น 1:5 พบว่า อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของแป้งข้าวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่าความหนืดต่ำสุด และค่าความหนืดลดลงมีค่าเพิ่มขึ้น Stute (1992) และ Jacobs *et. al.*(1995) พบว่า การ ANN ทำให้อุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชัน และความหนืดสุดท้ายเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนืดสูงสุดลดลง

Jacobs *et. al.* (1998) พบว่า ANN ทำให้ความหนืดสูงสุด ความหนืดสุดท้ายของสตาร์ชข้าวสาลี ถั่ว และข้าว เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติที่แตกต่างกันของสตาร์ช สภาวะในการดัดแปร และ อิทธิพลของอุณหภูมิในการดัดแปร โดยสตาร์ชเกรนูลจะมีความสามารถในการทนต่อความร้อน และแรงเฉือนมากกว่าแป้งปกติ ANN ทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างเพิ่มขึ้น Gomes *et al.*(2004) โดยสตาร์ชเกรนูลจะเกิดเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น สอดคล้องกับผลของ Adebowale *et al.*, (2005) ทำการดัดแปรสตาร์ชข้าวฟ่างด้วยการ ANN ในสภาวะที่มีน้ำมากเกินไป อุณหภูมิ 50 °C นาน 48 h พบว่า สตาร์ชข้าวฟ่างมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืด คือ อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด ค่าความหนืดสุดท้าย เซตแบค และความหนืดต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้รายงานว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ของสตาร์ชเกรนูลดัดแปร เนื่องจากมีโครงสร้างผลึกเพิ่มขึ้น ทำให้มีเจลมีความคงตัว (Gomes *et al.*,2004 ; Hormdok and Noomhorm, 2007)

2. ผลต่อสมบัติการเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization properties)

Jacob *et al.* (1995) ได้ตรวจสอบค่าเอนทัลปี ด้วยเครื่อง DSC และปริมาณการซึมผ่านของแอมิโลสออกจากสตาร์ชเกรนูล (amylose leaching) ของสตาร์ชถั่ว มันฝรั่ง ข้าวสาลี และข้าวเจ้า ที่ผ่านการ ANN พบว่าสตาร์ชเกรนูลมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น amylose leaching มีค่าลดลง สอดคล้องกับ Gomes *et al.* (2005) พบว่าแป้งมันสำปะหลังหมักที่ผ่านการ ANN ที่ 50 °C เป็นเวลา 0 72 96 144 และ 240 h เปรียบเทียบกับแป้งหมักปกติ พบว่าเมื่อ เวลาในการ ANN เพิ่มขึ้น สตาร์ชเกรนูลมีกำลังการพองตัว และร้อยละการละลายลดลง ค่าเอนทัลปีเพิ่มขึ้น Seow and Teo (1993) ตรวจสอบสมบัติการเกิดเจลาติไนซ์ของสตาร์ชข้าวที่ผ่านการ ANN อุณหภูมิ 55 °C เป็นเวลา 4 12 และ 24 h ความชื้น 40 % พบว่าสตาร์ชข้าวมีค่า To และ Tp เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อค่าเอนทัลปีของ

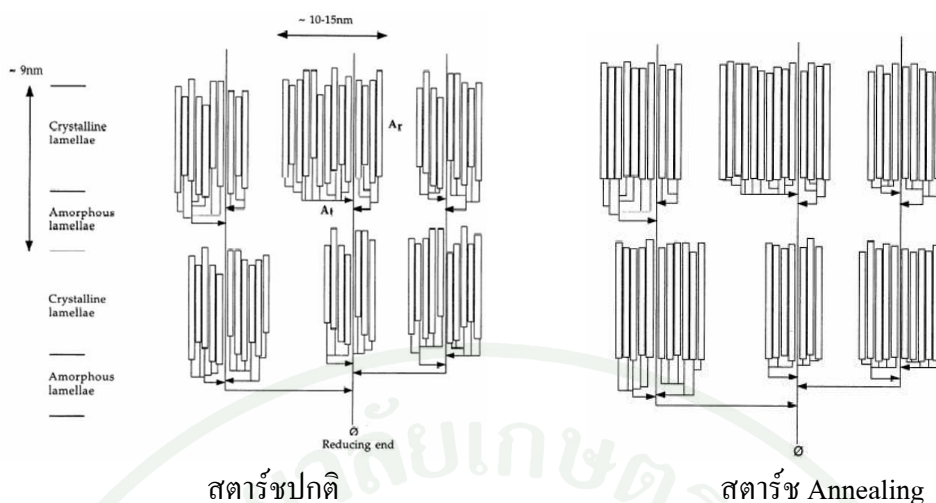
สตาร์ช Sekine *et al.* (2000) ทำการ ANN สตาร์ชข้าวสาลี และข้าวโพด ที่อุณหภูมิ 50 °C 20 h พบว่า สตาร์ชข้าวสาลี และข้าวโพด มีค่าเอนทาลปีเพิ่มสูงขึ้นจากสตาร์ชปกติ Jacobs *et al.*, (1995) คัดแปร สตาร์ชข้าวโพด ANN ที่อัตราส่วนสตาร์ชข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:2 นาน 24 h ที่อุณหภูมิ 55 °C พบว่า ค่า To Tp และค่าเอนทาลปีของสตาร์ชข้าวมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลที่ในเซชัน (Tc-To) มีค่า ลดลง Valentina *et al.*, (2005) สตาร์ชข้าวสาลีผ่านการ ANN ที่อุณหภูมิ 55 °C 10 h พบว่า สตาร์ช ข้าวสาลีมีค่าเอนทาลปีของการเกิดเจลที่ในเซชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่เป็นระเบียบมีความยาวเพิ่มขึ้น

3. ผลต่อสมบัติเนื้อสัมผัสของเจล

การคัดแปรด้วยวิธี ANN อุณหภูมิและเวลาเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความแข็งแรงของเจล เนื่องจากการเกิดผลึกที่สมบูรณ์ขึ้นเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ของส่วนอสัณฐานทำให้เกิด double helice ขึ้น (Lin *et al.*, 2006) Chung *et al.* (2000) อธิบายว่าการ ANN มีการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลแป้งส่งผลทำให้กำลังการพองตัว และการละลายลดลง เป็นผลให้เจลที่ได้มีความคงตัวและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น Hormdok and Noomhorm (2007) พบว่าการ ANN ทำให้เจลสตาร์ชข้าวมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยใช้สตาร์ชข้าวชยันนาที่อัตราส่วนสตาร์ชต่อน้ำ เป็น 1:3 นาน 8 16 และ 24 h ที่อุณหภูมิ 55 °C โดยระยะเวลาในการ ANN นานขึ้น เจลจากสตาร์ชข้าวมีค่าความแข็งแรงมากขึ้น

4. ผลกระทบต่อความเป็นผลึก

การคัดแปรสตาร์ชด้วยวิธี ANN มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสตาร์ชแกรนูล โดยทำให้สตาร์ชมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น มีความคงทนต่อการเกิดเจลที่ในเซชัน การพองตัว และการละลายลดลง (Waduge *et al.* ,2006) Jacob and Delcour (1998) การคัดแปรด้วยวิธี ANN มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกภายในสตาร์ชแกรนูล เพิ่มขึ้น ทำให้สตาร์ชแกรนูลมีความแข็งแรงมากขึ้น หรือเกิดจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเอมิโลสและลิปิด ทำให้เอมิโลสมีความเสถียรเพิ่มขึ้น และ amylose leaching ระหว่างการให้ความร้อนเกิดขึ้นน้อยลง Kohyama and Sasaki (2006) ตรวจสอบโครงสร้างโมเลกุลของเอมิโลส และเอมิโลเพกทินในสตาร์ชผ่านการ ANN 20 °C และ 50 °C ปรากฏว่า ไม่พบการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสายกลูโคสในช่วง DP 6-12, DP 13-24, DP 25-35 และตั้งแต่ DP 36 ขึ้นไป แสดงให้เห็นว่าไม่เกิดพันธะโควาเลนต์ขึ้นกับเอมิโลเพกทิน (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 ผลของการ Annealing ต่อการจัดเรียงตัวของแอมิโลเพกทินในสตาร์ชแกรนูล

ที่มา : Kohyama and Sasaki (2006)

2. การใช้ประโยชน์จากการดัดแปรแป้งโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น (Hydrothermal Treatment)

2.1 การดัดแปรแป้งข้าวต่อคุณภาพข้าวระหว่างการเก็บรักษา

การเก็บข้าวทั้งเมล็ด เพื่อใช้ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าว เช่น เส้นก๋วยเตี๋ยว เส้นขนมจีน เป็นเวลา 4 ถึง 6 เดือน พบว่าแป้งข้าวมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนืด โดยมีค่าความหนืดสูงสุด และเซตแบคเพิ่มขึ้น (Daniels *et al.*, 1998; Perdon *et al.*; 2001; งามชื่น, 2538) ลักษณะเนื้อสัมผัส (Champagne *et al.*, 1998; Meullenet *et al.*, 2000) และสมบัติด้านความร้อนเพิ่มขึ้น (Fan and Marks, 1999)

เมล็ดข้าวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นโดยเฉพาะในระยะเวลา 3-4 เดือนหลังเก็บเกี่ยว การเปลี่ยนแปลงในเมล็ดข้าวเกิดจากกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับสตาร์ช ไขมัน และโปรตีน ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันทำให้เกิดกรดไขมันอิสระ และสารกลุ่มคาร์บอนิลเพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นสาบในข้าวเก่า กรดไขมันอิสระนี้ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของแอมิโลสกลายเป็นสารประกอบแอมิโลส-ลิพิด (amylose-lipid complex) และมีผลต่อการพองตัวของสตาร์ชแกรนูล ทำให้เนื้อสัมผัส

แข็งขึ้น เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับกรดเอมิโน ทำให้มีผลต่อการพองตัวของสตาร์ชแกรนูลเช่นเดียวกับกรดไขมัน

อัตราส่วนระหว่างเอมิโลสกับเอมิโลเพคตินเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อคุณภาพและเนื้อสัมผัสของเจลข้าว นอกจากนี้โครงสร้างของเอมิโลเพคติน ยังมีผลต่อคุณสมบัติของเจลข้าว โดยเอมิโลเพคตินสายยาวจะมีความสามารถในการจับกับองค์ประกอบอื่นๆ ที่อยู่ในเมล็ดข้าว เช่น โปรตีน ไขมัน ได้มากกว่าเอมิโลเพคตินสายสั้น จึงมีผลทำให้ความนุ่มของเจลลดลง (Ong and Blanshard, 1995)

การเร่งให้เมล็ดข้าวให้มีคุณสมบัติเหมือนข้าวเก่า มีหลายวิธี เช่น การให้ความร้อนกับเมล็ดข้าวสารที่อุณหภูมิ 110 °C ในภาชนะปิดสนิท การใช้ลมร้อนโดยตรงกับเมล็ดข้าวที่อุณหภูมิ 150-250 °C และกระบวนการทำข้าวเหนียว (parboiled rice) (งามชื่น, 2536)

2.2 การใช้แป้งข้าวคัดแปรในผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยว

เส้นก๋วยเตี๋ยว เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากข้าวเจ้าที่นำมาโม่ หรือจากแป้งข้าวเจ้า ซึ่งอาจมีแป้งชนิดอื่นผสม นึ่งให้สุก เป็นแผ่นบาง ตัดเป็นเส้น มีความหนาสม่ำเสมอไม่เกิน 0.7 mm มีสีขาวนวล ไม่มีกลิ่นหืน มีลักษณะนิ่ม เหนียว และไม่เกาะติดกัน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2533) ประเทศไทย มีการผลิตเส้นหมี่ และเส้นก๋วยเตี๋ยวประมาณ 300,000 ตันต่อปี เพื่อการบริโภคในประเทศ และส่งออก (พรพิศ, 2548) ในรูปแบบของเส้นก๋วยเตี๋ยวอบแห้งไปยังประเทศต่าง ๆ เช่น ฮองกง เกาหลี ญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกา เป็นต้น

2.2.1 ชนิดของเส้นก๋วยเตี๋ยว

งามชื่น (2541) ได้จำแนกประเภทก๋วยเตี๋ยวตามปริมาณความชื้นภายในเส้นก๋วยเตี๋ยว โดยแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. เส้นก๋วยเตี๋ยวสด คือ ก๋วยเตี๋ยวที่มีความชื้นประมาณ 62- 64 % ซึ่งอาจเป็นเส้นใหญ่ที่มีขนาดกว้าง 1.5-2.5 cm. หรือเส้นเล็กขนาด 0.4-0.5 cm. เนื่องจากเส้นก๋วยเตี๋ยวชนิดนี้ไม่ผ่านการทำแห้ง จึงมีอายุการเก็บเพียง 1-2 วัน
2. เส้นก๋วยเตี๋ยวกึ่งแห้ง คือ เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ได้จากการนำเส้นสดมาผึ่งลม จนมีความชื้นประมาณ 37 % แล้วจึงตัดเป็นเส้น โดยปกติแล้ว เส้นก๋วยเตี๋ยวชนิดนี้ มีอายุการเก็บรักษา 1-2 วัน

3. เส้นก๋วยเตี๋ยวบแห้ง คือ เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ทำให้แห้งด้วยการอบลมร้อนหลังจากการตัดเป็นเส้น มีความชื้นประมาณ 13 % หรือต่ำกว่า สามารถเก็บรักษาได้นาน

2.2.2 คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งข้าวต่อผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยว

คุณภาพของ เส้นก๋วยเตี๋ยวขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัตถุดิบ ข้าวที่เลือกใช้เพื่อการผลิต ก๋วยเตี๋ยวควรมีการตรวจสอบคุณสมบัติก่อนการผลิต เนื่องจากเป็นข้าวท่อนซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงสีข้าว ซึ่งมักรวมข้าวพันธุ์ต่างๆ เข้าด้วยกันทำให้คุณภาพไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้วัตถุดิบที่มีคุณภาพดีมีปริมาณไม่เพียงพอความต้องการ จึงมีการนำข้าวคุณภาพต่ำ

แป้งหรือสารเจือปนอาหารอื่นๆ มาผสมซึ่งก่อให้เกิดปัญหาค่อนข้างมาก (วิภา, 2541) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์อาหารเส้น (งามชื่น, 2536)

2.2.1 ขนาดอนุภาคของผงแป้ง

Chiang and Yeh (2002) ได้ทดลองเปรียบเทียบเวลาในการแช่เมล็ดข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง โดยเปรียบเทียบการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 0 10 20 30 60 120 240 และ 480 h พบว่าเวลาในการแช่น้ำ มีผลต่อขนาดอนุภาคของผงแป้ง โดยอนุภาคแป้งในข้าวที่ไม่ได้แช่น้ำมีขนาดใหญ่กว่า 450 μm หลังจากแช่ข้าวในน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 30 min อนุภาคแป้งที่มีขนาดใหญ่กว่า 450 μm มีจำนวนลดลง 4.2 % และอนุภาคแป้งที่มีขนาดเล็กกว่า 10.4 μm มีจำนวนเพิ่มขึ้นจาก 17.2 เป็น 36.3 % นอกจากนี้วิธีการหมักก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง โดย Yoenyongbuddhagal and Noomhorm (2002) ได้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าพันธุ์เส้าไห้ เปรียบเทียบวิธีการเตรียมแป้งโดยการโม่แห้ง และไม่เปียก ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer) โดยแป้งที่ได้จากการโม่แห้งมีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (80.70 °C) สูงกว่าแป้งไม่เปียก (77.87 °C) แต่มีความหนืดสูงสุด (202.71 RVU) ความหนืดลดลง (45.88 RVU) และความหนืดสุดท้าย (326.50 RVU) ต่ำกว่าแป้งไม่เปียก พบว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวที่มีเนื้อสัมผัสเรียบเนียน และนุ่ม เกิดจากการใช้แป้งข้าวที่มีขนาดอนุภาคเล็ก และสม่ำเสมอ ซึ่งต้องเป็นแป้งข้าวที่ผ่านการโม่เปียก (พัชร, 2538)

2.2.2 การพองตัว และการละลาย

ค่ากำลังการพองตัว เป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึงความแข็งแรงของเจลสตาร์ช ซึ่งมีความสัมพันธ์กับเนื้อสัมผัสที่หืดหยุ่นและเหนียวนุ่มของเส้นก๋วยเตี๋ยว เจลที่มีค่ากำลังการพองตัวสูงมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดี เป็นคุณสมบัติที่ต้องการของเส้นก๋วยเตี๋ยว (Crosbie, 1991) Lii *et al.* (1995) ตรวจสอบกลไกการเกิดเจลของสตาร์ชข้าว 3 ชนิด คือ ข้าวอินดิกา ข้าวจาปอนิกา และข้าวเหนียว ซึ่งมีปริมาณแอมิโลส 25.60 14.80 และ 0.99 % ตามลำดับ ค่ากำลังการพองตัว และการละลายเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยสตาร์ชจากข้าวแอมิโลสสูงมีการพองตัวน้อยกว่าสตาร์ชจากข้าวแอมิโลสต่ำ ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแอมิโลเพคตินมีส่วนช่วยในการพองตัว วิธีการไม่ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อค่ากำลังการพองตัว Yoenyongbuddhagal and Noomhorm (2002) พบว่าค่ากำลังการพองตัวของแป้งข้าวเจ้ามีผลต่อคุณภาพของเส้นหมี่ โดยแป้งไม่แห้งมีการพองตัวมากกว่าแป้งไม่เปียก

2.2.3 ปริมาณแอมิโลส

ในเมล็ดข้าวมีสตาร์ชอยู่ประมาณ 90 % โดยน้ำหนักแห้งเช่นเดียวกับธัญชาติอื่น สตาร์ชข้าวมี ปริมาณแอมิโลสเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวมีคุณสมบัติต่างกัน และมีผลต่อผลิตภัณฑ์แปรรูปจากข้าว คุณภาพการหุงต้ม และคุณภาพของข้าวสุก โดยสถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ (International Rice Research Institute, IRRI) แบ่งข้าวตามปริมาณแอมิโลสเป็น 5 กลุ่ม ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณแอมิโลส

ประเภทข้าว	ปริมาณแอมิโลส (ร้อยละ)	ลักษณะเจล
ข้าวเหนียว	1-2	เหนียวมาก
ข้าวเจ้าแอมิโลสต่ำมาก	2-9	เหนียว นุ่ม
ข้าวเจ้าแอมิโลสต่ำ	9-20	เหนียว นุ่ม
ข้าวเจ้าแอมิโลสปานกลาง	20-25	นุ่ม ค่อนข้างเหนียว
ข้าวเจ้าแอมิโลสสูง	25-33	ร่วน แข็ง

ที่มา : Juliano (1982)

สตาร์ชข้าวเหนียวมีเอมิโลเพกทินอย่างเดียว หรืออาจมีเอมิโลสปนอยู่เพียงเล็กน้อย ข้าวเจ้ามีเอมิโลส ประมาณ 7-33 % ในข้าวสาร หรือ 9-37 % ในสตาร์ช ส่วนที่เหลือ 63-91 % เป็นเอมิโลเพกติก สัดส่วนของเอมิโลส และเอมิโลเพกทิน ซึ่งปริมาณเอมิโลส เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวมีคุณภาพข้าวสุกแตกต่างกัน คือข้าวเอมิโลสสูงคุดน้ำ และขยายปริมาตรในระหว่างการหุงต้มได้มากกว่าข้าวเอมิโลสต่ำ และทำให้ข้าวสุกมีลักษณะที่บวมไม่เลื่อมมัน ข้าวสุกแข็ง และร่วน ส่วนข้าวเหนียวคุดน้ำ และขยายตัวน้อยกว่าข้าวเจ้า และข้าวสุกที่ได้เหนียว และนุ่มกว่า (Juliano, 1968) ปริมาณเอมิโลสมีความสัมพันธ์กับการขยายปริมาตร และการคุดน้ำของสตาร์ชในระหว่างการหุงต้ม แต่มีความสัมพันธ์ในทางลบกับความนุ่ม และความเหนียวของข้าวสุก และสตาร์ชที่มีปริมาณเอมิโลสสูงมาก ทำให้ผลิตภัณฑ์มีการพองตัวลดลง และมีค่าปริมาตรจำเพาะลดลง (อรพรรณ, 2547) การใช้แป้งข้าวเอมิโลสปานกลางถึงสูง ในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว สตาร์ชมีความสามารถในการคุดน้ำ และขยายปริมาตรได้ดี ทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสที่ความเหนียวนุ่ม

2.2.4 ความคงตัวของเจล (gel consistency)

ข้าวที่ อยู่ในกลุ่มเอมิโลสสูง ยังมีความแตกต่างกันของคุณภาพด้านความคงตัวของเจล เช่น ข้าวที่ความคงตัวของเจลสูงเมื่อหุงสุกแล้วมีเนื้อสัมผัสแข็งกว่าข้าวที่มีความคงตัวของเจลต่ำ การหาค่าความคงตัวของเจลเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการคาดคะเนคุณภาพของข้าว โดยวัดระยะทางที่เจลไหลไปเมื่อวางบนพื้นราบ ความคงตัวของเจลมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับปริมาณเอมิโลส พบว่าข้าวที่มีปริมาณ เอมิโลสเท่ากันมีความแตกต่างของค่าความคงตัวของเจล ดังนั้นปัจจัยนี้จึงสามารถใช้คาดคะเนคุณภาพการหุงต้ม และคุณภาพการรับประทานของข้าวที่มีความแตกต่างของปริมาณเอมิโลส เช่น ข้าวที่มีความคงตัวของเจลสูงกว่าทำให้ได้ข้าวสุกแข็ง และร่วนกว่าข้าวที่มีความคงตัวของเจลต่ำ โดยการเก็บรักษาข้าวมีผลทำให้ความคงตัวของเจลเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการทำผลิตภัณฑ์เส้นชนิดต่าง ๆ จึงไม่นิยมใช้ข้าวใหม่ (งามชื่น, 2536)

2.3 การใช้แป้งข้าวัดแปรเป็นสารให้ความหนืดและสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์อาหาร

2.3.1 ลักษณะที่ต้องการของสารให้ความหนืดและสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์อาหาร

สารให้ความข้นหนืดมีหลายประเภทส่วนใหญ่เป็นสารประเภทไฮโดรคอลลอยด์ ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ (hydrophilic) ได้จากพืช สัตว์ จุลินทรีย์ รวมถึงโพลิเมอร์ดัดแปรจาก

ธรรมชาติหรือสังเคราะห์ มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซี (-OH) และ polyelectrolyte อื่นๆ โพลีเมอร์เหล่านี้แสดงหน้าที่ที่สำคัญในอาหาร เช่น เป็นสารให้ความหนืด ทำให้เกิดเจลเป็นอิมัลซิไฟเออร์ และเป็นสารที่ทำให้เกิดความคงตัวเป็นต้น (Phillips และ Williams, 2000)

แป้งและสตาร์ชมีสมบัติบางประการไม่เหมาะกับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ เนื้อสัมผัสไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิตหรือความคงทนต่อสภาวะความเป็นกรดต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ ดังนั้นจึงมีการดัดแปรคุณสมบัติของแป้งและสตาร์ชเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดี (Light, 1990) การคั้นตัว และการสูญเสียน้ำของเจลลดลง มีความคงตัวในการละลายจากการแช่แข็ง (freeze-thaw) เพิ่มขึ้น ลักษณะของเนื้อเจลดีขึ้น และสามารถผสมกับตัวละลายอื่นๆ เพิ่มขึ้น (BeMiller, 1997)

การใช้แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งข้าวเจ้า เพื่อเป็นสารให้ความข้นหนืดในผลิตภัณฑ์อาหาร แต่ข้อด้อยของแป้งคือ เจลมีการคั้นตัว ไม่คงทนต่อกรด ความร้อน และแรงเฉือนระหว่างการผสม จึงมีการใช้แป้งดัดแปรด้วยวิธีครอสลิงก์ (crosslink) ได้แป้งดัดแปรมีความแข็งแรงและมีความหนืดที่คงตัวมากขึ้น การใช้แป้งเพื่อให้ความข้นหนืดนอกจากต้องการแป้งที่ให้ความหนืดสูง ยังต้องการแป้งที่ให้ลักษณะความหนืดเฉพาะตัว เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และแป้งกลุ่ม waxy ที่ให้ความหนืดสูง และมีเจล cohesive คือเจลมีลักษณะทนต่อแรงที่มากกระทำ สามารถคั้นตัวกลับได้โดยไม่เสียรูปของเจลหรือเรียกว่ามีคุณสมบัติแบบ Viscoelasticity โดยสตาร์ชแกรนูลมีทนทานต่อความร้อน แรงเฉือนและสภาพความเป็นกรด เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารกระป๋องที่ต้องผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนสูง แป้งที่ใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดจึงต้องทนต่อความร้อนสูง หรือกระบวนการผลิตอาหารที่ต้องผ่านสภาวะที่มีการกวนผสม ไหลผ่านระบบท่อ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นอาจทำให้สตาร์ชแกรนูลแตกได้ง่ายขึ้น และอาหารบางชนิดมีสภาพที่เป็นกรด ตัวอย่างเช่น ใส้พายผลไม้ มี pH อยู่ในช่วง 3.0-3.5 สภาพที่เป็นกรดจะทำให้แป้งมีความหนืดลดลง ความใสของเจล เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเจล ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ เช่น น้ำสลัด เจลจะมีลักษณะที่ข้นทึบ ส่วนใส้พาย ใส้คัสตาร์ด และซอสมะเขือเทศ เจลจะมีลักษณะที่ใสเลื่อมมัน และเจลต้องมีความคงตัวต่อการเก็บที่อุณหภูมิต่ำ มีความสามารถในการอุ้มน้ำของผลิตภัณฑ์ และมีความคงตัวระหว่างการเก็บ (Shi and BeMiller, 2002; Kim and Yoo, 2006)

2.3.2 การดัดแปรที่ใช้เป็นสารให้ความหนืดและสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์อาหาร

การใช้แป้งดัดแปรเพื่อเพิ่มความแข็งแรงแก่โครงสร้างแป้งให้มีความคงทนต่อสภาวะของการหุงต้มเป็นเวลานาน ทนต่อแรงเฉือน และกรด ทำให้เจลเปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านเนื้อสัมผัส และคุณสมบัติการไหล แป้งดัดแปรจะให้ความข้นหนืด ที่มีความคงตัวและความหนืด ในอาหารที่มีกรดสูง เช่น น้ำสลัด ซอสมะเขือเทศ ทำหน้าที่เป็นสารให้ความข้นหนืด แป้งดัดแปรจะไม่สูญเสียความหนืดที่พื้ของต่ำ และสามารถทนต่อการผสมด้วยความเร็วสูง Wu and Seib (1990) ดัดแปรสตาร์ชจากข้าวบาร์เลย์ชนิดเอมิโลสต่ำด้วยวิธีแอซิติเลชัน นำแป้งดัดแปรดังกล่าวมาผลิตผลิตภัณฑ์แช่แข็งคือ ใส้พาย คัดสตาร์ต พุดดิ้ง และพาสต้า พบว่าให้สมบัติที่ดีทางด้านความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย อภิญญา มาระโพธิ์ (2536) ใช้แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียวและแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรโดยวิธีโครอสลิงก์เป็นสารให้ความคงตัวในซอสมะเขือเทศ พบว่าซอสมะเขือเทศที่เติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ความเข้มข้น 1.5% ได้รับการยอมรับสูงสุด รองมาคือ แป้งข้าวเจ้าดัดแปรและแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ตามลำดับ เมื่อทำการเก็บรักษาที่ 40°C เป็นเวลา 2 เดือน พบว่าซอสมีความหนืดต่ำลงโดยเฉพาะซอสที่เติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปร การดัดแปรแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวด้วยวิธีแอซิติเลชันโดยใช้แอซิติคแอนไฮไดรด์ มี DS อยู่ในช่วง 0.6-2.4 พบว่าแป้งทุกชนิดที่ผ่านการดัดแปรมีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดลดลง แป้งที่มีระดับการแทนที่สูงขึ้นจะมีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดที่ลดลงมากขึ้น โดยแป้งมันสำปะหลังดัดแปร แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว ที่ DS 2.4 แป้งจะมีความหนืดที่สูงขึ้น และนำมาใช้เป็นสารให้ความหนืดและความคงตัวในซอสหอยนางรม พบว่าแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ DS 2.4 ได้รับคะแนนความชอบในด้านความใส ลักษณะเจลเรียบเนียน ความข้นเหนียวของเจล และความชอบรวม มีคะแนนสูงสุด (เอกพันธ์, 2538) Thebaudin *et al.* (1998) ดัดแปรแป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเหนียว ด้วยวิธีโครอสลิงก์และแอซิติเลชัน วัดค่าความหนืดของแป้งดัดแปรที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่าแป้งข้าวเหนียวดัดแปรมีค่าความหนืดสูงสุด รองมาคือแป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวโพดและแป้งสาลี ตามลำดับ โดยสามารถแบ่งกลุ่มแป้งได้สองกลุ่มโดยกลุ่มที่ 1 มีแป้งสาลีและแป้งข้าวโพด ซึ่งมีสมบัติแบบ thixotropic คือมีความหนืดสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และกลุ่มที่ 2 คือแป้งข้าวเหนียวดัดแปรซึ่งมีสมบัติแบบ nonthixotropic คือมีความหนืดคงที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าแป้งข้าวเหนียวดัดแปรมีความต้านทานต่อแรงเฉือน เมื่อทำการวัดค่า viscoelastic ของแป้งโดยมีน้ำเป็นตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 20 °C พบว่าแป้งข้าวเหนียวดัดแปรมีค่า storage modulus สูงสุด แสดงว่าสตาร์ชแกรนูลมีความแข็งแรง นำมาแป้งข้าวเหนียวดัดแปรเป็นสารให้ความข้นหนืดของซอสขาว (béchamel sauce) พบว่าซอสขาวมีความหนืดและความคงตัวดีขึ้นเมื่อผ่านการปั่นผสม นุชจรา และคณะ (2545) ดัดแปรแป้งข้าวเหนียวด้วยวิธีแอซิติเลชัน โดยใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตร่วมกับวิธี

กรอสลิงก์ พบว่า แป้งมีความหนืดสูงสุด ความหนืดสุดท้าย และค่า setback เพิ่มขึ้น มีความคงตัวที่ pH ต่ำ มีการสูญเสียเล็กน้อยเมื่อผ่านการแช่แข็งและการละลาย Perera *et al.* (1997) นำสตาร์ชมันฝรั่งแอมิโลสต่ำดัดแปรด้วยวิธี HMT นำมาใช้ทดแทนเคซีนในการผลิตไส้กรอก และผลิตภัณฑ์เนื้อไก่ปรุงสุก พบว่า ให้ความรู้สึกลื่นในปาก และรสชาติที่ดี และแป้งดัดแปรให้สมบัติการเป็นเจลที่อุณหภูมิต่ำ และมีความสามารถในการจับกับน้ำได้ดี ลดการสูญเสีย ทำให้เนื้อสัมผัสดีขึ้น เนื่องจากแป้งดัดแปรมีความทนพีเอชต่ำ อุณหภูมิสูง และแรงเฉือนได้ Ferry *et al.* (2005) นำแป้งสาลี แป้งข้าวโพด ข้าวเหนียว (waxy maize) ดัดแปรด้วยวิธี HMT เปรียบเทียบกับ hydroxypropylmethyl cellulose (HPMC) พบว่าเมื่อใช้ HPMC เป็นสารให้ความข้นหนืด การรับรู้กลิ่นรสและความเค็มจะลดลงอย่างมากเมื่อความหนืดของ HPMC เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อใช้แป้งทั้ง 3 ชนิดเป็นสารให้ความข้นหนืด พบว่าความหนืดจะมีผลทำให้การรับรู้กลิ่นรสลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแป้งชนิดต่างๆ ที่ความหนืดเดียวกัน พบว่าการรับรู้กลิ่นรสในอาหารที่มีแป้งสาลีและแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวดัดแปรจะสูงกว่าในอาหารที่มีแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว ซึ่งน่าจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของสตาร์ชแกรนูลเมื่อผ่านการให้ความร้อน โดยพบว่าแป้งสาลีและแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวดัดแปรยังรักษาสภาพของสตาร์ชแกรนูลไว้ได้ในขณะที่แป้งข้าวโพดข้าวเหนียวจะพบว่าการแตกของสตาร์ชแกรนูลอย่างชัดเจน ผลที่ได้นำไปสู่การตั้งสมมติฐานที่ว่าทั้งการรับรู้กลิ่นรสและความรู้สึกลื่นในปาก (mouthfeel) มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการผสมเป็นเนื้อเดียวกันของสารให้ความข้นหนืดกับน้ำ ในกรณีของโพลีเมอร์ (HPMC) จะมีประสิทธิภาพที่แตกต่างไปจากแป้งที่มีโครงสร้างเป็นเม็ด เนื่องจากโพลีเมอร์มีโครงสร้างที่เป็นสายโซ่และมีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ ทำให้การปลดปล่อยสารให้กลิ่นรสลดลง ดังนั้นการรับรู้ทางกลิ่นรสจึงลดลง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ
 - 1.1 ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (KDML105)
 - 1.2 ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 (CN1)
2. เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตแป้งข้าว และตัดแปรรูปแป้งข้าว
 - 2.1 เครื่องโม่ไฟฟ้า (Double-disc stone mill)
 - 2.2 เครื่องเหวี่ยงแยกน้ำแบบตะกร้า (Basket centrifuge H-130G, Kokusan Ensinki, Japan)
 - 2.3 ตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray dryer)
 - 2.4 เครื่องบดตัวอย่างแห้ง (Ultra-centrifugal mill type ZM1, Retch, Germany)
 - 2.5 ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช (Retch, Germany)
 - 2.6 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven, ULE500, Memmert, Germany)
3. เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์
 - 3.1 เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer: RVA3D New Port Scientific Instrument & Engineering, Australia)
 - 3.2 เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer TA-XT plus, Stable Micro System, England)
 - 3.3 เครื่องวัดความหนืด (Bostwick consistometer, Brookfield Model DV-II+, Germany)
 - 3.4 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, STAR[®] System, Mettler Toledo, Switzerland)
 - 3.5 เครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer Physica MCR 301, Anton Paar gmbh, Germany)
 - 3.6 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath WB22, Memmert, Germany)
 - 3.7 เครื่องกวนที่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ (High torque stirrer R50D, Ingenieurburo CAT, Germany)

4. อุปกรณ์อื่น ๆ

4.1 เครื่องนึ่งอาหารไฟฟ้า (HS-639, Freedom Development, China)

4.2 เครื่องตัดเส้น(cutter)

4.3 เครื่องผสม (mixer)

วิธีการ

1. การเตรียมแป้งข้าว

นำข้าวที่ขัดสีทั้งสองพันธุ์ คือ KDML105 และ CN1 ล้างทำความสะอาด และแช่ข้าวในน้ำ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 4 h. ล้างทำความสะอาดข้าวอีกครั้งจึงนำไปโม่ด้วยโม่หิน โดยใช้ อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ เท่ากับ 1:3 จากนั้นเหวี่ยงแยกน้ำออกจากน้ำแป้งด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงนาน 1 min. ลดขนาดของก้อนแป้งให้เล็กลงแล้วนำไปใส่ถาดเข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C เป็น เวลา 15 h. นำแป้งแห้งที่ได้ไปโม่ด้วยเครื่องบดโดยผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 0.2 mm. ตามลำดับ จากนั้นจึงร่อนแป้งผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh นำแป้งทั้งหมดผสมเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน

2. การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงด้านเทอร์โมไดนามิกของแป้งข้าว

ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงด้านเทอร์โมไดนามิก โดยใช้เครื่องDSC คัดแปลงจาก วิธีของ Seow and Teo (1993) วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้านเทอร์โมไดนามิก โดยใช้แป้งข้าวตัดแปรที่ ความชื้น 14 ถึง 18 % (โดยน้ำหนัก) ปิดผนึกภาชนะสแตนเลสที่ใส่ตัวอย่าง ด้วยเครื่องปิดผนึกบ่ม ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 4 °C นาน 4 hr นำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้านเทอร์โมไดนามิกด้วยเครื่อง DSC ที่อุณหภูมิ 40 ถึง 100 °C โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C ต่อนาที และลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วที่อัตราการลดอุณหภูมิ 20 °C ต่อนาที ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ผลึก (glass transition temperature, Tg) อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน (gelatinization temperature, Tgel) และ อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, Tm) ใช้กำหนดระดับของปัจจัยทำการตัดแปรแป้ง ข้าวทางกายภาพ

3. การดัดแปรแป้งข้าวทางกายภาพ

3.1 การดัดแปรแป้งข้าวด้วยวิธี HMT

นำแป้งข้าวมาดัดแปรด้วยวิธี HMT โดยดัดแปลงจากวิธีของ Lim *et.al.*, 2001 นำปัจจัยที่ใช้ในการดัดแปร คือ อุณหภูมิ (X1) ระยะเวลา (X2) และความชื้น (X3) ของแป้งข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ด้วยแผนการทดลองแบบ Face central composite design (FCCD) โดยนำแป้งข้าวไม่เปียกในข้อ 1 ที่ทราบปริมาณความชื้น จำนวน 500 g. ใส่ในถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน จากนั้นพ่นละอองน้ำกลั่นลงบนแป้ง เพื่อปรับปริมาณความชื้นให้ได้ตามต้องการผสมให้เข้ากัน ปิดฉนวนให้สนิท ทำให้เกิดความชื้นสมดุลโดยเก็บถุงบรรจุแป้งปรับความชื้นไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 °C นาน 24 h. นำถุงบรรจุแป้งออกมาตั้งที่อุณหภูมิห้องนาน 1 h. เพื่อปรับอุณหภูมิแป้งให้เท่าอุณหภูมิห้อง จากนั้นบรรจุแป้งที่ปรับความชื้นหลังลงในถุงออลูมิเนียม ปิดฉนวนแล้วนำไปใส่ในตู้อบลมร้อนควบคุมอุณหภูมิตามกำหนด หลังจากนั้นเทใส่ถาดเกลี่ยแป้งบางๆ อบในตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 45±5 °C เป็นเวลา 6 h. นำแป้งดัดแปรที่ได้ไปโม่หยาบด้วยเครื่องโม่หินไฟฟ้าบดหยาบ และบดละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่างแห้ง แล้วจึงร่อนผ่านตะแกรกร่อนขนาด 100 mesh เก็บแป้งดัดแปรที่ได้ในถุงพอลิเอทิลีน ปิดฉนวนให้แน่นเก็บที่อุณหภูมิ 25 °C เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.2 การดัดแปรแป้งข้าวด้วยวิธี ANN

นำแป้งข้าวมาดัดแปรด้วยวิธี ANN โดยดัดแปลงจากวิธีของ Jacobs *et.al.* (1995) ปัจจัยที่ใช้ในการดัดแปร คือ อุณหภูมิ (X1) และระยะเวลา (X2) ของแป้งข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ด้วยแผนการทดลองแบบ FCCD โดยนำแป้งไม่เปียกที่ได้มาผสมกับน้ำอัตราส่วนแป้งต่อน้ำ เท่ากับ 1: 2 โดยน้ำหนักใส่ในบีกเกอร์ 600 ml. ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ในช่วงอุณหภูมิตามกำหนดเป็นเวลา 12 24 และ 36 h. เมื่อครบกำหนด นำน้ำแป้งเทใส่ถาด อบในตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 45±5 °C เป็นเวลา 6 h. นำแป้งดัดแปรที่ได้ไปโม่หยาบด้วยเครื่องบดหยาบ และโม่ละเอียดด้วยเครื่องบดของแข็งแห้ง แล้วจึงร่อนผ่านตะแกรกร่อนขนาด 100 mesh เก็บแป้งดัดแปรที่ได้ในถุงพอลิเอทิลีน ปิดฉนวนให้แน่น เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

4. การตรวจคุณภาพแป้งข้าว

4.1 สมบัติด้านความหนืด (Pasting properties) (ภาคผนวก ก)

นำแป้งข้าวคัดแปร และแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บระยะเวลาต่าง ๆ ที่ร้อนผ่านตะแกรง 100 เมช ตรวจสอบสมบัติทางความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว ตาม AACC (no. 61-02) วิเคราะห์ ความหนืดสูงสุดขณะร้อน (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ความหนืดลดลง (breakdown) และค่าเซตแบค (setback) การทดลอง 3 ซ้ำ

4.2 สมบัติวิทยากระแส (Rheological properties)

นำแป้งข้าวคัดแปร และแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บระยะเวลาต่าง ๆ ตรวจสอบสมบัติวิทยากระแส คัดแปรจากวิธีของ บุญทิวา (2548) โดยใช้ความเข้มข้นของแป้ง 20 % โดยน้ำหนักแห้ง วิเคราะห์ด้วยรีโอมิเตอร์ ด้วยหัวกดแบบ Parallel-plate ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 ml และกำหนด gap size ที่ 1000 ไมครอน กำหนดค่าความเครียด (strain) ที่ร้อยละ 0.5 และความถี่ 1 เฮิรซ์ ในการทดลอง Temperature Sweep ที่อุณหภูมิ 55 ถึง 95 °C และทำให้เย็นจากอุณหภูมิ 95 ถึง 25 °C และหาค่า Frequency Sweep ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยกำหนดค่าความถี่ 0.1-100 Hz บันทึกค่า Storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

4.3 สมบัติทางเนื้อสัมผัส (Texture properties)

เตรียมตัวอย่างเจลจากแป้งข้าวและแป้งข้าวคัดแปร ความเข้มข้น 20 % (โดยน้ำหนักแห้ง) โดยนำมาให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 55 °C เป็นเวลา 15 min. นำสารละลายน้ำแป้งที่เป็นเนื้อเดียวกันเทในหลอดขนาด 15 ml. นำไปแช่ในน้ำเดือดจนกระทั่งสารละลายน้ำแป้งเป็นเจลที่สมบูรณ์ประมาณ 30 นาที หลังจากนั้นนำเจลที่ได้ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง และนำมาตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm ความสูง 1.5 cm นำไปวัดค่าคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส (Texture Profile Analysis, TPA) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส Texture Analyzer รุ่น TA.XT Plus ที่การเสียรูป (deformation) เท่ากับ 50 % ด้วยหัววัดทรงกระบอกขนาด 6 mm (P/6) ใช้ความเร็วของหัวกดเท่ากับ 20 mm/min ทำการบันทึกค่าต่าง ๆ ดังนี้ Hardness, Cohesiveness, Adhesiveness, Springiness, Gumminess ทำการทดลอง 15 ซ้ำ (ดัดแปลงจากวิธีการของ Vandeputte *et al.*, 2003)

4.4 สมบัติการเกิดเจลในเซชัน (gelatinization properties)

ใส่แป้งข้าวปริมาณ 7 mg ลงในถ้วยอลูมิเนียม (Alumimun) โดยใช้แป้งข้าวคัดแปร หยค น้ำ กลั่น ในอัตราส่วนแป้ง:น้ำ คือ 30:70 ลงในภาชนะสเตนเลส ได้แป้งที่ความเข้มข้น 30 % (โดย น้ำหนักแห้ง) ปิดผนึกด้วยเครื่องปิดผนึกบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 4 °C นาน 4 h นำมาวิเคราะห์สมบัติ การเกิดเจลในเซชันด้วยเครื่อง DSC ที่อุณหภูมิ 40 ถึง 100 °C โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C ต่อ นาที ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (Onset temperature, To), อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (Peak temperature, Tp) และอุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด (Conclusion temperature, Tc) ของการเกิดเจลในเซชัน (หน่วยเป็น °C) และค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลในเซชัน (เอนทัลปีของแป้งที่ผ่านการเกิดเจลใน เซชัน, ΔH) (หน่วยเป็นจูลต่อกรัม) (ดัดแปลงจากวิธีการของ Lu *et al.*, 1996)

5. การวางแผนการทดลอง และวิเคราะห์ผลทางสถิติ

5.1 การวางแผนการทดลอง

เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) เป็นเทคนิคหนึ่ง ที่ นิยมใช้ในการออกแบบการทดลอง (design of experiment; DOE) อย่างแพร่หลาย โดยนำมาใช้ใน การพัฒนาและปรับปรุงงานด้านคุณภาพในการผลิต เพื่อหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการผลิต และสามารถประยุกต์ใช้ในงานหลายสาขา การนำวิธีพื้นผิวตอบสนองไปประยุกต์ใช้นั้นมีความสำคัญ อยู่ que การเลือกสมการในการประเมินค่าตอบสนองให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าตอบสนองจริง แบบจำลอง ในการประเมินค่านั้นขึ้นอยู่กับผลที่ได้จากระบบหรือกระบวนการและรูปแบบของแบบจำลอง เทคนิคพื้นผิวตอบสนองเป็นเทคนิคเพื่อใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ใช้ในการทดลองหรือเซต ของตัวแปรที่สามารถควบคุมได้กับค่าตอบสนองหรือผลลัพธ์ที่ได้ โดยการแสดงตัวแทนทางเรขาคณิต ผลการตอบสนองของตัวแปร (response) ถูกกำหนดเป็นฟังก์ชันของตัวแปร ดังสมการ

$$Y = f(x_1 + x_2 + \dots + x_k) + E$$

โดย Y คือ ค่าตอบสนอง (response), dependent variable

E คือ error term

$x_1 + x_2 + \dots + x_k$ คือ ตัวแปรที่สนใจ , independent variable

แผนการทดลอง Face Central Compose Design (FCCD) พัฒนามาจากแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่มีระดับของปัจจัย 2 ระดับ (2^k Factorial Design) เนื่องจากการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่มีระดับปัจจัย 2 ระดับไม่สามารถใช้หาตัวแบบความสัมพันธ์ที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งหรือโมเดลความสัมพันธ์อันดับสอง (Second-Order Model) ได้ เพราะแผนการทดลองที่สามารถใช้ได้จะต้องมีระดับปัจจัยอย่างน้อย 3 ระดับ และมีการทำซ้ำเพื่อใช้ในการทดสอบความเหมาะสมของโมเดล (Lack-of-Fit test) จึงมีการทำการทดลองเพิ่มตามแนวแกนและการทำซ้ำที่จุดกึ่งกลางของแผนการทดลอง

งานวิจัยได้ทำการคัดแปรแป้งข้าว 2 สายพันธุ์ คือ พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (KDML 105) ซึ่งเป็นแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสอยู่ระหว่าง 12-16 % โดยน้ำหนักแห้ง จัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง และพันธุ์ชัยนาท 1 (CN1) มีปริมาณแอมิโลสอยู่ระหว่าง 26 -30% โดยน้ำหนักแห้ง จัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง นำมาตรวจหา T_g , T_{gel} และ T_m ของแป้งข้าว KDML105 และ CN1 ด้วยเครื่อง DSC แสดงดังตารางที่ 4 เพื่อนำมากำหนดสถานะในการคัดแปร

ตารางที่ 4 อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน และอุณหภูมิหลอมเหลวของแป้งข้าว

พันธุ์ข้าว	อุณหภูมิ กลาสทรานซิชัน ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิ เจลาติไนเซชัน ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิ หลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)
KDML 105	52.25 ± 0.12	67.17 ± 0.10	130.08 ± 0.05
CN1	57.83 ± 0.01	75.05 ± 0.04	130.15 ± 0.22

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางที่ 4 นำค่า T_g , T_{gel} และ T_m ของแป้งข้าวมากำหนดสถานะในการคัดแปรโดย HMT คัดแปรที่อุณหภูมิ สูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน (T_{gel}) แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และจำกัดปริมาณความชื้น 18 – 27 % ได้ช่วงของอุณหภูมิการคัดแปรวิธี HMT ของแป้ง KDML105 และ CN1 คืออุณหภูมิในการคัดแปร (X_1) $90 - 120^{\circ}\text{C}$ ระยะเวลาการคัดแปร (X_2) 1- 3 h และปริมาณความชื้น (X_3) 18 – 27% ได้สิ่งทดลอง จำนวน 20 สิ่งทดลอง (ตารางที่ 5) และ วิธี ANN กำหนดสถานะในการคัดแปร ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง และสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน มีน้ำในระบบมากเกินไปพอสำหรับการเกิดเจลาติไนเซชัน การคัดแปรวิธี ANN กับแป้ง KDML105 ใช้อุณหภูมิ (X_1) $55 - 60^{\circ}\text{C}$ และระยะเวลาการคัดแปร (X_2) 12- 36 h และแป้ง CN1

ใช้อุณหภูมิ (X_1) 60 - 70 °C และ ระยะเวลาการดัดแปร (X_2) 12- 36 h ได้สิ่งทดลองจำนวน 13 สิ่งทดลอง (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 5 ค่ารหัสแผนการทดลองแบบ FCCD ของอุณหภูมิ เวลา และความชื้นที่ใช้กำหนดสิ่งทดลองในการดัดแปรแป้งข้าวทั้งสองพันธุ์ด้วยวิธี HMT

สิ่งทดลอง	อุณหภูมิ (X_1)		เวลา (X_2)		ความชื้น(X_3)	
	ค่ารหัส	ค่าจริง	ค่ารหัส	ค่าจริง	ค่ารหัส	ค่าจริง
1	-1	90	-1	1	-1	18.0
2	1	120	-1	1	-1	18.0
3	-1	90	1	3	-1	18.0
4	1	120	1	3	-1	18.0
5	-1	90	-1	1	1	27.0
6	1	120	-1	1	1	27.0
7	-1	90	1	3	1	27.0
8	1	120	1	3	1	27.0
9	-1	90	0	2	0	22.5
10	1	120	0	2	0	22.5
11	0	105	-1	1	0	22.5
12	0	105	1	3	0	22.5
13	0	105	0	2	-1	18.0
14	0	105	0	2	1	27.0
15 – 20	0	105	0	2	0	22.5

ตารางที่ 6 ค่ารหัสแผนการทดลองแบบ FCCD ของอุณหภูมิ และเวลา ที่ใช้กำหนดสิ่งทดลองในการตัดแปรงทางกายภาพของแป้งข้าวด้วยวิธี ANN

สิ่งทดลอง	พันธุ์ KDML 105				พันธุ์ CN1			
	อุณหภูมิ (X_1)		เวลา (X_2)		อุณหภูมิ (X_1)		เวลา (X_2)	
	ค่ารหัส	ค่าจริง	ค่ารหัส	ค่าจริง	ค่ารหัส	ค่าจริง	ค่ารหัส	ค่าจริง
1	-1	55	-1	12	-1	60	-1	12
2	1	65	-1	12	1	70	-1	12
3	-1	55	1	36	-1	60	1	36
4	1	65	1	36	1	70	1	36
5	-1	55	0	24	-1	60	0	24
6	1	65	0	24	1	70	0	24
7	0	60	-1	12	0	65	-1	12
8	0	60	1	36	0	65	1	36
9-13	0	60	0	24	0	65	0	24

5.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการวางแผนการทดลองแบบ Face central composite design มาทำการวิเคราะห์สมการอันดับสอง (Second order model) หรือ quadratic model

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \beta_{11} X_1 X_2 + \beta_{22} X_1 X_3 + \dots$$

เมื่อ Y คือ ค่าตอบสนอง

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ คือ สัมประสิทธิ์ของจุดตัดแกน Y สมการเส้นตรง สมการอันดับสอง (quadratic) และเทอมอิทธิพลร่วม ตามลำดับ

การตัดแปรงวิธี HMT และวิธี ANN กับแป้งข้าว KDML 105 และ CN1 ด้วยสภาวะการตัดแปรงที่แตกต่างกัน นำแป้งตัดแปรงมาตรวจวัดคุณสมบัติทางเคมีกายภาพได้แก่ สมบัติด้านความหนืด สมบัติผิววิทยากระแส ลักษณะเนื้อสัมผัส และสมบัติด้านความร้อนแล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุเพื่อทดสอบความเหมาะสม (lack of fit) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

(coefficient of determinated: R^2) ของสมการตอบสนองที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ของตัวแปรตอบสนอง เพื่อใช้ในการคัดเลือกแบบจำลองของสมการที่ใช้ในการทำนายค่าตอบสนองของงานวิจัย

6. การประยุกต์ใช้สมการทำนายค่าตอบสนองของการดัดแปรแป้งข้าว

6.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติแป้งข้าวดัดแปรกับแป้งข้าวที่อายุการเก็บ 4 เดือน

การหาสถานะการดัดแปรแป้งข้าวเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับข้าวที่มีอายุการเก็บ 4 เดือน ทำได้โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง นำกราฟ Contour plot ของสมการตอบสนองที่มีค่าไม่ต่างจาก ค่า Final viscosity, Setback, Storage Modulus (G') 95 °C และ 25 °C, Hardness, Springiness, Onset temperature : T_o และ Enthalpy: ΔH ของแป้งข้าวที่ผลิตจากข้าวทั้งเมล็ดที่เก็บเป็นระยะเวลา 4 เดือน และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่มีค่ามากกว่า 0.80 ทั้งหมดมาซ้อนทับกัน โดยใช้ ที่อุณหภูมิ 35 ± 2 °C เป็นบริเวณที่มีค่าตอบสนองทุกค่าอยู่ในขอบเขตที่ต้องการบริเวณที่ค่าตอบสนองทุกค่าซ้อนทับกันได้ คือ สถานะที่เหมาะสมในการบอกลักษณะการเก็บของข้าวทั้งเมล็ด

เมื่อได้จุดที่เหมาะสมเป็นสถานะการดัดแปรแป้งข้าวทั้งสองพันธุ์ ทำการวัดค่าตอบสนอง คือ Final viscosity, Setback, Hardness, Springiness, G' 95 °C, G' 25 °C, T_o และ ΔH เพื่อยืนยันความแม่นยำของสมการถดถอยที่ใช้ในการทำนาย เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของค่าที่ตรวจสอบได้และค่าจากสมการ โดยใช้ t -test ยืนยันผลการคาดคะเน ค่าที่ตรวจสอบและค่าจากสมการไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

6.2 การดัดแปรแป้งข้าวเพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร

6.2.1 สถานะการดัดแปรแป้งข้าวที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว

สถานะการดัดแปรแป้งข้าวเพื่อการผลิตก๋วยเตี๋ยว 3 ชนิด คือ เส้นสด เส้นกึ่งแห้ง และเส้นแห้ง ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยการนำกราฟ contour plot ของสมการตอบสนองที่เหมาะสมและมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูงทั้งหมดมาซ้อนทับกัน โดยใช้แป้งข้าวทางการค้า PS1[®], PS2[®] และ PS3[®] แป้งดัดแปรทางการค้า ผลิตก๋วยเตี๋ยวเส้นสด เส้นเล็กกึ่งแห้ง และเส้นเล็กอบแห้ง ตามลำดับ จากบริษัทเนชั่นแนล สตาร์ช แอนด์ เคมีเคิลไทยแลนด์จำกัด เป็นค่าตอบสนอง

เป้าหมาย ได้บริเวณที่ซ้อนทับกัน คือ สภาวะการตัดแปรแป้งข้าวที่เหมาะสมในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแต่ละชนิด มีการผลิตและการตรวจสอบคุณภาพ

6.2.1.1 การผลิตผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวชนิดต่างๆ

เตรียมน้ำแป้งข้าวตัดแปรที่ได้จากสภาวะการตัดแปรที่เหมาะสมจากข้อ

6.2.1 ความเข้มข้น 40 % แช่น้ำแป้งเป็นเวลา 3 h โดยเว้นระยะการกวนน้ำแป้งทุกๆ 0.5 h เทน้ำแป้งใส่ถาดสแตนเลสขนาด 20 x 30 cm ถาดละ 60 g. นำไปนึ่งด้วยเครื่องนึ่งอาหารไฟฟ้า นาน 5 min. ทิ้งให้แผ่นแป้งเย็นเป็นเวลา 3 min. แล้วลอกแผ่นแป้งออกจากถาด วางไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อลดความชื้นนาน 5 min. ซ้อนแผ่นแป้งทับกัน 10 แผ่น โดยมีพลาสติกคั่นระหว่างแผ่น นำใส่ถุงพลาสติก ปิดผนึกให้เรียบร้อย ก่อนนำไปต้มในตู้เย็นอุณหภูมิ 4°C นาน 6 h. ตัดแผ่นแป้งด้วยเครื่องตัดเส้นขนาด 1 cm. ได้ผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวเส้นสดความชื้นเท่ากับ 64 % จากนั้นนำเส้นสดมาเรียงใส่ถาดอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 °C นาน 10-15 min. ให้มีความชื้นในผลิตภัณฑ์ 30 % ได้ผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กกึ่งแห้ง ส่วนก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กอบแห้งทำโดยการนำเส้นสดมาเรียงใส่ถาดอบแห้งที่อุณหภูมิ 45±5 °C นาน 2 h. บรรจุเส้นก๋วยเตี๋ยวในถุงพอลิเอทิลีน ปิดผนึกแล้วนำไปตรวจสอบคุณภาพต่อไป

6.2.1.2 การตรวจสอบคุณภาพเส้นก๋วยเตี๋ยว

ก) การวัดเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยว

การวัดเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยว ใช้หัววัด Light Knife Blade (A/LKB-F) กำหนดให้อัตราเร็วหัววัดก่อนการทดสอบ (pre-test speed) เท่ากับ 0.2 ml/s อัตราเร็วระหว่างการทดสอบ (test speed) เท่ากับ 0.2 ml/s และอัตราเร็วหลังการทดสอบ (post-test speed) เท่ากับ 10.0 ml/s ระยะทางการกด 0.4 ml ให้ trigger type auto เท่ากับ 10 g และอัตราการได้มาของข้อมูล 200 pps. (data acquisition rate 200 pps.) บันทึกเป็นค่าแรงกดสูงสุด (maximum cutting force)

ข) ร้อยละของการดูดน้ำ (Water absorption)

ตามวิธีการของ Lee *et.al.* (2005) โดยนำเส้นก๋วยเตี๋ยว 5 g. โดยน้ำหนัก ตัดเป็นท่อนยาว 3-5 cm. ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 ml. ซึ่งมีน้ำกลั่นต้มเดือด 200 ml ปิดด้วยกระดาษฟิลา นำผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวเส้นสดต้มนาน 5 s. เส้นเล็กกึ่งแห้ง และเส้นเล็กอบแห้งต้มนาน 5 และ 10 min. ตามลำดับ จากนั้นจึงกรองน้ำออก (เก็บน้ำที่กรองได้ไว้สำหรับวัดปริมาณเนื้อแป้งที่สูญเสียในระหว่างการต้ม) นำเส้นที่ได้จากการต้ม เกลบบนตะแกรง ล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วทิ้งให้สะเด็ดน้ำนาน 5 นาที ชั่งน้ำหนักของเส้น คำนวณการพองตัวของเส้นในระหว่างการต้ม

$$\text{การดูดน้ำ (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักเส้นหลังต้ม} - \text{น้ำหนักเส้นก่อนต้ม}) \times 100}{\text{น้ำหนักเส้นก่อนต้ม}}$$

ค) ร้อยละของการสูญเสียของแข็งระหว่างต้ม (Cooking loss)

นำเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผ่านการต้มสุกตามระยะเวลาที่เหมาะสมแล้วสะเด็ดน้ำผ่านกระชอน แล้วใช้น้ำกลั่นล้างเส้นก๋วยเตี๋ยว รวบรวมน้ำต้มเส้นก๋วยเตี๋ยวและน้ำล้างทั้งหมดมาระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C จนน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำบีกเกอร์ที่ระเหยน้ำจนหมดแล้วมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละการสูญเสียของแข็งระหว่างการต้ม

$$\text{การสูญเสียของแข็งระหว่างต้ม (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่} \times 100}{\text{น้ำหนักเส้นก๋วยเตี๋ยวก่อนต้ม}}$$

6.2.2 สภาวะการดัดแปรแป้งใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดในผลิตภัณฑ์อาหาร

โดยศึกษาหาสภาวะของแป้งดัดแปรที่ใช้เป็นสารให้ความหนืดในผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ ซอสมะเขือเทศ น้ำสลัด และ ใส้คัสตาร์ด ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยการนำกราฟ contour plot ของสมการตอบสนองที่เหมาะสมและมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูงทั้งหมดมาซ้อนทับกัน โดยใช้ แป้งทางการค้า (NL®; บริษัทเนชั่นแนล สตาร์ช แอนด์ เคมีเคิลไทยแลนด์ จำกัด) ที่ใช้เป็นสารให้ความหนืดในผลิตภัณฑ์เป็นตัวอย่างเป้าหมาย บริเวณที่ซ้อนทับกันได้ คือ สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารให้ความหนืดในอาหาร

6.2.2.1 การใช้แป้งคัดแปรทางเพื่อเป็นสารให้ความหนืดในซอสมะเขือเทศ น้ำสลัด และ ไส้คัสตาร์ด

ก) การเตรียมซอสมะเขือเทศ (สูตร ภาคผนวก ค) นำน้ำตาล เกลือ และ แป้งคัดแปร ผสมให้เข้ากันและละลายด้วยน้ำ ให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 95°C นาน 5 min. จากนั้นนำไปลดอุณหภูมิลงให้เท่ากับอุณหภูมิห้อง ผสมเนื้อมะเขือเทศเข้มข้น และน้ำส้มสายชู คน จนของผสมเป็นเนื้อเดียวกัน นำมาผ่านความร้อนระดับพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ $75-80^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 min. บรรจุในขวดแก้ว ปิดฝา และทำให้เย็นในอ่างน้ำเย็น

ข) การเตรียมน้ำสลัด (สูตร ภาคผนวก ค) นำส่วนผสมผสมทุกอย่าง ยกเว้นน้ำมันพืชในเครื่องผสม ได้แก่ น้ำตาลทราย เกลือ และ เลซิทีน ผสมส่วนผสมให้เข้ากัน ด้วยความเร็วสูง 2 min. ค่อยๆ เติมน้ำมันพืชจนหมด ผสมด้วยความเร็วสูง จนเป็นเนื้อเดียวกัน เติมน้ำส้มสายชู ตีผสมอีกครั้งความเร็วปานกลางประมาณ 1 min. จนเนื้อเนียน เติมเจลของแป้งคัดแปร (ผสมแป้งและน้ำแล้วนำไปให้ความร้อนจนแป้งสุกเป็นเจล) ผสมจนเข้ากัน (คัดแปลงจากจาก อภิญา, 2544) นำมาผ่านความร้อนระดับพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ $75-80^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 min. บรรจุในขวดแก้ว ปิดฝา และทำให้เย็นในอ่างน้ำเย็น

ค) การเตรียมไส้คัสตาร์ด (สูตร ภาคผนวก ค) นำแป้งคัดแปรละลายในน้ำ ใส่ไข่แดง เนย นมข้นจืด และเกลือ คนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำใส่ในหม้อต้มสองชั้น และให้ความร้อนอุณหภูมิประมาณ 60 ถึง 75°C คนตลอดเวลา เป็นเวลา 15-20 min. บรรจุในขวดแก้ว ปิดฝา และทำให้เย็นในอ่างน้ำเย็น

6.2.2.2 การตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ ซอสมะเขือเทศ น้ำสลัด และไส้คัสตาร์ด

ก) ค่าความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบ Brookfield viscosity โดยใช้หัววัด Small adapter นัมเบอร์ 4 วัดที่ความเร็ว 100 rpm นาน 2 min. และควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C

ข) แรงต้านทานการไหลสูงสุดของผลิตภัณฑ์ (yield stress) วิเคราะห์ด้วยรีโอมิเตอร์ ด้วยหัววัดแบบ Parallel-plate ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 ml และกำหนด gap size ที่ 1000 ไมครอน กำหนดความถี่ 1 เฮิรซ์ และค่าความเครียดที่ 0.01-100 % บันทึกค่า G' และ G'' จนกระทั่งมีจุดตัดของเส้นกราฟ G' และ G'' บันทึกเป็น % yield stress ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

ค) ค่าความเป็นกรดด่าง โดยใช้พีเอชมิเตอร์ (pH meter)

ง) ค่าการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ (serum loss, SL) ด้วยวิธี Yuan และคณะ (1998) และ Thitipraphunkul และคณะ (2003) โดยเตรียมหลอดทดลองขนาด 15 ml นำไปชั่งน้ำหนัก แล้วบันทึกน้ำหนัก ชั่งผลิตภัณฑ์ตัวอย่างจำนวน 5 g ลงในหลอดทดลองบันทึกน้ำหนัก ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8,000 rpm นาน 10 นาที เทของเหลวใสบนตัวอย่างผลิตภัณฑ์ออก ชั่ง น้ำหนักหลอดทดลองเพื่อนำมาคำนวณหาค่า percent serum loss, SL จากสูตร

$$\% SL = \frac{(\text{น้ำหนักทั้งหมดก่อนทดลอง} - \text{น้ำหนักทั้งหมดหลังทดลอง}) \times 100}{\text{น้ำหนักทั้งหมดก่อนทดลอง}}$$

7. การทวนสอบ (verification)

ทวนสอบความถูกต้องจากสภาวะการตัดแปรที่ได้จากพื้นที่ที่ซ้อนทับ โดยเลือกจุดในพื้นที่ที่ซ้อนทับมาทำการผลิตผลิตภัณฑ์ นำมาวัดค่าตอบสนอง เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้จริงและค่าที่ทำนายโดยสมการถดถอย ทดสอบความแตกต่างของค่าทั้งสองด้วยการทดสอบแบบ t-test โดยค่าทั้งสองต้องไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

8. สถานที่ทดลอง

ห้องปฏิบัติการและอาคารแปรรูป ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

9. ระยะเวลาการทดลอง

เดือน พฤษภาคม 2550 – กุมภาพันธ์ 2556

ผลและวิจารณ์

1. การตัดแปรด้วยวิธี HMT ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว

1.1 การวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุ

การตัดแปรด้วยวิธี HMT ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว KDML105 และ CN1 จากการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ และค่า R^2 ของสมการแสดงดังตารางที่ 7 และ 8 ค่า R^2 ของสมการการทำนายค่าตอบสนองของ Final viscosity, Setback, Storage Modulus (G') 95 °C และ Storage Modulus (G') 25 °C, Hardness, Springiness, Onset temperature (T_o) และ Enthalpy (ΔH) ของแป้งข้าว KDML105 คือ 0.87 0.91 0.88 0.89 0.90 0.93 0.97 และ 0.94 ตามลำดับ และแป้งข้าว CN1 คือ 0.96 0.91 0.97 0.98 0.92 0.89 0.89 และ 0.97 ตามลำดับ

การทดสอบ Lack of Fit ของสมการถดถอยแบบพหุของสมบัติทางเคมีกายภาพแป้งข้าวตัดแปรพบว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แสดงว่าสมการถดถอยมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทำนาย โดยปัจจัยในการตัดแปร คือ อุณหภูมิ และปริมาณความชื้น ต่อค่าตอบสนองคือ Final viscosity, Setback, G' (95°C) และ G' (25°C) , Hardness, Springiness , T_o และ ΔH

ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์และค่า R^2 ของสมการถดถอยของแป้งข้าว KDML 105 คัดแปรด้วยวิธี HMT

ค่าสัมประสิทธิ์	สมบัติด้านความหนืด (Cp)		สมบัติทางกระแสวิทยา (Pa)		ลักษณะเนื้อสัมผัส		สมบัติด้านความร้อน	
	Setback	Final viscosity	G' (95 °C)	G' (25 °C)	Hardness (g)	Springiness (gs)	To (°C)	ΔH (J/g)
B_0	904.000	7285.800	26238.61	59000.00	111.42	0.430	93.92	2.26
B_1	34.430	-59.820	-388.90	-453.12	1.68	0.007	-0.65	0.12
B_2	-159.800	25.410	1070.02	-2947.76	-7.97	0.005	0.64	-2.61
B_3	-206.210	-145.230	-656.01	-3262.63	-14.08	-0.03	-0.06	0.83
B_{11}	-0.230	0.260	1.76	3.21	-0.01	-0.0003	0.003	-0.0007
B_{22}	24.220	-30.480	-193.62	318.26	2.54	0.003	-0.31	0.45
B_{33}	3.580	2.890	11.22	72.54	0.26	0.0006	-0.002	-0.02
B_{12}	0.550	-1.02	-5.90	26.72	-0.11	0.0018	0.02	-0.005
B_{13}	0.740	0.39	3.61	3.01	0.03	0.0001	0.003	-0.003
B_{23}	2.050	9.35	21.90	-27.84	0.57	-0.001	-0.05	0.04
R^2	0.910	0.87	0.88	0.89	0.90	0.93	0.97	0.94
$Sig_{Lack-of Fit}$	0.210	0.32	0.33	0.06	0.15	0.08	0.07	0.37

หมายเหตุ ค่า G' คือ Storage Modulus; To คือ Onset temperature; ΔH คือ Enthalpy

ตารางที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์และค่า R^2 ของสมการถดถอยของแป้งข้าว CN1 คัดแปรด้วยวิธี HMT

ค่าสัมประสิทธิ์	สมบัติด้านความหนืด (Cp)		สมบัติทางกระแสวิทยา (Pa)		ลักษณะเนื้อสัมผัส		สมบัติด้านความร้อน	
	Setback	Final viscosity	G' (95 °C)	G' (25 °C)	Hardness (g)	Springiness (gs)	To (°C)	ΔH (J/g)
B ₀	3836.75	8605.02	-17784.23	89084.30	-3531.84	0.574	148.48	28.38
B ₁	-14.63	-55.71	664.92	-1282.81	72.09	-0.002	-1.19	0.21
B ₂	-531.30	-62.91	91.20	3809.55	80.51	-0.357	8.95	-10.02
B ₃	-223.29	-317.71	-1306.14	-1260.31	-16.57	0.019	-3.16	-0.72
B ₁₁	-0.07	0.21	-3.45	6.60	-0.33	-0.00003	0.008	-0.002
B ₂₂	39.73	-17.36	-353.20	-563.63	-18.8	0.035	-1.30	0.59
B ₃₃	2.13	7.18	14.72	21.51	0.59	-0.001	0.09	0.02
B ₁₂	2.10	0.54	-4.28	-20.82	0.4	0.001	-0.06	0.06
B ₁₃	1.69	0.88	7.31	4.31	-0.09	0.0004	-0.01	-0.001
B ₂₃	9.13	3.30	98.62	47.28	-0.88	0.003	0.14	-0.02
R^2	0.908	0.962	0.97	0.98	0.92	0.89	0.89	0.97
$Sig_{Lack-of-Fit}$	0.155	0.494	0.05	0.33	0.79	0.16	0.62	0.05

หมายเหตุ ค่า G' คือ Storage Modulus; To คือ Onset temperature; ΔH คือ Enthalpy

1.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการดัดแปรวิธี HMT และค่าตอบสนอง

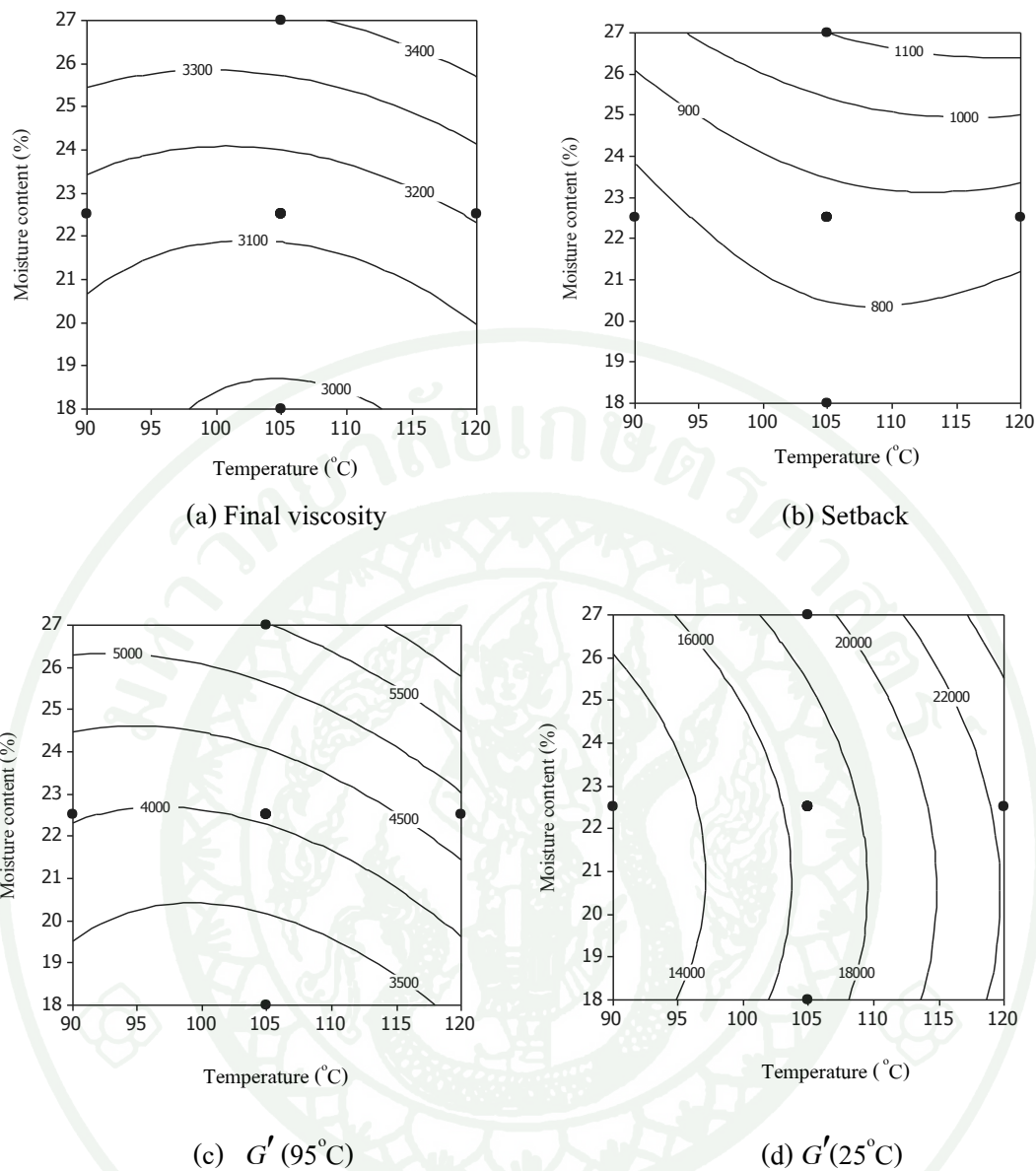
การดัดแปรวิธี HMT ที่อุณหภูมิ 90 105 120 °C และปริมาณความชื้น 18 22.5 27 % ของแป้งข้าวแอมิโลสสูง (CN1) และแป้งข้าวแอมิโลสปานกลาง (KDML105) มีแนวโน้มค่า Final viscosity, Setback, $G'(95^{\circ}\text{C})$ และ $G'(25^{\circ}\text{C})$, Hardness, Springiness, To และ ΔH เพิ่มขึ้น โดยการ HMT ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไต่ของโมเลกุลของแอมิโลส และจุดเชื่อมระหว่างโมเลกุลแอมิโลเพกติน (ส่วนที่เป็น amorphos) (Kiseleva *et al.*, 2004) ทำให้โครงสร้างทั้งสองส่วนของแป้งข้าว CN 1 และ KDML105 มีการจัดเรียงตัวกันให้เป็นระเบียบเพิ่มการยึดเกาะภายใน และสตาซ์แกรนูลของแป้งข้าวซึ่งปกติมีโครงสร้างผลึกแบบ A เมื่อผ่านการ HMT จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกแบบ V เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและลิปิด ทำให้แกรนูลของสตาซ์ CN1 และ KDML105 มีความคงทนต่อแรงเฉือน นอกจากนี้ ที่ระดับการดัดแปรที่อุณหภูมิสูงมากถึง 120 °C จะเกิดการแตกหักบางส่วนของแอมิโลเพกตินในสตาซ์แกรนูล เกิด amylose leaching เพิ่มขึ้น (Miyoshi, 2002) ส่งผลทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันอย่างรวดเร็วภายหลังการเกิดเจลลาทีนเซชัน ซึ่งทำให้ค่า Setback, Hardness และ $G'(25^{\circ}\text{C})$ ของเจลแป้งข้าวทั้งสองที่มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เจลของแป้งข้าวดัดแปรทั้งสองพันธุ์มีค่า Hardness, Springiness และความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น

แป้งข้าวดัดแปร HMT มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ To และการลดลงของ ΔH โดยแป้งข้าวที่ถูกดัดแปรด้วยสภาวะที่รุนแรง คือ อุณหภูมิ 120 °C ความชื้น 27 % นาน 3 h จะมีค่า ΔH ต่ำที่สุด และ To สูงที่สุด แสดงถึงโครงสร้างแอมิโลเพกตินที่มีผลึกที่แข็งแรงและคงทนต่อความร้อนได้ขึ้น (Lai, 2001; Lim *et al.*, 2001) ทำให้อุณหภูมิของการเกิดเจลลาทีนเซชันมีค่าเพิ่ม (Miyoshi, 2002; Gunaratne and Hoover, 2002, พิณทิพย์, 2547) Takahashi *et al.* (2005) ใช้วิธี HMT ดัดแปรแป้งข้าวที่อุณหภูมิ 120 °C นาน 1 h ความชื้น 20.6 % พบว่าแป้งมีค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด และค่าความหนืดสูงสุดมากขึ้น แสดงถึงความคงทนต่อความร้อนและแรงเฉือนของสตาซ์แกรนูลที่มีความเป็นผลึกและโครงสร้างที่แข็งแรง (Gomes *et al.*, 2004; Kiseleva *et al.*, 2004). การดัดแปรวิธี HMT แป้งข้าวแอมิโลสสูง (CN1) จะมีแนวโน้มของค่า Final viscosity, Setback, Hardness, Springiness และ $G'(95^{\circ}\text{C})$ และ $G'(25^{\circ}\text{C})$ เพิ่มขึ้นมากกว่า แป้งข้าวแอมิโลสปานกลาง (KDML105) โดยการ HMT ปรับปรุงโครงสร้างส่วนที่เคลื่อนที่ไต่ของแอมิโลส และจุดเชื่อมระหว่างโมเลกุลแอมิโลเพกตินของแป้งข้าวให้เป็นระเบียบ

การดัดแปรแบบ HMT ในแป้งข้าวแอมิโลสปานกลาง (KDML105) พบว่า ปริมาณความชื้นมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า Final viscosity, Setback, $G'(95^{\circ}\text{C})$ และ Hardness มากกว่าอุณหภูมิ

โดยพบว่าสภาวะดัดแปรที่ปริมาณความชื้น 27 % ให้ค่าตอบสนองทุกค่าสูงที่สุด ส่วนการดัดแปรในแป้งข้าวแอมิโลสสูง (CN1) พบว่า อุณหภูมิในการดัดแปรมีผลต่อค่า Setback, $G'(95^{\circ}\text{C})$, $G'(25^{\circ}\text{C})$, Hardness, Springiness, To และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลจากอุณหภูมิการดัดแปร และทุกคุณสมบัติทางเคมีกายภาพมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิการดัดแปร 120°C

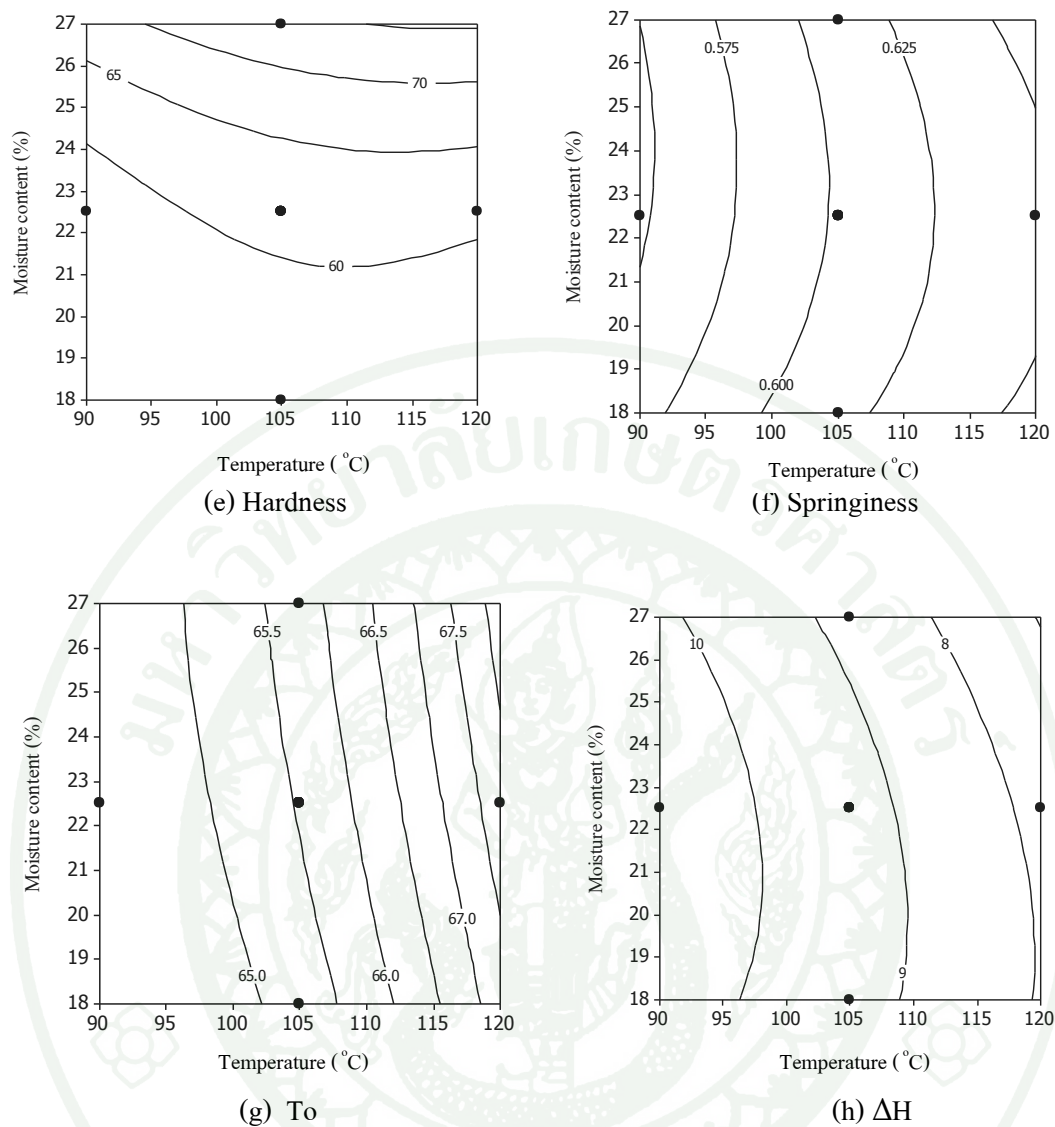
ดังนั้นการดัดแปรแบบ HMT กับแป้งแอมิโลสปานกลาง ต้องมีปริมาณความชื้นมากถึง 27% เป็นปัจจัยหลัก เพื่อให้มีการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ส่วนแป้งข้าวแอมิโลสสูง เนื่องจากแป้งแอมิโลสมีความเป็นผลึกมากกว่าจึงต้องอุณหภูมิการดัดแปรสูงสำหรับปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสถานะการดัดแปรแป้ง KDML 105 ด้วยวิธี HMT ต่อค่า

(a) Final viscosity (b) Setback (c) G' (95°C) (d) G' (25°C) (e) Hardness (f) Springiness

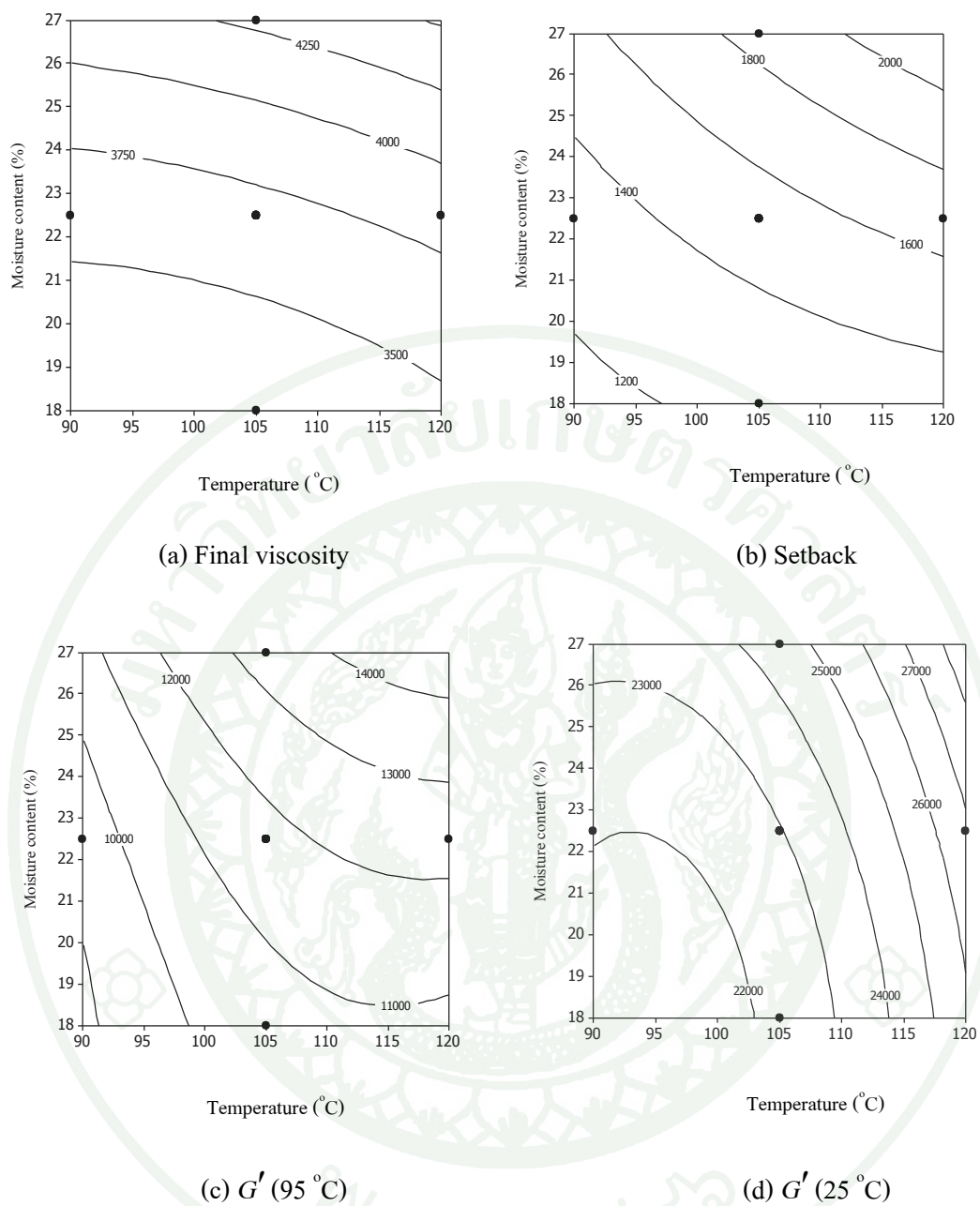
(g) To (h) ΔH



ภาพที่ 3 (ต่อ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสถานะการดัดแปรแป้ง KDML 105 ด้วยวิธี HMT ต่อค่า

(a) Final viscosity (b) Setback (c) G' (95°C) (d) G' (25°C) (e) Hardness (f) Springiness

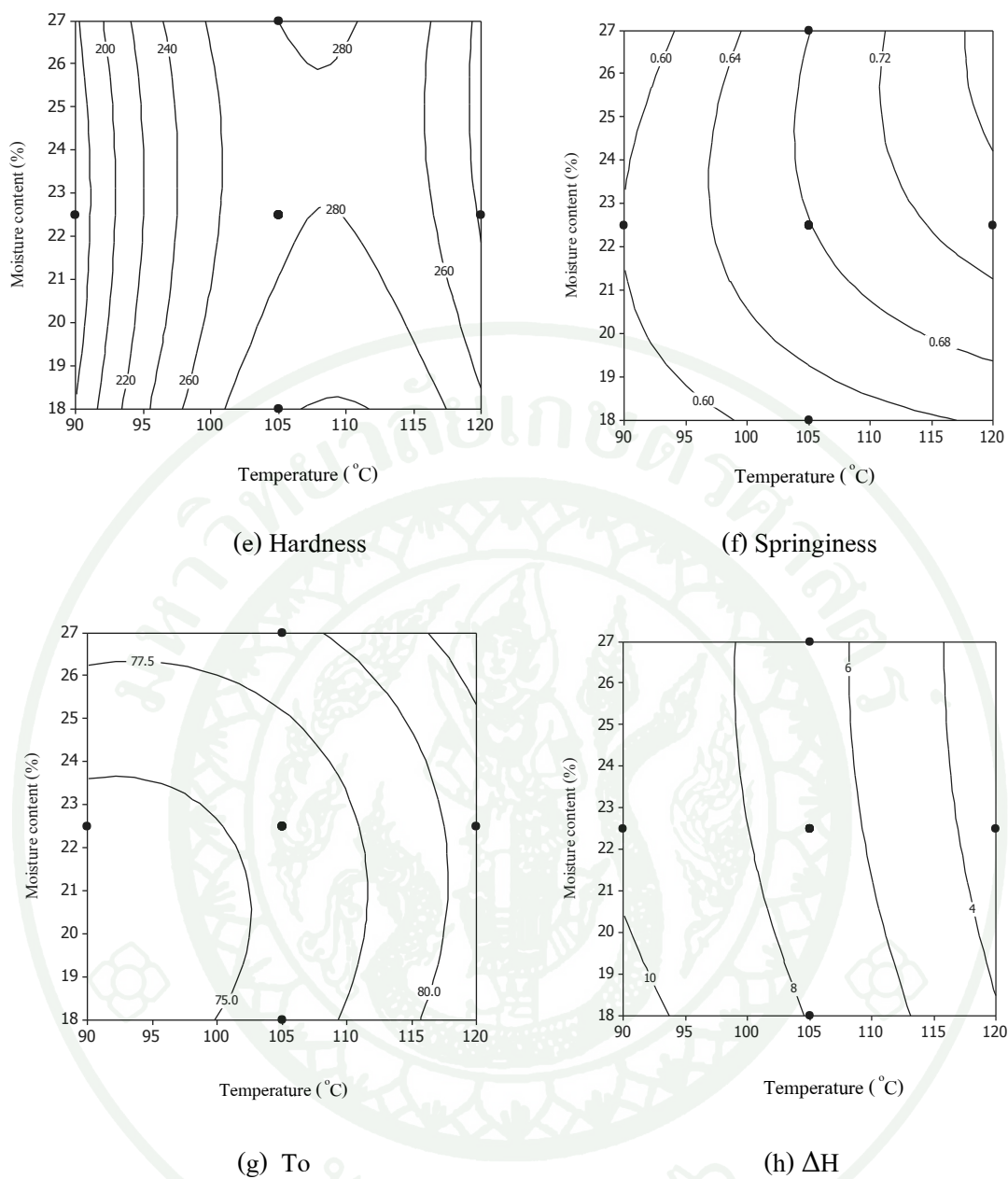
(g) To (h) ΔH



ภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการดัดแปรแป้ง CN1 ด้วยวิธี HMT ต่อค่า

(a) Final viscosity (b) Setback (c) G' (95 °C) (d) G' (25 °C) (e) Hardness

(f) Springiness (g) To (h) ΔH



ภาพที่ 4 (ต่อ) Contour plot แสดงผลของสภาวะการดัดแปรแป้งข้าว CN1 ด้วยวิธี HMT

(a) Final viscosity (b) Setback (c) G' (95 °C) (d) G' (25 °C) (e) Hardness

(f) Springiness (g) To (h) ΔH

2. การดัดแปรด้วยวิธี ANN ต่อ คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว

2.1 การวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุ

การดัดแปรด้วยวิธี ANN ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว KDML105 และ CN1 จากการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์และค่า R^2 ของสมการถดถอยค่าตอบสนอง แสดงดังตารางที่ 9 และ 10 ค่า R^2 ของสมการการทำนายค่าตอบสนองของ Final viscosity, Setback, $G'(95^\circ\text{C})$ และ $G'(25^\circ\text{C})$, Hardness, Springiness, To และ ΔH แป้งข้าว KDML105 คือ 0.93 0.89 0.94 0.96 0.97 0.91 0.97 และ 0.98 ตามลำดับ R^2 และแป้งข้าว CN1 คือ 0.92 0.95 0.91 0.90 0.85 0.87 และ 0.98 ตามลำดับ

การทดสอบ Lack of Fit ของสมการถดถอยแบบพหุของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าสมการถดถอยมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทำนาย โดยนำมาสร้าง contour plot ระหว่าง ปัจจัยในการดัดแปรคือ อุณหภูมิ และปริมาณความชื้นกับค่าตอบสนองคือ Final viscosity, Setback, $G'(95^\circ\text{C})$ และ $G'(25^\circ\text{C})$, Hardness, Springiness, To และ ΔH พบว่า แป้งข้าว KDML105 (ภาพที่ 5) และ CN1 (ภาพที่ 6) พบว่ามีแนวโน้มของ ค่า Final viscosity, Setback, Hardness, Springiness และ $G'(95^\circ\text{C})$ และ $G'(25^\circ\text{C})$ เพิ่มขึ้นทั้งสองพันธุ์ข้าว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์และค่า R^2 ของสมการถดถอยของแป้งข้าว KDML 105 คัดแปรด้วยวิธี ANN

ค่าสัมประสิทธิ์	สมบัติด้านความหนืด (Cp)		สมบัติทางกระแสวิทยา (Pa)		ลักษณะเนื้อสัมผัส		สมบัติด้านความร้อน	
	Setback	Final viscosity	G' (95 °C)	G' (25 °C)	Hardness (g)	Springiness (gs)	To (°C)	ΔH (J/g)
B_0	-14066.00	2680.78	8866.89	-60695.50	604.44	4.2125	145.84	93.43
B_1	458.61	-49.24	-272.12	2068.51	-19.46	-0.1406	-3.04	-2.91
B_2	12.60	0.47	-3.94	217.24	-3.51	-0.00051	-0.08	-0.27
B_{11}	-3.53	0.63	2.66	-14.80	0.17	0.0013	0.03	0.03
B_{22}	0.11	0.40	0.11	-2.01	0.02	0.00015	0.002	0.0015
B_{12}	-0.20	-0.12	-0.04	-1.13	0.05	-0.00007	0.0001	0.004
R^2	0.89	0.93	0.94	0.96	0.97	0.91	0.97	0.98
$Sig_{Lack-of Fit}$	0.66	0.20	0.36	0.22	0.05	0.96	0.32	0.79

หมายเหตุ ค่า G' คือ Storage Modulus; To คือ Onset temperature; ΔH คือ Enthalpy

ตารางที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์และค่า R^2 ของสมการถดถอยของแป้งข้าว CN 1 คัดแปรด้วยวิธี ANN

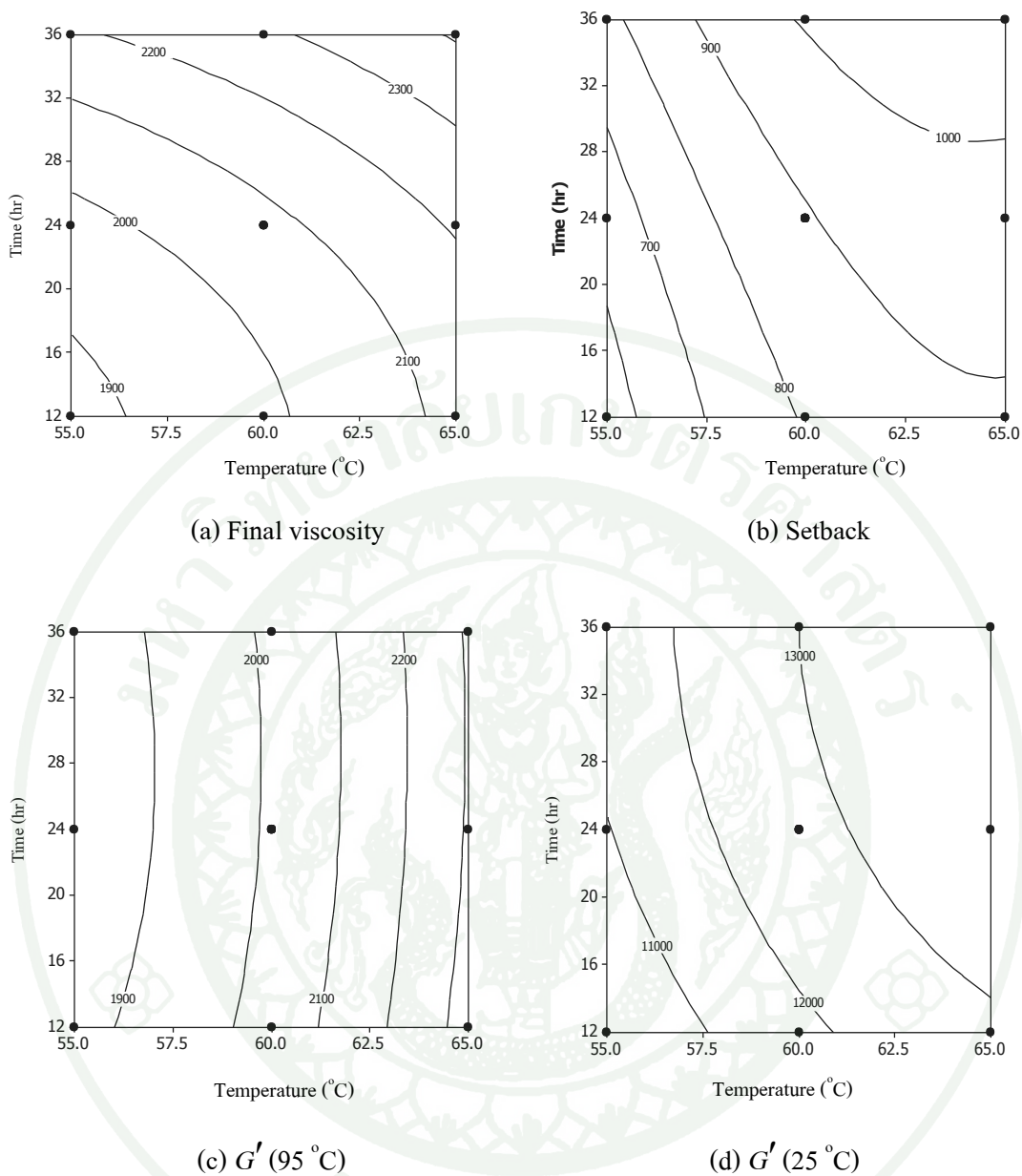
ค่าสัมประสิทธิ์	สมบัติด้านความหนืด (Cp)		สมบัติทางกระแสวิทยา (Pa)		ลักษณะเนื้อสัมผัส		สมบัติด้านความร้อน	
	Setback	Final viscosity	G' (95 °C)	G' (25 °C)	Hardness (g)	Springiness (gs)	To (°C)	ΔH (J/g)
B_0	-11065.36	-16461.67	95620.74	-5440.86	2082.88	23.72	59.24	12.05
B_1	280.14	492.71	-3179.71	185.82	-67.51	-0.70	0.23	-0.09
B_2	-4.91	-22.46	581.80	9.82	7.83	-0.05	0.15	-0.13
B_{11}	-1.30	-3.03	30.77	-1.37	0.57	0.005	0.0001	0.001
B_{22}	0.53	0.71	3.21	-0.31	0.01	0.0003	-0.001	-0.002
B_{12}	-0.26	-0.0001	-11.79	0.13	-0.11	0.0007	-0.001	0.004
R^2	0.94	0.95	0.91	0.95	0.90	0.85	0.87	0.98
$Sig_{Lack-of-Fit}$	0.27	0.38	0.47	0.49	0.82	0.25	0.91	0.05

หมายเหตุ ค่า G' คือ Storage Modulus; To คือ Onset temperature; ΔH คือ Enthalpy

2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการตัดแปรรูปและค่าตอบสนอง

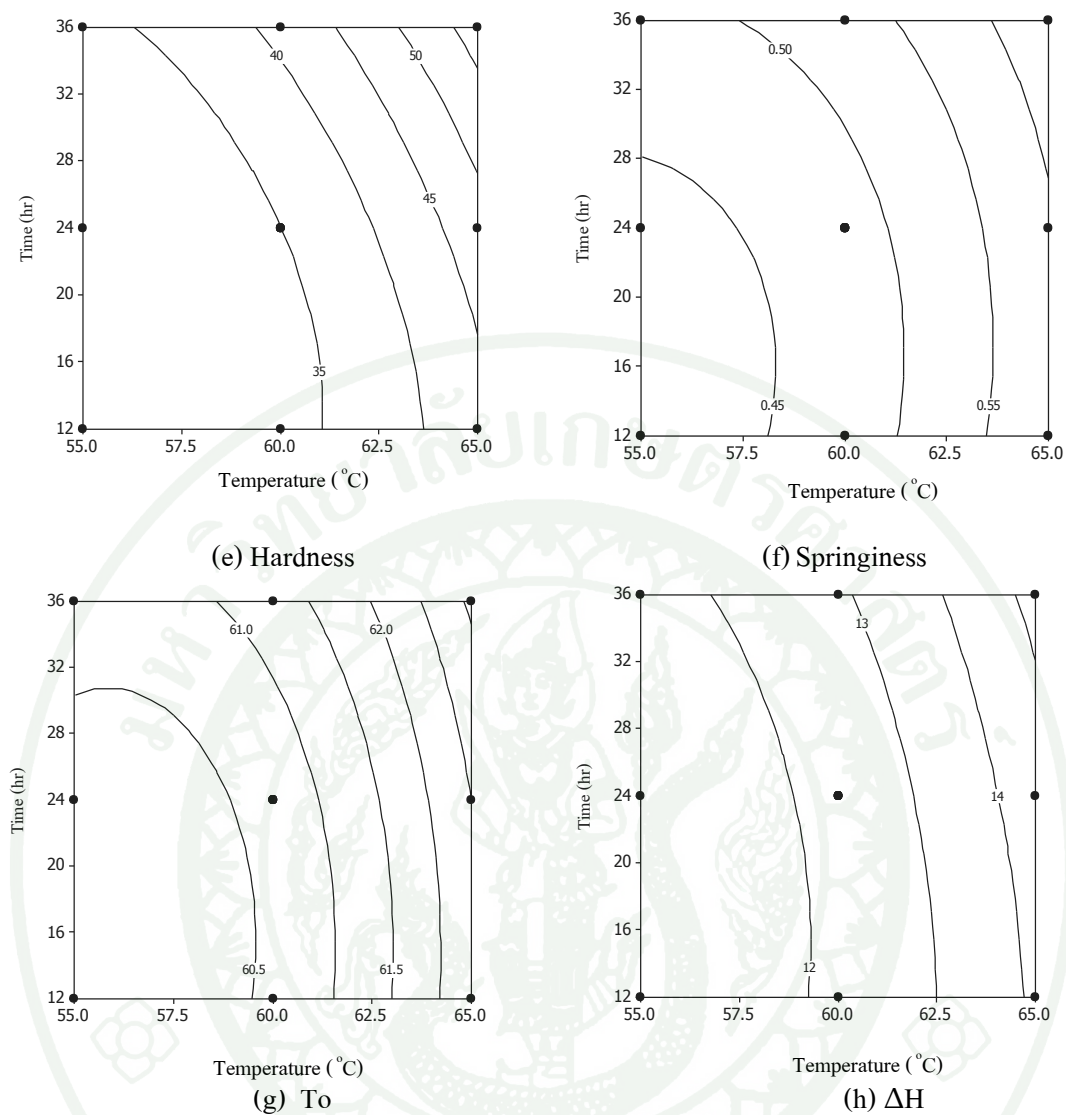
การตัดแปรรูปแบบ ANN กับแป้งข้าวแอมิโลสปานกลาง (KDML105) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลต่อค่าตอบสนองทุกค่ามากกว่าเวลา การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้ค่าตอบสนองทุกค่าเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิสูงสุดในการทดลองนี้คือ 65°C ทำให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพทุกค่ามีค่าสูงสุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hormdok and Noomhorm (2007) ที่ว่าการตัดแปรรูปแบบ ANN จะให้ผลชัดเจนเมื่ออุณหภูมิการตัดแปรรูปเข้าใกล้อุณหภูมิของการเกิดเจลลาติไนซ์เซชัน ส่วนการตัดแปรรูป ANN ในแป้งข้าวแอมิโลสสูง (CN1) พบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิการตัดแปรรูปมีผลต่อค่าตอบสนองทุกค่าเช่นเดียวกัน ยกเว้นค่า Hardness และ Springiness ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้น จากอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิ และเวลาในการตัดแปรรูป โดยมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 62°C ถึง 65°C

อิทธิพลของอุณหภูมิมีผลมากต่อการตัดแปรรูปแบบ ANN มากกว่าเวลา เนื่องจากการตัดแปรรูปแบบ ANN กระทำในสภาวะที่มีน้ำมากพอทำให้การพองตัวสตาร์ชแกรนูลเกิดได้เต็มที่เพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างผลึกเกิดการเคลื่อนที่ได้อยู่แล้ว การเพิ่มเวลาแช่จึงมีผลไม่มากนัก ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิจึงเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้ผลึกเคลื่อนที่ได้มากขึ้น



ภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการดัดแปรแป้ง ข้าว KDML 105 ด้วยวิธี ANN ต่อค่า

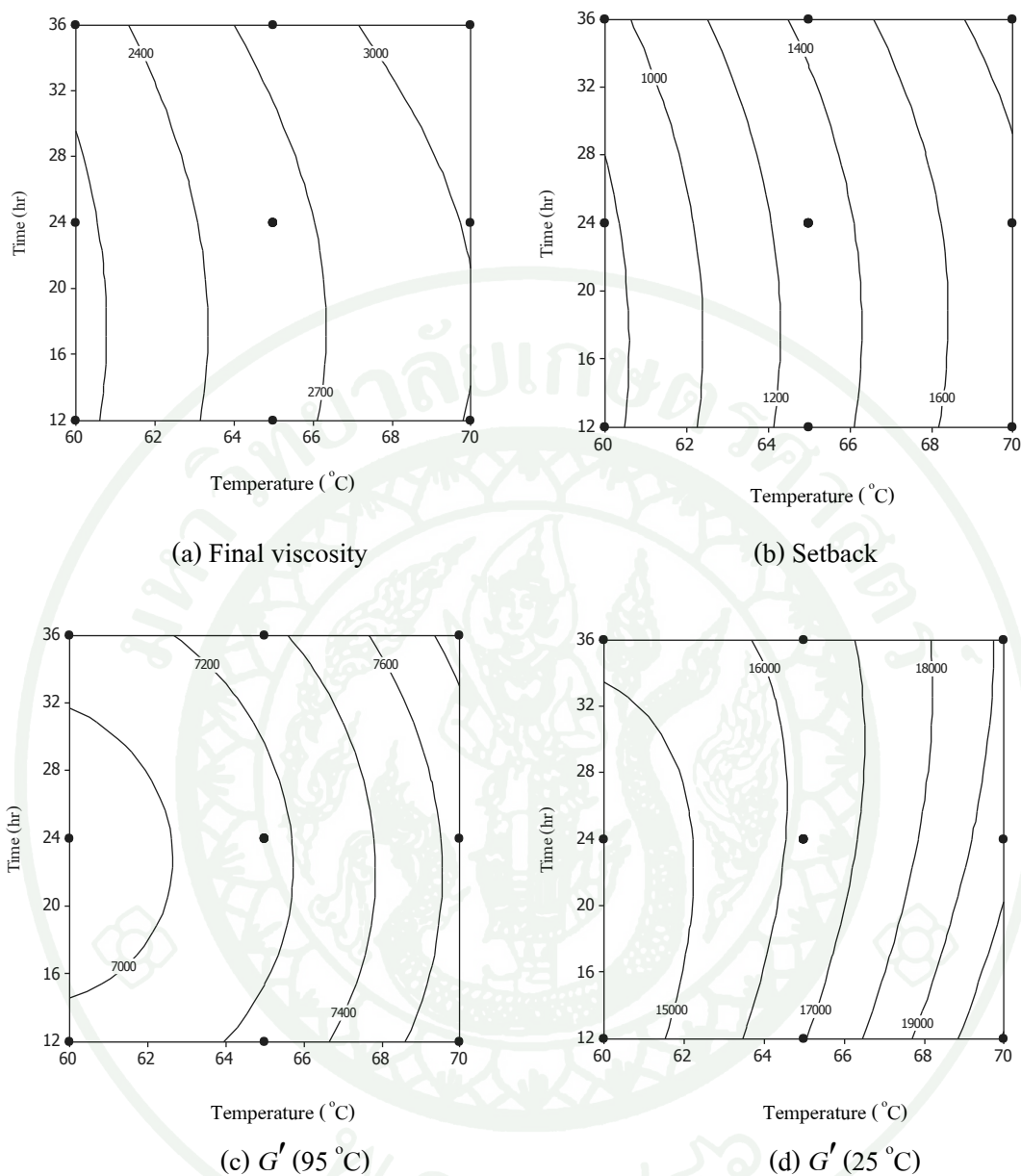
(a) Final viscosity (b) Setback (c) G' (95 °C) (d) G' (25 °C) (e) Hardness (f) Springiness
(g) To (h) ΔH



ภาพที่ 5 (ต่อ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการดัดแปรแป้ง ข้าว KDML 105 ด้วยวิธี ANN

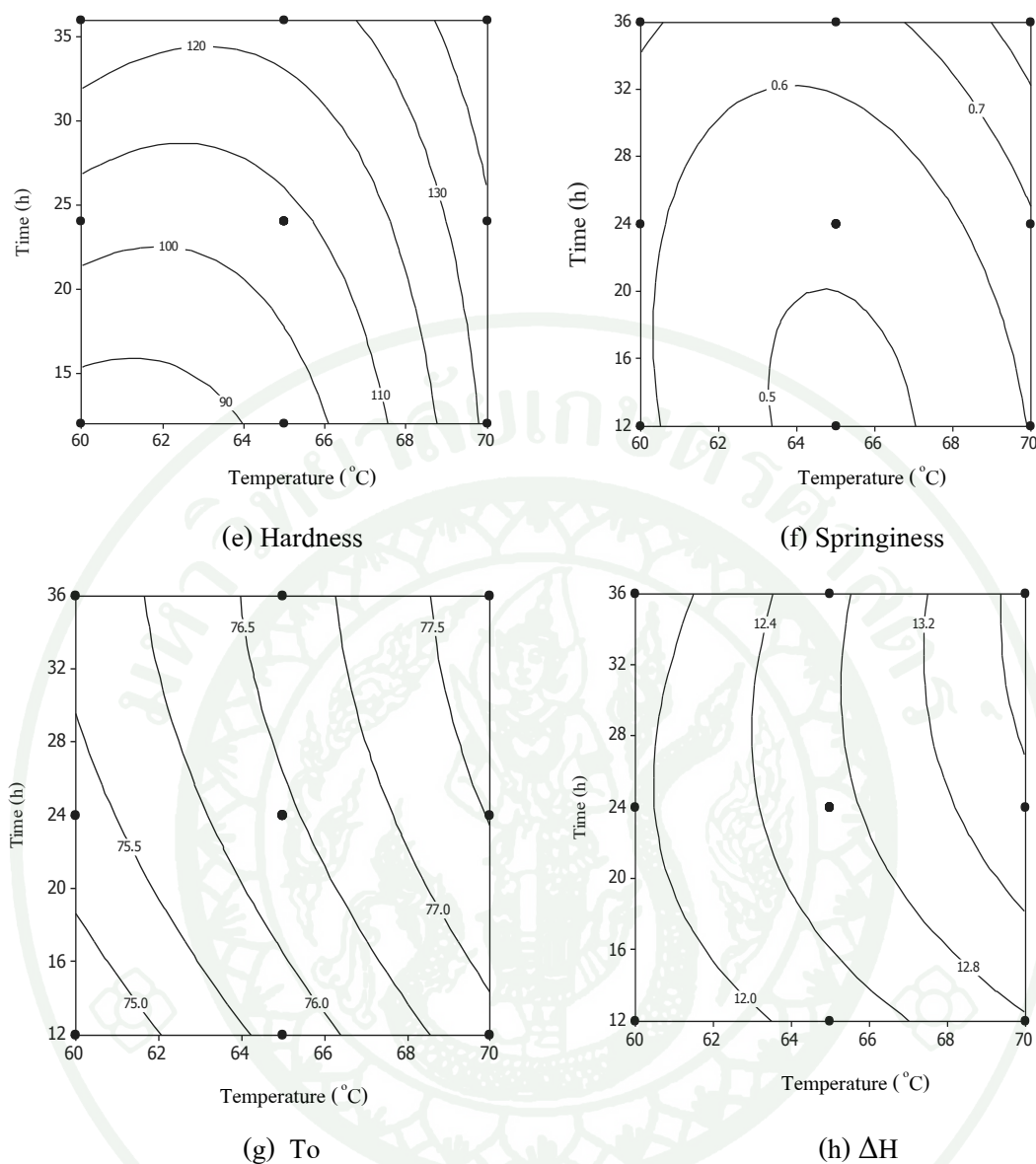
ต่อค่า (a) Final viscosity (b) Setback (c) G' (95 °C) (d) G' (25 °C) (e) Hardness

(f) Springiness (g) To (h) ΔH



ภาพที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสถานะการดัดแปรแป้งข้าว CN1 ด้วยวิธี ANN ต่อค่า

(a) Final viscosity (b) Setback (c) G' (95 °C) (d) G' (25 °C) (e) Hardness (f) Springiness
(g) To (h) ΔH



ภาพที่ 6 (ต่อ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการดัดแปรแป้งข้าว CN1 ด้วยวิธี ANN ต่อค่า

(a) Final viscosity (b) Setback (c) G' (95 °C) (d) G' (25 °C) (e) Hardness (f) Springiness
(g) To (h) ΔH

งานการวิจัยนี้พบว่า การดัดแปรแบบ HMT มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพมากกว่าการ ANN เป็นเพราะ HMT เป็นวิธีการให้ความร้อนที่สูงมาก และความชื้นต่ำ น้ำภายในโมเลกุลแสดงสมบัติเป็นพลาสติกไซเซออร์ช่วยจัดโครงสร้างโดยการเพิ่มการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแป้งภายในสตรัคเจอร์นูลทำให้โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเป็นระเบียบเพิ่มขึ้น HMT เป็นการดัดแปรในสภาวะที่รุนแรงกว่า ANN มาก ทำให้เกิดการแตกหักบางส่วนของโมเลกุลเอมิโด

เพกติน ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของ Amylose Leaching ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Lu *et al.*, 1996; Han and Hamaker, 2001; Miyoshi, 2002) นอกจากนี้ ในสภาวะที่ร้อนและความชื้นต่ำ ยังส่งเสริมให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเอมิโลสและลิปิด (amylose-lipid complex) เนื่องจากแป้งข้าวมีปริมาณไขมันประมาณ $0.17\% \pm 0.12$ (บุญทิวา, 2548) ทำให้เกิดเป็นผลึกแบบ V เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลึกที่มีความแข็งแรง ทำให้ค่า Final viscosity, Setback, $G'(25^\circ\text{C})$, Hardness, Springiness T_0 และ ΔH เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการดัดแปรเพิ่มขึ้น (Adebowale *et al.*, 2005 ; Tsutsui *et al.*, 2005)

3 สภาวะการดัดแปรที่เหมาะสมและการประยุกต์ใช้

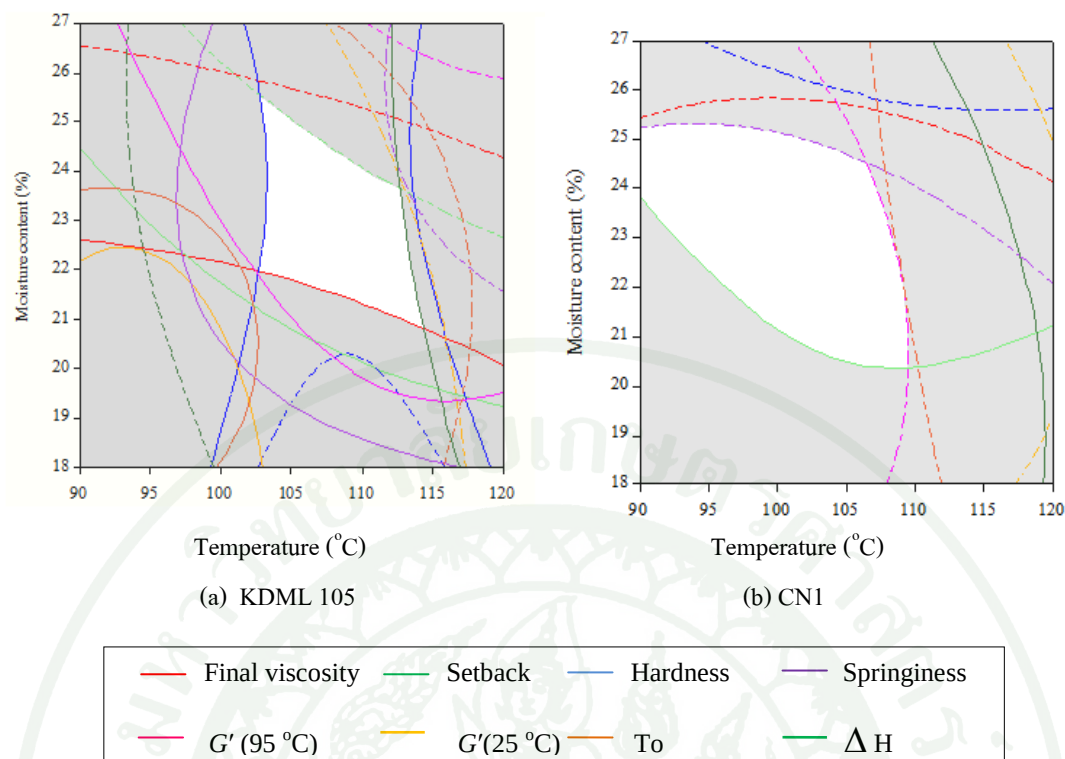
3.1 การดัดแปรข้าวให้มีสมบัติไม่แตกต่างจากข้าวที่ระยะเวลาเก็บ 4 เดือน

HMT เป็นการดัดแปรข้าวทำให้โครงสร้างข้าวมีความเป็นผลึกมากขึ้น แป้งข้าวเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเอมิโลสกับลิปิด การพองตัวของสตาร์ชแกรนูลแบ่งลดลง ทำให้เจลแบ่งมี Hardness เพิ่มขึ้น และ Stickness ลดลง ดังได้กล่าวมาแล้ว มีรายงานว่าสามารถเร่งให้ข้าวใหม่กลายเป็นข้าวเก่าได้ โดยการเพิ่มความร้อนให้กับข้าวสารสูงถึง 110°C ในภาชนะปิดสนิทโดยไม่ให้ความชื้นสูญหายไป นอกจากนี้การเป่าลมร้อน $150-250^\circ\text{C}$ หรือกระบวนการทำข้าวหนึ่ง (parboiled rice) เป็นวิธีการทำให้ข้าวเปลี่ยนสภาพเป็นข้าวเก่าได้เช่นกัน (งามชื่น, 2536) งานวิจัยนี้จึงเลือกสภาวะการดัดแปรแป้งข้าวด้วยวิธี HMT เนื่องจากสภาวะการดัดแปรนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยข้างต้น โดยใช้สมการค่าตอบสนองที่สามารถทำนายได้จากข้อ 1.1 และใช้ค่าตอบสนองของแป้งข้าวที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 เดือนเป็นค่าเป้าหมาย (ตารางที่ 11)

ตารางที่ 11 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง KDML105 และ แป้ง CN1 ที่อายุการเก็บ 4 เดือน

คุณสมบัติ	ข้าวอายุการเก็บรักษา 4 เดือน	
	KDML 105	CN1
Final viscosity (Cp)	2150 – 3300	3600 – 4080
Setback (Cp)	800 – 1500	1400 – 1700
Hardness (g)	35 – 70	270 – 288
Springiness (gs)	0.5- 0.65	0.64- 0.725
G' (95 °C) (Pa)	2100 – 4500	11250 – 14000
G' (25 °C) (Pa)	12000 – 18000	22000 – 25000
To (°C)	61.5 – 66	75 – 80
ΔH (J/g)	8 – 15.5	5 – 9

หลังจากนั้นทำการ optimization โดยการซ้อนทับ contour plot ที่ได้จากสมการของค่าตอบสนองที่สามารถใช้ในการทำนายได้ทั้ง 8 ค่าเพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการคัดแปรแป้งข้าวให้มีค่าตอบสนองดังกล่าวไม่แตกต่างทางสถิติกับค่าเป้าหมาย คือ แป้งข้าว ที่เก็บไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 เดือน ได้พื้นที่ที่มีสภาวะเหมาะสมในการคัดแปร แสดงในพื้นที่สีขาวของภาพที่ 7



ภาพที่ 7 สภาวะคัดแปรที่เหมาะสม (optimization) ของแป้งข้าวคัดแปร (a) KDML105 (b) CN1 ที่ใช้ค่าตอบสนองของแป้งข้าวอายุการเก็บ 4 เดือนเป็นค่าเป้าหมาย

หลังจากนั้นทำการทวนสอบความถูกต้องโดยคัดเลือกจุดที่เหมาะสมที่อยู่ในพื้นที่ดังกล่าวมา 1 จุด ในที่นี้คือ สภาวะการ HMT แป้งข้าว KDML105 อุณหภูมิ 105 °C ปริมาณความชื้น 22.5 % เป็นเวลา 2 h (ภาพที่ 7a) และ แป้งข้าว CN1 อุณหภูมิ 105 °C ปริมาณความชื้น 22.5 % เป็นเวลา 2 h (ภาพที่ 7b) นำมาทดลองหาค่าตอบสนองโดยใช้สมการถดถอยที่ใช้ในการทำนาย เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของค่าที่ได้จากสมการและค่าที่ได้จากการทดลอง ได้ผลแสดงตารางที่ 12 พบว่าค่าตอบสนอง คือ Final viscosity, Setback, Hardness, Springiness, G' (95 °C), G' (25 °C), T_o และ ΔH ของแป้งทั้งสองสภาวะ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับค่าจากสมการ แสดงว่าสามารถใช้สมการของการทำนายตัวแปรตอบสนอง ณ สภาวะดังกล่าวในการทำนายค่าตอบสนอง และเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการคัดแปรแป้งข้าวให้มีสมบัติทางเคมีกายภาพไม่แตกต่างจากข้าวที่เก็บไว้เป็นระยะเวลา 4 เดือน การประยุกต์ใช้ดังกล่าว สามารถคัดแปรแป้งข้าวให้เป็นแป้งข้าวเก่าได้ ซึ่งเหมาะสมในการนำมาแปรรูปเส้นก๋วยเตี๋ยว นอกจากนี้ยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายและสถานที่ในการเก็บรักษาข้าว

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการการทำนายและค่าจากการทดลอง โดยใช้ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตัวแปรตอบสนอง	แป้งข้าว CN1		แป้งข้าว KDML105	
	ค่าจากสมการ	ค่าจากการทดลอง ^{ns}	ค่าจากสมการ	ค่าจากการทดลอง ^{ns}
Final viscosity (Cp)	3759.46	3770.50±0.02	3123.46	3158.25±0.42
Setback (Cp)	1553.93	1549.43±0.52	1500.87	1485.84±0.13
Hardness (g)	242.81	250.01±0.01	67.08	67.94±0.011
Springiness (gs)	0.66	0.68±0.003	0.64	0.62±0.004
G' (95°C) (Pa)	12170.78	12163.85±0.52	4673.70	4690.95±0.47
G' (25 °C) (Pa)	22962.28	22898.15±0.21	16830.53	16885.45±0.03
To (°C)	73.47	73.5±0.01	65.41	65.5±0.01
ΔH (J/g)	7.01	7.25±0.003	9.32	9.45±0.006

หมายเหตุ ns ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.2 สถานะการตัดแปรที่เหมาะสมสำหรับการตัดแปรแป้งข้าวเพื่อใช้ในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว

3.2.1 สถานะการตัดแปรที่เหมาะสม

ในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวเส้นสด เส้นเล็กกึ่งแห้ง และเส้นเล็กกอบแห้ง ต้องใช้แป้งข้าวแอมิโลสสูง (CN1) ที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 4 เดือน เพื่อให้มีสมบัติทางเคมีกายภาพตามต้องการ การทดลองนี้ต้องการหาสถานะตัดแปรแบบ ANN ที่เหมาะสมสำหรับก๋วยเตี๋ยวเส้นสด และ การตัดแปรแบบ HMT ที่เหมาะสมสำหรับก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กกึ่งแห้ง และเส้นเล็กกอบแห้ง โดยใช้แป้งข้าวทางการค้า PS1[®] PS2[®] และ PS3[®] (บริษัท เนชั่นเนลสตาร์ชแอนด์เคมีเคิลไทยแลนด์ จำกัด) ตามลำดับ เป็นค่าตอบสนองเป้าหมาย ได้แก่ค่า Final viscosity, Setback, Hardness, Springiness, G' (95 °C), G' (25 °C), To และ ΔH (ตารางที่ 13)

ตารางที่ 13 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งดัดแปรทางการค้าที่ใช้ผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว

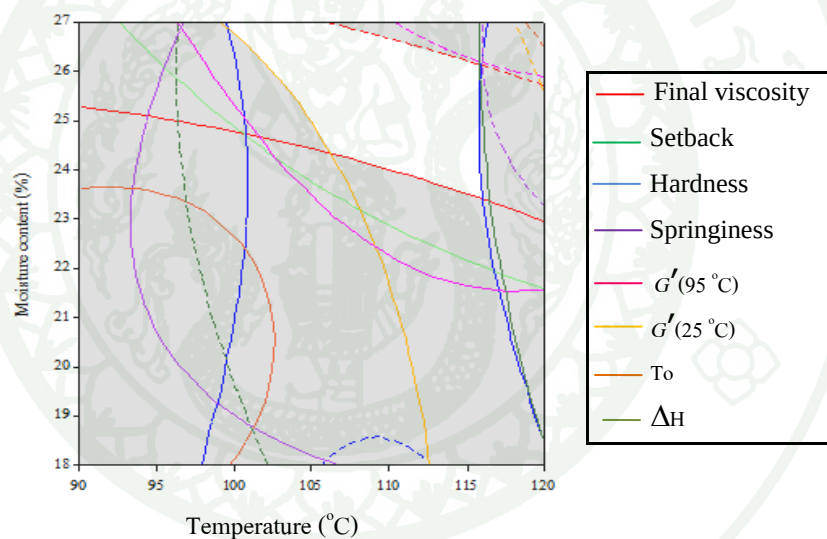
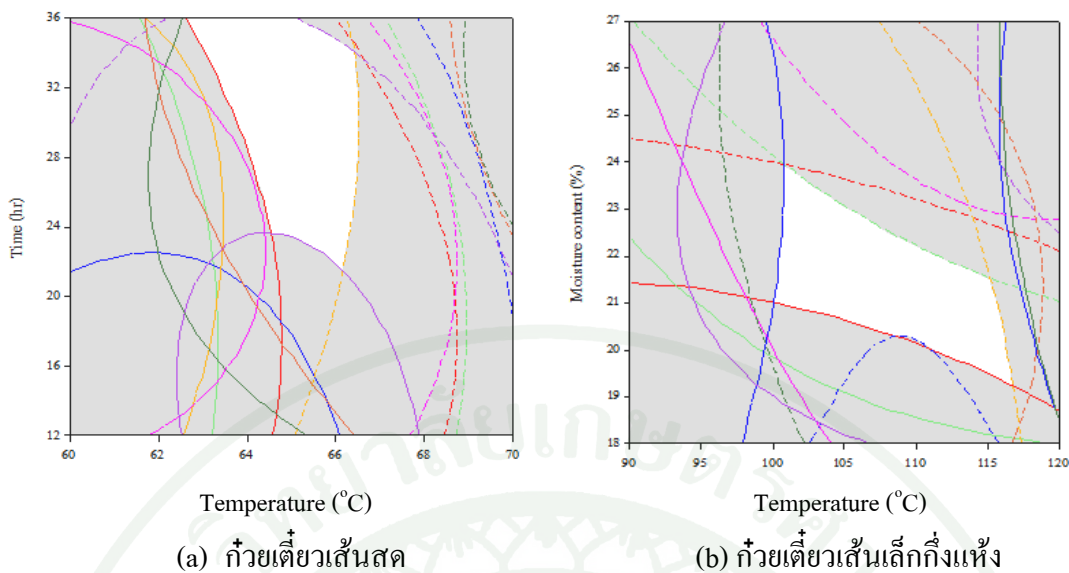
คุณลักษณะ	แป้ง PS1 [®]	แป้ง PS2 [®]	แป้ง PS3 [®]
ทางเคมีกายภาพ	(ก๋วยเตี๋ยวเส้นสด)	(ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กกึ่งแห้ง)	(ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กอบแห้ง)
Final viscosity (Cp)	2550 - 2900	3500 - 3800	3900 - 4300
Setback (Cp)	1100- 1650	1300 - 1500	1600 - 2200
Hardness (g)	100 - 135	260 - 280	260 - 298
Springiness (gs)	0.55 - 0.65	0.62 - 0.74	0.62 - 0.75
G' (95 °C) (Pa)	7100 - 7500	10500 - 12500	12000 - 14000
G' (25 °C) (Pa)	15500 - 17000	21400 - 25000	23700 - 28000
To (°C)	76 - 77.5	73 - 80.5	75 - 83.5
ΔH (J/g)	12.2 - 13.5	4 - 8.5	4 - 8.5

การทดลองนี้เลือกสถานะการดัดแปรแป้งข้าว CN1 แบบ ANN สำหรับ ก๋วยเตี๋ยวเส้นสด เนื่องจาก ก๋วยเตี๋ยวเส้นสด ต้องการลักษณะของเจลแป้งที่มีความหนืดสูง สตาร์ชแกรนูลมีการพองตัวสูง และมีค่า Setback สูง สำหรับเส้นเล็กกึ่งแห้ง และเส้นเล็กอบแห้ง ใช้การดัดแปรแป้งข้าว CN1 แบบ HMT เนื่องจากก๋วยเตี๋ยวทั้งสองชนิด ต้องการเจลแป้งที่มีการรีโทรเกรดในช่วงการเก็บรักษาสูง ต้องการลักษณะเส้นที่ทนต่อการให้ความร้อนในการคั้นรูปหรือปรุงอาหาร และเส้นที่ได้มีลักษณะยืดหยุ่นสูง ดังนั้นสตาร์ชแกรนูลจึงต้องมีความแข็งแรง ค่าการพองตัวไม่สูงมาก และทนต่อความร้อนในกระบวนการผลิตได้ดี

การหาค่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับการดัดแปรแป้งข้าวเพื่อทำเส้น ก๋วยเตี๋ยว โดยการ optimization จากการซ้อนทับ contour plot ที่ได้จากสมการของค่าตอบสนองที่สามารถใช้ในการทำนายได้ทั้ง 8 ค่า เพื่อหาค่าสถานะที่เหมาะสมในการดัดแปรแป้งข้าวให้มีค่าตอบสนองดังกล่าวไม่แตกต่างทางสถิติกับค่าเป้าหมายคือ แป้งข้าวทางการค้าสำหรับผลิต ก๋วยเตี๋ยวเส้นสด เส้นเล็กกึ่งแห้ง และเส้นเล็กอบแห้งดังได้กล่าวข้างต้น ได้พื้นที่ที่มีสถานะเหมาะสมในการดัดแปร แสดงในพื้นที่สีขาวของภาพที่ 8

หลังจากนั้นทำการทวนสอบความถูกต้องโดยคัดเลือกจุดที่เหมาะสมที่อยู่ในพื้นที่ดังกล่าวมา 1 จุด ในที่นี้คือ สถานะการ ดัดแปรแบบ ANN ที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 24 h สำหรับก๋วยเตี๋ยวเส้นสด (ภาพที่ 8a) สถานะการดัดแปรแบบ HMT ที่อุณหภูมิ 105 °C ความชื้น 22.5% เป็นเวลา 2 h

สำหรับก๊วยเตี๋ยวเส้นเล็กกึ่งแห้ง (ภาพที่ 8b) และ สภาวะการดัดแปรแบบ HMT ที่อุณหภูมิ 105 °C ความชื้น 27 % เป็นเวลา 2 h สำหรับก๊วยเตี๋ยวเส้นเล็กอบแห้ง (ภาพที่ 8c) นำมาทดลองหาค่าตอบสนอง โดยใช้ สมการถดถอยที่ใช้ในการทำนาย เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของ ค่าที่ตรวจสอบได้และค่าที่ได้จากสมการได้ผลแสดงใน ตารางที่ 14 พบว่าค่าตอบสนอง คือ Final viscosity, Setback, Hardness, Springiness, G' (95 °C), G' (25 °C) , T_0 และ ΔH ของแป้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับค่าจากสมการ แสดงว่าสามารถใช้สมการของตัวแปรตอบสนอง ณ สภาวะดังกล่าวในการทำนายค่าตอบสนองและเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการ ดัดแปรแป้งข้าวให้สมบัติทางเคมีกายภาพไม่แตกต่างจากแป้งข้าวทางการค้าสำหรับผลิตก๊วยเตี๋ยวเส้นสด เส้นเล็กกึ่งแห้ง และเส้นเล็ก อบแห้ง เป็นการลดการใช้สารเคมีอาหารในการปรับปรุงคุณภาพแป้งสำหรับผลิตเส้นก๊วยเตี๋ยวและลดระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าว



ภาพที่ 8 สภาวะตัดแปรที่เหมาะสม (optimization) ของแป้งข้าวคัดแปร (a) ก๋วยเตี๋ยวเส้นสด (b) ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กกึ่งแห้ง (c) ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กอบแห้ง ที่มีค่า response ของแป้งข้าวทางการค้า PS1[®], PS2[®] และ PS3[®] (บริษัท เนชั่นเนล สตาร์ช แอนด์ เคมีเคิลไทยแลนด์ จำกัด) เป็นค่าเป้าหมาย

ตารางที่ 14 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการการทำนายและค่าจากการทดลอง โดยใช้ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ของแปรงคัดแปรรูปที่ใช้ผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว

ค่าตอบสนอง	ก๋วยเตี๋ยวเส้นสด		ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กกึ่งแห้ง		ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กอบแห้ง	
	ค่าจากสมการ	ค่าจากการทดลอง ^{ns}	ค่าจากสมการ	ค่าจากการทดลอง ^{ns}	ค่าจากสมการ	ค่าจากการทดลอง ^{ns}
Final viscosity (Cp)	2754.34	2650.77 ± 15.1	3759.46	3670.14 ± 12.2	4374.61	4255.12 ± 0.55
Setback (Cp)	1507.10	1548.53 ± 17.3	1553.93	1548.54 ± 15.3	1904.28	2000.48 ± 11.3
Hardness (g)	125.06	130.19 ± 0.7	242.82	240.85 ± 12.1	249.23	247.15 ± 8.7
Springiness (gs)	0.40	0.40±0.016	0.66	0.67±0.01	0.65	0.66±0.01
G' (95°C) (Pa)	7034.50	7056.72±11.4	12170.78	12192.64±18.3	13904.40	13970.25±0.84
G' (25°C) (Pa)	16202.10	16100 ± 20.2	22962.20	22500.15 ± 18.4	24536.60	24350 ± 24.2
To (°C)	76.44	75.58±0.04	73.48	73.61±0.05	77.22	77.85±0.01
ΔH (J/g)	12.84	12.91±0.01	7.01	7.10±0.002	6.74	6.75±0.01

หมายเหตุ ns ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.2.2 คุณภาพการหุงต้มและลักษณะเนื้อสัมผัส

คุณภาพการหุงต้มและลักษณะเนื้อสัมผัส ของเส้นก๋วยเตี๋ยวชนิดต่างๆ ที่เตรียมจากแปรงคัดแปรรูป HMT และ ANN ที่ได้ นำมาตรวจสอบเปรียบเทียบกับเส้นก๋วยเตี๋ยวที่เตรียมจากแปรงคัดแปรรูปทางการค้า PS1[®], PS2[®] และ PS3[®] พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 15)

ตารางที่ 15 คุณภาพการหุงต้ม และคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวชนิดต่างๆ ที่ผลิตจากแป้งข้าวคั่วแปรรูปเปรียบเทียบกับแป้งทางการค้า

ลักษณะคุณภาพ	เส้นสด		เส้นเล็กกึ่งแห้ง		เส้นเล็กอบแห้ง	
	ANN	PS1 [®]	HMT	PS2 [®]	HMT	PS3 [®]
	60°C;24 h		105°C; 22.5%;2h		105 °C;27%;2h	
Tensile Strength (g)	21.17 ^a	25.60 ^a	39.20 ^b	43.82 ^b	51.19 ^c	54.31 ^c
Hardness (g)	134.35 ^a	135.98 ^a	200.11 ^b	205.85 ^b	215.03 ^c	216.90 ^c
Adhesiveness (gs)	3.40 ^a	2.16 ^b	2.34 ^b	1.09 ^c	3.29 ^a	1.94 ^b
Water absorption (%)	98.78 ^a	99.81 ^a	260.65 ^b	265.70 ^b	420.50 ^c	435.65 ^c
Cooking loss (%)	7.85 ^a	6.50 ^a	10.25 ^c	9.85 ^c	8.85 ^b	8.45 ^b

หมายเหตุ ตัวอักษรแนวนอนที่เหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แป้งคั่วแปรรูปทางการค้า PS1[®] PS2[®] และ PS3[®] (บริษัท เนชั่นเนลสตาร์ชแอนด์เคมีเคิลไทยแลนด์ จำกัด)

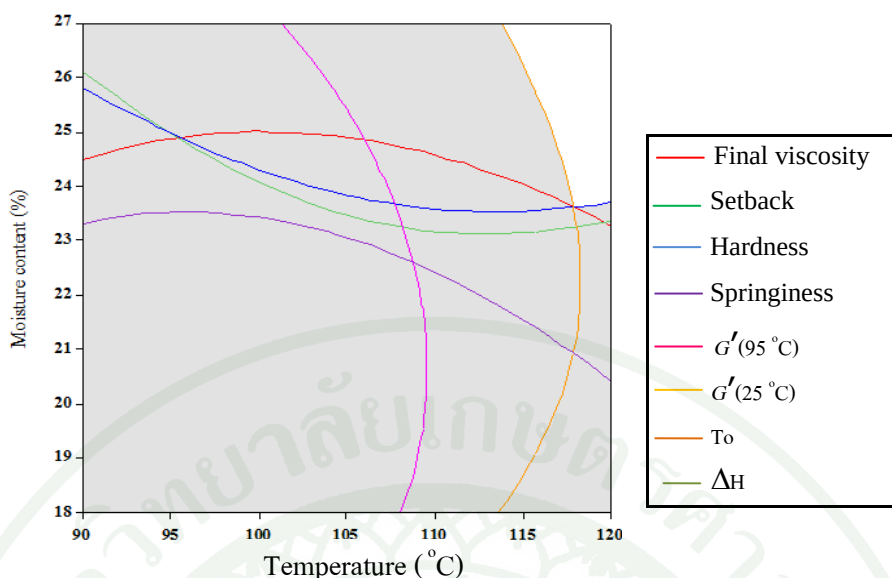
ค่า Tensile Strength รวมทั้งค่า Hardness บอกลักษณะความยืดหยุ่นของเส้นก๋วยเตี๋ยวเป็นคุณลักษณะสำคัญของเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ดี (Bhattacharya *et al.*, 1999; Surojanametakul *et al.*, 2002; Yoenyongbuddhagal and Noomhorm, 2002; Ozcan and Jackson, 2003) ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กกึ่งแห้ง และเส้นเล็กอบแห้ง มีความต้านทานแรงดึงและความแข็งแรงของเจลสูงกว่าเส้นสด เนื่องจากเจลแป้งมีการรีโพรเกรดหลังจากการอบแห้ง การตัดแปรรูปด้วย HMT ทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของเส้นก๋วยเตี๋ยวเพิ่มขึ้นซึ่งเหมาะสำหรับเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ต้องการความเหนียวและ ยืดหยุ่นมากเป็นพิเศษ ได้แก่เส้นเล็กกึ่งแห้ง และเส้นเล็กอบแห้ง ส่วนก๋วยเตี๋ยวเส้นสดต้องการความนุ่ม และความต้านทานแรงดึงปานกลาง ซึ่งเหมาะกับการตัดแปรรูปวิธี ANN นอกจากนี้การตัดแปรรูปวิธี ANN ยังทำให้ค่า Adhesiveness ลดลง เป็นผลเนื่องมาจากการเกิด amylose leaching ลดลง ทำให้ผิวของเส้นก๋วยเตี๋ยวเรียบและลื่นขึ้น ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ดีในเส้นก๋วยเตี๋ยว

3.3 สถานะการตัดแปรที่เหมาะสมสำหรับการตัดแปรแป้งข้าวเพื่อใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดในผลิตภัณฑ์อาหาร

3.3.1 สถานะการตัดแปรที่เหมาะสม

แป้งที่ใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดในผลิตภัณฑ์อาหาร คือ ซอสมะเขือเทศ น้ำสลัด และ คัสตาร์ดครีม ต้องการแป้งที่มีความหนืดสูง มีความใสของน้ำแป้งสูง ทนต่อแรงเฉือน และความเป็นกรดได้ดี (Thitipraphunkul *et al*, 2003) มีความคงตัวไม่เกิดการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ (Sidhu *et al*, 1997) โดยทั่วไปมักใช้แป้งตัดแปรทางเคมี การตัดแปรแป้งข้าวแบบ HMT มีความเหมาะสม เนื่องจากได้สตาρχเกรนูลที่มีความแข็งแรง มีความคงทนต่อแรงเฉือน และความคงตัวสูง ในการทดลองนี้ใช้แป้งข้าวทางการค้า NL[®] (บริษัท เนชั่นแนลสตาρχแอนด์เคมีเคิลไทยแลนด์ จำกัด) เป็นค่าเป้าหมาย คือมีค่า Final viscosity 3,250 - 3,560 Cp, Setback 900 - 1,280 Cp, G' (95 °C) 4,210 - 6,625 Pa, G' (25 °C) 18,000 - 25,520 Pa, Hardness 64 - 82 g และ Springiness 0.64 - 0.75 gs

หลังจากนั้นทำการ optimization โดยการซ้อนทับ contour plot ที่ได้จากสมการของค่าตอบสนองที่สามารถใช้ในการทำนายได้ทั้ง 8 ค่า เพื่อหาค่าสถานะที่เหมาะสมในการตัดแปรแป้งข้าวให้มีค่าตอบสนองดังกล่าวไม่แตกต่างทางสถิติกับค่าเป้าหมาย คือ แป้งข้าวทางการค้า NL[®] ได้พื้นที่ที่มีสถานะเหมาะสมในการตัดแปร แสดงในพื้นที่สีขาวของภาพที่ 9



ภาพที่ 9 สภาวะดัดแปรที่เหมาะสม (optimization) ของแป้งข้าวดัดแปรเพื่อใช้เป็นสารให้ความชื้นหนืด โดยใช้ค่าตอบสนองของแป้งดัดแปรทางการค้า NL[®] (บริษัทบริษัท เนชั่นเนล สตาร์ชแอนด์เคมีเคิลไทยแลนด์ จำกัด) เป็นค่าตอบสนองเป้าหมาย

หลังจากนั้นทำการทวนสอบความถูกต้องโดยคัดเลือกจุดที่เหมาะสมที่อยู่ในพื้นที่ดังกล่าวมา 1 จุด ในที่นี้คือ สภาวะการดัดแปรแบบ HMT ที่อุณหภูมิ 120 °C ปริมาณความชื้น 27% เป็นเวลา 2 h นำมาทดลองหาค่าตอบสนอง โดยใช้สมการถดถอยที่ใช้ในการทำนาย เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของค่าที่ตรวจสอบได้และค่าจากสมการได้ผลแสดงใน ตารางที่ 16 พบว่า ค่าตอบสนอง คือ Final viscosity, Setback, Hardness, Springiness, $G'(95\text{ }^{\circ}\text{C})$, $G'(25\text{ }^{\circ}\text{C})$, T_o และ ΔH ของแป้งข้าวดัดแปร HMT ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับค่าจากสมการ แสดงว่าสามารถใช้สมการของตัวแปรตอบสนอง ณ สภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรแป้งข้าวให้มีสมบัติทางเคมีกายภาพไม่แตกต่างจากแป้งข้าวทางการค้าสำหรับใช้เป็นสารให้ความหนืด ซึ่งทำให้ลดการใช้แป้งดัดแปรทางเคมี และปลอดภัยต่อผู้บริโภค

ตารางที่ 16 ค่าตอบสนองของแป้งคัดแปร HMT ที่ได้จากสมการการทำนาย และจากการทดลอง เพื่อใช้เป็นสารให้ความข้นหนืด

ตัวแปรตอบสนอง	ค่าจากสมการ	ค่าจากการตรวจสอบ ^{ns}
Final viscosity (Cp)	3489.60	3517.25±0.05
Setback (Cp)	1183.52	1219.91±0.17
Hardness (g)	82.06	80.10±0.21
Springiness (gs)	0.70	0.74±0.01
G' (95 °C) (Pa)	7299.60	7010.25±0.06
G' (25 °C) (Pa)	25486.50	25340.10±0.01

หมายเหตุ ns ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.3.2 สมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้แป้งข้าวคัดแปร HMT เป็นสารให้ความหนืด

นำผลิตภัณฑ์ซอสมะเขือเทศ น้ำสลัด และคัสตาร์ดครีม ที่ใช้แป้งข้าวคัดแปร HMT เป็นสารให้ความหนืด มาตรวจสอบสมบัติทางเคมีกายภาพ คือ ค่า Viscosity, Serum Loss, pH และ Yield Stress เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้แป้งคัดแปรทางการค้า NL[®] พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 17)

ตารางที่ 17 คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้แป้งข้าวคัดแปร HMT เป็นสารให้ความหนืดเปรียบเทียบกับสารให้ความหนืดทางการค้า NL[®]

คุณภาพทางกายภาพ	ซอสมะเขือเทศ		น้ำสลัด		ไส้คัสตาร์ดครีม	
	NL [®]	HMT	NL [®]	HMT	NL [®]	HMT
Viscosisty (Cp)	33800±0.42 ^a	30010±0.14 ^a	23700±58.2 ^c	22545±0.7 ^c	28480±0.26 ^b	28360±0.69 ^b
SL (%)	100	100	100	100	100	100
pH	3.88±0.13 ^b	3.85±0.01 ^b	3.85±0.11 ^b	3.92±0.2 ^b	6.24±0.04 ^a	6.45±0.01 ^a
Yield Stress (%)	24.56±0.45 ^a	20.24±0.03 ^a	16.36±0.19 ^b	15.13±0.1 ^b	12.41±0.05 ^c	10.96±0.02 ^c

หมายเหตุ ตัวอักษรในแนวตั้งที่เหมือนกัน แสดงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

การใช้แป้งเป็นสารให้ความข้นหนืดในผลิตภัณฑ์ที่เป็นกรดเช่น ซอสมะเขือเทศ และน้ำสลัด ต้องการสมบัติของแป้งที่ทนต่อความร้อน ความเป็นกรด แรงเฉือนจากการกวนผสมหรือการไหลผ่านระบบท่อ เจลแป้งมีความใสเลื่อมมัน และมีความคงตัวระหว่างการเก็บรักษา (Shi and BeMiller, 2002; Kim and Yoo, 2006) แป้งข้าวแอมิโลสปานกลาง (KDML105) คัดแปรแบบ HMT สามารถใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดในผลิตภัณฑ์ดังกล่าวได้ดี Ford *et al.* (1997) พบว่าสตาร์ชแกรนูลของแป้งข้าวที่มีขนาดเล็กอยู่ในช่วง 2-8 ไมครอน ซึ่งใกล้เคียงกับขนาดของเม็ดน้ำมันในระบบอิมัลชันของน้ำสลัด สามารถนำมาใช้ทดแทนไขมันได้โดยให้พลังงานที่ต่ำลง สำหรับค่า Yield Stress (%) ซึ่งหมายถึง แรงต้านการไหล เป็นค่าความเครียดต่ำสุดที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเคลื่อนที่ บอกถึงความง่ายต่อการเทออกของผลิตภัณฑ์จากบรรจุภัณฑ์ พบว่ามีค่าไม่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้แป้งคัดแปรทางการค้าเป็นสารให้ความหนืด (ตารางที่ 17)

สรุปและข้อเสนอแนะ

การดัดแปรความร้อนร่วมกับความชื้นด้วยวิธี HMT และ ANN ทำให้ค่าตอบสนองทุกค่าของแป้งข้าว KDML105 และ CN1 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) การ HMT แป้งข้าว KDML105 อุณหภูมิ 105 °C ปริมาณความชื้น 22.5% เป็นเวลา 2 h และ แป้งข้าว CN1 อุณหภูมิ 105 °C ปริมาณความชื้น 22.5 % เป็นเวลา 2 h ได้แป้งข้าวที่มีคุณสมบัติทางเคมีกายภาพไม่แตกต่างจากแป้งข้าวที่เก็บไว้เป็นเวลา 4 เดือน สภาวะดัดแปรแป้งข้าว CN1 แบบ ANN ที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 24 h เหมาะสำหรับนำไปผลิตก๋วยเตี๋ยวสด สำหรับก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กกึ่งแห้งและเส้นเล็กอบแห้ง พบว่าการดัดแปรที่เหมาะสมคือการ HMT ที่อุณหภูมิ 105 °C ความชื้น 22.5% เป็นเวลา 2 h และที่อุณหภูมิ 105 °C ความชื้น 27 % เป็นเวลา 2 h ตามลำดับ การดัดแปรแป้งข้าว KDML105 แบบ HMT ที่อุณหภูมิ 120 °C ปริมาณความชื้น 27% เป็นเวลา 2 h เหมาะต่อการนำไปใช้เป็นสารให้ความชื้นหนึ่ในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความเป็นกรด เช่น ซอสมะเขือเทศ และ น้ำสลัด การดัดแปรแป้งข้าวโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้นสามารถนำไปใช้ทดแทนแป้งทางการค้าในผลิตภัณฑ์อาหารได้ โดยปลอดภัยต่อผู้บริโภค ลดการใช้สารเคมี และค่าใช้จ่ายในการผลิต

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- งามชื่น คงเสรี. 2536. คุณภาพเมล็ดทางเคมี, น. 54-70. ใน เอกสารประกอบการบรรยายการ
ฝึกอบรมหลักสูตรวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ณ ศูนย์วิจัยข้าวพัทลุง. ฝ่ายฝึกอบรมสถาบัน
วิจัยข้าวกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- งามชื่น คงเสรี. 2538. การปรับปรุงคุณภาพข้าวสารเพื่อการบริโภคและส่งออก. น. 54-70. ใน
เอกสาร การฝึกอบรมหลักสูตรการวิเคราะห์คุณภาพข้าวทางเคมี 1-2 และ 15-16 มิถุนายน
2538. ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี อำเภอรัญบุรี, ปทุมธานี.
- งามชื่น คงเสรี. 2541. ข้าวที่เหมาะสมสำหรับการแปรรูปก๋วยเตี๋ยวและการตรวจสอบคุณภาพ, น.
14-32. ใน เอกสารประกอบการบรรยาย โครงการฝึกอบรมเรื่อง การพัฒนาและยกระดับ
อุตสาหกรรมก๋วยเตี๋ยว และขนมจีนโดยใช้เทคโนโลยีสะอาด. สถาบันค้นคว้าและพัฒนา
ผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นุชจรา แซ่ตั้ง, วรนุช ศรีเจษฎารักษ์, เกษม นันทชัย และวิเชียร วรพุทธพร. 2545. การแปรสภาพ
แป้งข้าวเหนียวด้วยวิธีเอนไซม์เลชันร่วมกับวิธีเชื่อมข้ามเพื่อใช้เป็นสารให้ความข้นหนืด.
วารสาร วิจัย มข. 2: 1-5.
- พิณทิพย์ รัมภการณ. 2547. การตัดแปรแป้งข้าวโดยการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พรพิศ โพธิสุข. 2548. การพัฒนากรรมวิธีการผลิตก๋วยเตี๋ยวข้าวกล้องอบแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญา
โท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2533. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมก๋วยเตี๋ยว.
มอก. 959-2533.
- อภิญญา มาระโพธิ์. 2536. การใช้แป้งตัดแปรเป็นสารให้ความคงตัวในซอสมะเขือเทศ. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- Adebowale, K.O and O.S. Lawal. 2003. Microstructure, physicochemical properties and retrogradation behavior of Mucuna Bean (*Mucuna pruriens*) starch on heat moisture treatments. **Food Hydrocolloids** 17: 265-272.
- Adebowale , T.A. Afolabi and B.I. Olu-Owolabi. 2005. Hydrothermal treatments of Finger Millet (*Eleusine coracana*) Starch. **Food Hydrocolloids** 6: 974-983.
- Abraham, T. 1993. Stabilization of paste viscosity of cassava starch by heat moisture treatment. **Starch/Stärke** 45: 131-135.
- Bhattacharya, M., Zee, S.Y. and Cork, H. 1999. Physicochemical properties related to quality of ricenoodles. **Cereal Chem.** 76: 861-868.
- Champagne, E.T., G.L. Brenda, K. M. Bong, B.T. Vinyard, K.L. Bett, E. Barton II Franklin, B.D. Webb, A.M. McClung, K.A. Moldenhauer, S. Linscombe, K.S. McKenzie and D.E. Kohlwey. 1998. Effect of Post harvest Processing on Texture Profile Analysis of Cooked Rice. **Cereal Chem** 75: 181-186.
- Chiang P.Y. and A.I.Yeh. 2002. Effect of soaking on wet-milling of rice. **J. Cereal Sci** 35: 85-94.
- Chung, K.M., T.W. Moon and J.K. Chun. 2000. Influence of Annealing on Gel Properties of Mung Bean Starch. **Cereal Chemistry**. 77: 567-571.
- Collado, L. S., and H. Corke. 1999. Heat-moisture treatment effects on sweet potato starches differing in amylose content. **Food Chem.** 65: 339-346.
- Collado, L.S., L.B. Mabesa, C.G. Oates and H. Corke. 2001. Bihon-type noodles from heat-moisture treated sweet potato starch. **J. Food Sci.** 66: 604-609.

- Crosbie, G.B. 1991. The relationship between starch swelling properties, paste viscosity and boiling noodle quality in wheat flours. **J. of Cereal Sci.** 13: 145-150.
- Daniels, M.J., B.P. Marks, T.J. Siebenmorgen, R.W. Mcnew and J.F. Meullenet. 1998. Effects of Long-grain Rough Rice Storage History on End-use Quality. **J. of Food Sci.** 63: 832-835.
- Donovan, J.W., K. Lorenz and K. Kulp. 1983. Differential scanning calorimetry of heat moisture treated wheat and potato starches. **Cereal Chem.** 60: 381-387.
- Elessandra, R. Z. and R. G. D. Alvaro. 2011. Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review. **Carbohydrate Polymers.** 83: 317-328.
- Eliasson, A.C. and M. Gudmundsson. 1996. Starch: physicochemical and function aspects, pp. 431-503. *In* A.C. Eliasson, ed. **Carbohydrates in Food**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Fan, J. and B.J. Marks. 1999. Effect of Rough Rice Storage Conditions on Gelatinization and Retrogradation Properties of Rice Flours. **Cereal Chem.** 76: 894-897.
- Ford, L.D., R. Borwankar, R.W. Martin and Holcomb. 1997. Dressing and sauces. *In* Friberg, S.E. and K. Larsson, Food Emulsion 3rd ed., New York. Marcel Dekker.
- Franco, C.M.L., C.F. Ciacco and D.Q. Tavares. 1995. Effect of the heat-moisture treatment on the enzymatic susceptibility of corn starch granules. **Starch/Stärke.** 47: 223-228.
- Gomes, A. M. M., M. E. Claudio, M. D. Siva and M. P. S. R. Nagila. 2004. Effects of annealing on the physicochemical properties of fermented cassava starch (*polvilho azedo*). **Carbohydrate Polymers.** 60:1-6.

- Gunaratne, A. and R. Hoover. 2002. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. **Carbohydrate Polymers**. 49: 425-437.
- Han, X.Z. and B.R. Hamaker. 2001. Amylopectin fine structure and rice starch paste breakdown. **J. Cereal Sci.** 34: 279-284.
- Horndok, R., Noomhorm, A., 2007. Hydrothermal treatment of rice starch for improvement of rice noodle quality. **Journal of Food Science and Technology**. 61: 1-9.
- Hoover, R. and H. Manuel. 1996. The effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of normal maize, waxy maize, dull waxy maize and amylomaize V starches. **Journal of Cereal Science**. 23: 153-162.
- Hsu, S., S. Lu and C. Huang. 2002. Viscoelastic changes of rice starch suspensions during gelatinization. **Journal of Food Science**. 65: 215-220.
- Jacobs, H., R. C. Eerlingen, W. Clauwaert and J. A. Delcour. 1995. Influence of annealing on the pasting properties of starches from varying botanical sources. **Cereal Chemistry**. 72: 480-487
- Jacobs, H. and J.A. Delcour. 1998. Hydrothermal modifications of granular starch, with retention of the granular structure: a review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 46: 2895-2905.
- Juliano, B.O. 1982. An International Survey of Methods Used for the Cooking and Eating Qualities. **IRRI Research Paper Series**. International Rice Research Institute. Philipines.

- Kawabata, A., N. Takase, E. Miyoshi, S. Sawayama, T. Kimura and K. Kudo. 1994. Microscopic observation and X-ray diffractometry of heat/moisture-treated starch granules. **Starch/Stärke**. 46: 463-469.
- Kiseleva, V. I., A. V. Krivandin, J. Fornal, W. Blaszcak, T. Jelinski and P. Yuryev. 2005. Annealing of normal and mutant wheat starches LM, SEM, DSC and SAX studies. **Carbohydrate Research**. 340: 75-83.
- Kohyama, K. and T. Sasaki. 2006. Differential scanning calorimetry and a model calculation of starches annealed at 20 and 50 °C. **Carbohydrate Polymers**. 63: 82-88.
- Lai, H.M. 2001. Effects of hydrothermal treatment on the physicochemical properties of pregelatinized rice flour. **Food Chem**. 72: 455-463.
- Lee, J.S., R.N. Kumar, H.D. Rozman and B.M.N. Azemi. 2005. Pasting, swelling and solubility properties of UV initiated starch-graft-poly(AA). **Food Chemistry** 91: 203-211.
- Lii, C.Y., Y.Y. Shao and K.H. Tseng. 1995. Gelation mechanism and rheological properties of rice starch. **Cereal Chem**. 72: 393-400.
- Lim, S.T., E.H. Chang and H.J. Chung. 2001. Thermal transition characteristics of heat moisture treated corn and potato starches. **Carbohydrate Polymers**. 46: 107-115.
- Liu, H., N. A. M. Eskin and S. W. Cui. 2006. Effects of yellow mustard mucilage on functional and rheological properties of buckwheat and pea starches. **Food Chemistry**. 95:83-93.
- Liu, H., H. Corke and L. Ramsden. 2000. The effect of autoclaving on the acetylation of ae, wx and normal maize starches. **Starch/Stärke**. 52: 353-360.
- Lu, S., C.Y. Chen and C. Y. Lii. 1996. Gel-chromatography fractionation and thermal characterization of rice starch affected by hydrothermal treatment. **Cereal Chem**. 73: 5-11.

- Meullenet, J.F., B.P. Marks, J.A. Hankind, V.K. Griffin and M.J. Daniels. 2000. Sensory quality of cooked long grain rice as affected by rough rice moisture content, storage temperature and storage duration. **Cereal Chem.** 77: 259-263.
- Miyoshi, E. 2002. Effects of heat-moisture treatment and lipids on gelatinization and retrogradation of maize and potato starches. **Cereal Chem.** 79: 72-77.
- Ozcan, S., D.S. Jackson. 2003. A response surface analysis of commercial corn starch annealing. **Cereal Chemistry.** 80: 241-243.
- Pearce, M.D., B.P. Marks and J.F. Meullenet. 2001. Effects of post harvest parameters on functional changes during rough rice storage. **Cereal Chem.** 78: 354-357.
- Perdon, A.A., B.P. Marks, T.J. Siebenmorgen and N.B. Reid. 1997. Effects of rough rice storage conditions on the amylograph and cooking properties of medium-grain rice *cv. bengal*. **Cereal Chem.** 74: 864-867.
- Perera, C., R. Hoover and A.M. Martin. 1997. The effect of hydroxypropylation on the structure and physicochemical properties of native, defatted and heat-moisture treated potato starches. **Food Research International.** 30: 235-247.
- Phillips, G.O. and P.A. Williams. 2000. **Handbook of hydrocolloids.** CRC press. New York.
- Pitiphunpong, S. and P. Suwannaporn. 2009. Physicochemical properties of KDML 105 rice cultivar from different cultivated locations in Thailand. **Journal of the Science of Food and Agriculture.** 13:2186-2190.
- Rao, M.A. and J.Tattiyakul. 1999. Granule size and rheological behavior of heated tapioca starch dispersions. **Carbohydrate Polymers.** 38: 123-132.

- Roller, S. 1996. Starch-derived fat mimetics: maltodextrins, pp. 99-118. In Roller, S. and Jones, S.A. (eds.). *Handbook of Fat Replacers*. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida. USA.
- Sekine, M., K. Otobe, J. Sugiyama and Y. Kawamura. 2000. Effects of heating, vacuum drying and steeping on gelatinization properties and dynamic viscoelasticity of various starches. **Starch/Stärke**. 52: 398- 405.
- Seow, C.C and C.H. Teo. 1993. Annealing of granular rice starches-interpretation of the effect on phase transitions associated with gelatinization. **Starch/Stärke**. 43: 345-351.
- Sidhu, J. S., A. S. Bawa and N. Singh. 1997. Studies on the effect of hydrocolloids on the consistency of tomato ketchup. **Journal of Food science and Technology**. 34: 423-424.
- Stute, R., 1992. Hydrothermal modification of starches: the difference between annealing and heat- moisture treatment. **Starch/Stärke**. 44: 205-214.
- Surojanametakul, V., P. Tungtakul, W. Varanyanond and R. Supasri. 2002. Effects of partial replacement of rice flour with various starches on the physicochemical and sensory properties of “Sen Lek” noodle. **Kasetsart J.** 36: 55-62.
- Takahashi, T., M. Miura , N. Ohisa and S. Kobayashi. 2005. Modification of gelatinization properties of rice flour by heat-treatment. **Journal of the Society of Rheology**. 33: 81-85.
- Takaya, T., C. Sano and K. Nishinari. 2000. Thermal studies on the gelatinisation and retrogradation of heat-moisture treated starch. **Carbohydrate Polymers**. 41: 97-100.
- Tester, R. and S. J. J. Debon. 2000. Annealing of starch-a review. **International J. of Biological Macromolecules**. 27:1-12.

- Thebaudin, J.Y., A.C. Lefebvre and J.L. Doublier. 1998. Rheology of starch pastes from starches of different origin: applications to starch-based sauces. **Academic Press**. 31: 354-360.
- Thitipraphunkul, K., D. Uttapap, K. Piyachomkwan and Y. Takeda, 2003. A comparative study of edible canna (*Canna edulis*) starch from cultivars. part I. Chemical composition and physicochemical properties. **Carbohydrate Polymer**. 53: 317-324.
- Tsutsui, K., K. Katsuta, T. Matoba, M. Takemasa and K. Nishinari. 2005. Effect of annealing temperature on gelatinization of rice starch suspension as studied by rheological and thermal measurements. **J. Agri. Food Chem**. 53: 9056-9063.
- Vandeputte, G.E., R. Vermeulen, J. Geeroms and J.A. Delcour. 2003. Rice starch III structural aspects provide insight in amylopectin retrogradation properties and gel texture. **J.Cereal Sci**. 37: 1-8.
- Valentina, I. K., V. K. Alexei., F. Jozef., B. Wioletta., J. Tomasz and P.Y. Vladimir. 2005. Annealing of normal and mutant wheat starches LM, SEM, DSC, and SAXS studies. **Carbohydrate Research**. 340: 75-83.
- Vermeulen, R., B. Goderis and J.A. Delcour. 2006. An X-ray study of hydrothermally treated potato starch. **Carbohydrate Polymers**. 64: 364-375.
- Waduge, R.N., R. Hoover., T. Vasanthan., J. Gao and J. Li. 2006. Effect of annealing on the structure and physicochemical properties of barley starches of varying amylase content. **Food Research International**. 39: 59-77.
- Wu Y. and P.A. Seib. 1990. Acetylation and hydroxypropylate distarch phosphates from waxy barley: paste properties and freeze thaw stability. **Cereal Chem**. 67: 202-208.
- Yamamoto, A. and K. Shirakawa. 1999. Annealing of long-term stored rice grains improves gelatinization properties. **Cereal Chem**. 76: 646-649.

Yoenyongbuddhagal, S. and A. Noomhorm. 2002 . Effect of physical properties of high-amylose Thai rice flours on vermicelli quality. **Cereal Chem.** 79: 481- 485.

Yuan, R. C., and D. B.Thompson. 1998. Freeze-thaw stability of three waxy maize starch pastes measured by centrifugation and calorimetry. **Cereal Chemistry.** 75: 571–573.







ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์สมบัติของแป้งข้าว และแป้งข้าวคัดแปร

1. การวิเคราะห์สมบัติความหนืด

(ดัดแปลงจากวิธีการของ Jacob *et al.* (1998) (AACC2000 no. 61-02)

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid visco analyzer, RVA3D, Newport Scientific Instruments & Engineering, Australia)

1.2 วิธีการวิเคราะห์

1.2.1 ตัวอย่างแป้งข้าวที่ใช้วิเคราะห์ต้องผ่านการบดจนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าหรือเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร แล้วจึงนำไปหาความชื้นตามวิธี AACC (2000) ก่อนการวิเคราะห์

1.2.2 ชั่งแป้งข้าวจำนวน 3 g ใส่ลงในอุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก และตวงน้ำปริมาตร 25.0 ml ใส่ในถ้วยทรงกระบอก (คำนวณที่ความชื้น 12 %) แต่ถ้าตัวอย่างแป้งมีความชื้นไม่เท่ากับ 12 % สามารถคำนวณปริมาณน้ำและแป้งที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามสูตร

$$\begin{aligned} \text{สำหรับปริมาณแป้ง} \quad S &= \frac{88 \times 3.0}{100 - M} \\ \text{สำหรับปริมาณน้ำ} \quad W &= 25 + (3.0 - S) \end{aligned}$$

โดย S = น้ำหนักตัวอย่างที่ปรับค่าแล้ว

W = น้ำหนักน้ำที่ปรับค่าแล้ว

M = ปริมาณความชื้นที่แท้จริงของตัวอย่าง (%)

1.2.3 ใส่แป้งลงบนผิวหน้าของน้ำในถ้วยทรงกระบอก ใช้ใบพายเขย่าตัวอย่างในถ้วยทรงกระบอกขึ้นลง 10 ครั้ง แต่ถ้าแป้งยังคงอยู่บนผิวหน้าหรือติดบนใบพาย ให้เขย่าตัวอย่างซ้ำอีกครั้ง

1.2.4 ใส่ใบพายในถ้วยทรงกระบอกและสวมใบพายเข้ากับที่ยึดโดยให้ใบพายอยู่กึ่งกลางถ้วย แล้วเริ่มต้นการวิเคราะห์โดยกดมอเตอร์ของเครื่องมือลง และมีสิ่งที่ต้องระวังคืออย่าผสมแป้งกับน้ำนานกว่า 1 min ก่อนการวิเคราะห์ ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับแป้งข้าว มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาดังนี้

อุณหภูมิ(°C)	ระยะเวลา (min:sec)
50.0(อุณหภูมิเริ่มต้น)	0:00
50.0	2:00
95.0	4:00
95.0	12:00
50.0	15:00
สิ้นสุดการทดสอบ	20:00

สำหรับความเร็วรอบเริ่มต้นที่ใช้คือ 960 rpm เป็นเวลา 10 sec แล้วจึงใช้ความเร็วรอบ 160 rpm คงที่ตลอดการทดสอบ

1.2.5 บันทึกอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย(final viscosity) ค่าความหนืดลดลง (breakdown) เป็นความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและต่ำสุด และค่าเซตแบค (setback) เป็นความแตกต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายและความหนืดต่ำสุด



การวิเคราะห์สมบัติของก้วยเดี่ยว

1. แรงสูงสุด และพื้นที่ใต้กราฟ (ดัดแปลงจาก AACC, 2000)

โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyser) รุ่น TA-XT2 หัววัด Light Knight Blade, A/LKB-F พร้อมแท่นวางตัวอย่าง มีวิธีการวัด ดังนี้

1.1 วางเส้นก้วยเดี่ยวที่ถูกตัดให้ยาว 5 ซม. ลงบนแท่นวางตัวอย่าง

1.2 ให้หัววัดตัดลงบนตัวอย่างด้วยแรงคงที่ 10 นิวตัน เป็นระยะทาง 60% ของความหนาของตัวอย่าง ใช้สภาวะในการวัด ดังนี้

Mode : Measure Force in Compression

Option : Return to Start

Pre – Test Speed : 0.5 mm/s

Test Speed : 0.2 mm/s

Post – Test Speed : 10.0 mm/s

% Strain : 60 %

Trigger Type : Auto (10 g)

Data Acquisition Rate : 400 pps

1.3 อ่านค่าที่ได้จากกราฟ ดังนี้ แรงสูงสุด (maximum cutting force) เป็นค่าสูงสุดที่วัดได้จากการตัดตัวอย่างของหัววัดด้วยอัตราเร็ว 0.2 มม./วินาที มีหน่วยเป็น กรัม และงานใช้ในการตัด (total work to cut) เป็นค่าที่คำนวณจากแรงกดและเวลาในการตัดตัวอย่าง ซึ่งเป็นพื้นที่ใต้กราฟ มีหน่วยเป็น g/sec.

2. แรงต้านการดึง

โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyser) รุ่น TA-XT2 หัววัด Spaghetti tensile grips, A/SPR วิธีการวัดค่า ดังนี้

2.1 พันเส้นก้วยเดี่ยวที่ลวกสุกแล้วเข้ากับแขนของหัววัดทั้งแขนบน และล่าง

2.2 ให้หัววัดดึงตัวอย่างด้วยแรงคงที่ เป็นระยะทาง 100 mm. ใช้สภาวะในการวิเคราะห์ดังนี้

Mode : Measure Force in Tension

Option : Return to Start

Pre – Test Speed : 3.0 mm/s

Test Speed : 3.0 mm/s

Post – Test Speed : 5.0 mm/s

Distance : 100 mm

Trigger Type : Auto (5 g)

Data Acquisition Rate : 200 pps

2.3 อ่านค่าที่ได้จากกราฟ โดยแรงสูงสุด (mean peak force) เป็นค่าสูงสุดที่วัดได้จากการดึงตัวอย่างของหัววัดด้วยอัตราเร็ว 3.0 มม./วินาที มีหน่วยเป็นก เป็นแรงต้านการดึงเส้นก๊วยเตีย ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงความยืดหยุ่น (elasticity หรือ tensile strength) ของก๊วยเตีย



1. สูตร หอสมะเขือเทศ

ส่วนประกอบ

มะเขือเทศเข้มน้ําร้อยละ	70
แป้งคัดแปรร้อยละ	4
น้ำตาลร้อยละ	12.5
เกลือร้อยละ	0.5
น้ำส้มสายชูร้อยละ	12

2. สูตร น้ำสลัด

ส่วนประกอบ

น้ำมันพืชร้อยละ	50
น้ำส้มสายชูร้อยละ	12
น้ำตาลร้อยละ	15
น้ำร้อยละ	10
แป้งคัดแปรร้อยละ	4
เลซิทินร้อยละ	8
เกลือร้อยละ	1

3. ไข่กัศตาร์ด

ส่วนประกอบ

นมข้นจืดร้อยละ	35
แป้งคัดแปรร้อยละ	4
ไข่แดงร้อยละ	12
เนยร้อยละ	3
เกลือร้อยละ	1
น้ำร้อยละ	45



ภาคผนวก ง

สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวคั่วแปรรูปด้วยวิธี HMT และ ANN

ตารางผนวกที่ 1 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว KDML105 ดัดแปรด้วยวิธี HMT จากแผนการ ทดลองแบบ FCCD

การ ทดลองที่	อุณหภูมิ การดัดแปร	เวลา	ปริมาณ ความชื้น	Peak Viscosity	Trough	Break down	Final Viscosity	Setback	$G'_{95^{\circ}\text{C}}$	$G''_{95^{\circ}\text{C}}$	$G'_{25^{\circ}\text{C}}$	$G''_{25^{\circ}\text{C}}$
1	90	1	18.0	4019.90	2289.00	1730.90	3014.67	725.67	3220	394	13100	1100
2	120	1	18.0	4001.80	2286.40	1715.40	3016.40	730.00	3200	396	22700	2070
3	90	3	18.0	4006.67	2190.40	1816.27	2945.33	754.93	3270	390	13000	1190
4	120	3	18.0	3980.87	2207.60	1773.27	2982.00	774.40	3230	479	25200	2100
5	90	1	27.0	3090.00	2328.40	761.60	3282.40	954.00	4800	609	14400	1220
6	120	1	27.0	2932.67	2345.20	587.47	3486.00	1140.8	6080	857	25800	2290
7	90	3	27.0	2976.33	2475.50	500.83	3477.67	1002.1	5580	735	14800	1250
8	120	3	27.0	2801.00	2283.40	517.60	3523.60	1240.2	6170	929	26800	2320
9	90	2	22.5	3394.00	2450.40	943.60	3199.40	749.00	3440	407	13400	1170
10	120	2	22.5	2915.20	2367.60	547.60	3152.40	784.80	5580	771	18800	1980
11	105	1	22.5	3231.00	2371.40	859.60	3119.00	747.60	3580	400	15100	1320
12	105	3	22.5	2774.00	2115.00	659.00	3054.67	939.67	4310	504	16300	1620
13	105	2	18.0	3354.40	2350.33	1004.07	3082.20	731.87	3230	429	15000	1300
14	105	2	27.0	2519.20	2217.20	302.00	3269.33	1052.1	5500	783	18700	1770

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

การ ทดลองที่	อุณหภูมิ การตัดแปะ	เวลา	ปริมาณ ความชื้น	Peak Viscosity	Trough	Break down	Final Viscosity	Setback	$G'_{95^{\circ}\text{C}}$	$G''_{95^{\circ}\text{C}}$	$G'_{25^{\circ}\text{C}}$	$G''_{25^{\circ}\text{C}}$
15	105	2	22.5	2670.40	2236.40	434.00	3083.67	847.27	4870	624	16200	1600
16	105	2	22.5	2891.33	2197.60	693.73	3169.40	971.80	3810	419	18600	1860
17	105	2	22.5	2696.67	2364.33	332.34	3196.20	831.87	3820	416	16600	1630
18	105	2	22.5	2855.20	2294.60	560.60	3185.67	891.07	3870	424	18800	1780
19	105	2	22.5	2641.67	2269.67	372.00	3161.40	891.73	3850	413	18200	1760
20	105	2	22.5	2609.00	2109.40	499.60	3004.67	895.27	3820	416	16600	1660

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

การทดลองที่	อุณหภูมิการตัดแปรร	เวลา	ปริมาณความชื้น	Hardness	Springiness	To	Tp	Tc	ΔH
1	90	1	18.0	60.420	0.5630	64.31	69.83	76.70	11.33
2	120	1	18.0	60.915	0.6620	65.88	75.67	80.44	9.26
3	90	3	18.0	60.341	0.5730	64.13	71.67	80.34	10.24
4	120	3	18.0	61.030	0.6700	67.91	76.01	79.12	7.42
5	90	1	27.0	60.850	0.5670	64.36	69.83	76.67	11.13
6	120	1	27.0	75.915	0.6745	67.89	75.17	78.99	7.90
7	90	3	27.0	77.906	0.5320	64.48	71.50	79.72	10.33
8	120	3	27.0	79.499	0.6630	67.95	76.14	78.10	7.20
9	90	2	22.5	58.407	0.5610	64.82	70.83	79.80	10.52
10	120	2	22.5	59.585	0.6180	67.88	75.22	78.54	7.54
11	105	1	22.5	56.771	0.6010	65.14	73.57	78.19	9.83
12	105	3	22.5	70.547	0.5970	65.56	75.85	78.54	9.45
13	105	2	18.0	56.370	0.6090	65.45	75.67	80.55	9.59
14	105	2	27.0	76.230	0.6070	65.77	75.67	79.10	8.16

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

การทดลองที่	อุณหภูมิการดัดแปร	เวลา	ปริมาณความชื้น	Hardness	Springiness	To	Tp	Tc	ΔH
15	105	2	22.5	60.621	0.6030	65.26	75.75	79.54	9.55
16	105	2	22.5	66.558	0.6030	65.50	76.15	79.59	9.60
17	105	2	22.5	60.850	0.6040	65.55	76.21	79.58	9.58
18	105	2	22.5	60.985	0.6050	65.53	76.02	79.45	9.64
19	105	2	22.5	60.650	0.6250	65.77	75.86	80.06	9.53
20	105	2	22.5	60.196	0.6010	65.28	75.72	80.40	8.69

ตารางผนวกที่ 2 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว KDML105 คัดแปรด้วยวิธี ANN จากแผนการทดลองแบบ FCCD

การทดลองที่	อุณหภูมิการ คัดแปร	เวลา	Peak Viscosity	Trough	Break down	Final Viscosity	Setback	$G'_{95^{\circ}\text{C}}$	$G''_{95^{\circ}\text{C}}$	$G'_{25^{\circ}\text{C}}$	$G''_{25^{\circ}\text{C}}$
1	55	12	2685.50	1412.25	772.75	1835.25	762.50	1850	720	10100	1190
2	65	12	2094.00	1034.00	632.25	2085.00	1152.75	2340	744	12900	1110
3	55	36	2166.25	1147.50	918.75	2207.50	988.75	1820	664	11170	1270
4	65	36	2014.50	1025.50	689.00	2428.00	1439.00	2300	785	13700	1180
5	55	24	2169.50	1102.75	866.75	1986.25	819.50	1920	640	11020	1090
6	65	24	2036.00	1030.50	505.50	2231.50	1426.00	2320	760	13780	1560
7	60	12	2118.50	1292.00	726.50	2059.50	1033.00	2070	648	11550	1370
8	60	36	2216.50	1097.50	619.00	2242.50	1323.50	2070	785	13400	1440
9	60	24	2270.75	1465.20	705.55	2017.00	1011.45	2055	640	12800	1400
10	60	24	2265.00	1246.00	619.00	2065.00	1146.00	1960	639	12400	1460
11	60	24	2284.00	1457.00	627.00	2074.00	1147.00	1961	738	12800	1410
12	60	24	2277.00	1548.00	529.00	2128.00	1299.00	2057	640	12800	1310
13	60	24	2057.00	1410.00	647.00	2051.00	1104.00	1960	639	12400	1460

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

การทดลองที่	อุณหภูมิการดัดแปร	เวลา	Hardness	Springiness	To	Tp	Tc	ΔH
1	55	12	30.810	0.428	60.22	67.75	70.40	11.52
2	65	12	44.730	0.600	62.42	67.65	70.38	14.24
3	55	36	32.868	0.485	60.64	67.78	70.35	11.64
4	65	36	58.723	0.640	62.95	67.60	70.50	15.28
5	55	24	32.559	0.440	60.42	67.80	70.10	11.55
6	65	24	45.385	0.582	62.60	67.65	70.49	14.45
7	60	12	33.669	0.468	60.54	67.66	70.71	12.11
8	60	36	41.023	0.530	61.58	67.81	71.35	13.01
9	60	24	34.733	0.472	61.01	67.25	71.19	12.75
10	60	24	35.819	0.540	60.53	67.55	70.77	12.22
11	60	24	34.711	0.480	60.64	67.66	70.75	12.18
12	60	24	33.819	0.478	60.60	67.67	70.75	12.15
13	60	24	36.160	0.450	60.54	67.66	70.78	12.24

ตารางผนวกที่ 3 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว CN1 ดัดแปรด้วยวิธี HMT จากแผนการทดลองแบบ FCCD

การ ทดลองที่	อุณหภูมิ การดัดแปร	เวลา	ปริมาณ ความชื้น	Peak Viscosity	Trough	Break down	Final Viscosity	Setback	$G'_{95^{\circ}\text{C}}$	$G''_{95^{\circ}\text{C}}$	$G'_{25^{\circ}\text{C}}$	$G''_{25^{\circ}\text{C}}$
1	90	1	18.0	3998.40	2108.40	1890.00	3282.80	1174.40	8110	1240	20500	368
2	120	1	18.0	3831.40	2145.20	1686.20	3486.60	1341.40	10600	1720	25200	752
3	90	3	18.0	3880.00	2075.50	1804.50	3245.67	1170.17	8590	1400	21400	419
4	120	3	18.0	3699.80	2143.40	1556.40	3442.60	1299.20	10300	1220	25500	785
5	90	1	27.0	2993.00	2490.20	502.80	4124.40	1634.20	9270	1340	21500	498
6	120	1	27.0	2450.40	2432.80	393.60	4527.20	2094.40	13200	1770	28000	890
7	90	3	27.0	2890.40	2476.83	413.57	4107.20	1630.37	11000	1430	23900	613
8	120	3	27.0	2300.60	2201.80	505.80	4582.20	2380.40	15200	1540	28500	895
9	90	2	22.5	3294.80	2450.40	844.40	3699.60	1249.20	9960	1060	22500	522
10	120	2	22.5	2815.20	2067.60	747.60	3702.20	1634.60	12400	1320	26400	771
11	105	1	22.5	3031.00	2271.00	760.00	3619.67	1348.67	11300	1730	22300	707
12	105	3	22.5	2691.00	2008.00	683.00	3654.67	1646.67	11900	1250	22500	746
13	105	2	18.0	3254.33	2050.00	1204.33	3380.67	1330.67	10700	1480	22400	619
14	105	2	27.0	2479.67	2047.67	432.00	4219.33	1671.66	13800	2010	24400	747

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

การ ทดลองที่	อุณหภูมิ การดัดแปร	เวลา	ปริมาณ ความชื้น	Peak Viscosity	Trough	Break down	Final Viscosity	Setback	$G'_{95^{\circ}\text{C}}$	$G''_{95^{\circ}\text{C}}$	$G'_{25^{\circ}\text{C}}$	$G''_{25^{\circ}\text{C}}$
15	105	2	22.5	2760.00	2036.00	724.00	3683.00	1547.00	11300	1810	23300	647
16	105	2	22.5	2791.67	2097.67	694.00	3769.00	1571.33	11900	1510	22800	551
17	105	2	22.5	2696.00	2094.00	602.00	3596.00	1502.00	11500	1680	22400	653
18	105	2	22.5	2755.00	2014.00	741.00	3605.00	1591.00	11400	1680	23400	631
19	105	2	22.5	2741.00	2169.67	571.33	3836.00	1666.33	11400	1370	22900	630
20	105	2	22.5	2879.00	2209.00	670.00	3604.67	1395.67	11500	1370	22900	648

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

การทดลองที่	อุณหภูมิการตัดแปรร	เวลา	ปริมาณความชื้น	Hardness	Springiness	To	Tp	Tc	ΔH
1	90	1	18.0	141.494	0.6025	72.24	75.50	79.08	13.01
2	120	1	18.0	227.687	0.6400	81.12	84.85	88.45	4.86
3	90	3	18.0	196.345	0.6070	73.80	77.83	81.87	8.87
4	120	3	18.0	273.234	0.6970	81.36	84.88	87.59	3.95
5	90	1	27.0	156.247	0.6040	73.50	75.84	80.65	12.84
6	120	1	27.0	183.542	0.7210	81.92	84.83	87.44	3.65
7	90	3	27.0	161.643	0.6090	79.66	83.83	87.62	7.63
8	120	3	27.0	246.769	0.8830	82.63	85.67	88.28	3.02
9	90	2	22.5	157.728	0.6020	74.85	76.45	81.05	9.89
10	120	2	22.5	229.583	0.7770	81.09	84.50	87.12	3.88
11	105	1	22.5	193.145	0.6720	74.14	78.50	85.58	9.11
12	105	3	22.5	303.305	0.7950	75.45	80.05	86.74	6.98
13	105	2	18.0	274.261	0.6440	74.70	76.55	83.14	8.95
14	105	2	27.0	283.529	0.6890	81.28	84.13	86.24	6.65

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

การทดลองที่	อุณหภูมิการดัดแปร	เวลา	ปริมาณความชื้น	Hardness	Springiness	To	Tp	Tc	ΔH
15	105	2	22.5	259.103	0.6980	74.10	79.85	84.45	6.95
16	105	2	22.5	289.951	0.6850	74.24	79.87	84.51	6.90
17	105	2	22.5	294.228	0.6800	74.22	79.91	84.15	6.12
18	105	2	22.5	290.924	0.6450	77.21	79.88	85.08	6.88
19	105	2	22.5	287.379	0.6450	77.24	79.87	84.12	6.85
20	105	2	22.5	273.680	0.6450	77.30	79.54	84.06	6.21

ตารางผนวกที่ 4 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว CN1 ดัดแปรด้วยวิธี ANN จากแผนการทดลองแบบ FCCD

การทดลองที่	อุณหภูมิ การดัดแปร	เวลา	Peak Viscosity	Trough	Break down	Final Viscosity	Setback	$G'_{95^{\circ}\text{C}}$	$G''_{95^{\circ}\text{C}}$	$G'_{25^{\circ}\text{C}}$	$G''_{25^{\circ}\text{C}}$
1	60	12	1601.00	1040.40	360.60	1962.40	701.80	7000	1160	14600	952
2	70	12	1761.60	1830.00	331.60	3037.00	1805.40	7727	1110	20800	1005
3	60	36	1611.40	1186.20	425.20	2151.40	826.20	7050	1140	15200	1066
4	70	36	1725.40	1183.40	442.00	3220.40	1878.40	7850	1193	18600	1150
5	60	24	1591.00	1228.20	362.80	2170.80	908.00	7030	1190	14200	961
6	70	24	1796.25	1139.75	356.50	2993.00	1736.50	7740	1220	20500	1150
7	65	12	1835.75	1577.75	438.52	2629.25	1290.73	7367	1030	17000	1050
8	65	36	1616.25	1709.00	407.25	2881.25	1574.00	7440	1130	17100	1041
9	65	24	1920.25	1505.25	415.00	2576.50	1261.50	7207	1130	16200	1177
10	65	24	1857.00	1455.00	402.00	2423.00	1121.00	7236	1180	16900	1146
11	65	24	1715.00	1555.00	406.00	2697.00	1391.00	7006	1070	16600	1046
12	65	24	1906.00	1129.00	425.00	2635.00	1310.00	7005	1030	15800	1185
13	65	24	1903.00	1482.00	401.00	2551.00	1250.00	7080	1110	15000	1044

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

การทดลองที่	อุณหภูมิการดัดแปร	เวลา	Hardness	Springiness	To	Tp	Tc	ΔH
1	60	12	86.782	0.619	74.37	78.64	81.46	11.67
2	70	12	134.926	0.610	76.78	77.44	82.13	12.65
3	60	36	128.755	0.687	75.55	79.34	82.29	11.81
4	70	36	150.127	0.843	77.83	79.24	82.70	13.68
5	60	24	102.475	0.665	75.53	77.31	82.26	11.80
6	70	24	134.090	0.705	77.55	75.15	82.73	13.65
7	65	12	89.280	0.484	75.88	79.67	82.44	12.24
8	65	36	123.094	0.712	76.79	79.49	82.11	12.64
9	65	24	109.157	0.545	76.77	77.46	82.09	12.61
10	65	24	104.150	0.515	75.75	77.50	82.05	12.77
11	65	24	96.461	0.490	76.72	77.52	82.14	12.64
12	65	24	114.403	0.470	75.74	79.48	82.01	12.69
13	65	24	118.972	0.545	76.77	79.48	82.49	12.67



ตารางผนวกที่ 5 การวิเคราะห์ ANOVA ของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว KDML105
ดัดแปรด้วยวิธี HMT

Source	Peak viscosity				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	9	4713271	523697	23.98	0.000
Linear	3	2672045	229746	10.52	0.002
Square	3	2025146	675049	30.91	0.000
Interaction	3	16080	5360	0.25	0.863
Residual Error	10	218359	21836		
Lack-of-Fit	5	149592	29918	2.18	0.207
Pure Error	5	68767	13753		
Total	19	4931630			
trough					
Regression	9	82732	9192	0.91	0.550
Linear	3	28700	9014	0.89	0.477
Square	3	36428	12143	1.21	0.357
Interaction	3	17604	5868	0.58	0.640
Residual Error	10	100768	10077		
Lack-of-Fit	5	62752	12550	1.65	0.298
Pure Error	5	38016	7603		
Total	19	183500			
final viscosity					
Regression	9	465233	51693	7.29	0.002
Linear	3	405585	9863	1.39	0.302
Square	3	38030	12677	1.79	0.213
Interaction	3	21618	7206	1.02	0.426
Residual Error	10	70935	7093		
Lack-of-Fit	5	43134	8627	1.55	0.321
Pure Error	5	27800	5560		
Total	19	536167			

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

Source	breakdown				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	9	4736916	526324	22.21	0.000
Linear	3	2936622	180575	7.62	0.006
Square	3	1767664	589221	24.86	0.000
Interaction	3	32629	10876	0.46	0.717
Residual Error	10	236976	23698		
Lack-of-Fit	5	148857	29771	1.69	0.290
Pure Error	5	88119	17624		
Total	19	4973892			
Setback					
Regression	9	364699	40522	10.77	0.000
Linear	3	320251	8106	2.16	0.157
Square	3	23111	7704	2.05	0.171
Interaction	3	21337	7112	1.89	0.195
Residual Error	10	37610	3761		
Lack-of-Fit	5	25702	5140	2.16	0.209
Pure Error	5	11908	2382		
Total	19	402309			
G' 95 °C					
Regression	9	17744329	1971592	8.74	0.001
Linear	3	16194530	290455	1.29	0.332
Square	3	943161	314387	1.39	0.301
Interaction	3	606637	202212	0.90	0.477
Residual Error	10	2256526	225653		
Lack-of-Fit	5	1359593	271919	1.52	0.330
Pure Error	5	896933	179387		
Total	19	20000855			

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

Source	G'' 95				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	9	539210	59912	8.68	0.001
Linear	3	428040	25208	3.65	0.052
Square	3	93864	31288	4.53	0.030
Interaction	3	17306	5769	0.84	0.504
Residual Error	10	69008	6901		
Lack-of-Fit	5	33438	6688	0.94	0.526
Pure Error	5	35570	7114		
Total	19	608218			
G' 25°C					
Regression	9	297849409	33094379	8.90	0.001
Linear	3	271761000	3083257	0.83	0.507
Square	3	24363409	8121136	2.18	0.153
Interaction	3	1725000	575000	0.15	0.924
Residual Error	10	37180091	3718009		
Lack-of-Fit	5	30480091	6096018	4.55	0.061
Pure Error	5	6700000	1340000		
Total	19	335029500			
G'' 25 °C					
Regression	9	2497960	277551	10.65	0.000
Linear	3	2474740	3498	0.13	0.937
Square	3	13870	4623	0.18	0.909
Interaction	3	9350	3117	0.12	0.946
Residual Error	10	260535	26053		
Lack-of-Fit	5	209785	41957	4.13	0.073
Pure Error	5	50750	10150		
Total	19	2758495			

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

Source	Hardness				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	9	938.20	104.244	9.73	0.001
Linear	3	663.58	35.646	3.33	0.065
Square	3	169.58	56.527	5.28	0.019
Interaction	3	105.03	35.011	3.27	0.067
Residual Error	10	107.10	10.710		
Lack-of-Fit	5	77.76	15.552	2.65	0.154
Pure Error	5	29.34	5.869		
Total	19	1045.30			
	Springiness				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	9	0.025817	0.002869	14.57	0.000
Linear	3	0.024375	0.000180	0.91	0.468
Square	3	0.000638	0.000213	1.08	0.401
Interaction	3	0.000804	0.000268	1.36	0.310
Residual Error	10	0.001969	0.000197		
Lack-of-Fit	5	0.001564	0.000313	3.86	0.082
Pure Error	5	0.000405	0.000081		
Total	19	0.027785			
	To				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	9	27.8772	3.09747	32.14	0.000
Linear	3	25.1144	0.46418	4.82	0.025
Square	3	1.4961	0.49872	5.17	0.020
Interaction	3	1.2667	0.42225	4.38	0.033
Residual Error	10	0.9637	0.09637		
Lack-of-Fit	5	0.7835	0.15669	4.35	0.066
Pure Error	5	0.1803	0.03606		
Total	19	28.8410			

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

Source	Tp				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	9	97.3147	10.8127	48.45	0.000
Linear	3	65.3404	7.1837	32.19	0.000
Square	3	31.3378	10.4459	46.81	0.000
Interaction	3	0.6364	0.2121	0.95	0.453
Residual Error	10	2.2317	0.2232		
Lack-of-Fit	5	2.0182	0.4036	9.45	0.014
Pure Error	5	0.2135	0.0427		
Total	19	99.5464			
Tc					
Regression	9	20.3973	2.2664	6.78	0.003
Linear	3	4.8055	4.2718	12.78	0.001
Square	3	5.2733	1.7578	5.26	0.020
Interaction	3	10.3185	3.4395	10.29	0.002
Residual Error	10	3.3428	0.3343		
Lack-of-Fit	5	2.6380	0.5276	3.74	0.087
Pure Error	5	0.7048	0.1410		
Total	19	23.7402			
ΔH					
Regression	9	24.7705	2.7523	17.39	0.000
Linear	3	23.5363	0.2437	1.54	0.264
Square	3	0.6556	0.2185	1.38	0.305
Interaction	3	0.5785	0.1928	1.22	0.353
Residual Error	10	1.5824	0.1582		
Lack-of-Fit	5	0.9149	0.1830	1.37	0.369
Pure Error	5	0.6675	0.1335		
Total	19	26.3529			

ตารางผนวกที่ 6 การวิเคราะห์ ANOVA ของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว CN1 ดัดแปรด้วยวิธี HMT

Source	Peak viscosity				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	9	4528129	503125	44.65	0.000
Linear	3	3534905	104080	9.24	0.003
Square	3	915700	305233	27.09	0.000
Interaction	3	77524	25841	2.29	0.140
Residual Error	10	112686	11269		
Lack-of-Fit	5	93695	18739	4.93	0.052
Pure Error	5	18991	3798		
Total	19	4640815			
trough					
Regression	9	362848	40316	3.20	0.042
Linear	3	193627	21335	1.69	0.231
Square	3	135492	45164	3.59	0.054
Interaction	3	33730	11243	0.89	0.478
Residual Error	10	125899	12590		
Lack-of-Fit	5	97699	19540	3.46	0.099
Pure Error	5	28199	5640		
Total	19	488747			
final viscosity					
Regression	9	2563180	284798	27.94	0.000
Linear	3	2393855	26932	2.64	0.107
Square	3	138573	46191	4.53	0.030
Interaction	3	30751	10250	1.01	0.430
Residual Error	10	101946	10195		
Lack-of-Fit	5	51355	10271	1.02	0.494
Pure Error	5	50590	10118		
Total	19	2665125			

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Source	breakdown				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	9	4252178	472464	34.27	0.000
Linear	3	3512775	168588	12.23	0.001
Square	3	705575	235192	17.06	0.000
Interaction	3	33828	11276	0.82	0.513
Residual Error	10	137854	13785		
Lack-of-Fit	5	115014	23003	5.04	0.050
Pure Error	5	22841	4568		
Total	19	4390033			
setback					
Regression	9	1491084	165676	10.92	0.000
Linear	3	1344346	20613	1.36	0.311
Square	3	20842	6947	0.46	0.718
Interaction	3	125897	41966	2.77	0.097
Residual Error	10	151656	15166		
Lack-of-Fit	5	109975	21995	2.64	0.155
Pure Error	5	41681	8336		
Total	19	1642740			
G' 95°C					
Regression	9	51152362	5683596	43.66	0.000
Linear	3	43928190	572434	4.40	0.032
Square	3	3685734	1228578	9.44	0.003
Interaction	3	3538438	1179479	9.06	0.003
Residual Error	10	1301893	130189		
Lack-of-Fit	5	1081893	216379	4.92	0.053
Pure Error	5	220000	44000		
Total	19	52454255			

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Source	G'' 95°C				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	9	794570	88286	2.84	0.060
Linear	3	319250	135174	4.34	0.033
Square	3	343070	114357	3.67	0.051
Interaction	3	132250	44083	1.42	0.295
Residual Error	10	311285	31128		
Lack-of-Fit	5	145885	29177	0.88	0.553
Pure Error	5	165400	33080		
Total	19	1105855			
G' 25°C					
Regression	9	84041886	9337987	56.81	0.000
Linear	3	71262000	2411264	14.67	0.001
Square	3	10976136	3658712	22.26	0.000
Interaction	3	1803750	601250	3.66	0.052
Residual Error	10	1643614	164361		
Lack-of-Fit	5	988614	197723	1.51	0.331
Pure Error	5	655000	131000		
Total	19	85685500			
G'' 25°C					
Regression	9	344690	38298.9	16.69	0.000
Linear	3	334798	2941.9	1.28	0.333
Square	3	6960	2320.2	1.01	0.428
Interaction	3	2932	977.3	0.43	0.739
Residual Error	10	22943	2294.3		
Lack-of-Fit	5	15625	3125.0	2.14	0.212
Pure Error	5	7317	1463.5		
Total	19	367633			

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Source	Hardness				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	9	52357.6	5817.5	12.85	0.000
Linear	3	20520.8	6159.0	13.61	0.001
Square	3	31095.4	10365.1	22.90	0.000
Interaction	3	741.4	247.1	0.55	0.662
Residual Error	10	4526.6	452.7		
Lack-of-Fit	5	3613.6	722.7	3.96	0.079
Pure Error	5	913.0	182.6		
Total	19	56884.2			
Springiness					
Regression	9	0.090648	0.010072	9.79	0.001
Linear	3	0.070403	0.002958	2.87	0.090
Square	3	0.004688	0.001563	1.52	0.269
Interaction	3	0.015557	0.005186	5.04	0.022
Residual Error	10	0.010290	0.001029		
Lack-of-Fit	5	0.007386	0.001477	2.54	0.164
Pure Error	5	0.002903	0.000581		
Total	19	0.100937			
To					
Regression	9	198.86	22.095	9.01	0.001
Linear	3	150.91	4.684	1.91	0.192
Square	3	35.82	11.941	4.87	0.024
Interaction	3	12.13	4.043	1.65	0.240
Residual Error	10	24.53	2.453		
Lack-of-Fit	5	10.44	2.088	0.74	0.625
Pure Error	5	14.09	2.818		
Total	19	223.39			

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Source	Tp				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	9	198.125	22.01391	11.98	0.000
Linear	3	162.278	0.97367	0.53	0.672
Square	3	15.573	5.19116	2.82	0.093
Interaction	3	20.274	6.75785	3.68	0.051
Residual Error	10	18.376	1.83762		
Lack-of-Fit	5	18.280	3.65605	190.42	0.000
Pure Error	5	0.096	0.01920		
Total	19	216.501			
Tc					
Regression	9	133.541	14.8379	43.47	0.000
Linear	3	103.935	2.9602	8.67	0.004
Square	3	6.031	2.0105	5.89	0.014
Interaction	3	23.574	7.8580	23.02	0.000
Residual Error	10	3.413	0.3413		
Lack-of-Fit	5	2.680	0.5360	3.65	0.091
Pure Error	5	0.733	0.1467		
Total	19	136.954			
ΔH					
Regression	9	138.270	15.3633	36.63	0.000
Linear	3	128.484	2.5416	6.06	0.013
Square	3	2.017	0.6724	1.60	0.250
Interaction	3	7.769	2.5897	6.17	0.012
Residual Error	10	4.194	0.4194		
Lack-of-Fit	5	3.475	0.6949	4.83	0.055
Pure Error	5	0.720	0.1440		
Total	19	142.464			

ตารางผนวกที่ 7 การวิเคราะห์ ANOVA ของ คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว KDML105
คัดแปรด้วยวิธี ANN

Source	Peak viscosity				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	5	222457	44491	2.27	0.158
Linear	2	169907	28183	1.44	0.300
Square	2	4205	2103	0.11	0.900
Interaction	1	48345	48345	2.47	0.160
Residual Error	7	137215	19602		
Lack-of-Fit	3	99278	33093	3.49	0.129
Pure Error	4	37937	9484		
Total	12	359672			
trough					
Regression	5	300589	60118	3.19	0.081
Linear	2	91091	54178	2.88	0.122
Square	2	193082	96541	5.13	0.042
Interaction	1	16416	16416	0.87	0.381
Residual Error	7	131736	18819		
Lack-of-Fit	3	81701	27234	2.18	0.233
Pure Error	4	50035	12509		
Total	12	432325			
final viscosity					
Regression	5	233936	46787.2	17.48	0.001
Linear	2	219799	144.6	0.05	0.948
Square	2	13923	6961.7	2.60	0.143
Interaction	1	214	213.9	0.08	0.786
Residual Error	7	18735	2676.5		
Lack-of-Fit	3	12205	4068.4	2.49	0.199
Pure Error	4	6530	1632.5		
Total	12	252671			

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Source	breakdown				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	5	128841	25768	4.36	0.040
Linear	2	90694	7400	1.25	0.343
Square	2	36156	18078	3.06	0.111
Interaction	1	1991	1991	0.34	0.580
Residual Error	7	41381	5912		
Lack-of-Fit	3	25154	8385	2.07	0.247
Pure Error	4	16227	4057		
Total	12	170222			
setback					
Regression	5	232777	46555.3	11.40	0.003
Linear	2	210070	13173.5	3.23	0.102
Square	2	22307	11153.4	2.73	0.133
Interaction	1	400	400.0	0.10	0.763
Residual Error	7	28593	4084.7		
Lack-of-Fit	3	8493	2830.9	0.56	0.667
Pure Error	4	20100	5025.1		
Total	12	261369			
G ' 95°C					
Regression	5	331462	66292.46	20.40	0.000
Linear	2	313633	4520.20	1.39	0.310
Square	2	17804	8901.99	2.74	0.132
Interaction	1	25	25.00	0.01	0.933
Residual Error	7	22749	3249.84		
Lack-of-Fit	3	11764	3921.24	1.43	0.359
Pure Error	4	10985	2746.30		
Total	12	354211			

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Source	G'' 95°C				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	5	27756	5551	2.42	0.140
Linear	2	14185	3602	1.57	0.273
Square	2	11219	5610	2.45	0.157
Interaction	1	2352	2352	1.03	0.345
Residual Error	7	16057	2294		
Lack-of-Fit	3	8294	2765	1.42	0.360
Pure Error	4	7763	1941		
Total	12	43813			
G' 25°C					
Regression	5	14219660	2843932	38.03	0.000
Linear	2	13214417	360325	4.82	0.048
Square	2	987018	493509	6.60	0.024
Interaction	1	18225	18225	0.24	0.637
Residual Error	7	523432	74776		
Lack-of-Fit	3	331432	110477	2.30	0.219
Pure Error	4	192000	48000		
Total	12	14743092			
G'' 25°C					
Regression	5	133438	26687.5	1.43	0.320
Linear	2	23067	33558.8	1.80	0.233
Square	2	110346	55172.9	2.97	0.117
Interaction	1	25	25.0	0.00	0.972
Residual Error	7	130239	18605.6		
Lack-of-Fit	3	115159	38386.5	10.18	0.024
Pure Error	4	15080	3770.0		
Total	12	263677			

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Source	Hardness				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	5	691.336	138.2672	47.20	0.000
Linear	2	552.443	47.3353	16.16	0.002
Square	2	103.282	51.6408	17.63	0.002
Interaction	1	35.611	35.6111	12.16	0.010
Residual Error	7	20.508	2.9297		
Lack-of-Fit	3	16.954	5.6512	6.36	0.053
Pure Error	4	3.554	0.8886		
Total	12	711.844			
Springiness					
Regression	5	0.047553	0.009511	13.85	0.002
Linear	2	0.040874	0.001190	1.73	0.245
Square	2	0.006607	0.003304	4.81	0.048
Interaction	1	0.000072	0.000072	0.11	0.755
Residual Error	7	0.004806	0.000687		
Lack-of-Fit	3	0.000318	0.000106	0.09	0.959
Pure Error	4	0.004488	0.001122		
Total	12	0.052360			
To					
Regression	5	10.1540	2.03081	40.64	0.000
Linear	2	8.1194	0.57595	11.53	0.006
Square	2	2.0316	1.01582	20.33	0.001
Interaction	1	0.0030	0.00302	0.06	0.813
Residual Error	7	0.3498	0.04997		
Lack-of-Fit	3	0.1920	0.06401	1.62	0.318
Pure Error	4	0.1577	0.03943		
Total	12	10.5038			

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Source	Tp				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	5	0.081679	0.016336	0.69	0.649
Linear	2	0.033633	0.006551	0.28	0.767
Square	2	0.046446	0.023223	0.98	0.422
Interaction	1	0.001600	0.001600	0.07	0.803
Residual Error	7	0.166398	0.023771		
Lack-of-Fit	3	0.038118	0.012706	0.40	0.764
Pure Error	4	0.128280	0.032070		
Total	12	0.248077			
Tc					
Regression	5	1.10470	0.220939	5.03	0.028
Linear	2	0.12908	0.475565	10.83	0.007
Square	2	0.96839	0.484193	11.02	0.007
Interaction	1	0.00723	0.007225	0.16	0.697
Residual Error	7	0.30743	0.043918		
Lack-of-Fit	3	0.16055	0.053516	1.46	0.352
Pure Error	4	0.14688	0.036720		
Total	12	1.41212			
ΔH					
Regression	5	17.0722	3.41444	76.12	0.000
Linear	2	14.9985	0.67678	15.09	0.003
Square	2	1.8621	0.93103	20.76	0.001
Interaction	1	0.2116	0.21160	4.72	0.066
Residual Error	7	0.314	0.04485		
Lack-of-Fit	3	0.0649	0.02163	0.35	0.794
Pure Error	4	0.2491	0.06227		
Total	12	17.3862			

ตารางผนวกที่ 8 การวิเคราะห์ ANOVA ของ คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว CN1 ดัดแปร ด้วยวิธี ANN

Source	trough				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	5	500086	100017	2.84	0.103
Linear	2	104043	173008	4.91	0.047
Square	2	239068	119534	3.39	0.093
Interaction	1	156974	156974	4.45	0.073
Residual Error	7	246900	35271		
Lack-of-Fit	3	131795	43932	1.53	0.337
Pure Error	4	115105	28776		
Total	12	746986			
final viscosity					
Regression	5	1562121	312424.1	26.10	0.000
Linear	2	1530974	12715.3	1.06	0.395
Square	2	31139	15569.3	1.30	0.331
Interaction	1	8	7.8	0.00	0.980
Residual Error	7	83795	11970.7		
Lack-of-Fit	3	41640	13880.0	1.32	0.385
Pure Error	4	42155	10538.8		
Total	12	1645916			
breakdown					
Regression	5	8964.3	1792.9	2.36	0.147
Linear	2	3500.1	2622.1	3.45	0.090
Square	2	4939.8	2469.9	3.25	0.100
Interaction	1	524.4	524.4	0.69	0.433
Residual Error	7	5314.9	759.3		
Lack-of-Fit	3	4904.1	1634.7	15.92	0.011
Pure Error	4	410.8	102.7		
Total	12	14279.3			

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

Source	Setback				
	Df	SS	MS	F	sig
Linear	2	1522848	3989.2	0.30	0.753
Square	2	16179	8089.5	0.60	0.575
Interaction	1	660	660.5	0.05	0.831
Residual Error	7	94543	13506.2		
Lack-of-Fit	3	55683	18561.1	1.91	0.269
Pure Error	4	38860	9715.0		
Total	12	1634231			
G^* 95°C					
Regression	5	1059379	211876	14.67	0.001
Linear	2	844114	33789	2.34	0.167
Square	2	213933	106966	7.40	0.019
Interaction	1	1332	1332	0.09	0.770
Residual Error	7	101126	14447		
Lack-of-Fit	3	53151	17717	1.48	0.348
Pure Error	4	47975	11994		
Total	12	1160505			
G^{**} 95°C					
Regression	5	27982	5596.5	2.51	0.131
Linear	2	4610	11217.4	5.04	0.044
Square	2	20720	10360.2	4.65	0.052
Interaction	1	2652	2652.2	1.19	0.311
Residual Error	7	15586	2226.6		
Lack-of-Fit	3	2466	822.0	0.25	0.858
Pure Error	4	13120	3280.0		
Total	12	43568			

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

Source	$G' \ 25^{\circ}\text{C}$				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	5	47959576	9591915	17.17	0.001
Linear	2	42510000	950830	1.70	0.250
Square	2	3489576	1744788	3.12	0.107
Interaction	1	1960000	1960000	3.51	0.103
Residual Error	7	3909655	558522		
Lack-of-Fit	3	1709655	569885	1.04	0.467
Pure Error	4	2200000	550000		
Total	12	51869231			
$G'' \ 25^{\circ}\text{C}$					
Regression	5	42210.1	8442.0	1.78	0.236
Linear	2	28129.3	1982.0	0.42	0.674
Square	2	13840.5	6920.3	1.46	0.296
Interaction	1	240.3	240.3	0.05	0.829
Residual Error	7	33273.6	4753.4		
Lack-of-Fit	3	13872.4	4624.1	0.95	0.495
Pure Error	4	19401.2	4850.3		
Total	12	75483.7			
Hardness					
Regression	5	3995.17	799.03	14.69	0.001
Linear	2	3084.38	303.86	5.58	0.035
Square	2	731.60	365.80	6.72	0.023
Interaction	1	179.18	179.18	3.29	0.112
Residual Error	7	380.85	54.41		
Lack-of-Fit	3	72.13	24.04	0.31	0.817
Pure Error	4	308.72	77.18		
Total	12	4376.02			

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

Source	Springiness				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	5	0.138733	0.027747	17.27	0.001
Linear	2	0.052468	0.030926	19.25	0.001
Square	2	0.079459	0.039729	24.73	0.001
Interaction	1	0.006806	0.006806	4.24	0.079
Residual Error	7	0.011248	0.001607		
Lack-of-Fit	3	0.006818	0.002273	2.05	0.249
Pure Error	4	0.004430	0.001107		
Total	12	0.149981			
To					
Regression	5	9.2863	1.857268	9.44	0.005
Linear	2	9.1473	0.036602	0.19	0.834
Square	2	0.1348	0.067415	0.34	0.721
Interaction	1	0.0042	0.004225	0.02	0.888
Residual Error	7	1.3773	0.196752		
Lack-of-Fit	3	0.1555	0.051821	0.17	0.912
Pure Error	4	1.2218	0.305450		
Total	12	10.6636			
Tp					
Regression	5	14.6716	2.9343	2.90	0.099
Linear	2	2.8923	3.8527	3.81	0.076
Square	2	11.4767	5.7384	5.67	0.034
Interaction	1	0.3025	0.3025	0.30	0.601
Residual Error	7	7.0807	1.0115		
Lack-of-Fit	3	2.3427	0.7809	0.66	0.619
Pure Error	4	4.7381	1.1845		
Total	12	21.7523			

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

Source	Tc				
	Df	SS	MS	F	sig
Regression	5	0.65659	0.13132	1.40	0.330
Linear	2	0.59123	0.03273	0.35	0.717
Square	2	0.04846	0.02423	0.26	0.779
Interaction	1	0.01690	0.01690	0.18	0.684
Residual Error	7	0.65568	0.09367		
Lack-of-Fit	3	0.50696	0.16899	4.55	0.089
Pure Error	4	0.14872	0.03718		
Total	12	1.31228			
ΔH					
Regression	5	4.48191	0.896383	71.91	0.000
Linear	2	4.09248	0.028217	2.26	0.174
Square	2	0.19141	0.095703	7.68	0.017
Interaction	1	0.19802	0.198025	15.89	0.005
Residual Error	7	0.08726	0.012465		
Lack-of-Fit	3	0.07254	0.024178	6.57	0.050
Pure Error	4	0.01472	0.003680		
Total	12	4.56917			

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล นางสาวดี แซ่ม

วัน เดือน ปี ที่เกิด วันที่ 20 สิงหาคม 2514

สถานที่เกิด ลำปาง

ประวัติการศึกษา วท.บ. (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร)

สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (พ.ศ. 2536)

วท.ม. (เทคโนโลยีอาหาร)

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (พ.ศ. 2542)

ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน ข้าราชการมหาวิทยาลัย

สถานที่ทำงานปัจจุบัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ -

ทุนการศึกษาที่ได้รับ ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปี

งบประมาณ 2549