

# สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวโพดบดหยาบดัดแปร ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

## Physicochemical Properties of Modified Corn Grit Flour by Extrusion Process

นิพนธ์ ลิมสงวน\* จุฬาลักษณ์ จารุณช, วายุห์ สนเทศ,

พิศมัย ศรีชาเยช และกัษมาพร ปัญตะบุตร

ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Nipat Limsangouan\*, Chulaluck Charunuch, Vayuh Sonted,

Phisamai Srichayet and Kassamaporn Puntaburt

Department of Food Processing and Preservation, Institute of Food Research and Product Development,

Kasetsart University, Bangkok Campus, Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวโพดบดหยาบดัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะในการดัดแปร 3 ปัจจัย ได้แก่ ขนาดของอนุภาค (250, 500 และ 600 ไมครอน) ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (14, 16 และ 18 %) และความเร็วยกของสกรู (300, 350 และ 400 รอบต่อนาที) ที่มีผลต่อสมบัติด้านสี อัตราการพองตัว ความหนาแน่นรวม ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำ สมบัติในการไหลและความชื้นหนืด โดยจัดสิ่งทดลองแบบ factorial design เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยแต่ละปัจจัยในแต่ละระดับ ซึ่งจากการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณความชื้นเริ่มต้นส่งผลให้ความหนาแน่นรวม ความสามารถในการดูดซับน้ำ และสมบัติในการไหลและความชื้นหนืดเพิ่มขึ้น แต่กลับลดอัตราการพองตัวและความสามารถในการละลายน้ำ ในขณะที่การเพิ่มขนาดของอนุภาคทำให้ค่าความสว่างของสีเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีของการเพิ่มความเร็วยกของสกรูจะให้อัตราการพองตัวและความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น

**คำสำคัญ :** ข้าวโพดบดหยาบ; แป้งดัดแปร; เอกซ์ทรูชัน; สมบัติทางกายภาพ; สมบัติทางเคมี

### Abstract

This study investigated the physicochemical properties of corn grit flour modified by co-rotating twin screw extruder. The effect of particle size (250, 500 and 600  $\mu$ m), feed moisture

\*ผู้รับผิดชอบบทความ : ifrnpl@ku.ac.th

content (14, 16 and 18 %) and screw speed (300, 350 and 400 rpm) on color, expansion ratio, bulk density, water absorption index (WAI), water solubility index (WSI) and rheological of modified extrudates was investigated. Increasing feed moisture content resulted extrudates with higher bulk density, WAI and cold paste viscosity, but lower the expansion ratio and WSI. Increasing particle size caused a brighter color and higher amylose content than small particle size. The expansion ratio and WSI increased with increasing the screw speed.

**Keywords:** corn grit; modified starch; extrusion; physical property; chemical property

## 1. บทนำ

ปัจจุบันแป้งดัดแปร มีบทบาทในอุตสาหกรรมอาหารเป็นอย่างมาก เนื่องจากแป้งดิบซึ่งเป็นแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร มีสมบัติต่าง ๆ เฉพาะตัว อาจเป็นลักษณะพิเศษมาจากแหล่งที่ผลิต เช่น แป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง ซึ่งมีลักษณะจำเพาะ เช่น ขนาด รูปร่าง และการพองตัว แต่สิ่งที่แป้งทุก ๆ ชนิดมีคล้ายกัน คือ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อมีปัจจัยความร้อน แรงเฉือน และเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง ส่วนใหญ่แล้ว แป้งดิบจึงไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม เพราะมีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิตหรือความคงทนต่อสภาวะต่าง ๆ ต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำและสิ้นเปลืองงบประมาณในการผลิตโดยไม่จำเป็น ดังนั้นจึงมีการดัดแปรสมบัติบางประการของ แป้งดิบเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดี [1] การเกิดเจลาตินไนซ์ (gelatinization) การคืนตัว (retrogradation) และการสูญเสีย น้ำของเจลลดลง มีความคงตัวในการละลายจากการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw) เพิ่มขึ้น ลักษณะของเนื้อเจลดีขึ้น มีสมบัติความเป็นกาวเพิ่มขึ้น มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือความสามารถในการผสมกับตัวทำละลายอื่น ๆ เพิ่มขึ้น [2] ในการดัดแปรสตราร์ชใน แป้งนั้นแบ่งเป็น 3 วิธีใหญ่ ๆ คือ การดัดแปรทางเคมี

การดัดแปรทางกายภาพ และการดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ ซึ่งแต่ละวิธีจะให้สมบัติของ แป้งที่ผ่านการดัดแปรที่แตกต่างกัน

เอกซ์ทรูชันเป็นอีกกระบวนการหนึ่งในการดัดแปรสตราร์ชใน แป้งทางกายภาพ ใช้สำหรับการผลิต แป้งพรีเจลาติไนซ์หรือแป้งพรีเจล เป็น แป้งดัดแปรที่ทำ โดยให้ความร้อนแก่ แป้ง ทำให้ แป้งสุกหรือเกิดเจลาติไนซ์ แล้วทำให้แห้งและบดให้ละเอียด ได้ แป้งดัดแปรที่สามารถละลายกระจายตัวได้ในน้ำเย็น ให้ความหนืดได้ทันที และไม่เกิดเจล เป็นกระบวนการดัดแปร แป้งที่ไม่ยุ่งยาก เหมาะสำหรับใช้กับอาหารที่ไม่ต้องให้ความร้อน เช่น ขนมพุดดิ้ง น้ำเกรวี่ ซอส ส่วนผสมของซุปรอง [3] สามารถดูดซับน้ำได้มากกว่า แป้งดิบ ใช้เป็นสารยึดเกาะในอาหารประเภทเนื้อเพื่อช่วยรักษาความชุ่มชื้น และอุ้มน้ำในผลิตภัณฑ์ ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมเค้กเพื่อช่วยการดูดซับน้ำ และเก็บฟองอากาศได้ดีขึ้น ทำให้เค้กมีความชุ่มชื้นและมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ได้ลักษณะเนื้อเค้กที่มีความสม่ำเสมอ [4] ใช้เป็นส่วนผสมในของหวานที่มีลักษณะคล้ายโยเกิร์ต [5] ใช้เป็น texturizing agent สำหรับ oat cereal [6] ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวสำหรับส่วนผสมของอาหารแช่เยือกแข็ง เช่น milk shake [7] และใช้เป็นส่วนผสมในขนมขบเคี้ยว [8]

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำข้าวโพด ซึ่งถือเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศชนิดหนึ่ง โดยทำรายได้จากการส่งออกต่างประเทศ มีมูลค่าประมาณปีละ 6,000 ล้าน

บาท ทั้งนี้ส่วนใหญ่ส่งออกในรูปของเมล็ดข้าวโพดแห้ง ซึ่งมีมูลค่าต่ำ ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการนำเมล็ดข้าวโพดแห้งผ่านการแยกส่วนของคัพภะ และบดที่ 20-30 mesh ซึ่งเรียกว่าข้าวโพดบดหยาบ (corn grit) นำมาศึกษาสมบัติทางด้านกายภาพและเคมี หลังจากผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้เป็นแป้งตัดแปร เพื่อนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร อันเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบทางการเกษตรของไทย และสร้างความเข้มแข็งให้กับชุมชนต่อไป

## 2. อุปกรณ์และวิธีวิจัย

### 2.1 วัตถุดิบ

ข้าวโพดบดหยาบ (corn grit) สั่งซื้อจาก บริษัทอุตสาหกรรมแป้งข้าวสาลีไทย (กรุงเทพฯ)

### 2.2 การเตรียมตัวอย่าง

ใช้ข้าวโพดบดหยาบที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน 3 ขนาด โดยนำข้าวโพดบดหยาบบดด้วยเครื่อง Fitz mill (Comminutor serial # 1871, USA) และ Pin mill (Alpine Augsbug, Germany) ร่อนด้วยตะแกรงร่อนให้ได้ขนาดอนุภาคตามต้องการ หลังจากนั้นวัดขนาดอนุภาคของข้าวโพดบดหยาบโดยใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Mastersizer Scirocco 2000, United Kingdom)

### 2.3 กระบวนการเอกซ์ทรูชัน

นำข้าวโพดบดหยาบทั้ง 3 ขนาด (particle size) ป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูคู่ที่หมุนตามกัน (Hermann Berstoff Laboratory Co-rotating Twin Screw Extruder รุ่น ZE 25x33D, Germany) ซึ่งประกอบด้วยบาร์เรล 7 หัว ความยาวของบาร์เรลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 870:25 มม. บาร์เรลให้ความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าซึ่งควบคุมได้ในผนังบาร์เรลบางส่วนเป็นแจ็กเก็ตสองชั้นที่มีท่อน้ำสำหรับปั้มน้ำเย็นเข้าไปหมุนเวียนด้วยอัตราการไหลที่ควบคุมได้ เพื่อป้องกัน

ความร้อนที่สูงเกินไป ส่วนท้ายสุดของบาร์เรลประกอบด้วยหน้าแปลน ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 มม. ส่วนผสมวัตถุดิบถูกป้อนเข้าสู่เครื่องด้วยถังป้อนที่มีสกรูคู่อยู่ที่ก้นถังทำหน้าที่ป้อนวัตถุดิบแบบปริมาตร ซึ่งในสภาวะการผลิตของการทดลองนี้ได้อัตราการป้อนให้คงที่ แต่ปรับปริมาณน้ำเข้าให้ผสมกับวัตถุดิบในปริมาณที่แตกต่างกัน เพื่อแปรค่าปริมาณความชื้นของวัตถุดิบขณะป้อน (feed moisture) และแปรค่าความเร็วรอบของสกรู (screw speed) ให้แตกต่างกัน โดยจัดอุณหภูมิที่บาร์เรลให้คงที่ ( $H_2$ : 45 °C;  $H_3$ : 55 °C;  $H_4$ : 95 °C;  $H_5$ : 125 °C;  $H_6$ : 130 °C;  $H_7$ : 125 °C; Die: 120 °C) หลังจากผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน นำเอกซ์ทรูเดตที่ได้ทิ้งไว้ให้เย็น บางส่วนนำมาวิเคราะห์อัตราการพองตัวและความหนาแน่นรวม บางส่วนบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด Pin mill ใส่ช่องอะลูมิเนียมฟอยล์ เก็บในตู้เย็น รอการวิเคราะห์ภายในสัปดาห์

### 2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

#### 2.4.1 ความชื้น (moisture)

ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 2 g ใส่ใน moisture can ที่ทราบน้ำหนักคงที่แล้ว นำไปเข้า oven ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง นำออกมาใส่ใน desiccator 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก นำค่าที่ได้ไปคำนวณหา % moisture

#### 2.4.2 สี (color)

นำตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันและผ่านการบดด้วยเครื่อง Pin mill บรรจุใส่ในถุงพลาสติกใส และวัดสีผ่านถุงพลาสติกโดยใช้เครื่องวัดสี (Spectraflash 600plus; Datacolor International, USA) บันทึกค่าสี  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ในระบบ CIE Lab โดยค่า  $L^*$  คือ ค่าความสว่าง (0 = สีดำ, 100 = สีขาว) ค่า  $a^*$  คือ ค่าสีแดง-เขียว (+ = สีแดง, - = สีเขียว) และค่า  $b^*$  คือ ค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (+ = สีเหลือง, - = สีน้ำเงิน)

## 2.4.3 อัตราการพองตัว (expansion ratio)

นำเวอร์เนียร์มาวัดขนาดของตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยวัดแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง นำค่าที่วัดได้หารด้วยขนาดของหน้าแปลน จะได้ค่า expansion ratio [9]

อัตราการพองตัว = ขนาดของตัวอย่าง ÷ ขนาดของหน้าแปลน

## 2.4.4 ความหนาแน่นรวม (bulk density)

ใส่ตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันลงในกระบอกตวง 100 ml จนถึงระดับ ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างเทียบกับปริมาตรของกระบอกตวง จะได้ค่า bulk density [10]

ความหนาแน่นรวม = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในภาชนะ ÷ ปริมาตรของภาชนะที่บรรจุ

## 2.4.5 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption index, WAI)

ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 2.5 g ใส่ลงใน centrifuge tube ที่ทราบน้ำหนักแล้ว เติมน้ำกลั่น 30 ml คนด้วยแท่งแก้วนาน 30 นาที นำไปเข้าเครื่อง centrifuge ที่ 4,500 rpm นาน 35 นาที เทส่วนใสใส่ลงใน moisture can ที่ทราบน้ำหนักคงที่แล้ว นำ centrifuge tube และส่วนเจลที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า WAI [11]

ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) = (น้ำหนักของเจล - น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง) ÷ น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง

## 2.4.6 ความสามารถในการละลายน้ำ (water solubility index, WSI)

นำ moisture can ที่บรรจุส่วนใสที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์ WAI ไปประเหยจนแห้ง แล้วนำไปเข้าตู้อบสุญญากาศ (vacuum oven, WTC binder, Germany) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

นาน 5 ชั่วโมง นำ moisture can ใส่ใน desiccator นาน 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า WSI [12]

ความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) = (น้ำหนักของแข็งที่ได้จากส่วนใส × 100) ÷ น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง

## 2.4.7 สมบัติในการไหลและความข้นหนืด (pasting property)

วิเคราะห์โดยเครื่อง RVA (Rapid Visco Analyzer; Newport Scientific, Australia) คำนวณการใช้ น้ำหนักตัวอย่างโดยใช้สูตรคำนวณจากคู่มือการใช้เครื่อง  $[(86 \times 3.5) \div (100 - \% \text{moisture})]$  ชั่งน้ำกลั่น 25 g ใส่ลงใน Pan RVA ชั่งน้ำหนักตัวอย่างตามที่คำนวณได้ใส่ลงใน Pan RVA ที่มีน้ำกลั่น 25 g คนตัวอย่างให้เข้ากันด้วยใบพัด แล้ววัดสมบัติการไหลและความข้นหนืดโดยใช้เครื่อง Rapid Viscosity Analyzer โดยวิเคราะห์ค่า cold peak (I), raw peak, hold, breakdown, final viscosity, set back, peak time และ cold peak (II) ด้วย software “Thermocline for windows Version 2.1” profile ของการเดินเครื่องตาม RVATM Extrusion Method Profiles

## 2.5 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จัดสิ่งทดลองแบบ 3x3 factorial design โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ ขนาดอนุภาค (ที่ขนาด 250, 500 และ 600 ไมครอน) ความชื้นเริ่มต้น (ที่ 14, 16 และ 18 %) และความเร็วยรอบของสกรู (ที่ 300, 350 และ 400 รอบต่อนาที) แสดงดังตารางที่ 1 ทดลอง 3 ซ้ำ และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม SAS version 8.1

### 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

#### 3.1 สี (color)

การสังเกตสีของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันและบดให้ละเอียดแล้ว พบว่าผงแป้งดังกล่าวมีสีเหลืองนวล เมื่อวิเคราะห์ค่าสี ได้แก่  $L^*$ ,  $a^*$

และ  $b^*$  ระบบ CIE Lab ได้ผลดังตารางที่ 1 และหลังจากวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าค่า  $L^*$  บ่งบอกถึงความสว่างของแป้งข้าวโพดบดหยาบที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าสิ่งทดลองทั้ง 3 ปัจจัย ส่งผลต่อค่าความสว่าง

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งข้าวโพดบดหยาบตัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะต่าง ๆ

| Experiment | Particle size (micron) | Feed moisture (%) | Screw speed (rpm) | Color      |            |            | Expansion ratio | Bulk density (g/100 ml) | Water absorption index | Water solubility index |
|------------|------------------------|-------------------|-------------------|------------|------------|------------|-----------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
|            |                        |                   |                   | $L^*$      | $a^*$      | $b^*$      |                 |                         |                        |                        |
| 1          | 250                    | 14                | 300               | 85.13±0.61 | 7.86±0.78  | 39.34±0.87 | 4.09±0.08       | 4.73±0.08               | 3.72±0.06              | 48.90±0.50             |
| 2          | 250                    | 14                | 350               | 84.50±0.44 | 7.63±0.27  | 37.08±0.94 | 4.24±0.07       | 4.29±0.07               | 3.07±0.03              | 51.13±0.89             |
| 3          | 250                    | 14                | 400               | 83.15±0.51 | 7.94±0.32  | 37.18±0.75 | 4.21±0.05       | 4.3±7±0.10              | 2.43±0.03              | 59.86±2.09             |
| 4          | 250                    | 16                | 300               | 84.60±0.38 | 8.12±0.43  | 40.09±1.65 | 4.21±0.08       | 4.17±0.13               | 3.84±0.11              | 51.13±1.21             |
| 5          | 250                    | 16                | 350               | 83.17±0.17 | 7.79±0.11  | 38.89±0.15 | 4.22±0.06       | 4.07±0.10               | 3.89±0.11              | 48.89±1.09             |
| 6          | 250                    | 16                | 400               | 82.61±0.22 | 7.37±0.26  | 35.39±1.19 | 4.13±0.07       | 4.10±0.07               | 2.36±0.01              | 64.51±1.26             |
| 7          | 250                    | 18                | 300               | 86.44±0.10 | 9.00±0.17  | 43.33±1.13 | 3.81±0.07       | 6.33±0.27               | 4.79±0.09              | 42.50±0.64             |
| 8          | 250                    | 18                | 350               | 85.54±0.79 | 8.28±0.94  | 40.82±3.06 | 4.08±0.07       | 4.76±0.17               | 4.44±0.03              | 45.48±0.42             |
| 9          | 250                    | 18                | 400               | 85.27±0.40 | 7.66±0.41  | 39.34±1.69 | 4.08±0.04       | 4.60±0.14               | 3.46±0.03              | 53.94±1.58             |
| 10         | 500                    | 14                | 300               | 85.48±0.19 | 9.37±0.20  | 43.91±1.37 | 4.21±0.05       | 4.94±0.10               | 3.67±0.07              | 48.21±2.54             |
| 11         | 500                    | 14                | 350               | 85.62±0.44 | 8.44±0.50  | 41.43±1.69 | 4.22±0.10       | 4.51±0.29               | 2.61±0.03              | 61.22±1.33             |
| 12         | 500                    | 14                | 400               | 85.34±0.20 | 7.97±0.25  | 40.49±0.87 | 4.40±0.09       | 4.38±0.15               | 2.80±0.08              | 58.82±0.62             |
| 13         | 500                    | 16                | 300               | 87.32±0.22 | 8.97±0.38  | 44.03±1.73 | 3.79±0.08       | 7.63±0.18               | 4.88±0.06              | 42.03±0.55             |
| 14         | 500                    | 16                | 350               | 87.53±0.61 | 8.42±0.52  | 44.47±2.13 | 4.02±0.08       | 6.99±0.16               | 4.66±0.15              | 44.73±0.84             |
| 15         | 500                    | 16                | 400               | 87.70±0.63 | 7.94±0.67  | 41.96±1.62 | 4.17±0.07       | 6.12±0.15               | 3.82±0.16              | 52.16±1.35             |
| 16         | 500                    | 18                | 300               | 87.84±0.29 | 9.02±0.51  | 44.36±1.78 | 3.51±0.12       | 9.45±0.28               | 5.53±0.06              | 35.70±0.53             |
| 17         | 500                    | 18                | 350               | 87.84±0.33 | 8.64±0.23  | 44.01±2.21 | 3.79±0.07       | 8.37±0.32               | 5.38±0.07              | 39.62±0.55             |
| 18         | 500                    | 18                | 400               | 87.17±0.27 | 9.07±0.30  | 45.33±1.77 | 4.02±0.10       | 7.26±0.19               | 5.03±0.09              | 41.64±1.38             |
| 19         | 600                    | 14                | 300               | 85.62±0.25 | 8.97±0.27  | 44.13±1.57 | 4.15±0.08       | 5.05±0.14               | 3.45±0.20              | 50.72±1.98             |
| 20         | 600                    | 14                | 350               | 85.05±0.23 | 8.78±0.21  | 42.11±0.83 | 4.13±0.06       | 4.67±0.21               | 2.99±0.07              | 53.86±0.64             |
| 21         | 600                    | 14                | 400               | 84.88±0.41 | 8.36±0.41  | 40.35±1.46 | 4.05±0.04       | 4.63±0.12               | 2.05±0.02              | 63.44±1.31             |
| 22         | 600                    | 16                | 300               | 86.58±0.10 | 10.02±0.38 | 45.77±1.26 | 3.82±0.10       | 8.00±0.20               | 4.56±0.08              | 42.01±3.59             |
| 23         | 600                    | 16                | 350               | 85.87±0.44 | 10.25±0.39 | 44.76±0.60 | 3.85±0.08       | 6.60±0.21               | 3.89±0.09              | 46.54±1.89             |
| 24         | 600                    | 16                | 400               | 86.90±0.41 | 8.73±0.44  | 43.65±1.54 | 4.10±0.06       | 5.81±0.24               | 3.30±0.09              | 49.78±2.77             |
| 25         | 600                    | 18                | 300               | 86.29±0.25 | 10.46±0.48 | 44.35±2.00 | 3.54±0.09       | 9.61±0.26               | 5.69±0.13              | 33.01±1.22             |
| 26         | 600                    | 18                | 350               | 86.57±0.64 | 10.16±0.71 | 45.52±2.05 | 3.54±0.08       | 9.05±0.15               | 4.99±0.08              | 39.02±2.09             |
| 27         | 600                    | 18                | 400               | 86.36±0.45 | 10.21±0.63 | 45.94±1.29 | 3.65±0.05       | 8.05±0.08               | 4.26±0.06              | 41.05±0.82             |

ของแป้ง โดยปัจจัยที่ส่งผลมากที่สุด ได้แก่ ขนาดอนุภาค รองลงมา คือ ความชื้นเริ่มต้น ส่วนความเร็วรอบของสกรูส่งผลน้อยที่สุด เมื่อวิเคราะห์ระดับที่แตกต่างกันในแต่ละปัจจัย พบว่าขนาดอนุภาคเริ่มต้นของข้าวโพดบดหยาบก่อนป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ใหญ่ขึ้น มีแนวโน้มเพิ่มค่าความสว่างให้มากขึ้นด้วย เช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณความชื้นของแป้งเริ่มต้นยิ่งมากขึ้น ทำให้ค่าความสว่างเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่ในทางกลับกัน การเพิ่มความเร็วรอบของสกรูเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ยิ่งทำให้ค่าความสว่างลดลง อันเนื่องมาจากการที่ความเร็วรอบเพิ่มสูงขึ้นทำให้มีความดันภายในสูงขึ้น ส่งผลต่อเนื่องให้ระดับความร้อนภายในมากขึ้น จึงอาจทำให้เกิดการไหม้ รวมถึงปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลก็อาจเกิดขึ้นได้ง่ายในสภาวะดังกล่าว จึงทำให้ค่าความสว่างที่ได้ลดลงนั่นเอง ในขณะที่ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นจึงจำเป็นต้องมีการใช้พลังงานความร้อนภายในมากขึ้นในการหลอมเหลว รวมทั้งปริมาณความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ลดระดับความร้อนภายในเครื่องได้มากกว่าจึงทำให้สีของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านออกมาจากเครื่องมีค่าความสว่างมากกว่า ผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Charunuch และคณะ [13] ที่ทดลองในผลิตภัณฑ์อาหารเข้าธัญชาติผสมรำข้าว แต่เมื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 3 พบว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) แสดงว่าอิทธิพลร่วมระหว่างขนาดอนุภาค ความชื้นเริ่มต้น และความเร็วรอบสกรู ไม่มีผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์

ค่า  $a^*$  บ่งชี้ถึงระดับความเป็นสีแดง-เขียว โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสีมากที่สุด ได้แก่ ขนาดอนุภาคเริ่มต้น รองลงมา คือ ความชื้นเริ่มต้น และความเร็วรอบสกรู ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของระดับที่แตกต่างกันในแต่ละปัจจัย พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคและความชื้นเริ่มต้น ส่งผลให้ค่า  $a^*$  มีค่าเพิ่มขึ้น

แต่ในทางกลับกัน การเพิ่มความเร็วรอบสกรูกลับทำให้ค่าดังกล่าวลดลง เมื่อพิจารณาถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคและความเร็วรอบของสกรู และความชื้นเริ่มต้นและความเร็วรอบของสกรู พบว่าไม่มีผลต่อค่า  $a^*$  แต่เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของทั้ง 3 ปัจจัย กลับพบว่าส่งผลต่อกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แสดงว่าอิทธิพลร่วมของทั้ง 3 ปัจจัย ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี  $a^*$  ของตัวอย่าง

ค่า  $b^*$  บ่งชี้ถึงระดับความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน เมื่อวิเคราะห์ค่าสีโดยรวมอยู่ที่ 42.15 แสดงถึงความเป็นสีเหลือง โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสีนี้มากที่สุด ได้แก่ ขนาดอนุภาคเริ่มต้น รองลงมา คือ ความชื้นเริ่มต้น และความเร็วรอบสกรู ตามลำดับ (ให้ผลการวิเคราะห์เช่นเดียวกับค่า  $a^*$ ) เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของระดับที่แตกต่างกันในแต่ละปัจจัย พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคและความชื้นเริ่มต้น ส่งผลให้ค่า  $b^*$  มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกัน การเพิ่มความเร็วรอบสกรูกลับทำให้ค่าดังกล่าวลดลง เมื่อพิจารณาถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคและความชื้นเริ่มต้น ขนาดอนุภาค และความเร็วรอบของสกรู และปฏิสัมพันธ์ของทั้ง 3 ปัจจัย พบว่าจะไม่ผลต่อค่า  $b^*$

### 3.2 อัตราการพองตัว (expansion ratio)

การวิเคราะห์อัตราการพองตัวของเอกซ์ทรูเดตของแป้งข้าวโพดบดหยาบที่สภาวะการทดลองที่แตกต่างกันได้ผลดังตารางที่ 1 ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาทั้ง 3 ปัจจัยมีผลต่ออัตราการพองตัวเป็นอย่างดี เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นมีอิทธิพลต่อการพองตัวมากที่สุด รองลงมา คือ ขนาดของอนุภาค และความเร็วรอบของสกรู ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ระดับที่แตกต่างกันในแต่ละปัจจัย โดยสรุปพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นเริ่มต้นให้สูงขึ้นจะทำให้อัตราการพองตัวลดลง ทั้งนี้เพราะความชื้นที่สูงจะลดความหนืดของแป้งโด และลดพลังงานที่เกิดขึ้นจากการ

เสียดสีของแป้งโดในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เป็นผลให้ลดการเกิดเจลลาทีโนเซชันและการพองตัว (ทำให้ความดันในระบบลดลงก่อนออกสู่หน้าแปลน) ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Charunuch และคณะ [14] ที่ศึกษาอัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ผสมผงใบหม่อน โดยการเพิ่มขนาดของอนุภาคเริ่มต้นจะส่งผลให้อัตราการพองตัวลดลง ในขณะที่การเพิ่มความเร็วรอบของสกรูมีแนวโน้มทำให้อัตราการพองตัวของเอกซ์ทรูเดตเพิ่มสูงขึ้น เมื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ( $p < 0.05$ ) กล่าวคือ อิทธิพลร่วมของทั้ง 3 ปัจจัย ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการพองตัว

### 3.3 ความหนาแน่นรวม (bulk density)

ความหนาแน่นรวมถือเป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึงการพองตัวของผลิตภัณฑ์ โดยที่เอกซ์ทรูเดตที่พองตัวได้น้อยจะมีความหนาแน่นรวมสูง และในขณะเดียวกันถ้าเอกซ์ทรูเดตพองตัวได้มากจะมีความหนาแน่นรวมต่ำ จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวมของแป้งข้าวโพดบดหยาบดัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ได้ผลดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าค่าความหนาแน่นรวมมีความสัมพันธ์กับอัตราการพองตัว กล่าวคือ หากความหนาแน่นรวมมีค่าสูงจะทำให้มีอัตราการพองตัวต่ำ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Singh และคณะ [15] ซึ่งทดลองผสมแป้งข้าวสาลีกับเกล็ดมันฝรั่ง โดยศึกษาปริมาณของความชื้นเริ่มต้นต่ออัตราการพองตัวและความหนาแน่นรวม เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นรวมมากที่สุด คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น รองลงมา คือ ขนาดของอนุภาค และความเร็วรอบของสกรู ตามลำดับ โดยปริมาณความชื้นในระดับที่สูงขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นรวมของเอกซ์ทรูเดตสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เพราะความชื้นที่สูงจะทำให้เกิดการลดความหนืดของ

แป้งโด และลดพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เป็นผลให้ลดการเกิดเจลลาทีโนเซชันและลดการพองตัว หรือเป็นการเพิ่มความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่มีผลการทดลองในลักษณะดังกล่าว ที่ศึกษาในเอกซ์ทรูเดตจากข้าวโพด [16] และจากข้าวโอ๊ต [17] เช่นเดียวกับการเพิ่มขนาดของอนุภาค ในขณะที่ความเร็วรอบของสกรูที่เพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้ความหนาแน่นรวมมีค่าลดลง เมื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ( $p < 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลร่วมของแต่ละปัจจัยส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นรวมของตัวอย่างที่ทดสอบ

### 3.4 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI)

ค่า WAI เป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึงการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงจากแป้งดิบกลายเป็นแป้งสุก เมื่อได้รับความร้อนและปริมาณน้ำที่เพียงพอ [12] จากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งข้าวโพดบดหยาบดัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ได้ผลดังตารางที่ 1 ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาทั้ง 3 ปัจจัย มีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำ เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นมีอิทธิพลต่อการดูดซับน้ำมากที่สุด รองลงมา คือ ความเร็วรอบของสกรู และขนาดของอนุภาค ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ระดับที่แตกต่างกันในแต่ละปัจจัย พบว่าเมื่อเพิ่มระดับความชื้นเริ่มต้นให้สูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับรายงานของ Anderson และคณะ [11] ที่ศึกษาค่า WAI ของแป้งข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยค่า WAI ของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นตามความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและการเพิ่มอุณหภูมิของบาเรล ในขณะที่การเพิ่มความเร็วรอบของสกรูมีแนวโน้มทำให้

ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง ในกรณีของขนาดอนุภาคเริ่มต้น พบว่าอนุภาคขนาด 500 ไมครอน มีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงกว่าขนาดอนุภาค 600 และ 250 ไมครอน ตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์หรืออิทธิพลร่วมของแต่ละปัจจัย พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลร่วมของทั้ง 3 ปัจจัย ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับน้ำ

### 3.5 ความสามารถในการละลายน้ำ (WSI)

ค่า WSI เป็นค่าที่ได้จากปริมาณของแห้ง (dry matter) ที่ได้จากการระเหยส่วนใสที่แยกจากเจลในการวิเคราะห์ค่า WAI ซึ่งค่า WSI นี้สัมพันธ์กับปริมาณสารที่ละลายน้ำ (solubilized molecule) โดยบ่งบอกถึงปริมาณการแปลงแป้ง (starch conversion) ที่เกิดขึ้นเมื่อเม็ดสตาร์ชถูกทำลายและสามารถจับกับน้ำได้มากขึ้น รวมถึงสัมพันธ์กับปฏิกิริยาการเกิด dextrinization ที่มักเกิดขึ้นหลังจากที่แป้งดูดน้ำในปริมาณสูงสุดแล้ว [18] จากการวิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำของแป้งข้าวโพดบดหยาบตัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้ผลดังตารางที่ 1 ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาทั้ง 3 ปัจจัยมีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำ ( $p < 0.05$ ) เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นมีอิทธิพลต่อการละลายมากที่สุด รองลงมา คือ ความเร็วรอบของสกรู และขนาดของอนุภาค ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ระดับที่แตกต่างกันในแต่ละปัจจัย โดยสรุปพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นเริ่มต้นให้สูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลง ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Stojceska และคณะ [19] ซึ่งศึกษาผลของความชื้นเริ่มต้นต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวผสมผักที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ในขณะที่การเพิ่มความเร็วรอบของสกรูมีแนวโน้มทำให้ความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มสูงขึ้น ในกรณีผล

ของขนาดอนุภาคเริ่มต้น พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคให้สูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลง และเมื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) จากการที่ความชื้นเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น และความเร็วรอบสกรูน้อยลง จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลงนั่นเอง ดังนั้นค่า WSI มีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นรวมด้วย

### 3.6 สมบัติในการไหลและความข้นหนืด (rheological property)

สมบัติในการไหลและความข้นหนืดเป็นสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่เป็นดัชนีบ่งชี้ความสมบูรณ์ของการเกิดเจลที่ในเซชัน สำหรับกรณีของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูชันนั้น ได้มีการวิเคราะห์ค่าความหนืดและระยะเวลาที่เกิดขึ้นทั้งหมด 8 ค่า ได้แก่ cold peak (I), raw peak, hold, breakdown, final viscosity, set back, peak time และ cold peak (II) ดังตารางที่ 2 เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ สำหรับค่าตอบสนอง 7 ค่า ที่เกี่ยวเนื่องกับความข้นหนืด ได้แก่ cold peak (I), raw peak, hold, breakdown, final viscosity, set back และ cold peak (II) พบว่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นมีอิทธิพลต่อความหนืดมากที่สุด รองลงมา คือ ความเร็วรอบของสกรู และขนาดของอนุภาค ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ระดับที่แตกต่างกันในแต่ละปัจจัย โดยสรุปพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นและขนาดอนุภาคเริ่มต้นให้สูงขึ้นจะทำให้ความหนืดเพิ่มสูงขึ้น แต่ในทางกลับกัน การเพิ่มความเร็วรอบของสกรูจะทำให้ความหนืดของเอกซ์ทรูเตลดลดลง ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับ El Dash และคณะ [20] และ Paton และ Spratt [21] ซึ่งทดลองในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีตามลำดับ สำหรับค่า peak time พบว่าปัจจัยที่ศึกษาทั้ง 3 ปัจจัย ไม่มีผล

ต่อค่าดังกล่าว ( $p > 0.05$ )

เมื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลจากสถานะในการศึกษาที่ระดับอุณหภูมิและแรงกวนที่แตกต่างกันตาม profile (extrusion) ของการวิเคราะห์ RVA สำหรับแป้งข้าวโพดบดหยาบดัดแปรทั้ง 3 ขนาด ทั้งก่อนและหลังกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ได้ผลดังรูปที่ 1 จากรูปที่ 1 (ก) แสดงสมบัติการไหลและความชื้น

หนืดของแป้งข้าวโพดบดหยาบทั้ง 3 ขนาด ซึ่งไม่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยพบว่าที่ขนาดอนุภาค 250 ไมครอน จะให้ความหนืดสูงสุด รองลงมา คือ ที่ขนาด 600 และ 500 ไมครอน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความหนืดของแป้งที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันจะมีค่าที่ค่อนข้างสูง และหลังจากลดอุณหภูมิ (เมื่อเม็ดแป้งสุก) พบว่าความหนืดจะเพิ่มสูงขึ้น (final viscosity) ซึ่ง

ตารางที่ 2 สมบัติในการไหลและความชื้นหนืดของแป้งข้าวโพดบดหยาบดัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

| Experiment | Cold peak (I) (cP) | Raw peak (cP) | Hold (cP)    | Breakdown (cP) | Final viscosity (cP) | Set back (cP) | Peak time (min) | Cold peak (II) (cP) |
|------------|--------------------|---------------|--------------|----------------|----------------------|---------------|-----------------|---------------------|
| 1          | 313.00±16.52       | 319.00±16.09  | 44.33±4.16   | 274.67±12.01   | 177.33±4.51          | 133.00±1.00   | 2.27±0.07       | 629.64±26.10        |
| 2          | 279.67±19.66       | 281.33±18.50  | 55.00±19.08  | 226.33±18.77   | 164.33±17.90         | 109.33±1.53   | 2.09±0.03       | 592.00±34.39        |
| 3          | 275.67±13.58       | 276.00±14.53  | 85.67±7.57   | 190.33±21.22   | 184.67±4.04          | 99.00±11.27   | 2.24±0.10       | 586.68±17.19        |
| 4          | 452.33±23.97       | 453.67±24.54  | 107.67±29.57 | 346.00±16.00   | 264.00±26.06         | 156.33±5.13   | 2.11±0.03       | 912.87±34.09        |
| 5          | 399.33±28.22       | 400.00±27.78  | 64.67±9.29   | 335.33±33.65   | 184.00±9.54          | 119.33±1.53   | 2.11±0.08       | 833.37±42.02        |
| 6          | 384.00±12.53       | 382.67±12.58  | 91.33±21.94  | 291.33±24.01   | 187.00±21.70         | 95.67±1.53    | 2.13±0.07       | 810.08±23.69        |
| 7          | 616.00±22.61       | 625.67±30.89  | 128.67±2.08  | 497.00±29.51   | 350.67±2.89          | 222.00±1.00   | 2.29±0.19       | 1168.08±17.59       |
| 8          | 504.67±11.50       | 504.33±13.01  | 116.33±1.53  | 388.00±14.53   | 280.33±1.15          | 164.00±1.00   | 2.09±0.03       | 1038.76±3.96        |
| 9          | 451.00±17.35       | 453.00±19.92  | 111.33±3.51  | 341.67±16.86   | 249.67±2.52          | 138.33±1.15   | 2.09±0.03       | 904.04±26.34        |
| 10         | 393.00±25.51       | 394.00±27.51  | 107.33±5.69  | 286.67±22.01   | 286.67±4.16          | 179.33±2.89   | 2.11±0.03       | 818.18±28.94        |
| 11         | 321.00±17.35       | 321.67±17.79  | 95.33±15.50  | 226.33±19.50   | 249.67±14.98         | 154.33±4.16   | 2.15±0.04       | 675.06±24.32        |
| 12         | 304.33±17.10       | 305.00±18.25  | 88.67±14.57  | 216.33±17.47   | 219.00±12.49         | 130.33±2.52   | 2.15±0.04       | 638.77±22.09        |
| 13         | 449.00±13.00       | 450.33±11.85  | 107.33±2.52  | 343.00±13.89   | 352.33±3.51          | 245.00±1.00   | 2.13±0.07       | 944.29±20.88        |
| 14         | 405.00±7.81        | 406.67±5.51   | 83.00±14.00  | 323.67±17.21   | 296.33±13.32         | 213.33±3.06   | 2.15±0.04       | 848.75±13.34        |
| 15         | 350.00±13.00       | 349.67±21.39  | 102.67±5.86  | 247.00±15.59   | 283.33±2.08          | 180.67±3.79   | 2.29±0.03       | 729.52±45.45        |
| 16         | 763.00±19.00       | 752.67±24.38  | 109.67±7.37  | 643.00±17.09   | 465.67±10.69         | 356.00±4.00   | 2.09±0.03       | 1566.48±24.21       |
| 17         | 582.33±13.32       | 583.00±13.08  | 113.33±4.93  | 469.67±18.01   | 388.67±5.03          | 275.33±1.53   | 2.22±0.14       | 1177.82±11.59       |
| 18         | 511.00±13.23       | 545.33±65.53  | 111.67±2.08  | 433.67±67.00   | 346.67±2.52          | 235.00±4.58   | 2.89±1.37       | 1035.69±20.96       |
| 19         | 331.67±35.64       | 330.33±32.72  | 61.33±25.42  | 269.00±8.00    | 226.33±23.86         | 165.00±2.65   | 2.07±0.00       | 664.11±40.63        |
| 20         | 253.33±10.79       | 254.33±12.22  | 46.67±14.01  | 207.67±7.77    | 190.00±13.08         | 143.33±2.08   | 2.29±0.21       | 548.07±16.69        |
| 21         | 237.00±1.00        | 239.67±2.89   | 53.00±1.00   | 186.67±2.08    | 180.00±1.00          | 127.00±2.00   | 2.11±0.03       | 521.32±2.44         |
| 22         | 537.00±18.74       | 539.33±26.27  | 115.00±29.31 | 424.33±7.37    | 367.33±24.19         | 252.33±5.13   | 2.16±0.10       | 1091.33±37.83       |
| 23         | 438.00±5.29        | 439.33±5.86   | 104.67±1.15  | 334.67±4.73    | 308.67±2.52          | 204.00±1.73   | 2.14±0.12       | 920.58±8.05         |
| 24         | 356.67±28.29       | 359.33±27.47  | 71.67±26.76  | 287.67±10.97   | 250.33±26.10         | 178.67±4.04   | 2.27±0.20       | 729.75±37.52        |
| 25         | 785.33±16.07       | 779.33±14.05  | 169.33±20.21 | 610.00±14.80   | 547.67±19.55         | 378.33±1.53   | 2.13±0.07       | 1589.81±36.40       |
| 26         | 617.33±12.86       | 615.67±11.93  | 141.33±1.53  | 474.33±12.86   | 430.67±2.52          | 289.33±2.31   | 2.11±0.03       | 1270.03±31.13       |
| 27         | 534.00±14.18       | 529.33±17.90  | 121.33±6.66  | 408.00±15.72   | 365.00±3.46          | 243.67±4.73   | 2.13±0.07       | 1095.52±18.84       |

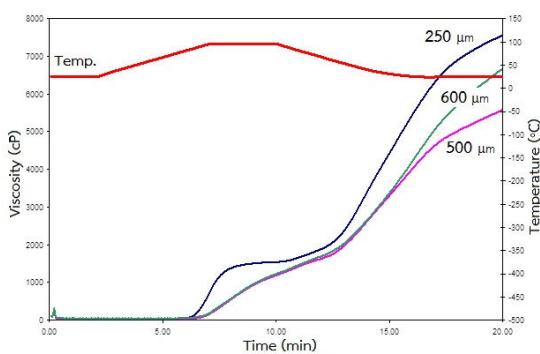
จะแตกต่างกับ RVA curve ของแป้งเมื่อผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (final viscosity จะแตกต่างกับ cold peak (I) ไม่มากนัก)

เมื่อกำหนดให้ปริมาณความชื้นเริ่มต้นคงที่ที่ 16 % และความเร็วรอบของสกรูอยู่ที่ 350 rpm RVA curve ของแป้งดัดแปรที่ได้แสดงดังรูปที่ 1 (ข) พบว่าสมบัติในการไหลและความหนืดที่ได้เมื่อขนาดอนุภาคแตกต่างกัน มีแนวโน้มที่ให้ความหนืดสูงที่สุด รองลงมา คือ 500 และ 250 ไมครอน ตามลำดับ

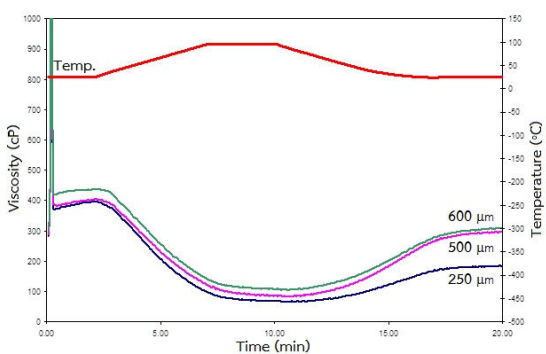
เมื่อกำหนดให้ขนาดของอนุภาคคงที่ที่ 500 ไมครอน และความเร็วรอบของสกรูอยู่ที่ 350 rpm RVA curve ของแป้งดัดแปรที่ได้แสดงดังรูปที่ 1 (ค)

พบว่าสมบัติในการไหลและความหนืดที่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นเริ่มต้น โดยปริมาณความชื้นที่ 18 % มีแนวโน้มที่ให้ความหนืดสูงที่สุด รองลงมา คือ 16 และ 14 % ตามลำดับ

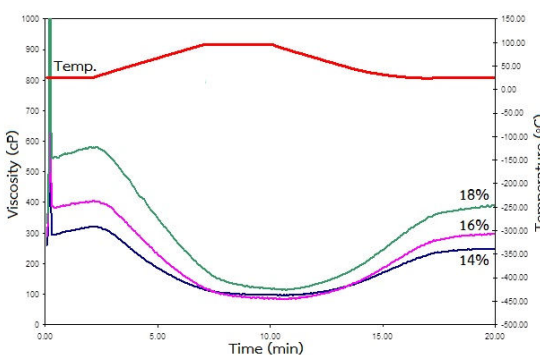
และเมื่อกำหนดให้ขนาดของอนุภาคคงที่ที่ 500 ไมครอน และปริมาณความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 16 % RVA curve ของแป้งดัดแปรที่ได้แสดงดังรูปที่ 1 (ง) พบว่าสมบัติในการไหลและความหนืดจะผันแปรตามความเร็วรอบของสกรู โดยความเร็วรอบของสกรูที่ 300 รอบต่อนาที มีแนวโน้มที่ให้ความหนืดสูงที่สุด รองลงมา คือ 350 และ 400 รอบต่อนาที ตามลำดับ



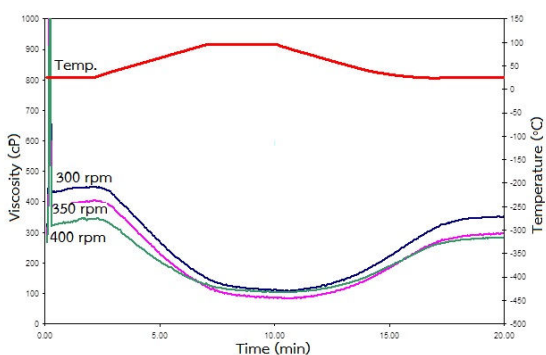
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 1 RVA curve แสดงแนวโน้มความหนืดของแป้งข้าวโพดบดหยาบดัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (ก) ไม่ผ่านการดัดแปร (ข) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน (ค) ที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นต่างกัน และ (ง) ที่ความเร็วรอบของสกรูต่างกัน

#### 4. สรุป

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณลักษณะของแป้งข้าวโพดบดหยาบดัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ได้แก่ ขนาดของอนุภาค ปริมาณความชื้นเริ่มต้น และความเร็วรอบของสกรู ซึ่งทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งดัดแปรที่ได้ ได้แก่ อัตราการพองตัว ความหนาแน่นรวม ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำได้ เป็นต้น ดังนั้นในการนำเอาแป้งดัดแปรที่ได้นี้มาใช้ประโยชน์จึงต้องคำนึงถึงสมบัติเหล่านั้นด้วย โดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันทำให้เกิด pre-gelatinization product ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น และละลายได้ดีในน้ำร้อน จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่พร้อมกินด้วยน้ำร้อนหรือน้ำเย็น เช่น เครื่องดื่มผง ซึ่งควรใช้สภาวะในการดัดแปรที่ช่วยทำให้ค่าการละลายน้ำเพิ่มสูงขึ้น เช่น สภาวะที่มีการลดความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบขณะป้อนเข้าเครื่อง และในทางกลับกันสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารเข้าธัญพืชซึ่งต้องการให้ผลิตภัณฑ์สามารถกระจายตัวในน้ำได้นานก็ควรดัดแปรแป้งในสภาวะที่ทำให้มีค่าการดูดซับน้ำลดลง เช่น สภาวะที่มีการลดความชื้นเริ่มต้น หรือหากต้องการให้ได้ผลิตภัณฑ์พองกรอบที่มีอัตราการพองตัวสูง ก็ควรเลือกเอกซ์ทรูเดอร์ที่ได้มาจากสภาวะการดัดแปรที่ทำให้มีอัตราการพองตัวสูง แต่ความหนาแน่นรวมต่ำ เช่น ใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำและใช้ความเร็วรอบของสกรูสูง ๆ ในการผลิต

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการดำเนินโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร ที่อนุเคราะห์สถานที่ในการปฏิบัติงานพร้อมเครื่องจักร และอุปกรณ์

#### ทั้งหมดในการทดลอง

#### 6. รายการอ้างอิง

- [1] Light, J.M., 1990, Modified food starches: Why, what, where and how, *Cereal Foods World* 35: 1081-1092.
- [2] BeMiller, J.N., 1997, Starch modification: Challenges and prospects, *Starch/Staerke* 49: 127-131.
- [3] Power, E.L., 1967, Production and Use of Pregelatinized Starch, pp. 523-536, In Whistler, R.L. and Paschall, E.F. (Eds.), *Starch: Chemistry and Technology Vol. II*, Academic Press, Inc., New York.
- [4] Boettger, M., 1963, Recent study show the effect of pregelatinized starches on cake quality, *Cereal Sci. Today* 8: 106-108.
- [5] Gardiner, D.S., 1975, Dessert Composition, British-Patent, 1 419 996.
- [6] Ronai, K.S. and Spanier, H.C., 1972, Instant Oat Cereal, United-State-Patent, 3 704 134.
- [7] Senda, A., 1991, Premix Preparation for Ice Foods, United-States-Patent, 5 006 359.
- [8] Beltran, E.G. and Singer, N.S., 1970, Snack Food, Canadian-Patent, 847 281 (847281).
- [9] Anton, A.A., Fulcher, R.G. and Arntfield, S.D., 2009, Physical and nutritional impact of fortification of corn starch-based extruded snacks with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour: Effects of bean addition and extrusion cooking, *Food Chem.* 113: 989-996.

- [10] Rahman, M.S., 1995, Food Properties Handbook, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, 528 p.
- [11] Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeifer, V.F. and Griffin, E.L., 1969, Gelatinization of corn grits by roll- and extrusion-cooking, Cereal Sci. Today 14: 4-12.
- [12] Ding, Q.B., Ainsworth, P., Plunkett, A., Tucker, G. and Marson, H., 2006, The effect of extrusion condition on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks, J. Food Eng. 73: 142-148.
- [13] Charunuch, C., Limsangouan, N., Prasert. W. and Wongkrajang, K., 2014, Optimization of extrusion conditions for ready-to-eat breakfast cereal enhanced with defatted rice bran, Int. Food Res. J. 21: 713-722.
- [14] Charunuch, C., Tangkanakul, P., Rungchang, S. and Sonted, V., 2008, Application of mulberry (*Morus alba* L.) for supplementing antioxidant activity in extruded Thai rice snack, Int. Kasetsart. J. (Nat. Sci.) 42: 79-87.
- [15] Singh, N., Singh, B., Sandhu, K.S., Bawa, A.S. and Seknon, K.S., 1996, Extrusion behavior of wheat, rice and potato blends, J. Food Sci. Technol. 30: 291-294.
- [16] Barrett, A.H. and Peleg, M., 1992, Extrudate cell structure-texture relationships, J. Food Sci. 57: 1253-1257.
- [17] Pan, Z., Zhang, S. and Jane, J., 1998, Effect of extrusion variables and chemicals on the heamolysis, Phytochem. 36: 579-583.
- [18] Mercier, C., Linko, P. and Harper, J.M., 1989, Extrusion Cooking. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, 471 p.
- [19] Stojceska, V., Ainsworth, P., Plunkett, A. and Ibanoglu, S., 2009, The effect of extrusion cooking using different water feed rates on the quality of ready-to-eat snacks made from food by-products, Food Chem. 114: 226-232.
- [20] El Dash, A.A., Gonzales, R. and Ciol, M., 1983, Response surface methodology in the control of thermoplastic extrusion of starch, J. Food Eng. 2: 129-152.
- [21] Paton, D. and Stratt, W.A., 1984, Component interactions in the extrusion cooking process: Influence of process conditions on the functional viscosity of the wheat flour system, J. Food Sci. 49: 1380-1385.