สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานวิจัย

เรื่อง

การผลิตอนุพันธ์ไซริลของแป้งข้าวเจ้าโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

(Production of Silyl derivatives of Rice flour using Cooker extruder)

คณะผู้วิจัย

สมชาย สุริยะศิริบุตร

ผศ.ดร. กิตติพงษ์ ห่วงรักษ์

RCH
TX
809
.R58
ส2ส๙
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 64473
วัน,เดือน,ปี 11 ก.ย. 2549

.b 11105616
.i.....

โครงการสนับสนุนงานวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ 2541

ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

การดัดแปรแป้งข้าวเจ้าในการวิจัยนี้ จะใช้สารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนหรือเทตราอีทอกซีไซเลนร่วมกับการใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวโดยศึกษาความสำคัญของปัจจัยในการผลิต 4 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 5 ระดับ ซึ่งได้แก่ ความชื้นรวมของแป้งข้าวเจ้าผสมขณะป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (13 16 19 22 และ 25%) อุณหภูมิของบาร์เรล (140 150 160 170 และ 180 °C) ความเข้มข้นของสารเคมี (0.0025 0.0075 0.0125 0.0175 และ 0.0225 โมล/โมลแป้งแห้ง ในกรณีของโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน หรือ 0.0125 0.0250 0.0375 0.0500 และ 0.0625 โมล/โมลแป้งแห้ง ในกรณีของเทตราอีทอกซีไซเลน) และความเร็วรอบของสกรู (130 155 180 205 และ 230 รอบต่อนาที) ต่อคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรที่ได้ ซึ่งได้แก่ response angle สมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ ระดับการแทนที่ และแบบแผนการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากเครื่องบราเบนเดอร์ โดยใช้ Response Surface Methodology (RSM) เลือกแผนการทดลองแบบ Central Composite Rotatable Design พบว่า สภาวะการผลิตที่เหมาะสม คือ ใช้ความเข้มข้นของโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน 0.0391 โมลต่อโมลแป้งแห้ง อุณหภูมิบาร์เรล 152 °C และความเร็วรอบของสกรู 207 รอบต่อนาที สำหรับแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารเทตราอีทอกซีไซเลนไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับสมบัติของแป้งดัดแปร จากนั้นศึกษาผลของการดัดแปรและผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มจากแป้งดัดแปรข้าวเจ้าด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนด้วยสภาวะการผลิตที่เหมาะสม เปรียบเทียบกับฟิล์มของแป้งข้าวเจ้าที่ ไม่ได้ดัดแปร ในการทำฟิล์มจะใช้สัดส่วนแป้งข้าวเจ้าดัดแปรต่อน้ำกลั่น เท่ากับ 1 : 10 และใช้ปริมาณของกลีเซอรอล 10 และ 15% ของน้ำหนักแป้งแห้ง พบว่าแป้งดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนที่เติมกลีเซอรอล 10% จะมีแรงต้านทานดึงขาดสูงสุดเท่ากับ 0.915 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร การยืดตัวคิดเป็น 2.875% และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำสุดเท่ากับ 89.49 กรัม/ ตารางเมตร. 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSTRACT

Modification of rice flour by propyltrimethoxysilane or tetraethoxysilane using single screw extruder was studied. Correlation between process variables, namely, total moisture contents of flour (13, 16, 19, 22 and 25 %), barrel temperatures (140, 150, 160, 170 and 180 °C), reagent concentrations (0.0025, 0.0075, 0.0125, 0.0175 and 0.0225 mole/mole starch(db.) in case of propyltrimethoxysilane or 0.0125, 0.0250, 0.0375, 0.0500 and 0.0625 mole/mole starch(db.) in case of tetraethoxysilane) and screw speeds (130, 155, 180, 205 and 230 rpm) and the properties of modified rice flour, i.e. response angle, floating property, degree of substitution (DS) and Brabender viscoamylogram were calculated using the central composite rotatable design of the response surface methodology (RSM). It was found that the optimum concentration of propyltrimethoxysilane was 0.0391 mole/mole starch(db), barrel temperature was 152°C and screw speed was 207 rpm. Modification of rice flour by tetraethoxysilane did not show any correlation between properties of modified flour and process variables. Effect of modification and glycerol concentration on film properties were also studied. To make the film, ratio of flour to distilled water was 1 : 10 and concentrations of glycerol added were 10 and 15% on flour (db.) It was found that the modified rice starch film with 10% glycerol showed the maximum tensile strength of 0.915 kgf/mm.^{2}, the elongation of 2.875% and the minimum water vapor permeability of 89.49 g/m.^{2} 24 hr.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ เนื่องด้วยได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพงษ์ ห่วงรักษ์ ที่ได้ให้เกียรติเป็นอาจารย์ควบคุมงานวิจัย และกรุณามอบความรู้ รวมทั้งคำแนะนำและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการดำเนินงานวิจัยของข้าพเจ้า ตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไขงานวิจัยฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ช่างเทคนิค และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์วิไล รังสาดทอง และเจ้าหน้าที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือเอ็กซ์ทรูเดอร์ เจ้าหน้าที่ทุกท่านของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย อาจารย์ของคณะคหกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล คลอง 6 ปทุมธานี และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ตลอดมา ขอขอบคุณคุณแสงเงิน สาระวาสี คุณบุณยกฤต รัตนพันธุ์ เป็นอย่างมากในการให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยโดยตลอด รวมถึงน้องๆ ปริญญาโทที่ได้ให้ความปรารถนาดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอรำลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา และญาติพี่น้องที่ท่านได้ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด คุณค่าและประโยชน์อันมีจากงานวิจัยฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญรูป.....XI

บทที่ 1 บทนำ.....1

บทที่ 2 การตรวจเอกสาร.....2

2.1 ลักษณะทั่วไปของข้าวและแป้งข้าวเจ้า.....2

2.1.1 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของแป้ง.....2

2.1.2 การเกิดเจลาติไนซ์และรีโทรเกรเดชั่น.....4

2.2 การดัดแปรแป้ง.....6

2.3 ไซเลนและอนุพันธ์ของไซเลน.....12

2.4 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น.....14

2.5 การนำแป้งข้าวเจ้าดัดแปรมาใช้ประโยชน์ในการผลิตแผ่นฟิล์ม.....19

2.5.1 การเกิดฟิล์ม.....20

2.5.2 วิธีการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม.....20

2.5.3 คุณสมบัติ และองค์ประกอบของฟิล์ม.....21

2.6 วิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง.....23

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....30

3.1 วัตถุดิบ.....30

3.2 สารเคมี.....30

3.3 อุปกรณ์ และเครื่องมือ.....30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 สถานที่ทดลอง.....31
3.5 วิธีการทดลอง.....31
3.5.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบ.....31
3.5.2 การเตรียมแป้งข้าวเจ้าผสมก่อนป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์.....31
3.53. การศึกษาสภาวะของการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยโพรพิลไตรเมทอกซี. ไซเลนในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์.....32
3.5.4 การศึกษาสภาวะของการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารเทตราอีทอกซี ไซเลนในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์.....34
3.5.5 ศึกษาปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสมเพื่อทำฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปร.....36

บทที่ 4 ผลและอภิปรายการทดลอง.....37
4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ได้ถูกดัดแปร.....37
4.2 ศึกษาสภาวะของการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์.....39
4.2.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับ Response angle(Y_1)...42
4.2.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับคุณสมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ(Y_2).....44
4.2.3 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับค่าระดับการแทนที่(Y_3)..44
4.2.4 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับความหนืดสูงสุด(Y_4).....50
4.2.5 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับความหนืดที่อุณหภูมิ 95°C (Y_5).....51
4.2.6 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับความหนืดที่อุณหภูมิ 95°C เมื่อให้ความร้อนครบ 15 นาที (Y_6).....51
4.2.7 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับความหนืดที่อุณหภูมิ 50°C (Y_7).....52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

4.3 ศึกษาสภาวะของการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารเทตราอีทอกซีไซเลนในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์.....53
4.4 ศึกษาปริมาณกลีเซอรอลเพื่อผลิตฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปร.....57
4.4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ.....57
4.4.2 ปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสมเพื่อทำฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าดัดแปร.....58

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....64

บรรณานุกรม.....66

ภาคผนวก.....70
ก วิธีวิเคราะห์ทางเคมี.....71
ข วิธีวิเคราะห์ทางกายภาพ.....80
ค การทดสอบคุณสมบัติทางกลของแผ่นฟิล์ม.....82
ง วิธีการคำนวณ.....85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 คุณสมบัติของน้ำแป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์.....5

2.2 คุณสมบัติแป้งมันฝรั่งดัดแปรในสภาวะการผลิตโดยใช้น้ำและไม่ใช้น้ำ.....12

2.3 การวางแผนการทดลองแบบต่าง ๆ ในวิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง..... 25

2.4 แสดงจำนวนการทดลองของแผนการทดลองแบบ central composite design.....26

2.5 วางแผนการทดลองแบบ central composite design แบบ 2 ตัวแปร.....26

3.1 แผนการทดลองแบบ Central Composite Rotatable Design ที่ใช้ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรด้วยโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน.....33

3.2 แผนการทดลองแบบ Central Composite Rotatable Design ที่ใช้ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรด้วยเทตราอีทอกซีไซเลน.....35

4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งข้าวเจ้าปกติ..... 38

4.2 แสดงค่าคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน.....40

4.3 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน.....41

4.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในสภาวะการผลิตที่ศึกษากับค่าตอบสนองโดยวิธี Multiple Regression ด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน.....42

4.5 แสดงค่าคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารเทตราอีทอกซีไซเลน.....54

4.6 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารเทตราอีทอกซีไซเลน.....55

4.7 สมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนเมื่อใช้สภาวะที่เหมาะสม.....58

4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความหนา ความต้านทานแรงดึงขาด การยืดตัวและอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์ม.....59

4.9 ชนิดของแป้งข้าวเจ้าที่มีอิทธิพลต่อด้านความหนา การต้านทานแรงดึงขาด การยืดตัว อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์ม.....59

4.10ปริมาณกลีเซอรอลที่มีอิทธิพลต่อความหนา การต้านทานแรงดึงขาด การยืดตัว อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิลม์.....60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

4.11 อิทธิพลของชนิดแป้งข้าวเจ้าและปริมาณกลีเซอรอลต่อความหนา การต้านทานแรงดึงขาด การยืดตัว และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์ม.....60

ง.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ด้าน response surface ของตัวแปรต่าง ๆ และระดับการยอมรับที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ.....87

ง.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ด้านระดับการแทนที่ของตัวแปรต่าง ๆ และระดับการยอมรับที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ.....88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน.....3

2.2 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างสารไซเลนกับน้ำ.....13

2.3 ปฏิกิริยาคอนเดนเซชั่นของสารไซลานอล 13

2.4 การเกิดพันธะไฮโดรเจนของสารไซโลเซนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง.....13

2.5 การเกิดพันธะโควาเลนท์โดยปฏิกิริยาเชื่อมข้าม.....14

2.6 องค์ประกอบของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยว.....15

2.7 รูปแบบจำลองของการเสียสภาพของเม็ดแป้งในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น.....16

2.8 รูปแบบจำลองการวิเคราะห์ระบบกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นของแป้ง.....17

3.1 ขั้นตอนการเตรียมแป้งข้าวเจ้าผสมก่อนป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์.....32

4.1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าปกติ.....38

4.2 Response surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างระดับการแทนที่ (โมลซิลิคอน/โมลแป้งแห้ง) กับความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (โมล/โมลแป้งแห้ง) และอุณหภูมิ (°C) ที่ความเร็วรอบสกรู 180 รอบต่อนาที.....46

4.3 Response surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างระดับการแทนที่ (โมลซิลิคอน/โมลแป้งแห้ง) กับความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (โมล/โมลแป้งแห้ง) และความเร็วรอบของสกรูที่อุณหภูมิ 160 °C.....47

4.4 Response surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างระดับการแทนที่ (โมลซิลิคอน/โมลแป้งแห้ง) กับอุณหภูมิ (°C) และความเร็วรอบสกรูที่ความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน 0.0125 โมล/โมลแป้งแห้ง.....48

4.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนเมื่อใช้สภาวะที่เหมาะสม.....58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้แป้งในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย อาทิ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษอุตสาหกรรมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมกาว แต่แป้งธรรมชาติ (native starch) ไม่สามารถนำมาใช้ได้กว้างขวางนัก เพราะมีข้อด้อยหลายประการ ซึ่งบางครั้งไม่เป็นที่ต้องการต่อการใช้ในระดับอุตสาหกรรมหรือยังไม่เหมาะสมกับสภาวะบางอย่าง ได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี เจลคายน้ำเมื่อเก็บที่อุณหภูมิต่ำ มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิต หรือความคงทนต่อสภาวะต่าง ๆ ต่ำ ทำให้ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ จึงมีการคิดค้นวิธีการนำแป้งมาปรับเปลี่ยนคุณสมบัติ

การดัดแปรแป้ง (modification of starch) เป็นวิธีการนำเอาแป้ง (starch) มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมี และ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะทำให้ให้แป้งดัดแปรที่ได้มีคุณสมบัติ และการนำไปใช้ประโยชน์ตามที่ต้องการ เช่น มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เพิ่มขึ้น มีคุณสมบัติความเป็นกาวเพิ่มขึ้น หรือมีความสามารถในการผสมกับตัวทำละลายอื่น ๆ เพิ่มขึ้น เป็นต้น

แป้งข้าวเจ้าเป็นไบโอโพลีเมอร์อย่างหนึ่ง เป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายในประเทศ และมีราคาไม่แพง แต่เนื่องจากข้อด้อยของแป้งธรรมชาติมีมากจึงควรจะดัดแปร การใช้สารออร์กาโนไซเลนดัดแปรแป้งก็เป็นอีกแนวทางหนึ่ง ออร์กาโนไซเลน (organosilane) สารประกอบกลุ่มนี้สามารถทำปฏิกิริยากับไบโอโพลีเมอร์ได้ พันธะระหว่างสารเคมีนี้กับไบโอโพลีเมอร์เป็นพันธะที่แข็งแรง ไบโอโพลีเมอร์ที่ถูกดัดแปร จะมีสมบัติเปลี่ยนไปขึ้นกับกลุ่มที่อยู่บนอะตอมของซิลิคอน

ในปัจจุบันมีแนวโน้มการนำไบโอโพลีเมอร์มาใช้แทนโพลีเมอร์สังเคราะห์กันมากขึ้น เนื่องจากไบโอโพลีเมอร์มีสมบัติบางอย่างใกล้เคียงกับโพลีเมอร์สังเคราะห์ การใช้ไบโอโพลีเมอร์มีข้อดีคือ สามารถย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ ปัญหาสำคัญประการหนึ่งคือ ไบโอโพลีเมอร์นั้นมีสมบัติการทนทานต่อน้ำหรือความชื้นต่ำ การดัดแปรด้วยออร์กาโนไซเลนที่เหมาะสมอาจจะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านนี้ขึ้นได้

ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน และเทตราอีทอกซีไซเลน รวมทั้งสภาวะการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วรอบสกรู และความชื้นของส่วนผสมขณะป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่มีต่อระดับการเกิดปฏิกิริยา และสมบัติของแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปร รวมทั้งเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน และเทตราอีทอกซีไซเลนโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ และศึกษาคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มที่ได้จากแป้งข้าวเจ้าดัดแปรโดยใช้กลีเซอรอลเป็นสารพลาสติไซเซอร์

เอกสารนี้เป็นที่ ... ให้นำไปใช้ ... ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
การตรวจเอกสาร

2.1 ลักษณะทั่วไปของข้าวและแป้งข้าวเจ้า

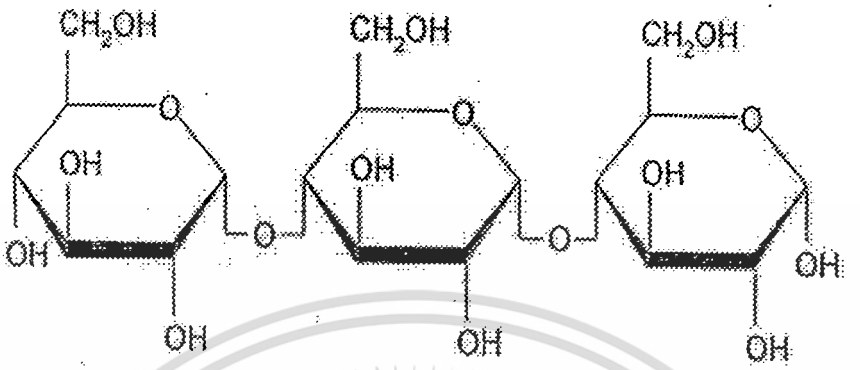
ข้าวเจ้า เป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้า จัดอยู่ในแฟมมิลี่ Gramineae มีต้นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Oryza sativa L* แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ พันธุ์อินดิคา (*O. sativa indica*) ปลูกมากในแถบมรสุม เช่น อินเดีย ลาว พม่า ไทย และพันธุ์จาปอนิคา (*O. sativa japonica*) ปลูกในพื้นที่เขตอบอุ่น เช่น ญี่ปุ่น เกาหลี การผลิตแป้งข้าวเจ้า จะใช้ข้าวหักหรือปลายข้าว และนิยมใช้ข้าวประเภทที่มีอะมิโลสสูง โดยผ่านกรรมวิธีการผลิตแบบโม่น้ำ (wet milling process) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน แป้งที่ได้มีคุณภาพดี เม็ดแป้งมีความละเอียด และสิ่งเจือปนน้อย ข้าวที่มีจำหน่ายทั่วไปสามารถจัดกลุ่มตามปริมาณอะมิโลสได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ข้าวอะมิโลสต่ำ (มี 10-20%) เป็นข้าวนุ่มค่อนข้างเหนียว ข้าวอะมิโลสปานกลาง (มี 20-25%) เป็นข้าวค่อนข้างนุ่มแต่ไม่เหนียว ข้าวอะมิโลสสูง (มี 25-34%) เป็นข้าวแข็ง ปริมาณอะมิโลสเป็นลักษณะประจำพันธุ์ของข้าวแต่ละพันธุ์ เพราะอะมิโลสเป็นปัจจัยสำคัญในการคาดคะเน หรืออธิบายคุณภาพในการหุงต้มข้าว (งามชื่น คงเสรี. 2537)

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งข้าวเจ้า (2529) กำหนดว่าแป้งข้าวเจ้าต้องมีความชื้นไม่เกิน 13.0% ปริมาณแป้งไม่น้อยกว่า 85.0% เถ้าไม่เกิน 0.50% เถ้าที่ไม่ละลายในกรดไม่เกิน 0.030% และปริมาณอะมิโลสไม่น้อยกว่า 15.0% เมื่อนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงจะพบเม็ดแป้งขนาดเล็กประมาณ 2-9 ไมโครเมตร มีรูปทรงเป็นเหลี่ยมกระจายตัวอยู่ และบางส่วนจับตัวกันเป็นกลุ่ม เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงมองเห็นวงแหวนและไฮลัมไม่ชัดเจน

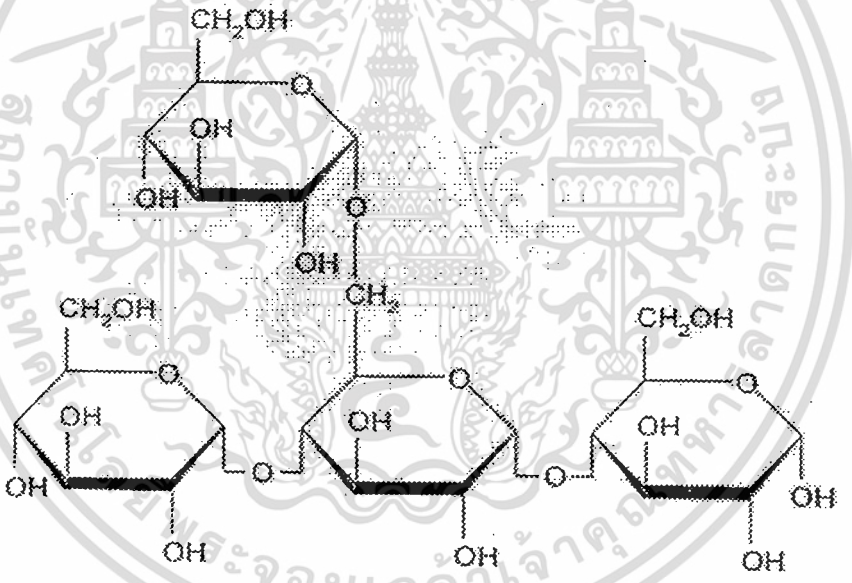
2.1.1 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของแป้ง

แป้ง (starch) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 :10 :5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose unit) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวต่อกันของน้ำตาลกลูโคสโดย สูญเสียน้ำ 1 โมเลกุลต่อ 1 พันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic bond) ที่เกิดระหว่างน้ำตาลกลูโคส 2 โมเลกุล แป้งจะอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง (starch granule) มีขนาด 1-2 ไมครอน ไปจนถึง 200 ไมครอน มีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันไปทั้งแบบทรงกลม รูปไข่ และหลายเหลี่ยม ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยโพลีเมอร์ 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพกติน (amylopectin) โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Amylose



Amylopectin

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะมิโลส และอะมิโลเพกติน

ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอต (2542)

อะมิโลสมีลักษณะเป็นสายตรงของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟ่า – 1,4 ไกลโคซิดิก (α –1,4 glycosidic linkaged bond) เพียงอย่างเดียว ประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200 – 2,000 หน่วย สามารถดูดความชื้น และกระจายตัวในน้ำได้ดี เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งจนเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ โมเลกุลของอะมิโลสจะละลายออกมาจากเม็ดแป้งทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดต่ำลง เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการจัดเรียงตัวเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงร่างสามมิติ โดยโมเลกุลของอะมิโลสจะเข้ามาจัดเรียงตัวใกล้ ๆ กันได้ลักษณะโครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำได้ ในกรณีที่สารละลายแป้งมีความเข้มข้นมากจะได้ลักษณะเป็นเจล และจะตกตะกอนในกรณีที่สารละลายแป้งมีความเข้มข้นของแป้งน้อย อะมิโลสมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^5–10^6 ซึ่งอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป นอกจากนี้แล้วอะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนให้สีน้ำเงิน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะมิโลส

อะมิโลเพกติน มีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ส่วนที่เป็นเส้นตรงประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส 25–30 หน่วย เรียงต่อกันด้วยพันธะแอลฟ่า – 1,4 ไกลโคซิดิก ส่วนจุดแยกเป็นกิ่งก้านจะต่อกันด้วยพันธะแอลฟ่า – 1,6 ไกลโคซิดิก (α – 1,6 glycosidic linkaged bond) อะมิโลเพกตินโมเลกุลหนึ่งจะประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200,000 หน่วยขึ้นไป เนื่องจากอะมิโลเพกตินเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ และมีกิ่งก้านสาขามาก เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกตินสูง แป้งเปียกที่ได้ไม่มีสี และใส มีความหนืดสูง เมื่ออุณหภูมิลดลงโมเลกุลเกิดการระเกะระกะจึงรวมตัวกันยาก และคืนตัวน้อย อะมิโลเพกตินจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^7–10^9

อะมิโลสและอะมิโลเพกตินจะเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบแบบแผนในเม็ดแป้ง ภายในเม็ดแป้งจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) กับส่วนที่ไม่เป็นผลึกหรือที่เรียกว่า ส่วนอสัณฐาน (amorphous) โดยส่วนที่เป็นผลึก โมเลกุลจัดเรียงตัวกันเป็นกลุ่ม ๆ อย่างหนาแน่นเป็นระเบียบ จะมีอะมิโลสประกอบอยู่มาก โดยประกบตามความยาวกับส่วนที่เป็นเส้นตรงของอะมิโลเพกตินด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างภายในโมเลกุลเดียวกันและต่างโมเลกุลขึ้นมากมาย ทำให้โมเลกุลในบริเวณนี้หนาแน่นและมีแรงยึดเหนี่ยวกันสูง การดูดน้ำและพองตัวเกิดขึ้นอย่างจำกัด เนื้อค่อนข้างแข็ง และไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับสารอื่น ส่วนที่ไม่เป็นผลึก โมเลกุลจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ประกอบด้วยอะมิโลเพกตินเป็นส่วนใหญ่ จึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลได้น้อยและเป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดี ไวต่อปฏิกิริยา ทั้งส่วนที่เป็นผลึกกับส่วนที่ไม่เป็นผลึกจะเรียงสลับกันทำให้เกิดการหักเหสองแนวเป็นเงากากบาทเมื่อส่องผ่านแสงโพลาไรส์ (polarized light) เรียกว่า ไบริฟรินเจนท์ (birefringence) แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนอะมิโลสและอะมิโลเพกตินแตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อการพองตัวของเม็ดแป้ง ความหนืด ความใส และการคืนตัวของแป้งสุก (อนงค์ เจษฎาญานเมธ. 2534)

2.1.2 การเกิดเจลาติไนซ์และรีโทรเกรเดชั่น

สายโพลีเมอร์ของแป้งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ที่ตำแหน่งกลุ่มไฮดรอกซิลบนกลูโคสระหว่างกันในแต่ละสาย ทำให้แป้งเกาะตัวกันเป็นเม็ด และเมื่อนำมาผสมกับน้ำที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะไม่ละลายน้ำเย็น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่น้ำแป้ง พันธะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งคลายออก และเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างไฮดรอกซิลกับน้ำแทนโดยการอุ้มน้ำเข้าไปในเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งเริ่มพองตัว เม็ดแป้งจะพองตัวขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่องจนถึงจุด ๆ หนึ่งเม็ดแป้งจะแตกออก โพลีเมอร์แต่ละสายในเม็ดแป้งจะถูกปล่อยออกอย่างอิสระในน้ำ ทำให้แป้งละลายน้ำได้ดีขึ้นและรวมตัวกับน้ำเป็นเนื้อเดียวกันมีผลทำให้แป้งมีความหนืดสูงขึ้น ซึ่งก็คือ การเกิดเจลของแป้ง (gelatinization) อุณหภูมิสารละลาย ที่เริ่มเกิดความหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์ เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดความหนืด มักเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) แป้งแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชันแตกต่างกันไปขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ เช่น สัดส่วนของปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพกติน การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในเม็ดแป้ง เป็นต้น การเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้น ปริมาณของอะมิโลส และอะมิโลเพกตินในแป้งของพืชจะแตกต่างกัน ซึ่งมีอิทธิพลต่อลักษณะของแป้งและการเลือกใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำแป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์

ชนิดของแป้ง	เปอร์เซนต์สัดส่วนของอะมิโลสต่ออะมิโลเพกติน	ช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์ (°C)	ความใสของน้ำแป้งสุก
แป้งข้าวเจ้า	17 / 83	61 – 78	ขุ่นขาว
แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว	1 / 99	63 – 72	โปร่งแสง
แป้งข้าวโพด	26 / 74	62 – 74	ขุ่นขาว
แป้งสาลี	25 / 75	52 – 64	ขุ่นขาว
แป้งข้าวฟ่าง	26 / 74	68 – 75	ขุ่นขาว
แป้งมันสำปะหลัง	17 / 83	52 –64	โปร่งแสง
แป้งมันฝรั่ง	24 / 76	56 – 69	โปร่งแสง
แป้งมันเทศ	18 / 82	58 – 74	โปร่งแสง

ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอต (2542)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชั่นแล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออกในที่สุด โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายตัวออกมาจากเม็ดแป้งมีผลทำให้ความหนืดลดลง และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงจะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงร่างแหสามมิติขึ้น โดยโมเลกุลของอะมิโลสที่ออกมาจากเม็ดแป้งที่อยู่ใกล้กันจะเข้ามาเรียงตัวใกล้ ๆ กัน และเกาะเกี่ยวกันเองเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างโมเลกุลได้ลักษณะโครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

คงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า รีโทรเกรเดชั่น (retrogradation) ถ้าปล่อยให้อุณหภูมิต่ำลงอีก จะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างดังกล่าวแน่นขึ้นโมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า ซิเนอรีซิส (syneresis) ปริมาณและขนาดของอะมิโลส มีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากขึ้นและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกตินสูง

2.2 การดัดแปรแป้ง (modification of starch)

การดัดแปรแป้ง หมายถึง การนำแป้ง (starch) เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมี และ/หรือทางกายภาพจากเดิมด้วยความร้อน และ / หรือเอนไซม์ และ / หรือสารเคมีชนิดต่าง ๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้

การดัดแปรแป้งสามารถกระทำได้ 3 วิธีใหญ่ ๆ คือ

2.4.1 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (biotechnological modification) เป็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งโดยการใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม เช่น การปรับปรุงพันธุ์เพื่อให้พืชมีปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพกตินอย่างใดอย่างหนึ่งสูงกว่าพันธุ์พืชที่มีอยู่ในธรรมชาติและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสม

2.4.2 การดัดแปรโดยวิธีทางกายภาพ (physical modification) เป็นการดัดแปรแป้งธรรมชาติโดยใช้ความร้อน ความดัน แรงเฉือน และความชื้นแก่แป้ง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ 2 ลักษณะ คือ มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพและทำลายโมเลกุลของแป้ง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการดังกล่าว ได้แก่ แป้งพรีเจลาติไนซ์ (pregelatinized starch) เป็นแป้งดัดแปรทางกายภาพที่ทำโดยให้ความร้อนแก่แป้งทำให้แป้งสุกหรือเกิดเจลาติไนซ์ แล้วทำให้แห้งโดยเครื่องทำแห้ง และบดให้ละเอียด คุณสมบัติที่สำคัญของแป้งพรีเจลาติไนซ์ คือ สามารถละลายกระจายตัวได้ในน้ำเย็น สามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งธรรมชาติให้ความหนืดได้ทันที และไม่เกิดเจล นอกจากนี้ การดัดแปรทางกายภาพยังทำได้โดยการปรับขนาดอนุภาคของสตาร์ช เพื่อควบคุมความสามารถในการกระจายตัวและการดูดซับน้ำ รวมทั้งการแยกส่วน (fractionation) เพื่อนำแป้งมาแยกเอาอะมิโลสและอะมิโลเพกตินออกจากกัน เพื่อสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างจำเพาะเจาะจง แป้งที่มีอะมิโลสสูง มีคุณสมบัติที่จะเกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางได้ดี เหมาะที่จะนำเคลือบผิวหรือเป็นกาวติดวัสดุต่าง ๆ รวมถึงการใช้วัสดุเพื่อบรรจุภัณฑ์อาหารที่รับประทานได้ ส่วนแป้งที่มีอะมิโลเพกติน เมื่ออยู่ในสภาพแป้งสุกจะมีความอยู่ตัวภายใต้สภาวะการแช่แข็งและการคืนตัว (freeze-thaw stability)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การดัดแปรทางเคมี (chemical modification) เป็นการนำแป้งธรรมชาติไปทำปฏิกิริยากับสารเคมี แล้วทำให้สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งธรรมชาตินั้นเปลี่ยนไป การทำปฏิกิริยาเคมีกับแป้ง โดยส่วนใหญ่แล้วจะทำในสภาพแขวนลอยที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชั่น (45–50 °C) สารเคมีจะทำปฏิกิริยากับแป้งบริเวณพื้นผิวเม็ดแป้ง โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีของเม็ดแป้งขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของส่วนผลึกและภายในส่วนอสัณฐาน สมบัติของแป้งดัดแปรโดยใช้สารเคมีนี้จะต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมี ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น และสภาวะของปฏิกิริยาที่ใช้ การดัดแปรแป้งโดยวิธีทางเคมีแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดัดแปรทางเคมีที่ทำให้โมเลกุลของแป้งแตกตัว (degradative chemical modification) และการดัดแปรทางเคมีที่ไม่ทำให้โมเลกุลของ แป้งแตกตัว (nondegradative chemical modification)

2.4.3.1 การดัดแปรทางเคมีที่ทำให้โมเลกุลของแป้งแตกตัว เป็นกระบวนการดัดแปรแป้งที่มีผลทำลายโมเลกุลแป้งให้มีขนาดเล็กลง ความแข็งแรงของเม็ดแป้ง ลดลงความสามารถในการพองตัวและความข้นหนืดจะน้อยลง ทำให้แป้งละลายได้ในความเข้มข้นที่สูงกว่าแป้งธรรมชาติ วัตถุประสงค์หลักของการดัดแปรวิธีนี้ก็เพื่อทำให้สามารถใช้แป้งได้มากขึ้น เพิ่มความสามารถในการละลายน้ำ ควบคุมความแข็งแรงของเจล และดัดแปรความคงตัวของแป้ง แป้งที่ถูกดัดแปรในกรณีนี้ ได้แก่ แป้งที่ถูกดัดแปรด้วยกรด (acid – thinned starch) แป้งที่ถูกดัดแปรด้วยการออกซิไดซ์ (oxidized starch) แป้งที่ถูกดัดแปรด้วยวิธีเด็กซ์ทรินไนเซชัน (dextrinized starch) เป็นต้น

ก) การไฮโดรไลซ์ด้วยกรด (acid thinning) โดยใช้กรดเกลือหรือกรดกำมะถันเจือจาง ทำปฏิกิริยากับสารละลายแป้งเข้มข้น (36-40%) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเกิดเจลาติไนซ์ (40–60 °C) เป็นเวลานานพอที่จะทำให้แป้งดัดแปรมีคุณสมบัติตามต้องการ ทำให้เป็นกลาง กรองหรือเหวี่ยงให้ได้เม็ดแป้ง นำมาล้างและทำให้แห้ง แป้งดัดแปรที่ได้ส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปเม็ดแป้ง มีความหนืดต่ำขณะร้อน ความเหนียวในการยึดเกาะเพิ่มขึ้น แป้งจะมีรีโทรเกรเดชันสูงและได้เจลที่แข็งแรงเมื่อทิ้งให้เย็น

ข) เดกซ์ทริไนเซชัน (dextrinization) เป็นการให้ความร้อนแก่แป้งแห้งในสภาพที่มีกรดเกลือหรือกรดกำมะถัน เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่พันธะแอลฟ่า – 1,4 ไกลโคซิดิกและการเกิดโพลีเมอร์ใหม่ (repolymerization) ในเม็ดแป้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกเป็น 3 ชนิดขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และความเป็นกรดด่าง คือ white dextrin yellow dextrin และ british gum เดกซ์ทรินมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ให้ความหนืดต่ำแต่ความสามารถในการละลายสูง จึงสามารถใช้เดกซ์ทรินที่ความเข้มข้นสูง ๆ ในการแปรรูปอาหารได้ เดกซ์ทรินอาจทำให้เกิดเจลหรือไม่ก็ได้ขึ้นกับระดับการเกิดเดกซ์ทรินไนเซชั่นสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นรูปฟิล์มที่มีคุณสมบัติในการยึดเกาะและเป็นกาวที่ดี นอกจากนี้ยังใช้เดกซ์ทรินในการผลิตขนมอบ อาหารว่าง ของหวาน สี และสารให้กลิ่นรส

ค) ออกซิเดชั่น (oxidation) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) เช่น โซเดียมไฮเปอร์คลอไรด์ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โพตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต เป็นต้น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลให้เป็นหมู่อัลดีไฮด์ คีโตน หรือหมู่คาร์บอกซิล และมีการตัดโมเลกุลแป้งทำให้เกิดการกำจัดสีและทำลายจุลินทรีย์ ทำให้แป้งมีความขาวขึ้น คุณสมบัติของแป้งออกซิไดซ์ คือ แป้งจะมีประจุลบเนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิลเข้าไปอยู่ในโมเลกุลอะไมโลส ทำให้อัตราการคืนตัวของแป้งที่เกิดการเจลาติไนซ์ลดลง แป้งที่เกิดเจลาติไนซ์จะมีความหนืดต่ำลง ทำให้สามารถใช้ในระดับความเข้มข้นสูง ดังนั้น เมื่อเกิดการคืนตัวจะได้เจลที่มีความคงตัวสูงมีความสามารถในการยึดเกาะกันได้ดีขึ้น

ง) การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ (enzymatic hydrolysis) แป้งดัดแปรที่ได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ผลิตโดยผสมสารละลายแป้งกับเอนไซม์ นำไปเจลาติไนซ์โดยใช้การฉีดผสมกับไอน้ำ เมื่อเอนไซม์ย่อยถึงระดับที่ต้องการ หยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์โดยเพิ่มอุณหภูมิภายในเครื่องสำหรับทำการหุงต้มให้สูงขึ้น เอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยแป้งมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของแป้งดัดแปรที่ต้องการ เช่น กลูโคอะมิเลส แอลฟาอะมเลส ไอโซอะมิเลส เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยแป้ง ได้แก่ น้ำเชื่อมกลูโคส น้ำเชื่อมฟรักโตส ไซโคลเดกซ์ทริน

2.4.3.2 การดัดแปรทางเคมีที่ไม่ทำให้โมเลกุลของแป้งแตกตัว การดัดแปรแป้งแบบนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติของแป้งโดยไม่ทำให้โครงสร้างของโมเลกุลแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยด้วยปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารที่ใช้ดัดแปรในภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่

ก) ปฏิกิริยาการแทนที่ (substitution) เป็นการปรับปรุงสมบัติของแป้งโดยใช้สารที่มีหมู่สำหรับเกิดปฏิกิริยาเพียงหมู่เดียวเข้าทำปฏิกิริยาแทนที่กับหมู่ ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง สารเหล่านี้ได้แก่ กรดซัลฟุริก เอทธิลีนออกไซด์ โพรพิลีน ออกไซด์ อะซีติกแอนไฮไดร์ด และไวนิลอะซีเตต เป็นต้น ปฏิกิริยาแทนที่ที่เกิดขึ้นอาจเป็นปฏิกิริยาอีเทอรริฟิเคชั่นหรือเอสเทอริฟิเคชั่น แป้งดัดแปรที่ได้ก็จะมีชื่อเรียกตามหมู่ที่เกิดการแทนที่ ได้แก่ สตาร์ชเอสเทอร์ เช่น สตาร์ชอะซีเตต สตาร์ชฟอสเฟต สตาร์ชซิเทรต และสตาร์ชอีเทอร์ เช่น ไฮดรอกซีเอทธิลสตาร์ช ไฮดรอกซีโพรพิลสตาร์ช คาร์บอกซีเมทิลสตาร์ช, แคทไอออนิก สตาร์ช เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของแป้งดัดแปรโดยปฏิกิริยาการแทนที่ อุณหภูมิการเกิดเจลลดลง แป้งเปียกหลังการทำให้สุกมีลักษณะใสและเหนียวยืดมากขึ้น เกิดการคืนตัวและแยกตัวของน้ำจากแป้งเปียกช้าลง จับกับไขมันได้ดีขึ้น คงตัวต่อสภาพการละลายหลังการแช่เยือกแข็ง

ข) การครอสลิงกิง (cross linking) เป็นการปรับปรุงสมบัติของแป้งโดยใช้สารที่มีหมู่สำหรับเกิดปฏิกิริยาตั้งแต่ 2 หมู่ขึ้นไป เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลแป้งตั้งแต่ 2 โมเลกุลขึ้นไป ทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลของแป้งซึ่งเป็นพันธะโควาเลนท์ ช่วยส่งเสริมพันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างของเม็ดแป้งไว้ให้แข็งแรงมากขึ้น สารเคมีที่ใช้ได้แก่ โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ อิพิคลอโรไฮดริน เป็นต้น การเกิดครอสลิงที่เกิดขึ้นอาจเป็นปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชั่นหรืออีเทอริฟิเคชั่นขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่ใช้ ตัวอย่างแป้งครอสลิง ได้แก่ ไดสตาร์ชฟอสเฟต และไดสตาร์ชกลีเซอรอล เป็นต้น

คุณสมบัติของแป้งดัดแปรโดยปฏิกิริยาครอสลิงที่ได้จะแตกต่างจากแป้งธรรมชาติ ดังนี้ อุณหภูมิการเกิดเจลสูงขึ้น การพองตัวและการละลายลดลง ทนต่อความร้อน แรงเฉือน และสภาวะความเป็นกรดมากขึ้น จึงเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านภาวะต่าง ๆ ดังกล่าว แป้งเปียกที่ได้จะข้น แต่ไม่เหนียวยืดติด และขุ่นทึบ

ในทางอุตสาหกรรมการดัดแปรแป้งแบบครอสลิง มีหลักการทั่วไปคือ ปฏิกิริยาจะเกิดในสภาพของผสมของแป้งกับน้ำโดยมีแป้ง 35–40% ในของผสม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน ในสภาวะความเป็นกรดด่าง 9–11 จนได้แป้งดัดแปรที่มีระดับการ ครอสลิงและคุณสมบัติตามต้องการ

คุณสมบัติของแป้งดัดแปรที่ได้จากการเกิดอนุพันธ์ (starch derivatives) จะถูกเปลี่ยนแปลงไปตามระดับการแทนที่และลักษณะของหมู่ฟังก์ชั่นที่เข้ามาทำปฏิกิริยากับแป้ง ระดับการแทนที่ คือ จำนวนหมู่ฟังก์ชั่นที่มาแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลต่อจำนวนหน่วยกลูโคส ซึ่งจะบ่งบอกถึงจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่เท่านั้น แต่ไม่ระบุถึงตำแหน่งที่ถูกแทนที่

$$\text{ระดับการแทนที่ (degree of substitution , DS)} = \frac{\text{โมเลกุลของหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่โดยเฉลี่ย}}{\text{โมลของหมู่แอนไฮโดรกลูโคส}}$$

$$= \frac{\text{โมลของรีเอเจนต์ที่ใช้}}{\text{โมลของหมู่แอนไฮโดรกลูโคสที่เหลืออยู่}}$$

การแทนที่ของสารเคมีเพื่อเกิดอนุพันธ์นั้นทำได้ดีในส่วนอสัณฐานของอะมิโลเพกตินและทำได้ในส่วนของอะมิโลสเช่นกัน (กล้าณรงค์ ศรีรอต. 2542)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Amort *et al.* (1985) พบว่าสามารถดัดแปรแป้งด้วยไฮโดรไลเซทของไซเลนบางชนิด โดยมีโซเดียมอลูมิเนตเป็นสารเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์จะมีสมบัติด้านไฮโดรโฟบิคและการไหลดีขึ้น แป้งที่ได้มีสมบัติในการกระจายตัว (dispersibility) และความคงตัวของโพลีเมอร์ในแป้งได้ดี

Felcht *et al.* (1984) สามารถผลิตผลิตภัณฑ์เซลลูโลสอีเทอร์ (cellulose ethers) ดัดแปร โดยการใช้เซลลูโลสอีเทอร์ที่ละลายน้ำ (water – soluble cellulose ethers) อาทิ โซเดียมคาร์บอกซีเมทอกซิลเซลลูโลส, เมทธิลไฮดรอกซีเอทธิลเซลลูโลส เป็นต้น เข้าทำปฏิกิริยากับสารไซเลน เช่น เมทอกซิลไตรเมทอกซีไซเลน, เมทอกซีไตรอีทอกซีไซเลนในปริมาณความเข้มข้น 0.0001 – 0.12 โมลต่อโมลของเซลลูโลส เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านการกระจายตัว (dispersing properties)

ไซเลนหลายชนิด เช่น อัลคิลไตรเมททอกซีไซเลน จะถูกไฮโดรไลซ์ในน้ำและรวมตัวกับกลุ่มไฮดรอกซิลที่เกิดจากการไฮโดรไลซ์ เกิดพันธะไฮโดรเจนกับกลุ่มไฮดรอกซิลบน โพลิเมอร์และพัฒนาเป็นพันธะที่แข็งแรง ปฏิกิริยาจะมีอลูมิเนตเป็นสารเร่ง การดัดแปรสภาพนี้นอกจากจะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านไฮโดรโฟบิคแล้ว ยังช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการเกาะติดด้วย ทำให้พลาสติกที่นำมาใช้ มีสมบัติมีความแข็งแรง มีการโค้งงอมากขึ้น (Peeters *et al.* 1990)

Sau (1991) สังเคราะห์อนุพันธ์ไซริลของโพลีแซคคาไรด์ เช่น คาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส ทำปฏิกิริยากับ 3-ไกลซิดอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน หรือไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน ฟิล์มของอนุพันธ์เหล่านี้จะมีความใส ค่อนข้างยืดหยุ่น และทนทานต่อน้ำ และกรด แต่สามารถละลายได้ในสารละลายด่าง

Lim *et al.* (1994) ใช้สารเคมีทำการเชื่อมข้าม (cross-linking) คือ อัลดิพิค อะซิตริกแอนไฮไดรด์หรืออีพอกไซด์ระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชกับโปรตีนเซอีนของข้าวโพด (corn starch/zein) และนำมาผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ จะมีสมบัติเทอร์โมพลาสติก มีความแข็งแรงสูง ทนน้ำ และสามารถถูกย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ

Chang and Lii (1992) ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลังที่ถูกดัดแปรด้วยโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตโดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น เปรียบเทียบกับวิธีการแบบเก่า (conventional method) พบว่า ระดับการแทนที่ของฟอสเฟต (degree of substitution , D.S.) ในแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ กระบวนการแบบเก่า มีค่าเท่ากับ 0.048 และ 0.047 โดยลำดับ ขณะที่แบบเอ็กซ์ทรูชั่นมีค่าเท่ากับ 0.040 นอกจากนี้ ค่าของความหนืดของแป้งจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นที่วัดด้วยเครื่องบาร์เบนเดอร์วิสโคอะมิโล กราฟ จะต่ำกว่าแบบเก่า ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากความเสียหายของเม็ดแป้งที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Meuser and Grimmler (1993) ได้ศึกษาการดัดแปรทางเคมีของแป้งสาลีแบบแคทไอออนิกสตาร์ช (cationic starches) โดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ เป็นถังปฏิกรณ์เคมีแทนแบบ Batch พบว่า ค่าของพลังงานกลจำเพาะ (specific mechanical energy ; SME) ซึ่งวัดได้จากค่าของแรงต้านการบิด (torque) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 120 °C มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 155 กิโลวัตต์ต่อวินาที ค่าของประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (reaction efficiency; R.E.) ลดลงจาก 70% เป็น 50% และผลรวมของเวลาเฉลี่ย (residence time) เพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 100 วินาที ยิ่งไปกว่านั้น สำหรับค่า SME ที่สูงกว่า 200 กิโลวัตต์ต่อวินาที และอุณหภูมิที่สูงกว่า 135 °C รวมถึงเวลาที่ใช้จะมากกว่า 60 วินาที ค่าของ R.E. จะลดลงเป็น 27% สรุปได้ว่า ค่าของ SME ระยะเวลา และอุณหภูมิยิ่งเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าของความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของสับเสตรทและสารเคมีที่ใช้ ในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นลดน้อยลง

เกศศิณี ตระกูลทิวากร และคณะ (2539) ศึกษาคุณลักษณะของแผ่นฟิล์มที่ทำจากแป้งข้าวเจ้าหรือแป้งมันสำปะหลังผสมกับกลีเซอรอลในปริมาณ 0.2, 5 และ 10% ตามลำดับ ซึ่งผ่านการดัดแปรโดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น พบว่าปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น ทำให้แผ่นฟิล์มมีความเรียบขึ้น แต่คุณภาพด้านความคงทนต่อการแตกหักเมื่อพับลดลง การผสมกลีเซอรอลในปริมาณ 5 และ 10% ไม่ทำให้แผ่นฟิล์มมีคุณลักษณะดีขึ้น ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมกับกลีเซอรอลมีลักษณะใส และยืดหยุ่นดี ส่วนฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าผสมกลีเซอรอลมีสีขาวขุ่น ยืดหยุ่นน้อยกว่า

Huangrak (1995) ได้ทำการศึกษาเรื่องการดัดแปรแป้งมันฝรั่งด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนโดยกระบวนการใช้น้ำ (wet process) และไม่ใช้น้ำ (dry process) พบว่าค่าของ response angle จากแป้งมันฝรั่งที่ทำการดัดแปรโดยใช้น้ำจะมีค่าเท่ากับ 40° และไม่ใช้น้ำ (dry process) มีค่าเท่ากับ 60.6° ขณะที่ของแป้งมันฝรั่งปกติ เท่ากับ 60.8° สำหรับสมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำของแป้งมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรโดยกระบวนการใช้น้ำจะมีค่ามากกว่า 24 ชั่วโมง ส่วนกระบวนการไม่ใช้น้ำมีค่าน้อยกว่า 15 นาที ส่วนระดับการแทนที่ของแป้งมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรโดยกระบวนการใช้น้ำมีค่าเท่ากับ 0.00216 และกระบวนการไม่ใช้น้ำมีค่าเท่ากับ 0.00229 ดังแสดงในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยา หรือกลไกของสารประกอบออร์กาโนไซเลนกับแป้ง แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนคือ

1. <u>ไฮโดรไลซิส</u> สารไซลานอล (silanols) เกิดขึ้นจากสารไซเลนทำปฏิกิริยากับน้ำโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา

$$Y-R_n-Si-X_{(4-n)} \xrightarrow[\text{catalyst}]{H_2O} Y-R_n-Si-(OH)_{(4-n)} + (4-n)XO$$

รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างสารไซเลนกับน้ำ

ที่มา : Peeters *et al.* (1990)

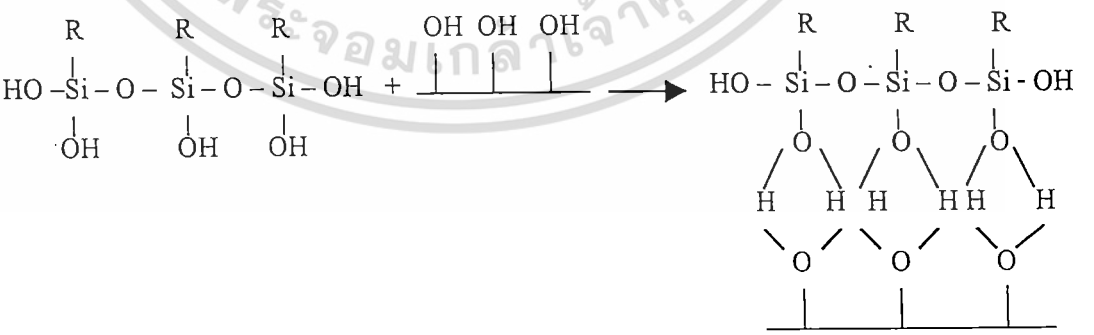
2. <u>คอนเดนเซชั่น</u> เป็นปฏิกิริยาการควบแน่นของสารไซลานอล เกิดสูญเสียน้ำออกให้สารประเภทโอลิโกเมอริกไซโลเซน (oligomeric siloxanes)

$$Y-R-Si-OH + HO-Si-R-Y \longrightarrow Y-R-Si-O-Si-R-Y + H_2O$$

รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาคอนเดนเซชั่นของสารไซลานอล

ที่มา : Peeters *et al.* (1990)

3. <u>การเกิดพันธะไฮโดรเจน</u> เป็นปฏิกิริยาของการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสารโอลิโกเมอร์ (oligomers) กับหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ของแป้ง

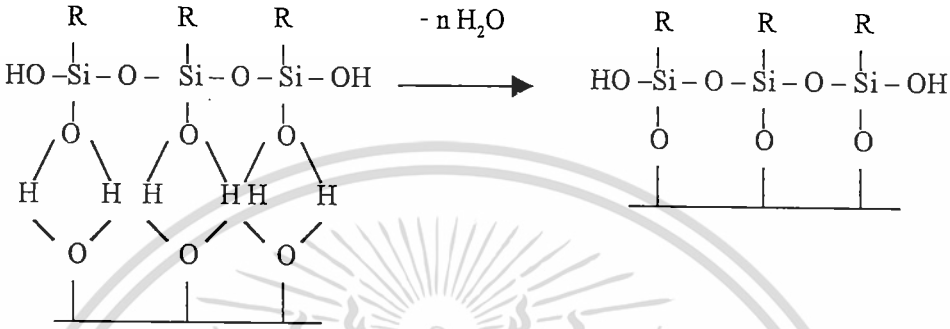


รูปที่ 2.4 การเกิดพันธะไฮโดรเจนของสารไซโลเซนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง

ที่มา : Peeters *et al.* (1990)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. <u>การเกิดพันธะโควาเลนท์</u> เป็นปฏิกิริยาของการเกิดพันธะโควาเลนท์ระหว่างธาตุซิลิคอนที่เป็นองค์ประกอบของสารไซโลเซนรวมตัวกับหมู่ไฮดรอกซิลอย่างเหนียวแน่นในสภาวะเปียก หรือแห้ง



รูปที่ **2.5** การเกิดพันธะโควาเลนท์โดยปฏิกิริยาเชื่อมข้าม
ที่มา : Peeters *et al.* (1990)

ไซเลนซึ่งโมเลกุลประกอบด้วยกลุ่มคลอโร อะมิโน และอัลคอกซิล (chloro, amino, and alkoxyl group) สามารถทำปฏิกิริยาและเกิดพันธะกับกลุ่มไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชได้ โดยกลุ่มคลอโรเป็นกลุ่มซึ่งไวต่อปฏิกิริยามากที่สุด ในปฏิกิริยาจะมีการแทนที่อะตอมไฮโดรเจนบนโมเลกุลสตาร์ช เกิดกรดไฮโดรคลอริก แอมโมเนีย หรือแอลกอฮอล์ (Kerr and Hobbs. 1953)

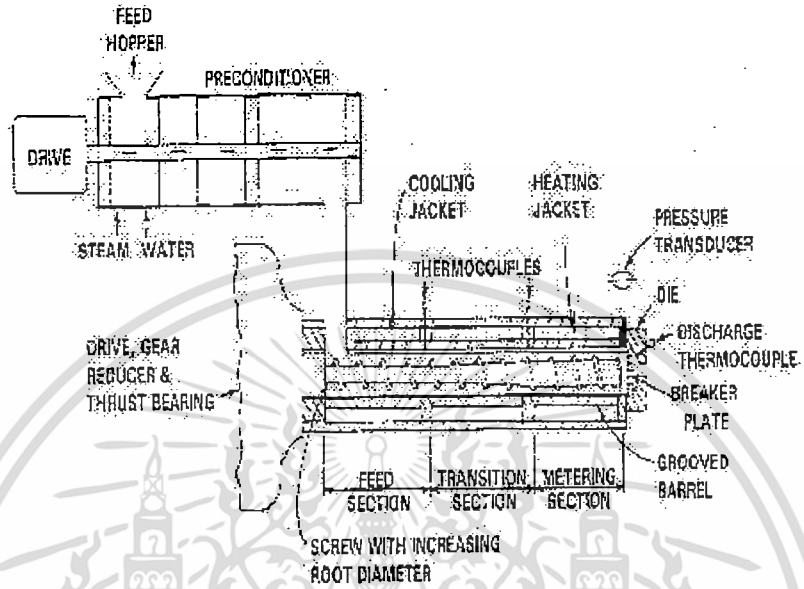
2.4 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น (Extrusion process)

กระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น (extrusion process) หมายถึง กระบวนการทำให้เกิดรูปร่างโดยการบังคับวัตถุดิบให้ไหลหรือเคลื่อนที่ไปภายใต้สภาวะการณ์หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งอย่าง จนมีลักษณะหนืด หยุ่น เหนียวคล้ายพลาสติก (plasticized material) แล้วอัดรีดผ่านทางหน้าแปลน (die) เป็นรูปร่างออกมา โดยเครื่องมือที่ใช้เรียกว่า เอ็กซ์ทรูเดอร์ (extruder)

เอ็กซ์ทรูเดอร์ (extruder) เป็นเครื่องจักรที่รวมเอาขั้นตอนการผลิตหลายขั้นตอนอยู่ในเครื่องจักรเดียวกัน ตัวเอ็กซ์ทรูเดอร์ประกอบด้วยส่วนยาวของสกรูที่มีเกลียวลาดเอียง ซึ่งสามารถหมุนได้โดยรอบภายในของเหล็กทรงกระบอกผนังบาร์เรล (barrel) ส่วนของสกรูนี้จะทำหน้าที่ลำเลียงวัตถุดิบหยุ่นเหนียว ผ่านความยาวของสกรูเข้าไปในเนื้อที่จำกัดในบาร์เรลได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการผสม (mixing) การบีบอัด (compression) และเกิดความร้อนถึงขั้นสุก (cooking) มีการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน อัตราการเกิดแรงเฉือน (shear forces) ของกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น จนในที่สุดจะผ่านช่องเปิดหรือที่เรียกว่า หน้าแปลน (die) ออกมา ซึ่งเป็นจุดสิ้นสุดของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

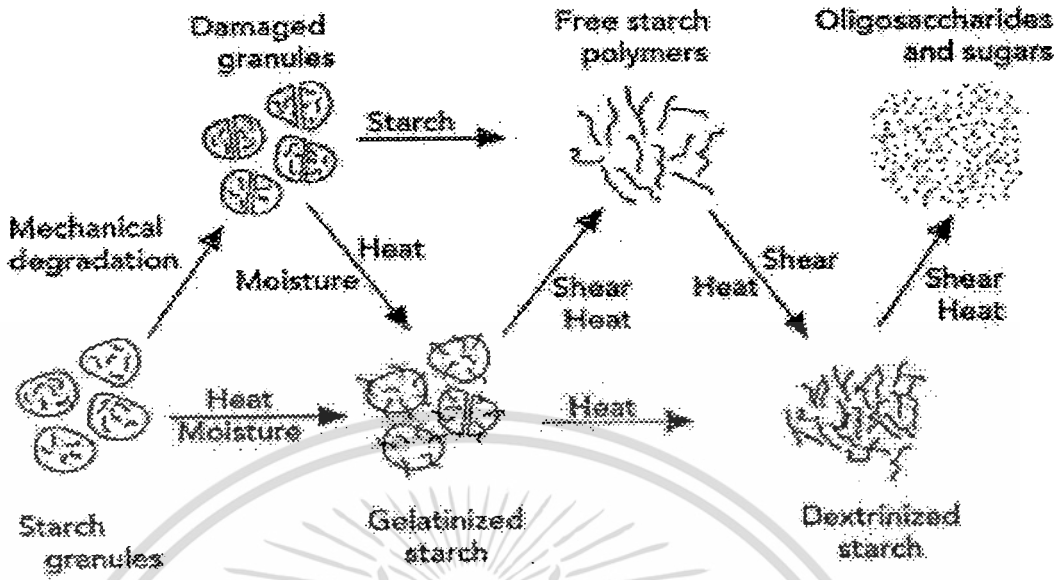
ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ (extrudate) ได้ตามรูปร่างของหน้าแปลนที่ผลิตภัณฑ์นั้นผ่านออกมาจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ดูจากรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยว
ที่มา : Moore (1994)

การดัดแปรแป้งไม่ว่าจะเป็นแบบทางกายภาพหรือทางเคมีโดยใช้กระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นเพื่อที่จะผลิตอนุพันธุ์ของแป้งต่าง ๆ พบว่า มีข้อดีต่างๆมากมาย อาทิ สภาวะในการใช้ปริมาณน้ำหรือความชื้นต่ำ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆโดยทางความร้อนและทางกลได้อย่างต่อเนื่อง และใช้ระยะเวลาในการผลิตสั้นลง ปฏิกิริยาต่างๆที่เกิดขึ้นในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์จะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบ ตัวอย่างอาหารประเภทแป้ง เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี แป้งมันฝรั่ง เป็นต้น เมื่อป้อนเข้าสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในสภาวะที่มีการควบคุมปริมาณความชื้น และอุณหภูมิ เม็ดแป้งจะบวม ดูดน้ำ พร้อมทั้งมีการแตกและกระจัดกระจายออก เนื่องจากจะได้รับแรงเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

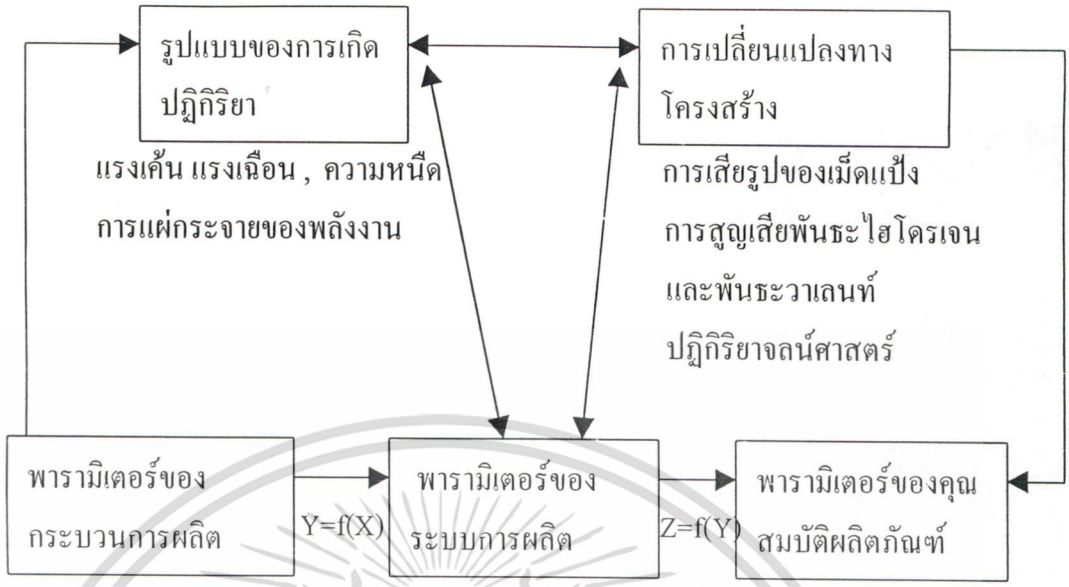


รูปที่ 2.7 รูปแบบจำลองของการเสียสภาพของแป้งในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น
ที่มา : Heldman, D.R. and Hartel , R.W. (1997)

Meuser and Grimmler (1989) ได้เสนอรูปแบบจำลองการวิเคราะห์ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงถึง ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิต (process parameter) ซึ่งรวมถึงสภาวะเงื่อนไขของการผลิตและสูตรการผลิตกับพารามิเตอร์ของระบบการผลิต (system parameter) ได้แก่ ค่าพลังงานกลจำเพาะ (specific mechanical energy ; SME) อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ และระยะเวลาที่ผลิตภัณฑ์อยู่ในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (residence time distribution) หรือระหว่างพารามิเตอร์ของระบบการผลิตกับพารามิเตอร์ของคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (target parameter) ได้แก่ ระดับการเกิดปฏิกิริยาและคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.8 รูปแบบจำลองการวิเคราะห์ระบบกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นของแป้ง

ที่มา : Meuser and Gimmler (1989)

ค่าพลังงานกลจำเพาะจะมีความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของระบบการผลิต และพารามิเตอร์ของการทำงาน ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปมวลของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น สามารถคำนวณได้จากค่าของทอร์ก (torque) ซึ่งเป็นแรงต้านการบิด หรือหมุนตัวสกรูในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ โดยจะสัมพันธ์กับความเร็วรอบ อัตราการป้อน และความหนืดที่เกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างร่องของสกรู การเพิ่มความเร็วรอบของสกรูจะมีผลทำให้ค่าของแรงบิดลดขณะที่ค่าของพลังงานเชิงกลของเครื่องจักรโดยเฉพาะสูง

64473

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Moore (1994) ได้จำแนกตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการผลิตโดยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ไว้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

2.4.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ ได้แก่

2.4.1.1 ความเร็วรอบสกรูอัด เป็นส่วนที่พาส่วนผสมของวัตถุดิบให้ผ่านเข้าไปในเครื่อง โดยระหว่างนั้นจะมีการบดผสมนวดให้วัตถุดิบเกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และเกิดแรงอัด แรงเฉือน ความร้อนที่เกิดขึ้นรวมกับการใช้ความร้อนจากเครื่องทำให้เกิดการสุกของแป้ง

2.4.1.2 อุณหภูมิภายในเครื่อง เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มีการแบ่งการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบออกเป็น 3 โซน คือ ช่วงที่หนึ่ง เป็นช่วงที่ให้ความร้อนเบื้องต้นกับส่วนผสมของวัตถุดิบ ช่วงที่สอง อุณหภูมิที่ใช้จะต้องสูงขึ้นเพื่อให้วัตถุดิบเริ่มเกิดการสุกและเกิดการเปลี่ยนสภาพและในช่วงที่สาม อุณหภูมิที่ใช้นั้นจะต้องทำให้วัตถุดิบสุกอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากปริมาณแป้งที่เกิดเจลาติไนซ์มีผลต่อการพองตัวและลักษณะของผลิตภัณฑ์

2.4.1.3 อัตราส่วนการอัดของสกรู การใช้แรงอัดสูงจะมีผลทำให้วัตถุดิบเกิดการสุกได้ง่าย และเร็วกว่าการใช้แรงอัดที่ต่ำกว่า แต่ก็มีผลเสียคือ เครื่องจักรต้องใช้กำลังเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดความแตกต่างของความดันมาก

2.3.1.4 ขนาดของหน้าแปลน เป็นส่วนประกอบสุดท้ายที่ต่อจากเครื่องเป็นส่วนตีบหรือเรียวเล็ก เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ถูกบีบหรือขับออกมา หน้าที่สำคัญคือ การจำกัดการไหลและทำให้ผลิตภัณฑ์มีรูปร่างต่าง ๆ ตามต้องการ

2.4.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบ ได้แก่

2.4.2.1 ส่วนประกอบของวัตถุดิบ ธรรมชาติและองค์ประกอบของวัตถุดิบ ได้แก่ แป้ง โปรตีน ไขมัน และความชื้น จะมีบทบาทสำคัญต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ โดยเฉพาะในส่วนองค์ประกอบของแป้งจะมีผลต่อการพองตัวของผลิตภัณฑ์มากที่สุด

2.4.2.2 ความชื้นของวัตถุดิบ ในกระบวนการผลิตจะต้องมีการจำกัดปริมาณความชื้นในส่วนผสมของวัตถุดิบด้วย เนื่องจากปริมาณความชื้นมีผลต่ออัตราการพองตัวหรือการสุกของผลิตภัณฑ์ รวมถึงความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.3 ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ วัตถุดิบที่ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มีหลายรูปแบบ จากขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ ธรรมชาติและขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบที่ป้อนมีบทบาทสำคัญในเรื่องกระบวนการผลิต และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เนื่องจากอนุภาคที่เล็กกว่าจะดูดซับน้ำได้เร็วกว่าอนุภาคที่ใหญ่ จึงทำให้การเกิดการเปลี่ยนแปลงอนุภาคของวัตถุดิบเป็นของไหลได้ง่ายขึ้น

2.5 การนำแป้งข้าวเจ้าดัดแปรมาใช้ประโยชน์ในการผลิตแผ่นฟิล์ม

แป้งจัดเป็นโพลีเมอร์ทางชีวภาพ (biopolymer) เมื่อได้รับความร้อนเม็ดแป้งจะพองตัวและเกิดเจลาติไนซ์ เป็นผลทำให้เกิดการกระจายตัวของคอลลอยด์ของแป้งที่อุ้มน้ำไว้ เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มแล้วทำให้แห้งจะได้ฟิล์มจากแป้ง ฟิล์มที่เตรียมขึ้นอาจใช้สารชนิดเดียวหรือหลายชนิดรวมกันโดยนำคุณลักษณะเด่นของสารแต่ละชนิดมาใช้ประโยชน์

การเตรียมฟิล์มจะต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ (Mchuge and Krochta. 1994)

1. ส่วนโพลีเมอร์ (polymer) จะทำหน้าที่เป็นส่วนทำให้เกิดโครงสร้าง (structure) ของฟิล์ม โดยทั่วไปฟิล์มเกิดขึ้นจากสารประกอบที่เป็นโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงยาวโพลีเมอร์ที่สามารถทำให้เกิดฟิล์มได้ดี ได้แก่ โพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide)

2. ส่วนพลาสติไซเซอร์ (plasticizer) เป็นส่วนสำคัญในการผลิตฟิล์ม การเติมลงไปเพื่อให้เกิดแผ่นฟิล์มได้ดีนั้นจะต้องเอาชนะคุณสมบัติการแตกหัก ซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงดึงดูดซึ่งมีมากระหว่างโมเลกุล การที่จะทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นดี นุ่มและมีความอ่อนตัว จะต้องทำให้แรงระหว่างโมเลกุลโพลีเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนตัว ดังนั้นพลาสติไซเซอร์จึงเป็นสารที่มีคุณสมบัติไม่ระเหย มีจุดเดือดสูง ไม่แยกตัวออกจากองค์ประกอบอื่น ๆ และเมื่อเติมพลาสติไซเซอร์ลงไปจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของสารนั้นและคุณสมบัติดังกล่าวสามารถป้องกันการแยกตัวออกมาของพลาสติไซเซอร์ในระหว่างการทำแห้งฟิล์ม ในการเตรียมฟิล์มที่ได้จากโพลีเมอร์โดยไม่มีการใช้พลาสติไซเซอร์ร่วมด้วยจะได้ฟิล์มที่เปราะมาก เนื่องจากพลาสติไซเซอร์จะช่วยลดแรงยึดจับระหว่างโมเลกุล (intermolecule force) ระหว่างสายโพลีเมอร์และช่วยทำให้โพลีเมอร์มีการเคลื่อนตัวมากขึ้น จึงมีผลทำให้ฟิล์มมีลักษณะไม่เป็นชิ้นเล็ก ๆ หรือแตกหักง่าย แต่พลาสติไซเซอร์จะไปลดคุณสมบัติในการเป็นตัวกั้นก๊าซ ไอน้ำ และตัวถูกละลายของฟิล์ม และยังอาจทำให้ความยืดหยุ่นและการเกาะตัวกันลดลงด้วย

พลาสติไซเซอร์ที่ใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มมีหลายประเภท ได้แก่ โมโน ไดและโอลิโกแซ็คคาไรด์ โพลีออลและลิพิดหรืออนุพันธ์ของลิพิด ปริมาณการใช้พลาสติไซเซอร์โดยทั่วไปประมาณ 10 – 60% โดยน้ำหนักแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การเกิดฟิล์ม

ฟิล์มเกิดขึ้นได้จากการทำให้สารที่สามารถเกิดฟิล์มละลายหรือกระจายตัว แล้วใช้วิธีต่าง ๆ ในการแยกสารนั้นออกจากตัวทำละลาย เช่น การทำให้ตัวทำละลายระเหยไป การเติมอิเล็กโทรไลต์เพื่อให้เกิดพันธะข้าม การปรับความเป็นกรดด่าง ซึ่งเรียกว่า โคแอกเซอเวชั่น (coacervation) หรือโดยการทำให้สารที่เกิดฟิล์มซึ่งหลอมเหลวแข็งตัว (solidification) โดยทั่วไปองค์ประกอบหลักของฟิล์ม คือ โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งมีคุณสมบัติเกิดฟิล์มได้ ตัวทำละลาย และสารเจือปนซึ่งเติมลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์ม

ในการเตรียมฟิล์มจะมีแรง 2 ชนิดที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ได้แก่ แรงโคฮีชั่น (cohesion) เป็นแรงระหว่างโมเลกุลโพลีเมอร์ด้วยกันเองจะเกิดขึ้นระหว่างการเกิดฟิล์มทำให้เกิดการเชื่อมต่อของผิววัตถุเดียวกันสร้างพันธะที่แข็งแรงซึ่งจะช่วยป้องกันหรือต้านทานการแยกจากกัน ปัจจัยที่มีผลต่อแรงโคฮีชั่น ได้แก่ โครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีของโพลีเมอร์ ระบบการละลาย และสภาวะในการเตรียมฟิล์ม โดยแรงโคฮีชันมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุล ความสม่ำเสมอของโครงสร้างสายโซ่ การแผ่กิ่งก้านสาขา และการกระจายของกลุ่มที่มีขั้วอย่างมีระเบียบในสายโพลีเมอร์จะช่วยให้เกิดพันธะไฮโดรเจนและพันธะไอออนิกระหว่างสายโซ่ ทำให้มีความแข็งแรง การละลายของโพลีเมอร์ในการเตรียมฟิล์มยังมีผลต่อแรงโคฮีชั่น คือ ถ้าโมเลกุลของโพลีเมอร์ละลายหรือขยายตัวได้มากที่สุดจะได้โครงสร้างซึ่งเชื่อมกันด้วยแรงโคฮีชั่นที่มาก ฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรง ส่วนสภาวะในการเตรียมฟิล์มนั้น ควรเตรียมฟิล์มโดยใช้สารละลายที่อุ่น และทำให้ฟิล์มแห้งโดยใช้ความร้อนที่เหมาะสม เพราะถ้าใช้อุณหภูมิสูงอาจทำให้อัตราการระเหยตัวทำละลายเร็วเกินไป โมเลกุลของโพลีเมอร์ถูกตรึงก่อนที่จะเชื่อมกันอย่างสมบูรณ์ทำให้เกิดรูเข็ม (pinholes) หรือทำให้ฟิล์มมีความหนาไม่สม่ำเสมอซึ่งทำให้การซึมผ่านของฟิล์มเพิ่มขึ้น ระดับของแรงโคฮีชั่นมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มได้แก่ ความหนาแน่น (density) ความอัดแน่น (compactness) ความโปร่งเป็นรูพรุน (porosity) ความสามารถในการซึมผ่าน (permeability) ความยืดหยุ่น (flexibility) และความเปราะ เป็นต้น ส่วนแรงอีกชนิดหนึ่ง คือ แรงแอดฮีชั่น (adhesion) เป็นแรงระหว่างโมเลกุลของโพลีเมอร์กับพลาสติไซเซอร์ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์ม เช่น ทำให้แผ่นฟิล์มมีความยืดหยุ่นดีขึ้น (Banker. 1966)

2.5.2 วิธีการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม

การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ การขึ้นรูปที่รวดเร็วเป็นที่ต้องการในแง่อุตสาหกรรม แต่จะต้องควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม เพื่อให้ฟิล์มขึ้นรูปไม่เร็วเกินไป มิฉะนั้นฟิล์มจะไม่สม่ำเสมอ ผิวหน้าขรุขระและแตกง่าย (Banker. 1966) วิธีการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มมีหลายวิธีด้วยกัน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.1 วิธีเทสารละลายลงบนวัสดุต่างๆ (solvent casting) เป็นการทำให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มด้วยการนำสารผสมของฟิล์มที่เตรียมได้เทลงบนภาชนะเฉพาะที่ใช้ในการเตรียมขึ้นรูปฟิล์ม เช่น แผ่นกระจก เหล็กปลอดสนิม หรือพลาสติก เป็นต้น โดยควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมในการทำให้ฟิล์มให้แห้งแล้วลอกออกเป็นแผ่นฟิล์มตามต้องการ

2.5.2.2 วิธีการเอ็กซ์ทรูชั่น (extrusion) เป็นการทำให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มด้วยการนำเอาส่วนผสมของฟิล์มที่เตรียมได้ผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในการทำให้ฟิล์มขึ้นรูปเป็นแผ่นบาง ด้วยการทำให้ส่วนผสมมีความหนืดโดยการให้ความร้อนและอัดด้วยความดันให้เคลื่อนที่ผ่านหน้าแปลนออกมาให้ได้รูปทรงตามที่ต้องการ

2.5.2.3 วิธีการทำแห้งด้วยลูกกลิ้ง (calenderling) เป็นวิธีที่ทำให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มด้วยลูกกลิ้ง (drum drier) โดยนำส่วนผสมของฟิล์มที่เตรียมได้ผ่านเข้าไปยังลูกกลิ้งร้อนเพื่อรีดให้ฟิล์มเรียบและแห้ง ความหนาของฟิล์มที่ต้องการขึ้นกับแรงกดอัดของลูกกลิ้งบนแผ่นฟิล์ม และระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 2 ลูกกลิ้งที่ฟิล์มผ่านเข้าไป

2.5.3 คุณสมบัติ และองค์ประกอบของฟิล์ม

การนำเอาฟิล์มไม่ว่าชนิดใดมาใช้เป็นภาชนะบรรจุ ต้องคำนึงถึงโครงสร้างและสมบัติการใช้งาน โดยฟิล์มจะมีคุณสมบัติเช่นใดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของโพลีเมอร์หลัก สารปรุงแต่ง สูตร และวิธีการผลิต ซึ่งสามารถจัดจำแนกสมบัติของฟิล์มได้กว้าง ๆ คือ สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความโปร่งแสง ความเป็นมันวาว ความหนา สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ ได้แก่ การซึมผ่านของไอน้ำ การซึมผ่านของออกซิเจน สมบัติทางกล ได้แก่ การต้านทานแรงดึงขาด การยืดตัว ความทนทานต่อการพับขาด และสมบัติเชิงความร้อน ได้แก่ การปิดผนึก การหดตัว เป็นต้น

Roth and Mehltretter (1967) ได้ศึกษาคุณสมบัติบางประการของฟิล์มที่ผลิตจากแป้งไฮดรอกซีโพรพิลเลท อะมิโลเมต (hydroxypropylated amylomaize starch) ในการเตรียมฟิล์มจะใช้แป้งไฮดรอกซีโพรพิลเลท อะมิโลเมต 25 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 175 กรัม โดยให้ความร้อนอุณหภูมิ 90-95 °C เทสารละลายลงบนกระจกซิลิโคน จากนั้นใช้กลีเซอรอล 5% เพื่อเป็นพลาสติไซเซอร์เทลงบนแผ่นฟิล์ม แล้วทำแห้งโดยใช้อากาศร้อน เมื่อฟิล์มแห้งแล้วจะมีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร หลังจากนั้นตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว เก็บที่สภาวะอุณหภูมิ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% 7 วันก่อนที่จะนำมาทดสอบ พบว่า ฟิล์มที่ผลิตได้จะมีความต้านทานแรงดึงขาดลดลง ส่วนความต้านทานต่อการแตก ปริ และความสามารถในการยืดตัวและความทนทานต่อการพับจะเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Park *et al.* (1993) ศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์ต่อฟิล์มเมทธิลเซลลูโลส และฟิล์มไฮดรอกซีโพรพิลเมทธิลเซลลูโลส โดยใช้พลาสติไซเซอร์ 3 ชนิด คือ โพลีเอทิลีนไกลคอล โพรพิลีนไกลคอล และกลีเซอรีน ที่ความเข้มข้น 4 ระดับ คือ 0.17 0.33 0.50 และ 0.66 มิลลิลิตรพลาสติไซเซอร์/กรัมเซลลูโลส และควบคุมความหนาของแผ่นฟิล์ม พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นพลาสติไซเซอร์เพิ่มขึ้น ค่าการต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์ม 2 ชนิดลดลง แต่ค่าการยืดตัวเพิ่มขึ้น และการเพิ่มความเข้มข้นของโพลีเอทิลีนไกลคอลมีผลต่อการเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์มมากกว่าพลาสติไซเซอร์อีก 2 ชนิด ส่วนคุณสมบัติในการขวางกั้นพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพรพิลีนไกลคอล ค่าการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจนของฟิล์มทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของโพลีเอทิลีนไกลคอลไม่มีผลต่อค่าทั้งสองนี้ โดยพบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้น 0.33 มิลลิลิตรพลาสติไซเซอร์/กรัมเซลลูโลส ค่าทั้งสองมีค่าสูงสุด สำหรับกลีเซอรีนเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจนถึง 0.33 มิลลิลิตรพลาสติไซเซอร์ต่อกรัมเซลลูโลส ค่าการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น แต่ใช้ความเข้มข้นมากกว่านี้ค่าจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของกลีเซอรีนไม่มีผลต่อค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มทั้งสองชนิด

มณฑาทิพย์ ยุ่นฉลาด (2534) ได้เตรียมฟิล์มอะมิโลสจากสตาร์ชมันเทศที่แยกส่วนแล้วโดยเตรียมแบบ oblate ซึ่งส่วนประกอบต่างกัน แบ่งเป็น 3 สูตร ได้แก่ สตาร์ชมันเทศและวุ้น (สูตรที่1)สตาร์ชและ อะมิโลส (1:1) และวุ้น (สูตรที่2) และอะมิโลสและวุ้น (สูตรที่3) โดยใช้กลีเซอรอล 0, 0.25 และ 0.50% โดยน้ำหนักของสารละลาย แผ่นฟิล์มที่ได้มีค่าการต้านทานแรงดึงขาดแปรผกผันกับปริมาณกลีเซอรอลที่เติมลงไปโดยในสูตรที่ 1 ค่าลดลงจาก 4.65–3.31 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร สูตรที่ 2 จาก 2.29–1.59 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร และสูตรที่ 3 จาก 1.47–1.39 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร ค่าการยืดตัวแปรผันตามปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นจาก 2.4 ถึง 3.75% 1.0 ถึง 3.15% และ 1.0 ถึง 2.25% ตามลำดับ และค่าการต้านทานแรงฉีกขาดแปรผันตามปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นโดยเพิ่มขึ้นจาก 3.39 ถึง 4.58 3.29 ถึง 8.15 และ 1.55 ถึง 5.83 กรัม ตามลำดับ ส่วนอัตราการซึมผ่านของก๊าซจะแปรผกผันกับปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นโดยค่าลดลงจาก 4.83 ถึง 1.23 1.56 ถึง 1.09 และ 3.56 ถึง 2.18 x 10^3 มิลลิเมตร/ตารางเมตร. 24 ชั่วโมง. บรรยากาศตามลำดับ และค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ของฟิล์มแปรผันตามปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นโดยค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0.472 ถึง 0.585

ปนัดดา พวงเกษม (2540) เตรียมฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งมันสำปะหลัง และทดสอบคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มที่ผลิตได้เพื่อหาแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์ที่สามารถทดแทนการใช้ฟิล์มพลาสติก พบว่า ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีคุณสมบัติการนำไปใช้ประโยชน์ เตรียมได้จากน้ำแป้งที่มีความเข้มข้น 5% และเติมซอร์บิทอล 30% เป็นพลาสติไซเซอร์ แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะปรากฏใส ผิวเรียบ ความหนาเฉลี่ย 0.063 มิลลิเมตร และมีคุณสมบัติทางกล คือ ค่าการต้านทานแรงดึงขาด 1.17 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร การยืดตัว 10.13% และความทนทานต่อการพับ

เอกสารนี้เป็น... ไม่ว่ากรณีใด...

45 ครั้ง ส่วนคุณสมบัติด้านการซึมผ่านพบว่า มีค่าการซึมผ่านของออกซิเจน 6 มิลลิเมตร/ตารางเมตร.24 ชั่วโมง.บรรยากาศ การซึมผ่านของไอน้ำ 0.37 กรัม.มิลลิเมตร/ตารางเมตรต่อ 24 ชั่วโมง. มิลลิเมตรปรอท และคุณสมบัติเด่น คือ ต้านทานน้ำมันได้ 120 วัน ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ และผนึกติดได้ด้วยความร้อนจึงสามารถนำทำเป็นถุง โดยมีค่าความแข็งแรงของตะเข็บ 19.07 นิวตันต่อ 25 มิลลิเมตร เมื่อบรรจุเครื่องปรุงบะหมี่สำเร็จรูปรสต้มยำ พบว่า มีอายุการเก็บรักษานาน 22 เดือนที่อุณหภูมิ 30 °C โดยไม่มีแสงส่องผ่าน และจะละลายในน้ำต้มเดือดภายใน 5 นาที ส่วนการเคลือบผิวสตรอเบอร์รี่ เบบี้แครอต และมะเขือเทศด้วยฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง จะไม่สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักหรือช่วยยืดอายุการเก็บได้

2.6 วิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

แผนการทดลองสำหรับวิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง เป็นการใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ร่วมกับทางสถิติ วางแผนและวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อให้ทราบแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับของปัจจัยเปลี่ยนแปลง ตลอดจนการหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่จะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด วิธีการนี้ได้มีการเสนอแนะครั้งแรกโดย Box และ Wilson (1951) หลังจากนั้นจึงมีการพัฒนากันต่อ ๆ มา วิธีการดังกล่าวนี้ใช้การวิเคราะห์แบบ Multiple Regression Analysis ซึ่งหากมีตัวแปรใดที่มีผลต่อค่าการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ตัวแปรนั้นจะปรากฏในสมการ สมการที่ได้อาจเป็นสมการกำลังที่หนึ่ง (first order model) ที่มีลักษณะกราฟเป็นเส้นตรง หรือสมการกำลังสอง (second order model) ที่มีลักษณะเส้นกราฟเป็นเส้นโค้ง

ขั้นตอนในการวางแผนการทดลองแบบวิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

2.6.1 กำหนดตัวแปรอิสระ (independent variable) ชนิดของตัวแปรอิสระที่จะนำมาทำการทดลองนั้นจะต้องมีผลต่อการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่น หากต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งแบบถาด อาจเลือกใช้ตัวแปรอิสระคือ อุณหภูมิ เวลาในการให้ความร้อน หรือความหนาของวัตถุดิบ เป็นต้น นอกจากนี้จะต้องกำหนดชนิดของตัวแปรอิสระให้สอดคล้องกับการทดลองแล้วยังต้องกำหนดช่วงการทดลองด้วย ซึ่งช่วงการทดลองนี้หากกำหนดแคบเกินไปจะมีผลทำให้เส้นกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ยากต่อการทำนายทิศทางว่าจะทดลองในทิศทางใดเพื่อให้ได้จุดที่เหมาะสม แต่หากตัวแปรช่วงการทดลองกว้างเกินไป อาจจะทำให้ไม่สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมได้ชัดเจน ดังนั้นในการทดลองขั้นแรก จะต้องสุ่มการทดลองโดยเลือกตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 แผนการทดลองที่เหมาะสมสำหรับวิธีหาพื้นผิวตอบสนอง มีหลายแบบด้วยกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยทั่วไปจะใช้ fractional factorial design คือ เลือกบางจุดที่สามารถทำนายผลได้อย่างครอบคลุมและมีประสิทธิภาพ โดยไม่ทำการทดลองทุกจุด ช่วงที่ทดลองส่วนใหญ่จะทำการทดลองที่จุดกึ่งกลางจุดสูงสุดและต่ำสุดของตัวแปรอิสระ เพื่อที่จะทำนายผลจากช่วงเหล่านี้ เช่น แผนการทดลองแบบ central composite design นี้ ดังตารางที่ 2.4 จะทำการศึกษาตัวแปรที่ระดับต่าง ๆ 5 ระดับแทนระดับต่ำสุดจนถึงสูงสุดของตัวแปรด้วยอักษร a , b , c , d และ e ในเทอมสัญญลักษณ์ c มีค่าเท่ากับ 0 b , d มีค่าเท่ากับ –1 , 1 ส่วน e มีสัญญลักษณ์เป็น $-\alpha$ และ α โดยค่าของ α จะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรและจำนวนการทดลอง และจำนวนการทดลองของแผนการทดลองแบบ central composite rotable ประกอบด้วย 3 กลุ่มการทดลองตามความแตกต่างของสภาวะการทดลองที่มีระดับของตัวแปรต่างกัน ดังนี้คือ

1. กลุ่มของ 2^k factorial จำนวนจุดของ factorial points มีจำนวนเท่ากับ 2^k โดยแต่ละปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย จะทำการทดลอง 2 ระดับ ซึ่งใช้สัญญลักษณ์ของระดับตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองจะมีค่าเท่ากับ +1 และ –1

$$(X_1 , X_2 , \ldots\ldots , X_k) = (\pm 1 , \pm 1 , \ldots\ldots , \pm 1)$$

2 จำนวนจุดของ center points (n_o) จะต้องมีการทำซ้ำมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อทำการคำนวณหา pure error โดยการวิเคราะห์การทดสอบการขาดความพอดี (lack of fit) การทดลองสำหรับ center points เขียนเป็นสัญญลักษณ์ได้คือ

$$(X_1 , X_2 , \ldots\ldots , X_{C-1} , X_C) = (0 , 0 , \ldots.. , 0)$$

3. จำนวนจุดของ star points มีค่าเท่ากับ 2k โดยแต่ละจุดอยู่ห่างจาก center points ด้วยระยะที่เท่ากันคือ ระยะ α โดย $\alpha = \sqrt[4]{2^k}$ จึงเป็นการทดลองที่อยู่ในกลุ่มการทดลองแบบ rotatable design การทดลองสำหรับ Star points เขียนเป็นสัญญลักษณ์ได้คือ

$$(\pm\alpha , 0 , 0 , \ldots . , 0) , (0 , \pm\alpha , 0 , \ldots . , 0) , \ldots . , (0 , 0 , \ldots . , \pm\alpha)$$

ดังนั้นการทดลองสำหรับ 2^k central composite จะมีจำนวนจุดทั้งหมดเท่ากับ $2^k + 2k + n_o$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 การวางแผนการทดลองแบบต่าง ๆ ในวิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง

Design Name	Runs	Error df	Largest Block
2 Factor Designs			
3 – level factorial design : 3^2	9	3	9
3 – level factorial in 3 blocks	9	1	3
Central composite design : 2^2 + star	10	4	10
Central composite blocked cube-star	10	3	5
User – defined design			
3 Factor Designs			
Box – Behnken design	15	5	15
Central composite design : 2^3 + star	16	6	16
Central composite blocked cube-star	16	5	9
Central composite in 3 blocks	17	5	7
3 – level factorial design : 3^3	27	17	27
3 – level factorial in 3 blocks	27	15	9
3 – level factorial in 9 blocks	27	9	3
User – defined design			
4 Factor Designs			
Draper – Lin small composite design :	18	3	18
Draper – Lin blocked cube-star	18	2	9
Central composite design : 2^4 + star	26	11	26
Central composite blocked cube-star	26	10	17
Central composite in 3 blocks	27	10	9
Box – Behnken design	27	12	27
Box – Behnken design in 3 blocks	27	10	9
3 – level factorial design : 3^4	81	66	81
3 – level factorial in 3 blocks	81	64	27
3 – level factorial in 9 blocks	81	57	9
User defined design			
5 Factorial Designs			
Draper – Lin small composite design	24	3	24
Draper – Lin blocked cube-star	24	2	24
Central composite design : 25-1 + star	28	7	28
Central composite blocked cube-star	28	6	17

ที่มา : Gracula and Singh (1984)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงจำนวนการทดลองของแผนการทดลองแบบ central composite design

K	2	3	4	5	6
Factorial points (2^k)	4	8	16	32	64
Star points (2k)	4	6	8	10	12
Center points (n_o)	5	6	7	10	15
จำนวนทรีตเมนท์ทั้งหมด	13	20	31	52	91
α	1.414	1.682	2.000	2.378	2.828

ที่มา : Montgomery (1991)

ตัวอย่าง การทดลองที่มีระดับตัวแปร 2 ตัวแปร ตัวแปรละ 5 ระดับ โดยทำการกระจายจุดกึ่งกลางไปในทิศทางต่าง ๆ พบว่า มีจุดที่จะต้องทดลองทั้งหมด 9 จุด แต่เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด จะต้องทดลองที่จุดกึ่งกลางเป็นจำนวน 5 ซ้ำ จะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 วางแผนการทดลองแบบ central composite design แบบ 2 ตัวแปร

การทดลองที่	รหัสตัวแปรที่ 1	รหัสตัวแปรที่ 2
1	- 1	+ 1
2	+ 1	- 1
3	- 1	+ 1
4	+ 1	- 1
5	- 1.414	0
6	+ 1.414	0
7	0	- 1.414
8	0	+ 1.414
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0

ที่มา : Montgomery (1991)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 เป็นตารางแสดงรหัสการทดลองซึ่งการกำหนดรหัสและจำนวนการทดลอง ซึ่งจะมีการกระจายการทดลองไปในลักษณะวงกลม ค่า 0 หมายถึง ค่ากึ่งกลางของตัวแปร หากตัวแปรไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้นจะมีรหัสตัวแปรเป็น +1 และหากตัวแปรเพิ่มขึ้นไปอีกรหัสตัวแปรจะเป็น +1.414 โดยต้องกำหนดให้ช่วงของการเพิ่มหรือลดเท่ากันในแต่ละการทดลอง สำหรับการทดลองจริงนั้น ผู้ทดลองจะต้องพิจารณากำหนดช่วงขึ้นมาเอง โดยช่วงการทดลองจะต้องไม่แคบหรือกว้างมากเกินไปซึ่งสามารถทำได้โดยการทดลองสุ่มดูว่าช่วงที่ใช้นั้นเหมาะสมหรือไม่ โดยพิจารณาจากสมการที่ได้ว่าจะมีค่า R^2 สูงกว่า 0.6 และสมการที่ได้มีความสัมพันธ์เป็นอนุพันธ์อันดับสองหรือไม่ ตัวอย่างเช่นในการทดลองของ Yamaguchi และ Kimisuka (1987) ได้แปรปริมาณเกลือแกงและผงชูรสในมิโซซุป (miso soup) โดยใช้ค่าจุดกึ่งกลางคือ ใช้ปริมาณเกลือแกงเป็น 0.35% (รหัสเป็น 0) ผงชูรสเป็น 0.27% (รหัสเป็น 0) แล้วทำการแปรค่าสำหรับการทดลอง โดยกำหนดให้ช่วงของการแปรเกลือแกงมีความกว้างเป็น 0.2% ของผงชูรสเป็น 0.1% โดยความกว้างของช่วงนี้ ผู้ทดลองจะกำหนดขึ้นมาเอง สามารถเขียนสมการและค่าจริงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

ค่าการทดลองจริง = ค่าการทดลองจากจุดกึ่งกลาง + รหัส (ความกว้างช่วงของการแปร)

<u>เกลือแกง</u>

รหัส 0	หรือค่ากึ่งกลางมีปริมาณเกลือแกงเป็น 0.35%	
รหัส +1	จะได้ปริมาณเกลือแกงเป็น 0.35 + (+1)(0.2)	= 0.5%
รหัส -1	จะได้ปริมาณเกลือแกงเป็น 0.35 + (-1)(0.2)	= 0.15%
รหัส +1.414	จะได้ปริมาณเกลือแกงเป็น 0.35 + (+1.414)(0.2)	= 0.633%
รหัส -1.414	จะได้ปริมาณเกลือแกงเป็น 0.35 + (-1.414)(0.2)	= 0.067%

<u>ผงชูรส</u>

รหัส 0	หรือค่ากึ่งกลางมีปริมาณผงชูรสเป็น 0.27%	
รหัส +1	จะได้ปริมาณเกลือแกงเป็น 0.27 + (+1)(0.1)	= 0.37%
รหัส -1	จะได้ปริมาณเกลือแกงเป็น 0.27 + (-1)(0.1)	= 0.17%
รหัส +1.414	จะได้ปริมาณเกลือแกงเป็น 0.27 + (+1.414)(0.1)	= 0.4114%
รหัส - 1.414	จะได้ปริมาณเกลือแกงเป็น 0.27 + (-1.414)(0.1)	= 0.1286%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 วิเคราะห์ข้อมูล นำข้อมูลของค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองด้วยแบบแผนการทดลองที่เหมาะสม มาหาค่าความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระที่ศึกษาโดยวิธี multiple regression ในรูปของสมการกำลังสอง รูปแบบของสมการที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ คือ สมการโพลีโนเมียลกำลังสอง ซึ่งมีรูปแบบโดยทั่วไปดังนี้

$$Y = B_o + \sum B_i X_i + \sum B_{i,i-1} X_i X_{i+1} + \sum B_{ii} X_i^2$$

เมื่อ

Y คือ ค่าตอบสนองที่เกิดจากการแปรค่าตัวแปร X_I

B_o คือ ค่าเทอมคงที่

$\sum B_i X_i$ คือ เทอมที่แสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระ X_i

$\sum B_{i,i-1} X_i X_{i+1}$ คือ เทอมที่แสดงอิทธิพลร่วมของตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร X_i , X_{i+1}

$\sum B_{ii} X_i^2$ คือ เทอมที่แสดงอิทธิพลของกำลังสองของตัวแปรอิสระ

จากสมการดังกล่าว เมื่อได้ตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญแล้ว จะสามารถสร้างกราฟ contour plot โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป กราฟ contour plot จะมีลักษณะเป็นอนุกรมของเส้นตรงหรือเส้นโค้ง ซึ่งแสดงสภาวะที่ให้ค่าตอบสนองคงที่มีหลายรูปแบบขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรอิสระกับค่าตอบสนอง ดังนั้น จาก contour plot ที่ได้ ทำให้สามารถเลือกภาวะของตัวแปรที่ให้ค่าตอบสนองที่เหมาะสม (optimum point) ได้ เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี multiple regression ได้สมการดังตัวอย่างต่อไปนี้

ศุภฤกษ์ บูรณะคงคาตรี (2538) ได้ทดลองผลิตน้ำใบบัวบกผงด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) โดยวิธี Response Surface Methodology และใช้แผนการทดลองแบบ Box – Behnken Design ศึกษา 3 ตัวแปร จำนวนการทดลอง 15 การทดลอง ซึ่งกำหนดตัวแปรการทดลองได้ดังนี้ ตัวแปรที่ 1 คือ อุณหภูมิลมเข้ามีทั้งหมด 3 ระดับคือ 150 °C (รหัสเป็น 0) 180 °C (รหัสเป็น +1) 120 °C (รหัสเป็น –1) ตัวแปรที่ 2 คือ ปริมาณสารไซโครเดกซ์ทริน (กรัมต่อน้ำใบบัวบก 100 มิลลิลิตร) มีทั้งหมด 3 ระดับคือ 73 กรัม (รหัสเป็น 0) 113 กรัม (รหัสเป็น +1) 33 กรัม (รหัสเป็น –1) ตัวแปรที่ 3 คือ อัตราการไหลของน้ำใบบัวบกเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (มิลลิลิตรต่อนาที) มีทั้งหมด 3 ระดับคือ 19 มิลลิลิตรต่อนาที (รหัสเป็น 0) 29 มิลลิลิตรต่อนาที (รหัสเป็น +1) 9 มิลลิลิตรต่อนาที (รหัสเป็น –1) ประเมินผลทางประสาทสัมผัสด้านสี แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลแบบmultiple regression โดยค่าคงที่และตัวแปรที่จะเกิดขึ้นในสมการนั้น ต้องมีค่าความแตกต่าง (significant level) ในสมการน้อยกว่า 0.05 จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทำให้ได้สมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = 310.7720 - 3.2994x_1 - 210.1870x_2 - 6.2184x_3 + 0.07975x_1^2 + 14.3067x_2^2 + 0.015906x_3^2 + 1.3366x_1x_2 + 0.041031x_1x_3$$

เมื่อ y คือ ทางประสาทสัมผัสทางด้านสี

x_1 คือ อุณหภูมิลมเข้า (°C)

x_2 คือ ปริมาณสารไซโครเดกซ์ตริน (กรัมต่อน้ำใบบัวบก 100 มิลลิลิตร)

x_3 คือ อัตราการไหลของน้ำใบบัวบกเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (มิลลิลิตรต่อนาที)

การหาจุดที่เหมาะสมอาศัยวิธีการดิฟเฟอร์เรนทิเอท (differentitate) โดยเทียบค่า y กับค่า x ทีละตัวได้ดังนี้

$$dy / dx_1 = -3.2994 + 0.1595x_1 + 1.3366x_2 + 0.041031x_3 = 0$$

$$dy / dx_2 = -210.1870 + 28.6134\,x_2\ \ 0.1595x_1 + 1.3366x_1 = 0$$

$$dy / dx_3 = -6.2184 + 0.0318x_3 + 0.041031x_3 = 0$$

ดังนั้น เมื่อทำการแก้สมการแล้วจะได้

$x_1 = 150$

$x_2 = 0.665$

$x_3 = 12.77$

จากการทดลองนี้ สามารถสรุปได้ว่า ในการผลิตน้ำใบบัวบกแบบพ่นฝอย คะแนนทางประสาทสัมผัสด้านสีจะมีค่าสูงสุด (จุดที่เหมาะสม) ที่อุณหภูมิลมเข้ามีค่าเท่ากับ 150 °C ปริมาณสารไซโครเดกซ์ทรินเป็น 0.665 กรัมต่อน้ำใบบัวบก 100 มิลลิลิตร อัตราการไหลของน้ำใบบัวบกเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็น 12.77 มิลลิลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ

3.1.1 แป้งข้าวเจ้า จากบริษัทไทยวา จำกัด

3.2 สารเคมี

3.2.1 โพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน $[C_3H_7Si(OCH_3)_3]$ Fluka ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

3.2.2 เทตราอีทอกซีไซเลน $[Si(OC_2H_5)_4]$ Fluka ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

3.2.3 กลีเซอรอล glycerine zer analyse (et.wa 87%) Merck ประเทศเยอรมัน

3.3 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

3.3.1 เครื่องผสมอาหาร Kitchen aid ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.2 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (single screw extruder) (Brabender OHG DUISBURG, Model 20 DN and DO-CORDER E DCE 330) ประเทศเยอรมัน

3.3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด Metter Toledo AB 204 ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

3.3.4 เครื่องสเปคโทรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer UV – 1601, SHIMADZU Company) ประเทศญี่ปุ่น

3.3.5 เตาเผา (carbolite furnace) ประเทศเยอรมัน

3.3.6 เครื่องวัดความหนืดบราเบนเดอร์ วิสโค – อะมิโลกราฟ (Brabender visco – amylograph , Duisburg) ประเทศเยอรมัน

3.3.7 เครื่องบดข้าว (RETSCH Ultra Centrifugal Mill ZM 1000)

3.3.8 Hot air Oven Memmert ประเทศเยอรมัน

3.3.9 เครื่องวิเคราะห์โปรตีน Buchi 425 ประเทศเยอรมัน

3.3.10 เครื่องวิเคราะห์ไขมัน Buchi B810 ประเทศเยอรมัน

3.3.11 เครื่องวิเคราะห์ dietary fiber Gerharat ประเทศเยอรมัน

3.3.12 เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter) Suntex SP – 701 ประเทศญี่ปุ่น

3.3.13 แผ่นพลาสติก (acrylic sheet) ขนาด 20 x 30 ซ.ม. ต่อขอบสูง 1 ม.ม.

3.3.14 อุปกรณ์เครื่องแก้วต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 สถานที่ทดลอง

ห้องปฏิบัติการภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ห้องปฏิบัติการภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะคหกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปทุมธานี

ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีทางอาหาร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

ห้องปฏิบัติการสาขาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบ

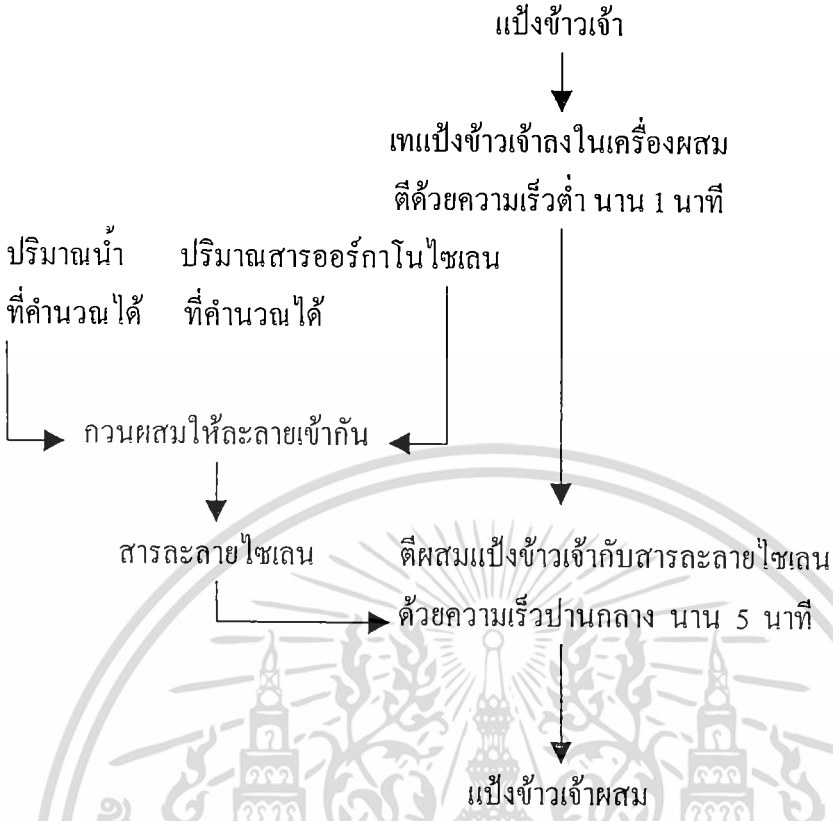
ทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี – กายภาพของแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ได้ถูกดัดแปร ได้แก่ ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน ปริมาณเส้นใย และเถ้า (AOAC. 1998) ปริมาณอะมิโลส (Juliano. 1971) และความหนืด (มอก. ที่ 625 – 2529)

3.5.2 การเตรียมแป้งข้าวเจ้าผสมก่อนป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

การเตรียมแป้งข้าวเจ้าผสม มีขั้นตอนดังนี้ คือ

1. เตรียมชั่งแป้งข้าวเจ้า ซึ่งตรวจวัดค่าความชื้นแล้ว มา 500 กรัม (wet basis) ต่อ 1 ตัวอย่างทดลอง
2. นำแป้งข้าวเจ้าที่ได้จากข้อ 1. มาคำนวณปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อปรับความชื้นของแป้งข้าวเจ้า และคำนวณปริมาณสารไซเลนในการใช้ดัดแปรแป้งข้าวเจ้า
3. ผสมน้ำ และสารไซเลนที่ได้จากข้อ 2. ละลายเข้าด้วยกัน
4. นำแป้งข้าวเจ้าที่ได้จากข้อที่ 1. เทลงในเครื่องผสม เปิดเครื่องผสมโดยใช้ความเร็วต่ำนาน 1 นาที จากนั้นเทส่วนผสมของสารไซเลนจาก ข้อ 3. ลงไปในเครื่องผสม
5. ตีด้วยความเร็วปานกลาง ประมาณ 5 นาที นำแป้งข้าวเจ้าผสมที่ได้เข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมแป้งข้าวเจ้าผสมก่อนป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

3.5.3 การศึกษาสภาวะของการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

นำแป้งข้าวเจ้าผสมที่ผสมสารเคมีมาผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ วางแผนการทดลองโดยใช้ Response Surface Methodology (RSM) เพื่อศึกษาสภาวะการผลิตแป้งข้าวเจ้าดัดแปร โดยศึกษาตัวแปร 4 ตัวแปร แต่ละตัวแปรแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ดังนี้ คือ

ตัวแปรที่ 1 (X_1) คือ ความชื้นรวมของแป้งข้าวเจ้าผสม ขณะป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ระดับความชื้น 13 16 19 22 และ 25%

ตัวแปรที่ 2 (X_2) คือ อุณหภูมิบาร์เรลของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่โซน 3 ณ ระดับอุณหภูมิ 140 150 160 170 และ 180 °C

ตัวแปรที่ 3 (X_3) คือ ความเข้มข้นของโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนที่ระดับปริมาณ 0.0025 0.0075 0.0125 0.0175 และ 0.0225 โมล /โมลแป้งแห้ง

ตัวแปรที่ 4 (X_4) คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ระดับความเร็ว 130 155 180 205 และ 230 รอบต่อนาที

เลือกแบบแผนการทดลองโดยใช้ Central Composite Rotatable Design ศึกษา 4 ตัวแปร 5 ระดับ มีการทดลอง 31 การทดลองที่มีสภาวะการทดลองต่าง ๆ กัน ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองแบบ Central Composite Rotatable Design ที่ใช้ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรด้วยโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน

การทดลองที่	ความชื้น (%)	อุณหภูมิของบาร์เรล (°C)	ความเข้มข้น (mole/mole starch)	ความเร็วรอบ (rpm)
1	16	150	0.0075	155
2	22	150	0.0075	155
3	16	170	0.0075	155
4	22	170	0.0075	155
5	16	150	0.0175	155
6	22	150	0.0175	155
7	16	170	0.0175	155
8	22	170	0.0175	155
9	16	150	0.0075	205
10	22	150	0.0075	205
11	16	170	0.0075	205
12	22	170	0.0075	205
13	16	150	0.0175	205
14	22	150	0.0175	205
15	16	170	0.0175	205
16	22	170	0.0175	205
17	13	160	0.0125	180
18	25	160	0.0125	180
19	19	140	0.0125	180
20	19	180	0.0125	180
21	19	160	0.0025	180
22	19	160	0.0225	180
23	19	160	0.0125	130
24	19	160	0.0125	230
25	19	160	0.0125	180
26	19	160	0.0125	180
27	19	160	0.0125	180
28	19	160	0.0125	180
29	19	160	0.0125	180
30	19	160	0.0125	180
31	19	160	0.0125	180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดลอง 2 ซ้ำ จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาทำการบดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดข้าว โดยผ่านตะแกรงขนาด 60 เมซ (mesh) แล้ววิเคราะห์หาคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรในด้าน response angle (Aguiler *et al.* 1995) สมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ (Amort *et al.* 1985) ระดับการแทนที่ (degree of substitution , DS) (Huls. 1993) และความหนืดด้วยเครื่องบาร์เบนเดอร์วิสโคกราฟ (มอก. ที่ 625 – 2529) โดยทำการทดสอบวิเคราะห์ 2 ซ้ำ นำค่าตอบสนองที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์กับตัวแปรในสภาวะการผลิตที่เลือกศึกษาโดยวิธี multiple regression และสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการโพลีโนเมียลกำลังสอง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป STATGRAPHICS เลือกสภาวะการผลิตที่เหมาะสม (optimization) สำหรับแป้งดัดแปรด้วยโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน

3.5.4 การศึกษาสภาวะของการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารเทตราอีทอกซีไซเลนในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

ทดลองและวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับข้อ 3.5.3. แต่เปลี่ยนปริมาณความเข้มข้นของเทตราอีทอกซีไซเลนเป็น 0.0125 0.0250 0.0375 0.0500 และ 0.0625 โมล/โมลแป้งแห้ง สภาวะในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แผนการทดลองแบบ Central Composite Rotatable Design ที่ใช้ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรด้วยเทตราอีทอกซีไซเลน

การทดลองที่	ความชื้น (%)	อุณหภูมิของบาร์เรล (°C)	ความเข้มข้น (mole/mole starch)	ความเร็วรอบ (rpm)
1	16	150	0.0250	155
2	22	150	0.0250	155
3	16	170	0.0250	155
4	22	170	0.0250	155
5	16	150	0.0500	155
6	22	150	0.0500	155
7	16	170	0.0500	155
8	22	170	0.0500	155
9	16	150	0.0250	205
10	22	150	0.0250	205
11	16	170	0.0250	205
12	22	170	0.0250	205
13	16	150	0.0500	205
14	22	150	0.0500	205
15	16	170	0.0500	205
16	22	170	0.0500	205
17	13	160	0.0375	180
18	25	160	0.0375	180
19	19	140	0.0375	180
20	19	180	0.0375	180
21	19	160	0.0125	180
22	19	160	0.0625	180
23	19	160	0.0375	130
24	19	160	0.0375	230
25	19	160	0.0375	180
26	19	160	0.0375	180
27	19	160	0.0375	180
28	19	160	0.0375	180
29	19	160	0.0375	180
30	19	160	0.0375	180
31	19	160	0.0375	180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.5 ศึกษาปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสมเพื่อทำฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปร

3.5.5.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรจากการเลือกสภาวะการผลิตที่เหมาะสมในข้อ 3.5.3 โดยการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ-เคมีในด้าน response angle (Aguiler *et al.* 1995) สมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ (Amort *et al.* 1985) ระดับการแทนที่ (degree of substitution , DS) (Huls. 1993) และความหนืดด้วยเครื่องบาร์เบนเดอร์วิสโคกราฟ (มอก. ที่ 625 – 2529)

3.5.5.2 นำแป้งข้าวเจ้าปกติและแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนที่ได้ผ่านการเลือกสภาวะเหมาะสมจากข้อ 3.5.3 โดยใช้แป้งกับน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 ตั้งบนอ่างน้ำร้อน (water bath) ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 5 นาที เติมกลีเซอรอล (glycerol) ในอัตราส่วน 0 5 และ 10% โดยน้ำหนักของแป้งข้าวเจ้า พร้อมทั้งกวนตลอดเวลา จากนั้นจึงนำมาทำเป็นแผ่นฟิล์มโดยเทลงบนแผ่นพลาสติก (acrylic sheet) ชั่งน้ำหนัก 60 กรัมต่อแผ่น แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C จนแผ่นฟิล์มแห้ง (เกศศิณี ตระกูลทิวากร และคณะ. 2539)

นำแผ่นฟิล์มที่ผลิตได้ มาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกล ดังต่อไปนี้

1. ทดสอบค่าการต้านทานแรงดึงขาด และการยืดตัวของฟิล์ม
2. ทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม

ทำการทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลทางสถิติตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลในแบบการสุ่มแบบสมบูรณ์ (factorial in Completely Randomized Design ; CRD) และวิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างทรีตเมนท์ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม SPSS Version 7.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลและอภิปรายการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเป้งข้าวเจ้าที่ไม่ได้ถูกดัดแปร

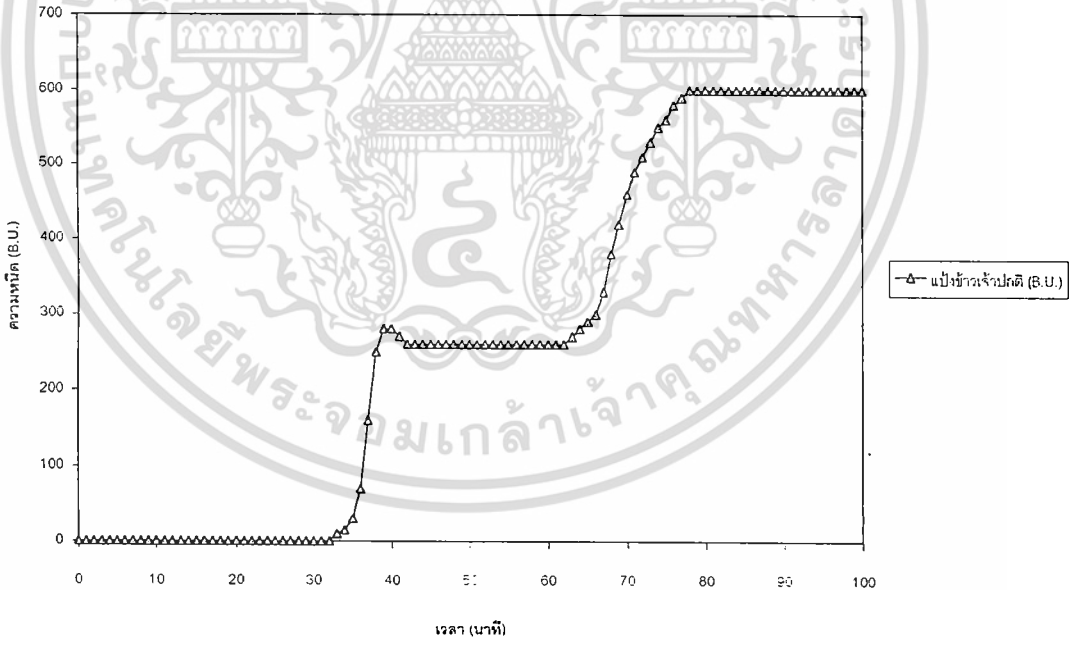
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของแป้งข้าวเจ้าที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการดัดแปร ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด ปริมาณอะมิโลส ค่าความเป็นกรดด่าง response angle และสมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ แสดงในตารางที่ 4.1 ส่วนการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าเมื่อวัดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์วิสโคอะไมโลกราฟ พบว่า ในช่วงของการให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 30 °C ถึง 95 °C เม็ดแป้งมีการดูดน้ำและมีการพองตัวมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น จุดที่เริ่มปรากฏความหนืดที่เครื่องสามารถอ่านได้เรียกอุณหภูมิจุดนี้ว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์มีค่าเท่ากับ 76 – 80 °C และแป้งให้ความหนืดสูงสุดที่ 280 B.U. เพราะมีการพองตัวอย่างเต็มที่ และเมื่อมีการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง โดยรักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 95 °C นาน 15 นาที เม็ดแป้งที่พองตัวเต็มที่จะแตกออก มีผลให้ความหนืดลดลงเรื่อย ๆ โดยความหนืดที่ 95 °C นาน 15 นาที มีค่าเท่ากับ 260 B.U. และเมื่อลดอุณหภูมิลงจนถึง 50 °C ในช่วงการทำให้เย็น (cooling) ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเป็น 600 B.U. ทั้งนี้เพราะเกิดการคืนตัวของอะมิโลสที่กระจัดกระจายออกมาจากโมเลกุลของแป้ง ค่าความหนืดที่จุดต่าง ๆ ของแป้งข้าวเจ้าดังแสดงในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งข้าวเจ้าปกติ

สมบัติทางเคมีและกายภาพ	ค่าที่วัดได้
ความชื้น	10.78%
โปรตีน	4.92%
ไขมัน	0.23%
เถ้า	0.28%
เส้นใย	0.11%
คาร์โบไฮเดรต	83.68%
อะมิโลส	21.85%
ความเป็นกรดด่าง	5.82
response angle	50 °
สมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ	75 วินาที

หมายเหตุ : ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ 2 ครั้ง



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ศึกษาสภาวะของการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

ทำการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ โดยใช้แผนการทดลอง Response Surface Methodology แบบ Central Composite Design เพื่อศึกษาผลของตัวแปรในสภาวะการผลิตแป้งข้าวเจ้าดัดแปร 4 ตัวแปร คือ ความชื้นของแป้งข้าวเจ้าผสมขณะป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ อุณหภูมิของบาร์เรล ความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน และความเร็วรอบสกรู เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรในด้าน response angle สมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ ระดับการแทนที่ และการเปลี่ยนแปลงความหนืด ได้แก่ ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดที่ 95 °C ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 °C ครบ 15 นาที และความหนืดที่ 50 °C จะได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน

การทดลองที่	response angle (°) Y_1	สมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ (วินาที) Y_2	ระดับการแทนที่ (โมลซิลิคอน /โมลแป้งแห้ง) Y_3
1	32	65	0.00261
2	38	90	0.00139
3	35	43	0.00279
4	36	71	0.00327
5	30	84	0.00700
6	32	161	0.00815
7	31	67	0.00738
8	31	162	0.00903
9	31	55	0.00299
10	35	34	0.00205
11	32	41	0.00214
12	34	81	0.00244
13	28	80	0.00078
14	33	139	0.00877
15	31	67	0.00852
16	30	149	0.00828
17	29	137	0.00334
18	30	57	0.00357
19	34	167	0.00451
20	29	118	0.00402
21	32	65	0.00111
22	33	122	0.00932
23	34	147	0.00519
24	32	92	0.00484
25	29	122	0.00368
26	30	111	0.00320
27	33	84	0.00390
28	31	132	0.00262
29	32	151	0.00240
30	35	161	0.00297
31	33	121	0.00275

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน

การทดลองที่	อุณหภูมิเริ่มเจลาติไนเซชั่น (°C)	ความหนืดสูงสุด (B.U.) Y_4	ความหนืดที่ 95 °C (B.U.) Y_5	ความหนืดที่ 95 °C ครบ 15 นาที (B.U.) Y_6	ความหนืดที่ 50 °C (B.U) Y_7
1	-	50	20	20	40
2	-	60	30	30	40
3	-	60	30	30	50
4	-	70	40	30	50
5	-	60	40	40	60
6	-	50	30	20	30
7	-	50	30	30	30
8	-	60	40	30	30
9	-	40	30	30	40
10	-	60	30	30	40
11	-	50	20	20	30
12	-	60	40	40	40
13	-	60	30	30	30
14	-	50	30	30	30
15	-	60	40	30	30
16	-	60	40	40	50
17	-	40	30	20	30
18	-	80	50	30	40
19	-	60	30	30	30
20	-	70	40	40	70
21	-	50	30	30	40
22	-	40	20	20	40
23	-	60	30	30	30
24	-	40	30	20	40
25	-	50	20	20	30
26	-	40	20	20	30
27	-	30	20	20	30
28	-	60	40	30	60
29	-	50	30	30	30
30	-	40	30	30	40
31	-	50	20	20	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าตอบสนอง (response) ที่ได้จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 มา fit model ด้วยขั้นตอน multiple regression โดยโปรแกรม STATGRAPHIC version 7.0 (ภาคผนวก ง.3)โดยพิจารณาตัวแปรอื่น ๆ ที่มีค่า significant level ที่น้อยกว่า 0.05 จะปรากฏค่าในสมการดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในสภาวะการผลิตกับค่าตอบสนอง โดยวิธี multiple regression เมื่อดัดแปรด้วยด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน

Generated Regression Equation
$Y_1 = 7.4226X_1$
$Y_3 = 0.1272 - 0.00116X_2 + 0.0000038X_2^2 + 25.3256X_3^2 + 0.0000009X_4^2$

X_1 คือ ปริมาณความชื้นของแป้งข้าวเจ้าผสมก่อนป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (%)

X_2 คือ ระดับอุณหภูมิ ($^{\circ}C$)

X_3 คือ ปริมาณความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (โมล/โมลแป้งแห้ง)

X_4 คือ ความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที)

Y_1 คือ reponse angle ($^{\circ}$) Y_2 คือ สมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ (วินาที)

Y_3 คือ ระดับการแทนที่ (โมลซิลิลคอน/โมลแป้งแห้ง) Y_4 คือ ความหนืดสูงสุด (B.U.)

Y_5 คือ ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 $^{\circ}C$ (B.U.)

Y_6 คือ ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 $^{\circ}C$ ครบ 15 นาที (B.U.)

Y_7 คือ ความหนืดที่อุณหภูมิ 50 $^{\circ}C$ (B.U.)

ตัวแปรอื่น ๆ ที่มีค่า significant level มากกว่า 0.05 จะไม่ปรากฏค่าในสมการดังตารางในผนวก ง.3

จากตารางที่ 4.4 เมื่อนำผลค่าตอบสนองที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์กับตัวแปรในสภาวะการผลิตที่เลือกศึกษา โดยวิธี multiple regression จะได้สมการแสดงดังต่อไปนี้

4.2.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับ response angle (Y_1)

สมการที่ได้นี้เป็นสมการเส้นตรงที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของความชื้นของแป้งข้าวเจ้าผสมก่อนป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (X_1) กับ response angle (Y_1)

$$Y_1 = 7.4226X_1 \quad \text{.....(1)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าค่า response angle มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าปริมาณความชื้นของแป้งข้าวเจ้าผสมขณะป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์เพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น กล่าวคือ ยิ่งค่าความชื้นของแป้งข้าวเจ้าผสมขณะป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สูงขึ้น ค่าของ response angle ก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นในการทดลองนี้ จะใช้อุณหภูมิและแรงเฉือนที่สูง คือ จะใช้อุณหภูมิในช่วง 140 – 180 °C และความเร็วรอบของสกรูในช่วง 130 – 230 rpm ทำให้โครงสร้างของโมเลกุลของแป้งถูกทำลายลงมาก และมีขนาดความยาวของโมเลกุลสั้นกว่าเดิม โดยแป้งจะเกิดเจลาติไนซ์ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำสูงขึ้น จึงมีอิทธิพลทำให้สามารถดูดซับน้ำได้ดี

จากผลการทดลองพบว่า แป้งข้าวเจ้าก่อนดัดแปรวัดค่า response angle มีค่าเท่ากับ 50° ดังแสดงตารางที่ 4.1 ขณะที่แป้งข้าวเจ้าเมื่อผ่านการดัดแปรแล้วจะมีค่า response angle น้อยกว่าแป้งปกติ ดูได้จากตารางที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Huangrak (1995) ที่ทำการศึกษาเรื่องการดัดแปรแป้งมันฝรั่งด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนในสภาวะกระบวนการโดยใช้น้ำ (wet process) และไม่ใช้น้ำ (dry process) ซึ่งพบว่า ค่าของ response angle จากแป้งมันฝรั่งไม่ได้ทำการดัดแปร และการดัดแปรโดยกระบวนการโดยไม่ใช้น้ำ มีค่าสูงกว่าแป้งมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรโดยกระบวนการโดยใช้น้ำ กล่าวคือ ค่าของ response angle ที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 40° ขณะที่แป้งมันฝรั่งปกติ และแป้งมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรโดยกระบวนโดยไม่ใช้น้ำ มีค่าเท่ากับ 60.8° และ 60.6° ตามลำดับ (ตารางที่ 2.2) สาเหตุที่ค่า response angle แตกต่างกัน เพราะการกระจายตัวของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนสัมผัสกับโมเลกุลแป้งในกระบวนการโดยใช้น้ำดีกว่าในกระบวนการโดยไม่ใช้น้ำ ขณะที่การดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (ตารางที่ 4.2) จะใช้อุณหภูมิและแรงเฉือนที่สูงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวเต็มที่และแตกออก สารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนจึงเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินภายในเม็ดแป้งได้มากกว่า ทำให้ค่า response angle ของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรที่ได้มีค่าน้อยกว่าแป้งข้าวเจ้าปกติ

ค่าของ response angle ที่ลดลง แสดงว่าแป้งดัดแปรที่ได้มีคุณสมบัติในการไหล หรือความลื่น (free flowing) ดีกว่าแป้งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร ซึ่งจะมีแนวโน้มแสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) มากขึ้น เมื่อนำแป้งดัดแปรดังกล่าวมาทำเป็นฟิล์มจะทำให้ฟิล์มนั้นไม่ดูดซับความชื้นจากบรรยากาศได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Amort *et al.* (1985) ซึ่งศึกษาการดัดแปรแป้งข้าวโพดด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนในสภาวะใช้น้ำ พบว่า แป้งข้าวโพดดัดแปรที่ได้มีคุณสมบัติด้านการไหลที่ดี (good free – flowing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับคุณสมบัติการลอยบนผิวน้ำ (Y_2)

พบว่าค่าของคุณสมบัติการลอยบนผิวน้ำไม่มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา จากการทดสอบ พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการลอยตัวของแป้งข้าวเจ้าปกติ เท่ากับ 75 วินาที (ตารางที่ 4.1) ขณะที่แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรส่วนใหญ่ใช้ระยะเวลาในการลอยตัวบนผิวน้ำน้อยกว่าแป้งปกติ โดยดูได้จากตารางที่ 4.2

เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของ Huangrak (1995) ซึ่งดัดแปรแป้งมันฝรั่งด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนโดยกระบวนการใช้น้ำ แป้งมันฝรั่งดัดแปรที่ได้มีระยะเวลาในการลอยตัวบนผิวน้ำมากกว่า 24 ชั่วโมง ส่วนงานวิจัยของ Amort *et al.* (1985) พบว่า แป้งข้าวโพดดัดแปรที่ได้ก็มีระยะเวลาในการลอยตัวบนผิวน้ำมากกว่า 24 ชั่วโมง ขณะที่การทดลองวิจัยนี้ระยะเวลาในการลอยตัวบนผิวน้ำมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผลการวิจัยของ Huangrak (1995) และ Amort *et al.* (1985) สรุปได้ว่า คุณสมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำของตัวอย่างที่ได้จากการทดลองนี้ไม่มี

เหตุผลที่ค่าสมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำของแป้งไม่เกิดขึ้นนั้น พบว่า วิธีการของการดัดแปรแป้งมันฝรั่งในกระบวนการของสภาวะการผลิตโดยกระบวนการใช้น้ำของ Huangrak (1995) จะใช้อุณหภูมิประมาณ 50 – 60 °C ส่วน Amort *et al.* (1985) ทำการดัดแปรแป้งในสภาวะการผลิตแขวนลอยโดยในน้ำ อุณหภูมิที่ใช้ 25 – 30 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งข้าวเจ้าปกติซึ่งจะอยู่ในช่วง 70 – 75 °C (Swinkle. 1985) ขณะที่กระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นจะใช้อุณหภูมิสูงกว่า คือ จะใช้ในช่วง 140 – 180 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ แป้งจะเกิดเจลาติไนซ์ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำสูงขึ้น แป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนโดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น จึงละลายน้ำได้ดี ดังนั้น สมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำจึงไม่เกิดขึ้น

4.2.3 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับค่าระดับการแทนที่ (Y_3)

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ได้จากตารางที่ 4.4 คือ

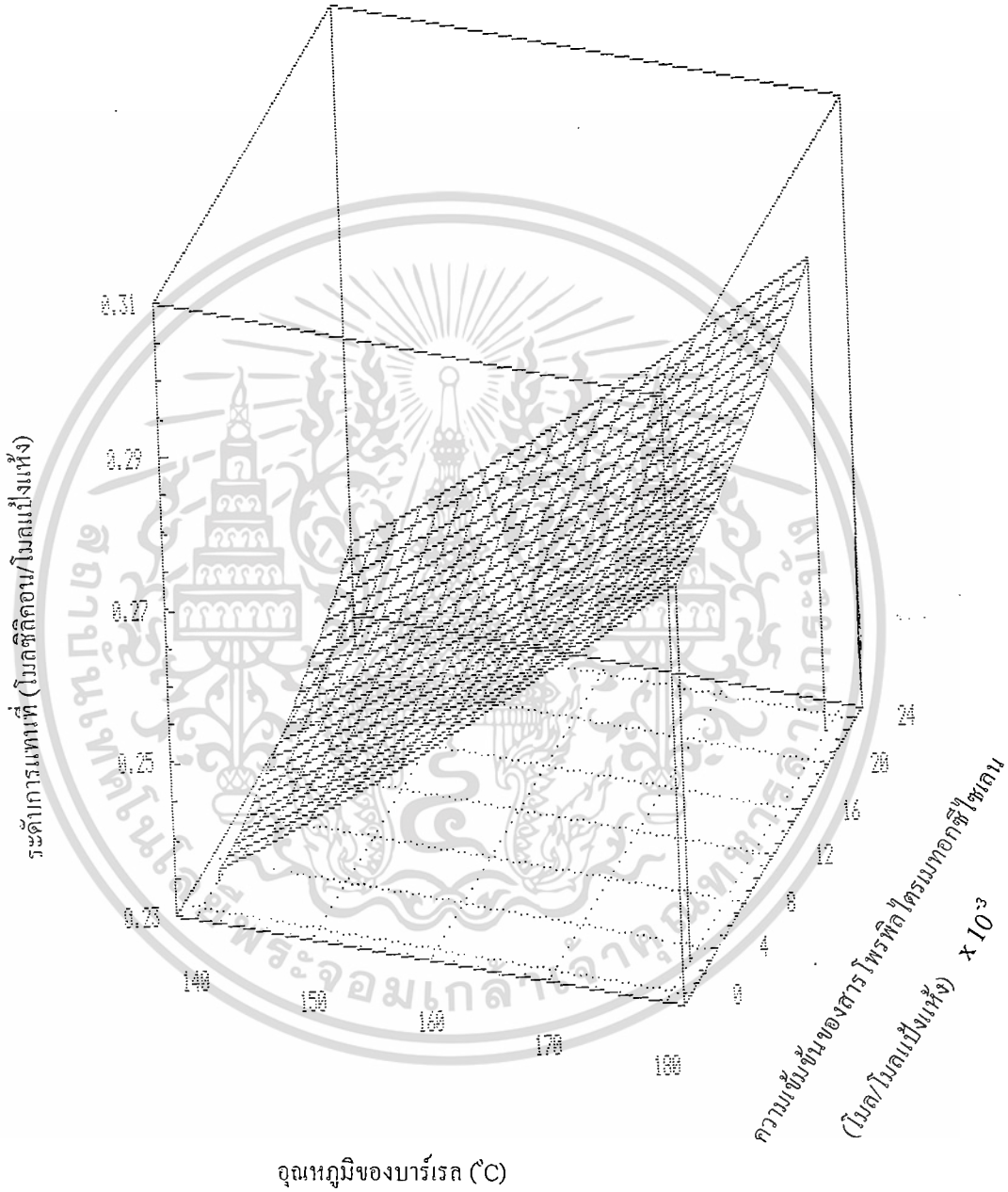
$$Y_3 = 0.127272 - 0.00116X_2 + 0.0000038X_2^2 + 25.3256X_3^2 + 0.0000009X_4^2 \quad \text{.....(2)}$$

พบว่า ค่าระดับการแทนที่ที่ได้มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของบาร์เรล ความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน และความเร็วรอบสกรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

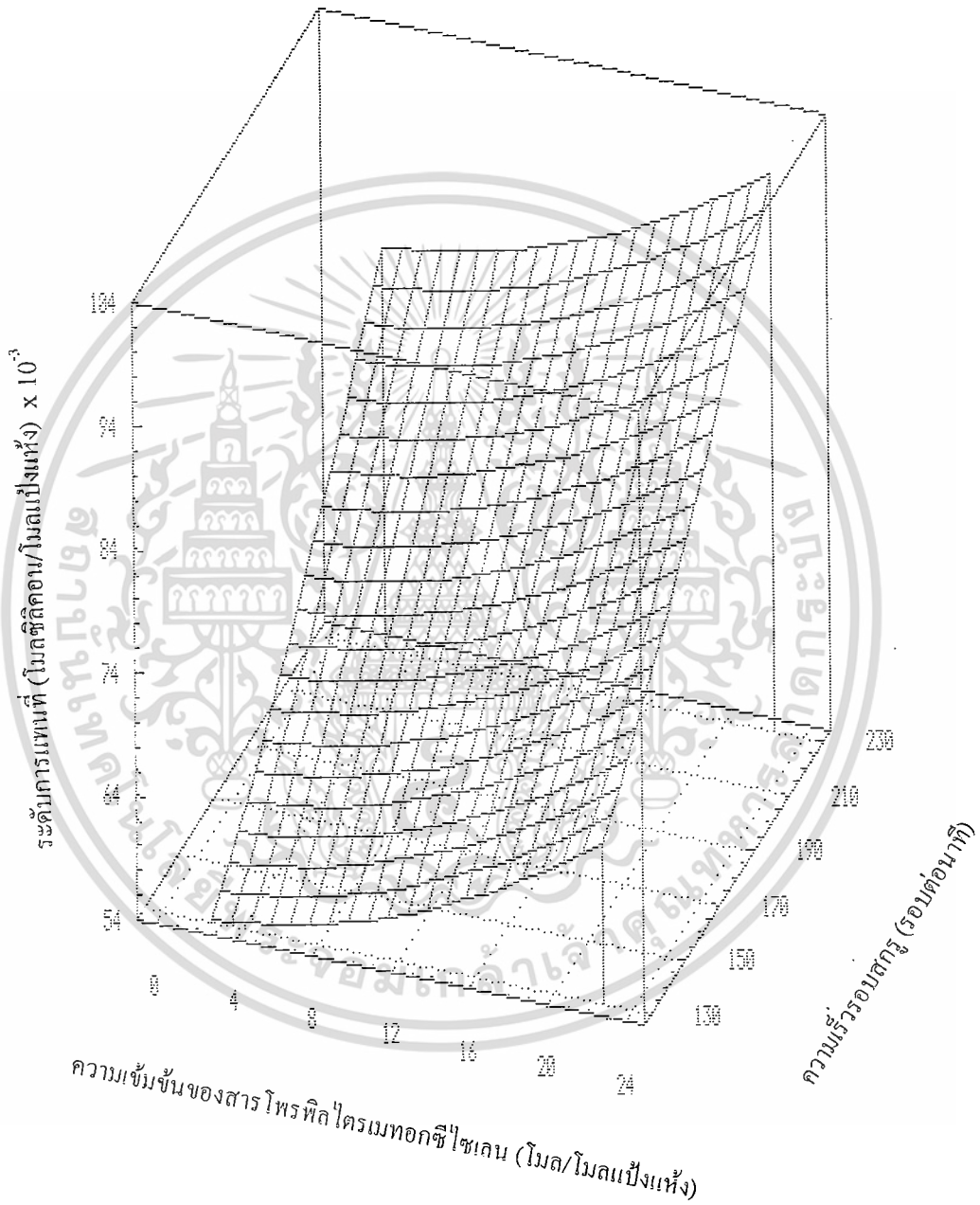
เนื่องจากสมการที่ได้ไม่เป็นสมการ linear แต่เป็นสมการ quardratic ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมบางช่วงเท่านั้น เมื่อนำมา differentiate และหาจุดตัด เพื่อหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสม (optimum condition) พบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้อุณหภูมิของบาร์เรล 152 °C ความเข้มข้นของโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน 0.0391 โมล/โมลแป้งแห้ง และความเร็วรอบของสกรู 207 รอบต่อนาที จากการคำนวณมีระดับการแทนที่ที่สภาวะนี้ คือ 0.0776 โมลซิลิคอนต่อโมลแป้งแห้ง (ภาคผนวก ง.4) เมื่อนำไปสร้าง response surface plot ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนกับอุณหภูมิของบาร์เรลต่อระดับการแทนที่โดยกำหนดความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 180 รอบต่อนาที จะได้สมการคือ $Y_3 = 0.15636 + 0.0000038X_2^2 + 25.3256X_3^2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนกับความเร็วรอบสกรูต่อระดับการแทนที่ โดยกำหนดอุณหภูมิเท่ากับ 160 °C และ สมการที่ได้คือ $Y_3 = 0.03888 + 25.3256X_3^2 + 0.0000009X_4^2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วรอบสกรูต่อระดับการแทนที่โดยกำหนดความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนเท่ากับ 0.0125 โมล/โมลแป้งแห้ง และสมการที่ได้คือ $Y_3 = 0.131157 - 0.00116X_2 + 0.0000038X_2^2 + 0.0000009X_4^2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



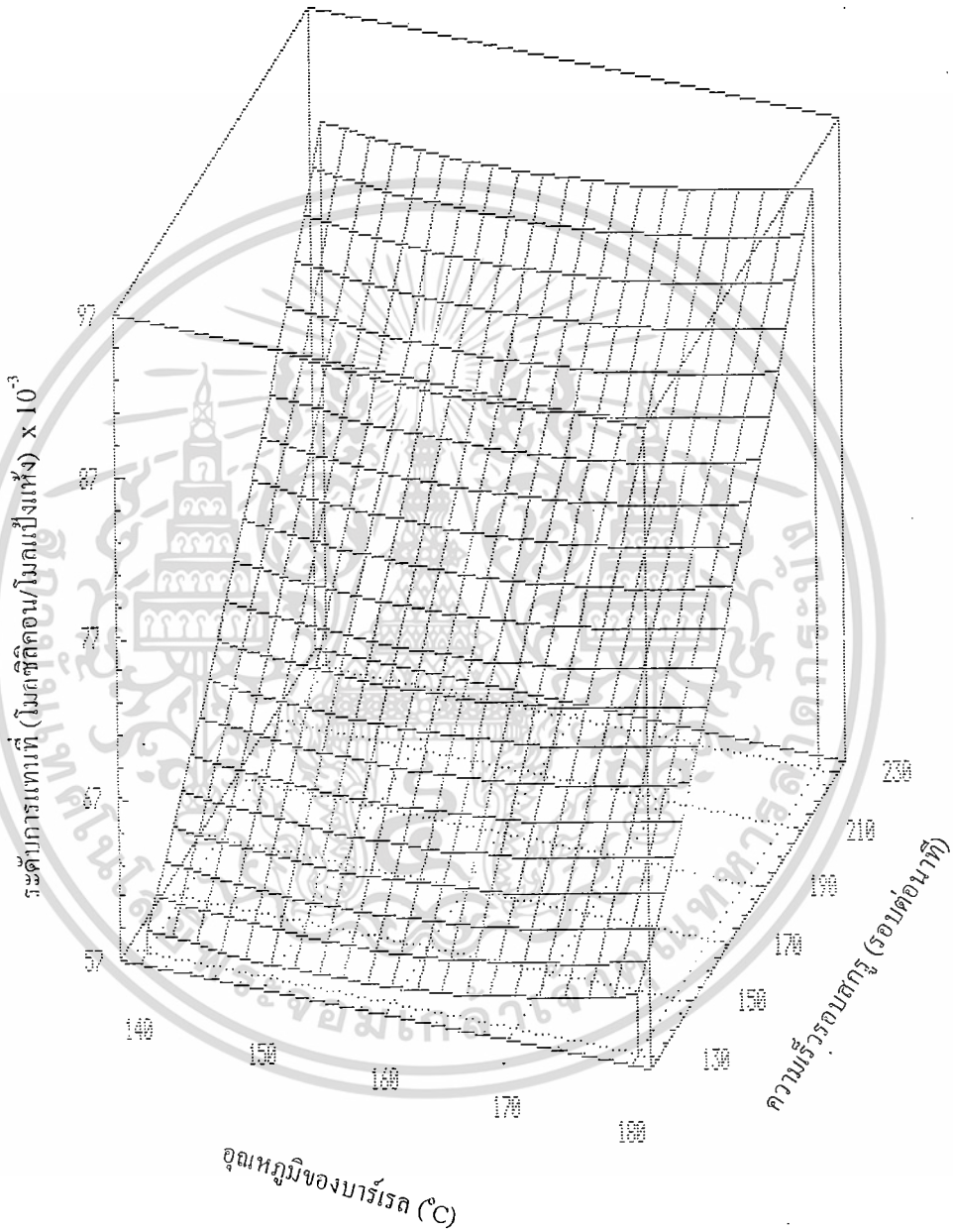
รูปที่ 4.2 Response surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างระดับการแทนที่ (โมลซิลิลคอน/โมลแป้งแห้ง) กับอุณหภูมิของบาร์เรล (°C) และความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (โมล/โมลแป้งแห้ง) ที่ความเร็วรอบสกรู 180 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 Response surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างระดับการแทนที่ (โมลซิลิลคอน/โมลแป้งแห้ง) กับความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (โมล/โมลแป้งแห้ง) และความเร็วรอบสกรูที่อุณหภูมิของบาร์เรล 160 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 Response surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างระดับการแทนที่ (โมลซิลิลคอน/โมลแป้งแห้ง) กับอุณหภูมิของบาร์เรล(°C) และความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที) ที่ความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน 0.0125 (โมล/โมลแป้งแห้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากเส้นกราฟสามมิติในรูปที่ 4.2 พบว่า ณ ความเร็วรอบสกรูคงที่ที่ 180 รอบต่อนาที อุณหภูมิของบาร์เรลเพิ่มขึ้น ค่าระดับการแทนที่จะสูงขึ้นตาม ในขณะที่ความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนเพิ่มขึ้น ค่าระดับการแทนที่ก็จะสูงขึ้นตามเช่นกัน แต่การเพิ่มระดับของอุณหภูมิ มีผลทำให้ค่าระดับการแทนที่มีค่ามากกว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน ส่วนในรูปที่ 4.3 ณ อุณหภูมิของบาร์เรลคงที่ที่ 160 °C พบว่าความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนพิ่มขึ้น ค่าระดับการแทนที่จะสูงขึ้นตาม ในขณะที่ความเร็วรอบสกรูมากขึ้น ค่าระดับการแทนที่ก็จะสูงขึ้นตามเช่นกัน แต่การเพิ่มความเร็วรอบสกรูมีผลทำให้ค่าระดับการแทนที่มีค่ามากกว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน และในรูปที่ 4.4 ณ ความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนคงที่ที่ 0.0125 โมล/โมลแป้งแห้ง พบว่า อุณหภูมิของบาร์เรลเพิ่มขึ้น ค่าระดับการแทนที่จะสูงขึ้นตาม ในขณะที่ความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้น ค่าระดับการแทนที่ก็จะสูงขึ้นเช่นกัน แต่การเพิ่มความเร็วรอบสกรู มีผลทำให้ค่าระดับการแทนที่เพิ่มมากกว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

ระดับการแทนที่ที่เกิดขึ้นจะบ่งบอกว่ามีปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างแป้งกับสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนมากหรือน้อย จากผลการทดลองนี้ การทดลองทำในสภาวะกึ่งแห้งในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ได้ระดับการแทนที่เท่ากับ 0.0338 โมลซิลิคอนต่อโมลแป้ง ที่อุณหภูมิ 152 °C ความเร็วรอบสกรู 207 รอบต่อนาที และความเข้มข้นของโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน 0.0391 โมล/โมลแป้งแห้ง (ตารางที่ 4.7) สาเหตุที่ระดับการแทนที่มีค่ามาก เนื่องจากเม็ดแป้งเกิดการพองตัวสูงและโครงสร้างภายในแตกออก สารเคมีจึงเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินภายในเม็ดแป้งได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าระดับการแทนที่ของการทดลองนี้มีค่าสูงมากเช่นนี้ อาจจะเป็นไปได้ว่า ตัวอย่างไม่ได้มีการล้างเพื่อกำจัดสารที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาก่อนวิเคราะห์หาระดับการแทนที่ ทำให้ปริมาณที่วิเคราะห์ได้อาจเป็นปริมาณสารที่ไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยารวมอยู่ด้วย

สำหรับค่าระดับการแทนที่ของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนที่ได้จากการคำนวณและการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.0776 และ 0.0338 โมลซิลิคอนต่อโมลแป้งแห้ง ซึ่งมีค่าแตกต่างกันถึง 129 % เนื่องจากในทางคำนวณซึ่งเป็นทางทฤษฎีจะเป็นค่าตัวเลขในทางอุดมคติ (ideal) ซึ่งเป็นการทำนายบอกถึงปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ขณะที่ในการทดลองซึ่งเป็นทางปฏิบัติ (practical) ปฏิกิริยาอาจเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เพราะอาจจะมีปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ชนิดของอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ และสารเคมีที่ใช้ เป็นต้น เช่น เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวและสกรูคู่ที่ใช้ มีประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาที่ได้จะแตกต่างกัน จึงอาจจะเป็นสาเหตุทำให้ค่าระดับการแทนที่เกิดขึ้นน้อยกว่าทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับความหนืดสูงสุด (Y_4)

จากการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรกับค่าความหนืดสูงสุด (ตารางที่ 4.3) พบว่า ความหนืดสูงสุดไม่มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษา

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน โดยพิจารณาจากอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชั่น และค่าความหนืดสูงสุด พบว่า ไม่ปรากฏอุณหภูมิของการเจลาติไนเซชั่นของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรทั้ง 31 การทดลอง และทุกการทดลองให้ความข้นหนืดเมื่อเมื่อละลายน้ำที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากแป้งถูกเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิสูงมากในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น โดยในการทดลองนี้จะใช้อุณหภูมิในช่วง 140 – 180 °C ทำให้แป้งสามารถละลายน้ำได้ สำหรับค่าความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรทุกสภาวะการทดลองมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแป้งข้าวเจ้าปกติซึ่งมีค่าความหนืดสูงสุดเท่ากับ 280 B.U. ค่าความหนืดสูงสุดนี้จะบอกว่าเม็ดแป้งมีการดูดน้ำและพองตัวมาก หากทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น เม็ดแป้งจะพองตัวได้น้อยและอัตราการเพิ่มความหนืดจะต่ำทำให้ค่าความหนืดสูงสุดจึงมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากเม็ดแป้งส่วนที่พองตัวมีปริมาณมากกว่าเม็ดแป้งส่วนที่แตกตัว ซึ่งเป็นไปทำนองเดียวกับการทดลองของนุชฤดี ศิริบุญ (2534) ที่ศึกษาการดัดแปรข้าวเจ้าแบบครอสลิงด้วยอิพิคลอโรไฮดริน 0.001, 0.01 และ 0.1% ในสารละลายที่มีความเป็นกรดด่าง ตั้งแต่ 3.5 – 8.0 พบว่า แป้งข้าวเจ้าดัดแปรแบบครอสลิงด้วยความเข้มข้น 0.1% ให้ความหนืดต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้าดัดแปร 0.001 และ 0.01% และแป้งข้าวเจ้าปกติทุกความเป็นกรดด่างที่ศึกษา โดยเฉพาะที่ความเป็นกรดด่างที่เป็นกรด แป้งข้าวเจ้าดัดแปรจะเกิดรีโทรเกรเดชั่นสูง และมีความหนืดเมื่อเย็นที่อุณหภูมิ 50°C เพิ่มขึ้น หรือในการทดลองของ Wurzburg (1972) ได้แสดงอะมิโลแกรมของแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวโพดดัดแปรด้วยอิพิคลอโรไฮดริน 2 ชนิด พบว่า แป้งดัดแปรที่ระดับต่ำ 1 พันธะต่อน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส 1300 หน่วย หรือ เอจียู (1 – crosslink per 1300 anhydroglucose unit หรือ AGU) จะทำให้ความหนืดสูงสุดต่ำกว่าความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวโพดปกติโดยที่ความหนืดจะไม่ลดลงตลอดการให้ความร้อน ส่วนแป้งที่มีระดับการดัดแปรระดับสูง คือ 1 พันธะต่อ 440 เอจียู เมื่อต้มจะพองตัวได้น้อยทำให้มีความหนืดต่ำและไม่มีความหนืดสูงสุด แต่ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตลอดการให้ความร้อน Rutenberge and Solarek (1984) สรุปว่า การดัดแปรแบบครอสลิงมีผลทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้ช้าลง มีผลทำให้เกิดเจลาติไนเซชั่นช้าลง อุณหภูมิเจลาติไนเซชั่นจึงเพิ่มขึ้น แป้งดัดแปรจะมีความหนืดสูงสุดมากกว่าเมื่อเทียบกับแป้งปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับความหนืดที่อุณหภูมิ 95 °C (Y_5)

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 95 °C ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา

พบว่า ความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 95 °C ของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนมีค่าลดลงทั้ง 31 การทดลอง และมีค่าความหนืดต่ำมาก (ตารางที่ 4.3) เมื่อเทียบกับแป้งข้าวเจ้าปกติซึ่งมีค่าความหนืดเท่ากับ 280 B.U. เหตุผลที่ทำให้ความหนืดของแป้งดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มีค่าน้อยกว่าความหนืดของแป้งข้าวเจ้าปกติ เนื่องจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นใช้อุณหภูมิและแรงเฉือนที่สูง โครงสร้างโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินจะถูกทำลายเช่นเดียวกับกระบวนการเด็กซ์ทริไนเซชั่น (dextrinization) ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อนแป้งแห้งในสภาวะที่เป็นกรดในช่วงอุณหภูมิ 100 – 200 °C โดยจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่พันธะ α -1,4 และการเกิด repolymerization ภายในเม็ดแป้ง ดังนั้น โมเลกุลของแป้งที่เกิดโมเลกุลสายสั้น (short chain) เป็นจำนวนมากในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น จึงทำให้ความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรต่ำลง

4.2.6 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับความหนืดที่อุณหภูมิ 95°C เมื่อให้ความร้อน 15 นาที (Y_6)

จากตารางที่ 4.3 ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 95 °C เมื่อให้ความร้อน 15 นาที ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา พบว่า ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 °C เมื่อให้ความร้อน 15 นาทีของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนมีค่าความหนืดต่ำมากทั้ง 31 การทดลอง (ตารางที่ 4.3) เมื่อเทียบกับแป้งข้าวเจ้าปกติมีค่าความหนืดที่ 280 B.U. ซึ่งแสดงว่าเกิดโมเลกุลของแป้งที่เป็น oligomers สายสั้น ๆ (short chain) เป็นจำนวนมาก เนื่องจากพันธะในโมเลกุลของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรในการทดลองนี้ถูกทำลายลงอย่างมากด้วยแรงเฉือน ส่งผลให้หมู่ไฮดรอกซิลภายในโมเลกุลแป้งมีอิสระและสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลน้ำที่อยู่รอบ ๆ ได้มากขึ้น

ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 95 °C จะบ่งบอกถึงความคงตัว (consistency) ของพันธะภายในเม็ดแป้งว่ามีความแข็งแรง หรือยึดเกาะกันได้แน่นมากน้อยในการทนต่อสภาวะต่าง ๆ อาทิ แรงเฉือน อุณหภูมิสูง ความเป็นกรดด่าง เป็นต้น โดยพิจารณาจากค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเท่าใด เหตุผลที่ทำให้เสถียรภาพของความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรน้อย เนื่องจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นใช้อุณหภูมิ และแรงเฉือนที่สูง โมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลสเพคตินจะถูกทำลาย ทำให้พันธะภายในเม็ดแป้งอ่อนแอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกับความหนืดที่อุณหภูมิ 50°C (Y_7)

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าของความหนืดที่อุณหภูมิ 50 °C ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา

ความหนืดที่อุณหภูมิ 50 °C บอกถึงการเกิดรีโทรเกรเดชั่นของแป้งว่าเร็วหรือช้าต่างกัน เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชั่นแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อปล่อยให้เย็นตัวโมเลกุลของอะมิโลสจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหสามมิติที่สามารถอุ้มน้ำ มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลหรือฟิล์มคล้ายผลึก ผลจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน พบว่า เมื่อลดอุณหภูมิลงที่อุณหภูมิ 50 °C ค่าความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนเพิ่มขึ้นน้อยทั้ง 31 การทดลอง และมีค่าความหนืดต่ำมาก (ตารางที่ 4.3) เมื่อเทียบกับแป้งข้าวเจ้าปกติซึ่งมีค่าความหนืดเท่ากับ 600 B.U. แสดงว่าเกิดรีโทรเกรเดชั่นน้อย

เหตุผลที่ทำให้รีโทรเกรเดชั่นของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรไม่เกิดขึ้น เนื่องจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นซึ่งใช้อุณหภูมิและแรงเฉือนที่สูง ทำให้โมเลกุลของแป้งอยู่ห่างและกระจัดกระจายมากยิ่งขึ้น ขณะเดียวกัน ขนาดของโมเลกุลของอะมิโลสที่เป็นอิสระซึ่งมีขนาดเล็กมากเนื่องจากแรงเฉือน จึงเคลื่อนที่เข้าหากันเพื่อจับตัวกันให้เป็นระเบียบได้ยากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของอะมิโลสที่สั้นจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (brownian movement) ทำให้แป้งสุกที่ได้มีลักษณะข้นหนืดต่ำ รีโทรเกรเดชั่นของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการทำให้เย็น อุณหภูมิต่ำ ระยะเวลา ความเป็นกรดด่างของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะมิโลส อะมิโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในแป้ง (กล้าณรงค์ ศรีรอต. 2542)

สำหรับค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืด ได้แก่ ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดที่ 95 °C ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 °C ครบ 15 นาที และความหนืดที่ 50 °C อาจจะใช้สมบัติของความหนืดดังกล่าวเป็นดัชนีบอกถึงระดับการแทนที่ที่เกิดขึ้นได้ หากค่าระดับการแทนที่เกิดขึ้นจะทำให้พฤติกรรมความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรในระหว่างการให้ความร้อนและการทำให้เย็นมีการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ เกิดขึ้น แต่จากการทดลองวิจัยนี้ ค่าระดับการแทนที่ไม่มีความสัมพันธ์กับสมบัติของความหนืด เนื่องจากค่าระดับการแทนที่ที่เกิดขึ้นไม่ได้ทำให้พฤติกรรมของความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนเกิดการเปลี่ยนแปลงในแนวโน้มในทางเดียวกัน ดังนั้น ค่าระดับการแทนที่ในการทดลองนี้จึงไม่สามารถใช้เป็นตัวชี้ความสัมพันธ์ของระดับการแทนที่กับสมบัติความหนืดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่า การศึกษาสภาวะของการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ จากการแก้สมการความสัมพันธ์ของค่าตอบสนองกับตัวแปรที่ศึกษามาแก้สมการดังกล่าวเพื่อหาค่าจุดที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิของบาร์เรล 152°C ความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนที่ 0.0391 mole / mole starch db. และความเร็วรอบของสกรูที่ 207 rpm โดยจะให้ค่าของ response angle การลอยตัวบนผิวน้ำ ระดับการแทนที่ เท่ากับ 35° 215 วินาที และ 0.0338 ตามลำดับ ขณะที่ค่าความหนืดสูงสุด และความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 50 °C เท่ากับ 210 และ 100 B.U.

4.3 ศึกษาสภาวะของการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารเทตราอีทอกซีไซเลนในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

ผลการทดลองของการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าโดยใช้เทตราอีทอกซีไซเลน ร่วมกับการใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่สภาวะการผลิตที่กำหนด จะแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารเทตราอีทอกซีไซเลน

การทดลองที่	Response angle ($^\circ$) : Y_1	สมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ (วินาที) : Y_2	ระดับการแทนที่ : Y_3
1	32	71	0.0109
2	29	83	0.0079
3	28	63	0.0082
4	33	59	0.0090
5	32	52	0.0170
6	29	69	0.0178
7	31	69	0.0214
8	32	61	0.0183
9	34	42	0.0100
10	28	57	0.0092
11	32	34	0.0090
12	32	57	0.0094
13	31	69	0.0206
14	36	64	0.0200
15	35	47	0.0190
16	33	69	0.0192
17	35	117	0.0157
18	29	59	0.0136
19	32	44	0.0137
20	28	53	0.0143
21	30	59	0.0058
22	33	71	0.0256
23	33	26	0.0120
24	31	78	0.0147
25	31	35	0.0140
26	31	30	0.0137
27	27	46	0.0144
28	30	43	0.0152
29	32	52	0.0146
30	30	56	0.0142
31	34	44	0.0144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารเทตราอีทอกซีไซเลน

การทดลองที่	อุณหภูมิเริ่มเจลาติไนเซชั่น (°C)	ความหนืดสูงสุด (B.U.) ; Y_4	ความหนืดที่ 95 °C ; Y_5 (B.U.)	ความหนืดที่ 95°C ครบ 15 นาที ; Y_6 (B.U.)	ความหนืดที่ 50 °C ; Y_7 (B.U.)
1	-	30	20	20	30
2	-	60	30	30	40
3	-	40	30	30	30
4	-	60	30	40	50
5	-	50	20	20	30
6	-	60	40	30	30
7	-	50	20	20	30
8	-	40	30	30	30
9	-	50	30	20	20
10	-	40	20	20	20
11	-	40	20	20	30
12	-	60	40	20	30
13	-	70	30	20	40
14	-	50	30	30	30
15	-	60	30	20	40
16	-	50	40	30	50
17	-	40	30	20	30
18	-	70	30	20	40
19	-	60	30	30	30
20	-	60	40	20	30
21	-	50	30	20	30
22	-	50	30	30	40
23	-	60	20	20	30
24	-	50	30	30	40
25	-	40	30	30	30
26	-	40	30	30	30
27	-	40	30	30	30
28	-	40	30	30	30
29	-	40	30	30	30
30	-	40	30	30	30
31	-	40	30	30	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าตอบสนอง (Response) ที่ได้จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 มา fit model ด้วยขั้นตอน multiple regression ของ STATGRAPHIC version 7.0 เช่นเดียวกับข้อ 4.2 พบว่า ไม่ได้สมการเลย

วิธีการดัดแปรด้วยสารเทตราอีทอกซีไซเลนในการทดลองของ Mallon (1984) พบว่าจะต้องละลายสารเทตราอีทอกซีไซเลนในเฮกเซน แป้งจะถูกนำมาทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 – 50 °C ภายใต้สภาวะสุญญากาศ หลังจากนั้น เอาสารละลายของเทตราอีทอกซีไซเลนในเฮกเซนผสมกับแป้งให้ความร้อนต่อที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ และใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะล้างเทตราอีทอกซีไซเลนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกด้วยเฮกเซนและอะซีโตน ทำให้แห้งในเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 40 – 50 °C จึงนำมาวิเคราะห์ผล

แต่ในการวิจัยนี้ต้องการทดลองดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารเทตราอีทอกซีไซเลนโดยใช้กระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นแทนวิธีในงานวิจัยทดลองของ Mallon (1984) ผลการทดลองที่ได้พบว่าการใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ไม่สามารถใช้ทดแทนสภาวะดังกล่าวได้ เนื่องจากการดัดแปรแป้งโดยวิธีของ Mallon (1984) จะใช้แป้งที่ถูกไล่ความชื้นในสภาวะสุญญากาศจนมีความชื้นต่ำผสมกับสารเทตราอีทอกซีไซเลนในเฮกเซนแล้วกระทำให้แห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้เวลานาน ขณะที่การดัดแปรแป้งของการทดลองนี้จะใช้แป้งที่มีความชื้นผสมกับสารเทตราอีทอกซีไซเลนโดยตรงและกระทำในสภาวะการผลิตที่อุณหภูมิสูงภายใต้ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศปกติในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้เวลาสั้น เหตุผลที่ทำให้แป้งในการทดลองนี้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้น เพราะสารเทตราอีทอก ซีไซเลนซึ่งมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ไม่ได้ถูกนำมาละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เหมือนกับวิธีของ Mallon (1984) จึงอาจทำให้ปฏิกิริยาของสารเทตราอีทอกซีไซเลนเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของแป้งได้ยากกว่า เนื่องจากตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้จะช่วยในเรื่องของการละลาย (solubility) ให้ไซเลนกระจายตัว เป็นผลให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดี

สรุปได้ว่า สภาวะการในการผลิตของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารเทตราอีทอกซีไซเลนโดยใช้ครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในการทดลองนี้ไม่เกิดขึ้น เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในการทดลองวิจัยนี้ จำเป็นต้องใช้น้ำเป็นตัวปรับความชื้นเพื่อให้ส่วนผสมของแป้งข้าวเจ้าที่ทำการดัดแปรอยู่ในลักษณะของโดสุกหรือผลิตภัณฑ์ที่พองตัวออกมาจากหน้าแปลนได้ ดังนั้น จึงต้องผสมน้ำกับสารเทตราอีทอกซีไซเลนก่อนนำไปผสมร่วมกับแป้งข้าวเจ้า แต่เนื่องจากสารเทตราอีทอกซีไซเลนมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ยากกว่าเมื่อเทียบกับสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน จึงอาจทำให้สภาวะการผลิตแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารเทตราอีทอกซีไซเลนไม่เกิดขึ้นดังที่กล่าวไว้ในตอนต้น นอกจากนี้แล้ว สภาวะการผลิตในกระบวนเอ็กซ์ทรูชั่นซึ่งใช้อุณหภูมิสูงมาก หากใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ร่วมด้วย จะทำให้ตัวทำละลายอินทรีย์ หรือเฮกเซนที่ผสมกับแป้งข้าวเจ้าเกิดการฟุ้งกระจายออกไปในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ศึกษาปริมาณกลีเซอรอลเพื่อผลิตฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปร

จากสภาวะเหมาะสมของการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในหัวข้อ 4.2 นำแป้งข้าวเจ้าที่ดัดแปรด้วยสภาวะดังกล่าวแล้วมาวิเคราะห์ในด้านต่าง ๆ คือ

4.4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพ

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนร่วมกับการใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ แสดงในตารางที่ 4.7 ได้แก่ ระดับการแทนที่ ค่าความเป็นกรดด่าง response angle และสมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ และส่วนการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรด้วยเครื่องบราเบนเดอร์วิสโคอะไมโลกราฟ พบว่า แป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรเมื่อละลายน้ำ ณ อุณหภูมิห้องมีความหนืดเท่ากับ 50 B.U. เมื่อให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 30 °C ถึง 95 °C แป้งให้ความหนืดสูงสุดที่ 210 B.U. และเมื่อมีการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง โดยอุณหภูมิที่ 95 ° C แป้งให้ความหนืดเท่ากับ 130 B.U. และความหนืดที่ 95 °C นาน 15 นาที มีค่าเท่ากับ 80 B.U. และเมื่อให้อุณหภูมิลดลงจนถึง 50 °C แป้งมีความหนืดเท่ากับ 80 B.U ค่าความหนืดที่จุดต่าง ๆ ของแป้งข้าวเจ้าดัดแปร แสดงในรูปที่ 4.2

แป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนที่เหมาะสมในข้อ 4.2 พบว่าค่าระดับการแทนที่มีค่าเท่ากับ 0.0338 เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเจ้าปกติที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร ค่านี้จะบอกถึงว่ามีปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างแป้งกับสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนมากน้อย เมื่อนำแป้งข้าวเจ้าดัดแปรมาพิจารณาด้านสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้ง ได้แก่ response angle ระยะเวลาในการลอยตัวบนผิวน้ำ และการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืด พบว่า ค่าของ response angle ของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรมีค่าเท่ากับ 35° ขณะที่แป้งข้าวเจ้าปกติมีค่าเท่ากับ 50° แสดงว่าแป้งข้าวเจ้าดัดแปรมีคุณสมบัติการไหลลื่นที่ดี ตามที่ Carr (1976) กล่าวว่า ค่า response angle ในช่วง 0 – 35° จะถือว่ามีสมบัติเป็น free flowability ขณะที่แป้งข้าวเจ้าปกติมีค่าเท่ากับ 50° ส่วนระยะเวลาในการลอยตัวบนผิวน้ำของแป้งข้าวเจ้าดัดแปร และแป้งข้าวเจ้าปกติเท่ากับ 215 และ 75 วินาที ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ Huangrak (1995) และ Amort *et al.* (1985) ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ พบว่า แป้งดัดแปรใช้ระยะเวลาในการลอยตัวบนผิวน้ำมากกว่า 24 ชั่วโมง จึงสรุปได้ว่า สมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรที่เหมาะสมจากการทดลองนี้ไม่มี ส่วนด้านการเปลี่ยนแปลงความหนืด พบว่า แป้งข้าวเจ้าดัดแปรมีสมบัติเป็นแป้งพรีเจล เพราะให้ความหนืดทันทีในน้ำเย็นที่อุณหภูมิห้อง คือให้ความหนืดเท่ากับ 50 B.U. ขณะที่ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 °C ความหนืดที่ 95 °C นาน 15 นาที และความหนืดที่อุณหภูมิ 50°C เท่ากับ 210 130 และ 80 B.U. ขณะที่แป้งข้าวเจ้าปกติเป็น 280 260 และ 260 B.U. แสดงว่า เม็ดแป้งของแป้งข้าวเจ้าดัดแปร มีความคงตัวของเม็ดแป้งต่ำ กล่าวคือ มีแนวโน้ม

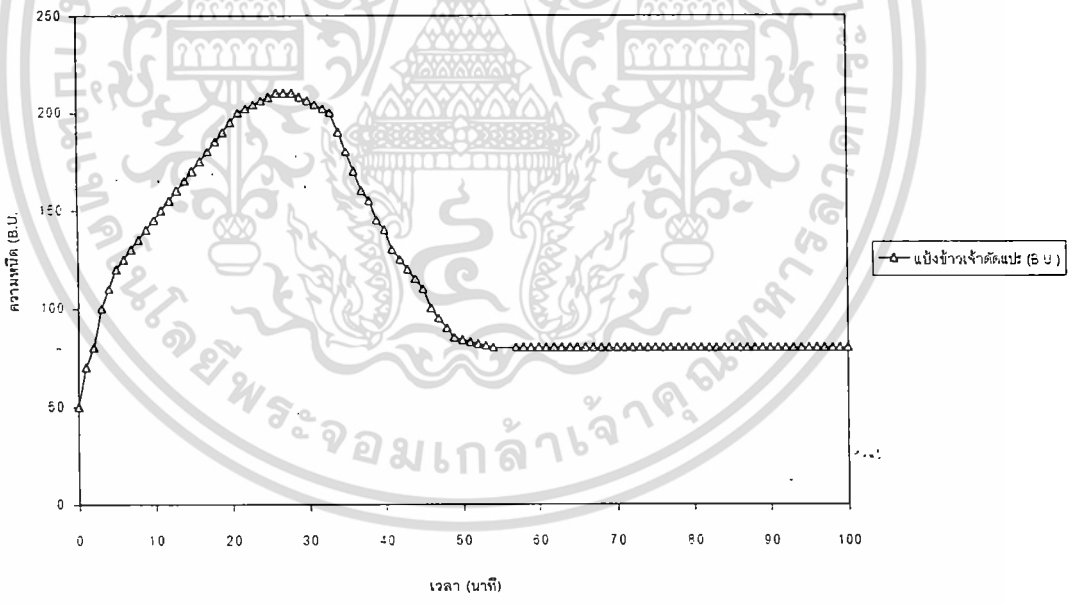
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พองตัวมากแตกเร็วในช่วงให้ความร้อน ส่วนความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าเท่ากับ 80 B.U ขณะที่ความหนืดของแป้งข้าวเจ้าปกติมีค่าเท่ากับ 600 B.U. แสดงว่า การคืนตัวของแป้งสุกของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรในการทดลองนี้เกิดขึ้นต่ำ อาจจะเป็นเพราะเม็ดแป้งถูกทำลายมากในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นของการทดลองนี้ เมื่อเทียบกับแป้งข้าวเจ้าปกติ

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนเมื่อใช้สภาวะการผลิตที่เหมาะสม

องค์ประกอบทางเคมี	ค่าที่วัดได้
ระดับการแทนที่	0.0338
ค่าความเป็นกรดด่าง	6.94
response angle	35 °
สมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ	215 วินาที

หมายเหตุ : ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ 2 ครั้ง



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนเมื่อใช้สภาวะการผลิตที่เหมาะสม

4.4.2 ศึกษาปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสมเพื่อทำฟิลม์จากแป้งข้าวเจ้าดัดแปร

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนและแป้งข้าวเจ้าปกติเมื่อเติมกลีเซอรอลไปใช้ในปริมาณต่างกัน พบว่าแผ่นฟิล์มของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนและแป้งข้าวเจ้าปกติที่ไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เติมกลีเซอรอลจะแตก ขณะที่แผ่นฟิล์มของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนและแป้งข้าวเจ้าปกติที่เติมกลีเซอรอลจะไม่แตก เนื่องจากกลีเซอรอลจะไปเชื่อมประสานกับร่างแหของแป้งเกิดเป็นโครงสร้างที่ยืดหยุ่น แผ่นฟิล์มที่ได้จึงมีความยืดหยุ่น นุ่ม และใสขึ้น ไม่เปราะหรือขาดง่าย (Gentard *et al.* 1993) ความหนาของแผ่นฟิล์มที่ได้อยู่ในช่วง 0.083 – 0.085 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของฟิล์มที่ระบุความหนาไว้ในช่วง 0.010 – 0.100 มิลลิเมตร (สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม. 2534)

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความหนา ความต้านทานแรงดึงขาด การยืดตัว และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์มแป้งข้าวเจ้าปกติ และแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน

Source of Variation	df	Mean square			
		ความหนา	ความต้านทานแรงดึงขาด	การยืดตัว	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ
Treatment	3	5.063×10^{-6} ns	3.634×10^{-2} *	2.020 *	753.362 *
A (ชนิดของแป้ง)	1	5.062×10^{-6} ns	8.066×10^{-2} *	5.406 *	470.933 *
B (ปริมาณกลีเซอรอล)	1	5.063×10^{-6} ns	2.624×10^{-2} *	0.651 *	1788.529 *
AB	1	5.063×10^{-6} ns	2.116×10^{-3} *	2.209×10^{-3} ns	0.373 ns
Error	12	1.240×10^{-5}	3.250×10^{-3}	5.51×10^{-4}	
Total	16				

* คือ significant level 0.05 , ns คือ non-significant

ตารางที่ 4.9 คุณสมบัติทางกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนและแป้งข้าวเจ้าปกติ

ประเภทของแป้ง	ความหนา (มิลลิเมตร)^{ns}	ความต้านทานแรงดึงขาด (กิโลกรัม/ตารางเมตร)	การยืดตัว (%)	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (กรัม/ตารางเมตร.24ชั่วโมง
แป้งข้าวเจ้าปกติ	0.085±0.003	0.7440±0.006	1.9021±0.228	110.7130±11.604
แป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน	0.084±0.004	0.8860±0.003	3.0650±0.203	99.8655±11.330

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 คุณสมบัติทางกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนและแป้งข้าวเจ้าปกติ

ปริมาณกลีเซอรอล	ความหนา (มิลลิเมตร)^{ns}	ความต้านทานแรงดึงขาด (กิโลกรัม/ตารางเมตร)	การยืดตัว (%)	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ(กรัม/ตารางเมตร.24ชั่วโมง
10%	0.084±0.003	0.856±0.064	2.282±0.634	94.718±5.845
15%	0.085±0.004	0.775±0.088	2.686±0.609	115.861±6.378

ตารางที่ 4.11 คุณสมบัติทางกลของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนและแป้งข้าวเจ้าปกติ

ประเภทของแป้ง	ปริมาณกลีเซอรอล (%)	ความหนา (มิลลิเมตร)^{ns}	ความต้านทานแรงดึงขาด (กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร)	การยืดตัว (%)	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ(กรัม/ตารางเมตร. 24 ชั่วโมง)
แป้งข้าวเจ้าปกติ	10	0.085 ± 0.003	0.796 ± 0.006^{c}	1.689 ±0.013^{d}	99.946 ±0.100^{c}
	15	0.085 ±0.004	0.692 ±0.004^{d}	2.116 ±0.013^{c}	121.48 ±2.239^{a}
แป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน	10	0.083 ± 0.003	0.915 ±0.006^{a}	2.875 ±0.019^{b}	89.490 ±2.611^{d}
	15	0.085 ± 0.004	0.857 ±0.006^{b}	3.255 ±0.059^{a}	110.241 ±2.374^{b}

หมายเหตุ : ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัด 4 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength) หมายถึง ความสามารถของแผ่นฟิล์มที่จะต้านทานแรงดึงซึ่งกระทำที่ปลายข้างหนึ่งของแผ่นทดสอบที่มีความกว้างคงที่ จนแผ่นทดสอบนั้นขาด (มยุรี และคณะ. 2533) เมื่อพิจารณาความต้านทานแรงดึงขาดของแผ่นฟิล์มแป้งข้าวเจ้าดัดแปรและแป้งข้าวเจ้าปกติในทุกอัตราส่วนของการเติมกลีเซอรอล พบว่า ฟิล์มที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 0.692 $\pm$ 0.004 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร ถึง 0.915 $\pm$ 0.006 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลในการสุ่มแบบสมบูรณ์และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงดึงขาดโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า แผ่นฟิล์มของแป้งข้าวเจ้าปกติและแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนมีค่าความต้านทานแรงดึงขาดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 โดยที่แป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนเมื่อเติม กลีเซอรอล 10% มีค่าความต้านทานแรงดึงขาดสูงสุด ส่วนฟิล์มแป้งข้าวเจ้าปกติเมื่อเติมกลีเซอรอล 15% มีค่าความต้านทานแรงดึงขาดต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า ชนิดของแผ่นฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้า และปริมาณกลีเซอรอลมีอิทธิพลร่วมต่อความต้านทานแรงดึงขาด โดยฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนฟิล์มจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงขาดมากกว่าแป้งข้าวเจ้าปกติที่ระดับของกลีเซอรอลเท่ากัน และเมื่อพิจารณาผลของระดับการเติมกลีเซอรอลก็พบว่า การเติมกลีเซอรอลที่ระดับ 10% และ 15% มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงขาดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อระดับกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงขาดจะลดลงหรือฉีกขาดง่าย ซึ่งสอดคล้องกับผลของพลาสติไซเซอร์ต่อค่าความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มสตาร์ชมันเทศและวุ้น ฟิล์มสตาร์ช มันเทศอะมิโลสและวุ้น และฟิล์มอะมิโลสและวุ้น (มณฑาทิพย์ ยุ่นฉลาด. 2534) และผลของความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์ต่อฟิล์มเมทิลเซลลูโลส และฟิล์มไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลส (Park *et al.* 1993) ซึ่งพบว่า เมื่อใช้ปริมาณพลาสติไซเซอร์เพิ่มมากขึ้นการต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มมีค่า ลดลง อาจเนื่องมาจากปริมาณพลาสติไซเซอร์ที่เติมลงไปจะไปจับกับโพลีเมอร์เกิดพันธะมีขั้วหรือพันธะไฮโดรเจน ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายโพลีเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนลง (Banker. 1966)

ด้านการยืดตัวของแผ่นฟิล์มที่ผลิตได้ พบว่า ฟิล์มที่ผลิตได้มีค่าการยืดตัวอยู่ในช่วง 1.689 $\pm$ 0.013 % ถึง 3.255 $\pm$ 0.059 % เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลในการสุ่มแบบสมบูรณ์และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าการยืดตัว โดยใช้ Duncan`s New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า แผ่นฟิล์มของแป้งข้าวเจ้าปกติและแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนมีค่าการยืดตัวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 โดยที่แป้งข้าวเจ้าปกติเมื่อเติมกลีเซอรอล 10% มีค่าการยืดตัวต่ำที่สุด ส่วนฟิล์มแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนเมื่อเติมกลีเซอรอล 15% มีค่าการยืดตัวสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า ชนิดของแผ่นฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้า และปริมาณกลี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

เซอรอลไม่มีอิทธิพลร่วมต่อความต้านทานแรงดึงขาด โดยฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนฟิล์มจะให้ค่าการยืดตัวมากกว่าแป้งข้าวเจ้าปกติที่ระดับของกลีเซอรอลเท่ากัน และเมื่อพิจารณาผลของระดับการเติมกลีเซอรอลก็พบว่า การเติมกลีเซอรอลที่ระดับ 10% และ 15% มีผลทำให้ค่าการยืดตัวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อระดับกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ค่าการยืดตัวจะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของนักวิจัยหลายท่านที่กล่าวว่า ความสามารถในการยืดตัวของฟิล์มแปรผันตามปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น (Otey *et al.* 1977 ; Woff *et al.* 1951 ; มณฑาทิพย์ ยุ่นฉลาด. 2534 ; Coffin and Fishman. 1993) เนื่องจากการใช้พลาสติไซเซอร์แบบ external ซึ่งเป็นกรรมวิธีการเติมสารลงไปในโครงสร้างโพลีเมอร์ทำให้เกิดเป็นสารเชิงซ้อนหรือโมเลกุลจับกลุ่มกัน พลาสติไซเซอร์และโพลีเมอร์จับยึดเข้าด้วยแรงวาเลนซีทุติยภูมิ (secondary valency) พลาสติไซเซอร์จะทำให้แรงระหว่างโมเลกุลระหว่างเส้นสายโพลีเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนตัวลง ส่งผลให้ค่าต้านทานแรงดึงขาดลดลง และทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่น (flexibility) เพิ่มขึ้น ลดความเปราะ แตกง่าย (Banker. 1966)

ด้านการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มที่ผลิตได้ พบว่า ฟิล์มที่ผลิตได้มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำอยู่ในช่วง 89.490 $\pm$ 2.611 กรัม/ตารางเมตร.24ชั่วโมง ถึง 121.48 $\pm$ 2.239 กรัม/ตารางเมตร.24ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลในการสุ่มแบบสมบูรณ์และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า แผ่นฟิล์มของแป้งข้าวเจ้าปกติและแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 โดยที่แป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนเมื่อเติมกลีเซอรอล 10% มีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำสุด ส่วนฟิล์มแป้งข้าวเจ้าปกติเมื่อเติมกลีเซอรอล 15% มีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า ชนิดของแผ่นฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าและปริมาณกลีเซอรอลไม่มีอิทธิพลร่วมต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำ โดยฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนฟิล์มจะให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำน้อยกว่าแป้งข้าวเจ้าปกติที่ระดับของกลีเซอรอลเท่ากัน และเมื่อพิจารณาผลของระดับการเติมกลีเซอรอลก็พบว่า การเติมที่ระดับ 10% และ 15% มีผลทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อระดับกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำก็จะสูงขึ้น เนื่องจากพลาสติไซเซอร์จะไปลดคุณสมบัติในการเป็นตัวกั้นแก๊ส ไอน้ำ และตัวถูกละลายของฟิล์มและยังทำให้ความยืดหยุ่นและการเกาะตัวลดลง (Gentard *et al.* 1993 ; Mchuge and Krocht. 1994)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปว่าการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ จะช่วยทำให้คุณสมบัติทางกลของฟิล์ม ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงขาด การซึมผ่านของไอน้ำ มีค่าสูงขึ้นกว่าแป้งข้าวเจ้าปกติ โดยพิจารณาจากฟิล์มของแป้งข้าวเจ้าปกติ และแป้งข้าวเจ้าดัดแปรที่ใช้ปริมาณกลีเซอรอล 10 และ 15% มาเปรียบเทียบด้วยกัน (ตารางที่ 4.8) ส่วนปริมาณของกลีเซอรอลที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือ 10% เนื่องจากแผ่นฟิล์มที่ได้ให้ค่าความต้านทานแรงดึงขาดสูงสุดเท่ากับ 0.915 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำที่สุดเท่ากับ 89.490 กรัม/ตารางเมตร.24 ชั่วโมง สำหรับแผ่นฟิล์มของแป้งข้าวเจ้าดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนในการทดลองวิจัยนี้ที่ผลิตจัดเป็น edible film ประเภท biodegradable film ที่มีคุณสมบัติถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย ซึ่งจะช่วยลดปัญหามลพิษด้านสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าปกติ พบว่า แป้งข้าวเจ้ามีความชื้น 10.78% โปรตีน 6.92% ไขมัน 0.23% เส้นใย 0.11% เถ้า 0.28% คาร์โบไฮเดรต 81.68% และอะมิโลส 21.80% ส่วนการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยบราเบนเดอร์วิสโคอะมิโลกราฟ พบว่า มีอุณหภูมิเจลาติไนซ์เท่ากับ 76 °C ความหนืด สูงสุด ความหนืดที่อุณหภูมิ 95°C ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 °C ครบ 15 นาที และความหนืดที่อุณหภูมิ 50 °C เท่ากับ 280 260 260 และ 600 B.U. ตามลำดับ แสดงว่าเม็ดแป้งมีการพองตัวแบบปานกลางมีความคงทนต่อสภาวะอุณหภูมิสูงและการกวนอย่างต่อเนื่องโดยสามารถรักษาความหนืดไว้ได้

การดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์โดยใช้แผนการทดลอง Response Surface Methodology แบบ Central Composite Design โดยศึกษาสภาวะในการผลิต 4 ตัวแปร คือ ความชื้นของแป้งข้าวเจ้าผสมขณะป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ อุณหภูมิของบาร์เรล ความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน และความเร็วรอบสกรูต่อคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรในด้าน response angle สมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ ระดับการแทนที่ และการเปลี่ยนแปลงความหนืด พบว่า ค่าของ response angle ของแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรมีความสัมพันธ์กับความชื้นของแป้งข้าวเจ้าผสมขณะป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในรูปสมการ คือ $Y_1 = 7.4226X_1$ ส่วนระดับการแทนที่ของแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของบาร์เรล ความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน และความเร็วรอบของสกรูในรูปสมการคือ $Y_3 = 0.1272 - 0.00116X_2 + 0.0000038X_2^2 + 25.3256X_3^2 + 0.0000009X_4^2$ เมื่อนำมาคำนวณหาจุดการผลิตที่เหมาะสม (optimum point) พบว่าสภาวะการผลิตที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิของบาร์เรล 152 °C ความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน 0.0391 โมล์/โมลแป้งแห้ง และความเร็วรอบสกรู 207 รอบต่อนาที โดยจะให้ค่าของ response angle สมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ ระดับการแทนที่ เท่ากับ 35 ° 215 วินาที และ 0.0338 ตามลำดับ ขณะที่ค่าความหนืดสูงสุด และความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 50 °C เท่ากับ 210 และ 100 B.U. แต่สมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำของแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปร และการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมความหนืดไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่ศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยสารเทตราอีทอกซีไซเลนด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในลักษณะเดียวกับการใช้สารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนนั้น พบว่า คุณสมบัติทุกอย่างของแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรด้วยสารเทตราอีทอกซีไซเลนไม่มีความสัมพันธ์กับความชื้นของแป้งข้าวเจ้าผสมขณะป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ อุณหภูมิของบาร์เรล ความเข้มข้นของสารเทตราอีทอกซีไซเลน และความเร็วรอบสกรู

แผ่นฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน เมื่อเติมระดับกลีเซอรอล 10 และ 15% นำมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนา และคุณสมบัติทางกล ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงขาด ความสามารถในการยืดตัว และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ แล้ววิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ โดยการใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลในการสุ่มแบบสมบูรณ์และวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างทรีตเมนท์ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม SPSS Version 7.5 พบว่า ฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าที่ถูกดัดแปรด้วยสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน เมื่อเติมกลีเซอรอล 10% เป็นฟิล์มที่มีคุณสมบัติดีที่สุด คือ มีค่าความต้านทานแรงดึงขาดสูงที่สุดเท่ากับ 0.915 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร ค่าความสามารถในการยืดตัวเท่ากับ 2.116% และอัตราการซึมผ่านไอน้ำต่ำที่สุดเท่ากับ 89.490 กรัม /ตารางเมตร.24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2529. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์แป้งข้าวเจ้า.** เอกสารมอก.ที่ 625-2529. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงทพฯ. 24 หน้า.

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2535. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรม.** เอกสาร มอก. ที่ 1073-2535. สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ. 11 หน้า.

กล้าณรงค์ ศรีรอต. 2542. เทคโนโลยีของแป้ง. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เกศศิณี ตระกูลทิวากร. วิภา สุโรจนเมธากุล ประชา บุญญสิริกุล และสมยศ จรรยาวิลาศ. 2539. "การทำฟิลม์บริโภคได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง." อาหาร 26 (4) : 249 – 262.

งามชื่น คงเสรี. 2537. "ศักยภาพพันธุ์ข้าวไทยสู่การแปรรูป." หน้า 8. ใน การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ครั้งที่ 32 สาขาอุตสาหกรรมเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นุชฤดี ศิริบุญ. 2534. " การดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าแบบครอสลิงกิง." วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ปนัดดา พวงเกษม. 2540. " การเตรียมฟิล์มบริโภคได้จากแป้งมันสำปะหลังและแนวทางการใช้ประโยชน์." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พนอจิต ธัญญมงคลพงศ์. 2531. " การแยกส่วนอะมัยโลสจากแป้งข้าวเจ้า." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

มณฑาทิพย์ ยุ่นฉลาด. 2534. " การเตรียมฟิล์มอะมิโลสจากสตาร์ชมันเทศที่แยกส่วนแล้ว." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มยุรี ภาคลำเจียก อมรรัตน์ สวัสดิทัต วัลย์ลดา หงส์ทอง และนฤมล รื่นไวย์. 2533. คู่มือการหีบห่อเรื่อง คู่มือการใช้พลาสติกเพื่อการหีบห่อ. ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ 145 น.

ฤทัยพันธน์ ศิริพละ. 2537. " การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบจากธัญพืชด้วยเอ็กซ์ทรูดเดอร์." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

สนั่น จอกลอย. 2535. **สถิติเพื่อการวิจัยทางการเกษตร.** ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศุภฤกษ์ บูรณะคงคาตรี. 2538. "การผลิตเครื่องดื่มใบบัวบก." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกพันธ์ แก้วมณีชัย. 2538. "การดัดแปรสตาร์ชในแป้งมันสำปะหลังและข้าวด้วยวิธีแอซีทิลเลชั่น." วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

อนงค์ เจษฎาญานเมธา. 2534. "แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยวิธี การแทนที่และการเชื่อมขวาง." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Aguilera, J.M., Del Valle, J.M. and Karel. M. 1995. "Caking phenomena in amorphous food powders." **Trend in Food Sciences & Technology.** 6 : 149-155.

Amort , J., Hanisch, H., Klapdor, U., Van der Maas, H. and Suerken, H.P. **Method for the modification of starch in an aqueous medium.** U.S patent no. 4540777, Sep 1985.

American Standard for Testing and Materials. 1991 . **Standard test method for gas permeability characteristic of plastics film and sheeting,** D 882-91. Annual Book of ASTM Standard. Philadephia.

American Standard for Testing and Materials. 1990. **Standard test method for water vapor transmission of materials,** E 96-80. Annual Book of ASTM Standard. Philadephia.

AOAC. 1998. Official Methods of Analysis. 16th ed. The Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C.

Banker, G.S. 1966. "Film coating theory and practice." **J. Pham. Sci.** 55(1) 81 – 89

Box, G.E.P. and Wilson, K.B. 1951. "On the experimental attainment of optimum conditions." **J. Roy. Statist. Soc.** B13, 1 – 45.

Carr, R.L. 1976. Powder and Granule properties and mechanics. Marchello, J.M. and Gomezplata, A. (eds) **in Gas-solids handling in the processing industries.** Marcel Dekker, Inc. New York.

Chang, H.Y. and Lii, C.Y. 1992. "Preparation of starch phosphates by extrusion. **J. Food Sci.** 57 : 203-205.

Coffin, D.R. and Fishman, M.L. 1993. "Viscoelastic properties of pectin/starch blend." **J. Agri Food Chem.** 41 : 1192 – 1197.

Felcht, U.H. and Berenbold, H. **Cellulose ethers having improved dispersing properties.** U.S patent no. 4474950, Oct 1984.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gentard, N., Guilbert, S and Cuq, J.L. 1993. "Water and glycerol as plasticizers affect mechanical and water vapor barrier properties of an edible wheat gluten film." **J. Food Sci.** 55(1) : 206 – 211.

Gracular, M.C. and Singh, J. 1984. **Statistical methods in food and consumer research.** Acadamic press. p. 241.

Heldman ,D.R and Hartel R.W. 1997. **Principle of Food Processing.** 2nd. ed. Chapman & Hall Inc. U.K. p. 280.

Huangrak, K. 1995. "Herstellung von Silyl – Staerkderivaten." Ph.D. Thesis Agricultural University Vienna, Austria.

Huls Co.Ltd. 1993. Personal Communication. Cited by Huangrak, K. 1995. "Herstellung von Silyl – Staerkderivaten." Ph.D. Thesis Agricultural University Vienna, Austria.

Jozef, L., Chi – Tang, H. and Karwe. M. 1991. **Food Extrusion Science and Technology.** Marcel Dekker, Inc., New York.

Juliano, B.O. 1971. "A Simplified assay for milled rice amylose." **Cereal Sci. Today.** 16(10) : 334

Kerr, R.W. and Hobbs, K.C. 1953. "Substituted Silyl Derivatives of Starch." **Ind. Eng. Chem.** 45 : 2542-2544.

Lim, S.T. and Jane, J.L. **Cereal grain-based biodegradable thermoplastic compositions.** U.S patent no. 5320699, June 1994.

Mallon, C.B. and Belle Mead, N.J.. **Use of ethyl silicate as a crosslinker for hydroxylated polymers.** U.S patent no 4480072, October 1984.

Mchugh, T.H. and Krochta, J.M. 1994. **Permeability properties of edible films.** Lancaster : Technomic Publishing Co. p. 139- 187.

Meuser, F. and Grimmler, N. 1989. Production of starch derivatives using an extruder. **In Trends in Food Processing,** (eds) in Ang How Ghee, Singapore Institute of Food Science and Technology, Singapore. 289-296.

Montgomery, D.C. 1991. **Design and Analysis of Experiments.** 3rd ed. USA: John Wiley & Sons Inc.

Moore, G. 1994. **The Technology of Extrusion Cooking.** Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall Inc. U.K. 133-139.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Otey. F.H., Weshoff, R.P. and Donae, W.M. 1987. "Strach – based blown films." **Ind. Eng. Chem. Res.** 26 : 1659 – 1663.

Park, H.J., Weller, CL., Vergano, P.J. and Testin, R.F. 1993. "Permeability and mechanical properties of cellulose edible films." **J. Food Sci.** 58(6) : 830 – 833.

Peeters, H., Steinmetz, J.R. and Mehta, P. 1990. **Silane Modification of Renewable Resources.** TAPPI Proceedings Nonwovens Conference. 235-255.

Roth, W.B. and Mehltretter, C.L. 1967. "Some properties of hydroxypropylated amylomaize starch films." **Food Tecnology.** 21 : 72 – 74 .

Rutenberg, M.W., and Solarkek, D. 1984. "Starch derivatives technology and uses." 529 – 574. in Whistler, R.L., BeMiller, J.N. and Paschall E.F. (eds.) **Starch: Chemistry and Technology.** 2nd ed. Academic PressInc., Florida.

Sau, A.C. **Silated Polysaccharides.** U.S patent no. 5059686, Oct 1991.

Swinkles, J.M. 1985. "Source of starch, its chemistry and physics." 15 – 45. In Van Beynum, G.M.A. and Roles, J.A. (eds) **Starch conversion Technology.** New York : Marcel Dekker Inc.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. 1988. **Tensile breaking properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus)** T 494 om-88. TAPPI Test Method. Technology Park, Atlanta.

Weidmann, W. and Strobel, E. 1991. "Compounding of Thermoplastic Starch with Twin screw Extruders." **Starch/Starke.** 43 : 138-145.

Wolff, I.A., Davis, J.E., Cluskey, L.J., Gumdrum and C.E., Rist. 1951. "Preparation of films from amylose." **Ind. Eng. Chem.** 43 : 915 – 919.

Wurzburg, O.B. 1972. "Starch in the food industry." 361 – 395. In T.E. Furia (ed.) **Handbook of Food Additives.** 2nd. ed. CRC Press Inc., Cleveland, Ohio.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์ทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น (AOAC. 1998)

1. เตรียมจานโลหะ และฝาที่ผ่านการอบจนน้ำหนักคงที่แล้ว

2. ชั่งตัวอย่าง 2 – 3 กรัม ใส่ลงในจานโลหะจากข้อ 1

3. นำตัวอย่างเข้าอบหาความชื้นในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 ± 3 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาทำให้เย็นในเดซิกเคเตอร์ (desiccator) บันทึกน้ำหนักไว้ และอบต่ออีกประมาณ 10 – 15 นาที จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ ปริมาณความชื้นคำนวณเป็นร้อยละของน้ำหนักที่สูญหาย

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักที่หายไป}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

2. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนแบบ Buchi – Kjeldahl - Systems (AOAC. 1998)

สารเคมี

1. กรดซัลฟุริกเข้มข้น
2. กรดบอริกความเข้มข้น 2%
3. กรดไฮโดรคลอริก 0.01 นอร์มัล
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 32%
5. คะตะลิสต์ (catalyst) : ผสมซิลิเนียมไดออกไซด์ (SeO_2) 2.5 กรัม โปแตสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) 100 กรัม และคอบเปอร์ซัลเฟต 20 กรัม เข้าด้วยกัน
6. อินดิเคเตอร์ผสม

ก. เตรียม Bromo cresol green ความเข้มข้น 0.1% ในเอทธิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้น 95% และ Methyl red ความเข้มข้น 0.1% ในเอทธิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้น 95%

ข. ผสม 10 มิลลิลิตรBromo cresol green กับ 2 มิลลิลิตร Methyl red ในขวดหยด

<u>วิธีวิเคราะห์</u>

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 1 กรัม ลงใน Kjeldahl flask
2. เติมคะตะลิสต์ 5 กรัม กรดซัลฟุริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร และ Glass beads
3. นำ Kjeldahl flask ตั้งในชุดย่อยโปรตีน ย่อยจนได้สารละลายสีฟ้า
4. นำสารละลายตัวอย่างที่ย่อยเสร็จแล้ว ไปใส่ในเครื่องกลั่นโปรตีน (Buchi) เติมน้ำกลั่นลงในตัวอย่าง ปริมาณ 25 มิลลิลิตร แล้วเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 32% 50 มิลลิลิตร ทำการกลั่นโดยตั้งเวลาไว้ประมาณ 4 –5 นาที เก็บแก๊สแอมโมเนียที่ได้ในสารละลายกรดบอริกเข้มข้น

เอกสารนี้เป็น... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2% ปริมาณ 100 มิลลิลิตรที่มีอินดิเคเตอร์ผสมอยู่ 2 – 3 หยด ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร กลั่นจนได้สารละลายสีฟ้าใสในปริมาณ 200 มิลลิลิตร

5. นำส่วนที่กลั่นได้ไปไตเตรตกับกรดไฮโดรคลอริก 0.01 นอร์มัลจนถึงจุดยุติ (End point) คือ สีของอินดิเคเตอร์เปลี่ยนจากสีฟ้าใสเป็นสีชมพูอ่อน

6. ทำแบลงค์ (blank) เปรียบเทียบด้วย

วิธีการคำนวณ

ปริมาณโปรตีน (%) =

$$= \frac{[\text{ml HCl ที่ใช้กับตัวอย่าง} - \text{ml HCl ที่ใช้กับแบลงค์}] \times N \text{ ของ HCl} \times 14 \times 5.95 \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้}}$$

3. การวิเคราะห์หาปริมาณไขมัน (AOAC. 1998)

สารเคมี

ปิโตรเลียมอีเทอร์

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างแห้ง 5 กรัม (น้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ในกระดาษกรอง Whatman No.1 โดยห่อ 2 ชั้น ใส่ห่อตัวอย่างลงใน Thimble ปิด Thimble ด้วยสำลีที่ปราศจากไขมัน

2. นำ Thimble ใส่ลงในชุดแยกสกัดไขมัน (extraction unit) เติมปิโตรเลียมอีเทอร์ลงใน Soxhlet flask ในปริมาณเพียงพอที่จะให้เกิดการสกัดอย่างสมบูรณ์ แล้วต่อเข้ากับชุดแยกสกัด และคอนเดนเซอร์ ทำการสกัดโดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

3. นำ Soxhlet flask ไประเหยเอาอีเทอร์ออกแล้วอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 45 นาที หรือจนน้ำหนักคงที่ ทิ้งให้เย็นใน desiccator แล้วชั่ง คำนวณหา %ไขมัน

วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณไขมัน (\%)} = \frac{\text{ปริมาณไขมันที่สกัดได้ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}} \times 100$$

4. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (AOAC. 1998)

1. ชั่งตัวอย่าง 2 กรัม ใส่ลงใน Porcelain crucible ที่แห้งสนิทและรู้น้ำหนักที่แน่นอน
2. นำตัวอย่างไปเผาบน Hot plate ใน Hood จนเป็นสีเทา ไม่มีควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำไปเผาต่อในเตาเผา (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 550 °C จนเป็นสีขาว หรือมีน้ำหนักคงที่ ทำให้เย็นใน desiccator

4. นำไปชั่งน้ำหนัก จดบันทึกไว้แล้วนำไปคิดคำนวณหาปริมาณเถ้า

วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)} = \frac{\text{ปริมาณเถ้า (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}} \times 100$$

5. การวิเคราะห์หาปริมาณเส้นใย (AOAC. 1998)

สารเคมี

1. สารละลายกรดกำมะถันเข้มข้น 0.1275 โมลาร์ (0.255 นอร์มัล) (กรดกำมะถันเข้มข้น จำนวน 1.25 กรัม ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น)

2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.313 โมลาร์ (0.313 นอร์มัล) (ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.25 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร สารละลายนี้จะต้องปราศจากโซเดียมคาร์บอเนต)

3. สารละลายกรดเกลือเข้มข้น 1%

4. เอทธิลแอลกอฮอล์ 95% (ปริมาตรต่อปริมาตร)

5. ไดเอทธิลอีเธอร์

วิธีวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างไปต้มในสารละลายกรดกำมะถันเข้มข้น 0.1275 โมลาร์ จำนวน 200 มิลลิลิตร นาน 30 นาที เพื่อสลายคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน เขย่าขวดตลอดเวลา

2. กรองสารละลายผ่านเครื่องกรองแบบบุชเนอร์ ล้างกากด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งไม่มีกรดเหลืออยู่ในกาก

3. เทกากกลับลงในฟลาสก์ใบเดิม ใช้สารละลายโซเดียมเข้มข้น 0.313 นอร์มัล จำนวน 200 มิลลิลิตร ล้างกากออกจากกระดาษกรอง นำไปต้มเดือดนาน 30 นาที

4. กรองสารละลายอีกครั้ง แล้วล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนจนแน่ใจว่าไม่มีด่างเหลืออยู่

5. เทกากกลับลงในฟลาสก์ใบเดิม ล้างกากด้วยสารละลายเกลือเข้มข้น 1% แล้วตามด้วยน้ำร้อนจนแน่ใจว่าไม่มีกรดเหลืออยู่

6. ล้างกากด้วยเอธิลแอลกอฮอล์ 2 ครั้ง และไดเอทธิลอีเทอร์อีก 3 ครั้ง นำกากที่เหลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดใส่ลงบนกระดาษกรองชนิดปราศจากเถ้า หรือถ้วยกระเบื้องเคลือบที่ผ่านการกรองและทราบน้ำหนักแน่นอน ล้างส่วนที่ติดกระดาษกรองด้วยน้ำร้อนเล็กน้อย

7. นำไประเหยให้แห้งบนหม้อต้มน้ำแบบปรับปรุงอุณหภูมิได้แล้วอบต่อที่อุณหภูมิ 100 °C จนได้น้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักของกากที่แห้งเหลือ

8. นำกากไปเผาต่อในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550°C นาน 3 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งได้เถ้าสีขาว ปล่อยทิ้งให้เย็นใน desiccator ชั่งหาน้ำหนักเถ้าที่ได้

9. คำนวณหาปริมาณเส้นใยในตัวอย่าง

ปริมาณเส้นใยในตัวอย่าง = น้ำหนักแห้งของกาก – น้ำหนักเถ้า

6. การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์โบไฮเดรต

คำนวณหาปริมาณปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยวิธีการ Total by difference ดังนี้คือ

% คาร์โบไฮเดรต = 100 – (% ความชื้น + % โปรตีน + % ไขมัน + % เยื่อใย + % เถ้า)

7. การวิเคราะห์หาปริมาณอะมิโลส (Juliano. 1971)

สารเคมี

1. อะมิโลสบริสุทธิ์ (pure amylose from potato)
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์
3. กรดอะซิติกเข้มข้น
4. สารละลายไอโอดีน (ไอโอดีน 0.2 กรัม และโปตัสเซียมไอโอไดด์ 2 กรัม ละลายน้ำ 100 มิลลิลิตร)
5. เอทธิลแอลกอฮอล์

<u>วิธีวิเคราะห์</u>

1. การทำกราฟมาตรฐาน โดยชั่งอะมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง จำนวน 40 มิลลิกรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมเอทธิลแอลกอฮอล์(95%) 1 มิลลิลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1 โมลาร์ 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ต้มในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิน้ำเดือด นาน 10 นาที ทำให้เย็นลง เติมน้ำกลั่นให้ถึงขีดปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน ใช้ปิเปตดูดสารละลายโพเทโตอะมัยโลสมา 1 2 3 4 และ 5 มิลลิลิตร (เทียบเท่ากับ 8, 16, 24, 32 และ 40 %) ใส่ในขวดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร ใบที่ 1 – 5 ตามลำดับ เติมกรดอะซีติกเข้มข้น 1 โมลาร์ จำนวน 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปริมาตร ใบที่ 1 – 5 ตามลำดับ เติมสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโอดีน 2 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปริมาตรแต่ละใบ แล้วจึงเติมน้ำกลั่นให้ถึงขีดปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 15 – 20 นาที นำไปอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปคโตโฟโตมิเตอร์ ทำแบลงค์เช่นเดียวกัน เขียนกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนของแสงกับปริมาณอะมิโลส (0.4 0.8 1.2 1.6 และ 2.0 มิลลิกรัม/100 มิลลิลิตร) จะได้สมการกราฟ เส้นตรงในรูปทั่วไปเป็น $Y = a + bx$ จะสามารถคำนวณหาปริมาณอะมิโลสในตัวอย่างได้

2. การวิเคราะห์ตัวอย่าง ชั่งตัวอย่างแป้ง 0.1000 กรัม ให้ได้น้ำหนักคงที่แน่นอน ทำขั้นตอนวิธีวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับวิธีการทำกราฟมาตรฐานของอะมิโลส นำสารละลายตัวอย่างที่ได้ไปอ่านค่าการดูดกลืนของแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปคโตโฟโตมิเตอร์ หาปริมาณอะมิโลสโดยอ่านจากค่ากราฟมาตรฐาน

8. การวิเคราะห์หาปริมาณซิลิคอน (Huls. 1993)

สารเคมี

1. กรดซัลฟุริกเข้มข้น (H_2SO_4)
2. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl)
3. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 % (H_2O_2 solution 30 %)
4. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
5. โปตัสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3)
6. แอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium – molybdate)
7. กรดออกซาลิก (Oxalic acid)
8. มีทอล (Metol ; n – methyl – p – aminophenolsulphate)
9. โปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟท์ ($K_2S_2O_5$)
10. SiO_2 บริสุทธิ์

<u>วิธีวิเคราะห์</u>

1. การทำกราฟมาตรฐาน

1.1 ชั่ง SiO_2 บริสุทธิ์ จำนวน 0.0428 กรัม ใส่ในถ้วยนิเกิล

1.2 เติมกรดซัลฟุริกเข้มข้น 0.5 มิลลิลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% 0.5 มิลลิลิตร ลงในถ้วยนิเกิล

1.3 นำถ้วยนิเกิลที่มีส่วนผสมต่างๆ ของข้อ 1.2 ไปเผาบน Hot plate ในตู้ดูดควันจนไม่มีควันดำ

1.4 นำถ้วยนิเกิล จากข้อ 1.3 ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 900 °C ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 นำถ้วยนิเกิล จากข้อ 1.4. ออกจากเตาถ้วยนิเกิลเผา เติมส่วนผสมของโซเดียมคาร์บอเนต / โปตัสเซียมคาร์บอเนต (1 : 1) จำนวน 0.5 กรัม ลงในถ้วยนิเกิล

1.6 นำถ้วยนิเกิล จากข้อ 1.5 เข้าเตาเผา เผาต่อที่อุณหภูมิ 900 °C ประมาณ 15 นาที หรือเผาจน residue ละลายเข้ากันดี

1.7 นำถ้วยนิเกิล จากข้อ 1.6 ออกจาก เตาเผา ละลาย residue ใน ด้วยน้ำกลั่น และทำให้เป็นกลางด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น

1.8 เทสารละลายของ residue จากข้อ 1.7 ลงในขวดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับจนถึงขีดปริมาตรด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปกรอง

1.9 ใช้ปิเปตดูด filtrate ที่กรองได้ จากข้อ 1.8 จำนวน 1 3 5 7 และ 9 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร ใบที่ 1 – 5 ตามลำดับ

1.10 เติมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (5 กรัม ของแอมโมเนียมโมลิบเดต ละลายในน้ำกลั่นจำนวน 50 มิลลิลิตร และกรดกำมะถันเข้มข้น 5 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับจนถึงขีดปริมาตร) 1 มิลลิลิตร ลงใน ขวดปริมาตร ที่มี filtrate ทั้ง 5 ใบใน ข้อ 1.9 ตั้งทิ้งไว้นาน 3 นาที

1.11. เติมสารละลายกรดออกซาลิก (5 กรัม ของกรดออกซาลิกละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับจนถึงขีดปริมาตรในขวดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร) 1 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตร ทั้ง 5 ใบ ในข้อ 1.10. ตั้งทิ้งไว้นาน 1 นาที

1.12. เติมสารละลายมีทอล (2 กรัมของมีทอล และ 20.5 กรัม ของโปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟท์ ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรในขวดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วกรอง) 1 มิลลิลิตร ลงใน ขวดปริมาตร ทั้ง 5 ใบในข้อ 1.11. แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 25 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตร จะเกิดสีฟ้าขึ้นในสารละลาย ตั้งทิ้งไว้นาน 25 นาที

1.13. นำไปอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 720 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปคโตโฟโตมิเตอร์ ทำแบลงค์เปรียบเทียบ เขียนกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนของแสงกับปริมาณซิลิคอน (20 60 100 140 และ 180 μg Si / ml) จะได้สมการเส้นตรงในรูปทั่วไปเป็น $Y = a + bX$ จะสามารถคำนวณหาปริมาณซิลิคอนในตัวอย่าง

1.14. ปริมาณซิลิคอนที่คำนวณได้จากการทำกราฟมาตรฐาน คือ $X = (Y - a) / b$ โดย X มีหน่วยเป็น μg Si / ml

1.15. ปริมาณซิลิคอนในตัวอย่างจะคำนวณได้จากสมการดังนี้คือ

$$Si = \frac{[X \times 50]}{[V \times W]} - B$$

โดย Si คือ ปริมาณซิลิคอนในตัวอย่าง มีหน่วยเป็น μg / g dry weight

V คือ ปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ มีหน่วยเป็น ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ มีหน่วยเป็น g

50 คือ ปริมาตรของขวดปริมาตร ที่ใช้ปรับขีดปริมาตร

B คือ ค่าเปรียบเทียบกับตัวอย่างโดยคำนวณได้จากแป้งที่ไม่ได้ทำการดัดแปร

1.16. ค่าระดับการแทนที่ (degree of substitution ; DS) คำนวณได้จากปริมาณซิลิคอนในตัวอย่าง ดังสมการต่อไปนี้คือ

$$DS = \frac{\%\,Si}{(100 - \%\,Si)} \times \frac{162}{28}$$

DS คือ ค่าระดับการแทนที่ มีหน่วยเป็น โมลซิลิคอนต่อโมลแป้ง

% Si คือ ปริมาณซิลิคอนในรูป %น้ำหนัก

162 คือ น้ำหนักโมเลกุลของแป้ง (anhydrous glucose unit)

28 คือ น้ำหนักโมเลกุลของซิลิคอน

2. การทำแบล็งค์ (Blank)

2.1 ชั่งแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร จำนวน 0.5 กรัม (W) และทำขั้นตอนเดียวกับการทำกราฟมาตรฐานจากขั้นตอน 1.2. ถึง 1.7

2.2 เทสารละลายของ residue จากข้อ 2.1. ลงในขวดปริมาตร ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับจนถึงขีดปริมาตรด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปกรอง

2.3 ดูด filtrate ที่ต้องการจากข้อ 2.2. จดบันทึกปริมาตรที่ใช้ (V) ใส่ลงในขวดปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร

2.4 เติมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 1 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตรที่มี filtrate ในข้อ 2.3. ตั้งทิ้งไว้นาน 3 นาที

2.5 เติมสาระลายกรดออกซาลิก 1 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตร ในข้อ 2.4. ตั้งทิ้งไว้นาน 1 นาที

2.6 เติมสารละลายมีทอล 1 มิลลิลิตรลงในขวดปริมาตร ในข้อ 2.5. แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร จะเกิดสีฟ้าขึ้นในสารละลาย ตั้งทิ้งไว้นาน 25 นาที

2.7 นำไปอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 720 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปคโตโฟโตมิเตอร์

3. การหาปริมาณซิลิคอนในตัวอย่าง

3.1 ชั่งตัวอย่างจำนวน 0.1 – 1.0 กรัม $\pm$ 0.1 มิลลิกรัม (W) ขึ้นอยู่กับปริมาณความ เข้มข้นของสารไซเลนที่ใช้ดัดแปร และทำขั้นตอนเดียวกับการทำกราฟมาตรฐาน จากขั้นตอน 1.2 ถึง 1.7.

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้ามมิให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือสำเนาเพื่อการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เทสารละลายของ residue จากข้อ 3.1. ลงในขวดปริมาตร ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับจนถึงขีดปริมาตรด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปกรอง

3.3 ดูด filtrate ที่ต้องการจากข้อ 3.2. จดบันทึกปริมาตรที่ใช้ (V) ใส่ลงในขวดปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร

3.4 เติมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 1 มิลลิลิตรลงในขวดปริมาตร ที่มี filtrate ในข้อ 3.3. ตั้งทิ้งไว้นาน 3 นาที

3.5 เติมสารละลายกรดออกซาลิก 1 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตร ในข้อ 3.4. ตั้งทิ้งไว้นาน 1 นาที

3.6 เติมสารละลาย 1 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตร ในข้อ 3.5. แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร จะเกิดสีฟ้าขึ้นในสารละลาย ตั้งทิ้งไว้นาน 25 นาที

3.7 นำไปอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 720 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปคโตโฟโตมิเตอร์ หาปริมาณซิลิคอนโดยอ่านจากค่ากราฟมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ทางกายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์อะมิโลกราฟ (มอก. ที่ 625-2529)

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างคิดเป็นน้ำหนักแห้ง 40 กรัม ผสมกับน้ำให้ได้ทั้งหมด 500 กรัม ใส่ลงในเครื่องบราเบนเดอร์อะมิโลกราฟ ซึ่งได้จัดเตรียมพร้อมสำหรับการทดสอบแล้ว
2. เพิ่มความร้อนด้วยอัตรา 1.5 °C / นาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 95 °C และคงไว้ที่อุณหภูมินี้นาน 15 นาทีแล้วค่อยๆลดอุณหภูมิลงในอัตราเดียวกันจนถึงอุณหภูมิ 50 °C
3. หยุดเครื่องบราเบนเดอร์อะมิโลกราฟ ตรวจดูลักษณะเจลและเปรียบเทียบค่าความหนืดและอุณหภูมิที่เกิดเจลจากกราฟระหว่างตัวอย่างแป้งดัดแปรกับตัวอย่างแป้งธรรมชาติที่ได้จากพืชชนิดเดียวกัน

2. การวิเคราะห์หาสมบัติการลอยตัวบนผิวน้ำ (Huangrak. 1995)

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างแป้ง จำนวน 0.5 กรัม
2. เตรียมน้ำกลั่น จำนวน 150 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. เทตัวอย่างแป้งจากข้อ 1. ลงในบีกเกอร์ในข้อ 2.
4. จับเวลาที่ตัวอย่างแป้งจมลงทั้งหมดที่พื้นล่างของบีกเกอร์

3. การวิเคราะห์หา Response angle (ดัดแปลงจาก Aguilera *et al.* 1995)

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว สูง 4 นิ้ว หัวท้ายเปิด
2. วางท่อพีวีซีจากข้อ 1. ลงบนกระจก
3. เทแป้งตัวอย่างลงบนท่อพีวีซีจนเต็ม ใช้ Spatula ปาดให้เรียบ
4. ค่อย ๆ ยกท่อพีวีซีขึ้น แป้งตัวอย่างจะกองคล้ายลักษณะสามเหลี่ยมปิรามิด
5. วัดมุมที่ฐานของกองแป้งด้วยเวอร์เนียร์แคลิบเปอร์ โดยใช้เวอร์เนียแคลิบเปอร์วัดความยาวของฐานของกองแป้ง ความยาวของด้านที่ติดกับฐาน จดบันทึกไว้

การคำนวณ โดยลากความยาวของฐานที่วัดได้ แล้วแบ่งครึ่งออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน ณ จุดกึ่งกลางของฐาน ให้ลากเส้นในแนวดิ่งหรือตั้งฉากตรงขึ้นไป จากนั้นลากความยาวของด้านที่ติดกับฐานที่วัดได้ไปบรรจบกับเส้นในแนวดิ่งให้พอดีกับความยาว จากนั้นวัดมุมป้านที่ได้ นำไปหักลบกับ 180 องศา ก็จะได้มุมแหลมหรือมุมที่ฐานของกองแป้งตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การทดสอบคุณสมบัติทางกลของแผ่นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัว (tensile strength and elongation)

โดยวิธีการ Standard Method D 882-91 ASTM (1991 : 39-47)

อุปกรณ์ : เครื่อง TA-XT2 Texture Analyser , England โดยใช้หัวทดสอบแบบที่มีลักษณะเป็นหัวหนีบ 2 หัว ตั้งระยะห่างกัน 20 มิลลิเมตร

วิธีการ : ตัดตัวอย่างฟิล์ม กว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร ยึดปลายข้างหนึ่งของตัวอย่างกับหัวทดสอบให้แน่น แล้วจึงยึดปลายอีกข้างหนึ่ง โดยไม่ให้ตึงเกินไป ไม่ควรจับชิ้นตัวอย่างส่วนที่อยู่ระหว่างที่ยึด เริ่มทดสอบโดยปรับเครื่องทดสอบให้มีค่าอัตราเร็วในการดึง 1.5 มิลลิเมตร/นาที และค่า load cell เท่ากับ 10 กิโลกรัม เครื่องวัดนี้จะต่อเข้ากับเครื่องพิมพ์ รายงานผลเป็นค่าการต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength) ถ้าชิ้นตัวอย่างเลื่อนหรือขาดตรงขอบที่ยึด แสดงว่ามีแรงตามแนวกว้างของชิ้นตัวอย่างไม่สม่ำเสมอให้ตัดค่าที่อ่านได้ทิ้งไป รายงานค่าต้านทานแรงดึงขาด (กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร) แล้วนำกราฟของแต่ละตัวอย่างที่ทดสอบมาหาการยืดตัว (คิดเป็นเปอร์เซนต์การยืดตัว)

การคำนวณ :

$$\text{ค่าการต้านทานแรงดึงขาด (กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร)} = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้ (กิโลกรัม)}}{\text{ความกว้าง (มิลลิเมตร) x ความหนา (มิลลิเมตร) ของฟิล์ม}}$$

$$\text{การยืดตัว (\%)} = \frac{\text{ระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบ x 100}}{\text{ความยาวเดิมของชิ้นตัวอย่างระหว่างหัวทดสอบ (มิลลิเมตร)}}$$

2. อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (sheet materials-determination of water vapour transmission rate-Dish method) ตามวิธีของ ASTM E 96

อุปกรณ์และสารเคมี : ถ้วยทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ
เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์
เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
พาราฟิน และซิลิกาเจลที่อบแห้งแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการ : ตัดตัวอย่างฟิล์มเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 ชิ้น โดยตัวอย่างต้องปราศจากรอยพับ ขีด รูรั่วที่มองเห็นได้ นำมาวางปิดปากถ้วยทดสอบที่มีซิลิกาเจลที่อบแห้งแล้วบรรจุอยู่ผนึกรอบปากถ้วยด้วยพาราฟินเพื่อมิให้มีรอยรั่ว นำไปชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด แล้วนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 27 ± 2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 2 % บันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 4 วัน

การคำนวณ :

อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapour Transmission Rate = WVTR) = $\frac{(G/t)}{A}$

(กรัมต่อตารางเมตร. 24 ชั่วโมง)

โดยที่ G / t = อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักต่อเวลา

A = พื้นที่ของตัวอย่าง = 28.27 ตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

วิธีการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วิธีการคำนวณการปรับปริมาณความชื้นของแป้งที่ต้องการ

วิธีการคำนวณ

1. ตรวจวัดปริมาณความชื้นของแป้งข้าวเจ้าปกติเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 10%
2. ต้องการปรับปริมาณความชื้นของแป้งจากข้อ 1 เป็น 13%
3. ปริมาณน้ำที่ต้องเติมลงไปในแป้ง สามารถคำนวณได้ดังนี้คือ

แป้งที่ความชื้น 10 % หมายถึง แป้ง 100 กรัม มีปริมาณน้ำอยู่ 10 กรัม และเป็นส่วนของของแข็งแห้งอยู่ 90 กรัม นั่นคือ แป้งที่มีความชื้น 13% พบว่า

ปริมาณของของแข็งแห้งจำนวน 87 กรัม มีปริมาณน้ำ = 13 กรัม

ปริมาณของของแข็งแห้งจำนวน 90 กรัม มีปริมาณน้ำ = 13 x (87 / 90) กรัม

= 12.57 กรัม

แต่ปริมาณน้ำที่มีอยู่เดิมเท่ากับ 10 กรัม เพราะฉะนั้นปริมาณน้ำที่ต้องเพิ่มจะมีค่าเท่ากับ 12.57 – 10 = 2.57 กรัม ต่อแป้งจำนวน 100 กรัม จึงทำให้แป้งมีความชื้นเป็น 13 %

2. วิธีการคำนวณปริมาณไซเลนที่ใช้ในการดัดแปรแป้ง

วิธีการคำนวณ

2.1. โพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (Propyltrimethoxysilane)

มีสูตรโครงสร้าง $CH_3 - (CH_2)_2 - Si - (OCH_3)_3$

มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 164.28

น้ำหนัก 1 โมลของแป้ง (Anhydrous glucose unit) เท่ากับ 162

ปริมาณของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนมีหน่วยเป็น โมล / โมลแป้งแห้ง

แป้งข้าวเจ้าปกติมีความชื้นเริ่มต้น 10% หมายความว่า แป้ง 1 กิโลกรัม จะมีปริมาณน้ำอยู่ 100 กรัม และเป็นส่วนของของแข็งแห้งอยู่ 900 กรัม หรือหากคิดเป็นจำนวนโมลจะมีค่าเท่ากับ 900 / 162 หรือ 5.56 โมล

ถ้าความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนที่ใช้เป็น 0.01 โมล/โมลแป้งแห้ง หมายความว่า แป้งแห้ง 1 โมล ต้องการปริมาณสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน = 0.01 โมล

แป้งแห้ง 5.56 โมล ต้องการปริมาณสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน

$$= \frac{0.01 \text{ โมล} \times 5.56 \text{ โมลแป้งแห้ง}}{1 \text{ โมลแป้งแห้ง}} = 0.0556 \text{ โมล}$$

1 โมลของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน = 164.28 กรัม

0.0556 โมลของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน = 0.0556 x 164.28

= 9.13 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น แป้งจำนวน 1 กิโลกรัมที่มีความชื้น 10% ที่มีส่วนของของแข็งแห้งจำนวน 5.56 โมล จะใช้ปริมาณของโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน เท่ากับ 9.13 กรัม

2.2. เทตราอีทอกซีไซเลน (Tetraethoxysilane)

มีสูตรโครงสร้าง $Si-(OC_2H_5)_4$

มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 208.33

คำนวณเช่นเดียวกับข้อ 2.1

3. การวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Multi Regression ของการทดลองแบบ RSM

ตัวอย่างการหาสมการของ response angle ด้วยการวิเคราะห์แบบ Multiple Regression จากตารางที่ 4.4

ตารางผนวกที่ ง.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ด้าน response angle ของตัวแปรต่าง ๆ และระดับการยอมรับที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตัวแปรอิสระ	Coefficient	Standard Error	t – value	Sig – level
ค่าคงที่	-44.1959	134.646	-0.328236	0.7470
X_1	7.42259	3.41118	2.17596	0.0449
X_2	0.469256	1.3188	0.355822	0.7226
X_3	-380.298	1937.75	-1.96257	0.8469
X_4	-0.287155	0.416624	-0.689242	0.5005
$X_1 * X_1$	-0.0504229	0.0422881	-1.19253	0.2504
$X_2 * X_2$	0.00046131	0.00380593	0.121208	0.9050
$X_3 * X_3$	11845.2	15223.7	0.778079	0.4479
$X_4 * X_4$	0.00067381	0.000608948	1.10651	0.2849
$X_1 * X_2$	-0.03125	0.0169602	-1.84255	0.0840
$X_1 * X_3$	-29.1667	33.9203	-8.59859	0.4026
$X_1 * X_4$	0.000833333	0.00678406	0.122837	0.9038
$X_2 * X_3$	-1.25	10.1761	-0.122837	0.9038
$X_2 * X_4$	-0.00025	0.0023522	-0.122837	0.9038
$X_3 * X_4$	3.5	4.07044	0.859859	0.4026

R – squared = 58.2421 จากค่าที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรที่จะปรากฏในสมการคือ ตัวแปรที่มีค่าระดับความแตกต่าง (sig – level) ต่ำกว่า 0.05 ดังนั้นตัวแปรที่จะปรากฏในสมการของ response angle ในแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ คือ ตัวแปร X_1 ส่วนตัวแปรอื่นในตารางไม่ปรากฏในสมการ เนื่องจากมีค่าระดับความแตกต่าง (sig – level) สูงกว่า 0.05 ดังนั้นจะได้สมการดังนี้

$$Y_1 = 7.4226X_1$$

เมื่อ X_1 คือ ปริมาณความชื้นของแป้งข้าวเจ้าผสมก่อนป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (%)

ตัวอย่างการหาสมการของระดับการแทนที่ด้วยการวิเคราะห์แบบ Multiple Regression จากตารางที่ 4.4

ตารางผนวกที่ ง.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ด้านระดับการแทนที่ของตัวแปรต่าง ๆ และระดับการยอมรับที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตัวแปรอิสระ	Coefficient	Standard Error	t – value	Sig – level
ค่าคงที่	0.127162	0.0498433	2.55123	0.00213
X_1	- 0.00147968	0.00126275	- 1.17179	0.2584
X_2	- 0.00116188	0.000488191	- 2.37998	0.0301
X_3	- 0.671798	0.717316	- 0.936544	0.3629
X_4	- 0.000188658	0.000154226	- 1.22326	0.2389
$X_1 * X_1$	0.0000211822	0.0000156542	1.35314	0.1948
$X_2 * X_2$	0.0000038564	0.00000140808	2.73722	0.0146
$X_3 * X_3$	25.3256	5.6355	4.49394	0.0004
$X_4 * X_4$	0.000000937	0.00000022542	4.15679	0.0007
$X_1 * X_2$	0.00000464583	0.0000062783	0.739983	0.4700
$X_1 * X_3$	0.0207917	0.0125566	1.65584	0.1172
$X_1 * X_4$	- 0. 000001625	0.00000251132	- 0.64707	0.5268
$X_2 * X_3$	- 0.0003875	0.00376698	- 1.02868	0.9193
$X_2 * X_4$	- 0.0000008225	0.00000075396	- 1.09172	0.2911
$X_3 * X_4$	0.001215	0.00150679	0.806349	0.4319

R – squared = 95.2711 จากค่าที่ได้จากการทดลอง

ตัวแปรที่จะปรากฏในสมการคือ ตัวแปรที่มีค่าระดับความแตกต่าง (sig – level) ต่ำกว่า 0.05 ดังนั้นตัวแปรที่จะปรากฏในสมการของระดับการแทนที่ในแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ คือ ตัวแปร X_2 , X_3 และ X_4 ส่วนตัวแปรอื่นในตารางไม่ปรากฏในสมการ เนื่องจากมีค่าระดับความแตกต่าง (sig – level) สูงกว่า 0.05 ดังนั้นจะได้สมการดังนี้

$$Y_3 = 0.1272 - 0.00116X_2 + 0.0000038X_2^2 + 25.3256X_3^2 + 0.0000009X_4^2$$

เมื่อ X_2 คือ อุณหภูมิของบาร์เรล (°C)

X_3 คือ ความเข้มข้นของสารโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (โมล/โมลแป้งแห้ง)

X_4 คือ ความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที)

Y_3 คือ ระดับการแทนที่

4. วิธีการคำนวณการหาจุดที่เหมาะสม (Optimum point)

วิธีการคำนวณ

อาศัยสมการ Differential จากสมการของตัวแปรต่าง ๆ ของสภาวะการผลิตในการดัดแปรแป้งข้าวเจ้ากับระดับการแทนที่(Y_3) ผลมาจากตาราง 9 โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์แบบ Multiple regression ดังภาคผนวก ง.3 จะได้สมการดังนี้

$$Y_3 = 0.1272 - 0.00116X_2 + 0.0000038X_2^2 + 25.3256X_3^2 + 0.0000009X_4^2 \quad \text{.....(1)}$$

อาศัยวิธีการ Differntiate ค่า Y เทียบกับค่า X ทีละตัว ดังนั้นจากสมการจะได้

$$dY_3 / dX_2 = 0 - 0.00116 + 0.0000076X_2 = 0$$

เมื่อ X_2 คือ อุณหภูมิของบาร์เรล (°C)

เมื่อแก้สมการแล้วจะได้ X_2 = 152 °C นำค่า X_2 มาแทนค่าลงในสมการที่ 1

จะได้สมการใหม่คือ $Y_3 = 0.0386752 + 25.3256X_3^2 + 0.0000009X_4^2$ .....(2)

หาจุดตัดของสมการ (2) โดยให้ $X_4 = 0$ จะได้

จะได้สมการใหม่คือ $Y_3 = 0.0386752 + 25.3256X_3^2$ .....(3)

แก้สมการเพื่อหาค่า X_3 โดยใช้สมการ $X = \dfrac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ ..... (4)

จะได้ค่า X_3 = 0.0391 โมล/โมลแป้งแห้ง

ทำนองเดียวกันจากสมการ (3) โดยให้ $X_3 = 0$

จะได้สมการใหม่คือ $Y_3 = 0.0386752 + 0.0000009x_4^2$ .....(5)

แก้สมการเพื่อหาค่า X_4 โดยใช้สมการ (4) จะได้ค่า X_4 = 207 rpm

เมื่อนำค่า X_2 = 152 , X_3 = 0.0391 และ X_4 = 207 ลงในสมการ (1)

จะได้ค่า Y_3 = 0.0776

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้