



รายงานการวิจัย

คุณลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างภายในของพาสตาข้าวเจ้า  
ที่ได้จากการอัดพอง

(Physical Characteristics and Microstructure of Extruded  
Rice Pasta)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT-305-43-12-50



## รายงานการวิจัย

# คุณลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างภายในของพาสตาข้าวเจ้า ที่ได้จากการอัดพอง (Physical Characteristics and Microstructure of Extruded Rice Pasta)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์มานิชญ์ สุธีพัฒนานนท์

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2543

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2546

## กิตติกรรมประกาศ

### (Acknowledgments)

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2543 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ความอนุเคราะห์พื้นที่และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย ขอขอบคุณบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้มีส่วนช่วยให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## บทคัดย่อ (Abstract)

แป้งข้าวเจ้าชนิดที่มีปริมาณอะไมโลสสูงนำมาผ่านกระบวนการอัดพองที่สภาวะแตกต่างกันดังนี้คือ ระดับความชื้นของแป้งร้อยละ 27 – 35 อุณหภูมิของเครื่องอัดพองอยู่ในช่วง 95 – 115 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของสกรูระหว่าง 30 – 50 รอบต่อนาที ผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นคล้ายสปาเกตตี เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเนื้อสัมผัส พบว่ามีคุณสมบัติใกล้เคียงกับสปาเกตตีที่ทำจากแป้งสาลีที่วางจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป เพียงแต่มีปัญหาคุณภาพด้านการหุงต้ม เช่น เวลาที่ใช้ในการต้มให้สุกนานกว่าสปาเกตตีที่ทำจากแป้งสาลี ผลจากการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตสปาเกตตีที่ทำจากแป้งข้าวเจ้าอยู่ที่ความชื้นร้อยละ 33 – 35 ความเร็วรอบของสกรูที่ 30 รอบต่อนาที และอุณหภูมิของเครื่องอยู่ที่ 100 – 104 องศาเซลเซียส จากการศึกษาโครงสร้างภายในของสปาเกตตีจากข้าวเจ้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดพบว่าโครงสร้างของสปาเกตตีข้าวเจ้ามิได้เกิดโครงข่ายของโปรตีนเหมือนในสปาเกตตีที่ทำจากแป้งสาลีโดยเห็นได้จากชิ้นส่วนของโปรตีนกระจัดกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบทั่วไปภายในโครงสร้าง

### Abstract

Rice flour with high amylose content was extruded over a range of feed moistures (27-35%), barrel temperatures (95 – 115°C), and screw speeds (30 – 50 rpm) in a laboratory scale with twin screw extruder. The resulting products which are similar to spaghetti were characterized for physical and textural properties, and cooking qualities. The results indicate that the physical and textural properties were similar to the commercial type. The cooking qualities of rice spaghetti were slightly different from typical spaghetti due to a long cooking time. From surface response plots, the optimum condition for rice spaghetti production was at a moisture content of 33 – 35% (dry basis), a screw speed of 30 rpm, and barrel temperatures between 100 - 104°C. Image from scanning electron microscopy reveal that the structure of rice spaghetti is not formed by protein net work like wheat spaghetti. The protein bodies were randomly distributed throughout the structure.

**สารบัญเรื่อง**  
**(Table of Contents)**

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อภาษาไทย	ii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iii
สารบัญเรื่อง	iv
สารบัญตาราง	v
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	3
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	8
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	15
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	30
บรรณานุกรม	32
ภาคผนวก	34

**สารบัญตารางและรูปภาพ**  
**(List of Table and Figure)**

<b>ตารางที่</b>	<b>หน้า</b>
1. Experiment run of 3 × 3 full factorial	14
2. Chemical compositions and amylose content of rice flour	22
3. Properties of high amylose rice spaghetti	23
4. Regression coefficients and $r^2$ values for qualities of rice spaghetti	24
5. Correlation coefficient for quality attributes of rice pasta	25
6. Properties of commercial spaghetti and rice spaghetti for predicted optimal conditions	27
<b>รูปภาพที่</b>	
1. กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการผลิตที่มีต่ออัตรา การพองตัวและความหนาแน่นของสปาเกตตีจากข้าว	18
2. กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการผลิตที่มีต่อระยะเวลา ในการต้ม น้ำหนักหลังต้ม และการสูญเสียระหว่างต้ม	19
3. กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการผลิตที่มีต่อความ แน่นเนื้อ, ความเหนียวติดที่ผิวหน้า, และความต้านทานต่อแรงดึง	20
4. กราฟแสดงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตพาสต้าข้าวเจ้า	27
5. Scanning electron microgram of commercial and rice spaghetti	29

# บทที่ 1

## บทนำ

### (Introduction)

#### ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ผลิตภัณฑ์พาสตา (Pasta product) เช่น มะกะโรนี และ สปาเกตตี เป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่นิยมบริโภคกันมากในแถบยุโรปและอเมริกา ซึ่งความนิยมนี้ก็ได้แพร่หลายไปยังประเทศอื่น ๆ ทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทยด้วย วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคือ ซีโมลินา (Semolina) ที่ได้จากการบดหยาบของข้าวสาลีดูรัม (Durum wheat) ผสมน้ำ นวด ผ่านเครื่องอัดพอง (extruder) ขึ้นรูปเป็นรูปแบบต่าง ๆ แล้วนำไปอบแห้ง (Hoseney, 1994) ได้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ที่ผ่านมาประเทศไทยได้พยายามปรับปรุงพันธุ์และส่งเสริมการปลูกข้าวสาลีในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศ แต่กำลังการผลิตก็ยังไม่เพียงพอต่อการบริโภค เป็นเหตุให้ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศปีละไม่น้อย (กรรณิกา, 2536)

ผู้บริโภคบางกลุ่มเป็นโรคแพ้ (Allergic) แป้งสาลี มีอาการตั้งแต่เป็นผื่นคันที่ผิวหนังหายใจขัด การเจริญเติบโตช้าลงในเด็ก เจ็บปวดข้อ และ/หรือเกิดโรคเกี่ยวกับลำไส้ (Celiac disease) ซึ่งเกิดจากลำไส้เล็กไม่สามารถย่อยไกลอะซินซึ่งเป็นองค์ประกอบของโปรตีนกลูเตนในข้าวสาลีได้ (อรอนงค์, 2540, และ Newland et. al, 1995)

ถ้าหากสามารถผลิตพาสตาจากแป้งธัญชาติอื่นที่มีมากในประเทศไทย เช่น ข้าวเจ้า เป็นวัตถุดิบทดแทนแป้งสาลีซึ่งต้องนำเข้า นอกจากเป็นการลดการนำเข้าแป้งสาลีและผลิตภัณฑ์แล้วยังเป็นการเพิ่มผลิตภัณฑ์ใหม่อันเป็นการสร้างทางเลือกให้แก่ผู้บริโภคและเป็นอีกหนทางหนึ่งที่น่าสนใจในการส่งเสริมให้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการส่งออกได้อีกด้วย

#### วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์พาสตาชนิดสปาเกตตีโดยใช้แป้งข้าวเจ้าด้วยเครื่องอัดพองแบบสกรูคู่
2. เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และคุณภาพของสปาเกตตีข้าวเจ้าที่ผลิตได้
3. เพื่อศึกษาโครงสร้างภายใน (Microstructure) ของสปาเกตตีข้าวเจ้าเปรียบเทียบกับสปาเกตตีทางการค้าที่ผลิตจากแป้งสาลี



### ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยมุ่งเน้นหาสถานะที่เหมาะสมและดีที่สุดในการผลิตพาสต้าข้าวเจ้า โดยการใช้เครื่องอัดพองแบบสกรูคู่ โดยใช้คุณภาพในด้านการหุงต้มและลักษณะเนื้อสัมผัสของพาสต้าจากข้าวสาลีเป็นมาตรฐานในการตัดสินคุณภาพของพาสต้าจากข้าว รวมถึงอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างภายในและคุณภาพในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์พาสต้าและวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงปัจจัยการผลิตโดยรวมหรือแยกเดี่ยว

### ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

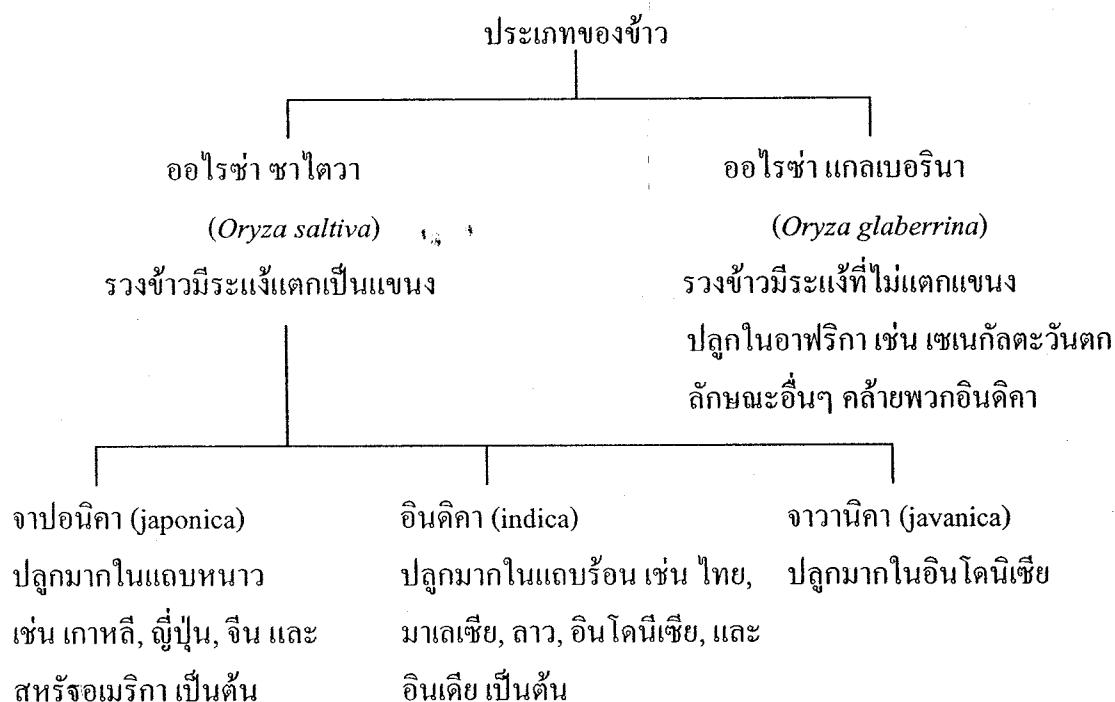
ส่งเสริมการใช้วัตถุดิบภายในประเทศเพื่อลดและทดแทนการนำเข้าทั้งแป้งสาลีและผลิตภัณฑ์พาสต้า เพิ่มสินค้าทางเลือกให้แก่ผู้บริโภคที่แพ้โปรตีนจากแป้งสาลี และอาจใช้เทคโนโลยีนี้ไปพัฒนาพาสต้าเพื่อการส่งออกและช่วยให้เกษตรกรขายข้าวได้ในราคาดี

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร (Literature Review)

#### ข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าว

ข้าวเป็นอาหารหลักและเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญของคนไทย รวมทั้งชนชาติอื่น ๆ เช่น ฮองกง เกาหลี ปากีสถาน ฟิลิปปินส์ อินเดีย และจีน เป็นต้น (ละม้ายมาศ, 2541) ข้าวเป็นพืชตระกูลหญ้าอยู่ในแฟมมีลี Gramineae มีจำนวนโครโมโซมเป็น  $2n = 24$  ข้าวที่นิยมปลูกมี 2 พวก คือ *Oryza sativa* และ *Oryza glaberrina* ซึ่งยังแบ่งได้อีกดังต่อไปนี้



ข้าวที่ปลูกมากในประเทศไทยหากแบ่งตามปริมาณอะไมโลส (Amylose Content) จะสามารถแบ่งได้เป็น

1. ข้าวอะไมโลสสูง ได้แก่ ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสตั้งแต่ 27 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป เช่น ชัยนาท1 สุพรรณบุรี1 ปทุมธานี60 และเหลืองประทิว123 เป็นต้น
2. ข้าวอะไมโลสปานกลาง ได้แก่ ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสตั้งแต่ 21 - 26 เปอร์เซ็นต์ เช่น กข7 สุพรรณบุรี60 และขาวตาแห้ง เป็นต้น
3. ข้าวอะไมโลสต่ำ ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ เช่น ขาวดอกมะลิ105 ปทุมธานี1 หอมคลองหลวง1 และกข15 เป็นต้น (ประภาส, 2531)

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งนอกจากจะมีการจำหน่ายในรูปของข้าวสารแล้ว ยังมีการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทก๋วยเตี๋ยว เส้นหมี่ และ ขนมจีน สำหรับการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก ในด้านการจำหน่ายข้าวในรูปของข้าวสารนั้นข้าวที่เป็นที่นิยมมากที่สุดคือ ข้าวหอมมะลิ (ข้าวดอกมะลิ105) เนื่องจากเป็นข้าวในกลุ่มที่อะไมโลสต่ำ จึงมีลักษณะเหนียว นุ่มเหนียว นอกจากนี้ข้าวหอมมะลียังมีกลิ่นหอมน่ารับประทาน จึงมีราคาค่อนข้างสูงและเป็นที่ยอมรับมากในต่างประเทศ ในขณะที่ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะให้ข้าวหุงสุกที่ร่วน แข็ง และไม่มียกกลิ่นหอม จึงมีราคาต่ำและบริโภคเพียงในประเทศ แต่อย่างไรก็ตามข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงเหมาะที่จะนำไปทำผลิตภัณฑ์จากข้าวเจ้าประเภทเส้นหมี่และเส้นก๋วยเตี๋ยว เนื่องจากมีคุณสมบัติในการจับตัวกันเป็นเจลแข็ง ไม่เปราะหรือหักงาระหว่างการผลิต ขณะเดียวกันเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปลวกให้สุกก็มีความเหนียวนุ่มพอเหมาะแก่การรับประทาน (งามชื่น, 2540, และ รัตพันธ์, 2544)

### พาสตาและผลิตภัณฑ์ (Pasta products)

พาสตาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารชนิดเส้นที่นิยมบริโภคกันมากในแถบยุโรปและอเมริกา ซึ่งผลิตภัณฑ์ในกลุ่มนี้มีชื่อเรียกหลายชื่อตามรูปแบบและรูปร่าง เช่น สปาเกตตี้ มีลักษณะเป็นเส้นกลมทึบมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 – 2.1 เซนติเมตร มีความยาวไม่น้อยกว่า 20 เซนติเมตร ในขณะที่มะกะโรนี มีลักษณะเป็นเส้นใหญ่มีรูกลวงตรงกลางมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 2.5 – 7 มิลลิเมตร ยาว 2 – 2.8 มิลลิเมตร หนา 0.5 – 1 มิลลิเมตร เป็นต้น (Hoseney, 1994) โดยทั่วไปจะจำหน่ายในลักษณะผลิตภัณฑ์แห้งเมื่อต้องการบริโภคก็นำมาต้มในน้ำร้อนเดือดแล้วทำให้สะเด็ดน้ำก่อนนำไปปรุงรสกับเนื้อและเครื่องปรุงอื่น ๆ ตามต้องการ

การผลิตพาสตามีส่วนประกอบหลัก คือ แป้งสาลีชนิดดูรัม (durum wheat) และน้ำ เนื่องจากในแป้งสาลีชนิดดูรัมมีโปรตีนที่ชื่อ กลูเตน (gluten) ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษ คือ เมื่อผสมกับน้ำแล้วจะเกิดโด (dough) ที่มีความเหนียวแต่ไม่ยืดง่าย จึงสามารถอัดขึ้นรูปได้ อีกทั้งการใช้น้ำปริมาณที่ไม่สูงนักจึงทำให้ใช้เวลาในการทำแห้งสั้น และนอกจากนี้แป้งสาลีชนิดดูรัมยังมีปริมาณแคลโรทีนสูงจึงให้ผลิตภัณฑ์มีสีเหลืองสวยอีกด้วย กรรมวิธีการผลิตพาสตาประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ การนวดผสม การขึ้นรูป และการทำแห้ง (Hoseney, 1994)

คุณสมบัติของพาสตาและผลิตภัณฑ์หลังจากผ่านการต้มสุกแล้วพาสตาต้องสามารถพองตัวได้ดี ไม่เปื่อยยุ่ย มีความเหนียวยืดหยุ่นดี ผิวหน้าไม่เหนียวติดกัน และน้ำที่ใช้ต้มไม่ขุ่นขาวเนื่องจากการละลายของแป้งที่อยู่ในพาสตา (Smewing, 1997)

## โรคแพ้แป้งสาลี (Gluten sensitive)

โรคแพ้แป้งสาลีมีชื่อเรียกหลายชื่อ เช่น celiac disease, gluten sensitive, หรือ gluten intolerance เป็นต้น ซึ่งหมายถึง โรคที่เกิดจากการที่ร่างกายไม่สามารถรับโปรตีนกลูเตนได้ โดยมีสาเหตุเนื่องมาจากความผิดปกติของยีน ดังนั้นโรคนี้อาจสามารถถ่ายทอดทางพันธุกรรมได้ พบมากในคนที่สืบเชื้อสายมาจากชาวยุโรป ในอัตราส่วน 1 คน ใน 150 – 250 คน แต่มีอัตราส่วนน้อยลงในคนแอฟริกาและเอเชีย โรคแพ้โปรตีนกลูเตนนี้เป็นโรคที่วินิจฉัยยาก เพราะมีอาการปรากฏได้หลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับแต่ละบุคคล เช่น ท้องเสีย ท้องผูก อ่อนเพลีย น้ำหนักลด ปวดในข้อและกระดูก และภาวะโศซำในเด็ก เป็นต้น ในปัจจุบันยังไม่พบวิธีการรักษาทำได้เพียงการป้องกันคือ ให้ผู้ป่วยหลีกเลี่ยงการรับประทานอาหารที่มีโปรตีนกลูเตนของข้าวสาลีและธัญหารอื่นที่มีโครงสร้างเหมือนกับกลูเตนในข้าวสาลี เช่น ข้าวโอ๊ต ข้าวบาเลย์ และข้าวไรย์ เป็นต้น (Scott, 2000)

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา นักวิจัยได้พยายามผลิตพาสตาจากธัญพืชชนิดอื่น ๆ อาทิเช่น เมื่อปี 1984 Hsu ได้จดสิทธิบัตรการผลิตพาสตาจากข้าว โดยต้องนำแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการทำให้สุก โปรไฟลีน ไกลคอลอัลจินต โซเดียมและ/หรือโพแทสเซียมอัลจินตมาผสมกับแป้งข้าวดิบก่อนนำมานวดผสมเพื่อทำการผลิตพาสตาข้าวเจ้า ต่อมาเมื่อปี 1985 Lechthaler ได้นำแป้งธัญพืชชนิดต่าง ๆ เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด แป้งถั่วและแป้งมันฝรั่ง มาผสมกับน้ำอ่อนและสารที่ทำให้เกิดเจล (gelling agent) เพื่อให้เกิดโคและนำโคดังกล่าวไปทำให้สุกบางส่วนและนวดอีกครั้งภายใต้ความดันสูงก่อนอัดเพื่อขึ้นรูปเป็นพาสตาค่อนนำลงแช่ในอ่างน้ำที่มีสารละลายที่มีประจุลบเพื่อส่งเสริมให้เกิดเจลจากนั้นจึงนำพาสตาดังกล่าวไปทำแห้ง และเมื่อปี 1994 Hauser และ Lechthaler ได้ผลิตพาสตาข้าวเจ้าโดยการนำแป้งข้าวเจ้าผสมกับสารที่ทำให้เกิดเจลอิมัลซิไฟเออร์ ก่อนนำเข้าสู่เครื่องอัดพอง อัดขึ้นรูปและนำพาสตาแช่ลงในอ่างที่มีสารละลายที่มีประจุลบเพื่อส่งเสริมการเกิดเจลก่อนนำพาสตาดังกล่าวไปทำแห้งได้เป็นพาสตาข้าวเจ้า

## การแปรรูปอาหารโดยวิธีการอัดพอง (Extrusion Process)

กระบวนการแปรรูปอาหารโดยวิธีการอัดพอง คือกระบวนการแปรรูปอาหารโดยใช้อุณหภูมิสูงในระยะเวลาสั้น (High Temperature Short Time :HTST) (Harper, 1978, และ Bailey, 1991) ซึ่งประกอบด้วยการทำงานของหลายส่วนร่วมกันของเครื่องอัดพอง (Extruder) ได้แก่ส่วนที่รับและส่งผ่านวัตถุดิบ (Feed hopper) เข้าสู่ตัวเครื่องอัดพอง ส่วนที่มีการผสม การนวด การให้ความร้อน และการขึ้นรูปโดยการอัดผ่านรูเปิด (Die) ทำให้เกิดรูปร่าง การทำงานร่วมกันของหน่วยต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของวัตถุดิบให้อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (Intermediate product) หรือผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Finish product) กระบวนการแปรรูปโดยเครื่องอัดพองใช้ประโยชน์ในการผลิตผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น อาหารเช้าพร้อมรับประทานจากธัญชาติ (ready-to eat cereal) เนื้อเทียม พาสตา ขนมปังและอาหารขบเคี้ยว (snack) เป็นต้น (ประชา, 2539)

## หลักการการทำงานของเครื่องอัดพอง

วัตถุดิบจะถูกส่งไปที่ส่วนรับวัตถุดิบจากนั้นส่งผ่านไปที่ตัวเครื่องอัดพอง วัตถุดิบจะหลอมเหลวอยู่ในรูปของเหลวหนืด เนื่องจากความดัน อุณหภูมิและแรงเฉือน (shear force) สูงที่เกิดขึ้นในเครื่องอัดพอง จากนั้นวัตถุดิบจะอยู่ในรูปของโคเคล็อนที่อยู่ภายในเครื่องอัดพองตามทิศทางการหมุนของสกรู (screw) ช่วงระยะที่ผ่านตัวเครื่องอัดพองนี้โคจะถูทำให้สุก และทำให้เกิดรูปร่างโดยผ่านหน้าแปลน (die) ซึ่งเป็นรูเปิดหรือช่องอยู่ส่วนสุดท้ายของเครื่องอัดพองผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องอัดพอง เรียกว่า เอ็กทรีเดต (extrudate) เอ็กทรีเดตที่ได้อาจมีลักษณะพองหรือมีลักษณะแบนบาง ซึ่งรูปร่างต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ เช่น อุณหภูมิภายในเครื่องอัดพอง และความเร็วรอบของสกรู เป็นต้น

## ชนิดของเครื่องอัดพอง

เครื่องอัดพองแบ่งตามจำนวนสกรูได้ 2 ประเภท คือ เครื่องอัดพองแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) และเครื่องอัดพองแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) ซึ่งทั้ง 2 แบบนี้มีการทำงานคล้ายกัน

1. เครื่องอัดพองแบบสกรูเดี่ยว ประกอบด้วยเกลียวสกรู 1 อันวางตลอดภายในตัวเครื่อง
2. เครื่องและเครื่องอัดพองแบบสกรูคู่ เป็นเครื่องอัดพองที่ประกอบด้วยสกรู 2 อัน ซึ่งมีความยาวเท่ากันอยู่ในบารเรลเดียวกันซึ่งเครื่องอัดพองแบบสกรูคู่ยังแบ่งได้หลายชนิดขึ้นกับแบบของสกรู (screw configuration) โดยขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของสกรูทั้งคู่ (แบบหมุนตามกันและหมุนตรงข้ามกัน) หรือแบ่งตามลักษณะของสกรูที่ซ้อนกัน (สกรูซ้อนและไม่ซ้อนกัน)

อย่างไรก็ตามเครื่องอัดพองแบบสกรูเดี่ยวมีการใช้ประโยชน์ค่อนข้างจำกัดและมักมีปัญหาในการส่งผ่านส่วนผสมที่มีความหนืดต่ำ เครื่องอัดพองแบบสกรูคู่จะเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากใช้ได้ดีกับแหล่งวัตถุดิบหลายประเภท รวมถึงสามารถใช้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นต่าง ๆ และวัตถุดิบที่มีปริมาณไขมันปานกลางด้วย (กมลวรรณ, 2541)

## โครงสร้างภายในของอาหาร (Food microstructure)

ในปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากกล้องจุลทรรศน์ไม่ได้จำกัดเพียงเพื่อการตรวจสอบ หรือการวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยาเท่านั้น แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้ในการศึกษาโครงสร้างภายในของวัสดุและวัตถุต่าง ๆ เพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ของโครงสร้างภายในที่มีต่อคุณสมบัติและ/หรือลักษณะภายนอกด้วย (Ding and Gunasekharans, 1998) อาหารมีองค์ประกอบและส่วนผสมมากมาย อีกทั้งกระบวนการผลิตที่หลากหลาย ซึ่งมีส่วนช่วยส่งเสริมและลดทอนคุณภาพที่ต้องการของอาหารชนิดต่าง ๆ การศึกษาโครงสร้างภายในของอาหารจึงช่วยทำให้เข้าใจว่ากระบวนการผลิตมี

ผลอย่างไรต่อคุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ของอาหาร และเพราะเหตุใดอาหารบางชนิดจึงมีคุณสมบัติในการป่าดทา มีความยืดหยุ่นสูง และเหตุใดอาหารบางชนิดจึงแข็งและร่วนเมื่อถูกกัด เป็นต้น (Aguilera, and Stanley, 1999)

กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างภายในของอาหารมีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ว่าต้องการศึกษาโครงสร้างภายในแบบใด ตัวอย่างกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาโครงสร้างภายใน ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์เลนส์ประกอบแบบใช้แสง (Light microscope) ซึ่งก็แบ่งได้อีกตามแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ เช่น แสงธรรมชาติ แสงจากรังสีอินฟราเรด และแสงฟลูออเรสเซนซ์ เป็นต้น กล้องจุลทรรศน์โพลาไรซ์ (Polarize microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope) ซึ่งแยกย่อยได้อีกหลายประเภท เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscope) เป็นต้น (Aguilera, and Stanley, 1999)

### บทที่ 3

## อุปกรณ์และวิธีทดลอง

### (Materials and Methods)

การเตรียมและการวิเคราะห์คุณภาพแป้งข้าวเจ้า

นำข้าวสารเจ้าพันธุ์เหลืองประทิว 123 บดเป็นแป้ง โดยใช้กรรมวิธีการบดแห้งด้วยเครื่องบดเมล็ดพืช (Retsch, SK standard, 1100W, Germany) จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.25 มิลลิเมตร ก่อนเก็บแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์คุณภาพแป้งข้าวเจ้า

1. วิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วยการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ตามวิธีมาตรฐาน AOAC ซึ่งประกอบด้วย การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน และ เส้นใย (ดังแสดงในภาคผนวก)
2. วิธีวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส ทำตามวิธี Colorimetric assay ของ Julino (1971) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้ potato amylose ในการสร้างกราฟมาตรฐานการหาปริมาณอะมิโลส

กระบวนการอัดพอง (Extrusion process)

การทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องอัดพองชนิดสกรูคู่แบบหมุนตามกัน (co-rotating intermeshing twin screw extruder: APV MPF19:25) ในการผลิตพาสตาชนิดสปาเกตตีจากข้าวเจ้า โดยเครื่องอัดพองดังกล่าวประกอบด้วยสกรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 19 มิลลิเมตร อัตราส่วนระหว่างความยาวทั้งหมดของสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เป็น 25 : 1 ในขณะที่ผนังบาริลมี ส่วนที่ให้ความร้อนที่สามารถควบคุมได้ ซึ่งสามารถแบ่งการควบคุมอุณหภูมิได้ 4 ช่วง ในผนังของบาริลแบบแจ็กเกต 2 ชั้น มีท่อน้ำฝังอยู่ด้านในเพื่อหมุนเวียนน้ำเย็นเมื่อต้องการลดอุณหภูมิของบาริล โดยควบคุมอุณหภูมิของบาริลในช่วงที่ 1, 2, และ 4 คงที่ที่ 55, 90, และ 95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ในกระบวนการผลิตใช้ความเร็วรอบของสกรูระหว่าง 30 – 50 รอบต่อนาที อุณหภูมิในช่วงที่ 3 ระหว่าง 95 – 115 องศาเซลเซียส นำแป้งข้าวเจ้าป้อนเข้าสู่เครื่องอัดพองผ่านทางถังป้อน (ถังพักวัตถุดิบ) ที่ได้ตั้งมีเกลียวสกรูเป็นตัวป้อนแบบปริมาตร (K-tron Crop., Pitman, NY) ด้วยอัตรา 1.09 – 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เข้าไปผสมกับน้ำที่เข้าสู่เครื่องด้วยอัตรา 0.27 – 0.40 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นเริ่มต้นของโดเป็น 27 – 35 เปอร์เซ็นต์ หน้าแปลนที่ใช้ขึ้นรูปสปาเกตตีมี

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ตัดตัวอย่างหลังจากที่ออกจากหน้าแปลนของเครื่องอัดฟอง ให้มีความยาว 30 เซนติเมตร ก่อนทำแห้งให้ตัวอย่างเหลือความชื้นไม่เกิน 13 เปอร์เซ็นต์

#### การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

ในการทดลองครั้งนี้ใช้แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบ 3 ปัจจัย  $\times$  3 ระดับ (ตารางที่ 1) รวมทั้งสิ้น 27 สภาวะการทดลอง ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาหุ่นจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ซึ่งมีสมการต้นแบบดังแสดงในสมการที่ 1 โดยมุ่งเน้นการศึกษาว่าสภาวะการผลิตที่แตกต่างกันมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านต่าง ๆ อย่างไร โดยใช้โปรแกรมสถิติสำเร็จรูป (SAS 6.08) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ( $p < 0.05$  และ  $p < 0.01$ ) และใช้หุ่นจำลองดังกล่าวสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (response surface plots) โดยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป (Statistica 5.0) เพื่อทำนายสภาวะที่ดีที่สุด (optimal prediction) และเหมาะสมในการผลิตของการผลิตสเปกเกตต์จากข้าวที่จะให้คุณภาพใกล้เคียงกับสเปกเกตต์ทางการค้าที่สุด

$$Y = B_0 + \sum B_i X_i + \sum B_{ij} X_i^2 + \sum B_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

เมื่อ Y คือ ผลตอบสนองที่ต้องการศึกษา (experimental response)  
 $B_0, B_i, B_{ij}$ , และ  $B_{ij}$  คือ ค่าคงที่และ regression coefficients ของหุ่นจำลอง  
 $X_i$  และ  $X_j$  คือ สัญลักษณ์ของตัวแปรอิสระ

#### การทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์

##### 1. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical property)

###### 1.1 อัตราการพองตัว (expansion ratio)

วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ จากนั้นคำนวณอัตราการพองตัวจากสูตร

$$\text{อัตราการพองตัว} = \frac{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดของตัวอย่าง}}{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางรูเปิดของได}}$$



## 1.2 ความหนาแน่น (bulk density)

การหาความหนาแน่นของตัวอย่างใช้วิธีการแทนที่ตามวิธีของ Hwang และ Hayakawa (1980) โดยใช้ทรายละเอียดขนาด 80 เมช เป็นตัวกลางการแทนที่

### 1.2.1 หาความหนาแน่นของทราย (กรัม/ซม<sup>3</sup>) โดย

- ชั่งน้ำหนักบีกเกอร์พลาสติกปริมาตร 500 มิลลิลิตร (กรัม) (W1)
- นำทรายละเอียดขนาด 80 เมชที่เตรียมไว้แล้ว ใส่ให้เต็มปาดหน้าให้เรียบแล้วชั่งน้ำหนักบีกเกอร์ (กรัม) (W2)
- คำนวณความหนาแน่นของทรายจากสูตร

$$\text{ความหนาแน่นของทราย} = \frac{(W2 - W1)}{\text{ปริมาตรของบีกเกอร์}}$$

### 1.2.2 หาความหนาแน่นของตัวอย่าง (กรัม/ซม<sup>3</sup>)

- หักตัวอย่างให้ยาวประมาณ 1–1.5 เซนติเมตร แล้วชั่งน้ำหนัก (W3)
- นำตัวอย่างที่หักแล้วใส่ในบีกเกอร์แล้วเติมทรายละเอียดขนาด 80 เมชให้เต็มบีกเกอร์ ปาดหน้าให้เรียบด้วยไม้บรรทัดพลาสติก จากนั้นชั่งน้ำหนัก (W4)
- คำนวณความหนาแน่นจากสูตร

$$\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง} = \frac{W3}{(W2 - W4)} \times \text{ความหนาแน่นของทราย}$$

## 2. การทดสอบคุณภาพในการหุงต้ม (Cooking qualities)

### 2.1 การหาระยะเวลาในการต้ม (cooking time) (Berkman et al., 1994)

นำตัวอย่างต้มในน้ำเดือดเพื่อหาระยะเวลาที่ต้องใช้ในการทำให้ตัวอย่างสุก โดยทำการสุ่มตัวอย่างขึ้นมาตรวจทุก ๆ 30 วินาที ด้วยการนำตัวอย่างไปบีบกดด้วยกระดาษ 2 แผ่น ซึ่งถ้าตัวอย่างสุกอย่างสมบูรณ์แล้วแกนแข็งสีขาวที่อยู่ภายในตัวอย่างจะหายไป บันทึกเวลา (นาที)

### 2.2 การหาน้ำหนักหลังต้ม (cooking weight) (Wang et al, 1999)

- 2.2.1 ชั่งตัวอย่าง 5 กรัม แล้วหักให้มีมีความยาวประมาณ 5 เซนติเมตร นำไปต้มในน้ำเดือดจนกระทั่งสุกซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่เหมาะสมที่ต้องใช้ในการต้มของแต่ละตัวอย่างที่ทำได้ก่อนหน้านี้
- 2.2.2 นำตัวอย่างขึ้นแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นพักบนตะแกรงเพื่อสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาที
- 2.2.3 ชั่งน้ำหนักหาตัวอย่างหลังต้ม (กรัม)

## 2.3 การหาการสูญเสียระหว่างต้ม (cooking loss) (Wang et al., 1999)

2.3.1 ชั่งตัวอย่าง 5 กรัม (ฐานแห้ง) แล้วหักให้มีความยาวประมาณ 5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปต้มในน้ำเดือดจนกระทั่งสุกซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่เหมาะสมที่ต้องใช้ของแต่ละตัวอย่างที่ทำได้ก่อนหน้านี้

2.3.2 นำน้ำที่ใช้ในการต้มไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การสูญเสียระหว่างต้ม

$$\text{การสูญเสียระหว่างต้ม} = \frac{\text{น้ำหนักของแข็งที่เหลือจากน้ำที่ใช้ต้ม} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนต้ม}}$$

## 3. การทดสอบคุณสมบัติลักษณะเนื้อสัมผัส (Textural properties)

การทดสอบคุณสมบัติทางลักษณะเนื้อสัมผัสกระทำโดยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส TA-XT2 (Texture analyzer; Texture Technologies Crop., Scarsdals, NY) ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

### 3.1 การทดสอบความแน่นเนื้อ (firmness)

การทดสอบความแน่นเนื้อดัดแปลงวิธีการทดสอบจากวิธีของ Waslh (1971)

3.1.1 ชั่งตัวอย่าง 5 กรัม หักให้มีความยาวประมาณ 5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปต้มในน้ำเดือดให้สุกตามระยะเวลาที่เหมาะสมของแต่ละตัวอย่างที่ทำได้มาก่อนหน้านี้

3.1.2 นำตัวอย่างแช่ลงในน้ำที่อุณหภูมิห้องนาน 1 นาที จากนั้นนำขึ้นผึ่งให้สะเด็ดน้ำบนตะแกรงเพื่อรอการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

3.1.3 นำตัวอย่าง 1 เส้นวางบนแท่นวางตัวอย่าง และตัดตัวอย่างให้ขาดออกจากกัน โดยกำหนดการทำงานของเครื่องดังต่อไปนี้

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

Distance: 15 mm

Trigger Type: 10 g

Data Acquisition Rate: 400 pps

Accessory: 1-mm Flat Perspex Knife Blade (A/LKB-F)

3.1.4 ความแน่นเนื้อหาได้จากงานที่ต้องใช้ในการตัดตัวอย่างให้ขาดหรือพื้นที่ได้กราฟระหว่างแรงที่ใช้กับระยะทางหารด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละตัวอย่างหลังต้ม

### 3.2 การทดสอบความเหนียวติดที่ผิวหน้า (stickiness)

การทดสอบความแน่นเนื้อดัดแปลงวิธีการทดสอบจากวิธีของ Wang(1999)

- 3.2.1 ชั่งตัวอย่าง 10 กรัม หักให้มีมีความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร จากนั้นนำไปต้มในน้ำเดือดให้สุกตามระยะเวลาที่เหมาะสมของแต่ละตัวอย่างที่ทำได้มาก่อนหน้านี้
- 3.2.2 นำตัวอย่างแช่ลงในน้ำที่อุณหภูมิห้องนาน 1 นาที จากนั้นนำขึ้นผึ่งให้สะเด็ดน้ำบนตะแกรงเพื่อรอการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป
- 3.2.3 นำตัวอย่างขึ้นวางเรียงทีละเส้นจนครอบคลุมพื้นที่ตรงกลางบนแท่นวางตัวอย่างให้กว้างประมาณ 5 เซนติเมตร
- 3.2.4 ก่อนทำการทดสอบ 3 นาที นำกระดาษทิชชูชุบน้ำส่วนเกินที่ผิวหน้าตัวอย่างออก โดยกำหนดการทำงานของเครื่องดังต่อไปนี้

Option:	Adhesive test
Pre-Test Speed:	1.0 mm/s
Test Speed:	0.5 mm/s
Post-Test Speed	10.0 mm/s
Compression force:	3000 g
Compression time:	2 sec
Withdrawal Distance:	10.0 mm
Trigger Type:	Auto 20 g
Data Acquisition Rate:	400 pps
Accessory:	Pasta Stickiness Rig (HDP/PFS)

- 3.2.5 ความเหนียวติดที่ผิวหน้าหาได้จากค่าที่จุดสูงสุดของเส้นกราฟ ซึ่ง คือแรง(กรัม)ที่ต้องใช้ในการแยกหัววัดออกจากผิวหน้าของตัวอย่าง

### 3.3 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength)

- 3.3.1 ชั่งตัวอย่าง 10 กรัม จากนั้นนำไปต้มในน้ำเดือดให้สุกตามระยะเวลาที่เหมาะสมของแต่ละตัวอย่างที่ทำได้มาก่อนหน้านี้
- 3.3.2 นำตัวอย่างแช่ลงในน้ำที่อุณหภูมิห้องนาน 1 นาที จากนั้นนำขึ้นผึ่งให้สะเด็ดน้ำบนตะแกรงนาน 15 นาทีก่อนการวิเคราะห์
- 3.3.3 นำตัวอย่างพันรอบหัววัด 2 – 3 รอบ จากนั้นทำการทดสอบโดยกำหนดสภาวะของเครื่องดังต่อไปนี้ดังต่อไปนี้

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
Accessory:	Spaghetti Tensile Rig (A/SPR)

- 3.3.4 ความต้านทานต่อแรงดึงหาได้จากค่าสูงสุดของกราฟซึ่งหมายถึงแรงสูงสุดที่ใช้ดึงตัวอย่างให้ขาดออกจากกันหารด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละตัวอย่างหลังดัม

#### 4. การศึกษาโครงสร้างภายใน

การศึกษาโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) (Dexter et al. 1978)

4.1 หักตัวอย่างให้เป็นชิ้นเล็กเพื่อวางบนแท่นติดตัวอย่าง (stub) โดยตัวอย่างที่ผ่านการดัมสุกต้องนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวและทำการทำแห้งด้วยระบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dry) ก่อน ส่วนตัวอย่างแบ่งโรยลงบนแท่นติดตัวอย่างบาง ๆ

4.2 เคลือบตัวอย่างด้วยทองให้ทองที่เคลือบมีความหนาประมาณ 10 ไมครอน ด้วยเครื่อง Sputter coated (Ion Sputtering Device JFC-110E, Japan)

4.3 ทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (JSM-6400, LV, Joel, Japan) ที่กำลังขยาย 1000X การบันทึกภาพด้วยกล้องโพลาไรซ์

สถานที่และระยะเวลาที่ทำการทดลอง

ดำเนินการทดลองที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ 1 และ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทำการทดลองระหว่างเดือนตุลาคม 2543 ถึง เดือนตุลาคม 2545 รวม 2 ปี

ตารางที่ 1 Experiment run of  $3 \times 3$  full factorial

Experiment run	Screw speed (rpm): S		Barrel temperature ( $^{\circ}$ C): T		Moisture content (%): M	
	Unicode value	Code value	Unicode value	Code value	Unicode value	Code value
1	30	-1	95	-1	35	+1
2	30	-1	95	-1	31	0
3	30	-1	95	-1	27	-1
4	30	-1	105	0	35	+1
5	30	-1	105	0	31	0
6	30	-1	105	0	27	-1
7	30	-1	115	+1	35	+1
8	30	-1	115	+1	31	0
9	30	-1	115	+1	27	-1
10	40	0	95	-1	35	+1
11	40	0	95	-1	31	0
12	40	0	95	-1	27	-1
13	40	0	105	0	35	+1
14	40	0	105	0	31	0
15	40	0	105	0	27	-1
16	40	0	115	+1	35	+1
17	40	0	115	+1	31	0
18	40	0	115	+1	27	-1
19	50	+1	95	-1	35	+1
20	50	+1	95	-1	31	0
21	50	+1	95	-1	27	-1
22	50	+1	105	0	35	+1
23	50	+1	105	0	31	0
24	50	+1	105	0	27	-1
25	50	+1	115	+1	35	+1
26	50	+1	115	+1	31	0
27	50	+1	115	+1	27	-1

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### (Results and Discussion)

การศึกษาการผลิตพาสตาจากข้าวเจ้าซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีแบบ ปริมาณและปริมาณอะไมโลสได้ผลดังตารางที่ 2 เมื่อนำแป้งข้าวเจ้าที่เตรียมได้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสปาเกตตีโดยใช้เครื่องอัดพองที่สภาวะต่าง ๆ หลังจากการทำแห้งจนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นไม่เกิน 13 เปอร์เซ็นต์ พบว่าตัวอย่างแห้งมีสีขาวขุ่น ผิวนอกขรุขระเล็กน้อยเนื่องจากการระเหยน้ำ ระหว่างการทำแห้ง ตัวอย่างที่ได้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกัน หลังจากผ่านการต้มสุกแล้ว ตัวอย่างเส้นสปาเกตตีจะพองตัวขึ้นและมีสีขาวทึบ มีคุณภาพในการหุงต้มและเนื้อสัมผัสต่าง ๆ กัน อันเป็นผลมาจากกระบวนการผลิตที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3

#### 1. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

##### 1.1 อัตราการพองตัว (Expansion ratio)

ผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้จากเครื่องอัดพองแบ่งได้ 2 พวกใหญ่ๆ คือ ผลิตภัณฑ์ที่พองตัว (Direct expanded products) และไม่พองตัว (Non-direct expanded products หรือ half product) พาสตาและผลิตภัณฑ์เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดไม่พองตัว ดังนั้นลักษณะของสปาเกตตีที่ต้องการก็คือ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใกล้เคียงหรือเท่ากับขนาดรูเปิดของหน้าแปลนที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งก็คือ 2 มิลลิเมตร

จากการนำตัวอย่างพาสตาข้าวเจ้าที่ได้จากการทดลองมาทำการศึกษาผลของสภาวะการผลิตโดยใช้เครื่องอัดพองต่ออัตราการพองตัวของตัวอย่าง โดยการนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface plot) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้กราฟในรูปที่ 1 โดยรูป 1A แสดงผลของความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของบารเรลเมื่อความเร็วรอบของสกรูเป็น 30 รอบต่อนาที และรูป 1B แสดงผลของความเร็วรอบของสกรูและอุณหภูมิของบารเรลเมื่อความชื้นเริ่มต้นเป็น 35 เปอร์เซ็นต์ จากรูปสามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของบารเรลและความเร็วรอบของสกรูเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ตัวอย่างที่ได้มีอัตราการพองตัวเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มปริมาณความชื้นเริ่มต้นจะทำให้ตัวอย่างมีอัตราการพองตัวลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากความชื้นที่เพิ่มขึ้นช่วยไปหล่อลื่นระบบภายในของเครื่องอัดพองทำให้ลดการเสียดสีและทำให้ความดันลดลง ทำให้ความเป็น Superheated ของไอน้ำลดลง เมื่อไอน้ำออกมาที่หน้าแปลนและเข้าสู่สภาวะความดันปกติ แรงดันภายในของโคที่ เกิดจากไอน้ำซึ่งน้อยกว่าโคที่มีน้ำน้อย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของบารเรลจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความดันไอน้ำของโคและส่งผลต่อการเพิ่มความสามารถในการระเหยของไอน้ำเมื่อตัวอย่างออกมาจากหน้า

แปลน ส่วนการเพิ่มความเร็วยรอบของสกรูจะส่งผลต่อแรงเฉือน (shear) และความดันภายในบารเรล เมื่อตัวอย่างออกมาจากหน้าแปลนจึงเกิดการระเหยของไอน้ำร่วมกับการลดลงของความดันอย่างรวดเร็วทำให้ตัวอย่างเกิดการพองตัวสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Diosady (1983) ที่ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่ออัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากแป้งชนิดต่างๆ

## 1.2 ความหนาแน่น (Bulk density)

จากการนำตัวอย่างพาสต้าข้าวเจ้าที่ได้จากการทดลองมาทำการศึกษาผลของสภาวะการผลิตโดยใช้เครื่องอัดพองต่อความหนาแน่นของตัวอย่าง โดยการนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองได้ดังรูปที่ 1 โดยรูป 1C แสดงผลของความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของบารเรลเมื่อความเร็วยรอบของสกรูเป็น 30 รอบต่อนาที และรูป 1D แสดงผลของความเร็วยรอบของสกรูและอุณหภูมิของบารเรลเมื่อความชื้นเริ่มต้นเป็น 35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบของสกรูและอุณหภูมิของบารเรลจะทำให้ความหนาแน่นของตัวอย่างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้ามหากลดความชื้นเริ่มต้นลงความหนาแน่นของตัวอย่างก็มีแนวโน้มที่ลดลงตามไปด้วย ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นไปในทางตรงข้ามกับอัตราการพองตัวอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $p < 0.01$ ,  $r = -0.883$ ) ดังแสดงในตารางที่ 5 กล่าวคือเมื่ออัตราการพองตัวเพิ่มขึ้นความหนาแน่นจะลดลง

## 2. คุณภาพในการหุงต้ม

### 2.1 ระยะเวลาในการต้ม (Cooking time)

เนื่องจากสเปกเตตตีเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่จำเป็นต้องมีการต้มให้สุกก่อนนำไปประกอบอาหารและรับประทานต่อไป โดยปกติผู้บริโภคต้องการให้สเปกเตตตีที่ใช้ระยะเวลาในการต้มสั้นเพื่อความสะดวกและรวดเร็ว ดังนั้นระยะเวลาในการหุงต้มจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องมีการศึกษาอีกทั้งระยะเวลาในการหุงต้มยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพในด้านอื่นๆ ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากการทดลองพบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างระยะเวลาในการหุงต้มกับน้ำหนักหลังต้ม ( $p < 0.05$ ,  $r = -0.391$ ), การสูญเสียระหว่างการต้ม ( $p < 0.01$ ,  $r = 0.835$ ), ความแน่นเนื้อ ( $p < 0.01$ ,  $r = -0.600$ ), ความต้านทานต่อแรงดึง ( $p < 0.01$ ,  $r = -0.580$ ), และความเหนียวติดที่ผิวหน้า ( $p < 0.05$ ,  $r = 0.486$ ) ดังแสดงในตารางที่ 5

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของสภาวะการผลิตต่อระยะเวลาที่ต้องใช้ต้มสุกตัวอย่าง โดยการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองได้กราฟดังรูปที่ 2 โดยรูปที่ 2A แสดงผลของความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของบารเรลเมื่อความเร็วยรอบของสกรูเป็น 30 รอบต่อนาที และรูป 2B แสดงผลของความเร็วยรอบของสกรูและอุณหภูมิบารเรลเมื่อความชื้นเริ่มต้นเป็น 35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่าเมื่อความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของบารเรลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการหุงต้มลดลงเนื่องจากเมื่อความชื้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้นอัตราการเกิดเจลลาติไนเซชัน (Degree of gelatinization) ของแป้งสูงขึ้น (Wang and

et al., 1999) ส่งผลให้อุณหภูมิการสุกของแป้งสาลีเกิดต่ำลง อีกทั้งการเพิ่มความชื้นจะส่งผลต่ออัตราการพองตัวซึ่งเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับการแพร่ผ่านของน้ำเข้าสู่แกนกลางหรือการต้มสุกของแป้งสาลี ( $p < 0.01$ ,  $r = 0.689$ ) ซึ่งถ้าหากตัวอย่างแป้งสาลีที่มีขนาดเล็กการแพร่ผ่านของน้ำเกิดได้เร็วขึ้นส่งผลให้ใช้เวลาในการต้มลดลง

## 2.2 น้ำหนักหลังต้ม (Cooking weight)

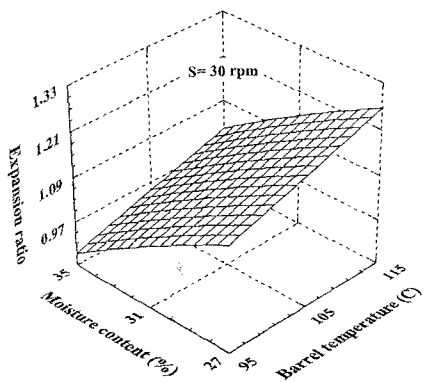
น้ำหนักหลังต้มเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอัตราการพองตัว การพองตัวของแป้งสาลีหรือผลิตภัณฑ์พาสตาเกิดจากการดูดและเก็บกักน้ำของเม็ดแป้งระหว่างการต้มสุก โดยลักษณะแป้งสาลีที่ต้องการคือให้น้ำหนักหลังต้มสูงโดยที่แป้งสาลีไม่เปื่อยยุ่ย

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของสภาวะการผลิตต่อน้ำหนักหลังต้ม โดยการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองได้กราฟดังรูปที่ 2 โดยรูป 2C แสดงผลของความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของบารเลเมื่อความเร็วรอบของสกรูเป็น 30 รอบต่อนาที และรูป 2D แสดงผลของความเร็วรอบของสกรูและอุณหภูมิของบารเลเมื่อความชื้นเริ่มต้นเป็น 35 เปอร์เซ็นต์ พบว่าน้ำหนักหลังต้มจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิของบารเลและ/หรือความเร็วรอบของสกรูลง หรือเพิ่มความชื้นขึ้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เกี่ยวข้องกับอัตราการเสื่อมสลาย (Degree of degradation) ของโมเลกุลแป้ง ซึ่งเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากสามารถทำลายพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ในสายโซ่ที่อยู่ในโมเลกุลแป้ง อีกทั้งแรงเฉือนที่เกิดจากความเร็วรอบของสกรูร่วมกับการลดความชื้นก็ช่วยส่งเสริมการเกิดการเสื่อมสลายของแป้ง ซึ่งถ้าแป้งเกิดการเสื่อมสลายสูงจะส่งผลต่อความสามารถในการอุ้มน้ำหรือเก็บกักน้ำของแป้ง (Diosady (1983)

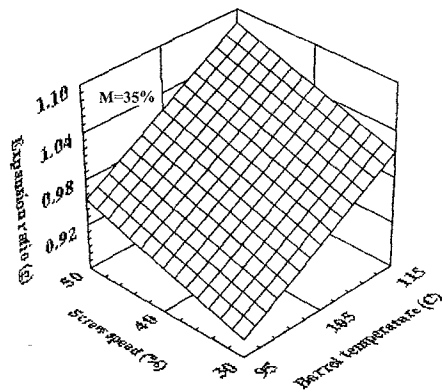
## 2.3 การสูญเสียระหว่างการต้ม (Cooking loss)

การสูญเสียระหว่างการต้มเป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ของพาสตาและผลิตภัณฑ์รวมถึงแป้งสาลีด้วย การสูญเสียระหว่างการต้มสังเกตเบื้องต้นได้จากการชั่งของน้ำที่ใช้ในการต้ม สิ่งทีละลายลงสู่น้ำที่ใช้ในการต้มโดยหลักจะเป็นแป้งหรืออะไมโลสที่หลุดออกมาจากเส้นแป้งสาลีจากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่เกี่ยวกับการสูญเสียระหว่างการต้มคือ ระยะเวลาที่ใช้ต้ม ( $p < 0.01$ ,  $r = 0.835$ ) เนื่องจากกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการต้มจะเริ่มจากที่ด้านนอกของเส้นแป้งสาลีก่อน จากนั้นจึงผ่านเข้าสู่แกนกลาง ซึ่งแกนกลางอาจยังไม่สุกในขณะที่ผิวด้านนอกอาจเกิดการสุกอย่างสมบูรณ์แล้วจึงเป็นเหตุให้อะไมโลสที่อยู่ผิวหลุดล่อนและละลายลงสู่น้ำที่ใช้ต้ม ดังนั้นหากใช้เวลาในการต้มนานการสูญเสียระหว่างการต้มก็จะมากขึ้นตามไปด้วย จากการศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ของสภาวะการผลิตต่อการสูญเสียระหว่างการต้ม โดยการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองได้กราฟดังรูปที่ 2 โดยรูป 2E แสดงผลของความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของบารเลเมื่อความเร็วรอบของสกรูเป็น 30 รอบต่อนาที และรูป 2F แสดงผลของความเร็วรอบของสกรูและอุณหภูมิของบารเลเมื่อความชื้นเริ่มต้นเป็น 35 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการสูญเสียระหว่างการต้มลดลงเมื่อความชื้นและอุณหภูมิของบารเล

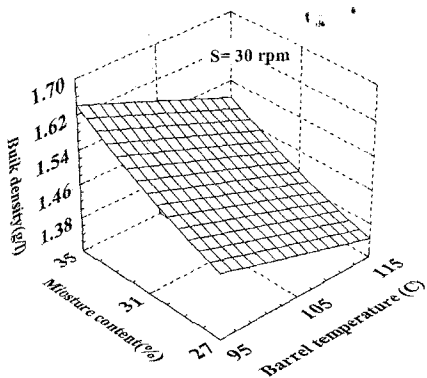




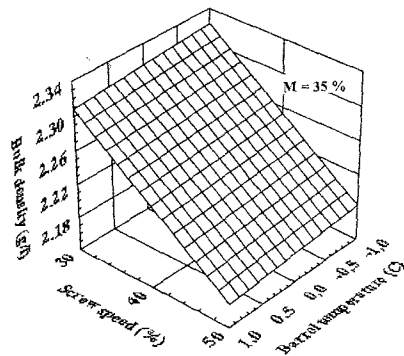
(A)



(B)

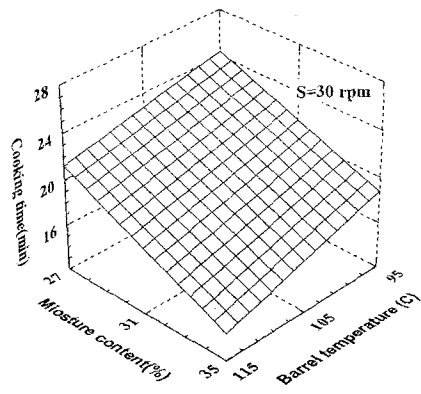


(C)

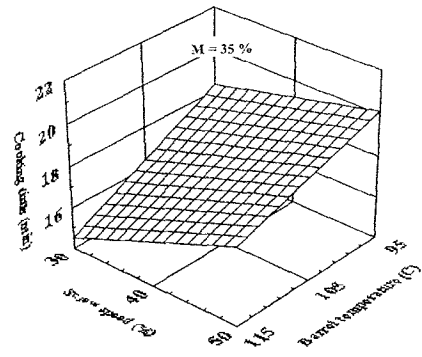


(D)

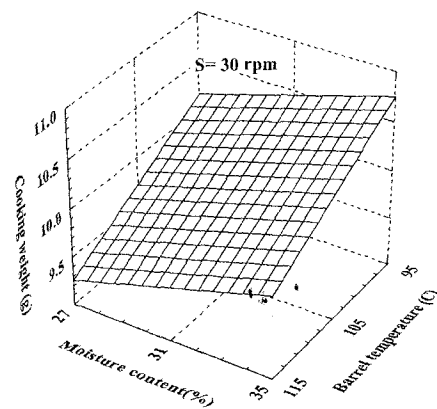
รูปที่ 1 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการผลิตที่มีต่ออัตราการพองตัว และความหนาแน่นของสเปกเต็จากข้าว



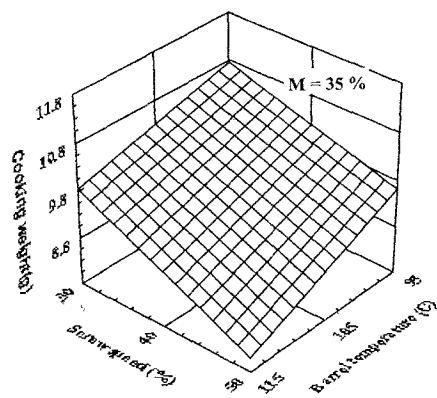
(A)



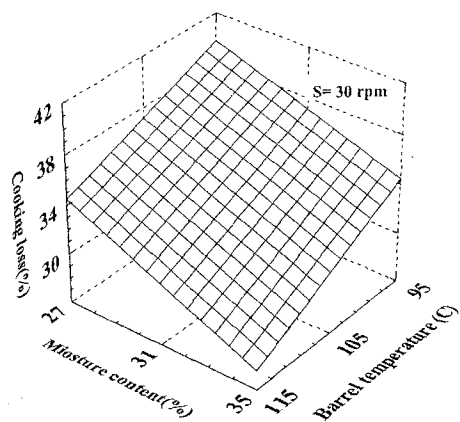
(B)



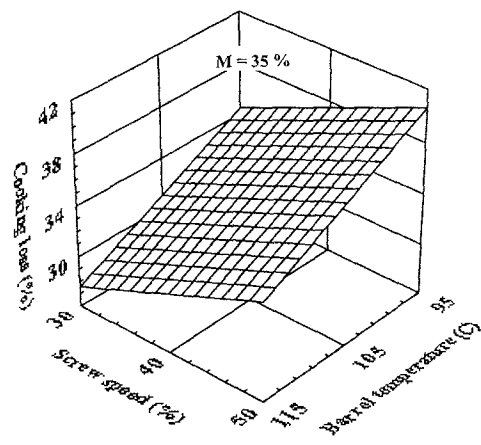
(C)



(D)

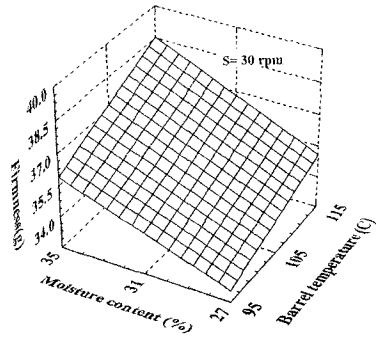


(E)

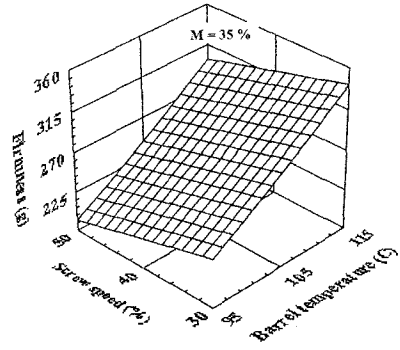


(F)

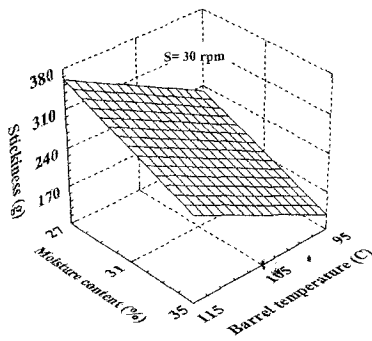
รูปที่ 2 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการผลิตที่มีต่อระยะเวลาในการต้ม น้ำหนักหลังต้มและการสูญเสียระหว่างการต้ม



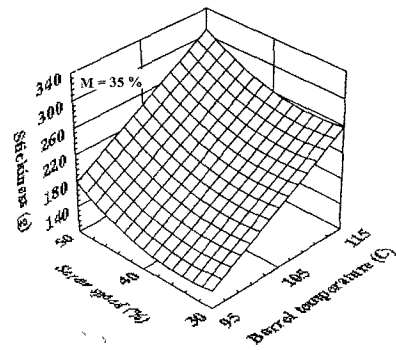
(A)



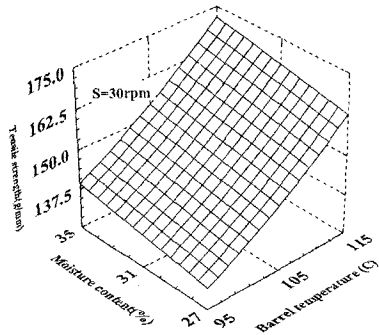
(B)



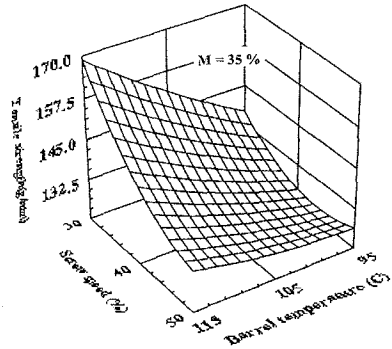
(C)



(D)



(E)



(F)

รูปที่ 3 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการผลิตที่มีผลต่อความแน่นเนื้อ , ความเหนียวที่ผิวหน้า และความต้านทานต่อแรงดึง

เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มความเร็วยรอบของสกรูก็ส่งผลให้การสูญเสียระหว่างการดัมเพิ่มสูงขึ้น (Colonna and Mercier, 1983)

### 3. คุณสมบัติทางประสาทสัมผัส (Textural properties)

#### 3.1 ความแน่นเนื้อ (Firmness)

คุณสมบัติที่สำคัญหลังจากการดัมสุกอีกประการที่สำคัญคือ ความแน่นเนื้อ ซึ่งลักษณะที่ดีของสปาเกตตีคือมีความเหนียวนุ่มและแน่นเนื้อ ไม่เปื่อยยุ่ยเนื่องจากการดัม เนื่องจากหลังการดัมสุกแล้ว ยังต้องมีกระบวนการปรุงต่อร่วมกับผักและเนื้อสัตว์อีก ดังนั้นสปาเกตตีจึงจำเป็นต้องมีความทนทานต่อการดัมที่ดี จากการศึกษาพบความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นเนื้อกับการสูญเสียระหว่างการดัม ( $p < 0.01$ ,  $r = -0.713$ ) ระยะเวลาในการดัม ( $p < 0.01$ ,  $r = -0.600$ ) ซึ่งเนื่องมาจากเมื่อใช้ระยะเวลาในการดัมนาน การสูญเสียระหว่างการดัมจะสูงตามไปด้วยซึ่งก็หมายถึงมีอะไมโลสหลุดออกมาละลายน้ำส่งผลให้เส้นสปาเกตตีบริเวณผิวนอกเปื่อยยุ่ย เป็นเหตุให้ความแน่นเนื้อลดลงตามไปด้วย จากการศึกษาความสัมพันธ์ของสภาวะการผลิตต่อความแน่นเนื้อ โดยการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองได้กราฟดังรูปที่ 3 โดยรูป 3A แสดงผลของความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของบารเลเมื่อความเร็วยรอบของสกรูเป็น 30 รอบต่อนาที และรูป 3B แสดงผลของความเร็วยรอบของสกรูและอุณหภูมิของบารเลเมื่อความชื้นเริ่มต้นเป็น 35 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของบารเลและความชื้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแน่นเนื้อสูงขึ้น แต่ถ้าหากเพิ่มความเร็วยรอบเพิ่มขึ้นความแน่นเนื้อกลับลดลง

#### 3.2 ความเหนียวติดที่ผิวหน้า (Stickiness)

ความเหนียวติดที่ผิวหน้าหลังจากผ่านการผลิตสุกเป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ของสปาเกตตี ซึ่งจะส่งผลต่อการเกาะติดกันของสปาเกตตีทำให้ดูไม่น่ารับประทาน โดยปกติหลังจากทำการดัมสุกสปาเกตตีแล้วหากผู้บริโภคไม่ได้ทำการปรุงในขั้นตอนต่อไปในทันที จำเป็นต้องมีการใช้น้ำมันไปเคลือบให้ทั่วเพื่อป้องกันการเหนียวติดกันของเส้นสปาเกตตี โดยทั่วไปการเหนียวติดที่ผิวหน้าเกิดจากการมีน้ำส่วนเกินที่ไม่สามารถดูดซึมได้ที่บริเวณผิวหน้าของสปาเกตตี ซึ่งจากข้อมูลพบความสัมพันธ์ของความเหนียวติดที่ผิวหน้ากับอัตราการพองตัว ( $p < 0.01$ ,  $r = 0.883$ ) ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อสปาเกตตีมีอัตราการพองตัวสูงขึ้นก็ต้องใช้ระยะเวลาในการดัมนานขึ้นเป็นเหตุให้อะไมโลสในตัวอย่างละลายออกมาเป็นจำนวนมากทั้งที่ลงสู่ น้ำที่ใช้ดัมและติดอยู่ที่ผิวหน้าของตัวอย่างทำให้ความเหนียวติดที่ผิวหน้าสูงขึ้น จากการศึกษาความสัมพันธ์ของสภาวะการผลิตต่อความเหนียวติดที่ผิวหน้าโดยการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองได้กราฟดังรูปที่ 3 โดยรูป 3C แสดงผลของความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของบารเลเมื่อความเร็วยรอบของสกรูเป็น 30 รอบต่อนาที และรูป 3D แสดงผลของความเร็วยรอบของสกรูและอุณหภูมิของบารเลเมื่อความชื้นเริ่มต้นเป็น 35

เปอร์เซ็นต์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในขณะที่เดียวกันเพิ่มอุณหภูมิของบาริลความเหนียวคิดที่ผิวหน้าจะสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าหากเพิ่มความชื้นความเหนียวคิดที่ผิวหน้ากลับลดลง

### 3.3 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

ความต้านทานต่อแรงดึงหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าความสามารถในการยืดหยุ่นของเส้นสปาเกตตีต่อแรงดึงซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ต้องการหลังจากการต้มสุกสปาเกตตีแล้ว จากการศึกษาพบความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงและความแน่นเนื้อ ( $p < 0.01$ ,  $r = 0.789$ ) , การสูญเสียระหว่างต้ม ( $p < 0.01$ ,  $r = -0.783$ ) และระยะเวลาในการต้ม ( $p < 0.01$ ,  $r = -0.580$ ) ดังแสดงในตารางที่ 5 จากการศึกษาความสัมพันธ์ของสภาวะการผลิตต่อความต้านทานต่อแรงดึง โดยการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองได้กราฟดังรูปที่ 3 โดยรูป 3E แสดงผลของความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของบาริลเมื่อความเร็วรอบของสกรูเป็น 30 รอบต่อนาที และรูป 3F แสดงผลของความเร็วรอบของสกรูและอุณหภูมิของบาริลเมื่อความชื้นเริ่มต้นเป็น 35 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของบาริลและความชื้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแน่นเนื้อสูงขึ้น แต่ถ้าหากเพิ่มความเร็วรอบขึ้นความแน่นเนื้อกลับลดลงซึ่งผลการทดลองดังกล่าวเป็นไปในทางเดียวกันกับความแน่นเนื้อ

ตารางที่ 2 Chemical compositions and Amylose content of rice flour

Compositions	Content (%)
<b>Proximate analysis</b>	
Protein	8.70
Fat	0.13
Fiber	1.80
Ash	0.34
Moisture	9.10
<b>Amylose</b>	<b>33.68</b>

ตารางที่ 3 Properties of High amylose rice spaghetti

Treatment	Physical properties		Cooking qualities			Textural properties		
	Bulk density( g/cm <sup>3</sup> )	Expansion ratio	Cooking time (min)	Cooking weight (g)	Cooking loss (%)	Firmness (g)	Stickiness (g)	Tensile strength (g/mm)
1	1.647	0.890	17.24	10.68	32.24	33.83	134.90	137.31
2	1.537	1.035	22.39	10.44	36.77	32.87	185.83	130.10
3	1.510	1.060	24.82	10.15	41.21	32.61	196.68	126.13
4	1.567	0.975	17.77	10.13	31.37	38.67	176.08	153.64
5	1.443	1.115	19.67	9.78	34.98	37.86	226.58	157.44
6	1.391	1.185	24.10	9.26	37.48	35.75	279.95	153.89
7	1.465	1.035	14.15	9.75	26.59	38.99	261.85	175.48
8	1.411	1.125	18.19	9.40	32.15	34.03	355.20	165.06
9	1.330	1.255	21.89	9.02	33.17	26.28	363.90	152.94
10	1.594	0.900	19.10	10.30	37.44	31.10	147.35	152.97
11	1.471	1.125	23.22	9.90	39.73	28.88	233.95	133.55
12	1.389	1.170	25.27	9.31	41.94	27.80	251.78	122.39
13	1.532	1.000	17.94	9.95	34.88	31.82	192.35	128.65
14	1.400	1.140	19.99	9.48	37.14	30.28	279.43	125.17
15	1.338	1.240	24.10	9.86	38.02	28.25	373.73	123.11
16	1.455	1.010	16.54	9.61	30.99	34.31	242.78	156.32
17	1.338	1.140	19.60	9.21	34.99	36.76	288.93	144.30
18	1.313	1.325	23.37	8.77	37.54	28.95	397.60	141.98
19	1.494	0.915	20.15	9.73	41.05	29.79	182.23	126.14
20	1.383	1.125	23.65	9.29	42.33	34.14	219.20	124.78
21	1.322	1.185	26.05	8.95	44.79	28.99	323.10	124.82
22	1.414	1.010	17.65	8.16	37.62	32.39	276.68	131.77
23	1.341	1.210	23.84	7.89	39.16	30.22	345.05	125.97
24	1.304	1.245	26.65	7.52	41.93	29.84	455.38	125.43
25	1.372	1.020	17.17	7.93	32.68	33.56	249.35	133.52
26	1.294	1.245	23.25	7.41	36.89	30.70	441.15	126.35
27	1.251	1.380	25.65	6.98	38.96	30.09	191.30	126.23

Table 4 Regression coefficients and R<sup>2</sup> values for qualities of rice spaghetti

Properties	Regression coefficients											R <sup>2</sup>
	b <sub>0</sub>	b <sub>S</sub>	b <sub>T</sub>	b <sub>M</sub>	b <sub>SS</sub>	b <sub>TT</sub>	b <sub>MM</sub>	b <sub>ST</sub>	b <sub>SM</sub>	b <sub>TM</sub>		
Physical properties												
Bulk density(g/cm <sup>3</sup> )	1.558	ns	ns	ns	ns	ns	9.96×10 <sup>-4**</sup>	ns	-3.67×10 <sup>-4**</sup>	-2.65×10 <sup>-4**</sup>		0.962
Expansion ratio	-1.194	3.52×10 <sup>-3**</sup>	6.43×10 <sup>-3**</sup>	0.13	ns	ns	-2.59×10 <sup>-3**</sup>	ns	ns	ns		0.932
Cooking qualities												
Cooking time(min)	43.481	-0.24	ns	ns	ns	ns	ns	-8.40×10 <sup>-3**</sup>	ns	-8.40×10 <sup>-3**</sup>		0.950
Cooking weight	12.46	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-1.51×10 <sup>-3**</sup>	2.46×10 <sup>-3**</sup>	ns		0.844
Cooking loss	57.893	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	8.82×10 <sup>-2**</sup>	-9.84×10 <sup>-3**</sup>		0.979
Textural properties												
Firmness(g)	67.273	-2.20	ns	ns	2.464×10 <sup>-2**</sup>	ns	ns	ns	ns	3.75×10 <sup>-3**</sup>		0.719
Stickiness(g)	-2.41×10 <sup>1</sup>	ns	6.54	ns	0.22	ns	ns	ns	-0.43	ns		0.901
Tensile strength(g/mm)	88.690	ns	ns	ns	6.90×10 <sup>-2**</sup>	1.52×10 <sup>-2**</sup>	ns	-6.35×10 <sup>-2**</sup>	ns	9.81×10 <sup>-3**</sup>		0.082

S = Screw speed (rpm); Barrel temperature (°C); M = Moisture content(%); b<sub>0</sub> = constant; b<sub>S</sub>, b<sub>T</sub>, b<sub>M</sub>, b<sub>SS</sub>, b<sub>ST</sub>, b<sub>SM</sub>, b<sub>TM</sub> = regression coefficients

\*\* = significant at p<0.01; ns = non significant

**Table 5** Correlation Coefficient for quality attributes of rice pasta

	Bulk density	Expansion ratio	Cooking time	Cooking weight	Cooking loss	Firmness	Stickiness	Tensile strength
Bulk density	-							
Expansion ratio	-0.883**	-						
Cooking time	-0.545**	0.689**	-					
Cooking weight	0.849**	-0.681**	-0.391*	-				
Cooking loss	ns	ns	0.835**	ns	-			
Firmness	ns	ns	-0.600**	ns	-0.713**	-		
Stickiness	-0.896**	-0.883**	0.486*	-0.837**	ns	ns	-	
Tensile strength	ns	ns	-0.580**	ns	-0.783**	0.789**	ns	-

\*\*\* = significant at  $p < 0.05$  and  $p < 0.01$  respectively, ns = non significant at 95% and 91%



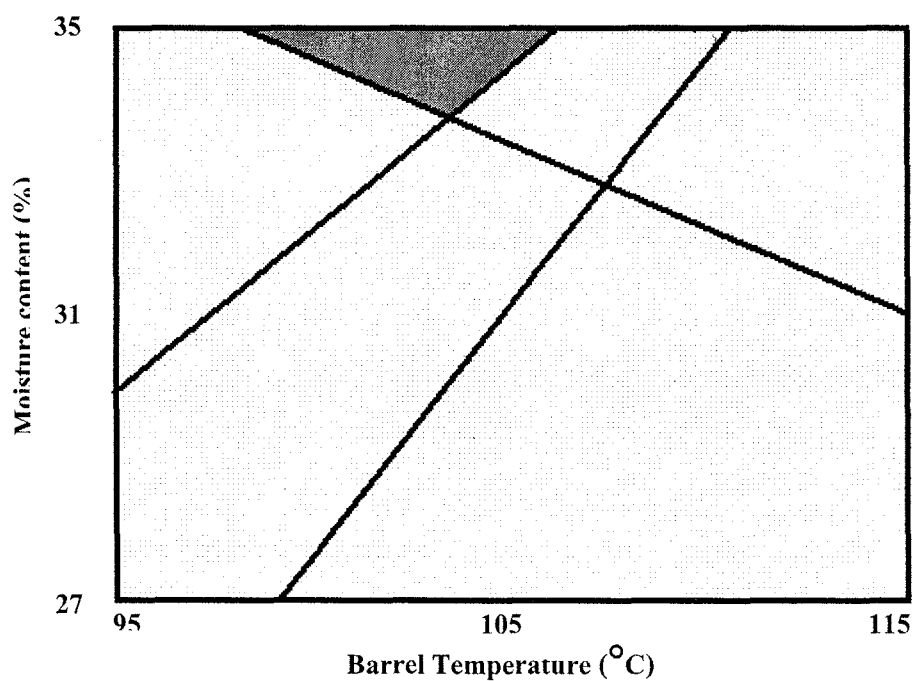
#### 4. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพาสต้าข้าวเจ้า

จากการทดลองสามารถนำข้อมูลมาใช้ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการผลิตสปาเกตตีจากข้าว โดยใช้สปาเกตตีทางการค้าที่มีการจำหน่ายในท้องตลาดเป็นต้นแบบในการจำกัดขอบเขตของคุณภาพของสปาเกตตีจากข้าวเพื่อให้สปาเกตตีที่ผลิตได้มีคุณภาพใกล้เคียงกับสปาเกตตีทางการค้าที่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคมากที่สุด โดยปกติแล้วคุณภาพสปาเกตตีที่ผู้บริโภคร้องการคือ ใช้เวลาในการต้มสุกน้อย, มีอัตราการพองตัวหรือน้ำหนักหลังต้มสุกสูง การสูญเสียระหว่างการต้มต่ำ มีความแน่นเนื้อและความต้านทานต่อแรงดึงสูงและในขณะเดียวกันความเหนียวติดที่ผิวหน้าต้องน้อย จากการทดสอบได้ข้อมูลคุณภาพในด้านต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 6 แต่เนื่องจากสปาเกตตีจากข้าวที่ผลิตได้มีคุณภาพด้านการหุงต้มดีน้อยกว่าสปาเกตตีทางการค้า โดยเฉพาะการสูญเสียระหว่างการต้มที่มีค่าสูงถึง 26.59-44.79 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการต้มและน้ำหนักหลังต้มดีน้อยกว่าเล็กน้อย เนื่องจากกลูเตนินโปรตีนในแป้งข้าวมีคุณสมบัติต่างจากกลูเตนโปรตีนในแป้งข้าวสาลี กล่าวคือ โปรตีนกลูเตนในแป้งสาลีมีคุณสมบัติการเกิดโครงข่ายร่างแหที่มีความยืดหยุ่นเมื่อนวดกับน้ำและยังมียูนิคอนในแป้งสาลีมีคุณสมบัติในการป้องกันการแตกของเม็ดแป้งระหว่างต้มส่งผลให้การสูญเสียระหว่างการต้มน้อย ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ชนิดเส้นที่ผลิตจากข้าว เช่น เส้นก๋วยเตี๋ยว เส้นหมี่ และ เส้นขนมจีน จำเป็นต้องอาศัยร่างแหอะไมโลสที่จะเกิดเมื่อแป้งสุกและแตกออกเพื่อให้อะไมโลสหลุดออกมาสร้างโครงข่ายอะไมโลส และจากการที่เมื่อแป้งเกิดการสุกจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง จึงทำให้การสูญเสียระหว่างการต้มสูงตามไปด้วย (Mestres et. al, 1988, and Bhattacharya et. al, 1999) อย่างไรก็ตามสปาเกตตีจากข้าวที่ได้จากการทดลองมีข้อดีที่เหนือกว่าสปาเกตตีทางการค้าในด้านความแน่นเนื้อและความต้านทานต่อแรงดึงของเจลที่ถูกสร้างโดยร่างแหอะไมโลส จากเหตุผลดังกล่าวในการกำหนดขอบเขตคุณภาพของสปาเกตตีจากข้าวจึงยกเว้นไม่นำการสูญเสียระหว่างการต้มมาร่วมพิจารณาและกำหนดคุณภาพในด้านระยะเวลาในการต้มและน้ำหนักหลังต้มให้ต่ำกว่าสปาเกตตีจากท้องตลาดเล็กน้อยดังแสดงในตารางที่ 6

เมื่อนำสมการที่ได้จากการศึกษาความสัมพันธ์ของสภาวะการผลิตต่อคุณสมบัติในด้านต่างๆ จากตารางที่ 6 มาสร้างกราฟคอนทัวร์ (Contour plot) 2 มิติ ได้กราฟการทำนายดังรูปที่ 4 บริเวณที่แรเงาคือบริเวณที่มีสภาวะการผลิตที่จะทำให้ได้คุณลักษณะตามที่กำหนดไว้ ซึ่งสภาวะเหล่านั้นคือ ความเร็วรอบของสกรู 30 รอบต่อนาที, อุณหภูมิของบารเรล 104-105 °C และความชื้น 33-35 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 6 Properties of commercial spaghetti and rice spaghetti for predicted optimal conditions

Properties	Commercial spaghetti	Rice spaghetti
Cooking quality		
Cooking time (min)	14	$\leq 18.00$
Cooking weight (g)	13.56	$\geq 10.00$
Textural property		
Firmness (g)	28.9	$\geq 28.90$
Stickiness (g)	131.30	$\leq 191.30$
Tensile strength (g/mm)	126.00	$\geq 126.00$



รูปที่ 4 กราฟแสดงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตพาสต้าข้าวเจ้า

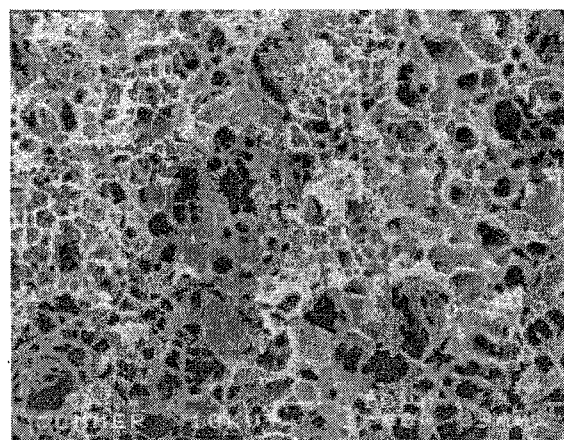
## 5. การศึกษาโครงสร้างภายใน

จากการศึกษาโครงสร้างภายในภาคตัดขวาง (cross section) เปรียบเทียบระหว่างสปาเกตตีทางการค้าและตัวอย่างสปาเกตตีจากข้าวที่ไม่ผ่านและผ่านการต้ม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 5 ซึ่งพบว่าในตัวอย่างสปาเกตตีทางการค้าที่ยังไม่ผ่านการต้ม (รูปที่ 5A) จะสังเกตเห็นเม็ดแป้งซึ่งมีลักษณะแบนรีขนาดต่าง ๆ เรียงอัดตัวกันแน่น โดยมีโปรตีนที่เป็นเม็ดกลมเล็ก ๆ เรียงตัวเป็นร่างแหล้อมรอบกลุ่มเม็ดแป้งดังกล่าว เช่นเดียวกับที่ Dexter และคณะ ได้ทำการศึกษาและรายงานไว้เมื่อปี 1978 ในขณะที่สปาเกตตีจากข้าวที่ยังไม่ผ่านการต้มไม่พบเม็ดแป้งและโปรตีน (รูป 5C) ซึ่งจากการศึกษาลักษณะเม็ดแป้งข้าวเจ้าโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดของ Mestres และคณะ เมื่อปี 1988 พบว่าโดยปกติเม็ดแป้งข้าวดิบจะมีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมอัดเรียงตัวกัน โดยมีเม็ดโปรตีนจำนวนเพียงเล็กน้อยกระจายอยู่ ซึ่งเมื่อนำความแตกต่างดังกล่าวมาพิจารณาร่วมกับคุณสมบัติของสปาเกตตีทั้ง 2 ประเภท ทำให้สามารถอธิบายได้ว่า เหตุที่สปาเกตตีทางการค้ายังคงลักษณะเม็ดแป้งและโปรตีนค่อนข้างสมบูรณ์นั้นเนื่องมาจากในกระบวนการผลิตมีการใช้น้ำในขั้นตอนการนวดผสมในปริมาณต่ำ (ประมาณ 29-31%) อีกทั้งมีการควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการนวดและขึ้นรูปให้ไม่เกิน 40 และ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Lorenz and Kulp, 1991) ด้วยเหตุนี้เม็ดแป้งจึงไม่สุกและไม่แตก ถึงแม้นำไปต้มร่างแหโปรตีนที่ล้อมรอบเม็ดแป้งเหล่านี้จะเสียสภาพธรรมชาติ (Denature) เกิดการตกตะกอน (Coagulation) ในขณะเดียวกันเม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัวขึ้น แต่การพองตัวดังกล่าวก็ถูกจำกัดโดยโปรตีนร่างแหที่เสียสภาพ ส่งผลให้เม็ดแป้งไม่แตกออกอะไมโลสที่อยู่ภายในเม็ดแป้งจึงไม่ละลายลงสู่น้ำที่ใช้ต้ม สปาเกตตีจึงมีการสูญเสียระหว่างต้มต่ำและทนทานต่อการหุงต้มดี (Reiter and Kleyn, 2001) ในขณะที่สปาเกตตีจากข้าวผลิตจากกระบวนการอัดพองที่ใช้อุณหภูมิสูงเป็นเหตุให้เม็ดแป้งส่วนใหญ่เกิดการสุกจึงทำให้ไม่พบเม็ดแป้งในสปาเกตตีจากข้าว จากการศึกษาของ Mestres ในปี 1988 พบว่าเส้นหมี่ที่ผลิตจากข้าวสามารถคงรูปร่างได้นั้น เนื่องมาจากร่างแหอะไมโลส (Amylose network) ที่สามารถเก็บกักน้ำไว้ภายในและให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความยืดหยุ่นดี ซึ่งการจะทำให้เกิดร่างแหดังกล่าวนี้ได้ต้องทำให้เม็ดแป้งสุกและแตกออกเพื่อให้อะไมโลสหลุดออกมาเรียงตัวเป็นร่างแหดังกล่าวขึ้น (Diosady, 1983) ส่งผลต่อคุณภาพในการหุงต้มกล่าวคือทำให้การสูญเสียระหว่างต้มสูงและหากใช้เวลาในการต้มนานก็เป็นการเปิดโอกาสให้อะไมโลสหลุดละลายลงสู่น้ำได้มากยิ่งขึ้นเช่นเดียวกับในกรณีสปาเกตตีที่ผลิตจากข้าว เมื่อพิจารณาโครงสร้างภายในของสปาเกตตีทั้ง 2 ชนิดเมื่อผ่านการต้มสุกแล้ว (รูป 5 B และ 5C) จะพบโครงข่ายที่เป็นโพรงคล้ายรังผึ้ง (Honey comb-like appearance) เนื่องจากการระเหยของน้ำที่แทรกอยู่ในตัวอย่างด้วยการทำแห้งแบบเยือกแข็งในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง แต่เมื่อเปรียบเทียบขนาดของโพรงของทั้งสองชนิดจะพบว่าสปาเกตตีทางการค้ามีขนาดโพรงใหญ่กว่าด้วยเหตุนี้เอง สปาเกตตีทางการค้าจึงใช้เวลาในการหุงต้มที่สั้นกว่าเพราะน้ำสามารถแทรกซึมเข้าสู่แกนกลางได้

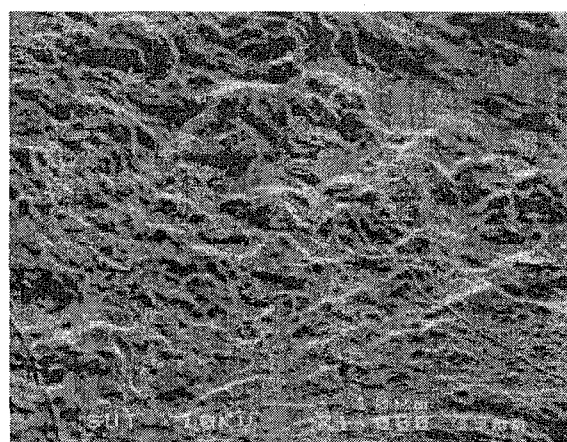
ง่ายกว่า และด้วยขนาดโพรงที่ใหญ่ขึ้นเองสปาเกตตีทางการค้าจึงสามารถเก็บกักน้ำได้มากกว่า สปาเกตตีจากข้าวซึ่งมีโพรงขนาดเล็กส่งผลให้น้ำหนักหลังต้มของสปาเกตตีทางการค้าจึงสูงกว่า สปาเกตตีจากข้าวเจ้า



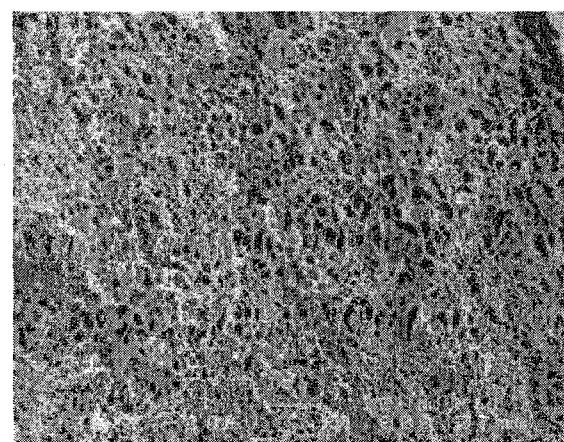
(A)



(B)



(C)



(D)

รูปที่ 5 Scanning electron microgram (A): Uncooked commercial spaghetti, (B): Cooked commercial spaghetti, (C): Uncooked rice spaghetti, (D): Cooked rice spaghetti

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### (Conclusions and Recommendation)

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของสภาวะของกระบวนการอัดฟองอันได้แก่ ความเร็วรอบของสกรู อุณหภูมิของบารเรล และความชื้น ต่อคุณภาพของสเปกเตติจากข้าวในด้านคุณลักษณะทางกายภาพ (อัตราการผลิตและความหนาแน่น) , คุณภาพในการหุงต้ม (ระยะเวลาในการต้ม น้ำหนักหลังต้ม และการสูญเสียระหว่างการต้ม) และคุณลักษณะเนื้อสัมผัส(ความแน่นเนื้อ ความเหนียวติดที่ผิวหน้า และความต้านทานต่อแรงดึง) พบว่าอัตราการผลิตและความหนาแน่นระหว่าง 0.890-1.380 และ 1.251-1.647 กรัม/ซม<sup>3</sup> ตามลำดับ ระยะเวลาที่ใช้ต้ม น้ำหนักหลังต้มและการสูญเสียระหว่างการต้มอยู่ระหว่าง 14.15-226.05 นาที 7.41-10.68 กรัม และ 26.59-44.97 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และความแน่นเนื้อ ความเหนียวติดที่ผิวหน้า และการต้านทานต่อแรงดึงมีค่าระหว่าง 27.08-35.99 กรัม 147.35-455.38 กรัม และ 122.39-165.06 กรัม/มิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อเขียนกราฟพื้นผิวตอบสนองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการผลิตกับคุณภาพพบว่า การเพิ่มความเร็วยุโรปของสกรูส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิต ระยะเวลาในการต้ม ความแน่นเนื้อ และความเหนียวติดที่ผิวหน้า แต่ความหนาแน่น น้ำหนักหลังต้ม ความแน่นเนื้อ และความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง หากเพิ่มอุณหภูมิของบารเรล อัตราการผลิต ความแน่นเนื้อ ความเหนียวติดที่ผิวหน้า และความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น แต่กลับลดความหนาแน่น ระยะเวลาในการต้ม และการสูญเสียระหว่างการต้ม และการเพิ่มความชื้นกลับทำให้ความหนาแน่น น้ำหนักหลังต้ม ความแน่นเนื้อและความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราการผลิต ระยะเวลาในการต้ม การสูญเสียระหว่างการต้มและความเหนียวติดที่ผิวหน้ากลับลดลง

เมื่อนำสมการแบบจำลองที่หาได้ไปเขียนกราฟคอนทัวร์ (Contour plot) 2 มิติเพื่อหาสภาวะการผลิตที่ทำให้ได้สเปกเตติจากข้าวที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับสเปกเตติทางการค้ามากที่สุด แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงข้อจำกัดบางประการของสเปกเตติจากข้าวซึ่งปราศจากโครงสร้างโปรตีนที่มีคุณสมบัติในการยึดหยุ่นและป้องกันเม็ดแป้งไม่ให้เกิดในระหว่างกระบวนการผลิตและการต้มสุก จึงต้องกำหนดขอบเขตการจำกัดคุณภาพด้านการหุงต้มของสเปกเตติจากข้าวให้ต่ำกว่าสเปกเตติทางการค้าเล็กน้อยในขณะที่คุณลักษณะเนื้อสัมผัสของสเปกเตติจากข้าวมีแนวโน้มที่ดีเทียบเคียงได้กับสเปกเตติทางการค้า ซึ่งพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ความเร็วรอบของสกรูที่ 30 รอบต่อนาที, อุณหภูมิของบารเรลระหว่าง 100 – 104 องศาเซลเซียสและความชื้นระหว่าง 33-35 เปอร์เซ็นต์

จากการศึกษาโครงสร้างภายในเพื่ออธิบายความสัมพันธ์กับคุณภาพของสเปกเตติเปรียบเทียบระหว่างสเปกเตติทางการค้าและสเปกเตติจากข้าวที่ผลิตได้ ทำให้เข้าใจและสามารถ

อธิบายได้ว่าเหตุที่สป่าเกิดดีทางการค้ามีคุณสมบัติบางประการอันได้แก่การใช้ระยะเวลาหุงต้มและการสูญเสียระหว่างต้มที่น้อยกว่าและน้ำหนักหลังต้มที่มากกว่านั้น มีสาเหตุหลักเนื่องมาจากความแตกต่างทั้งชนิดและคุณสมบัติเฉพาะตัวของโปรตีนและกรรมวิธีการผลิต ซึ่งสป่าเกิดดีทางการค้าต้องอาศัยโครงสร้างของโปรตีนกลูเตน ในขณะที่สป่าเกิดดีจากข้าวต้องอาศัยร่างแหอะไมโลสในการคงรูปร่างในระหว่างกระบวนการผลิตและการหุงต้ม

#### ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากข้าวเป็นธัญชาติที่มีโปรตีนต่ำ (ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์) ในการผลิตพาสตาคาข้าวจึงควรมีการเสริมโปรตีนจากแหล่งอื่นเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ
2. จากผลการทดลองพบว่าสป่าเกิดดีจากข้าวมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียระหว่างต้มสูง จึงควรทำการศึกษาและพัฒนาเพื่อลดการสูญเสียดังกล่าว

## เอกสารอ้างอิง

- กมลวรรณ แจ่มชัด. 2541. การแปรรูปอาหารโดยวิธีเอ็กทรูชัน. ว.อุตสาหกรรมเกษตร. 4-8.
- กรณีกา พรหมใจพันธุ์. 2536. โรค Black point ของข้าวสาลี. ว. วิชาการเกษตร. 11(2): 94-100.
- งามชื่น คงศรี. 2540. การทำผลิตภัณฑ์ข้าว. ว.จารย์พา. 39: 25-28.
- ประชา บุญญศิริกุล. 2537. บทบาทของเอ็กทรูเดอร์ที่มีต่ออุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย. ว. อาหาร. 24(1): 1-11.
- ประชา บุญญศิริกุล. 2539. เทคโนโลยีการอัดพองในกระบวนการผลิตอาหาร. ว. อาหาร. 26(4): 235-248.
- ประพาส วีระแพทย์. 2531. ความรู้เรื่องข้าว. กรมวิชาการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 19-27 หน้า.
- รัตนันท์ พรรณารุโณทัย. 2544. การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากข้าว. ว.จารย์พา. 60: 60-64.
- ละม้ายมาศ ยังสุข. 2541. เอกสารประกอบการบรรยายหลักสูตร เทคโนโลยีการผลิตข้าวหอมมะลิพันธุ์ดี. กรมวิชาการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 171-175 หน้า.
- อรอรงค์ นัยวิกุล. 2540. ข้าวสาลีและการแปรรูป. ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 25-37.
- Aguilera, J.M., and Stanly, D.W. 1999. **Microstructural prinisples of food processing and engineering**. Aspen Publisher, Inc. Gaithersberg, Maryland. 10- 15p.
- AOAC. 1997. **Official Method of Analysis**. 17<sup>th</sup> ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC.
- AOAC. 1987. **Official Method of Analysis**. 14<sup>th</sup> ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC.
- Bailey, L.N., Hauch, B.W., Sevatson, E.S., and Singer, R.E. 1991. Systems for manufacture of ready-to-eat breakfast cereals using twin-screw extrusion. *Cereal Foods World*. 36: 863-869.
- Bergman, C.J., Gualberto, D.G., and Weber, C.W. 1994. Development of a high-temperature-dried soft wheat pasta supplemented with cowpea (*Vigna unguiculate(L.)*). Cooking quality, color, and sensory evaluation. *Cereal Chem.* 71(6) : 523-527
- Bhattacharya, M., Zee, S. Y., and Corke, H. 1999. Physicochemical properties related to quality of rice noodles. *Cereal Chem.* 78:861-867.
- Colonna, P., and Mercier, C. 1989. Macromolecular modifications of manioc starch compounds by extrusion cooking with and without lipid. *Carbohydrate. Polymers.* 3: 87-107.

- Dexter, J.E. Dronzek, B.L., and Matsuo, R.R. 1978. Scanning electron microscopy of cooked spaghetti. **Cereal Chem.** 55(1): 23-30.
- Doisady, L. L., Paton, D., Rosen, N., Rubin, L. J., and Athanssoulias, C., 1985 Degradation of wheat starch in a single screw extruder: mechano-kinetic breakdown of cooked starch. **J. Food Sci.** 50 : 1697-1760
- Ding, K., and Gunasekaran. 1998. Three-dimensional image reconstruction procedure for food afficrostructure evaluation. **Food Res. Int.** 12: 245-262.
- Fardet, A., Baldwin, P.M., Bertrand, D. Bouchet, B., Gallant, D.J., and Barry, J.L. 1998. Textural image analysis of pasta protein networks to determine influence of technological process. **Cereal Chem.** 75(5): 699-704.
- Hwang, M.P., and Hayakawa, K.I. 1980. Bulk density of cookies undergoing commercial baking process. **J. Food Sci.** 45: 1400-1406.
- Harper, J.M. 1978. Food extrusion. **Food Sci. Nutr.** 11(2): 155.
- Hauser, T. W. and Lechthaler, J. 1994. Rice pasta. **Swiss patent.** CH684775A5.
- Hoseney, R.C. 1994. **Principle of cereal science and technology**, 3<sup>rd</sup> ed. American Association of Cereal Chemistry, Inc. St. Paul, MN. 321-326p.
- Hsu, J. 1984. Rice pasta composition. **US patent** 4435435.
- Lechthaler, J. 1985. Process of preparing a gelled pasta product. **US patent** 4544563.
- Lorenz, K.J., and Kulp, K. 1991. **Pasta products, in Handbook of Cereal Science and Technology.** Marcel Dekker Inc. New York : 780 – 792.
- Mestres, C., Colonna, P., and Buleon, A. 1988. Characteristics of starch network within rice flour noodle and mungbean starch vermicelli. **J. Food Sci.** 53(6) :1809-1812.
- Newland, J.R., 1995. **Examination & bord review phatilogy.** Appleton&lang. 154-155.
- Scott, A. 2000. **Celiac disease.** <http://www.celiac.com/frequent.html>.
- Smewing, J. 1997. Analyzing the texture of pasta for quality control. **Cereal Food World.** 42(1) : 8-11.
- Walsh, D.E. 1971. Measuring pasta firmness. **Cereal Sci. Today.** 16(7): 202-205.
- Wang, N., Bhirud, P.R., Sosulski, F.W., and Tyler, R.T. 1999. Pasta-like product from pea flour by twin screw extrusion. **J. Food Sci.** 64(4) : 671-678.



## ภาคผนวก

### การวิเคราะห์คุณภาพแป้งข้าวเจ้า

1. วิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วยการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ตามวิธีมาตรฐาน AOAC ซึ่งประกอบด้วย การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน และเส้นใย

#### การเตรียมตัวอย่าง (AOAC 1997)

หักหรือบดตัวอย่างร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 จนได้น้ำหนัก 300 - 500 กรัม จากนั้นเก็บตัวอย่างในภาชนะที่สามารถปิดฝาได้มิดชิดเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงความชื้น

#### การหาปริมาณความชื้น (AOAC 1997) วิธี Air oven method

1. อบอุ่นสำหรับหาความชื้นในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $130 \pm 3$  องศาเซลเซียส นาน 2 - 3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้น จนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะถึงอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนัก
2. ทำซ้ำ ข้อ 1. จนกระทั่งผลต่างของน้ำหนักที่ชั่ง 2 ครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1 - 3 มิลลิกรัม
3. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 2 กรัม ใส่ในภาชนะที่ทราบน้ำหนักแล้ว
4. อบอุ่นตัวอย่างในตู้อบไฟฟ้าด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง
5. นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนัก
6. อบอุ่นอีกครั้งละประมาณ 30 - 60 นาที และกระทำเช่นเดิมจนกระทั่งผลต่างของน้ำหนักที่ชั่ง 2 ครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1 - 3 มิลลิกรัม
7. คำนวณปริมาณความชื้นจากสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

#### การหาปริมาณเถ้า (AOAC 1984)

1. เผาด้วยกระบี่อบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นานประมาณ 3 ชั่วโมง ปิดสวิทซ์เตาเผา รอประมาณ 30 - 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิในเตาเผาตกลงก่อนแล้วเอาถ้วยออกจากเตาเผาในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องชั่งน้ำหนัก
2. เผาซ้ำอีกครั้งละประมาณ 30 นาที และทำซ้ำ ข้อ 1. จนกระทั่งผลต่างของน้ำหนักที่ชั่ง 2 ครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1 - 3 มิลลิกรัม
3. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 2 กรัม ใส่ในถ้วยกระบี่อบที่ทราบน้ำหนักเผาในตู้ดูดควันจนหมดควันแล้วจึงนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และทำซ้ำข้อ 1 - 2

## 4. คำนวณปริมาณได้จากสูตร

$$\text{ปริมาณเถ้า (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}}$$

การหาปริมาณโปรตีน (AOAC 1984)

1. ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองให้ได้น้ำหนักแน่นอนประมาณ 0.5 - 1 กรัม ห่อให้มีมิดชิดใส่ลงในขวดย่อยโปรตีน
2. ใส่สารผสม  $\text{CuSO}_4$  และ  $\text{K}_2\text{SO}_4$  5 กรัม
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น ปริมาตร 25 มล.
4. ใส่ลูกแก้ว
5. ย่อยบนเตาจนกระทั่งได้สารละลายใส
6. ปล่อยทิ้งให้เย็น
7. เติมน้ำกลั่นร้อนลงไปล้างบริเวณคอขวดให้ทั่ว
8. ย่อยอีกครั้งจนได้สารละลายใส
9. ปล่อยให้เย็น ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มล. และใช้น้ำกลั่นล้างขวดย่อยให้หมดสารละลายตัวอย่าง แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 100 มล.
10. จัดอุปกรณ์กลับ แล้วเปิดสวิทช์ไฟ และเปิดน้ำหล่อเย็นเครื่องควบแน่นด้วย
11. ใช้ ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มล. ซึ่งบรรจุกรดบอริก (4 เปอร์เซ็นต์) ปริมาณ 5 มล. และน้ำกลั่น 5 มล. ซึ่งเติมอินดิเคเตอร์เรียบร้อยแล้ว ไปรองรับของเหลวที่จะกลั่น โดยให้ส่วนปลายของอุปกรณ์ควบแน่นจุ่มลงในสารละลายกรดนี้
12. ดูดสารละลายตัวอย่างด้วยปิเปตและกระเปาะขนาดความจุ 10 มล. ใส่ลงในช่องใส่ตัวอย่างแล้วเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 มล.
13. กลั่นประมาณ 10 นาที ล้างปลายอุปกรณ์ควบแน่นด้วยน้ำกลั่นลงในขวดรองรับ
14. ไตเตรทสารละลายที่กลั่นได้กับเกลือที่มีความเข้มข้น 0.02 นอร์มัล สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง
15. ทำ blank และปฏิบัติตามข้อ 1-14
16. คำนวณปริมาณโปรตีนจากสูตร

$$\text{ปริมาณโปรตีนคิดเป็นร้อยละ โดยน้ำหนัก} = \frac{(A - B)N \times 14.007 \times F}{W}$$

- A = ปริมาณกรดที่ใช้ไตเตรตกับตัวอย่าง (มล.)  
 B = ปริมาณกรดที่ใช้ไตเตรตกับ blank  
 N = ความเข้มข้นของกรด (นอร์มัล)  
 F = แฟกเตอร์  
 W = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น

( $F \times 5.7$  ในกรณีผลิตจากข้าวสาลี และ  $F \times 6.25$  ในกรณีผลิตจากธัญพืชชนิดอื่น)

#### การหาปริมาณไขมัน (AOAC 1984)

1. อบขวดกลมสำหรับปริมาณไขมัน ซึ่งมีขนาดบรรจุ 250 มล. ในตู้อบไฟฟ้า ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนัก ถ้าตัวอย่างเป็นอาหารชนิดที่มีไขมันมากให้ชั่ง 1 - 2 กรัม ถ้าเป็นชนิดที่ไขมันน้อยให้ชั่ง 3 - 5 กรัม ห่อให้มิดชิดแล้วใส่ลงในหลอดสำหรับใส่ตัวอย่าง คลุมด้วยใยแก้วหรือสำลีเพื่อให้สารทำละลายมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ
3. นำหลอดตัวอย่างใส่ลงในชอคเลต
4. เติมสารตัวทำละลายปีโตรเลียม อีเทอร์ ในขวดหาไขมันประมาณ 150 มล. แล้ววางบนเตา
5. ประกอบอุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน พร้อมทั้งเปิดน้ำหล่ออุปกรณ์ควบแน่นและเปิดสวิทช์ให้ความร้อน
6. ใช้เวลาในการสกัดไขมัน 14 ชั่วโมง โดยปรับความร้อนให้หยดของสารทำละลายกลั่นตัวจากอุปกรณ์ควบแน่นด้วยอัตรา 150 หยดต่อนาที
7. เมื่อครบ 14 ชั่วโมงแล้ว นำหลอดใส่ตัวอย่างออกจากชอคเลต และกลั่นเก็บสารทำละลายจนเหลือสารละลายในขวดกลมเพียงเล็กน้อยด้วยเครื่องระเหยตัวทำละลาย
8. ขวดไขมันนั้น ออบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส จนแห้งใช้เวลาประมาณ 30 นาที ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
9. ชั่งน้ำหนัก แล้วอบซ้ำนานครั้งละ 30 นาที จนกระทั่งผลต่างของน้ำหนักสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม
10. กำหนดปริมาณไขมันจากสูตร

$$\text{ปริมาณไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = \frac{\text{น้ำหนักไขมันในอาหาร} \times 100}{\text{น้ำหนักอาหารเริ่มต้น}}$$

### การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใย (AOAC 1984)

1. วางกระดาษกรองบนกระชอนตาฟีกา ออบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำออกใส่ในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก
2. ใส่ตัวอย่างซึ่งผ่านการสกัดไขมันออกแล้ว ลงในปีกเกอร์ทรงสูงสำหรับวิเคราะห์สารเยื่อใย ขนาด 600 มล.
3. เติมกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 1.25 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 200 มล.
4. วางปีกเกอร์บนอุปกรณ์ให้ความร้อนซึ่งต่อเข้ากับอุปกรณ์ควบแน่น แล้วเปิดน้ำหล่อเครื่องควบแน่น พร้อมเปิดสวิทช์ไฟ
5. คัมให้เดือดนาน 30 นาที
6. กรองขณะร้อนผ่านกระดาษกรองที่ชั่งน้ำหนักแล้ว
7. ล้างด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งน้ำล้างหมดความเป็นกรด
8. ถ่ายกากที่ได้ลงในปีกเกอร์เดิม
9. เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.25 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 200 มล.
10. วางปีกเกอร์บนอุปกรณ์ให้ความร้อนซึ่งต่อกับอุปกรณ์ควบแน่นเช่นเดิม และคัมต่ออีก 30 นาที
11. กรองขณะร้อนผ่านกระดาษกรองแผ่นเดิม
12. ล้างด้วยน้ำร้อนจนน้ำล้างหมดความเป็นต่าง
13. ใส่กระดาษกรองพร้อมกากลงในถ้วยกระเบื้องเคลือบ (crucible) ไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสปริมาณ 3 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
14. ชั่งน้ำหนักแล้วอบซ้ำอีกครั้งละ 30 นาที จนกระทั่งได้ผลต่างของน้ำหนักสองครั้งติดกันไม่เกิน 1 - 3 มิลลิกรัม
15. เผาด้วยกระเบื้องเคลือบพร้อมกากที่อบแห้งแล้วในเตาเผาอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และกระทำเช่นเดียวกับวิธีการวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยและคำนวณปริมาณเส้นใย

### 2. วิธีวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส

ทำตามวิธี Colorimetric assay ของ Julino (1971) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร ด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้ potato amylose ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

#### วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งแป้งมา 0.1000 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรตาม 100 มิลลิลิตรที่แห้งสนิท
2. เติมเอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าเบาๆ
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตาม 2 นอร์มัล ปริมาตร 9 มิลลิลิตร

4. ปั่นกวนตัวอย่างเครื่องปั่นกระบวนแม่เหล็ก นาน 10 นาที ให้เป็นแป้งแล้วเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร
5. เตรียมขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ชุดใหม่ เติมน้ำกลั่นประมาณ 70 มิลลิลิตร กรดเกลือเชียลอะซิดิกปริมาตร 2 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร (ไอโอดีน 0.2 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2.0 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร) 2 มิลลิลิตร
6. ควบน้ำแป้ง ตาม 4 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดแก้วปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
7. วัดความเข้มของสีของสารละลายตาม 6 ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์โดยอ่านค่าเป็น absorbance ที่ความยาวคลื่นแสง 620 นาโนมิเตอร์ (nm:nanometer) หลังปรับเครื่องด้วย blank ให้ได้ค่าการดูดกลืนแสง เท่ากับ 0 (ศูนย์)
8. ในขณะที่ทำ blank โดยเติมกรดเกลือเชียลอะซิดิก ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น
9. นำ absorbance ไปหาปริมาณอะมิโลส โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานที่เตรียมไว้

#### การเขียนเส้นกราฟมาตรฐาน

1. ชั่งอะมิโลส 0.0400 กรัม ใส่ในขวดแก้วปริมาตรตาม 1.5 ที่แห้งสนิทแล้วดำเนินการเช่นเดียวกับตัวอย่างตามวิธีการวิเคราะห์ 3-4 เป็นสารละลายมาตรฐาน
2. เตรียมขวดแก้วปริมาตรขนาดความจุ 100 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด เติมน้ำกลั่นขวดละ 70 มิลลิลิตร เติมกรดเกลือเชียลอะซิดิก ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร ในขวดที่ 1 ปริมาตร 0.8 มิลลิลิตร ในขวดที่ 2 ปริมาตร 1.2 มิลลิลิตร ในขวดที่ 3 ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร ในขวดที่ 4 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ในขวดที่ 5 ตามลำดับ แล้วเติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร ลง ในแต่ละขวด
3. ควบสารละลายมาตรฐานจาก 1 ปริมาตร 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ซึ่งเทียบเท่าปริมาณอะมิโลส 8% 16% 24% 32% และ 40% ตามลำดับ ใส่ในขวดที่เตรียมไว้ในข้อ 2 เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร และวัด absorbance ที่ 620 นาโนมิเตอร์ โดยปรับเครื่องด้วย blank ให้ได้ค่า absorbance เท่ากับ 0 (ศูนย์)
4. นำ absorbance กับปริมาณอะมิโลสในสารละลายมาตรฐานตาม 3 มาเขียนเป็นเส้นกราฟมาตรฐาน  
นำเส้นกราฟมาตรฐานที่ได้จาก 4 มาใช้แปลง absorbance ให้เป็นเปอร์เซ็นต์อะมิโลสของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา