



สภาวะการหุงและการเก็บรักษาต่อคุณภาพ ความคงตัวของแอนโทไซยานิน
และกรดฟีนอลิกในข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภค

**Cooking Condition and Storage Time on Quality, Stability of Anthocyanin and
Phenolic Acid in Ready-to-Eat Cooked Sangyod Brown Rice**

วิลพร กลาย

Wilaiporn Klay

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Food Science and Technology**

Prince of Songkla University

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



สภาวะการหุงและการเก็บรักษาต่อคุณภาพ ความคงตัวของแอนโทไซยานิน
และกรดฟีนอลิกในข้าวกล้องงอกสัภัยหุงสุกพร้อมบริโภค

**Cooking Condition and Storage Time on Quality, Stability of Anthocyanin and
Phenolic Acid in Ready-to-Eat Cooked Sangyod Brown Rice**

วิไลพร กลาย

Wilaiporn Klay

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Food Science and Technology
Prince of Songkla University**

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ สภาวะการหุงและการเก็บรักษาต่อคุณภาพ ความคงตัวของแอนโทไซยานิน
 และกรดฟีนอลิกในข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภคน

ผู้เขียน นางสาววิไลพร กลาย

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มุกิตา มีนุ่น)

.....ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวคนธ์ วัฒนจันทร์)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มุกิตา มีนุ่น)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพิมล มะยะเขียว)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และ
 เทคโนโลยีอาหาร

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้างูสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มุกิตา มีนุ่น)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(นางสาววิไลพร กลาย)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นางสาววิไลพร กลาย)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	สภาวะการหุงและการเก็บรักษาต่อคุณภาพ ความคงตัวของแอนโทไซยานิน และกรดฟีนอลิกในข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภครวม
ผู้เขียน	นางสาววิไลพร กลาย
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

ข้าวกล้องสังข์หยดเป็นพันธุ์ข้าวพื้นเมืองดั้งเดิมในจังหวัดพัทลุง มีลักษณะเด่นเฉพาะตัวคือ เมล็ดข้าวกล้องมีลักษณะสีแดงเข้ม ซึ่งเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ แอนโทไซยานิน และกรดฟีนอลิก ข้าวกล้องสังข์หยดจัดเป็นข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ดังนั้น ข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิท จึงเป็นทางเลือกสำหรับผู้บริโภคที่สนใจในผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ให้ความสะดวกในการบริโภค และการพกพา อย่างไรก็ตาม แอนโทไซยานิน และกรดฟีนอลิก ซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญในข้าวกล้องสังข์หยดจัดเป็นสารที่ไม่คงตัวต่อสภาวะการแปรรูป และเก็บรักษา ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดแอนโทไซยานิน ผลของกระบวนการแปรรูปและสภาวะการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภค

ข้าวกล้องสังข์หยดถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ พบว่าข้าวกล้องสังข์หยดมีความกว้างและความยาวของเมล็ด เท่ากับ 1.80 และ 6.60 มิลลิเมตร ตามลำดับ อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง เท่ากับ 3.67 จัดเป็นข้าวที่มีลักษณะเมล็ดเรียวยาว มีน้ำหนักเมล็ด เท่ากับ 1.54 กรัมต่อข้าว 100 เมล็ด มีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใย ใย และ อะไมโลส เท่ากับร้อยละ 11.00, 6.28, 2.41, 3.54, 1.40 และ 14.64 ตามลำดับ ในขณะที่สมบัติการเกิดเจลลิตในเซชันของข้าวกล้องสังข์หยด โดยพบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตในเซชัน อุณหภูมิสูงสุดใน การเกิดเจลลิตในเซชัน อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลิตในเซชัน และการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปี มีค่าเท่ากับ 76.73, 81.86, 88.01 องศาเซลเซียส และ 9.42 จูลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนรูปแบบโครงสร้างผลึกของสตาร์ชในข้าวกล้องสังข์หยดจะมีรูปแบบผลึกชนิด A และมีปริมาณผลึกร้อยละ 30.68 ข้าวกล้องสังข์หยดมีค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดสุดท้าย และค่าการคืนตัว เท่ากับ 75.05, 127.42 และ 61.58 RVU ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดมีค่าเท่ากับ 93.75 องศาเซลเซียส

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดแอนโทไซยานินในข้าวกล้องสังข์หยด โดยใช้โปรแกรม Design expert กำหนดความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 0, 45 และ 90 ปริมาตรโดยปริมาตร ความเข้มข้นของกรดซิตริก ร้อยละ 0, 2.5 และ 5 น้ำหนักโดยปริมาตร และเวลาการสกัด 1, 12.5 และ 24 ชั่วโมง พบว่า เมื่อความเข้มข้นของเอทานอล กรดซิตริก และเวลาการสกัดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เฉดสี (Hue angle) และ ความเข้มสี (Chroma) ลดลง ส่วนค่าความเป็นสีแดง (a*) ปริมาณแอนโทไซยานิน (ทั้งวิธีของ Abdel and Hulc และ วิธีพีเอชดีฟเฟอเรนเทียล) ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH มีค่าเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) สมการทางคณิตศาสตร์ของค่า L*, a*, b* Hue angle ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel and Hulc ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเป็นสมการที่ใช้ในการทำนายได้ ซึ่งสภาวะการสกัดที่เหมาะสม คือ การใช้เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90 ร่วมกับกรดซิตริก ความเข้มข้นร้อยละ 4.25 สกัดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง L*, a*, b* และ Hue angle เท่ากับ 65.65, 7.62, 10.87 และ 56.99 ตามลำดับ ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel and Hulc เท่ากับ 16.06 มิลลิกรัมของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด เท่ากับ 256.40 มิลลิกรัมของกรดเฟอรูลิกต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ เท่ากับ ร้อยละ 70.66

การผลิตข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคน้ำในภาชนะบรรจุปิดสนิทด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ความดันสูง ประกอบด้วยขั้นตอนการให้ความร้อนเบื้องต้นด้วยการแช่ในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สุ่มตัวอย่างทุก 2 นาที คัดเลือกระยะเวลาการให้ความร้อนที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากร้อยละการเกิดเจลลิตีในเซชัน พบว่า การแช่ในน้ำเดือดเป็นเวลา 18, 20, 22 และ 24 นาที มีค่าการเกิดเจลลิตีในเซชันอยู่ในช่วงร้อยละ 65.50-87.79 จากนั้นบรรจุข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นลงในถุงรีทอร์ทเพาซ์ ปิดผนึก และฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 118 องศาเซลเซียส ความดัน 23 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่า เวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างจนถึงอุณหภูมิฆ่าเชื้อที่กำหนด (Come up time) เท่ากับ 23 นาที ระยะเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ (Heating time) เท่ากับ 26 นาที และ เวลาในการลดอุณหภูมิของข้าวกล้องสังข์หยด (Cooling time) เท่ากับ 31 นาที รวมระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อทั้งหมด เท่ากับ 80 นาที ซึ่งจะมีค่า F_0 Formula เท่ากับ 4.12 นาที จากนั้นนำข้าวที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงตามสภาวะดังกล่าวมาเปรียบเทียบคุณภาพกับข้าวที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไม่โครเวฟ พบว่า การแช่ในน้ำเดือด 24 นาที แล้วนำไปหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง จะทำให้เมล็ดข้าวมีความกว้างและความยาวของเมล็ดสูงที่สุด ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณารอยแตกของเมล็ด โดยการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค พบว่า ข้าวที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดนาน 24 นาที แล้วนำไปหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงจะมีขนาด

ความกว้างและความลึกของรอยแตกมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความชื้น อัตราการยึดตัว และการดูดซับน้ำของเมล็ดมีค่าสูงที่สุด ($p < 0.0$) และส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องหุงสุก โดยจะทำให้เมล็ดข้าวมีค่าความแข็งต่ำที่สุด ($p < 0.05$) ในขณะที่มีค่าการเกาะติดสูงที่สุด ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาผลของการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9-point Hedonic scale พบว่าข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่น้ำเดือด 24 นาที แล้วนำไปหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง จะมีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงที่สุด ($p < 0.05$) L^* , a^* และ Chroma มีค่าต่ำที่สุด ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่า Hue angle สูงที่สุด ($p < 0.05$) และสภาวะการหุงสุกดังกล่าวจะพบการลดลงของปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณของกรดฟีนอลิกทั้ง 6 ชนิด ได้แก่ กรดเฟอรูลิก กรดโปรโตแคทชอลิก กรดพาราควมาริก กรดพาราไฮดรอกซีเบนโซอิก กรดคาเฟอิก และกรดวานิลลิก และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด ($p < 0.05$)

ข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง (ที่เวลาการแช่น้ำเดือด 24 นาที) หม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไมโครเวฟ ถูกนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน และตรวจคุณภาพในวันที่ 0, 3 และ 7 พบว่า ในวันที่ 7 ของการเก็บรักษา L^* , a^* และ Chroma มีค่าลดลง ($p < 0.05$) ในขณะที่ Hue angle มีค่าเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ส่วนค่าความแข็งของเมล็ดข้าวสุกมีค่าเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) และค่าการเกาะติดลดลง ($p < 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันที่เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) จึงทำให้คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมีค่าลดลง ($p < 0.05$) นอกจากนี้ จะพบการลดลงของปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ($p < 0.05$) การเก็บรักษาข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงที่อุณหภูมิห้อง และ 4 องศาเซลเซียส นาน 6 เดือน และตรวจคุณภาพทุกเดือน พบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะมีค่า L^* , a^* และ Chroma สูงกว่า และ Hue angle ต่ำกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ($p < 0.05$) ในขณะที่ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณของกรดฟีนอลิกทั้ง 6 ชนิด ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ค่าความแข็ง และการเกิดรีโทรเกรเดชัน มีค่าสูงกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม มีค่าต่ำกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ($p < 0.05$)

Thesis Title	Cooking condition and storage time on quality, stability of anthocyanin and phenolic acid in ready-to-eat cooked Sangyod brown rice
Author	Ms. Wilaiporn Klay
Major Program	Food Science and Technology
Academic Year	2017

ABSTRACT

Sangyod brown rice is a traditional rice variety in Phatthalung province. The characteristic of brown rice is dark red, that contains antioxidant, including anthocyanins, phenolic acids and high nutrition values. Therefore, ready-to-eat cooked Sangyod brown rice is alternative product for consumers who are interested in health products. It is a convenient product to eat and carry. However, anthocyanins and phenolic acids are unstable either processing and storage. Therefore, the aim of this research was to optimize condition for extraction anthocyanin from Sangyod brown rice as well as to investigate the effect of processing and storage condition on the quality change in Sangyod brown rice.

Sangyod brown rice was analyzed for physical, chemical and physicochemical properties. It was found that, the breadth, length and L/B of grain are as 1.80 mm, 6.60 mm and 3.67, respectively. Thus, Sangyod brown rice was classified as of long and slender grain shape. The grain weight was 1.54 g/100 g. The moisture, protein, fat, fiber, ash and amylose of Sangyod brown rice were 11.00, 6.28, 2.41, 3.54, 1.40 and 14.64%, respectively. The gelatinization property of Sangyod brown rice was investigated by DSC, it was found that the onset temperature (T_o), peak temperature (T_p), conclusion temperature (T_c) and gelatinization enthalpy (ΔH) was 76.73, 81.86, 88.01°C and 9.42 J/g dry weight, respectively. The A-type of crystal structure was found in Sangyod brown rice with crystalline content approximately 30.68%. The viscosity behavior was monitored by using Rapid Visco Analyzer (RVA). The peak viscosity (PV), Final viscosity (FV), set back viscosity (SBV) and pasting temperature (P_{temp}) were 75.05, 127.42 61.58 RVU and 93.75°C respectively.

The optimum condition for extraction anthocyanin in Sangyod brown rice was done by the Design Expert program. The concentrations of ethanol were 0, 45 and 90% (v/v) combined with citric acid 0, 2.5 and 5% (w/v) for 1, 12.5 and 24 h. The result showed that, the brightness

(L*), the yellowness (b*), the Hue angle and the Chroma decreased as ethanol concentration, citric acid concentration and extraction time increased ($p < 0.05$), while, redness (a*), anthocyanin content (Abdel and Hulc method and the pH differential method), total phenolic content and the antioxidant activity increased ($p < 0.05$). The mathematical model can be used to predict the optimum condition according to the L*, a* and b* values, Hue angle, total anthocyanin content (Abdel and Hulc method), total phenolic content and antioxidant activity. It was found that the optimal extraction conditions were 90% ethanol with 4.25% citric acid for 24 h. Under this condition of the Sangyod brown rice extract, the L*, a*, b* values and Hue angle were 65.66, 7.62, 10.87 and 56.99, total anthocyanin content by Abdel and Hulc method was 16.06 mg of cyanidin-3-glucoside/100 g dry wt., total phenolic content was 256.40 mg of ferulic acid/100 g dry wt. and antioxidant activity that determined by DPPH radical scavenging assay was 70.62%.

Prior to cook ready-to-eat Sangyod brown rice with the retort, rice was soaked in boiling water and sampling 2 minutes-intervals to monitored moisture content and degree of gelatinization. It was found that, after soaking for 18, 20, 22 and 24 min in boiling water, the degree of gelatinization was ranged from 65.50 to 87.79%. Then soaked rice at certainly time, was packed in a retort pouch, sealed and sterilized at 118°C under pressure 23 pound/square inches. The time taken to increase the sample temperature to reach the sterilization temperature (Come up time) was 23 min, heating time was held at 118°C for 26 min, and cooling time was 31 min. Therefore, the sterilization time was 80 min, (F_0 Formula = 4.12 min). The quality of cooked rice with electric rice cooker, microwave and retort (soaked for 18, 20, 22 and 24 min in boiling water) were compared. The results showed that, rice that cooked by retort (soaked 24 min in boiling water) had the highest width and depth cracks. It had the highest moisture content, elongation ratio water uptake and stickiness ($p < 0.05$) while the lowest hardness was detected ($p < 0.05$). The sensory evaluation 9-point Hedonic scale showed that cooked rice by retort (soaked 24 min in boiling water) had the highest texture and overall acceptability score ($p < 0.05$). Under this condition, cooked rice had the lowest in L*, a* and Chroma ($p < 0.05$), while it had the highest in Hue angle ($p < 0.05$). Cooked rice by retort (soaked 24 min in boiling water) showed the highest loss of anthocyanin content, total phenolic acid and antioxidant activity ($p < 0.05$).

Ready-to-eat Sangyod brown rice with the retort cooking (soaked 24 min in boiling water), electric rice cooker and microwave were stored at 4°C for 7 days and determined quality every 3 day-intervals. The result shown that, L*, a* values and Chroma decreased ($p<0.05$), while Hue angle increased ($p<0.05$) on the 7th day of storage. The hardness of cooked rice increased ($p<0.05$) and the adhesiveness decreased ($p<0.05$) as a result of the retrogradation increased during storage ($p<0.05$). Therefore, texture and overall acceptability score of cooked rice decreased ($p<0.05$). In addition, anthocyanin content, total phenolic content and antioxidant activity decreased during storage ($p<0.05$). Ready-to-eat Sangyod brown rice with the retort cooking (soaked 24 min in boiling water) was stored at 4°C and room temperature and determined for the quality for 6 months. It was found that cooked rice that stored at 4°C had higher L *, a * values and Chroma than the cooked rice that kept at room temperature ($p<0.05$). Whereas, the decrease in Hue angle of cooked rice that stored at 4°C was lower. Meanwhile, cooked rice that stored at 4°C had higher anthocyanin content, total phenolic content, antioxidant activity, hardness and retrogradation than the one that stored at room temperature ($p<0.05$). However, texture and overall acceptability score had lower than that stored under room temperature ($p<0.05$).

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มุกิตา มีนุ่น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการค้นคว้าตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ทั้งยังสละเวลาในการตรวจทานและแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวคนธ์ วัฒนจันทร์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพิมล มะขะเจียว กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบุคลากร นักศึกษา คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ นายนฤชาติ บุญรัตน์ และนางสาวหทัยรัตน์ ทองปันจา ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัย ประเภททุนบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2560 ทุนอุดหนุนจาก บัณฑิตวิทยาลัย และคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

วิไลพร กลาย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(8)
กิตติกรรมประกาศ	(11)
สารบัญ	(12)
List of Tables	(13)
List of Figures	(15)
List of Appendix Tables	(18)
List of Appendix Figures	(19)
บทที่	
1 บทนำ	
บทนำต้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	2
วัตถุประสงค์	49
2 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	50
สารเคมี	50
อุปกรณ์และเครื่องมือ	51
วิธีการทดลอง	52
3 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	64
4 สรุปผลการทดลอง	146
เอกสารอ้างอิง	148
ภาคผนวก	169
ประวัติผู้เขียน	210

LIST OF TABLES

Table	Page
1 Anthocyanidins more commonly found in nature	22
2 Central composite design for extraction anthocyanin from sangyod brown rice	55
3 Physical properties of Sangyod brown rice	65
4 Color values of Sangyod brown rice	66
5 Chemical properties of Sangyod brown rice	68
6 The regression parameter coefficients product properties using independent variables ethanol (X_1), citric acid (X_2) and extraction time (X_3) for color of Sangyod brown rice	78
7 The regression parameter coefficients product properties using independent variables ethanol (X_1), citric acid (X_2) and extraction time (X_3) for anthocyanin content, phenolic content and DPPH free radical scavenging activity of Sangyod brown rice	87
8 Prediction of equation and experiment for optimization on physical properties of Sangyod brown rice extraction	89
9 Physical properties of Sangyod brown rice after soaked in boiling water at various time	92
10 Thermal properties of Sangyod brown rice after soaked in boiling water at various time	96
11 Water uptake and elongation ratio of Sangyod brown rice after soaked in boiling water at various time	97
12 F_0 value of cooked Sangyod brown rice after soaked in boiling water at various time	100
13 Physical properties of Sangyod brown rice under various cooking method	103
14 Color values of cooked Sangyod brown rice from various cooking method	104
15 Texture of cooked Sangyod brown rice from various cooking method	106
16 Moisture content of cooked Sangyod brown rice from various cooking method	107
17 Anthocyanin content, phenolic content and antioxidant activity of cooked Sangyod brown rice from various cooking method	109
18 Phenolic acid content of cooked sangyod brown rice various cooking method	113
19 Cooking quality of cooked sangyod brown rice various cooking method	117
20 Sensory evaluation of sangyod brown rice under various cooking method	119

LIST OF TABLES (Continued)

Table		Page
21	Color value of cooked Sangyod brown rice under various cooking method during storage at 4°C	122
22	Phenolic acid of cooked Sangyod brown rice under various cooking method during storage at 4°C	128
23	Thermal properties of cooked Sangyod brown rice under various cooking method during storage at 4°C	130
24	Sensory evaluation score of Sangyod brown rice under various cooking method during storage at 4°C	132
25	Color values of cooked Sangyod brown using retort at 118°C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperature	134
26	Chemical properties of cooked Sangyod brown rice using retort at 118°C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperature	139
27	Phenolic acid of cooked Sangyod brown rice using retort at 118°C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperature	141
28	Thermal properties of Sangyod brown rice using retort at 118°C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperatures	143
29	Sensory evaluation of Sangyod brown rice using retort at 118°C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperature	145

LIST OF FIGURES

Figure	Page
1 Structure of rice grain	4
2 X-ray diffraction of A, B and V _h type starch	8
3 Rapid Visco Analyzer (RVA) profile of rice starch	10
4 Schematic representation of a complex of amylose with two monopalmitin molecules	13
5 Structures of flavonoids (anthocyanidin, flavanone, flavanol, flavone, flavonol and isoflavone), phenolic acids (hydroxybenzoic acid and hydroxycinnamic acid) and tannins (proanthocyanidin and ellagitannin)	14
6 Representations of primary cell wall structure of plant material and cross-linking between structural components and phenolic compounds	17
7 Chemical structure of phenolic acids	18
8 Chemical structure of anthocyanin	22
9 UV-Visible spectra of anthocyanins in pH 1.0 and 4.5 buffers and the structures of the flavylium cation and hemiketal forms	28
10 Stabilization mechanism of acylated anthocyanins-proposed spatial intermolecular stacking configuration and stacking of acylated anthocyanin	33
11 Thermal degradation of anthocyanin	36
12 Anthocyanin chemical forms depending on pH and degradation reaction for anthocyanin	38
13 Sangyod brown rice	65
14 X-ray diffractogram of Sangyod brown rice	69
15 RVA profile of Sangyod brown rice	70
16 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on L* of Sangyod brown rice extract	73
17 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on a* of Sangyod brown rice extract	74
18 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on b* of Sangyod brown rice extract	75

LIST OF FIGURES (Continued)

Figure	Page
19 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on hue angle of Sangyod brown rice extract	76
20 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on chroma of Sangyod brown rice extract	77
21 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on anthocyanin content by Abdel and Hulc method of Sangyod brown rice extract	81
22 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on anthocyanin content by pH differential method of Sangyod brown rice extract	82
23 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on phenolic content of Sangyod brown rice extract	85
24 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on DPPH free radical scavenging activity of Sangyod brown rice extract	86
25 Appearance of Sangyod brown rice after soaked in boiling water at various time; 0 (a), 2 (b), 4 (c), 6 (d), 8 (e), 10 (f), 12 (g), 14 (h), 16 (i), 18 (j), 20 (k), 22 (l), 24 (m), 26 (n), 28 (o) and 30 (p) min	93
26 Moisture content of Sangyod brown rice after soaked in boiling water at various time	94
27 Cooked Sangyod brown rice from a retort at various soaking times; 18 (a), 20 (b), 22 (c), 24 (d) min, from an electric rice cooker (e) and from a microwave (f) starch granule of raw sangyod brown rice (c), soaked rice (f), cooked rice by electric rice cooker (i), cooked rice by microwave (l) and cooked rice by retort (o) at magnification 5,000X observed by SEM (accelerating voltage 20 k)	102

LIST OF FIGURES (Continued)

Figure	Page	
28	Cross section of raw Sangyod brown rice (a), soaked rice 24 min (d), cooked rice by electric rice cooker (g), cooked rice by microwave (j) and cooked rice by retort (m) at magnification 50X; Cross section of outer layer of raw sangyod brown rice (b), soaked rice (e), cooked rice by electric rice cooker (h), cooked rice by microwave (k) and cooked rice by retort (n) at magnification 2,000X; Starch granule of raw sangyod brown rice (c), soaked rice (f), cooked rice by electric rice cooker (i), cooked rice by microwave (l) and cooked rice by retort (o) at magnification 5,000X observed by SEM (accelerating voltage 20 k)	116
29	Hardness (a) and adhesiveness (b) of cooked Sangyod brown rice under various cooking method during storage at 4°C	123
30	Moisture content of cooked Sangyod brown rice under various cooking method during storage at 4°C	124
31	Anthocyanin content (a), phenolic content (b) and DPPH scavenging (c) of raw rice and cooked Sangyod brown under various cooking methods during storage at 4°C	126
32	Hardness (a) and adhesiveness (b) of cooked Sangyod brown using retort at 118°C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperature	136
33	Moisture content of cooked Sangyod brown rice using retort at 118°C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperature	137

LIST OF APPENDIX TABLES

Table		Page
1	Physical properties of anthocyanin extract from Sangyod brown rice	169
2	Chemical properties of anthocyanin extract from Sangyod brown rice	170
3	Maximum wavelength and retention time (RT) of phenolic acid standard	172
4	Preparation of phenolic acid mixed standard	200

LIST OF APPENDIX FIGURE

Figure	Page
1 HPLC chromatogram of phenolic acid standard and peak identification at 260 (a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm.; Gallic acid (1), protocatechuic acid (2), 4-hydroxybenzoic acid (3), vanillic acid (4), caffeic acid (5), syringic acid (6), <i>p</i> -coumaric acid (7), ferulic acid (8), sinapic acid (9), <i>p</i> -cresol (10), rutin (11), quercetin dehydrate (12), kaempferol (13)	171
2 Standard curve of phenolic standard; gallic acid (a), protocatechuic acid (b), 4-hydroxybenzoic acid (c), vanillic acid (d), caffeic acid (e), syringic acid (f) and <i>p</i> -coumaric acid (g)	173
3 HPLC chromatogram of free phenolic acid and peak identification at 260 (a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm in raw Sangyod brown rice	175
4 Anthocyanin content (a), phenolic content (b) and DPPH scavenging (c) of raw rice and cooked Sangyod brown under various cooking methods during storage at 4°C	176
5 Hardness (a) and adhesiveness (b) of cooked Sangyod brown using retort at 118°C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperature	177
6 HPLC chromatogram of bound phenolic acid and peak identification at 260 (a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm in cooked Sangyod brown rice by electric rice cooker	178
7 HPLC chromatogram of free phenolic acid and peak identification at 260 (a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm in cooked Sangyod brown rice by microwave	179
8 H7PLC chromatogram of bound phenolic acid and peak identification at 260 (a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm in cooked Sangyod brown rice by microwave	180
9 HPLC chromatogram of free phenolic acid and peak identification at 260 (a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm in cooked Sangyod brown rice by retort	181
10 HPLC chromatogram of bound phenolic acid and peak identification at 260 (a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm in cooked Sangyod brown rice by retort	182
11 Retort pouch was inserted probe at the half of its height	183

LIST OF APPENDIX FIGURE (Continued)

Figure		Page
12	A horizontal water spray retort was used in this research (a), probe position in a retort pouch (b), The arrangement of samples on the tray of retort (c), the probe of retort was connected with recorder (d)	183
13	Semi-logarithmic between temperature and time for calculating F_0 formula of Sangyod brown rice	184
14	Standard curve of ferulic acid	196

บทที่ 1

บทนำ

บทนำตั้งเรื่อง

ข้าวพันธุ์สังข์หยด เป็นพันธุ์ข้าวพื้นเมืองดั้งเดิมที่ปลูกในจังหวัดพัทลุง เป็นที่รู้จักกันมานาน ด้วยมีคุณสมบัติเฉพาะของลักษณะข้าวกล้องมีสีแดงเข้ม เมื่อผ่านการขัดสีจะได้เป็นข้าวซ้อมมือมีสีชมพู ข้าวกล้องสังข์หยดมีปริมาณอะไมโลสในระดับต่ำ (ร้อยละ 14.25) เมื่อผ่านการหุงสุกจึงทำให้มีลักษณะนุ่ม (สำเร็จ แซ่ตัน และ รุจิรา ปรีชา, 2548) ข้าวกล้องสังข์หยดมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก วิตามินบี เหล็ก และไนอาซิน โดยเฉพาะรงควัตถุที่สำคัญในข้าวกล้องสังข์หยด คือ แอนโทไซยานิน ซึ่งจัดเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่มีคุณสมบัติทำให้เมล็ดข้าวกล้องมีสีแดง และเป็นลักษณะเด่นที่สำคัญของข้าวกล้องสังข์หยด นอกจากนี้ ข้าวกล้องสังข์หยดยังเป็นแหล่งของกรดฟีนอลิก ซึ่งมีบทบาทในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ แอนโทไซยานินมีคุณสมบัติในการช่วยขยายหลอดเลือดและกระตุ้นการไหลเวียนของเลือด ลดคอเลสเตอรอล ลดความเสี่ยงของโรคมะเร็งและต้านไวรัส โดยคุณสมบัติเด่นที่สุดของแอนโทไซยานินคือ ประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ โดยมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าวิตามินซีและอีถึง 2 เท่า (Zhao *et al.*, 2013) ในปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสนใจในผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพกันมากขึ้น การผลิตข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิทจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้บริโภค เนื่องจากเป็นข้าวสำเร็จรูปที่ให้ความสะดวกในการบริโภค ช่วยลดขั้นตอนในการหุงสุกโดยผู้บริโภค การบรรจุในภาชนะพร้อมบริโภคจะช่วยเพิ่มความสะดวกในการพกพาและการอุ่นให้ความร้อน แต่เนื่องจากแอนโทไซยานินและกรดฟีนอลิกเป็นสารที่มีความคงตัวต่ำในสถานะต่างๆ เช่น ความร้อน และความเป็นกรด-ด่าง (Laleh, 2006) ดังนั้น จึงต้องศึกษาผลของการให้ความร้อนและวิธีการผลิตข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภค รวมทั้งสถานะในการเก็บรักษาต่อความคงตัวของแอนโทไซยานินและกรดฟีนอลิกที่สำคัญในข้าวกล้องสังข์หยด งานวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งศึกษาสถานะการสกัดแอนโทไซยานินในข้าวกล้องสังข์หยด ความคงตัวของแอนโทไซยานินและกรดฟีนอลิกในข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการให้ความร้อนในการผลิตข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภค รวมทั้งผลของสถานะการเก็บรักษาต่อคุณภาพและความคงตัวของแอนโทไซยานินและกรดฟีนอลิกในข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภค

การตรวจเอกสาร

1. ข้าวสังข์หยด

ข้าวพันธุ์สังข์หยดเป็นพันธุ์ข้าวพื้นเมืองดั้งเดิมของภาคใต้ มีการเพาะปลูกในแถบทะเลสาบสงขลา เป็นพันธุ์ข้าวเฉพาะท้องถิ่นในจังหวัดพัทลุง ข้าวสังข์หยดเป็นข้าวเจ้าพันธุ์พื้นเมืองที่มีความไวต่อช่วงแสง ปลูกได้เฉพาะนาปี (ฤดูฝน) โดยช่วงเวลาปลูกจนถึงเก็บเกี่ยวจะอยู่ในช่วงเดือนสิงหาคมถึงกุมภาพันธ์ของทุกปี (กรมการข้าว, 2559) พันธุ์ข้าวสังข์หยดที่ชาวนาทั่วไปปลูกอยู่เดิมมีหลากหลายลักษณะ มาจากหลายสายพันธุ์ จึงทำให้ข้าวมีความแตกต่างกันไม่สม่ำเสมอ ต่อมานักปรับปรุงพันธุ์ข้าวศูนย์วิจัยข้าวพัทลุง ได้นำพันธุ์มาพัฒนาปรับปรุงพันธุ์ได้สายพันธุ์ที่ดี เป็นสายพันธุ์บริสุทธิ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2530 และปลูกรักษาพันธุ์ไว้ที่ศูนย์วิจัยข้าวพัทลุง ข้าวสังข์หยดได้รับการคุ้มครองในฐานะพันธุ์ข้าวภายใต้กฎหมายบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (Geographical Indication; GI) และได้รับรองพันธุ์ขึ้นทะเบียนชื่อว่า “สังข์หยดพัทลุง” เมื่อวันที่ 23 มิถุนายน พ.ศ. 2546 ข้าวสังข์หยดพัทลุงนับเป็นข้าว GI พันธุ์แรกของไทย (สำเร็จ แซ่ตัน และ รุจิรา ปรีชา, 2548) เมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2559 สหภาพยุโรป (European Union; EU) ได้ประกาศลงใน Journal of the European Union ขึ้นทะเบียนข้าวสังข์หยดเมืองพัทลุงของไทยเป็นสินค้าบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (GI) ในสหภาพยุโรปแล้ว ซึ่งถือเป็นสินค้าลำดับที่ 4 ของไทยที่ได้ขึ้นทะเบียนเป็น GI ในสหภาพยุโรป ต่อจากข้าวหอมมะลิทุ่งกุลาร้องไห้ กาแฟดอยช้าง และกาแฟดอยตุง (กรมทรัพย์สินทางปัญญา, 2560) ปัจจุบันข้าวสังข์หยดได้รับความนิยมอย่างมาก ทำให้ปริมาณของสินค้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด จึงได้มีการขยายพื้นที่ปลูกเพิ่มมากขึ้น ในปี พ.ศ. 2558/2559 จังหวัดพัทลุงมีพื้นที่ปลูกข้าวสังข์หยดจำนวน 18,781 ไร่ มีผลผลิตรวม 7,392 ตันข้าวเปลือก ส่วนในปี พ.ศ. 2559 มีพื้นที่ปลูกเพิ่มขึ้นประมาณ 5,000 ไร่ ผลผลิตเพิ่มขึ้นมากกว่า 8,000 ตันข้าวเปลือก ข้าวสังข์หยดเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรของไทยที่ถูกส่งออกไปยังประเทศจีน สิงคโปร์ อินเดีย และมาเลเซีย ซึ่งข้าวกล้องสังข์หยดจะมีราคา 80-90 บาทต่อกิโลกรัม (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2560)

1.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

โดยทั่วไปโครงสร้างของเมล็ดข้าวจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ คือ เปลือกนอก (Hull) ส่วนห่อหุ้มเมล็ด (Caryopsis coat) ได้แก่ ชั้นเพอริคาร์พ (Pericarp) ชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด (Seed coat) ชั้นนุเซลลัส (Nucellus) และชั้นแอลิวโรน (Aleurone layer) เนื้อเมล็ด (Endosperm) และคัพภะ (Embryo) (Marshall and Wadsworth, 1994) ส่วนประกอบของเมล็ดข้าวมีรายละเอียดดังนี้

1.1.1 เปลือกนอกหรือแกลบ

ข้าวภายหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้วจะถูกเรียกว่า ข้าวเปลือก (Paddy grain หรือ Rough rice) ซึ่งจะมีเปลือกนอก (Hull) เป็นส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าวอยู่ด้านนอกสุด ส่วนของเปลือกนอกจะประกอบด้วยเปลือกสองแผ่นประสานกัน เปลือกนอกแผ่นใหญ่เรียกว่า Lemma ทำหน้าที่ปกคลุมเมล็ดข้าวส่วนหลัง (Dorsal) และส่วนเปลือกนอกแผ่นเล็กเรียกว่า Palea ทำหน้าที่ปกคลุมเมล็ดข้าวส่วนท้อง (Ventral) (ภาพที่ 1) ส่วนของเปลือกนอกจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 16-28 ของเมล็ดข้าวเปลือก เปลือกนอกจะมีส่วนของเยื่อใยและเถ้าในปริมาณสูง ในขณะที่จะมีปริมาณ โปรตีน ไขมัน และสตาร์ชในปริมาณต่ำ เมื่อข้าวเปลือกผ่านกระบวนการกะเทาะเปลือก ส่วนของเปลือกนอกจะถูกกำจัดออก ทำให้ได้เป็นข้าวกล้อง ส่วนของเปลือกนอกมีหน้าที่ในการป้องกันเมล็ดข้าวจากการถูกทำลายจากแมลง ป้องกันการเปลี่ยนแปลงความชื้นในเมล็ดข้าว (Juliano, 1985; Marshall and Wadsworth, 1994; Zhou *et al.*, 2002) นอกจากนี้ส่วนของเปลือกยังทำหน้าที่ในการป้องกันการสลายตัวของสารออกฤทธิ์ที่สำคัญในเมล็ดข้าว จากการศึกษาของ Sutharut และ Sudarat (2012) เกี่ยวกับปริมาณแอนโทไซยานินในระหว่างกระบวนการงอกของข้าวสี พบว่า ภายหลังกระบวนการงอก ข้าวเปลือกจะมีปริมาณแอนโทไซยานินสูงกว่าข้าวกล้อง ($p < 0.05$) เนื่องจากเปลือกจะเป็นส่วนห่อหุ้มเมล็ดข้าว ทำหน้าที่ในการป้องกันการสลายตัวของแอนโทไซยานิน

1.1.2 ส่วนห่อหุ้มเมล็ด

เมื่อข้าวเปลือกผ่านกระบวนการกะเทาะเปลือก จะพบส่วนห่อหุ้มเมล็ดเป็นส่วนที่อยู่ถัดจากส่วนของเปลือกนอก ประกอบด้วย ชั้นเพอริคาร์พ เป็นส่วนที่อยู่ถัดจากส่วนของเปลือกนอก ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของเมล็ดข้าวภายหลังกะเทาะเปลือก มีประมาณร้อยละ 1-2 ของน้ำหนักแห้ง ชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด ชั้นนูเซลลัส และชั้นแอลิวโรน มีประมาณร้อยละ 4-6 ของน้ำหนักแห้ง (ภาพที่ 1) ชั้นแอลิวโรนจะประกอบด้วยชั้นของเซลล์ตั้งแต่ 1-5 ชั้น ซึ่งส่วนท้องของเมล็ดข้าวจะมีความหนาของชั้นแอลิวโรนมากกว่าส่วนหลังของเมล็ดข้าว ในชั้นแอลิวโรนจะมีส่วนของคัพภะ หรือจุมูกข้าว (Embryo หรือ Germ) ประมาณร้อยละ 2-3 ของน้ำหนักแห้ง (Marshall and Wadsworth, 1994; Zhou *et al.*, 2002) ในระหว่างกระบวนการขัดสีส่วนของชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด ชั้นแอลิวโรน และคัพภะ จะถูกกำจัดออก จนได้เป็นส่วนของข้าวขาวทั้งเมล็ด เรียกว่าข้าวขัดขาว ซึ่งการกำจัดส่วนต่างๆเหล่านี้ที่เป็นส่วนประกอบของเมล็ดข้าวในระหว่างกระบวนการขัดสี จะทำให้ส่วนของไขมัน โปรตีน เยื่อใย น้ำตาลรีดิซ น้ำตาลทั้งหมด เถ้า วิตามิน กรดอะมิโน และกรดไขมันอิสระบางส่วนจะถูกกำจัดออกไปด้วย (Singh *et al.*, 1998; Park *et al.*, 2001)

1.1.3 เนื้อเมล็ด

เนื้อเมล็ด เป็นส่วนที่มีมากที่สุดในส่วนเมล็ดข้าว ประมาณร้อยละ 90 มีสตาρχเป็นองค์ประกอบหลัก ลักษณะของเนื้อเมล็ดจะมีผนังบางและเต็มไปด้วยอะไมโลพลาสต์ (Amyloplasts) ซึ่งจะมีสตาρχเกรนูล (Starch granule) กระจายอยู่ในภายในอะไมโลพลาสต์ ส่วนของเนื้อเมล็ดประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของชั้นซับแอลิวโรน (Subaleurone layer) ชั้นเซลล์ที่อยู่ถัดจากชั้นแอลิวโรน มีโปรตีนและไขมันเป็นองค์ประกอบหลัก และมีสตาρχเกรนูลเล็กน้อย และส่วนของเนื้อแป้ง (Starchy endosperm) มีองค์ประกอบของสตาρχเกรนูลเป็นส่วนใหญ่ และมีองค์ประกอบของโปรตีนบางส่วน โดยเฉพาะในส่วนของเอนโดสเปิร์มชั้นนอก และมีองค์ประกอบของไขมันเพียงเล็กน้อย ในระหว่างกระบวนการขัดสีส่วนของชั้นซับแอลิวโรน และบางส่วนของเนื้อแป้งจะถูกกำจัดออกไป ทำให้ข้าวที่ผ่านกระบวนการขัดสีมีองค์ประกอบของโปรตีนและไขมัน แร่ธาตุและวิตามินน้อย แต่จะมีองค์ประกอบของสตาρχมากกว่าส่วนของรำข้าว ดังนั้นข้าวที่ผ่านการขัดสีจึงมีคุณค่าทางสารอาหารลดลง โดยเฉพาะข้าวที่ผ่านกระบวนการขัดสีจนเป็นข้าวขาวจะมีสัดส่วนของสตาρχต่อน้ำหนักเมล็ดข้าวสูงกว่าข้าวกล้อง ดังนั้นข้าวขาวจึงจัดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ดี (Marshall and Wadsworth, 1994; Zhou *et al.*, 2002)

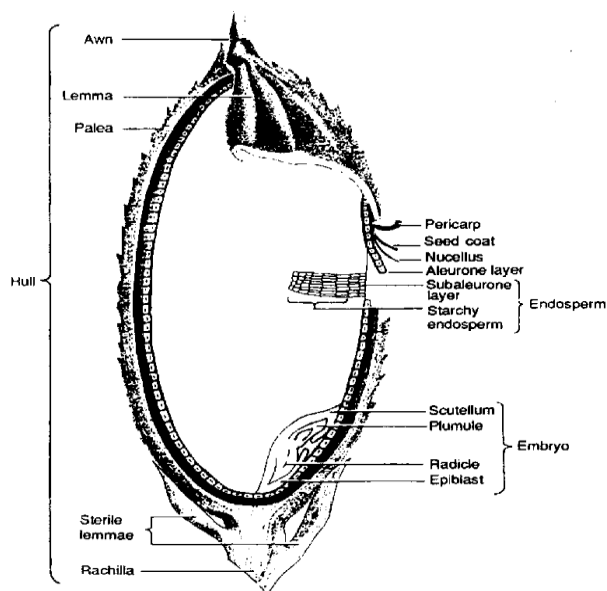


Figure 1 Structure of rice grain

Source: Juliano (1985)

1.2 สมบัติทางกายภาพ

ข้าวสังข์หยดจัดเป็นพันธุ์ข้าวเจ้า เปลือกเมล็ดสีฟาง เมล็ดเรียวยาว ข้าวเปลือกมีขนาดความยาวเฉลี่ย 9.33 มิลลิเมตร กว้าง 2.11 มิลลิเมตร หนา 1.7 มิลลิเมตร ส่วนขนาดเมล็ดข้าวกล้องยาวเฉลี่ย 6.70 มิลลิเมตร กว้าง 1.81 มิลลิเมตร หนา 1.64 มิลลิเมตร ข้าวกล้องสังข์หยด 1,000 เมล็ด มีน้ำหนักเฉลี่ย 17.64 กรัม น้ำหนักข้าวเปลือกต่อถังเท่ากับ 10.60 กิโลกรัม ข้าวกล้องแต่ละชนิดจะมีสีที่แตกต่างกันออกไป เช่น สีดำ สีม่วง และสีแดง ข้าวกล้องสีม่วงและสีดำนิยมบริโภคในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ อิตาลี อเมริกา จีน และญี่ปุ่น ข้าวสังข์หยดในรูปข้าวกล้องจะมีสีแดงเมื่อขัดสีเป็นข้าวซ้อมมือเป็นสีแดงปนขาว (สำเร็จ แซ่ตัน และ รุจิรา ปรีชา, 2548)

1.3 สมบัติทางเคมี

ข้าวสังข์หยดมีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใย และเถ้าเท่ากับร้อยละ 7.18, 8.06, 1.65, 0.26 และ 2.15 ตามลำดับ ปริมาณเหล็ก และ โพลีฟีนอล เท่ากับ 1.21 และ 82.01 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม ตามลำดับ วิตามินบี 2 ฟอสฟอรัส และไนอาซินเท่ากับ 0.06, 165 และ 3.97 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม ตามลำดับ แอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุสำคัญในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดของข้าว มีสี ทำให้ข้าวกล้องสังข์หยดมีลักษณะเด่นคือมีสีแดง ปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวสังข์หยดเท่ากับ 15.14 มิลลิกรัมของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ต่อข้าว 100 กรัม (สำเร็จ แซ่ตัน และ รุจิรา ปรีชา, 2548; Yodmanee *et al.*, 2011) แอนโทไซยานินเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ช่วยต้านอนุมูลอิสระ สามารถลดอาการอักเสบ โดยเพิ่มความแข็งแรงของเส้นใยโปรตีนในเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน และสามารถลดคลอเรสเตอรอลในเลือด ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคเรื้อรัง เช่น โรคหัวใจ (Mazza, 2007) นอกจากนี้ข้าวสังข์หยดยังมีองค์ประกอบสารต้านอนุมูลอิสระอื่นๆ เช่น โพลีฟีนอล วิตามินอี (Tocopherols) กาบา (Aminobutyric acid; GABA) และสารประกอบแกมมาออไรซานอล (γ -Oryzanol) ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติในการดักจับอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็ง รวมทั้งป้องกันการเกิดโรคหัวใจและโรคหลอดเลือด โดยทั่วไปคุณค่าทางโภชนาการในเมล็ดข้าวจะมีมากในส่วนของจมูกข้าวและในชั้นของรำ โดยเฉพาะพวกเยื่อใย กรดไฟติก วิตามินอี วิตามินบี และกาบา ดังนั้นในข้าวสังข์หยดในรูปข้าวกล้องจึงมีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าข้าวที่ผ่านกระบวนการขัดสี ข้าวกล้องสังข์หยดจัดเป็นข้าวที่มีปริมาณใยอาหารสูง (มากกว่าร้อยละ 3) จึงนับได้ว่าข้าวกล้องสังข์หยดจัดเป็นแหล่งของใยอาหาร มีประโยชน์ต่อระบบขับถ่าย จึงเหมาะกับผู้บริโภคที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก (Champagne *et al.*, 2004)

อะไมโลสเป็นองค์ประกอบสำคัญในสตาร์ชแกรนูล เป็น โพลีเมอร์สายยาวของน้ำตาลกลูโคส มีความสำคัญต่อคุณภาพของข้าว ปริมาณอะไมโลสในข้าวแต่ละสายพันธุ์จะแตกต่างกัน

ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะส่งผลให้เกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเพิ่มขึ้น ทำให้ลักษณะทางเนื้อสัมผัสของข้าวเมื่อผ่านการหุงสุกจะมีลักษณะแข็งเพิ่มขึ้น (Yu and Sun, 2009) ข้าวกล้องที่ผ่านการขัดสีในระดับที่ต่างกันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณอะไมโลส การแบ่งกลุ่มของข้าวจะแบ่งตามปริมาณอะไมโลส (Gomez, 1979) ดังนี้

- 1) ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 0-2 เช่น ข้าวเหนียว
- 2) ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสดำมาก มีปริมาณร้อยละ 2-9
- 3) ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสดำ มีปริมาณร้อยละ 9-20
- 4) ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสปานกลาง มีปริมาณร้อยละ 20-25
- 5) ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูง มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 25

ข้าวสังข์หยดเป็นจัดเป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสดำ โดยมีประมาณร้อยละ 14-15 เมื่อผ่านการหุงสุกจะทำให้ข้าวมีลักษณะนุ่ม ค่าความคงตัวของแป้งสุก ระดับอ่อน (94 มิลลิเมตร) ค่าการสลายเมล็ดในต่างเท่ากับ 5.0 อัตราการยึดตัวของข้าวสุกต่อข้าวดิบเท่ากับ 1.51 (สำเร็จ แซ่ตัน และ รุจิรา ปรีชา, 2548)

ดัชนีไกลซีมิก (Glycemix index; GI) เป็นดัชนีที่ใช้ชี้วัดคุณภาพของอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต โดยภายหลังการรับประทาน การย่อย และดูดซึม สามารถเพิ่มระดับน้ำตาลในเลือดได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งจะเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน คือ น้ำตาลกลูโคส หรือ ขนมปังขาว ซึ่งมีค่าดัชนีไกลซีมิก เท่ากับ 100 โดยทั่วไปค่าดัชนีไกลซีมิกของข้าวมีค่าตั้งแต่ 54-121 ค่าดัชนีไกลซีมิกภายในอาหารสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ อาหารกลุ่มที่มีค่าดัชนีไกลซีมิกต่ำ (ไม่เกิน 55) อาหารกลุ่มที่มีค่าดัชนีไกลซีมิกปานกลาง (56-69) และ อาหารกลุ่มที่มีค่าดัชนีไกลซีมิกสูง (มากกว่า 70) ซึ่งค่าดัชนีไกลซีมิกจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณอะไมโลสในข้าว โดยข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีค่าดัชนีไกลซีมิกต่ำ ในทางกลับกันข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสดำจะมีค่าดัชนีไกลซีมิกสูง (Sajilata *et al.*, 2006) จากรายงานของ Impun (2014) เกี่ยวกับดัชนีไกลซีมิกในข้าวสังข์หยดทั้งเมล็ด และแป้งข้าวกล้องสังข์หยด พบว่า แป้งข้าวกล้องสังข์หยดจัดเป็นอาหารที่มีค่าดัชนีไกลซีมิกสูง (77.1) ในขณะที่ข้าวสังข์หยดทั้งเมล็ดจัดเป็นอาหารกลุ่มที่มีค่าดัชนีไกลซีมิกปานกลาง (62.0)

1.4 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่เป็นองค์ประกอบหลักในพืช โดยส่วนใหญ่พบมากในธัญพืช บริเวณส่วนหัวและราก สตาร์ชประกอบด้วยโพลีเมอร์ 2 ชนิดเป็นองค์ประกอบ คือ อะไมโลส เกิดจากกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 และส่วนของอะไมโลเพคตินที่เกิดจากการเชื่อมต่อกัน

ของกลูโคสสายยาวด้วยพันธะ α -1,4 และโซ่กิ่งของกลูโคสด้วยพันธะ α -1,6 ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่เป็นองค์ประกอบในสตาร์ชมีมากถึงร้อยละ 98-99 ต่อน้ำหนักแห้งของสตาร์ชแกรนูล สตาร์ชแกรนูลจากพืชแต่ละชนิดจะมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน รวมไปถึงอัตราส่วนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่เป็นองค์ประกอบก็จะแตกต่างกันด้วย (Copeland *et al.*, 2009) สมบัติของสตาร์ชจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและทางเคมี เช่น ขนาดและการจัดเรียงตัวของสตาร์ชแกรนูล อัตราส่วนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินรวมถึงองค์ประกอบอื่นในสตาร์ช (Madsen and Christensen, 1996) สมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างทางผลึก (Crystallinity) ความสามารถในการพองตัวและการละลาย (Swelling and solubility) การเกิดเจลลิตีในเซชัน (Gelatinization) สมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting properties) การเกิดรีโทรเกรเดชันหรือการคืนตัว (Retrogradation) และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสตาร์ช ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

1.4.1 ลักษณะทางโครงสร้างผลึก

สตาร์ชแกรนูลจะมีทั้งส่วนที่เป็นผลึก และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Semi-crystallinity) โดยส่วนของผลึกมีประมาณร้อยละ 15-45 เป็นส่วนสายสั้นของอะไมโลเพคตินที่มีการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะเกลียวคู่อย่างเป็นระเบียบขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช ลักษณะทางโครงสร้างและปริมาณผลึกที่เป็นองค์ประกอบในสตาร์ชแกรนูลที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีประมาณร้อยละ 15 สำหรับสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูงจะมีปริมาณผลึกประมาณร้อยละ 45-50 (Copeland *et al.*, 2009) การจัดเรียงตัวของสตาร์ชสามารถตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ทั้งแบบธรรมดาและแบบส่องกราด ส่วนของสตาร์ชที่มีลักษณะเป็นผลึกจะเกิดจากการจัดเรียงตัวของอะไมโลเพคตินส่วนที่เป็นอสัณฐานจะเกิดจากการจัดเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่เป็นโซ่กิ่ง (Jane, 2007) สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีการจัดเรียงตัวเป็นเกลียวคู่จึงสามารถเกิดผลึกขึ้นได้ ซึ่งลักษณะโครงสร้างทางผลึกของสตาร์ชสามารถตรวจสอบได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ลักษณะโครงสร้างทางผลึก (X-ray diffraction pattern) ได้ 4 ชนิด คือ A, B, C และ V_h (ภาพที่ 2) โครงสร้างผลึกชนิด A เกิดจากการจัดเรียงตัวของอะไมโลเพคตินสายสั้น พบได้ในธัญพืช ทำให้โครงสร้างผลึกมีลักษณะแน่นกว่าโครงสร้างผลึกชนิด B ซึ่งโครงสร้างผลึกชนิด B จะมีโครงสร้างผลึกแบบเปิดทำให้มีความสามารถในการจับน้ำได้สูงกว่าชนิด A โครงสร้างผลึกชนิด B จะพบมากในพืชหัว ส่วนโครงสร้างผลึกชนิด C มีโครงสร้างผลึกผสมกันระหว่างชนิด A และชนิด B พบได้ในพืชตระกูลถั่ว ส่วนของราก และผลไม้บางชนิด ส่วนโครงสร้างผลึกแบบ V_h เป็นสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจนทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสและไขมัน (Buleon *et al.*, 1998)

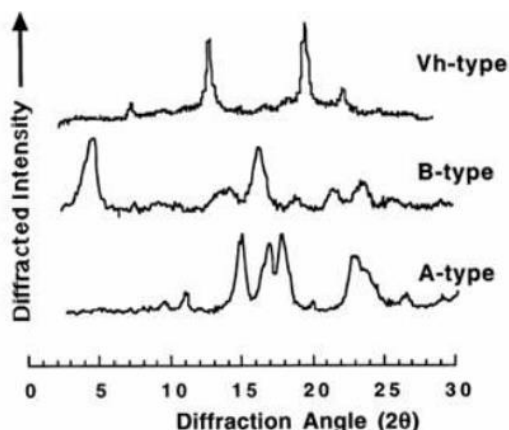


Figure 2 X-ray diffraction of A, B and V_h type starch

Source: Buleon *et al.* (1998)

1.4.2 ความสามารถในการพองตัวและการละลาย

ความสามารถในการพองตัวของสตาร์ชแกรนูลจะเกี่ยวข้องกับอะไมโลสในโครงสร้างของสตาร์ชแกรนูล ในขณะที่อะไมโลเพกตินจะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายของสตาร์ช Wani และคณะ (2013) ศึกษาสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของสตาร์ชที่แยกได้จากข้าวสาลีพันธุ์ที่เติบโตในประเทศอินเดีย พบว่า การค่าการพองตัวของสตาร์ชที่แยกได้มีค่าระหว่าง 23.5-27.4 กรัมต่อ 100 กรัมของน้ำ ในขณะที่ค่าการละลายจะมีค่าอยู่ระหว่าง 22.3-26.4 ต่อ 100 กรัมของน้ำ Tester และ Morrison (1990) รายงานว่าความสามารถในการพอง และการละลายตัวของสตาร์ชจากธัญพืชจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะ โครงสร้างของอะไมโลเพกติน สตาร์ชของธัญพืชที่มีค่าการละลายได้ต่ำจะมีโมเลกุลมีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถออกมาจากแกรนูลได้ และยังจับกับโมเลกุลอื่น Lii และคณะ (1996) พบว่า กำลังการพองตัวจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของสตาร์ชแกรนูล สตาร์ชที่มีกำลังการพองตัวสูง แสดงถึงแกรนูลมีความแข็งแรงน้อย

1.4.3 การเกิดเจลาตินในเซชัน

เจลาตินในเซชันเป็นกระบวนการที่ทำให้สตาร์ชแกรนูลเกิดการสูญเสียสมบัติ Birefringence ซึ่งเป็นผลมาจากสตาร์ชแกรนูลที่อยู่ในน้ำที่มีอุณหภูมิสูง ชั้นแรกสตาร์ชแกรนูลจะเกิดการพองตัวเนื่องจากการจับกันของน้ำและอะไมโลสหรืออะไมโลเพกตินด้วยพันธะไฮโดรเจน อุณหภูมิของน้ำเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้รูปร่างของสตาร์ชแกรนูลเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการดูดซับน้ำ การพองตัวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อสตาร์ชแกรนูลอยู่ในน้ำที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้โครงสร้างที่เป็นผลึกเกิดการแตกออก ดังนั้น โมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นสายยาวของอะไมโลสบางส่วนหลุดออกมา

และเป็นผลให้ความหนืดของระบบเพิ่มมากขึ้น (Manaois, 2009) อุณหภูมิในการเกิดเจลลาคือในเซชันของสตาร์ช (Gelatinization temperature; GT) ขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช วิธีที่ใช้ในการตรวจวัดสัดส่วนของน้ำต่อสตาร์ช ความเป็นกรด-ด่าง การมีอยู่ของสารยับยั้งการพองตัว เช่น เกลือ และความเข้มข้นของสารละลาย เช่น ซูโครส เป็นต้น (BeMiller, 2007) อุณหภูมิในการเกิดเจลลาคือในเซชันของสตาร์ช สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับ คือ อุณหภูมิในการเกิดเจลลาคือในเซชันระดับต่ำมีค่าระหว่าง 55-69.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในการเกิดเจลลาคือในเซชันระดับปานกลางมีค่าระหว่าง 70-74 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการเกิดเจลลาคือในเซชันระดับสูงจะมีค่าระหว่าง 74.5-80 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปอุณหภูมิในการเกิดเจลลาคือในเซชันของสตาร์ชมีค่าระหว่าง 60-80 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิในการเกิดเจลลาคือในเซชันจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณอะไมโลส โดยสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะส่งผลให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลาคือในเซชันเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย (Copeland *et al.*, 2009) เทคนิคที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของสตาร์ช ได้แก่ การศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลวของสตาร์ช (Melting) และอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพที่มีลักษณะคล้ายแก้วของสตาร์ช (Glass transition) ซึ่งเป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงเนื่องความร้อนที่ทำให้เกิดการสูญเสียรูปแบบของสตาร์ชแกรนูล โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) (Manaois, 2009)

1.4.4 สมบัติทางความหนืด

การให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องในสภาวะที่มีน้ำเกินพอ พร้อมกับการกวนจะส่งผลให้สตาร์ชแกรนูลเกิดการพองตัว ทำให้อะไมโลสบางส่วนหลุดออกและกระจัดกระจายภายนอกโมเลกุล ทำให้เกิดความหนืด ซึ่งทำให้สตาร์ชมีลักษณะคล้ายแป้งเปียก หรือเรียกว่า Paste (BeMiller, 2007) การเปลี่ยนแปลงทางความหนืดจะเกิดขึ้นภายหลังหรืออาจจะเกิดพร้อมกับการเกิดเจลลาคือในเซชัน สมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชเป็นสิ่งสำคัญที่บ่งชี้ถึงลักษณะของสตาร์ชในระหว่างกระบวนการแปรรูป สมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดสามารถตรวจวัดได้โดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) จากภาพที่ 3 แสดงถึงชนิดการเปลี่ยนแปลงทางความหนืดของสตาร์ช โดยใช้เครื่อง RVA โดยเริ่มจากการนำสตาร์ชผสมกับน้ำที่อุณหภูมิห้อง ให้ความร้อนซึ่งจะทำให้สตาร์ชแกรนูลเกิดการพองตัว ให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง จะสังเกตได้ว่าความหนืดของสตาร์ชเพิ่มขึ้น ทำให้สตาร์ชมีลักษณะข้นหนืด อุณหภูมิเริ่มต้นที่ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ เรียกว่า Pasting temperature ความหนืดที่เพิ่มขึ้นและการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งอัตราการพองตัวของสตาร์ชแกรนูลเท่ากับอัตราการแตกออกของสตาร์ชแกรนูล ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด เรียกจุดนี้ว่า Peak viscosity (PV) ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถใน

การจับน้ำของสตาร์ชและมีความสัมพันธ์กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย การพองตัวและการแตกออกของสตาร์ชแกรนูลมีความสัมพันธ์กับเนื้อสัมผัสของสตาร์ช ที่จุด PV จะแสดงถึงการแตกออกของสตาร์ชแกรนูล ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (Breakdown) จุดสิ้นสุดของความหนืดของการสตาร์ชเป็นการวัดถึงการพองตัวของสตาร์ชแกรนูล จนกระทั่งเกิดการแตกออกเป็นจุดที่บ่งบอกถึงความคงตัวของสตาร์ชต่อกระบวนการแปรรูป (Adebowale and Lawal, 2003; Copeland *et al.*, 2009) ความหนืดที่ต่ำที่สุดระหว่างการทำให้เย็นเรียกว่า Holding strength ซึ่งเป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุด ในระหว่างการเย็นตัวของสตาร์ชจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เรียกอุณหภูมินี้ว่า Setback temperature ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การคืนตัวของสตาร์ช ส่วนจุด Setback เป็นสิ่งบ่งชี้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์สุดท้าย และการขับน้ำออกจากโมเลกุลของสตาร์ชในกระบวนการแช่เยือกแข็งและการทำละลาย โดยปกติความหนืดของผลิตภัณฑ์จะอยู่ที่จุดความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความข้นหนืดหรือการเกิดเจลของสตาร์ช (Batey, 2007; Manaois, 2009) จากการศึกษาของ Wani และคณะ (2013) เกี่ยวกับสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชที่แยกได้จากข้าวสายพันธุ์ที่เติบโตในประเทศอินเดีย พบว่าการให้ความร้อนแก่สตาร์ชในสถานะที่มีน้ำทำให้สตาร์ชแกรนูลเกิดการสูญเสียโครงสร้างผลึก และความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากแกรนูลเกิดการพองตัว และปลดปล่อยอะไมโลสออกจากสตาร์ชแกรนูล ปริมาณอะไมโลส และขนาดแกรนูลต่างก็มีผลต่อสมบัติทางความหนืดของสตาร์ช

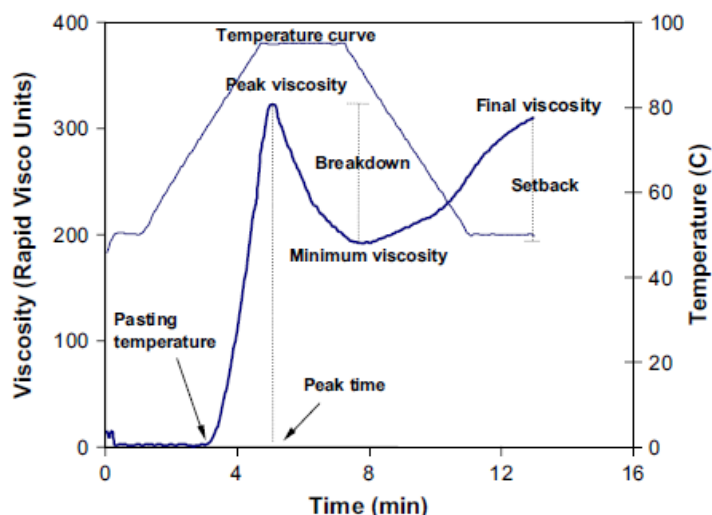


Figure 3 Rapid Visco Analyzer (RVA) profile of rice starch

Source: Copeland *et al.* (2009)

1.4.5 การเกิดรีโทรเกรเดชันหรือการคืนตัว

อะไมโลสเป็นองค์ประกอบหลักของสตาร์ชที่สามารถเกิดรีโทรเกรดหรือเกิดการสร้างผลึก (Recrystallize) ใหม่หลังการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ช ในกระบวนการแปรรูปจะทำให้สายยาวของอะไมโลสเกิดการฟอร์มตัวเป็นเกลียวทั้งแบบเกลียวเดี่ยวและเกลียวคู่ ทำให้เกิดเป็นผลึกที่ไม่ละลายน้ำและมีความคงทนต่อการย่อยสลายของเอนไซม์ กระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชันหรือการคืนตัวของสตาร์ช เป็นกระบวนการที่เจลาของสตาร์ชละลายน้ำได้น้อยลงในระหว่างกระบวนการเย็นตัวของสตาร์ช เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ชเกิดการสร้างผลึกใหม่อีกครั้ง กระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชันเกิดขึ้นเมื่ออะไมโลสในโมเลกุลของสตาร์ชหลุดออกจากสตาร์ชแกรนูลในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชัน ทำให้เกิดการสร้างผลึกใหม่ของอะไมโลสกับอะไมโลสและระหว่างอะไมโลสกับอะไมโลเพคติน ส่งผลให้โครงสร้างของสตาร์ชมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การแตกออกของสตาร์ชแกรนูล ซึ่งเป็นผลให้อะไมโลสและอะไมโลเพคตินหลุดออกจากโครงสร้างเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชัน อะไมโลสสามารถเกิดผลึกได้อย่างรวดเร็วในระหว่างกระบวนการลดอุณหภูมิ อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจะขึ้นอยู่กับปริมาณของอะไมโลส ปริมาณของไขมันอิสระ และมวลโมเลกุลของสตาร์ช ส่วนอะไมโลเพคตินมีความสามารถในการสร้างผลึกใหม่ได้ช้าและอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันจะขึ้นอยู่กับความยาวของสายอะไมโลเพคติน กรณีที่ตัวอย่างอาหารที่มีปริมาณสตาร์ชต่ำ อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันจะเกิดจากส่วนของอะไมโลส ในขณะที่การเกิดรีโทรเกรดของอะไมโลเพคตินจะโดดเด่นในตัวอย่างอาหารที่มีปริมาณสตาร์ชสูง ซึ่งการเกิดโพลีเมอร์ไรซ์จะจับกันหลวมกว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันจากอะไมโลส จึงทำให้มีลักษณะที่ง่ายต่อการเกิดการย่อยสลายของแป้ง กระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชันมีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะความแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์ภายหลังกระบวนการแปรรูปและเก็บรักษา (BeMiller and Whistler, 1996; Philpot *et al.*, 2006; Manaois, 2009) Yu และ Sun (2009) ศึกษาผลของปริมาณอะไมโลสต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันและลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขัดขาวในระหว่างการเก็บรักษา พบว่า ปริมาณอะไมโลสที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้สตาร์ชเกิดรีโทรเกรดเพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้ามข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสอยู่น้อยจะทำให้อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันช้าลง การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเนื้อสัมผัสของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา โดยเนื้อสัมผัสของข้าวจะมีความแข็งเพิ่มมากขึ้นเมื่อสตาร์ชเกิดรีโทรเกรดเพิ่มขึ้น

1.4.6 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสตาร์ช

สตาร์ชมีความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารต่างๆ เช่น โพรตีน และไขมัน ซึ่งการเกิดพันธะระหว่างสตาร์ชกับองค์ประกอบอื่นเกิดได้ในระหว่างกระบวนการเก็บรักษา ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช เช่น การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพรตีนกับสตาร์ชในแป้งข้าว เนื่องจากในแป้งข้าวโดยทั่วไปจะมีโพรตีนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นในระหว่างการเก็บรักษาจะทำให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างโพรตีนกับสตาร์ช ซึ่งจะส่งผลให้ความหนืดของแป้งข้าวเพิ่มขึ้น และเกิดเจลที่มีความแข็งแรงมากขึ้น (Xie *et al.*, 2008) และอาจเกิดได้จากการเติมสารบางอย่างเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของผลิตภัณฑ์ เช่น การเติมเบต้ากลูแคนลงในแป้งข้าวส่งผลให้ความหนืดของแป้งข้าวเพิ่มขึ้น และสามารถชะลอการเกิดรีโทรเกรดในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าว (Banchathanakij and Supphantharika, 2009)

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสตาร์ชกับไขมันส่วนใหญ่จะเกิดได้ง่ายในส่วนของอะไมโลส ซึ่งอัตราส่วนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะมีส่วนสำคัญต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไขมัน อะไมโลเพคตินที่มีกิ่งก้านจะทำให้การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไขมันมีความแข็งแรงของพันธะน้อยกว่าอะไมโลส ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของอะไมโลสจะมีองค์ประกอบของหมู่กลูโคซิลไฮดรอกซิล (Glucosyl hydroxyl group) อยู่บริเวณพื้นผิวของเกลียวอะไมโลส ดังนั้นจึงทำให้ส่วนด้านนอกของโครงสร้างอะไมโลสมีความสามารถในการจับกับน้ำได้มากกว่าส่วนที่อยู่ในโครงสร้างของเกลียวอะไมโลสซึ่งมีองค์ประกอบของหมู่ที่ไม่ชอบน้ำ เช่น หมู่เมทิลีน (Methylene) (ภาพที่ 4) (Copeland *et al.*, 2009) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสตาร์ชกับไขมันจะลดการละลายของสตาร์ช และมีส่วนในการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืดของสตาร์ช ลดการพองตัวของสตาร์ช และป้องกันการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชในระหว่างการเก็บรักษา ปัจจุบันมีการนำสมบัติของสตาร์ชในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไขมันมาใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร ทั้งนี้เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อสัมผัสนุ่ม ลดการเกิดเจลที่มีความแข็งแรง ปรับปรุงความคงตัวในระหว่างการแช่เยือกแข็งและการละลาย การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสตาร์ชและไขมันจะเกิดในระหว่างการเกิดเจลในเซชันของสตาร์ช สำหรับเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ การวัดสมบัติทางความร้อนของสตาร์ช (Differential Scanning Calorimetry) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometry) ทดสอบการจับกับไอโอดีน (Iodine-binding capacity) และตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืด (Viscometry) (Kaur and Singh, 2000; Tang and Copeland, 2007) ซึ่งการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน

ของสตาร์ชกับสารประกอบอื่นจะทำให้โครงสร้างของผลึกเมื่อวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะทำให้เกิดผลึกชนิด V_h ที่ต่างจากผลึกชนิด A และ B (Buleon *et al.*, 1998)

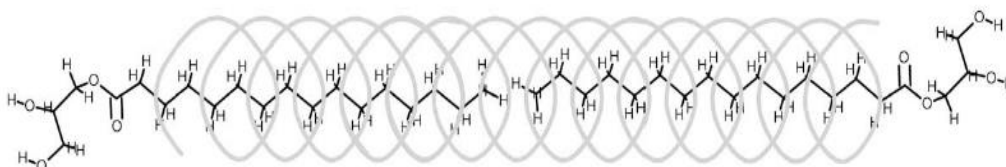


Figure 4 Schematic representation of a complex of amylose with two monopalmitin molecules

Source: Copeland *et al.* (2009)

2. สารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิก จัดเป็นสารประกอบที่ประกอบไปด้วยวงแหวนอะโรมาติกตั้งแต่ 1 หมู่ขึ้นไปรวมตัวกับหมู่ไฮดรอกซิลตั้งแต่ 1 หมู่ขึ้นไป สารประกอบฟีนอลิกสามารถพบได้ทั่วไปในพืชหลากหลายชนิด รวมไปถึงในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม ได้แก่ ชา กาแฟ เบียร์ และไวน์ ในปัจจุบันมีรายงานการพบฟีนอลิกมากกว่า 8,000 ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน สามารถพบได้ตั้งแต่ฟีนอลิกที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ได้แก่ กรดฟีนอลิก (Phenolic acids) และฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) จนไปถึงฟีนอลิกที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น แทนนิน (Tannins) (ภาพที่ 5) แอนโทไซยานิน จัดเป็นสารประกอบฟีนอลิกชนิดหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่มฟลาโวนอยด์ มีบทบาทในการทำให้เกิดสีส้ม แดง น้ำเงิน และม่วงในผักและผลไม้หลายชนิด เช่น แอปเปิ้ล พืชในตระกูลเบอร์รี่ และหอม เป็นต้น (Dai and Mumper, 2010) สารประกอบฟีนอลิกจัดเป็นสารเมตาบอไลต์ขั้นทุติยภูมิที่พืชสร้างขึ้นมาเพื่อป้องกันตัวเองจากการถูกทำลายด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต เชื้อโรค ปรสิตร รวมไปถึงศัตรูพืช ดังนั้นจึงมีบทบาทสำคัญในการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้านแบคทีเรีย ไวรัส รวมไปถึงด้านการอักเสบและการแพ้ ซึ่งฟีนอลิกในอาหารเหล่านี้ส่งผลต่อคุณสมบัติด้านการรับรู้ทางประสาทสัมผัส (Overall organoleptic properties) ยกตัวอย่างเช่น รสขมและฝาดในผักและผลไม้ เป็นผลมาจาก โพรไซยานิดินซึ่งจัดเป็นฟีนอลิกชนิดหนึ่งทำปฏิกิริยากับไกลโคโปรตีนในต่อมน้ำลาย

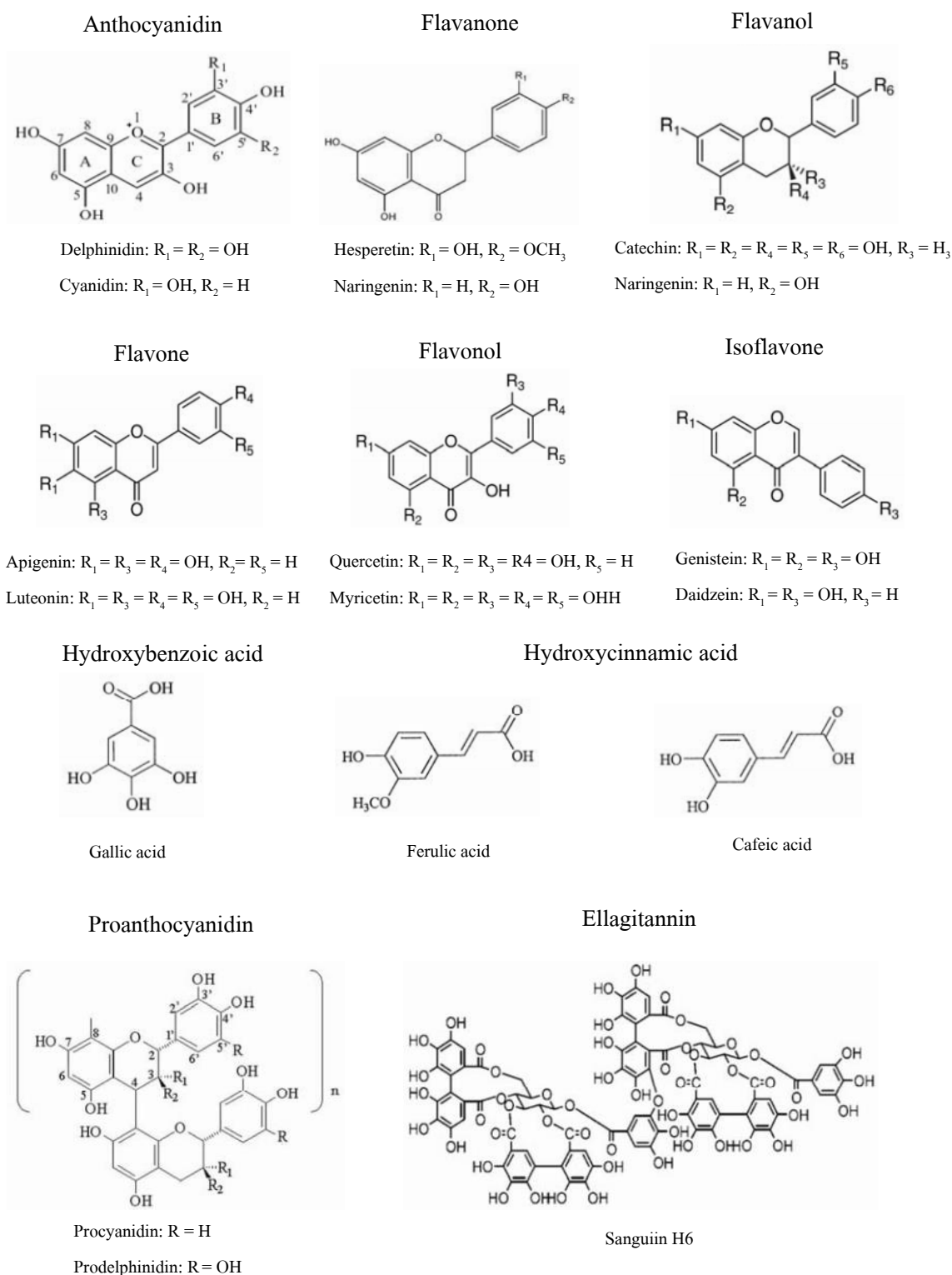


Figure 5 Structures of flavonoids (anthocyanidin, flavanone, flavanol, flavone, flavonol and isoflavone), phenolic acids (hydroxybenzoic acid and hydroxycinnamic acid) and tannins (proanthocyanidin and ellagitannin)

Source: Dai and Mumper (2010)

2.1 ชนิดของสารประกอบฟีนอลิกที่พบในข้าว

ข้าวจัดเป็นธัญพืชชนิดหนึ่งที่นิยมบริโภคกัน โดยทั่วไป อุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระหลายชนิด เช่น สารประกอบฟีนอลิก วิตามินอี และแกมมาออโรซานอล เป็นต้น (Iqbal *et al.*, 2005) ข้าวมีสีจะมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงกว่าข้าวที่ไม่มีสี ทั้งนี้เนื่องจากข้าวมีสีจะมีลักษณะของเยื่อหุ้มเมล็ดที่มีสีต่างๆ เช่น สีดำ ม่วง และสีแดง ซึ่งมีแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่ทำให้เกิดสีในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด จึงจัดเป็นข้าวที่มีองค์ประกอบของสารประกอบฟีนอลิกสูง ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าฟีนอลิกส่วนใหญ่ในข้าวจะถูกกำจัดออกในขั้นตอนการขัดสี เนื่องจากฟีนอลิกส่วนใหญ่จะพบมากในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ด หรือ รัภายหลังการขัดสี (Tian *et al.*, 2004; Zhou *et al.*, 2004; Massaretto *et al.*, 2011)

2.1.1 กรดฟีนอลิก

กรดฟีนอลิกในข้าวสามารถพบได้หลายชนิด แต่โดยส่วนใหญ่แล้วกรดฟีนอลิกชนิดที่พบมากที่สุด คือ กรดเฟอร์ูลิก (Ferulic acid) และกรดพาราคูมาริก (*p*-Coumaric) แต่ทั้งนี้ชนิดของกรดฟีนอลิกจะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของข้าวเป็นสำคัญ (Bunzel *et al.*, 2002; Chung *et al.*, 2002) กรดฟีนอลิกที่พบในข้าวส่วนใหญ่จะอยู่ภายในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกกำจัดออกในระหว่างกระบวนการขัดสี ดังนั้น ข้าวกล้องจึงมีปริมาณกรดฟีนอลิกสูงกว่าข้าวขัดขาว กรดฟีนอลิกสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ฟีนอลิกอิสระ (Free phenolic) และ ฟีนอลิกยึดเหนี่ยว (Bound phenolic) ซึ่งกรดฟีนอลิกที่พบในข้าวมีทั้งในรูปฟีนอลิกอิสระ ซึ่งละลายน้ำได้ และส่วนของฟีนอลิกที่จับกับองค์ประกอบอื่นในธัญพืช ซึ่งส่วนใหญ่จะจับกับโพลีแซคคาไรด์ที่เป็นองค์ประกอบในผนังเซลล์ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เพคติน รวมทั้ง โปรตีน ซึ่งจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้กรดฟีนอลิกในรูปนี้ไม่สามารถละลายน้ำ (ภาพที่ 6) ซึ่งส่วนของผนังเซลล์ที่เป็นลิกนินจะเชื่อมต่อกับวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้างของกรดฟีนอลิกในกลุ่มอนุพันธ์ของกรดซินนามิกและอนุพันธ์ของกรดเบนโซอิกด้วยพันธะอีเทอร์ ในขณะที่ผนังเซลล์ที่เป็นคาร์โบไฮเดรตและ โปรตีนจะเชื่อมต่อกับหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดฟีนอลิกด้วยพันธะเอสเทอร์ ซึ่งกรดฟีนอลิกที่อยู่ในรูปกรดฟีนอลิกยึดเหนี่ยวจะมีความคงตัวสูงกว่ากรดฟีนอลิกอิสระ (Wong, 2006; Liu, 2007; Acosta-Estrada *et al.*, 2014)

Zhou และคณะ (2004) ศึกษาหาชนิดของกรดฟีนอลิกที่พบในข้าวที่ผ่านและไม่ผ่านการขัดสี พบว่า ชนิดของกรดฟีนอลิกส่วนใหญ่ที่พบในข้าว คือ กรดเฟอร์ูลิก (255-362 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และกรดพาราคูมาริก (70-152 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) โดยข้าวที่ไม่ผ่านการขัดสีจะมีปริมาณของกรดฟีนอลิกทั้งสองชนิดสูงกว่าข้าวที่ผ่านการขัดสี และพบว่ากรดฟีนอลิกส่วนใหญ่ที่

พบในข้าวจะอยู่ในรูปฟีนอลิกชนิดเหนียวเป็นส่วนใหญ่ (ร้อยละ 80-90) Ayumi และคณะ (1999) จำแนกชนิดของฟีนอลิกในข้าวจำนวน 21 สายพันธุ์ (*Oryza sativa*) ทั้งในรำข้าวและข้าวขัดขาวด้วยเครื่องโครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถนสูง (High Performance Liquid Chromatography; HPLC) โดยสกัดกรดฟีนอลิกอิสระด้วยเอทานอลร้อยละ 70 นาน 30 นาที ก่อนนำมาหมუნเหวี่ยงแยกส่วนใส นำส่วนใสตรวจวิเคราะห์ชนิดฟีนอลิก ส่วนกรดฟีนอลิกชนิดเหนียวจะวิเคราะห์โดยใช้ของแข็งที่ได้จากการหมუნเหวี่ยงในขั้นตอนการสกัดกรดฟีนอลิกอิสระมาสกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ นาน 4 ชั่วโมง จากนั้นหมუნเหวี่ยงแยกส่วนใส นำส่วนใสสกัดซ้ำด้วยเอทิลอะซิเตท จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์ชนิดของกรดฟีนอลิกชนิดเหนียวด้วย HPLC พบว่า ในข้าวทั้ง 21 สายพันธุ์ ประกอบด้วยฟีนอลิกอิสระได้แก่ กรดเฟอร์ูลิก และกรดพาราความาติก โดยในรำข้าวและข้าวขัดขาว จะพบฟีนอลิกอิสระชนิดกรดเฟอร์ูลิก มีค่าระหว่าง 0.25-2.9 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และ 0-277 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่กรดพาราความาริกที่พบในรำข้าวและข้าวขัดขาวทั้ง 21 สายพันธุ์มีค่าระหว่าง 0.1-1.1 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และ 0-159 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ส่วนฟีนอลิกชนิดเหนียวที่พบในข้าวทั้ง 21 สายพันธุ์ ได้แก่ กรดเฟอร์ูลิก กรดพาราความาติก และ กรด 5,5'-ไดเฟอร์ูลิก (5,5'-diferulic acid) เป็นส่วนใหญ่ โดยในรำข้าวและข้าวขัดขาวจะพบกรดเฟอร์ูลิก มีค่าระหว่าง 22-225 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และ 1.7-13 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ กรดพาราความาริก มีค่าระหว่าง 51-243 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และ 0.5-4.9 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ และกรด 5,5'-ไดเฟอร์ูลิก มีค่าระหว่าง 3-22 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และ 0.04-0.5 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ และจากการศึกษาของ Tian และคณะ (2004) เกี่ยวกับชนิดและปริมาณฟีนอลิกในข้าวกล้อง (*Oryza sativa* L., koshihikari) ด้วยเครื่อง HPLC โดยฟีนอลิกอิสระจะใช้การสกัดด้วยเอทานอลร้อยละ 70 ในขณะที่กรดฟีนอลิกชนิดเหนียวจะใช้การสกัดด้วยเอทานอลร้อยละ 70 แล้วแยกส่วนใส ซึ่งเป็นส่วนของกรดฟีนอลิกอิสระทิ้งไป นำส่วนของแข็งที่เหลือมาสกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ แยกส่วนใสนำไปสกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก 4 โมลาร์ และสกัดซ้ำด้วยเอทิลอะซิเตทเป็นจำนวน 4 ครั้ง ระเหยให้แห้งแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC พบว่า ฟีนอลิกที่พบในข้าวกล้องงอกสามารถพบได้ทั้งในรูปฟีนอลิกอิสระ และฟีนอลิกชนิดเหนียว โดยกรดฟีนอลิกอิสระที่พบ ได้แก่ กรดโปรโตแคตชูอิก (Protocatechuic acid) (0.04 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) กรดไฮดรอกซีเบนโซอิก (Hydroxybenzoic acid) (0.04 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) กรควานิลลิก (Vanillic acid) (0.07 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) กรดไซริงจิก (Syringic acid) (0.03 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) กรดคลอโรจีนิก (Chlorogenic acid) (0.03 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) กรดคาเฟอิก (Caffeic acid) (0.02 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) กรดพาราความาริก (*p*-Coumaric acid) (0.1 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) กรดเฟอร์ูลิก (0.32 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) และกรดซินแนปพิค (Sinapinic acid) (0.02 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) ในขณะที่กรดฟีนอลิก

ชนิดเหนียวที่พบ ได้แก่ กรดโปรโตแคทชูลิก (0.17 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) กรดไฮดรอกซีเบนโซอิก (0.16 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) กรดวานิลลิก (0.17 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) กรดไซรินจิก (0.14 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) กรดคาเฟอิก (0.22 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) กรดพาราควมาริก (2.10 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) กรดเฟอร์รูลิก (15.19 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) และกรดซิแนพพิค (0.32 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)

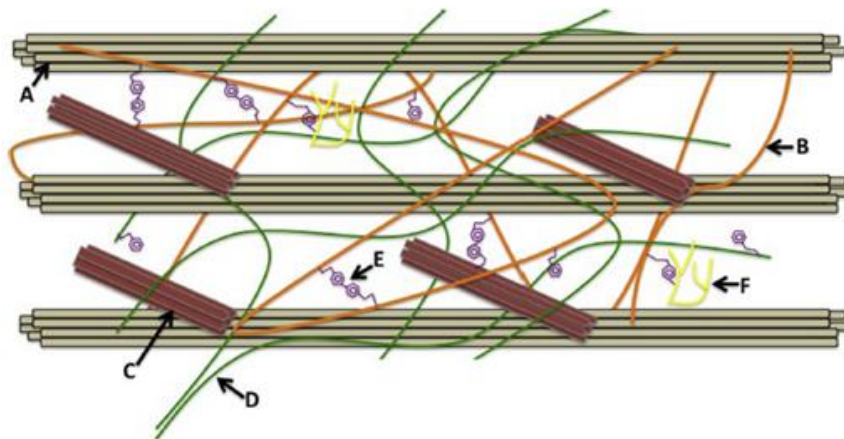


Figure 6 Representations of primary cell wall structure of plant material and cross-linking between structural components and phenolic compounds

Source: Adapted from Acosta-Estrada *et al.* (2014)

Note: Cellulose (A), hemicellulose (B), structural proteins (C), pectin (D), phenolic acids (E) and lignin (F)

2.1.1.1 โครงสร้างของกรดฟีนอลิก

กรดฟีนอลิกสามารถจำแนกออกเป็น 2 ชนิด คือ อนุพันธ์ของกรดเบนโซอิก (Benzoic acid) มีโครงสร้างพื้นฐาน คือ C6-C1 เช่น กรดโปรโตแคทชูลิก กรดไฮดรอกซีเบนโซอิก กรดวานิลลิก และกรดไซรินจิก และอนุพันธ์ของกรดซินนามิก มีโครงสร้างพื้นฐาน คือ C6-C3 เช่น กรดคาเฟอิก กรดพาราควมาริก กรดเฟอร์รูลิก กรดซิแนพพิค และกรดคลอโรเจนิค เป็นต้น (ภาพที่ 7) (Tian *et al.*, 2004) ซึ่งกรดคาเฟอิกพบได้มากในฝักและผลไม้ ส่วนกรดเฟอร์รูลิกพบได้มากในธัญพืช สามารถพบได้ทั้งในรูปกรดฟีนอลิกอิสระ (Free phenolic acid) หรือ กรดฟีนอลิกที่จับอยู่กับโมเลกุลของน้ำตาล สามารถละลายน้ำได้ ในขณะที่กรดฟีนอลิกส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่จับกับเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช ซึ่งไม่สามารถละลายน้ำได้ (D'Archivio *et al.*, 2007)

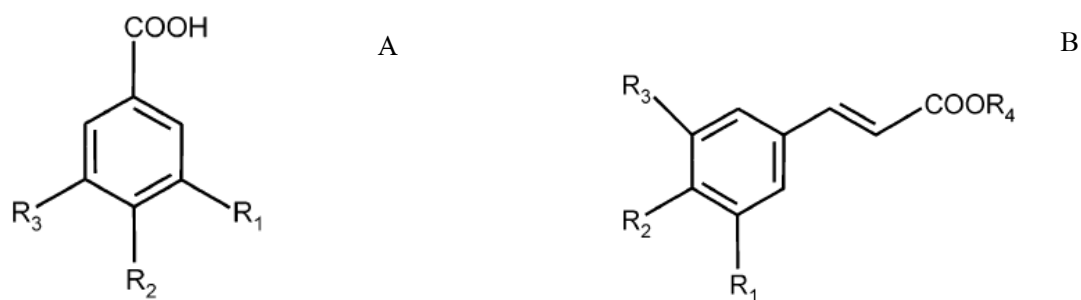


Figure 7 Chemical structure of phenolic acids

Source: Tian *et al.* (2004)

Note: Hydroxybenzoic acid (A) (protocatechuic acid: $R_1 = H$, $R_2 = OH$, $R_3 = OH$, hydroxybenzoic acid: $R_1 = H$, $R_2 = OH$, $R_3 = OH$, vanillic acid: $R_1 = H$, $R_2 = OH$, $R_3 = OCH_3$, syringic acid: $R_1 = OCH_3$, $R_2 = OH$, $R_3 = OCH_3$) and hydroxycinnamic acid (B) (caffeic acid: $R_1 = OH$, $R_2 = OH$, $R_3 = OH$, $R_4 = H$, *p*-coumaric acid: $R_1 = H$, $R_2 = OH$, $R_3 = H$, $R_4 = H$, ferulic acid: $R_1 = OCH_3$, $R_2 = OH$, $R_3 = H$, $R_4 = H$, sinapic acid: $R_1 = OCH_3$, $R_2 = OH$, $R_3 = OCH_3$, $R_4 = H$, chlorogenic acid: $R_1 = OH$, $R_2 = OH$, $R_3 = H$, $R_4 = \text{quinate}$)

2.1.1.2 การสกัดกรดฟีนอลิก

การสกัดกรดฟีนอลิกออกจากโครงสร้างของพืชจะใช้ตัวทำละลายกลุ่มแอลกอฮอล์หรือตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เมทานอล เอทานอล อะซิโตน น้ำ และเอทิลอะซิเตท เป็นต้น เอทานอลเป็นตัวทำละลายที่มีความเหมาะสมต่อการสกัดกรดฟีนอลิก เนื่องจากให้ผลผลิตจากการสกัดสูง และจัดเป็นสารที่มีความปลอดภัยต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

ในการสกัดกรดฟีนอลิกจะใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัด เนื่องจากง่ายต่อการใช้งาน มีประสิทธิภาพสูง และสามารถนำสารสกัดที่ได้ไปประยุกต์ใช้ได้จริงในทางอุตสาหกรรม ซึ่งประสิทธิภาพของการสกัดจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของตัวทำละลาย กล่าวคือความเข้มข้นของตัวทำละลายต้องมีความเหมาะสมต่อการละลายของสารประกอบฟีนอลิก เวลาที่ใช้ในการสกัด อุณหภูมิ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อตัวอย่าง ตลอดจนคุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของตัวอย่าง โดยทั่วไปวัสดุธรรมชาติจะมีองค์ประกอบของสารประกอบฟีนอลิกที่หลากหลายตั้งแต่สารประกอบฟีนอลิกที่มีโครงสร้างอย่างง่าย เช่น กรดฟีนอลิก และแอนโทไซยานิน เป็นต้น ตลอดจน สารประกอบฟีนอลิกที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น แทนนิน อีกทั้งกรดฟีนอลิกสามารถเกิดการรวมตัวกับสารประกอบอื่นที่มีในพืช เช่น คาร์โบไฮเดรต และโปรตีน ดังนั้นหากในตัวอย่างมีองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่กรดฟีนอลิก เช่น น้ำตาล กรดอินทรีย์ และไขมัน จึงต้องมีการกำจัดสาร

รบกวนเหล่านี้ก่อนการสกัด สำหรับการสกัดกรดฟีนอลิกชนิดเหนียวที่จับกับคาร์โบไฮเดรตหรือโปรตีนจะมีการทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) เพื่อทำลายพันธะเอสเทอร์ที่เชื่อมต่อกันระหว่างกรดฟีนอลิกกับผนังเซลล์พืช ก่อนการสกัดด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยการใช้ตัวทำละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นจึงสกัดซ้ำในสภาวะกรด ซึ่งกรดที่นิยมใช้คือ กรดไฮโดรคลอริก ที่ความเป็นกรดต่างต่ำกว่า 2 และสกัดด้วยเอทิลอะซิเตทเป็นจำนวน 3 ครั้ง (Yu *et al.*, 2002) Kroon และคณะ (1997) ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เพื่อทำลายพันธะเอสเทอร์ของกรดเฟอรูลิกกับผนังเซลล์ชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดในรำข้าวสาลี ส่วน Adom และคณะ (2003) ศึกษาการสกัดกรดฟีนอลิกจากข้าวสาลี โดยใช้เอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 80 เพื่อสกัดกรดฟีนอลิกอิสระ และส่วนของแข็งที่เหลือจากการสกัดกรดฟีนอลิกอิสระจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมงร่วมกับการเขย่าภายใต้แก๊สไนโตรเจน จากนั้นจึงปรับเป็นกลางด้วยกรดไฮโดรคลอริก และสกัดซ้ำด้วยเอทิลอะซิเตทจำนวน 5 ครั้ง จากผลการศึกษาพบว่าในข้าวสาลีแต่ละสายพันธุ์จะมีชนิดและปริมาณของกรดฟีนอลิกแตกต่างกัน โดยกรดฟีนอลิกชนิดเหนียวจะมีปริมาณมากกว่ากรดฟีนอลิกอิสระ 2.5-5.4 เท่า โดยกรดฟีนอลิกส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปกรดฟีนอลิกชนิดเหนียว (ร้อยละ 72-84) ซึ่งกรดฟีนอลิกที่อยู่ในรูปที่จับกับองค์ประกอบอื่นจะไม่ถูกทำลายในระหว่างการย่อยในกระเพาะอาหาร แต่จะถูกย่อยที่ลำไส้เล็ก และถูกดูดซึมที่ลำไส้ใหญ่ ดังนั้นการบริโภคข้าวสาลีที่มีองค์ประกอบของกรดฟีนอลิกที่อยู่ในรูปกรดฟีนอลิกชนิดเหนียวจะทำให้เกิดประโยชน์ต่อร่างกาย และมีฤทธิ์ในการป้องกันการเกิดโรค (Andreasen *et al.*, 2001)

นอกจากนี้ อุณหภูมิและเวลาในการสกัดยังเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดกรดฟีนอลิก เนื่องจากมีผลต่อการละลายและการสลายตัวของกรดฟีนอลิก เนื่องการเกิดออกซิเดชันระหว่างการสกัด การเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดสามารถช่วยเพิ่มการละลายและการแพร่ของกรดฟีนอลิกจากเซลล์เข้าสู่ตัวทำละลายได้มากขึ้น นอกจากนี้ อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจะช่วยลดความหนืดและแรงตึงผิวของตัวทำละลาย อย่างไรก็ตาม การใช้อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานจะเพิ่มโอกาสการเกิดออกซิเดชันของกรดฟีนอลิกทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดลดลง (Jacobs *et al.*, 2001)

2.1.2 แอนโทไซยานิน

แอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่ละลายน้ำพบได้ในพืช ทั้ง ผัก ผลไม้ ธัญพืช และดอกไม้ โดยสีของแอนโทไซยานินจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะความเป็นกรด-ด่าง แอนโทไซยานินจะมีสีแดงที่ความเป็นกรด-ด่างต่ำ ให้สีน้ำเงินที่สภาวะเป็นกลางและไม่มีสีที่ความเป็นกรด-ด่างสูง

แอนโทไซยานินพบมากในข้าวที่มีสีแดงและสีดำ รงควัตถุในข้าวเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ ชนิดแอนโทไซยานินที่พบ ได้แก่ ไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ (Cyanidin-3-glucoside) พีโอนิดิน-3-กลูโคไซด์ (Peonidin-3-glucoside) มอลวิดิดิน (Malvidin) พีลาโกนิน-3,5-ไดกลูโคไซด์ (Pelargonidin-3,5-diglucoside) ไซยานิดิน-3,5-ไดกลูโคไซด์ (Cyanidin-3,5-diglucoside) (Abdel-Aal *et al.*, 2006; Ahuja *et al.*, 2007; Hiemori *et al.*, 2009; Yodmanee *et al.*, 2011) ข้าวมีสีจะมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระที่สูงกว่าข้าวที่ไม่มีสีหรือข้าวที่ผ่านการขัดสี เนื่องจากแอนโทไซยานินจัดเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่เป็นองค์ประกอบหลักในส่วนของจมูกข้าวและรำข้าว ข้าวที่ผ่านกระบวนการขัดสีจึงทำให้เกิดการสูญเสียสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ (Champagne, 2004)

Sompong และคณะ (2011) ศึกษาชนิดและปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวสีแดง และสีดำ สกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ในเมทานอล อัตราส่วน 15:85 วัดปริมาณแอนโทไซยานินโดยใช้เครื่อง HPLC พบว่า ข้าวที่มีสีเป็นสายพันธุ์ที่มีปริมาณแอนโทไซยานินสูงที่สุด โดยชนิดของแอนโทไซยานินที่พบส่วนใหญ่จะเป็น ไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ และ พีโอนิดิน-3-กลูโคไซด์ ซึ่งมีปริมาณตั้งแต่ 19.4-140.8 และ 11.1-12.8 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับโดยข้าวสังข์หยดจัดเป็นข้าวในกลุ่มข้าวที่มีสีแดง ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวสังข์หยด พบว่า ข้าวสังข์หยดมีปริมาณแอนโทไซยานิน 0.60 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง จากการศึกษาของ Keawpeng Meenune (2012) ถึงปริมาณแอนโทไซยานินจากข้าวสังข์หยดของ โดยใช้วิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสง พบว่า ข้าวสังข์หยดมีปริมาณแอนโทไซยานินในรูปไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์เท่ากับ 16.42 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม

2.1.2.1 โครงสร้างของแอนโทไซยานิน

แอนโทไซยานิน เป็นรงควัตถุที่ จัดอยู่ในกลุ่มฟลาโวนอยด์ มีโครงสร้างเป็นแบบ C6-C3-C6 ซึ่งเป็นไกลโคไซด์ของ 2-ฟีนิลเบนโซไพริเลียม หรือ ฟลาวิลียมแคทไอออน (Flavylium cation) แอนโทไซยานินมีมากกว่า 400 ชนิดในธรรมชาติ แต่ละชนิดจะมีสีและคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป แม้ว่าแอนโทไซยานินจะมีด้วยกันหลายชนิด แต่ทุกชนิดจะมีโครงสร้างหลักเป็นสารชนิดเดียวกันที่เรียกว่า แอนโทไซยานิดิน (Anthocyanidin) ที่มีคาร์บอน 15 อะตอมอยู่ภายในโมเลกุล ประกอบด้วย อะไกลโคน (Aglycone) น้ำตาล และหมู่เอซิล (ภาพที่ 8) (DeMan 1999; Durst and Wrolstad, 2001; Anderson and Markham, 2006) แอนโทไซยานินที่พบได้โดยทั่วไปมีด้วยกัน 6 ชนิด คือ พีลาโกนิน (Pelargonidin) ไซยานิดิน (Cyanidin) เดลฟินิดิน (Delphinidin) พีโอนิดิน (Peonidin) เพทูนิดีน (Petunidin) และมอลวิดิดิน (Malvidin) ซึ่งแต่ละชนิดจะมีหมู่ไฮดรอกซิล หรือหมู่เมทอกซิลมาเกาะที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 5 ที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 1) (Mazza and Miniati, 1993;

Durst and Wrolstad, 2001; Yamasaki *et al.*, 1997) น้ำตาลที่มาเกาะในโครงสร้างของแอนโทไซยานิน มีทั้งน้ำตาล โมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharides) เช่น กลูโคส (Glucose) ไซโลส (Xylose) อะราบินอส (Arabinose) กาแลคโตส (Galactose) และแรมโนส (Rhamnose) น้ำตาลโมเลกุลคู่ (Disaccharides) เช่น รูติโนส (Rutinose) และเจนติโอไบโอส (Gentiobiose) โมเลกุลของน้ำตาลจะเกาะกับหมู่ไฮดรอกซิลของแอนโทไซยานิน นอกจากนี้ น้ำตาลอาจจับกับกรดที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 หรือ 5 เรียกว่า นอนอะซิลเทตแอนโทไซยานิน (Non-acylated anthocyanin) และเรียกแอนโทไซยานินที่ไม่มีองค์ประกอบของกรดว่า อะซิลเทตแอนโทไซยานิน (Acylated anthocyanin) โดยกรดจะเกิดพันธะเอสเทอร์กับน้ำตาลที่จับกับคาร์บอน ตำแหน่งที่ 3 หรือ ตำแหน่งที่ 5 กรดที่เกิดพันธะเอสเทอร์กับน้ำตาล เช่น กรดคูมาริก กรดเฟอร์ริก และกรดคาเฟอิก เป็นต้น ซึ่งการเกิดอะซิลเลชัน (Acylation) ในโครงสร้างของแอนโทไซยานินจะทำให้ตัวแอนโทไซยานินชนิดนั้นมีความคงตัวดีขึ้น (Delgado-Vargas *et al.*, 2000) การแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิล (OH) และหมู่เมทอกซิล (OCH₃) ในโครงสร้างวงแหวนฟลาโวนอยด์ จะทำให้เกิดสีของแอนโทไซยานิน กล่าวคือ การเพิ่มจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิลจะทำให้เกิดโทนสีฟ้า (Bluish shade) ส่วนการเพิ่มจำนวนของหมู่เมทอกซิลจะทำให้เกิดโทนสีแดง (Redness) (Mazza, 2007)

2.1.2.2 การสกัดแอนโทไซยานิน

แอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุในกลุ่มสารประกอบโพลีฟีนอลและจัดเป็นสารประกอบที่มีขี้ การสกัดแอนโทไซยานินจากพืชโดยทั่วไปจะมีการใช้ตัวทำละลายจำพวกแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล เมทานอล หรือ อะซิโตนร่วมกับกรดเล็กน้อยเพื่อให้แอนโทไซยานินคงตัวอยู่ในรูปของฟลาโวนิลเลียมแคทไอออน ซึ่งจะให้สีแดงและมีความคงตัวในสภาวะกรด (Strack and Wray, 1989) ประสิทธิภาพการสกัดแอนโทไซยานินจะขึ้นอยู่กับวิธีการเลือกชนิดตัวทำละลาย (Cowan, 1999) ซึ่งความมีขี้ของสารที่ต้องการสกัดเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเลือกใช้ชนิดตัวทำละลาย รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลตัวทำละลายและตัวถูกละลาย การถ่ายเทมวลของตัวทำละลาย การใช้ตัวทำละลายร่วม (Co-solvent) ความปลอดภัยด้านสิ่งแวดล้อม ความเป็นพิษต่อมนุษย์และต้นทุนการสกัด (Azmir *et al.*, 2013) โดยทั่วไปการสกัดที่ใช้ตัวทำละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง จะใช้ระยะเวลาในการสกัดนาน ดังนั้นจึงมีการใช้อุณหภูมิ ความดัน หรือคลื่นไมโครเวฟร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลายจะสามารถลดระยะเวลาในการสกัดแอนโทไซยานินได้ (Sun *et al.*, 2012)

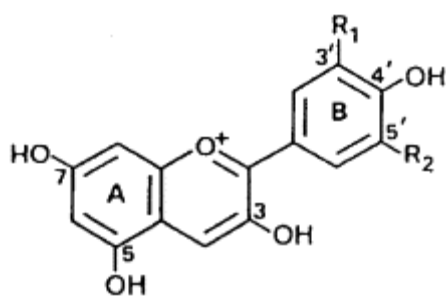


Figure 8 Chemical structure of anthocyanin

Source: DeMan (1999)

Table 1 Anthocyanidins more commonly found in nature

Anthocyanin	R ₁	R ₂	Chemical structure
Pelargonidin	H	H	
Cyanidin	OH	H	
Delphinidin	OH	OH	
Peonidin	OCH ₃	H	
Petunidin	OCH ₃	OH	
Malvidin	OCH ₃	OCH ₃	

Source: Durst and Wrolstad (2001)

ก. ชนิดและอัตราส่วนของตัวทำละลาย

เนื่องจากแอนโทไซยานินเป็นสารประกอบโพลีโคไซด์ ดังนั้นตัวทำละลายที่มีขั้วจะเหมาะต่อการสกัดแอนโทไซยานิน โดยทั่วไปจะใช้ตัวทำละลายในกลุ่มแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอลและเมทานอล จากการศึกษาของ Sharifi และ Hassani (2012) เกี่ยวกับผลของตัวทำละลายต่อปริมาณแอนโทไซยานินที่สกัดได้จากบาร์เบอร์รี่ (*Berberis vulgaris*) โดยวิธีรีฟลักซ์ ใช้ตัวอย่างจำนวน 200 กรัม โดยใช้ตัวทำละลาย 7 ชนิด ได้แก่ (1) น้ำกลั่น (2) เอทานอล (3) เมทานอล (4) เอทานอลร่วมกับเมทานอล (5) กรดไฮโดรคลอริก (6) กรดซิตริก และ (7) กรดไฮโดรคลอริก ร่วมกับกรดซิตริก ปริมาตร 500 มิลลิลิตร สกัดนาน 2 ชั่วโมง พบว่า เอทานอลผสมกับเมทานอลจะ

ให้ปริมาณแอนโทไซยานินสูงที่สุด ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามการใช้เมทานอล และเอทานอลผสมกับเมทานอลจะให้ปริมาณแอนโทไซยานินไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) การที่แอนโทไซยานินละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ได้แตกต่างกัน เนื่องจากการเกิดพันธะในโครงสร้างของแอนโทไซยานินที่ตำแหน่ง 3', 4' และ 5' โครงสร้างของไซยานิดินประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 2 หมู่ที่ตำแหน่ง 3' และ 4' และเกิดพันธะกับไฮโดรเจนที่ตำแหน่ง 5' ดังนั้นการละลายของไซยานิดินจึงเกิดขึ้นได้ดีในเอทานอลและเมทานอล เนื่องจากมีองค์ประกอบของหมู่ไฮดรอกซิล 2 หมู่อยู่ในโครงสร้าง (Deman, 1999; Francis, 1989)

ในการสกัดแอนโทไซยานินจากแหล่งอาหารต่างๆ รวมทั้งวัสดุเศษเหลือจากการเกษตร มีการใช้กรดร่วมกับตัวทำละลาย เช่น เอทานอล เมทานอล อะซิโตน และน้ำ ในการสกัดแอนโทไซยานิน เนื่องจากโครงสร้างของแอนโทไซยานินจะมีความคงตัวที่สภาวะเป็นกรด และเมทานอลเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการสกัดแอนโทไซยานิน เนื่องจากเป็นตัวทำละลายที่มีจุดเดือดต่ำ (65 องศาเซลเซียส) แต่ในการสกัดแอนโทไซยานินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เอทานอลจัดเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมต่อการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เนื่องจากเป็นตัวทำละลายที่มีความเป็นพิษต่ำ ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และมีต้นทุนในการสกัดต่ำ และมีประสิทธิภาพในการสกัดสูงกว่าตัวทำละลายชนิดอื่น ดังนั้นเอทานอลจึงเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดแอนโทไซยานิน (Kang *et al.*, 2014) อย่างไรก็ตามชนิดของกรดที่นำมาใช้ในการสกัดแอนโทไซยานินนั้น จะต้องไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอนโทไซยานิน ซึ่งกรดที่ถูกนำมาใช้ในการรักษาความเป็นกรด-ด่างของตัวทำละลายให้อยู่ในสภาวะกรด ได้แก่ กรดอินทรีย์ เช่น กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดซิตริก กรดแลคติก กรดมาลิกและกรดทาร์ทาริก หากเป็นกรดแก่จะต้องมีความเข้มข้นต่ำ เช่น กรดไฮโดรคลอริก (ความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 1) และกรดไตรฟลูออโรอะซิติก (ความเข้มข้นร้อยละ 0.05-0.3) (Jackman *et al.*, 1987; Rodriguez-Sanoa and Wrolstad, 2001; Revilla *et al.*, 1998) ซึ่งกรดจะทำหน้าที่ในการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของเซลล์พืชทำให้การละลายของแอนโทไซยานินออกจากเม็ตรงควัตถุได้ง่ายมากขึ้น (Andersen and Jordheim, 2006) นอกจากนี้กรดที่ใช้ร่วมในการสกัดยังมีบทบาทสำคัญต่อการรักษาระดับความเป็นกรด-ด่างของตัวทำละลายเพื่อรักษาสภาพโครงสร้างของแอนโทไซยานินให้อยู่ในรูปฟลาโวลีเทียมไอออน (สีแดง) ซึ่งมีความคงตัวในสภาวะกรด แต่ทั้งนี้การใช้กรดที่มีความเข้มข้นที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดการเสียหาย โครงสร้างธรรมชาติของแอนโทไซยานิน อันเป็นสาเหตุนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโทไซยานิน ทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินที่ได้จากการวิเคราะห์ไม่ตรงกับความเป็นจริง (Bakker and Timberlake, 1985; Revilla *et al.*, 1998)

Kang และคณะ (2014) ศึกษาผลของการใช้ตัวทำละลายและค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันในการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวดำ โดยใช้ตัวทำละลายที่ต่างกันได้แก่ (1) น้ำ (2) เมทานอลร้อยละ 70 (3) เอทานอลร้อยละ 70 และ (4) อะซิโตนร้อยละ 70 โดยกำหนดค่าความเป็นกรด-ด่าง 2 ระดับ ได้แก่ 1 และ 7 โดยการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์มัล อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 10 แล้วสกัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง พบว่าการใช้เมทานอลที่สภาวะเป็นกรด (ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 1) จะให้ปริมาณแอนโทไซยานินสูงที่สุด (461.72 มิลลิกรัมต่อลิตร) ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chandrasekhar และคณะ (2012) ถึงผลของตัวทำละลายต่อการสกัดแอนโทไซยานินจากกะหล่ำปลีแดง โดยศึกษาผลของการสกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 ใช้เอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20, 40, 60 และ 80 อัตราส่วนตัวอย่างต่อตัวทำละลาย เท่ากับ 1 ต่อ 2 สกัดโดยใช้การเครื่องปั่นเป็นเวลา 1 นาที พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้น ปริมาณของแอนโทไซยานินที่สกัดได้จะเพิ่มขึ้น โดยปริมาณแอนโทไซยานินที่สกัดได้สูงสุดที่ความเข้มข้นของเอทานอลเท่ากับร้อยละ 50 (381.1 มิลลิกรัมต่อลิตร) จนกระทั่งความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าร้อยละ 50 จะทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินที่ได้ลดลง ($p < 0.05$) จะเห็นได้ว่าการสกัดแอนโทไซยานินจำเป็นต้องมีส่วนของน้ำเป็นองค์ประกอบในตัวทำละลาย ทั้งนี้การมีอยู่ของน้ำ จะทำให้แอนโทไซยานินเกิดการละลายได้มากขึ้น เนื่องจากแอนโทไซยานินมีส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic structure) เป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง (Patil *et al.*, 2009) และเมื่อศึกษาผลของการใช้เอทานอลร่วมกับกรดไฮโดรคลอริก พบว่า การใช้เอทานอลร่วมกับกรดจะทำให้ได้ปริมาณแอนโทไซยานินสูงกว่าการใช้กรดหรือเอทานอลในการสกัดเพียงอย่างเดียว โดยที่ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 50 ร่วมกับกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 1 จะได้ปริมาณแอนโทไซยานินสูงที่สุด (387.6 มิลลิกรัมต่อลิตร) ($p < 0.05$) ส่วน Oancea และคณะ (2012) ศึกษาผลของการใช้เอทานอลต่อการสกัดแอนโทไซยานินจากบลูเบอร์รี่ (*Vaccinium corymbosum*) โดยการใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกันในการสกัด ได้แก่ (1) น้ำ (2) กรดไฮโดรคลอริก (3) สารละลายผสมระหว่างเอทานอลต่อกรดอะซิติกต่อน้ำ (25 ต่อ 1 ต่อ 24) (4) เอทานอลต่อกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล (85 ต่อ 15) และ (5) เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50, 60, 70 และ 80 โดยสกัดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง พบว่า การใช้เอทานอลต่อกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงกว่าการใช้เอทานอลร่วมกับกรดอะซิติก ในขณะที่การใช้เอทานอลต่อน้ำที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 จะได้แอนโทไซยานินที่สูงสุด (148.51 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) และการสกัดด้วยน้ำจะให้ปริมาณแอนโทไซยานินที่น้อยที่สุด (3.24 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) ($p < 0.05$) ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากรดไฮโดรคลอริกมีประสิทธิภาพใน

การสกัดแอนโทไซยานินสูงกว่ากรดอะซิติก ในขณะที่ Amelia และคณะ (2013) ศึกษาถึงสภาวะการสกัดแอนโทไซยานินจากมะเขาม่วงโดยการใช้อทานอลร้อยละ 70 ผสมกับกรด 2 ชนิด คือ กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 1 และกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 3 พบว่า การใช้กรดร่วมในการสกัดจะให้สกัดแอนโทไซยานินได้ดีกว่าการไม่ใช้กรด การใช้กรดซิตริกร่วมกับตัวทำละลาย จะให้ปริมาณแอนโทไซยานินที่สกัดได้สูงกว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริก ($p < 0.05$) การใช้เอทานอลร้อยละ 70 ร่วมกับกรดซิตริกร้อยละ 3 จะทำให้ได้ผลผลิตจากการสกัดแอนโทไซยานินสูงที่สุด คือ ร้อยละ 0.58 อย่างไรก็ตาม การใช้กรดไฮโดร-คลอริกซึ่งเป็นกรดแก่ จึงทำให้พันธะของกรด และน้ำตาลที่อยู่ในโครงสร้างของแอนโทไซยานินถูกทำลาย เป็นผลให้เกิดการสลายตัวของแอนโทไซยานิน ทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินที่สกัดได้จึงลดลง ในขณะที่การใช้กรดซิตริกซึ่งเป็นกรดอ่อน ทำให้เกิดการสลายตัวของแอนโทไซยานินได้น้อยกว่า จึงเหมาะต่อการใช้ในการสกัดแอนโทไซยานินมากกว่ากรดไฮโดรคลอริก (Main *et al.*, 1978)

ข. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความคงตัวของแอนโทไซยานินในระหว่างกระบวนการสกัด กล่าวคือ การใช้ระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดให้ดีขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเพิ่มอัตราการแพร่และการละลายของสารสกัดในตัวทำละลาย แต่อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิสูงเกินไปอาจเป็นสาเหตุให้แอนโทไซยานินเกิดการสลายตัว การสกัดแอนโทไซยานินโดยทั่วไปจะใช้ระดับอุณหภูมิในช่วง 20-50 องศาเซลเซียส (Jackman *et al.*, 1987; Dao *et al.*, 1998) ส่วน Sharifi และ Hassani (2012) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการสกัดแอนโทไซยานินจากบาร์เบอร์รี่ (*Berberis vulgaris*) โดยใช้อทานอลร่วมกับเมทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยกำหนดอุณหภูมิในการสกัด 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง พบว่าการสกัดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณแอนโทไซยานินสูงที่สุด (119.311 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร) ส่วนการสกัดที่อุณหภูมิเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส มีปริมาณแอนโทไซยานินต่ำสุด (107.957 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร) ($p < 0.05$) เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในการสกัดสูงขึ้นสารสกัดแอนโทไซยานินมีอัตราการแพร่และการละลายในตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดแอนโทไซยานินเพิ่มสูงขึ้น (Lou *et al.*, 1997) ส่วน Oancea และคณะ (2012) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการสกัดแอนโทไซยานินจากบลูเบอร์รี่ โดยใช้อทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 เป็นตัวทำละลาย โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด 3 ระดับ คือ 4, 30 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิการสกัด 50 องศาเซลเซียส จะมีแอนโทไซยานินสูงที่สุด ในขณะที่การสกัดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีปริมาณแอนโทไซยานินน้อยที่สุด ($p < 0.05$)

ค. ระยะเวลาในการสกัด

ระยะเวลาในการสกัดที่เหมาะสมจะส่งผลปริมาณแอนโทไซยานินที่สกัดได้เพิ่มมากขึ้น Lapornik และคณะ (2005) ศึกษาการสกัดแอนโทไซยานินจากเรดเคอเรนท์ (*Ribes rubrum*) โดยใช้ 50 กรัมของตัวอย่างต่อ 100 มิลลิลิตรของตัวทำละลายที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำ เอทานอลร้อยละ 70 และเมทานอลร้อยละ 70 สกัดที่อุณหภูมิห้อง นาน 1, 12 และ 24 ชั่วโมง พบว่าเมื่อระยะเวลาการสกัดเพิ่มขึ้นการใช้ น้ำเป็นตัวทำละลายส่งผลให้ปริมาณแอนโทไซยานินลดลง ($p < 0.05$) ในขณะที่การสกัดด้วยเอทานอลและเมทานอลร้อยละ 70 เมื่อเวลาการสกัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น ทั้งนี้พบว่า การสกัดด้วยเมทานอลร้อยละ 70 ที่เวลานาน 24 ชั่วโมง จะได้ปริมาณแอนโทไซยานินสูงที่สุด โดยเท่ากับ 1,086.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ($p < 0.05$)

2.2 สมบัติของสารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิกจัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญซึ่งมีฤทธิ์สูงกว่า วิตามินซี อี และแคโรทีนอยด์ แอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นสารกลุ่มฟลาโวนอยด์จัดเป็นสารที่มีขนาดใหญ่จึงทำให้มีความแตกต่างกันทั้งทางเภสัชวิทยาและชีววิทยา เช่น เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Biological activity) ช่วยต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) สามารถลดอาการอักเสบ (Anti-inflammatory) โดยเพิ่มความแข็งแรงของเส้นใยโปรตีนในเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (Connective tissue) และกระดูกอ่อน (Cartilage) จึงลดการทำลายจากอนุมูลอิสระอันตรายที่สำคัญ ได้แก่ $DPPH^{\bullet}$, OH^{\bullet} , O_2 และ H_2O_2 นอกจากนี้ยังช่วยปกป้องหลอดเลือด (Vasoprotective) โดยการขยายหลอดเลือดและกระตุ้นการไหลเวียนของเลือด ลดคอเลสเตอรอลในเลือดโดยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Lipid peroxidation) ลดความเสี่ยงของโรคมะเร็งและต้านไวรัส (Peng *et al.*, 2006) เนื่องจากในโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกมีองค์ประกอบของหมู่ฟีนอลเป็นหลัก กลไกการต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิกนั้น ประกอบไปด้วยหลายกลไก เช่น สารประกอบฟีนอลิกทำหน้าที่ในการให้ไฮโดรเจนอะตอมหรืออิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ หรือ ทำหน้าที่ในการใช้วงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้างจับกับอนุมูลอิสระ จึงเป็นการลดอนุมูลอิสระได้ ซึ่งความสามารถในการดักจับอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิกขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกแต่ละชนิด โดยความสามารถของกรดฟีนอลิกในการต้านอนุมูลอิสระขึ้นอยู่กับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระในโมเลกุล ซึ่งพบว่ากรดฟีนอลิกชนิดไฮดรอกซินามิกจะมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่ากรดฟีนอลิกชนิดไฮดรอกซิเบนโซอิก (Rice-Evans *et al.*, 1995) ดังนั้นการบริโภคอาหาร ผัก หรือ ผลไม้ รวมไปถึงอาหารที่มีองค์ประกอบของสารประกอบฟีนอลิกสูงจึงช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจ โรคหลอดเลือด รวมไปถึงโรคมะเร็งได้

2.3 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารประกอบฟีนอลิก

วิธีการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกสามารถแบ่งออกได้เป็นการวิเคราะห์ปริมาณและชนิดของสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบฟีนอลิก สารมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบ รวมไปถึงสารรบกวนที่มีอยู่ในสารสกัด

2.3.1 เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี

สเปกโตรโฟโตเมทรี เป็นวิธีการวัดปริมาณสาร โดยใช้หลักการดูดกลืนแสงของสาร ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) เป็นวิธีการที่สะดวก รวดเร็ว และเหมาะกับตัวอย่างสารที่มีปริมาณมาก การตรวจวัดปริมาณกรดฟีนอลิกมีด้วยกันหลากหลายวิธี เช่น วิธี Folin-Denis (F-D) วิธี Folin-Ciocalteu (F-C) และ วิธีการไทเทรตด้วยเปอร์แมงกานัต (Permanganate titration) เป็นต้น ซึ่งวิธี Folin-Ciocalteu เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการใช้หาปริมาณของกรดฟีนอลิก (Singleton *et al.*, 1999) หลักการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ คือ กรดฟีนอลิกจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่สารประกอบเชิงซ้อนของกรดฟอสโฟโมลิบดีค/ฟอสโฟทังสติก (Phosphomolybdic/phosphotungstic acid) ในสถานะต่าง เป็นผลให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงิน ซึ่งสามารถตรวจวัดสีที่เกิดขึ้นได้จากเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร (Singleton *et al.*, 1965) วิธี Folin-Ciocalteu เป็นวิธีที่ทำได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย จึงเหมาะต่อการใช้ในการตรวจวัดปริมาณกรดฟีนอลิก แต่เนื่องจากวิธีดังกล่าวมีข้อจำกัด คือ สารประกอบอื่นที่ไม่ใช่กรดฟีนอลิกที่มีอยู่ในสารสกัดเป็นตัวรบกวนที่ทำให้ผลการวิเคราะห์เกิดความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง เนื่องจากสารรบกวน เช่น อะโรมาติกเอมีน น้ำตาล และกรดแอสคอร์บิกในตัวอย่างแย่งจับกับสาร Folin-Ciocalteu ในการรับอิเล็กตรอนจากกรดฟีนอลิก ซึ่งสามารถแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว โดยปรับสภาพของการวิเคราะห์ให้เป็นต่างนอกจากนี้ยังพบว่าสารในกลุ่มซัลไฟด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เติมลงไปในวันเป็นสาเหตุสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ปริมาณกรดฟีนอลิก (Dai and Mumper, 2010)

การตรวจวัดปริมาณแอนโทไซยานินด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี จะใช้วิธีการที่เรียกว่า พีเอชดิฟเฟอเรนเชียล (pH differential method) ซึ่งเป็นวิธีที่วัดได้ทั้งแอนโทไซยานินที่อยู่ในรูปโมโนเมอร์ (Monomeric) และ โพลีเมอร์ (Polymeric) โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานินที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างกัน โดยจะใช้ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 1 และ 4.5 โดยตัวอย่างสารสกัดแอนโทไซยานินจะถูกเจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 1 และ 4.5 และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่แอนโทไซยานินในสารละลาย

ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 1 สามารถดูดกลืนแสงได้สูงที่สุด (520 นาโนเมตร) ความแตกต่างของค่าการดูดกลืนที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างทั้งสองเป็นผลมาจากโครงสร้างของแอนโทไซยานินเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่างกัน โดยโครงสร้างของแอนโทไซยานินจะอยู่ในรูปฟลาวิลเลียมแคทไอออนที่ความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 1 ซึ่งเป็นรูปที่มีสีส้มจนถึงสีม่วง และเมื่อความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.5 แอนโทไซยานินจะอยู่ในรูปเฮมิคีทอล ซึ่งเป็นรูปที่ไม่มีสี (ภาพที่ 9) (Wrolstad *et al.*, 2005) การคำนวณหาปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีพีเอชดีเฟอเรนเทียลจะคำนวณโดยใช้มวลโมเลกุลและโมลาร์แอบซอร์บติวิตี (Molar absorptivity) ของแอนโทไซยานินที่พบมากในวัตถุดิบนั้นหรือไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ ซึ่งเป็นแอนโทไซยานินที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติ

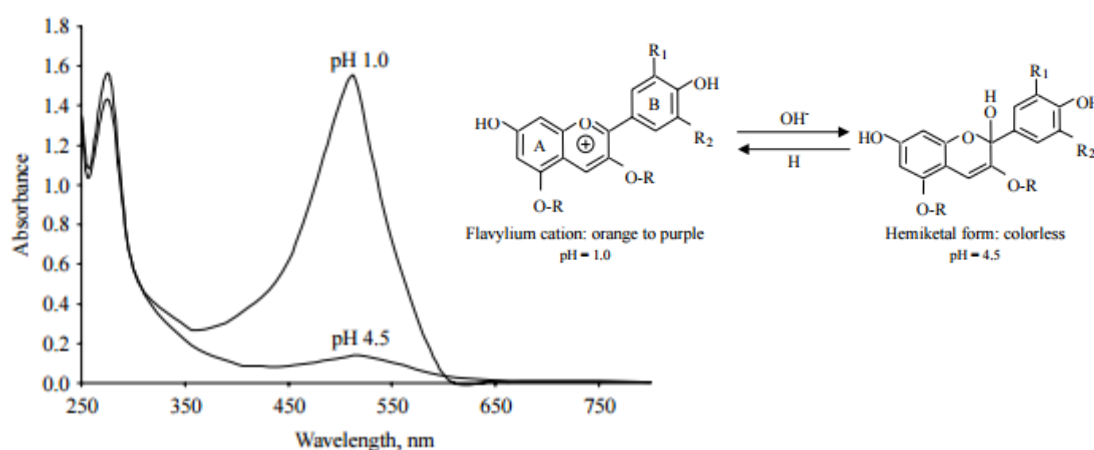


Figure 9 UV-Visible spectra of anthocyanins in pH 1.0 and 4.5 buffers and the structures of the flavylium cation and hemiketal forms

Source: Wrolstad *et al.* (2005)

Note: R=H or Glycosidic substituent

2.3.2 เทคนิคโครมาโตกราฟี

โครมาโตกราฟีเป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการจำแนกชนิดและระบุปริมาณของสารประกอบฟีนอลิก ตัวอย่างเช่น แก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography) โครมาโตกราฟีแผ่นบาง (Thin-Layer chromatography) และ แคปิลลารีอิเล็กโทรโฟรีซิส (Capillary electrophoresis) อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเทคนิค HPLC วิธีที่เป็นที่ได้รับความนิยมและมีความแม่นยำในการใช้จำแนกชนิดของสารประกอบฟีนอลิก เช่น กรดฟีนอลิก และแอนโทไซยานิน เป็นต้น HPLC เป็นเทคนิคการแยกสารโดยใช้ของเหลวความดันสูงจะสร้างแรงดันพาสารต่างๆ ในสารตัวอย่างผ่านไป

บนตัวกลางที่ไม่เคลื่อนที่ ความไวและความถูกต้องของการตรวจวัดด้วย HPLC จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของสารตัวอย่าง ชนิดของคอลัมน์ และตัวตรวจวัดที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ ของเหลวที่ใช้ในการพาสารผ่านไปยังคอลัมน์ เรียกว่า เฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase; MP) เฟสเคลื่อนที่ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิก ได้แก่ อะซิโตน ไตรล เมทานอล เอทานอล และเตตระไฮโดรฟูแรน (THF) (Sameckis *et al.*, 2006) นอกจากนี้ในการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้จะมีการรักษาระดับความเป็นกรด-ด่างของสารระหว่าง 2-4 เพื่อให้สารประกอบฟีนอลิกคงตัวในระหว่างการวิเคราะห์ ดังนั้น กรดที่ถูกนำมาใช้ในการรักษาความเป็นกรด-ด่างของเฟสเคลื่อนที่ เช่น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก กรดฟอสฟอริก ฟอสเฟต และแอมโมเนียมอะซิเตท เป็นต้น (Khoddami *et al.*, 2013) เทคนิคทางโครมาโตกราฟีเป็นเทคนิคที่ทำได้ง่าย ต้นทุนต่ำ สามารถใช้วิเคราะห์ข้อมูลทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ (Giusti and Wrolstad, 2001; Wrolstad *et al.*, 2005)

การเลือกคอลัมน์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบฟีนอลิก โดยทั่วไปจะอาศัยหลักการความมีขั้วของสาร ระดับความมีขั้วที่ต่างกันจะทำให้เวลาที่สารประกอบฟีนอลิกแต่ละชนิดที่ถูกหน่วงอยู่ในคอลัมน์ใช้เวลาต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์แอนโทไซยานินด้วย HPLC แอนโทไซยานินจะเกิดพันธะที่แข็งแกร่งกับตัวดูดซับผ่านทางหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของแอนโทไซยานิน ดังนั้นสารประกอบต่างๆ ที่อยู่ในสารสกัดร่วมกับแอนโทไซยานินจะถูกแยกออกด้วยชุดของตัวทำละลายที่มีความมีขั้วเพิ่มขึ้น ความมีขั้วของแอนโทไซยานินจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันความมีขั้วของแอนโทไซยานินจะลดลงเมื่อในโครงสร้างเกิดพันธะกับหมู่เมทอกซิล ดังนั้น แอนโทไซยานินที่พบมากในธรรมชาติทั้ง 6 ชนิดจะมีลำดับการแยกตามเวลาที่เพิ่มมากขึ้น ดังนี้ เคลฟิโนดิน ไชยานิดิน พิทุนิติน เพลาโกนิติน พิโอนิติน และมัลวิดิน ตามลำดับ (Santos-Buelga *et al.*, 2003)

นอกจากนี้แอนโทไซยานินที่เกิดพันธะกับน้ำตาลจะเพิ่มความมีขั้วของแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ระยะเวลาที่แอนโทไซยานินอยู่ในคอลัมน์ หรือที่เรียกว่า ระยะเวลา (Retention time; RT) ของแอนโทไซยานินลดลง ซึ่งความมีขั้วของแอนโทไซยานินที่เกิดพันธะกับโมเลกุลของน้ำตาลจะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำตาลและตำแหน่งการแทนที่ในโครงสร้างแอนโทไซยานิน ซึ่งลำดับการแยกของแอนโทไซยานิน ตามชนิดของน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์ คือ กาแลกโทไซด์ กลูโคไซด์ อะราบิโนไซด์ ไชโลไซด์ และแรมโนไซด์ ตามลำดับ ส่วนน้ำตาลชนิดไดแซคคาไรด์ ได้แก่ โซฟอโรไซด์ แซมบูบิโนไซด์ และรูติโนไซด์ ตามลำดับ แอนโทไซยานินที่เกิดพันธะกับน้ำตาลตัวแรกจะเกิดในโครงสร้างของแอนโทไซยานินที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 5, 7 หรือ 3 และโมเลกุลของน้ำตาลตัวที่สองจะทำให้แอนโทไซยานินมีความมีขั้วเพิ่มมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น 3, 5-ไดกลูโคไซด์

จะถูกแยกออกจากคอลัมน์ก่อน 3-กลูโคไซด์ และอนุพันธ์ของแอนโทไซยานินที่มีน้ำตาลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 5 จะมีความมีขั้วสูงกว่า อนุพันธ์ของแอนโทไซยานินที่มีน้ำตาลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 7 การมีน้ำตาลโมเลกุลคู่เกาะกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 จะทำให้ความมีขั้วน้อยกว่า การมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 โมเลกุลเกาะกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 5 (Hebrero *et al.*, 1989) นอกจากนี้ พบว่า การเกิดกระบวนการเอซิลเลชันของน้ำตาลในโครงสร้างของแอนโทไซยานินเป็นสาเหตุให้ความมีขั้วของแอนโทไซยานินลดลงจึงทำให้ค่า Retention time เพิ่มขึ้น ความมีขั้วของแอนโทไซยานินที่ลดลงจะขึ้นอยู่กับชนิดของหมู่เอซิลที่มาแทนที่ ซึ่งลำดับการแยกอนุพันธ์ของแอนโทไซยานินที่มีหมู่เอซิลอยู่ในโครงสร้างจะมีลำดับการแยก คือ อะซิติก มาโลนิค และซักซินิก ตามลำดับ (Escribano-Bailon *et al.*, 2004) คอลัมน์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกจะมีความยาวของคอลัมน์ตั้งแต่ 10-30 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.9-4.6 มิลลิเมตร อนุภาคภายในคอลัมน์ขนาด 3-10 ไมโครเมตร โดยทั่วไปคอลัมน์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิก คือ reversed phase C18 column (RP-C18) ตัวตรวจวัดที่ใช้ร่วมกับเทคนิคโครมาโตกราฟีมีหลายชนิด ยกตัวอย่าง เช่น ตัวตรวจวัดยูวีวิสิเบิล (UV-Visible detector; UV-VIS), ตัวตรวจวัดไดโอดอาร์เรย์ (Diode array detector; DAD) และ ตัวตรวจวัดแมสสเปกโตรเมทรี (Mass spectrometry detector; MS) เป็นต้น UV-Vis จัดเป็นตัวตรวจวัดชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ร่วมกับเทคนิคโครมาโตกราฟี โดยอาศัยหลักการดูดกลืนแสงของสาร ในช่วงความยาวคลื่น 190-600 นาโนเมตร ตัวตรวจวัดชนิดนี้สามารถตรวจวัดได้ทีละความยาวคลื่น เมื่อแอนโทไซยานินผ่านการแยกจากคอลัมน์ของ LC หรือ HPLC แล้วจะมีแหล่งกำเนิดแสงจากตัวตรวจวัดเป็นตัวให้พลังงานแสงแก่สารตัวอย่าง และตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างออกมาเป็นสัญญาณ โครมาโตแกรม ในขณะที่ DAD เป็นตัวตรวจวัดที่อาศัยหลักการดูดกลืนแสงของสารเช่นเดียวกับ UV-VIS แต่ในขณะที่วิเคราะห์สามารถวัดได้หลายความยาวคลื่น และมีช่วงความยาวคลื่นที่สามารถวัดได้กว้างกว่าเทคนิค UV-VIS คือสามารถวัดได้สูงสุดที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร และวัดค่าการดูดกลืนแสงออกมาเป็นสัญญาณ โครมาโตแกรม ลักษณะสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์แอนโทไซยานินสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการระบุชนิดของแอนโทไซยานิน หมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างวงแหวนของแอนโทไซยานินมีผลต่อค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของแอนโทไซยานินในช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible) กล่าวคือ แอนโทไซยานินที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ในโครงสร้างวงแหวน เช่น ไชยานิดิน และ ฟิโอนิดิน จะมีค่าการดูดกลืนแสงต่ำกว่าแอนโทไซยานินที่มีหมู่ฟังก์ชัน 3 หมู่ ถึง 11 นาโนเมตร ได้แก่ เดลฟิnidin พิทุnidin และมัลวิดิน (Rivas-Gonzalo, 2003) การมีอยู่ของหมู่เมทอกซิลในโครงสร้างแอนโทไซยานินจะกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานินไปทางสีแดง และทำให้แอนโทไซยานินมีความคงตัวมากขึ้น ดังนั้น ในสภาวะการมีอยู่ของ $AlCl_3$ การเกิด Bathochromic (red) shift (เป็นปรากฏการณ์

ที่เกิดจากการที่สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเคลื่อนไปทางความยาวคลื่นยาวที่เพิ่มขึ้น) ของ เคลฟิโนดิน พิพุนิโนดิน และไซยานิโนดิน จะแตกต่างจากมัลลิวิดิน และพิโอนิโนดิน ซึ่งจากความแตกต่างดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการจำแนกความแตกต่างระหว่างชนิดของแอนโทไซยานิน การเกิดกระบวนการไกลโคซิเลชัน จะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของแอนโทไซยานินลดลง 10 นาโนเมตร และโครงสร้างของแอนโทไซยานินที่มีไดไกลโคไซด์จะทำให้มีค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำกว่าโมโนไกลโคไซด์ ดังนั้นใน 3-โมโนไกลโคไซด์จะมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ 440 นาโนเมตร ในขณะที่ 3,5-ไดไกลโคไซด์จะไม่เกิดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว การมีอยู่ของหมู่เอซิดในโครงสร้างของแอนโทไซยานินจะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงยูวีเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเกิดกระบวนการสเตอริฟิเคชัน (Sterification) กับกรดคูมาริก ซึ่งทำให้ค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 308-313 นาโนเมตร และการเกิดพันธะกับกรดคาเฟอิก ทำให้มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ระหว่าง 326-329 นาโนเมตร แต่ในขณะที่การมีอยู่ของกรดจำพวกอะลิฟาติกจะไม่มีเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสง (Escribano-Bailon *et al.*, 2004)

Ryu และคณะ (1998) ศึกษาการจำแนกชนิดของแอนโทไซยานินจากข้าวดำ 10 สายพันธุ์ โดยแยกชนิดแอนโทไซยานินด้วย Cellulose thin layer chromatography และวิเคราะห์ชนิดของแอนโทไซยานินด้วย HPLC โดยใช้คอลัมน์ชนิด ODS-5 และตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร พบว่าในข้าวทั้ง 10 สายพันธุ์ มีแอนโทไซยานินชนิดไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ และ พิโอนิโนดิน-3-กลูโคไซด์ เป็นหลัก ซึ่งปริมาณแอนโทไซยานินที่วิเคราะห์ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 0-493 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ส่วน Hou และคณะ (2013) ศึกษาการจำแนกชนิดของแอนโทไซยานินจากข้าวดำ (*Oryza sativa* L.) วิเคราะห์โดย HPLC ใช้ Electrospray ionization เป็นตัวให้พลังงานแก่โมเลกุลต่อเข้ากับเครื่องแมสสเปกโตรเมตรี พบว่า ในข้าวดำประกอบด้วยแอนโทไซยานิน 4 ชนิด ได้แก่ ไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ (ร้อยละ 91.01) พิโอนิโนดิน-3-กลูโคไซด์ (ร้อยละ 7.13) ไซยานิดิน-3,5-ไดกลูโคไซด์ (ร้อยละ 0.92) และ ไซยานิดิน-3-รูติโนไซด์ (ร้อยละ 0.94)

Pengkumsri และคณะ (2015) จำแนกชนิดของกรดฟีนอลิกที่พบในข้าวดำเชียงใหม่ ข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าวหอมมะลิแดง โดยใช้ HPLC พบว่า ข้าวที่มีสีดำจะมีปริมาณกรดฟีนอลิกสูงที่สุด โดยกรดพาราคูมาริกมีปริมาณสูงที่สุด ตามด้วยกรดคาเฟอิก กรดโปรโตแคทชูลิก และกรดไซรินจิก ส่วน Sompong และคณะ (2011) ศึกษาการจำแนกชนิดและปริมาณของกรดฟีนอลิกจากข้าวสีแดงในไทย ได้แก่ ข้าวบางกอก ข้าวเหนียวลูกผึ้ง ข้าวสังข์หยด และข้าวสีดำ ได้แก่ ข้าวเหนียวดำเปลือกขาว และข้าวเหนียวดำเปลือกดำด้วย HPLC พบว่า ข้าวสีแดงจะพบกรดเฟอร์ูลิกและกรดโปรโตแคทชูลิกสูงที่สุด ในขณะที่ข้าวสีดำจะพบกรดโปรโตแคทชูลิกและกรดควานิลลิกสูงที่สุด ซึ่ง

ความแตกต่างของชนิดและปริมาณของกรดพีนอลิกเป็นผลมาจากสายพันธุ์และสีของเยื่อหุ้มเมล็ดที่แตกต่างกัน

2.4 ปัจจัยที่มีผลความคงตัวของสารประกอบพีนอลิกในระหว่างการแปรรูปและเก็บรักษา

2.4.1 กระบวนการแปรรูป

กระบวนการแปรรูปเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารประกอบพีนอลิก โดยกระบวนการแปรรูปที่แตกต่างกันทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบพีนอลิกที่ต่างกัน Chatthongpisut และคณะ (2015) ศึกษาวิธีการหุงสุกที่แตกต่างกัน ได้แก่ หม้อหุงข้าวไฟฟ้า หม้อความดันสูง และ ไมโครเวฟต่อความคงตัวของกรดพีนอลิก และแอนโทไซยานินในข้าวสีม่วง คือ ข้าวหอมมะลินิลสุรินทร์ พบว่า ในข้าวสีม่วงจะมีแอนโทไซยานินชนิด ไชยานิดิน-3-กลูโคไซด์ และ พิโอนิดิน-3-กลูโคไซด์เป็นหลัก ในขณะที่กรดพีนอลิกอิสระที่พบมากในข้าวชนิด คือ กรดโปรโตแคทชูลิกและกรดวานิลลิก ส่วนพีนอลิกยึดเหนี่ยวที่พบมาก คือ กรดเฟอร์ริก และกรดวานิลลิก ภายหลังจากกระบวนการหุงสุกด้วยไมโครเวฟและหม้อความดันสูงจะทำให้ได้ปริมาณแอนโทไซยานินและกรดพีนอลิกลดลง ($p < 0.05$) ซึ่งส่งผลให้ข้าวสีม่วงที่ผ่านการหุงสุกมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันลดลงด้วย การลดลงของแอนโทไซยานินภายหลังจากหุงสุกด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากแอนโทไซยานินและกรดพีนอลิกเป็นสารที่มีขั้วซึ่งสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟ เกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งสารที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการออกซิเดชันของมัลวิดอิน-3-กลูโคไซด์และมัลวิดอิน-3,5-ไดกลูโคไซด์ในระหว่างการหุงสุกด้วยไมโครเวฟ ในขณะที่การหุงสุกด้วยหม้อความดันสูงทำให้แอนโทไซยานินและกรดพีนอลิกลดลงเนื่องจากการใช้อุณหภูมิและความดันสูงทำให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบพีนอลิก (Zhao *et al.*, 2013)

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอนโทไซยานินสามารถเกิดได้ในช่วงกระบวนการสกัด กระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสามารถเกิดขึ้นได้จากผลของสารประกอบอื่นที่สามารถสร้างพันธะกับโครงสร้างของแอนโทไซยานิน ยกตัวอย่างเช่น กระบวนเอซิติเลชัน เป็นกระบวนการที่กรดทั้งชนิดอะโรมาติกและอะลิฟาติกเกิดการสร้างพันธะกับโครงสร้างของแอนโทไซยานิน กระบวนการไกลโคซิเลชัน เป็นกระบวนการที่น้ำตาลเกิดพันธะกับโครงสร้างของแอนโทไซยานิน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวข้างต้นสามารถเกิดได้ทั้งภายใน โมเลกุล (Intermolecular) และระหว่างโมเลกุลของแอนโทไซยานิน (Intramolecular) (ภาพที่ 10) และส่งผลให้โครงสร้างของแอนโทไซยานินมีความคงตัวเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้แอนโทไซยานินสามารถสร้าง

พันธะกับสารประกอบโพลีฟีนอล เช่น คาเทชิน กรดคาเฟอิก แทนนิน และกรดเฟอรูลิก เป็นต้น (Giusti and Wrolstad, 2003)

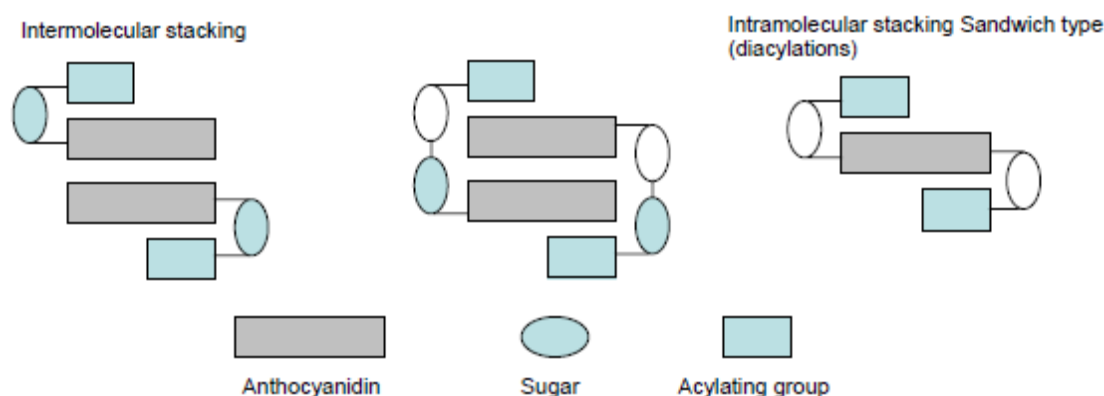


Figure 10 Stabilization mechanism of acylated anthocyanins-proposed spatial intermolecular stacking configuration and stacking of acylated anthocyanin

Source: Giusti and Wrolstad (2003)

โครงสร้างทางเคมีของแอนโทไซยานินเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความคงตัวของแอนโทไซยานิน เมื่อโครงสร้างของแอนโทไซยานินถูกทำลาย ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานิน ความคงตัวและการเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานินจะขึ้นอยู่กับ การเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ของหมู่ต่างๆ ในโครงสร้าง โดยความคงตัวจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนหมู่เมทอกซิลที่เพิ่มขึ้น และความคงตัวของแอนโทไซยานินจะลดลง เมื่อจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น (Escribano-Bailon *et al.*, 2004) การเพิ่มจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิล ในวงแหวนของแอนโทไซยานินนำไปสู่การดูดกลืนแสงสูงขึ้น ทำให้ความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดการเปลี่ยนสีจากสีส้มไปเป็นสีน้ำเงินแดง เช่น 3-ดีออกซีแอนโทไซยานิน (3-Deoxy anthocyanin) เนื่องจากเกิดการดีไฮดรอกซิเลชัน ของคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 (หมู่ไฮดรอกซิลลดลง) ทำให้แอนโทไซยานินมีความคงตัวมากกว่า 3-ไฮดรอกซีแอนโทไซยานิน (3-Hydroxy anthocyanin) ซึ่งมีสีแดงและมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่มากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างของแอนโทไซยานินที่ประกอบด้วยหมู่อะโรมาติกเอซิล (Aromatic acyl group) มีความคงตัวมากกว่าโครงสร้างที่ไม่มีหมู่อะโรมาติกเอซิล เนื่องจากความเร็วในการเปลี่ยนสีจากการไฮเดรชัน (Hydration) ของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ในโครงสร้างของแอนโทไซยานิน (Sikorski, 2007) Massaretto และคณะ (2011) ศึกษาผลของการหุงสุกข้าวที่มีสีแดงและไม่มีสีต่อความคงตัวของสารประกอบฟีนอลิก พบว่าข้าวมีสีที่ผ่านการหุงสุกจะทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดลงร้อยละ 50 โดยข้าวมีสีจะมีความคงตัวของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าข้าวที่ไม่มีสี 2

เท่า เมื่อพิจารณาปริมาณฟีนอลิกอิสระ พบว่า เมื่อผ่านกระบวนการหุงสุกทำให้ฟีนอลิกอิสระลดลง ร้อยละ 83 ซึ่งต่างจากฟีนอลิกยึดเหนี่ยวเมื่อผ่านการหุงสุกจะทำให้ฟีนอลิกยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น ร้อยละ 94 ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากเมื่อผ่านการแปรรูปทางความร้อนเป็นผลให้ปริมาณฟีนอลิกยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น เช่น โปรีไซยานิดินเกิดการสลายพันธะเป็นผลให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลง และเกิดการจับกับโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ เป็นผลให้การละลายของฟีนอลิกลดลง ฟีนอลิกยึดเหนี่ยวภายหลังการหุงสุกจึงมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น

2.4.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิในกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษาเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อความคงตัวของสารประกอบฟีนอลิก กระบวนการแปรรูปโดยใช้ความร้อน (Thermal processing) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการแปรรูปอาหาร เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ซึ่งกระบวนการแปรรูปทางความร้อนสามารถแบ่งได้หลายกระบวนการขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการแปรรูป ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการพาสเจอร์ไรเซชัน ใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 63-100 องศาเซลเซียส กระบวนการสเตอริไรซ์ ใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 100-130 องศาเซลเซียส และกระบวนการ UHT (Ultra-high-temperature) อุณหภูมิสูงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความคงตัวของกรดฟีนอลิกและแอนโทไซยานินลดลง ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับระดับความร้อน (ภาพที่ 11) (Patras *et al.*, 2010) กลไกการสลายตัวของแอนโทไซยานินเป็นผลมาจากความร้อนทำให้พันธะโควาเลนต์ในโครงสร้างของแอนโทไซยานินถูกทำลาย ทำให้เกิดการออกซิเดชันภายในโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น อัตราการสลายตัวจากความร้อน (Thermal degradation) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น เช่น ไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ และ ไซยานิดิน-3-รูติไซด์ ในสารสกัดจากบลูเบอร์รี่ (*Vaccinium corymbosum* L.) จะสลายตัวที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (Oancea *et al.*, 2012) กระบวนการแปรรูปที่ใช้อุณหภูมิสูงในระดับพาสเจอร์ไรซ์ (93 องศาเซลเซียส นาน 3 นาที) ส่งผลให้ปริมาณแอนโทไซยานินลดลงถึงร้อยละ 43 (Brownmiller *et al.*, 2008) ส่วน Laleh และคณะ (2006) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความคงตัวของแอนโทไซยานินในบาร์เบอร์รี่ 4 สายพันธุ์ (*Berberis khorasanica*, *Berberis integerrima*, *Berberis orthobotrys* และ *Berberis vulgaris*) ในระหว่างการเก็บรักษา โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา 4 ระดับ คือ 5, 15, 25 และ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 84 วัน พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาสูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณแอนโทไซยานินลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการไฮโดรไลซ์โครงสร้างของ 3-กลูโคไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อโครงสร้างของวงแหวนไพริเดียมถูกทำลายจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาลมากขึ้น

Hou และคณะ (2013) จำแนกชนิดของแอนโทไซยานินจากข้าวดำและการลดลงของแอนโทไซยานิน ที่อุณหภูมิ 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที พบว่าอนุพันธ์แอนโทไซยานิน 4 ชนิด ที่แยกได้จากข้าวดำโดยวิธี HPLC-DAD-MS ซึ่งประกอบด้วย ไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ (ร้อยละ 91.01) พิโอนิดิน-3-กลูโคไซด์ (ร้อยละ 7.13) ไซยานิดิน-3,5-ไดกลูโคไซด์ (ร้อยละ 0.92) และ ไซยานิดิน-3-ริวทิโนไซด์ (ร้อยละ 0.94) ($p < 0.05$) อนุพันธ์ของแอนโทไซยานินทั้ง 4 ชนิดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

Sui และคณะ (2016) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสี ความคงตัว และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของสารละลายแอนโทไซยานินที่สกัดได้จากข้าวที่มีสีดำ ซึ่งผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 90, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส และนำมาเก็บรักษาในที่มืด อุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 4, 25, 45 และ 65 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูง (120 และ 140 องศาเซลเซียส) มีผลให้ปริมาณแอนโทไซยานินลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อุณหภูมิที่ 90 และ 100 องศาเซลเซียส จะมีการสลายตัวของแอนโทไซยานินน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง สีของแอนโทไซยานินจะเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการเก็บรักษา และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะทำให้แอนโทไซยานินมีความคงตัวมากที่สุด ($p < 0.05$) ส่วนการเก็บรักษาที่ 45 และ 65 องศาเซลเซียส จะทำให้กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของแอนโทไซยานินจะลดลง ($p < 0.05$) ส่วน Zhou และคณะ (2004) ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาข้าวที่ 4 และ 37 องศาเซลเซียส นาน 6 เดือน ต่อความคงตัวของกรดฟีนอลิก พบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ทำให้กรดฟีนอลิกลดลงมากกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ($p < 0.05$) ปริมาณกรดฟีนอลิกชนิดนี้ยวจะลดลงมากเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเก็บที่อุณหภูมิสูงจะเร่งให้เกิดการออกซิเดชันของเฟอร์เรทอเทอร์ที่จับกับเฮมิเซลลูโลส รวมไปถึงทำให้เกิดการสลายตัวของฟีนอลิกชนิดนี้ยวจากผลของเอนไซม์ เป็นผลให้กรดฟีนอลิกอิสระจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น

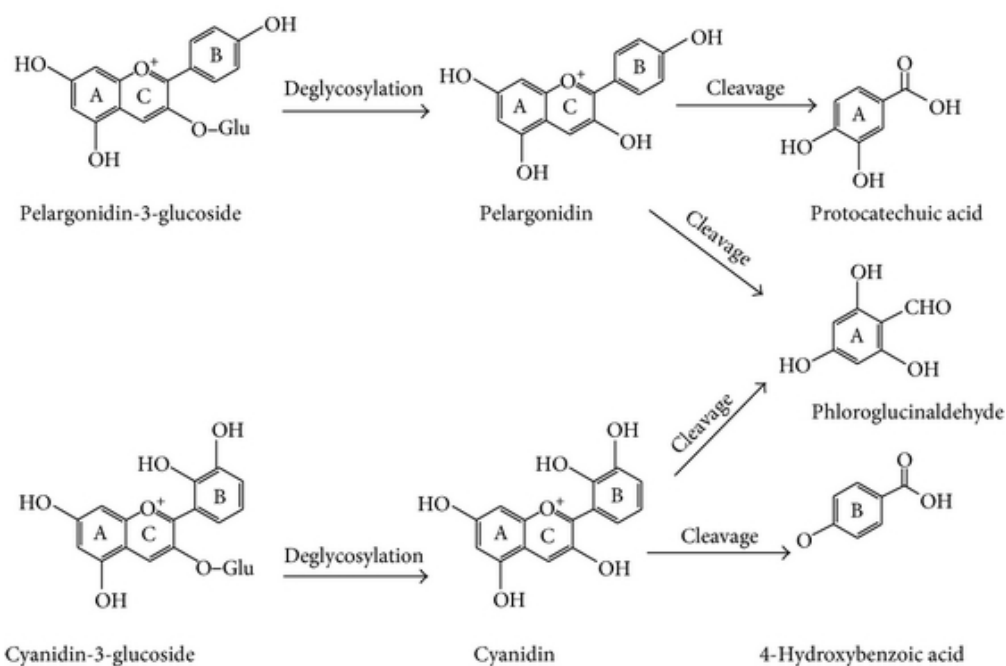


Figure 11 Thermal degradation of anthocyanin

Source: Patras *et al.* (2010)

2.4.3 แสง

การเสื่อมสลายของแอนโทไซยานิน โดยเฉพาะแอนโทไซยานินที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง C-5 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเนื่องจากแสงได้มากกว่าแอนโทไซยานินที่ไม่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง C-5 ทั้งนี้เมื่อแอนโทไซยานินสัมผัสกับแสงจะทำให้ไอออนเข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง C-5 ภายในโมเลกุล ทำให้โครงสร้างของแอนโทไซยานินเกิดการเปลี่ยนแปลง และแสงยังเป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสลายจากความร้อน (ยูพาพร ผลาขจรศักดิ์, 2547) Morais และคณะ (2002) ศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อความคงตัวของแอนโทไซยานินที่สกัดได้จากผลองุ่น (*Vitis vinifera*) โดยเก็บในสภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสงเป็นเวลา 14 วัน ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 24, 32 และ 40 องศาเซลเซียส พบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณแอนโทไซยานินลดลงมากกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเปรียบเทียบสภาวะการเก็บรักษาที่มีและไม่มีแสง พบว่า การเก็บรักษาในสภาวะที่มีแสงส่งผลให้ปริมาณแอนโทไซยานินลดลงมากกว่าสภาวะการเก็บรักษาที่ไม่มีแสง และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงร่วมกับสภาวะที่มีแสงส่งผลให้ปริมาณแอนโทไซยานินลดลงสูงที่สุด โดยเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ร่วมกับสภาวะที่มีแสงส่งผลให้ปริมาณแอนโทไซยานินลดลงมากที่สุด ($p < 0.05$)

2.4.4 ความเป็นกรด-ด่าง

แอนโทไซยานินจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปตามการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (ภาพที่ 12) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 1 ฟลาวิลเลียมแคทไอออน จะเป็นโครงสร้างที่โดดเด่นของแอนโทไซยานินที่จะให้สีม่วงและสีแดง (ภาพที่ 12A) ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 2-4 โครงสร้างของแอนโทไซยานินจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของควินอยด์ล (Quinoidal) ซึ่งจะมีสีฟ้า (ภาพที่ 12B-D) และที่ค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 5-6 แอนโทไซยานิน จะไม่มีสี ซึ่งเป็นโครงสร้างของแอนโทไซยานินที่อยู่ในรูป คาร์บินนอลซูโดเบส (Carbinol pseudobase) (ภาพที่ 12E) และ ชาลโคน (Chalcone) (ภาพที่ 12F) ตามลำดับ และแอนโทไซยานิน จะเกิดการสลายตัวที่ค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 7 ซึ่งการสลายตัวจะขึ้นอยู่กับหมู่ต่างๆ ที่เข้ามาแทนที่ในโครงสร้างของแอนโทไซยานิน (Castaneda-Ovando *et al.*, 2009)

Sui และคณะ (2014) ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อความคงตัวของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ และ ไซยานิดิน-3-รูตินโนไซด์ ที่สกัดได้จากข้าวดำ โดยกำหนดค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 2.2-6 พบว่า ความคงตัวของแอนโทไซยานินจะลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 และ 6 จะเร่งให้แอนโทไซยานินเกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ในขณะที่ไซยานิดิน-3-รูตินโนไซด์จะมีความคงตัวมากกว่า ไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ ส่วน Durge และคณะ (2013) ศึกษาความคงตัวของแอนโทไซยานินในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากข้าวที่ผลิตโดยใช้เครื่องเอกซ์ทราซัน โดยการเติมกรดซิตริกและโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 และ 2 ลงในแป้งข้าว กำหนดความชื้นของแป้งข้าว เท่ากับร้อยละ 16 อุณหภูมิอบแห้ง เท่ากับ 160 องศาเซลเซียส ความเร็วของสกรูเท่ากับ 170 รอบต่อนาที และมีอัตราการป้อนแป้งข้าวเข้าเครื่องเอกซ์ทราซัน เท่ากับ 70 กรัมต่อนาที พบว่าการเติมกรดซิตริก และโซเดียมไบคาร์บอเนต ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 สามารถรักษาแอนโทไซยานินไว้ได้ร้อยละ 59.97 และ 24.75 ตามลำดับ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้น โครงสร้างของแอนโทไซยานินจะอยู่ในรูปฟลาวิลเลียมแคทไอออนซึ่งจะให้สีแดง ดังนั้นสารละลายที่เป็นกรดจะทำให้แอนโทไซยานินจะมีความคงตัวในสารละลายกรดมากกว่าสารละลายด่าง

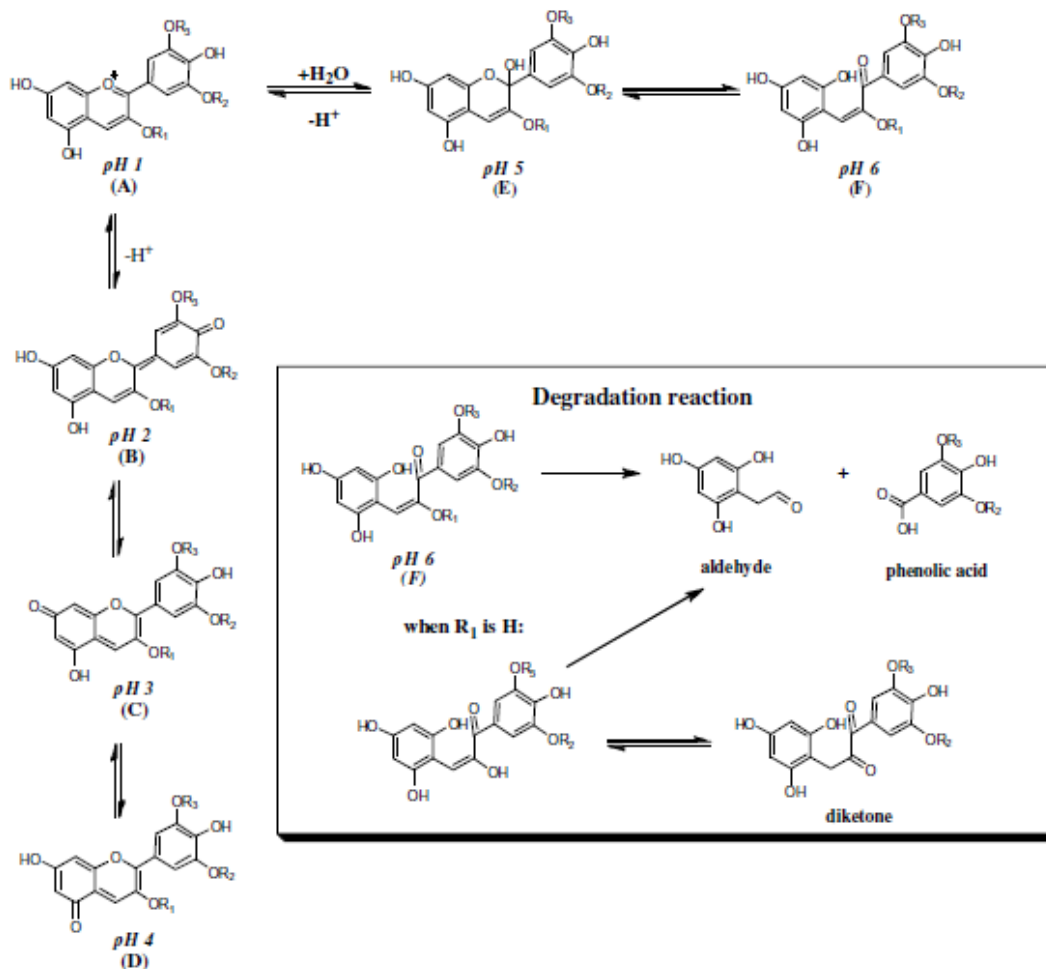


Figure 12 Anthocyanin chemical forms depending on pH and degradation reaction for anthocyanin

Source: Castaneda-Ovando *et al.* (2009)

Note: R₁ = H or Saccharide, R₂ and R₃ = H or Methyl

3. วิธีการผลิตข้าวหุงสุกพร้อมบริโภค

การบริโภคข้าวโดยทั่วไปจะบริโภคกันในรูปของข้าวสุก ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการหุงสุกข้าวมีด้วยกันหลายวิธี กระบวนการหุงสุกเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชภายในเมล็ดข้าวเนื่องจากความร้อนและการมีอยู่ของน้ำ (Juliano, 1985) จะทำให้กระบวนการเกิดเจลาตินในเซชัน โดยทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิระหว่าง 55 ถึง 80 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับข้าวแต่ละสายพันธุ์ โดยทั่วไปข้าวสุกจะมีร้อยละการเกิดเจลาตินในเซชัน (Degree of gelatinization) ตั้งแต่ร้อยละ 90 ถึง 100 (Daomukda *et al.*, 2011) ข้าวที่บริโภคโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของข้าวกล้องและข้าวที่ผ่านการขัดสี หรืออาจมีข้าวบางสายพันธุ์ที่จัดเป็นข้าวมีสี ได้แก่ สีดำ สีแดง หรือสีน้ำตาล

ขึ้นอยู่กับสีของเชื้อหุ้มเมล็ด ซึ่งมีแอนโทไซยานินเป็นองค์ประกอบหลัก (Chaudhary, 2003) ดังนั้นกระบวนการหุงสุกจึงอาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียสารอาหารที่สำคัญในข้าว เนื่องจากสารอาหารที่มีอยู่ในข้าวที่สำคัญ โดยเฉพาะในข้าวมีสีจะมีองค์ประกอบของสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ จะเกิดการสลายตัวได้เนื่องจากความร้อนในระหว่างการแปรรูป (Tang *et al.*, 2016) จากการศึกษาของ Ti และคณะ (2015) เกี่ยวกับผลของกระบวนการหุงสุกข้าวกล้องและข้าวขัดขาว ต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และ กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ โดยใช้การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า พบว่า ข้าวกล้องและข้าวขัดขาวที่ผ่านการหุงสุกจะมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกลดลงร้อยละ 47.9 และ 71.0 ตามลำดับ สารประกอบฟลาโวนอยด์ทั้งหมดลดลงร้อยละ 72.8 และ 82.5 ตามลำดับ กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระลดลงร้อยละ 31.8 และ 72.9 ตามลำดับ ($p < 0.05$) วิธีการที่ใช้ในการเตรียมข้าวหุงสุกมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และ ไมโครเวฟ เป็นต้น

3.1 การผลิตข้าวหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าเพื่อเพิ่มความดันสูง

ในปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสนใจในผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปพร้อมบริโภค โดยเฉพาะข้าวสำเร็จรูปพร้อมบริโภค ซึ่งเป็นข้าวที่ผ่านกระบวนการหุงสุกแล้วบรรจุในภาชนะปิดสนิท โดยผ่านการฆ่าเชื้อที่ความร้อนสูง ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น กระบวนการแปรรูปอาหารด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าเพื่อเพิ่มความดันสูง เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร โดยใช้หลักการให้ความร้อนสูงร่วมกับความดัน เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเกิดการเน่าเสีย รวมทั้งเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคที่สำคัญในอาหารที่บรรจุในภาชนะปิดสนิท คือ *Clostridium botulinum* กระบวนการแปรรูปโดยใช้ความร้อนในอาหารที่มีกรดต่ำ เช่น ข้าว จะใช้อุณหภูมิเพื่อการฆ่าเชื้อระหว่าง 112-125 องศาเซลเซียส โดยฆ่าเชื้อตามระยะเวลาที่สามารถกำจัดจุลินทรีย์ทั้งหมดในอาหาร เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและสามารถเก็บรักษาได้ที่อุณหภูมิห้อง (Prakash *et al.*, 2005)

รีทอร์ทแพคเกจ เป็นภาชนะที่ใช้บรรจุอาหารสำหรับการฆ่าเชื้อด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าเพื่อเพิ่มความดันสูง วัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบจะเป็นพลาสติกที่มีความเหนียว และแข็งแรง ช่วยให้บรรจุภัณฑ์ที่มีความยืดหยุ่น และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปรีทอร์ทแพคเกจ จะประกอบไปด้วยวัสดุหลายชนิดมาเคลือบซ้อนทับกัน เช่น Polypropylene (PP), Aluminum foils และ Polyethylene terephthalate (PET) แต่การใช้ Aluminum foil จะไม่เหมาะสมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ Byun และคณะ (2010) ศึกษาผลของสารเคลือบถุงรีทอร์ทแพคเกจต่อคุณภาพข้าวหุงสุก โดยการนำข้าวขัดขาวมาผสมกับน้ำอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:2 ต้มในน้ำเดือดนาน 15 นาที และ

แช่ในน้ำเย็น 5 นาที บรรจุในถุงรีโอร์ตแพวซ์ที่เคลือบด้วยสารที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ สารอินทรีย์ที่เคลือบบน Polyethylene terephthalate (PET)/nylon/cast polypropylene (CPP) และ สารเคลือบอนินทรีย์ Aluminum oxide/PET/ BON/CPP จากนั้นเข้าสู่กระบวนการหุงสุกด้วยหม้อมาเชื้อความดันสูง ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 28 นาที จากนั้นเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 สัปดาห์ พบว่า ข้าวที่บรรจุในถุงทนความร้อนสูงที่เคลือบด้วยสารอินทรีย์จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและค่าสีต่ำกว่าข้าวบรรจุในถุงทนความร้อนสูงที่เคลือบด้วยสารอนินทรีย์ ($p < 0.05$) เนื่องจากสารอินทรีย์ที่เคลือบถุงทนร้อนสูงจะช่วยลดการหดตัวของถุงพลาสติกและสามารถลดการระเหยน้ำออกจากตัวอย่างในระหว่างการเก็บรักษาได้ดีกว่า

Yu และคณะ (2015) ศึกษาผลของการใช้ความดันสูงในการเตรียมข้าวกล้องหุงสุกต่อคุณภาพข้าวกล้องหุงสุก พบว่า การใช้ความดันสูงในการหุงสุกจะช่วยลดระยะเวลาในการหุงลงได้รวมทั้งส่งผลให้ข้าวกล้องหุงสุกมีความแข็งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณเยื่อหุ้มเมล็ดและชั้นแอลิวโรนของข้าวกล้องถูกทำลายเนื่องจากความดันสูงส่งผลให้น้ำสามารถเข้าสู่ภายในเมล็ดได้ง่ายมากขึ้นจึงทำให้ระยะเวลาในการหุงสุกลดลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้ความดันสูงช่วยในการหุงสุกสามารถปรับปรุงคุณภาพของข้าวหุงสุกได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tian และคณะ (2014) ในการใช้ความดันสูงในการเตรียมข้าวเจ้าและข้าวเหนียวหุงสุก พบว่า การใช้ความดันสูงช่วยให้เมล็ดข้าวทั้งสองชนิดมีอัตราการดูดซับน้ำเข้าสู่เมล็ดเพิ่มมากขึ้นและทำให้ข้าวมีความยืดหยุ่นและการยึดเกาะของเมล็ดข้าวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ข้าวหุงสุกมีความแข็งลดลง ในขณะที่ Leelayuthsoontorn และ Thipayarat (2006) ศึกษาผลของอุณหภูมิ (80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส) และความดัน (0, 0.1, 0.3 และ 0.5 เมกะพาสกาล) ในการหุงสุกข้าวหอมมะลิต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและโครงสร้างทางจุลภาคของข้าวหุงสุก พบว่า การใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ได้ข้าวหุงสุกที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่มและเหนียว จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวสุกลักษณะเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และลักษณะของเอนโดสเปิร์มภายในเมล็ดคล้ายฟองน้ำมากขึ้น (Sponge-like texture) จึงทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกนุ่มมากขึ้น ในขณะที่ระดับความดันที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ไม่ส่งผลต่อคุณภาพของข้าวหุงสุก

โดยทั่วไปการแช่ข้าวก่อนการหุงเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการเตรียมข้าวก่อนการหุงสุก โดยเฉพาะในข้าวกล้อง การแช่ข้าวจะช่วยให้เยื่อหุ้มเมล็ดมีความนุ่ม สภาพการแช่ข้าว เช่น อุณหภูมิ ความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพข้าวหุงสุก เช่น เนื้อสัมผัส และสมบัติทางความร้อน เป็นต้น (Han and Lim, 2009) และในกระบวนการผลิตข้าวสำเร็จรูปใน ภาชนะบรรจุปิดสนิทจะมีขั้นตอนการทำให้ข้าวสุกบางส่วน (Partial gelatinization) โดยมี วัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความชื้นให้กับเมล็ดข้าวให้เพียงพอต่อการเกิดเจลลาตินในเซชัน โดยปกติที่ อุณหภูมิห้องเมล็ดข้าวจะดูดซึมน้ำจนอิ่มตัว ซึ่งเมล็ดข้าวจะมีความชื้นร้อยละ 30 ถึง 35 (Matz, 1970) การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำในการแช่ข้าวจะทำให้เมล็ดข้าวสามารถดูดน้ำได้เพิ่มขึ้น ทำให้ใช้ ระยะเวลาในการหุงสุกลดลง และข้าวที่ผ่านการหุงสุกจะมีการสุกของเมล็ดที่สม่ำเสมอ Han และ Lim (2009) ศึกษาผลของสภาพการแช่ข้าวกล้องก่อนการหุงสุกต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและสมบัติ ทางความร้อน กำหนดอุณหภูมิในการแช่ที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 25 และ 50 องศาเซลเซียส เพื่อให้เมล็ดข้าวมีความชื้น 2 ระดับ คือ ร้อยละ 20 และ 30 พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการแช่สูงขึ้นจะ ส่งผลให้ความชื้นในเมล็ดข้าวถึงความชื้นที่ต้องการได้รวดเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ โดย อุณหภูมิการ แช่ที่ 25 องศาเซลเซียส ใช้เวลาถึง 2 และ 24 ชั่วโมง จึงทำให้เมล็ดข้าวมีความชื้นร้อยละ 20 และ 30 ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิการแช่ที่ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเพียง 1 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความชื้นของเมล็ดข้าว พบว่าข้าวที่มีความชื้นสูงจะทำให้เมล็ดข้าวมีความแข็งของเมล็ด น้อยลงและมีค่าการเกาะติดของเมล็ดมากกว่า เช่นเดียวกับอุณหภูมิการแช่ที่สูงขึ้นจะทำให้เมล็ดมี ความแข็งน้อยลงและมีค่าการเกาะติดของเมล็ดเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติทางความร้อนของเมล็ด ข้าว พบว่า เมื่อความชื้นของเมล็ดข้าวสูงขึ้นทำให้อุณหภูมิเริ่มต้น (Onset Temperature; T_o) อุณหภูมิ สุดท้ายในการเกิดเจลลาตินในเซชัน (Conclusion Temperature; T_c) และพลังงานในการเกิดเจลลาตินในเซชัน (Enthalpy; ΔH) ของข้าวลดลง Cui และคณะ (2010) ศึกษาการพัฒนาวิธีการผลิตข้าวกล้องหุงสุกเร็ว (Quick cooking brown rice) โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 25, 40 และ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำมาหุงสุกด้วยการแช่ในน้ำเดือด โดยคุณภาพของ ข้าวกล้องหุงสุก พบว่า การใช้คลื่นอัลตราโซนิคในการเตรียมข้าวกล้องก่อนการหุงสุกจะช่วยลด ระยะเวลาที่ใช้ในการหุงสุก ซึ่งการใช้คลื่นอัลตราโซนิคที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาในการหุงสุกน้อยลง โดยการที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 55 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการหุงสุก เท่ากับ 37, 35 และ 33 นาที ตามลำดับ เนื่องจากเมล็ดข้าวกล้องมีอัตราการดูดซับน้ำเข้าสู่เมล็ดข้าว กล้องเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เมล็ดข้าวกล้องมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการหุงสุก และส่งผลให้ อุณหภูมิในการเกิดเจลลาตินในเซชันของข้าวกล้องลดลง ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการหุงสุกข้าวจึง ลดลงตามไปด้วย

ข้าวกล้องมีสีเป็นขาวที่มีลักษณะสำคัญ คือ การมีอยู่ของรงควัตถุแอนโทไซยานิน และสารประกอบฟีนอลิกอยู่ในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื่อความดันสูงซึ่งมีการใช้ความร้อนสูงร่วมกับความดัน มีผลให้แอนโทไซยานินและสารประกอบฟีนอลิกเกิดการสลายตัวได้ในระหว่างกระบวนการหุงสุก จากการศึกษาของ Hiemori และคณะ(2009) พบว่าการใช้ความดันในการหุงสุกข้าวดำเป็นผลให้เกิดการสูญเสียแอนโทไซยานินถึงร้อยละ 80 ส่วน Konwatchara และ Ahromrit (2014) ศึกษาผลของการใช้หม้อความดันในการหุงสุกข้าวเหนียวต่างออกต่อสมบัติเชิงหน้าที่และความคงตัวของแอนโทไซยานิน พบว่า การใช้หม้อความดันในการหุงสุกทำให้เมล็ดข้าวมีความเหนียวมากขึ้น เนื่องจากความดันทำให้เมล็ดข้าวเกิดเจลาติไนเซชันได้เพิ่มขึ้น เป็นผลจากสตาร์ชแกรนูลในเมล็ดข้าวจะเกิดการดูดซึมน้ำเข้าสู่เมล็ด และเกิดการพองตัว การขยายตัวของสตาร์ชแกรนูลจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งแตกออก ทำให้อะไมโลสที่อยู่ภายในสตาร์ชแกรนูลออกมาภายนอก ทำให้ความแข็งของเมล็ดข้าวลดลง และความเหนียวเพิ่มขึ้น ในขณะที่การหุงด้วยหม้อความดันจะทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินลดลง เนื่องจากแอนโทไซยานินจะเกิดการสลายตัวได้เนื่องจากความร้อน (Tester and Morrison, 1990)

3.2 การผลิตข้าวหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

วิธีการเตรียมข้าวหุงสุกที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อคุณภาพของข้าวหุงสุก เช่น ลักษณะเนื้อสัมผัส ความคงตัวของแอนโทไซยานิน การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าเป็นวิธีการที่นิยมใช้โดยทั่วไปในครัวเรือน ซึ่งจะเป็นวิธีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการให้ความร้อนในการทำให้ข้าวสุก (Juliano, 1985) Rewthong และคณะ (2011) ศึกษาผลของวิธีการหุงสุกต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหอมมะลิถึงสำเร็จรูป โดยใช้วิธีการหุงสุกโดยใช้หม้อหุงข้าวไฟฟ้า และการต้ม พบว่า การใช้หม้อหุงข้าวไฟฟ้าจะทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกมีความแข็งและความเหนียวน้อยกว่า ซึ่งเมื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวจะพบลักษณะรูพรุนบนพื้นผิวของเมล็ดข้าวที่ผ่านการทำให้สุกด้วยการต้ม และการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคเพียงเล็กน้อย ส่วน Kim และคณะ (2015) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟีนอลิกในข้าวผสมถั่วเหลืองที่ผ่านการหุงสุกที่แตกต่างกัน 2 วิธี คือ การใช้หม้อหุงข้าวไฟฟ้า และ การใช้หม้อหุงข้าวที่ใช้ความดัน โดยใช้ตัวอย่างถั่วเหลืองพันธุ์ Chung-ja จำนวน 40 กรัม ผสมกับข้าวสายพันธุ์ Choochung จำนวน 300 กรัม แช่น้ำเปล่า 400 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 14.7 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวที่ใช้ความดัน ที่อุณหภูมิ 120-130 องศาเซลเซียส ความดัน 25-30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่า วิธีหุงข้าวที่แตกต่างกันจะมีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก

($p < 0.05$) ตัวอย่างข้าวที่ผ่านการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและหม้อหุงข้าวที่ใช้ความดันจะทำให้สารประกอบฟีนอลิกลดลงร้อยละ 12 และ 8 ตามลำดับ ($p < 0.05$) ขณะที่ Hiemori และคณะ (2009) ศึกษาผลของกระบวนการหุงสุกข้าวดำต่อความคงตัวของแอนโทไซยานิน โดยศึกษาถึงวิธีการหุงสุกที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวที่ใช้ความดัน และการหุงสุกด้วยเตาแก๊ซ จากผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างข้าวดำประกอบด้วยแอนโทไซยานินชนิด ไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ (572.47 ไมโครกรัมต่อกรัม) และ พีโอนิดิน-3-กลูโคไซด์ (29.78 ไมโครกรัมต่อกรัม) เป็นส่วนใหญ่ วิธีการหุงสุกมีผลต่อความคงตัวของแอนโทไซยานิน ($p < 0.001$) การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวที่ใช้ความดันจะทำให้แอนโทไซยานินลดลงสูงที่สุด (ร้อยละ 79.8) ตามด้วยการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (ร้อยละ 74.2) และการหุงด้วยเตาแก๊ซ (65.4) ระดับการลดลงของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ จะสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของกรดโปรโตแคทชอลิก จากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า ไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ในข้าวสีดำส่วนใหญ่สลายตัวเป็นกรดโปรโตแคทชอลิก

Tang และคณะ (2016) ศึกษาผลของกระบวนการเตรียมข้าวสุกต่อความคงตัวของสารประกอบฟีนอลิก และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระในข้าวมีสีดำ ตัวอย่างข้าวที่มีสีดำที่ใช้ในการทดลองนี้มี 2 ชนิด ได้แก่ ข้าวเหนียวและข้าวเจ้า แช่น้ำเป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้การเตรียมข้าว 2 วิธี คือ การหุงข้าวสุกด้วยเตาให้ความร้อนไฟฟ้า ตัวอย่าง 40 กรัม เติมน้ำ 240 มิลลิลิตรเป็นเวลา 20, 25, 30 และ 35 นาที และการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าที่ใช้ในครัวเรือน โดยใช้ตัวอย่าง 40 กรัม เติมน้ำ 120 มิลลิลิตร หุงสุกเป็นเวลา 25 นาที พบว่า ในตัวอย่างข้าวทั้ง 2 ชนิด เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนเพื่อการหุงสุกที่เพิ่มขึ้น (20, 25, 30 และ 35 นาที) จะส่งผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ปริมาณแอนโทไซยานิน และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระลดลง ($p < 0.05$) ในขณะที่วิธีการเตรียมข้าวสุกเพื่อบริโภคที่แตกต่างกันทั้ง 2 วิธีจะมีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก แอนโทไซยานิน และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่แตกต่างกัน ($p < 0.05$) การใช้หม้อหุงข้าวไฟฟ้า จะทำให้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก แอนโทไซยานิน และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระน้อยกว่าการเตรียมข้าวสุกด้วยเตาให้ความร้อนไฟฟ้า ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจาก หม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีการใช้ความร้อนร่วมกับความดันจะมีผลให้สารประกอบโพลีฟีนอลเกิดการสลายตัวทำให้ปริมาณฟีนอลิกที่ได้ลดลง และเนื่องจากแอนโทไซยานินเกิดการสลายตัวได้ง่ายในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน ดังนั้น การใช้ความร้อนร่วมกับความดันจะส่งผลให้แอนโทไซยานินเกิดการสลายตัวได้มากขึ้น ซึ่งการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิกและแอนโทไซยานินจะส่งผลให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในข้าวที่ผ่านการหุงสุกลดลงตามไปด้วย (Xu and Chang, 2009)

Zaupka และคณะ (2015) ศึกษาผลของวิธีการหุงสุกข้าวต่อกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลในข้าวมีสีสายพันธุ์ที่ต่างกัน 3 สายพันธุ์ โดยนำข้าวมาหุงสุกด้วยวิธีที่ต่างกัน 2 วิธี คือ การแช่ในน้ำเดือด และการผลิตแบบบรีชอตโต้ โดยการแช่ในน้ำเดือดจะใช้ตัวอย่างข้าวกล้อง 110-120 กรัม กำหนดอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 3.6 เป็นเวลา 40 นาที ส่วนการผลิตแบบบรีชอตโต้ จะกำหนดอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ เท่ากับ 1 ต่อ 20 จากนั้นทำการกวนทุก 10 นาที เป็นเวลา 40 นาที จากการทดลองพบว่าข้าวที่ผ่านกระบวนการหุงสุกทั้ง 2 วิธี มีผลทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินลดลง ($p < 0.05$) การแช่ในน้ำเดือดจะทำให้แอนโทไซยานินลดลงร้อยละ 64 ในขณะที่การผลิตแบบบรีชอตโต้จะทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินลดลงร้อยละ 30 เมื่อพิจารณาความคงตัวของชนิดของแอนโทไซยานินภายหลังการหุงสุก พบว่า การหุงสุกแบบบรีชอตโต้จะส่งผลต่อความคงตัวของ พีโอนิดิน-3-กลูโคไซด์ และ พีโอนิดิน-3-รูติโนไซด์ มากกว่า ไชยานิดิน-3-กลูโคไซด์ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจาก การมีอยู่ขององค์ประกอบอื่นๆ ที่อาจส่งผลต่อความคงตัวของแอนโทไซยานิน เช่น สารประกอบฟีนอลิกบางชนิดทำหน้าที่เป็นรงควัตถุร่วม (Co-pigment) ทำให้แอนโทไซยานินมีความคงตัวมากขึ้น ในขณะที่การมีอยู่ของน้ำตาลจะส่งผลให้การสลายตัวของแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น (Hou *et al.*, 2013)

3.3 การใช้ไมโครเวฟในข้าวพร้อมบริโภค

การผลิตข้าวหุงสุกด้วยไมโครเวฟ เป็นการใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงทำให้น้ำในอาหารเกิดการสั่นสะเทือนและชนโมเลกุลอื่นๆ ต่อไป จนเกิดเป็นพลังงานจลน์และแปรเปลี่ยนเป็นความร้อนทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว (วิลโลว์ รังสาทอง, 2543) ปัจจุบันคลื่นไมโครเวฟเป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญที่ถูกนำมาใช้ในการแปรรูปอาหารมากขึ้น เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีอัตราการให้ความร้อนสูง และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม (Zhao *et al.*, 2007) การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในกระบวนการผลิตข้าวหุงสุกโดย สวนีย์ หอรั้งสิวัฒน์ และ นันทวัน เทอดไทย (2558) ศึกษาผลของวิธีการหุงสุกต่อคุณภาพของข้าวหอมมะลิหุงสุก พบว่า ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการหุงด้วยไมโครเวฟจะมีความแข็งและความเหนียวมากกว่าข้าวหุงสุกที่ผ่านการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และหม้อความดัน ($p < 0.05$) ส่วน Chatthongpisut และคณะ (2015) ศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวสีม่วงที่แตกต่างกัน 3 วิธีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโทไซยานิน สารประกอบฟีนอลิก และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ การหุงสุกด้วยไมโครเวฟใช้ตัวอย่างจำนวน 50 กรัม เติมน้ำ 150 มิลลิลิตร กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ นาน 13 นาที เติมน้ำและให้ความร้อนซ้ำเช่นเดิมจำนวน 2 ครั้ง การหุงด้วยหม้อฆ่าเชื้อ (Autoclave) นำตัวอย่างบรรจุลงในขวดแก้วฝาเกลียวหุงสุก ฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที และการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

เป็นเวลา 50 นาที พบว่า วิธีในการหุงข้าวที่แตกต่างกันมีผลต่อชนิดและปริมาณแอนโทไซยานินและปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ($p < 0.05$) โดยการหุงข้าวด้วยไมโครเวฟและหม้อฆ่าเชื้อมีผลทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินและสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดลดลงสูงที่สุด โดยปริมาณไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ และ เพลานิดิน-3-กลูโคไซด์ลดลงประมาณร้อยละ 93 และ 88 ตามลำดับ ($p < 0.05$) ในขณะที่การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าทำให้ปริมาณไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ และ เพลานิดิน-3-กลูโคไซด์ลดลงร้อยละ 74.2 และ 41.7 ตามลำดับ ($p < 0.05$) ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของข้าวที่ผ่านการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าจะทำให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระลดลงน้อยที่สุดในขณะที่การใช้ไมโครเวฟจะทำให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของข้าวสุกตกลงมากที่สุด ($p < 0.05$) ซึ่งการลดลงของฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระจะสัมพันธ์กับปริมาณแอนโทไซยานินและปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ($r^2 = 0.97-0.984, p < 0.05$)

4. ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวหุงสุกระหว่างการเก็บรักษา

โดยทั่วไปข้าวที่เพิ่งผ่านการหุงสุกจะมีเนื้อสัมผัสนุ่มและมีความยืดหยุ่น แต่เมื่อเก็บรักษาไประยะเวลาหนึ่งจะทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกมีลักษณะแข็ง อายุการเก็บรักษาข้าวที่ผ่านการหุงสุกโดยทั่วไปจะน้อยกว่า 3 วัน ที่อุณหภูมิการเก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส อายุการเก็บรักษาที่สั้นของข้าวหุงสุกเป็นผลมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งเป็นผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่มีค่าการเกาะติดของเมล็ดข้าวลดลง (Kock *et al.*, 1995) คุณภาพของข้าวหุงสุกจะขึ้นอยู่กับปริมาณอะไมโลสที่เป็นองค์ประกอบในสตาร์ชแกรนูล (Juliano, 1985) ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำเมื่อผ่านการหุงสุกจะทำให้ข้าวมีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่มและเหนียว ในขณะที่ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่แน่นและแข็ง โดยเนื้อสัมผัสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ในระหว่างการเก็บรักษา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะสายพันธุ์ อุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษา (Lima and Singh, 1993) สตาร์ชแกรนูลในเมล็ดข้าวผ่านกระบวนการเจลาติไนเซชัน เมื่อทิ้งไว้ให้เย็นส่วนของอะไมโลสจะเกิดการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลทำให้ข้าวหุงสุกมีเนื้อสัมผัสแข็ง หรือ การเกิดรีโทรเกรเดชัน ในขณะที่ส่วนของอะไมโลเพคตินยังคงอยู่ในรูปอสัณฐาน เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลาหนึ่งของอะไมโลเพคตินจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้ เช่นเดียวกับอะไมโลส โดยระหว่างการเก็บรักษาอะไมโลเพคตินจะเกิดการรวมตัวกัน หรือ เกิดการสร้างผลึกใหม่อีกครั้ง ทำให้ข้าวหุงสุกที่เก็บรักษาเป็นเวลานานมีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งมากขึ้น (Singh *et al.*, 2003)

4.1 อุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษา

อุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของข้าวหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษา Zhou และคณะ (2007) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อคุณภาพของข้าวหุงสุก โดยการเก็บรักษาข้าวที่ผ่านการหุงสุกที่อุณหภูมิ 4 และ 37 องศาเซลเซียส นาน 16 เดือน พบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสทำให้น้ำอ้อมของข้าวหุงสุกมีความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่มีค่าการเกาะติดน้อยลง ($p < 0.001$) เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวพบว่าข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีลักษณะพื้นผิวของเมล็ดข้าวสุกที่เรียบกว่าการเก็บรักษาที่ 37 องศาเซลเซียส ส่วน Tian และคณะ (2014) ศึกษาผลของการเก็บรักษาข้าวที่ผ่านการหุงสุกโดยใช้ความดันสูง เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 1, 3, 5, 7, 14 และ 35 วันต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวหุงสุก พบว่า ข้าวหุงสุกจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา การใช้ความดันสูงในการหุงสุกส่งผลให้เกิดรีโทรเกรเดชันในระหว่างการเก็บรักษาได้น้อยลง ในระหว่างการเก็บรักษาข้าวหุงสุกที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ผ่านการใช้ความดันสูงจะช่วยลดอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวหุงสุกจะเกี่ยวข้องกับปริมาณอะไมโลสที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากสตาร์ชแกรนูล การใช้ความดันสูงจะช่วยลดการปลดปล่อยอะไมโลสออกจากสตาร์ชแกรนูล และอะไมโลสที่ออกมาเพียงเล็กน้อยจากสตาร์ชแกรนูลจะเกิดการรวมตัวกันเป็นฟิล์มบางๆล้อมรอบสตาร์ชแกรนูล ดังนั้นจึงสามารถช่วยชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันในระหว่างการเก็บรักษาได้ ในขณะที่ Perdon และคณะ (1999) ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง โดยวัดการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปี (ΔH) ของข้าวหุงสุกที่อุณหภูมิตั้งแต่ 45 ถึง 65 องศาเซลเซียส พบว่า มีการเกิดรีโทรเกรเดชันในระหว่างการเก็บรักษาที่ 24 ถึง 96 ชั่วโมง โดยมีค่า ΔH เพิ่มขึ้นจาก 0.27 เป็น 1.30 จูลต่อกรัม โดยค่า ΔH มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึง 1.00 จูลต่อกรัม หลังจากรักษาเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ส่วน Narkrugsra และ Saeleaw (2009) ศึกษาผลการเก็บรักษาข้าวสำเร็จรูปบรรจุกระป๋องที่อุณหภูมิห้อง (27 ถึง 29 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 8 เดือน โดยใช้ข้าวเจ้า 3 สายพันธุ์ คือ ข้าวหอมมะลิ (อะไมโลส ร้อยละ 17.25) ข้าวขาวตาแห้ง (อะไมโลส ร้อยละ 33.52) และข้าวโคชิชิคาริ (อะไมโลส ร้อยละ 15.55) ทำการฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการสเตอริไรส์ที่อุณหภูมิ 116 องศาเซลเซียส โดยมีค่า F_0 เท่ากับ 1 และ 5 นาที พบว่าในระหว่างการเก็บรักษาข้าวจะมีเนื้อสัมผัสแข็งมากขึ้นเมื่อเก็บนานขึ้น ($p \leq 0.05$) โดยข้าวสายพันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีการเกิดรีโทรเกรเดชันที่สูงกว่าข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ ($p \leq 0.01$) ผลิตภัณฑ์ข้าวสำเร็จรูปบรรจุกระป๋องที่ผลิตจากข้าว เมื่อผลของระดับการสเตอริไรส์ (F_0) พบว่าเมล็ดข้าวที่ผ่านการสเตอริไรส์ที่ F_0 เท่ากับ 5 นาที จะมีความแข็งและเกิดการรีโทรเกรเดชันน้อยกว่าที่ระดับ F_0 เท่ากับ 1 นาที ($p \leq 0.01$)

ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษา Yu และคณะ (2009) เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะไมโลสกับการเกิดริโทเกรเดชันของข้าวหุงสุก 11 สายพันธุ์ในระหว่างการเก็บรักษา พบว่า ปริมาณอะไมโลส ความสัมพันธ์เชิงบวกกับการเกิดริโทเกรเดชันของสตาร์ช ($0.603 \leq r \leq 0.822$, $p < 0.01$) และความแข็งของข้าวหุงสุก ($0.706 \leq r \leq 0.866$, $p < 0.01$) ในขณะที่ค่าการเกาะติดของข้าวมีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณอะไมโลส ($-0.929 \leq r \leq -0.678$, $p < 0.01$) และการเกิดริโทเกรเดชัน ($r = -0.833$, $p < 0.01$) นั่นคือข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงอัตราการเกิดริโทเกรเดชันของสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นและเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกมีความแข็งเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา

Perdon และคณะ (1999) ศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัส และการเกิดริโทเกรเดชันของข้าวหุงสุก 2 สายพันธุ์ (Bengal และ Cypress) ที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -13, 3, 20 และ 36 องศาเซลเซียส พบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -13 องศาเซลเซียส จะพบการเกิดริโทเกรเดชันที่ระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 72 ชั่วโมง ในขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส จะพบการเกิดริโทเกรเดชันที่ระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 48 ชั่วโมง โดยข้าวทั้งสองสายพันธุ์จะมีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 3 องศาเซลเซียส การเก็บรักษาข้าวหุงสุกที่อุณหภูมิต่ำ และระยะเวลาเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกมีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น และมีความเหนียวลดลง เนื่องจากการเกิดริโทเกรเดชันเพิ่มขึ้น ส่วน Rodriguez และคณะ (2001) ศึกษาอายุการเก็บรักษาเบอร์รี่โตที่มีส่วนประกอบของข้าวและถั่วดำที่บรรจุในถุงรีทอร์ทเพาซ์ในสภาวะที่มีก๊าซเหลือในภาชนะปริมาตรที่แตกต่างกัน ได้แก่ 10, 20, 30 และ 40 ลูกบาศก์เซนติเมตร เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4.4, 26.7 และ 37.8 องศาเซลเซียส โดยทำการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค พบว่าปริมาตรก๊าซในภาชนะบรรจุที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อคุณภาพทางเคมี เคมีเชิงฟิสิกส์ และการยอมรับของผู้บริโภคในระหว่างการเก็บรักษา ($p \geq 0.05$) อย่างไรก็ตามพบว่า อุณหภูมิในการเก็บรักษาที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค ($p < 0.05$) การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ตัวอย่างจะมีความแน่นเนื้อสูงกว่าการเก็บที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่การเก็บรักษาที่ 37.8 องศาเซลเซียส เปลือกของเบอร์รี่โตจะปรากฏสีคล้ำขึ้น เนื่องจากการมีปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเกิดขึ้น รวมทั้งความชื้นในตัวอย่างลดลง เป็นผลให้ตัวอย่างมีลักษณะแห้งและแข็ง ดังนั้นการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 37.8 องศาเซลเซียส ผู้บริโภคจะมีการยอมรับน้อยกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ($p < 0.05$) ส่วน Ali และคณะ (2008) ศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษาข้าวที่ผ่านการหุงสุกต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัส โดยข้าวที่ผ่านหุงสุกจะถูกนำมาเก็บที่อุณหภูมิห้อง แช่เย็น และแช่แข็งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นข้าวที่เก็บแบบแช่เย็น และแช่แข็งจะถูกนำมาให้ความร้อนอีกครั้งด้วยไมโครเวฟเป็นเวลา 1 นาที จึงนำมาทดสอบความชอบของผู้บริโภคด้วย Hedonic scale ต่อความชอบด้านสี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม พบว่า ข้าวหุงสุกที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องและเก็บแบบแช่เย็น

แล้วนำมาให้ความร้อนอีกครั้งจะมีคะแนนความชอบความชอบด้านสี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงกว่าการแช่แข็ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการแช่แข็งเป็นผลให้เกิดการสร้างผลึกน้ำแข็งภายในเมล็ดข้าว เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิห้องจึงเป็นผลให้ผลึกน้ำแข็งเกิดการละลาย ทำให้ความชื้นภายในเมล็ดข้าวน้อยกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องและแบบแช่เย็น จึงส่งผลให้เนื้อสัมผัสของข้าวแช่แข็งมีความแข็งมากที่สุด จึงส่งผลกระทบต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 ชั่วโมง และการเก็บแบบแช่เย็นเป็นเวลา 48 ชั่วโมงผู้บริโภคจะให้คะแนนการยอมรับที่สูงที่สุด ($p < 0.05$)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวกล้องง่สังข์หยด
2. เพื่อศึกษาสภาวะการสกัดต่อปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวกล้องง่สังข์หยด
3. เพื่อศึกษาผลของวิธีการหุงสุกต่อคุณภาพ ความคงตัวของแอนโทไซยานินและกรดฟีนอลิกในข้าวกล้องง่สังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภค
4. เพื่อศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อคุณภาพ ความคงตัวของแอนโทไซยานินและกรดฟีนอลิกในข้าวกล้องง่สังข์หยดพร้อมบริโภค

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

- ข้าวกล้องสังข์หยดเต็มเมล็ดจากวิสาหกิจชุมชนบ้านเขากลาง จังหวัดพัทลุง ที่เก็บเกี่ยวในปี พ.ศ. 2558
- ถูกรีทอร์ทเพาว์ขนาด 11×13 เซนติเมตร

สารเคมี

- โปแทสเซียมซัลเฟต เกรดวิเคราะห์ (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.50, Fisher Chemicals)
- คอปเปอร์ซัลเฟต เกรดวิเคราะห์ (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98, Fisher Chemicals)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98, Fisher Chemicals)
- กรดบอริก เกรดวิเคราะห์ (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.7, Rankem)
- เมทิลเรดิอินดิเคเตอร์ เกรดวิเคราะห์ (Panreac)
- กรดซัลฟูริก ความเข้มข้นร้อยละ 98 เกรดวิเคราะห์ (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 97.5-98.5, RCI Labscan)
- กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นร้อยละ 37 เกรดวิเคราะห์ (RCI Labscan)
- ปีโตรเลียมอีเทอร์ ความเข้มข้นร้อยละ 99.5 เกรดวิเคราะห์ (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.98, RCI Labscan)
- เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 99.9 เกรดวิเคราะห์ (QRec)
- เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 เกรดวิเคราะห์ (QRec)
- ไอโอดีน เกรดวิเคราะห์ (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8, Univar)
- กรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 99.7 เกรดวิเคราะห์ (RCI Labscan)
- อะไม โลสบริสุทธิ์ (Sigma-Aldrich)
- โปแทสเซียมไอโอไดด์ เกรดวิเคราะห์ (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99, Univar)
- เมทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 99.8 เกรด HPLC (Chromanorm)
- โปแทสเซียมคลอไรด์ เกรดวิเคราะห์ (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8, Univar)
- โซเดียมอะซิเตท เกรดวิเคราะห์ (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8, Univar)
- กรดซिटริก เกรดวิเคราะห์ (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98, Univar)

- กรดฟอร์มิกความเข้มข้นร้อยละ 98 เกรดวิเคราะห์ (Fisher Chemicals)
- โซเดียมซิเตรท (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8, Univar)
- อะซิโตนไฮดรอลิก ความเข้มข้นร้อยละ 99.9 เกรด HPLC (Chromanorm)
- 2,2-ไดฟีนิล-1-ไพคริลไฮดรอกไซด์ (Sigma-Aldrich)
- Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich)
- กรดเพอรูติก (Sigma-Aldrich)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

- เวอร์เนียร์ (Mitutoyo 530-118, Japan)
- เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Sartorius, BSA 2245, Germany)
- เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Sartorius, BP310S, Germany)
- เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Stable Micro Systems, TA.XT. plus, UK.)
- เครื่องย่อยโปรตีน (Gerhardt, Model Kjeldatherm, Germany)
- เครื่องดักจับไอกรด (Gerhardt, Model TURBO SOG, Germany)
- เครื่องกลั่นโปรตีน (Gerhardt, Model Vapodest 10 SN, Germany)
- เครื่องสกัดไขมัน (Electrothermal, Model EME6, England)
- ตู้บดมร่อน (Mettler, UM 500, Germany)
- เตาเผา (Fisher Scientific, Isotemp, U.S.A)
- เครื่องวิเคราะห์เยื่อใย (Ankom, U.S.A)
- เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (RO 10 power IKAMAG[®], Germany)
- เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) (Perkin Elmer, U.S.A)
- เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) (X'Pert MPD, Netherlands)
- เครื่อง Rapid visco analyzer (Scientific Newport, RVA 4D, Australia)
- อ่างส่งคลื่นความถี่สูง (Sonicate bath)
- เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) (Agilent 1200 series, Germany)
- เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) (Quanta 400, FEI, Czech)
- คอลัมน์ชนิด Reverse phase C18 ขนาด 4.0 × 250 นาโนเมตร, 4 ไมโครเมตร (Hypersil ODS)
- เครื่องหมุนเหวี่ยง (Sanyo, Harrier 18/80, England)
- เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Hitachi Model U-1500, Japan)

- เครื่องวัดค่าสี (Hunter Lab, Color Quest XT, U.S.A)
- เครื่องบดของแห้ง (Philips, HR-2061, Indonesia)
- เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (Mettler Toledo, FE 20, China)
- หม้อนึ่งฆ่าเชื้อแบบพ่นไอน้ำ (OFM, AT2000, Thailand)
- ตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมโครเมตร (Advantech, SUS 316, U.S.A)
- หม้อหุงข้าวไฟฟ้า (Panasonic, SR-G181, Thailand)
- เตาอบไมโครเวฟ (Samsung, MS28H5125BR, Thailand)
- อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Memmert, WB10B7-45, Germany)
- เครื่องระเหยแบบสูญญากาศ (EYELA, N-1000, Japan)
- อุปกรณ์สำหรับการทดสอบทางประสาทสัมผัส
- โถดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ เคมี และ เคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวกล้องสังข์หยด

1.1 การเตรียมตัวอย่าง

ข้าวเปลือกสังข์หยดที่เก็บเกี่ยวในปี พ.ศ. 2558 จะถูกลดความชื้นโดยการตากแดดจนมีความชื้นประมาณร้อยละ 14 จากนั้นบรรจุในกระสอบพลาสติก เก็บรักษานาน 6 เดือน ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำมาผ่านการกะเทาะเปลือกจะได้เป็นข้าวกล้องสังข์หยดเต็มเมล็ด และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ในด้าน ค่าสี ขนาด และน้ำหนักเมล็ดข้าว บางส่วนจะถูกนำไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดของแห้ง แล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมโครเมตร จากนั้นนำไปใช้วิเคราะห์สมบัติทาง เคมี และสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ต่อไป

1.2 สมบัติทางกายภาพ

- ขนาดเมล็ดข้าว (Wadsworth *et al.*, 1982)
- น้ำหนักเมล็ดข้าว (Wadsworth *et al.*, 1982)
- ค่าสี ในระบบ CIE Hunter Lab ในรูป L^* , a^* และ b^* (Durge *et al.*, 2013)

1.3 สมบัติทางเคมี

- ปริมาณความชื้น (A.O.A.C., 2000)

- ปริมาณโปรตีน (A.O.A.C., 2000)
- ปริมาณไขมัน (A.O.A.C., 2000)
- ปริมาณเถ้า (A.O.A.C., 2000)
- ปริมาณเยื่อใย (A.O.A.C., 2000)
- ปริมาณอะไมโลส (Juliano *et al.*, 1985)

1.4 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์

- สมบัติทางความร้อน (Teo *et al.*, 2000)
- รูปแบบโครงสร้างและปริมาณผลึก (Kim *et al.*, 2001)
- พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืด (Zhou *et al.*, 2007)

ตอนที่ 2 ศึกษาสถานะการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องสังข์หยด

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ข้าวกล้องสังข์หยดเต็มเมล็ดจะถูกนำไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดของแห้ง (Grinder) แล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมโครเมตร จากนั้นบรรจุถุงพลาสติกชนิด Nylon/LLDPE ปิดสนิท

2.2 วิธีการทดลอง

นำตัวอย่างข้าวกล้องสังข์หยดมาสกัดแอนโทไซยานิน โดยใช้ เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 0, 45 และ 90 (ปริมาตรโดยปริมาตร) ร่วมกับกรดซิตริก ความเข้มข้นร้อยละ 0, 2.5 และ 5 (น้ำหนักโดยปริมาตร) กำหนดอัตราส่วนข้าวต่อตัวทำละลายเท่ากับ 1:30 สกัดที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1, 12.5 และ 24 ชั่วโมง ระหว่างการสกัดจะมีการเขย่าตลอดเวลาโดยใช้เครื่องกวนสารละลายที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที จากนั้นเมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด นำสารสกัดที่ได้ไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที แล้วกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 นำสารสกัดที่ได้ไประเหยด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ให้เหลือปริมาตรสุดท้ายประมาณ 2 มิลลิลิตร เก็บรักษาตัวอย่างสารสกัดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (คัดแปลงจาก Kang *et al.*, 2014) เพื่อรอวิเคราะห์ต่อไป

2.2.1 สมบัติทางกายภาพ

- ค่าสี ในระบบ CIE Hunter Lab ในรูป L*, a* และ b* (Durge *et al.*, 2013)

2.2.2 สมบัติทางเคมี

- ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารสกัด โดยใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง
- ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel-Aal and Hucl (Abdel-Aal and Hucl, 1999)
- ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีพีเอชดิฟเฟอเรนเชียล (Sutharut and Sudarat, 2012)
- ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดด้วยวิธีวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร (Singleton *et al.*, 1999)
- ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (Brand-Williams *et al.*, 1995)

2.2.3 วิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Response) มาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวางแผนการทดลองแบบ Face Central Composite Design โดยมีชุดการทดลองรวมเท่ากับ 17 ชุดการทดลอง ซึ่งที่จุดกึ่งกลางการทดลองจะมีการทดลอง 3 จุด แสดงดังตารางที่ 2 จากนั้นนำมาสร้างความสัมพันธ์กับตัวแปรระหว่างความเข้มข้นของเอทานอล ความเข้มข้นของกรดซิตริก และเวลาการสกัด โดยการวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Design Expert เพื่อทำนายและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่อค่าการตอบสนอง ดังสมการที่ 1 จากนั้นนำสมการทางคณิตศาสตร์มาทำนายเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimum prediction) โดยสมการต้องสามารถอธิบายผลของปัจจัยที่มีต่อค่าการตอบสนองได้ (Model, $p < 0.05$) สมการไม่มีความบกพร่อง (Lack of fit, $p \geq 0.05$) และมีค่าสหสัมพันธ์ (R^2) มากกว่า 0.75 (Hu, 1999)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_1^2 X_1^2 + \beta_2^2 X_2^2 + \beta_3^2 X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \dots \text{(สมการที่ 1)}$$

เมื่อ	β_0	คือ ค่าคงที่ที่จุดกึ่งกลางการทดลอง (0, 0)
	β_1, β_2 และ β_3	คือ สัมประสิทธิ์พจน์อันดับหนึ่ง (Linear coefficient)
	β_1^2, β_2^2 และ β_3^2	คือ สัมประสิทธิ์พจน์อันดับสอง (Quadratic coefficient)
	β_{12}, β_{13} และ β_{23}	คือ สัมประสิทธิ์พจน์อิทธิพลร่วมของตัวแปรอิสระทั้งสอง (Interaction coefficient)

X_1 คือ ความเข้มข้นของเอทานอล (ร้อยละปริมาตรโดยปริมาตร)

X_2 คือ ความเข้มข้นของกรดซิตริก (ร้อยละน้ำหนักโดยปริมาตร)

X_3 คือ เวลาการสกัด (ชั่วโมง)

Table 2 Central composite design for anthocyanin extraction from Sangyod brown rice

Number of treatment	Coded levels			Actual levels		
	Ethanol (X_1)	Citric acid (X_2)	Time (X_3)	Ethanol (%)	Citric acid (%)	Time (h)
1	1	1	1	90.00	5.00	24.00
2	0	0	1	45.00	2.50	24.00
3	0	0	0	45.00	2.50	12.50
4	1	1	1	90.00	5.00	24.00
5	1	-1	-1	90.00	0.00	1.00
6	0	0	-1	45.00	2.50	1.00
7	0	1	0	45.00	5.00	12.50
8	-1	-1	-1	0.00	0.00	1.00
9	0	-1	0	45.00	0.00	12.50
10	-1	0	0	0.00	2.50	12.50
11	0	0	0	45.00	2.50	12.50
12	-1	-1	1	0.00	0.00	24.00
13	-1	1	-1	0.00	5.00	1.00
14	1	1	-1	90.00	5.00	1.00
15	1	0	0	90.00	2.50	12.50
16	-1	1	1	0.00	5.00	24.00
17	0	0	0	45.00	2.50	12.50

2.2.4 ทำนายสมการที่ได้จากโปรแกรม Design Expert

นำค่าการตอบสนองที่ได้จากการทำนายโดยโปรแกรม Design Expert ซึ่งได้จากการแทนค่าในสมการที่ใช้ในการทำนาย เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องงอกสังข์หยด มาเปรียบเทียบกับค่าการตอบสนองที่ได้จากการทดลองจริง โดยใช้ความเข้มข้นของเอทานอล ความเข้มข้นของกรดซิตริก และเวลาการสกัดที่คัดเลือกมาจากข้อที่ 2.2.3 ซึ่งสมการ

ที่สามารถใช้งานได้จริงและมีความเหมาะสมต่อการนำมาทำนายเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมนั้น จะต้องมีค่าการตอบสนองที่ได้จากการทำนายโดยโปรแกรม Design Expert ซึ่งได้จากการแทนค่า ในสมการแบบจำลอง กับค่าการตอบสนองที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งจะต้องมีค่าแตกต่างกันไม่ เกินร้อยละ 10 (Hu, 1999)

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของวิธีการหุงสุกต่อคุณภาพข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภคในภาชนะ บรรจุปิดสนิท

3.1 กระบวนการหุงสุกข้าวกล้องสังข์หยดด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าความดันสูง

3.1.1 ศึกษาระยะเวลาการให้ความร้อนเบื้องต้นที่เหมาะสมกับข้าวกล้องสังข์หยดก่อน การหุงสุก

นำข้าวกล้องสังข์หยดเต็มเมล็ดที่ผ่านการลดความชื้นจนมีประมาณร้อยละ 14 ห่อด้วยผ้าขาวบางห่อละ 100 กรัม จำนวน 20 ห่อ (น้ำหนักรวม 2,000 กรัม) แช่ในน้ำอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปริมาตร 4,000 มิลลิลิตร (กำหนดอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ เท่ากับ 1 ต่อ 2) สุ่มตัวอย่าง ทุก 2 นาที จากนั้นทำให้เย็นโดยเปิดน้ำให้ไหลผ่านตัวอย่างจนกระทั่งอุณหภูมิของตัวอย่างเท่ากับ อุณหภูมิของน้ำ และสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 1 นาที วัดปริมาณ Starchy core (Julaino, 1985) คัดเลือก ตัวอย่างที่ผ่านให้ความร้อนทุกระยะเวลาก่อนที่มีปริมาณ Starchy core เท่ากับ 0 วัดปริมาณ ความชื้น (A.O.A.C., 2000) และร้อยละการเกิดเจลาตินในเซชัน (Teo *et al.*, 2000) คัดเลือกระยะเวลา การให้ความร้อนที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากตัวอย่างข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่มีร้อยละการเกิด เจลาตินในเซชันตั้งแต่ 65 แต่ไม่เกินร้อยละ 90 (อนลักษ์ณ์ โอปารี โกวิท, 2546) และนำข้อมูลนี้มาใช้ ในข้อ 3.1.2 ต่อไป

3.1.2 ศึกษาระยะเวลาการหุงข้าว

นำข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการให้ความร้อนที่เหมาะสมจากข้อ 3.1.1 บรรจุใน ถุงรีทอร์ทเพาว์ขนาด 11×13 เซนติเมตร ถุงละ 125 กรัม โดยมีการเกลี่ยตัวอย่างข้าวให้มีความ สม่าเสมอทั่วภาชนะบรรจุ ปิดฉนวน จัดเรียงตัวอย่างลงในถาดของหม้อหุงข้าวไฟฟ้าความดันสูง (ความ กว้าง ความยาว และความสูง เท่ากับ 90×100×4 ลูกบาศก์เซนติเมตร) จำนวนถาดละ 30 ถุง และส่วน ที่เหลือจะใช้บรรจุภัณฑ์จำลอง (น้ำแป้งร้อยละ 2) จากนั้นนำถาดของหม้อหุงข้าวไฟฟ้าความดันสูง บรรจุลงในตะกร้าของหม้อหุงข้าวไฟฟ้าความดันสูง (ความกว้าง ความยาว และความสูง เท่ากับ 90× 100×90 ลูกบาศก์เซนติเมตร) ซึ่งมีจำนวน 2 ตะกร้า แต่ละตะกร้าจะบรรจุถาดตัวอย่างได้ 16 ถาด

สำหรับตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาหาระยะเวลาการฆ่าเชื้อที่เหมาะสมจะใช้ถุญรีทอรัทเพาวซ์ที่มีการเสียบเข็มวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงของถุญ (ภาคผนวก ข ภาพภาคผนวกที่ 11 และ 12) จำนวน 3 ตัวอย่าง และจะวางในถาดตัวอย่างชั้นที่ 9 ซึ่งเป็นจุดที่มีการกระจายความร้อนช้าที่สุด นอกจากนี้เสียบเข็มวัดอุณหภูมิภายในเครื่องมือหนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง (Mercury in glass thermometer, MIG) จำนวน 1 สาย จากนั้นเชื่อมต่อสายกับเครื่องอ่านและบันทึกอุณหภูมิของตัวอย่างและหม้อหนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง ฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 118 องศาเซลเซียส ความดัน 23 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว กำหนดให้ค่า F_0 เท่ากับ 4 (Lewis and Heppell, 2000) ติดตามเวลาที่อุณหภูมิในหม้อหนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงถึงอุณหภูมิฆ่าเชื้อที่กำหนด เพื่อคำนวณหาระยะเวลาในการฆ่าเชื้อและจะนำไปใช้ต่อในข้อ 3.1.3 เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการให้ความร้อนในการฆ่าเชื้อจะเปิดน้ำเพื่อหล่อเย็นตัวอย่างและค่อยๆ ลดความดันลง จนกระทั่งอุณหภูมิอาหารลดลงเหลือประมาณ 40-45 องศาเซลเซียส การทดลองนี้จะหาระยะเวลาในการฆ่าเชื้อจำนวน 2 ชั่วโมง หลังจากการฆ่าเชื้อจะนำผลิตภัณฑ์มาทดสอบการเจริญเติบโตของเชื้อ เชื้อจุลินทรีย์ *Clostridium botulinum* ด้วยวิธี Sterility test โดยนำตัวอย่างไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 และ 55 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน และเมื่อพิจารณาถึงข้อมูลการฆ่าเชื้อที่สมบูรณ์ถูกต้องผลการทดสอบจะต้องไม่พบเชื้อกลุ่ม Mesophile และ Thermophile ชนิด aerobic และ anaerobic bacteria (BAM, 2001)

3.1.3 การผลิตข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิทด้วยหม้อหนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง

นำข้าวกล้องสังข์หยดห่อด้วยผ้าขาวบางห่อละ 100 กรัม แขนในน้ำอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ให้ความร้อนตามเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.1.1 จากนั้นทำให้เย็นโดยเปิดน้ำให้ไหลผ่านตัวอย่างจนกระทั่งอุณหภูมิของข้าวกล้องสังข์หยดเท่ากับอุณหภูมิของน้ำ และสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 1 นาที นำข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นที่เหมาะสมบรรจุในถุญรีทอรัทเพาวซ์ขนาด 11×13 เซนติเมตร ถุญละ 125 กรัม ตัวอย่างละ 100 ถุญ ฆ่าเชื้อด้วยหม้อหนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงที่อุณหภูมิ 118 องศาเซลเซียส ความดัน 23 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยฆ่าเชื้อตามระยะเวลาในข้อ 3.1.2 เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจะให้ความร้อนในการฆ่าเชื้อจะเปิดน้ำเพื่อหล่อเย็นตัวอย่างและค่อยๆ ลดความดันลง จนกระทั่งอุณหภูมิอาหารลดลงเหลือประมาณ 40-45 องศาเซลเซียส จากนั้นนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิทมา วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี เคมีเชิงฟิสิกส์ และการทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยจะเปรียบเทียบกับสมบัติในด้านต่างๆ กับข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและไมโครเวฟ ดังแสดงรายละเอียดในข้อ 3.2

3.2 เปรียบเทียบคุณภาพข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

ศึกษาสมบัติของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ความดันสูง หม้อหุงข้าวไฟฟ้าและไมโครเวฟ โดยใช้ข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภคน้ำจากข้อ 3.1.3 ส่วนการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าจะนำตัวอย่างข้าวกล้องสังข์หยดจำนวน 250 กรัม และใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 2 หุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (Keawpeng, 2012) และการหุงด้วยไมโครเวฟ จะใช้ตัวอย่างข้าวกล้องสังข์หยด จำนวน 250 กรัม บรรจุลงในหม้อหุงข้าวไมโครเวฟ ขนาด 1 ลิตร เติมน้ำในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 2 หุงด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำตัวอย่างออกมาเกลี่ยให้ทั่ว และเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟเป็น 850 วัตต์ ใช้เวลานาน 5 นาที แล้วปิดฝาทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี โครงสร้างทางจุลภาค คุณภาพการหุงสุก และการทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 สมบัติทางกายภาพ

- ค่าสี ในระบบ CIE Hunter Lab ในรูป L^* , a^* และ b^* (Durge *et al.*, 2013)
- เนื้อสัมผัส โดยวัดในรูปค่าความแข็ง (Hardness) และค่าการเกาะติด (Adhesiveness) (Toe *et al.*, 2000)

3.2.2 สมบัติทางเคมี

- ปริมาณความชื้น (A.O.A.C, 2000)
- ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel-Aal and Hucl (Abdel-Aal and Hucl, 1999)
- ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดด้วยวิธีวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร (Singleton *et al.*, 1999)
- ชนิดและปริมาณกรดฟีนอลิกในรูปฟีนอลิกอิสระ และฟีนอลิกยึดเหนี่ยว ด้วยวิธี HPLC (Krygier *et al.*, 1982; Adom *et al.*, 2003; Mattila *et al.*, 2005; Sompong *et al.*, 2011)
- ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (Brand-Williams *et al.*, 1995)

3.2.3 โครงสร้างทางจุลภาค

- ใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 50, 2,000 และ 5,000 เท่า (Luangmalawat *et al.*, 2008)

3.2.4 คุณภาพการหุงสุก

- อัตราการยึดตัวของข้าวสุก (Singh *et al.*, 2005)
- อัตราการดูดซับน้ำของข้าวสุก (Zhou *et al.*, 2007)

3.2.5 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

ทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยทดสอบความชอบของผู้บริโภคต่อข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่ต่างกันโดยใช้วิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9-point Hedonic scale กำหนดให้คะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด ไปจนถึงระดับคะแนน 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด โดยกำหนดผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คน มีช่วงอายุ 20-30 ปี และเป็นผู้ที่ไม่ปฏิเสธการรับประทานข้าวกล้อง การทดสอบชิมจะใช้ตัวอย่างข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่ต่างกันทั้ง 3 วิธี โดยนำข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิท นำมาตัดดูง ให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟที่ 850 วัตต์ นาน 90 วินาที ใช้ตัวอย่างจำนวน 10 กรัม (1 ช้อนโต๊ะ) ใส่ถ้วยแก้วใสขนาด 50 มิลลิลิตร ปิดฝาด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟลอยด์ จัดเสิร์ฟให้แก่ผู้ทดสอบชิมครั้งละ 1 ตัวอย่าง โดยจะบ้วนปากด้วยน้ำเปล่าระหว่างตัวอย่างทุกครั้ง (Srisawas and Jindal, 2006; Miao *et al.*, 2016) หลังจากนั้นจะให้ผู้ทดสอบชิมประเมินคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยใช้แบบทดสอบความชอบข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก ดังแสดงในภาคผนวก ซ.

3.2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณภาพข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกที่แตกต่างกัน 3 วิธี มาวิเคราะห์ทางสถิติโดยการวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) โดยวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ยกเว้นค่าสี วิเคราะห์ตัวอย่างละ 10 ซ้ำวิเคราะห์ ส่วนการทดสอบทางประสาทสัมผัสจะวางแผนการทดลอง Randomized Complete Block Design (RCBD) จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยสิ่งทดลองโดยวิธี Duncan's New Multiple Ranges Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SPSS (SPSS for windows, SPSS Inc, Chicago, IL)

ตอนที่ 4 ศึกษาผลของการเก็บรักษาข้าวกล้องงัดแห้งหุงสุกพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิท

4.1 ศึกษาคุณภาพของข้าวกล้องงัดแห้งที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกันระหว่างการเก็บรักษา

ข้าวกล้องงัดแห้งที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี จะถูกนำมาศึกษาสมบัติในระหว่างการเก็บรักษา โดยจะใช้ข้าวกล้องงัดแห้งพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิทจากข้อ 3.1.3 (โดยคัดเลือกเวลาการแช่ในน้ำเดือดที่มีคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูงสุด) ส่วนข้าวกล้องงัดแห้งที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและไมโครเวฟจะใช้ตัวอย่างจากข้อ 3.2 นำมาบรรจุในถุงรีทอร์ทเพาซ์ ขนาด 11×13 เซนติเมตร คุงละ 125 กรัม ปิดผนึก และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 7 วัน โดยจะสุ่มตัวอย่างวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี เคมีเชิงฟิสิกส์ และการทดสอบทางประสาทสัมผัส ในวันที่ 0, 3 และ 7 ของการเก็บรักษา โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

4.1.1 สมบัติทางกายภาพ

- ค่าสี ในระบบ CIE Hunter Lab ในรูป L*, a* และ b* (Durge *et al.*, 2013)
- เนื้อสัมผัส โดยวัดในรูปค่าความแข็ง (Hardness) และค่าการเกาะติด (Adhesiveness) (Toe *et al.*, 2000)

4.1.2 สมบัติทางเคมี

- ความชื้น (A.O.A.C., 2000)
- ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel-Aal and Hucl (Abdel-Aal and Hucl, 1999)
- ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดด้วยวิธีวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร (Singleton *et al.*, 1999)
- ชนิดและปริมาณกรดฟีนอลิกในรูปฟีนอลิกอิสระ และฟีนอลิกยึดเหนี่ยวด้วยวิธี HPLC (Krygier *et al.*, 1982; Adom *et al.*, 2003; Mattila *et al.*, 2005; Sompong *et al.*, 2011)
- ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (Brand-Williams *et al.*, 1995)

4.1.3 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์

- สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Teo *et al.*, 2000)

4.1.4 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

ทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคต่อข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี และผ่านการเก็บรักษาตามสภาวะที่กำหนดด้วยวิธี 9-point Hedonic scale กำหนดให้คะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุดไปจนถึงระดับคะแนน 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด กำหนดผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คน มีช่วงอายุ 20-30 ปี และเป็นผู้ที่ไม่ปฏิเสธการรับประทานข้าวกล้อง ตัวอย่างข้าวกล้องสังข์หยดที่หุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกันทั้ง 3 วิธี ซึ่งบรรจุอยู่ในถุงรีโพรทเพาซ์ จะถูกนำมาตัดปากถุง แล้วให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟที่กำลัง 850 วัตต์ นาน 90 วินาที สุ่มตัวอย่างจำนวน 10 กรัม (1 ซ้อนโต๊ะ) ใส่ถ้วยแก้วใสขนาด 50 มิลลิลิตร ปิดฝาด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟลอยด์ จัดเสิร์ฟให้แก่ผู้ทดสอบชิมครั้งละ 1 ตัวอย่าง โดยผู้ทดสอบจะบ้วนปากด้วยน้ำเปล่าระหว่างตัวอย่างทุกครั้ง (Srisawas and Jindal, 2006; Miao *et al.*, 2016) ผู้ทดสอบชิมประเมินคุณลักษณะ ด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยใช้แบบทดสอบความชอบข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก รายละเอียดแบบทดสอบแสดงในภาคผนวก ข.

4.1.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลจากการวิเคราะห์สมบัติของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกันทั้ง 3 ได้แก่ หม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง หม้อหุงข้าวไฟฟ้าและไมโครเวฟ มาวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) โดยวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ยกเว้นค่าสถิติวิเคราะห์ตัวอย่างละ 10 ซ้ำวิเคราะห์ ส่วนการทดสอบทางประสาทสัมผัสจะถูกนำมาวางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยสิ่งทดลองโดยวิธี Duncan's New Multiple Ranges Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SPSS (SPSS for windows, SPSS Inc, Chicago, IL)

4.2 คุณภาพของข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิทระหว่างการเก็บรักษา

ข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิท จากข้อ 3.1.3 จะถูกนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 2 ระดับ คือ 4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง เป็นเวลานาน 6 เดือน จากนั้น

ลุ่มตัวอย่างวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี เคมีเชิงฟิสิกส์ และการทดสอบทางประสาทสัมผัส ในทุกๆเดือนของการเก็บรักษา โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

4.2.1 สมบัติทางกายภาพ

- ค่าสี ในระบบ CIE Hunter Lab ในรูป L^* , a^* และ b^* โดยใช้เครื่องวัดค่าสี (Hunter Lab) (Durge *et al.*, 2013)
- เนื้อสัมผัส โดยวัดในรูปค่าความแข็ง (Hardness) และค่าการเกาะติด (Adhesiveness) (Toe *et al.*, 2000)

4.2.2 สมบัติทางเคมี

- ความชื้น (A.O.A.C., 2000)
- วิเคราะห์หาปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel-Aal and Hucl (Abdel-Aal and Hucl, 1999)
- ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดด้วยวิธีวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร (Singleton *et al.*, 1999)
- ชนิดและปริมาณกรดฟีนอลิกในรูปฟีนอลิกอิสระ และฟีนอลิกยึดเหนี่ยวด้วยวิธี HPLC (Krygier *et al.*, 1982; Adom *et al.*, 2003; Mattila *et al.*, 2005; Sompong *et al.*, 2011)
- ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (Brand-Williams *et al.*, 1995)

4.2.3 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์

- สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Teo *et al.*, 2000)

4.2.4 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

ทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยทดสอบความชอบของผู้บริโภคต่อข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนาในภาชนะบรรจุปิดสนิท ซึ่งใช้วิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9-point Hedonic scale กำหนดให้คะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุดไปจนถึงระดับคะแนน 9 หมายถึงชอบมากที่สุด โดยกำหนดผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คน มีช่วงอายุ 20-30 ปี และเป็นผู้ที่ไม่ปฏิเสธการรับประทานข้าวกล้อง ก่อนการทดสอบทางประสาทสัมผัส ตัวอย่างข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนาในภาชนะบรรจุปิดสนิทจะถูกนำมาตัดปากถุง แล้วให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟที่

กำลัง 850 วัตต์ นาน 90 วินาที ใช้ตัวอย่างจำนวน 10 กรัม (1 ซ้อนโต๊ะ) ใส่ถ้วยแก้วใสขนาด 50 มิลลิลิตร ปิดฝาด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟลอยด์ จัดเสิร์ฟให้แก่ผู้ทดสอบชิมครั้งละ 1 ตัวอย่าง โดยผู้ทดสอบจะบ้วนปากด้วยน้ำเปล่าระหว่างตัวอย่างทุกครั้ง (Srisawas and Jindal, 2006; Miao *et al.*, 2016) หลังจากนั้นจะให้ผู้ทดสอบชิมประเมินคุณลักษณะ ด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยใช้แบบทดสอบความชอบข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิท ดังแสดงในภาคผนวก ซ.

4.2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลจากการวิเคราะห์สมบัติของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิทระหว่างการเก็บรักษามาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ยกเว้นค่าสี วิเคราะห์ตัวอย่างละ 10 ซ้ำวิเคราะห์ การทดสอบทางประสาทสัมผัสข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิท จะถูกนำมาวางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยสิ่งทดลอง โดยวิธี Duncan's New Multiple Ranges Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SPSS (SPSS for windows, SPSS Inc, Chicago, IL)

บทที่ 3

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. สมบัติทางกายภาพ เคมี และ เคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวกล้องสังข์หยด

การศึกษาคุณภาพทางกายภาพ เคมี และ เคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวกล้องสังข์หยด โดยการนำข้าวเปลือกสังข์หยดที่ผ่านการเก็บเกี่ยวในปี พ.ศ. 2558 มาลดความชื้นโดยการตากแดดจนกระทั่งมีความชื้นลดเท่ากับร้อยละ 14 บรรจุในกระสอบพลาสติก เก็บรักษาไว้เป็นเวลานาน 6 เดือน จากนั้นจึงนำมากะเทาะเปลือก จะได้เป็นข้าวกล้องสังข์หยดเต็มเมล็ด นำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ โดยมีรายละเอียดผลการวิเคราะห์ดังนี้

1.1 สมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องสังข์หยด

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องสังข์หยด ได้แก่ ความกว้างเมล็ด ความยาวเมล็ด อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเมล็ด และน้ำหนักเมล็ด แสดงดังตารางที่ 3 ส่วนค่าสีของข้าวกล้องสังข์หยดซึ่งรายงานในรูปของค่า L^* , a^* , b^* , Hue angle และ Chroma (ตารางที่ 4) จากผลการศึกษา พบว่า ข้าวกล้องสังข์หยดมีความยาวเมล็ดเท่ากับ 6.60 มิลลิเมตร ความกว้างเมล็ด เท่ากับ 1.80 มิลลิเมตร ลักษณะข้าวกล้องสังข์หยดที่ใช้ในศึกษาแสดงดังภาพที่ 13 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ สำเร็จ แซ่ตัน และคณะ (2550) พบว่า ความยาวและความกว้างเมล็ดของข้าวกล้องสังข์หยดมีค่าเท่ากับ 6.67 และ 1.81 มิลลิเมตรตามลำดับ ในขณะที่ Keawpeng และ Meenune (2012) รายงานค่าความยาวและความกว้างเมล็ดของข้าวกล้องสังข์หยดเท่ากับ 6.10 และ 1.60 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากการศึกษาอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยด (L/B) พบว่ามีค่าเท่ากับ 3.67 ซึ่งอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเมล็ดเป็นค่าที่บ่งบอกถึงลักษณะรูปร่างของเมล็ด โดยข้าวที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของเมล็ดตั้งแต่ 3.0 ขึ้นไปจัดเป็นข้าวที่มีลักษณะรูปร่างของเมล็ดเรียวยาว (ผดุงศักดิ์ วานิชชัง และคณะ, 2556) ดังนั้นข้าวกล้องสังข์หยดจึงจัดเป็นข้าวที่มีลักษณะรูปร่างเมล็ดเรียวยาว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ อุไรวรรณ วัฒนกุล และคณะ (2558) ที่รายงานว่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดมีค่าเท่ากับ 3.68 และ 3.48 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาน้ำหนักของข้าวกล้องสังข์หยด พบว่า ข้าวสังข์หยดมีน้ำหนัก 1.54 กรัมต่อข้าว 100 เมล็ด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Keawpeng และ Meenune (2012) ที่พบว่าข้าวสังข์หยดมีน้ำหนักเท่ากับ 1.42 กรัมต่อข้าว 100 เมล็ดตามลำดับ



Figure 13 Sangyod brown rice

Table 3 Physical properties of Sangyod brown rice

Physical properties	Sangyod brown rice
Length (mm)	6.60±0.05
Breadth (mm)	1.80±0.02
L/B	3.67±0.01
Grain weight (g/100 gains)	1.60±0.03

ค่าสีของข้าวกล้องสังข์หยดจะรายงานค่าในรูปของ L^* ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงค่าความสว่าง ค่า a^* บ่งบอกถึงความเป็นสีแดง (เป็นบวกแสดงถึงความเป็นสีแดง เป็นลบแสดงถึงความเป็นสีเขียว) ค่า b^* บ่งบอกถึงค่าความเป็นสีเหลือง (เป็นบวกแสดงถึงความเป็นสีเหลือง เป็นลบแสดงถึงความเป็นสีน้ำเงิน) ส่วนค่า Hue angle บ่งบอกถึงเฉดสี (0 องศา แสดงเฉดสีแดงและม่วง 90 องศา แสดงเฉดสีเหลือง 180 องศาแสดงเฉดสีเขียว และ 270 แสดงเฉดสีน้ำเงิน) และ Chroma (แสดงความเข้มสีน้อยลงเมื่อมีค่าเข้าใกล้ 0 และ แสดงความเข้มสีมากขึ้น เมื่อค่าเข้าใกล้ 60) (Wrolstad *et al.*, 2005) เมื่อพิจารณาค่าสีของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยด จะเห็นได้ว่าเมล็ดข้าวมีเฉดสีแดง (ค่า a^* เป็นบวก และค่า Hue angle มีค่าระหว่าง 46-90 ซึ่งแสดงเฉดสีส้มแดงถึงสีเหลืองส้ม) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดจะมีเฉดสีแดงเข้มซึ่งเป็นผลมาจากแอนโทไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุที่ทำให้เกิดสีแดงในข้าวกล้องสังข์หยดและมีบทบาทสำคัญในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (สำเร็จ แซ่ตัน และ รุจิรา ปรีชา, 2548; Yodmanee *et al.*, 2011; Vichit and Seawan, 2015) จากการศึกษาของ Inpun (2014) เกี่ยวกับค่าสีของข้าวกล้องสังข์หยด ซึ่งรายงานในรูปค่า L^* , a^* , b^* , Hue angle และ Chroma มีค่าเท่ากับ 35.10, 15.20, 20.80, 25.8 และ 53.9 ตามลำดับ และข้าวสังข์หยดขัด มีค่า L^* , a^* , b^* , Hue angle และ Chroma มีค่าเท่ากับ 60.70, 6.70, 16.10, 17.50 และ 67.50 จะเห็นได้ว่าข้าวที่ผ่านการขัดสีจะมีค่าความเป็นสีแดง (a^*) ต่ำกว่าข้าวกล้อง และมีเฉดสี (Hue angle) ไปทางสีเหลืองส้มมากกว่าข้าวกล้อง ทั้งนี้เนื่องมาจากแอนโทไซยานินจะพบมากในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดชั้นนอก

และเยื่อหุ้มเมล็ดชั้นใน ดังนั้นข้าวสังข์หยดขัดสี ซึ่งผ่านกระบวนการขัดสีเพื่อกำจัดเยื่อหุ้มเมล็ด จึงมีความเป็นสีแดงน้อยกว่าข้าวกล้อง เพราะแอนโทไซยานินบางส่วนถูกกำจัดไปในกระบวนการขัดสี จากการศึกษาของ Keawpeng และ Meenune (2012) พบว่า ปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวสังข์หยด เท่ากับ 15.60 มิลลิกรัมในรูปไปไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง

Table 4 Color values of Sangyod brown rice

Color values	Sangyod brown rice
L*	38.48±0.08
a*	12.43±0.07
b*	18.61±0.04
Hue angle	56.26±0.16
Chroma	22.38±0.08

1.2 สมบัติทางเคมีของข้าวกล้องสังข์หยด

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีของข้าวกล้องสังข์หยด ได้แก่ ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้า และ อะไมโลส (ตารางที่ 5) พบว่า มีค่าเท่ากับร้อยละ 11.00, 6.28, 2.41, 3.54, 1.40 และ 14.64 ตามลำดับ สำเร็จ แซ่ตัน และรุจิรา ปรีชา (2548) ศึกษาสมบัติทางเคมีของข้าวกล้องสังข์หยด พบว่า มีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้า และอะไมโลส เท่ากับร้อยละ 7.18, 8.06, 1.65, 0.26, 2.15 และ 14.00 ตามลำดับ ส่วน Keawpeng และ Meenune (2012) รายงานปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และอะไมโลสในข้าวกล้องสังข์หยดมีค่าเท่ากับร้อยละ 11.27, 5.64, 2.48, 1.88 และ 15.32 ตามลำดับ ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวมีส่วนสำคัญที่บ่งบอกถึงคุณภาพและอายุการเก็บรักษา โดยทั่วไปเมล็ดข้าวภายหลังการเก็บเกี่ยวจะมีปริมาณความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 18 ข้าวในระหว่างการเก็บรักษาควรมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เพื่อให้ยืดอายุการเก็บรักษาข้าว โดยทั่วไปความชื้นของข้าวเปลือกที่เหมาะสมก่อนการเก็บรักษาต้องต่ำกว่าร้อยละ 14 ในขณะที่ความชื้นภายในเมล็ดต้องต่ำกว่าร้อยละ 12 และก่อนการขัดสีข้าวควรมีความชื้นร้อยละ 12-14 ซึ่งปริมาณความชื้นภายในเมล็ดข้าวที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากสายพันธุ์ การเพาะปลูก การเก็บเกี่ยว และกระบวนการที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือก (กรมทรัพย์สินทางปัญญา, 2560; Saeed and Mohammad, 2013) ส่วนโปรตีนในข้าวมีบทบาทสำคัญที่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้าง สมบัติเชิงหน้าที่ คุณค่าทางโภชนาการ รวมไปถึงส่งผลต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัส (Juliano, 1985) นอกจากนี้ระหว่างกระบวนการเก็บรักษาโปรตีนในข้าวสามารถเกิดพันธะไดซัลไฟด์กับสตาร์ชในข้าว จึงทำให้ความหนืดของข้าวเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษา (Xie *et al.*, 2008) ปริมาณไขมัน

ในข้าวเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพข้าวในระหว่างการเก็บรักษา จากการศึกษาของ Keawpeng และ Meenune (2012) พบว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระในข้าวมีความสัมพันธ์กับการเกิดกลิ่นหืนในข้าว โดยเมื่อกลิ่นหืนในข้าวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณกรดไขมันอิสระในข้าวเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งการเกิดกลิ่นหืนดังกล่าวเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไขมันในข้าว ซึ่งเกิดเนื่องจากการมีอยู่ของเอนไซม์ไลเปสทำหน้าที่ในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้ไขมันเปลี่ยนไปอยู่ในรูปกรดไขมันอิสระเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเอนไซม์ไลเปสจะพบมากบริเวณชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด ดังนั้นข้าวกล้องในระหว่างการเก็บรักษา จึงมีการเกิดกลิ่นหืนสูงกว่าข้าวที่ผ่านการขัดสี (Sayre *et al.*, 1982; Islam *et al.*, 2012) นอกจากนี้ไขมันสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะไมโลส ซึ่งเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงหน้าที่ของข้าวในระหว่างการเก็บรักษาได้ ทำให้ความหนืดของข้าวเพิ่มขึ้น รวมไปถึงช่วยลดการเกิดริโทเกรเดชันของข้าวได้ในระหว่างการเก็บรักษา (Copeland *et al.*, 2009) ปริมาณเยื่อใยในข้าวกล้องสังข์หยดจากการศึกษาพบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 3.54 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Inpun (2014) พบว่า ข้าวกล้องสังข์หยดและข้าวสังข์หยดขัดขาวมีปริมาณเยื่อใยเท่ากับร้อยละ 3.12 และ 1.40 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้าวกล้องสังข์หยดจะมีปริมาณเยื่อใยสูงกว่าข้าวสังข์หยดขัด ทั้งนี้โดยทั่วไปในข้าวกล้องจะมีปริมาณเยื่อใยสูงกว่าข้าวที่ผ่านการขัดสี เนื่องจากส่วนของเยื่อใยซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดถูกกำจัดออกในระหว่างกระบวนการขัดสี ในขณะที่การศึกษาของ Banchuen และคณะ (2010) พบว่า ปริมาณเยื่อใยในข้าวกล้องสังข์หยดมีค่าสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเยื่อใยในข้าวเหนียวดำเปลือกดำ และข้าวเหนียวพัทลุง โดยปริมาณเยื่อใยในข้าวสังข์หยด ข้าวเหนียวดำเปลือกดำ และข้าวเหนียวพัทลุง มีค่าเท่ากับร้อยละ 4.13, 3.34 และ 2.61 ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าข้าวกล้องสังข์หยดจัดเป็นแหล่งอาหารที่มีปริมาณเยื่อใยสูง เมื่อพิจารณาปริมาณเถ้าในข้าวกล้องสังข์หยดจากการศึกษาพบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 1.40 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Inpun (2014) พบว่าปริมาณเถ้าในข้าวกล้องสังข์หยดเท่ากับร้อยละ 1.36 ในขณะที่การศึกษาของ Banchuen (2010) พบว่า ปริมาณเถ้าในข้าวกล้องสังข์หยดเท่ากับร้อยละ 1.20 เมื่อพิจารณาปริมาณอะไมโลสในข้าวกล้องสังข์หยดพบว่า ข้าวกล้องสังข์หยดมีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 14.64 สอดคล้องกับการศึกษาของ Sompong และคณะ (2011) รายงานปริมาณอะไมโลสในข้าวกล้องสังข์หยดเท่ากับร้อยละ 18.58 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสดำ (ร้อยละ 9-20) (Gomez, 1979) ซึ่งคุณสมบัติของข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสดำ เมื่อผ่านกระบวนการหุงสุกจะทำให้มีลักษณะนุ่มกว่าข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูง Yu และคณะ (2009) ศึกษาถึงผลของปริมาณอะไมโลส ต่อการเกิดริโทเกรเดชันและลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเมื่อผ่านการหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษา พบว่าข้าวสายพันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีอัตราการเกิดริโทเกรเดชันในระหว่างการเก็บรักษาสูง

กว่าข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ นอกจากนี้อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเมื่อผ่านการหุงสุกมีลักษณะแข็งกว่าข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ

Table 5 Chemical properties of Sangyod brown rice

Chemical properties	Sangyod brown rice
Moisture (%)	11.00±0.15
Protein (%)	6.28±0.04
Fat (%)	2.41±0.06
Fiber (%)	3.54±0.02
Ash (%)	1.40±0.08
Amylose (%)	14.64±0.81

1.3 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวกล้องสังข์หยด

การศึกษาสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวกล้องสังข์หยด ได้แก่ สมบัติทางความร้อน รูปแบบโครงสร้างและปริมาณผลึก และพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความหนืด โดยมีรายละเอียด ดังนี้

สมบัติทางความร้อนของข้าวกล้องสังข์หยด

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของข้าวกล้องสังข์หยด โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) เป็นการศึกษาสมบัติเจลาตินในเซชันของสตาร์ชในข้าว ซึ่งเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนร่วมกับสภาวะที่มีน้ำมากเกินไป และติดตามการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปีในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน โดยรายงานค่าในรูปของ อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลาตินในเซชัน (T_g) อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลาตินในเซชัน (T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลาตินในเซชัน (T_c) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปี (ΔH) พบว่า ในข้าวกล้องสังข์หยดจะมีค่า T_g , T_p , T_c และ ΔH เท่ากับ 76.73, 81.86, 88.01 องศาเซลเซียส และ 9.42 จูลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาของ Keawpeng และ Meenune (2012) พบว่าในข้าวกล้องสังข์หยดจะมีค่า T_g , T_p , T_c และ ΔH เท่ากับ 73.61, 79.38, 83.69 องศาเซลเซียส และ 8.08 จูลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ความแตกต่างของสมบัติทางความร้อนเป็นผลมาจากแหล่งปลูก อายุการเก็บรักษา รวมถึงองค์ประกอบภายในเมล็ดข้าว ซึ่งอะไมโลสเป็นองค์ประกอบที่มีบทบาทสำคัญต่อการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชในข้าว จากการศึกษาของ Varavinit และคณะ (2003) ถึงผลของปริมาณอะไมโลสต่อสมบัติการเกิดเจลาตินในเซชันในข้าวไทยจำนวน 11 สายพันธุ์ พบว่า ปริมาณอะไมโลสส่งผลสมบัติการ

เกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชในข้าว ($p < 0.05$) โดยข้าวสายพันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะส่งผลให้ค่า T_0 , T_p , T_c และ ΔH มีค่าสูงกว่าข้าวสายพันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ

รูปแบบโครงสร้างและปริมาณผลึก

การศึกษา รูปแบบโครงสร้างและปริมาณผลึก เป็นการศึกษา ลักษณะการจัดเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในรูปผลึก โดยลักษณะ โครงสร้างทางผลึกของสตาร์ชสามารถจำแนกตามรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction pattern) จากผลการศึกษา รูปแบบและ โครงสร้างผลึกของข้าวกล้องสังข์หยดแสดงดังภาพที่ 14 จะเห็นได้ว่า สตาร์ชของข้าวกล้องสังข์หยดจะมีรูปแบบผลึกชนิด A ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของอะไมโลเพคตินสายสั้น สามารถพบได้ในธัญพืช โดยปรากฏพีคหลักที่ตำแหน่ง 2θ ที่ตำแหน่ง 15, 17, 18 และ 23 องศา และมีปริมาณผลึกร้อยละ 30.68 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Keawpeng และ Meenune (2012) ถึงรูปแบบโครงสร้างและปริมาณผลึกของข้าวกล้องสังข์หยด พบว่า รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสตาร์ชข้าวกล้องสังข์หยดจะปรากฏพีคที่ 15.2, 17.0, 17.9 และ 22.9 องศา และมีปริมาณผลึกร้อยละ 38.74

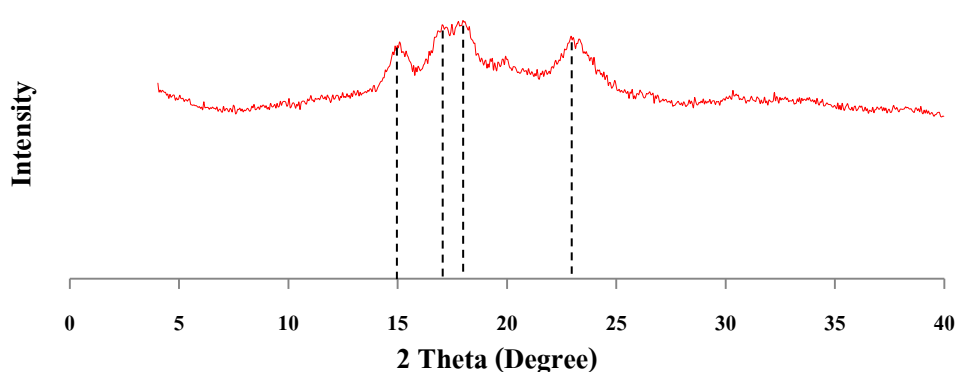


Figure 14 X-ray diffractogram of Sangyod brown rice

พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืด

สมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชเป็นสิ่งสำคัญที่บ่งชี้ถึงลักษณะของสตาร์ชในระหว่างกระบวนการแปรรูป ซึ่งคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดสามารถตรวจวัดได้โดยการใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงความหนืดในข้าวกล้องสังข์หยดจากการศึกษาจะรายงานค่าในรูปของความหนืดสูงสุด (PV) เป็นความหนืดที่เกิดขึ้นจากอัตราการพองตัวของสตาร์ชแกรนูลเท่ากับอัตราการแตกออกของสตาร์ชแกรนูล ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด เป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชและมี

ความสัมพันธ์กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ความหนืดสุดท้าย (FV) เป็นความหนืดของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความข้นหนืดหรือการเกิดเจลของสตาร์ช ค่าการคืนตัว (SBV) เป็นปรากฏการณ์การเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลส เป็นสิ่งบ่งชี้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (P_{temp}) เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นที่ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Adebowale and Lawal, 2003; Batey, 2007; Manaois, 2009) ภาพที่ 15 แสดงถึงพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงความหนืดในข้าวกล้องสังข์หยด พบว่า ในข้าวกล้องสังข์หยดมีค่า ความหนืดสูงสุด ความหนืดสุดท้าย และค่าการคืนตัว เท่ากับ 900.06 cP (75.05 RVU), 1,529.04 cP (127.42 RVU), 738.96 cP (61.58 RVU) ตามลำดับ อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด เท่ากับ 93.75 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม Keawpeng และ Meenune (2012) รายงานพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงความหนืดในข้าวกล้องสังข์หยด พบว่า ความหนืดสูงสุด เท่ากับ 118.62 RVU ความหนืดสุดท้าย เท่ากับ 247.72 RVU และอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด เท่ากับ 82.92 องศาเซลเซียส ซึ่งพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงความหนืดที่แตกต่างกันนั้นเป็นผลมาจากองค์ประกอบของโปรตีนและไขมันในข้าว โดยในระหว่างการเก็บรักษาโปรตีนในข้าวจะสร้างพันธะไดซัลไฟด์กับอะไมโลสในสตาร์ช ของข้าวจึงทำให้อะไมโลสมีความสามารถในการจับกับน้ำลดลง ทำให้ความหนืดของข้าวมีค่าลดลง (Tananuwong and Malila, 2011)

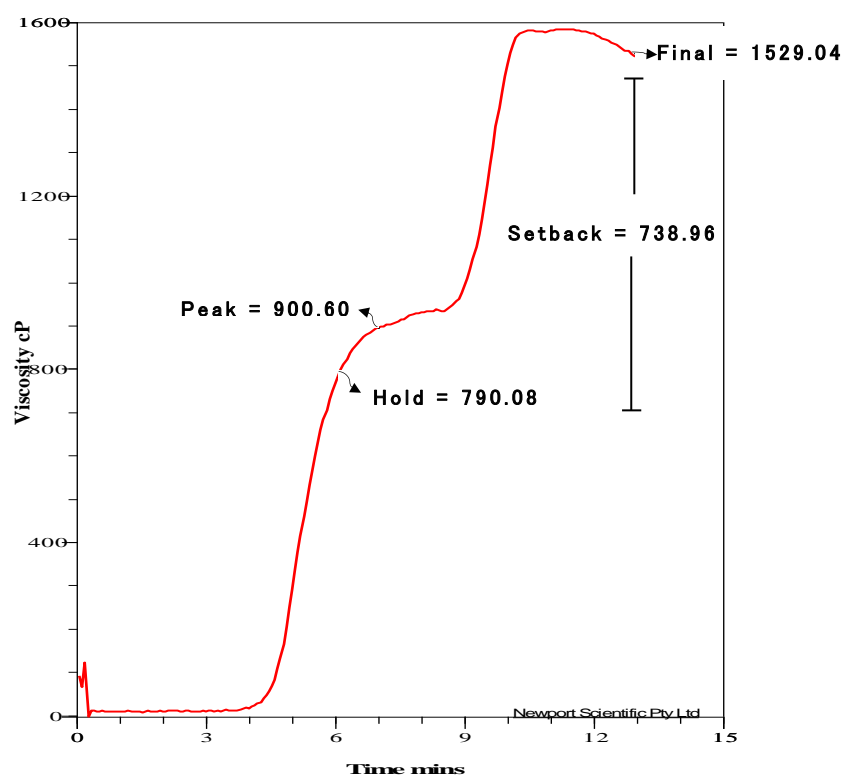


Figure 15 RVA profile of Sangyod brown rice

2. สภาพการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องสังข์หยด

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องสังข์หยด โดยกำหนดปัจจัยศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของเอทานอล (ร้อยละ 0, 45 และ 90 ปริมาตรโดยปริมาตร) ความเข้มข้นของกรดซิตริก (ร้อยละ 0, 2.5 และ 5 น้ำหนักโดยปริมาตร) และเวลาการสกัด (1, 12.5 และ 24 ชั่วโมง) จากนั้นจึงนำสารสกัดที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และทางเคมี โดยมีรายละเอียดผลการศึกษา ดังนี้

2.1 สมบัติทางกายภาพของสารสกัด

สารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องสังข์หยดถูกนำมาวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIE Hunter Lab โดยรายงานผลออกมาในรูปของค่า L^* , a^* , b^* , Hue angle และ Chroma (ภาคผนวก ก. ตารางภาคผนวกที่ 1) จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของเอทานอล กรดซิตริก และเวลาการสกัดมีผลต่อค่าสีของสารสกัด ($p < 0.05$) โดยเมื่อความเข้มข้นของเอทานอล กรดซิตริก และเวลาการสกัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า L^* และ b^* ลดลง (ภาพที่ 16 และ 18) ในขณะที่ a^* เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 17) ส่วนค่า Hue angle และค่า Chroma ลดลง (ภาพที่ 19 และ 20) จากผลการศึกษายืนยันได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นจะทำให้สารสกัดที่มีเม็ดสีไปทางสีแดงมากขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของเอทานอลลดลงจะทำให้ได้สารสกัดที่มีเม็ดสีเหลือง ($p < 0.05$) โดยเฉพาะเอทานอลที่มีการเติมกรดซิตริกจะทำให้ได้สารสกัดที่มีเม็ดสีแดงเพิ่มมากขึ้น (ค่า Hue angle เข้าใกล้ 0 องศา แสดงเม็ดสีแดง และเข้าใกล้ 90 องศา แสดงเม็ดสีเหลือง) ในขณะที่สารสกัดที่ไม่มีการเติมกรดจะทำให้สารสกัดมีเม็ดสีเหลือง เมื่อพิจารณาผลของเวลาการสกัด พบว่า เวลาการสกัดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ได้สารสกัดที่มีเม็ดสีแดงมากขึ้น ($p < 0.05$) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของเอทานอล กรดซิตริก และเวลาการสกัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสีของสารสกัดมีแนวโน้มเป็นสีแดงมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามสภาวะที่ความเข้มข้นของเอทานอลลดลงและไม่มีการร่วมกับเวลาการสกัดที่ลดลงจะทำให้สารสกัดมีแนวโน้มเป็นสีเหลืองมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในข้าวกล้องสังข์หยดมีองค์ประกอบของแอนโทไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุที่อยู่ในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดทำให้เมล็ดข้าวกล้องมีสีแดง (สำโรง แซ่ตัน และรุจิรา ปริษา, 2548) ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมจะทำให้ได้ปริมาณสารสกัดของแอนโทไซยานินมากขึ้น ซึ่งความแตกต่างของค่าสีของสารสกัดที่ได้จากข้าวกล้องสังข์หยดเป็นผลมาจากแอนโทไซยานินมีความสามารถในการละลายในสภาวะการสกัดที่แตกต่างกัน เมื่ออัตราส่วนของน้ำในตัวทำละลายเพิ่มขึ้นจะทำให้โครงสร้างของฟลาวิลเลียมซึ่งเดิมอยู่ในรูปโมโนเมอร์และมีสีแดงเกิดการจับกับโมเลกุลของน้ำ เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไดเมอร์มากขึ้น ส่งผลให้เปลี่ยนเป็นสีเหลืองมากขึ้น ส่วนการใช้กรดร่วมในการสกัดเป็นสภาวะที่ทำให้ฟลาวิลเลียมไอออนมีความคงตัว

และมีสีแดง (Castaneda-Ovando *et al.*, 2009) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ นิพัทธา ชาติสุวรรณ และ วริพัทธ์ อารีกุล (2553) ที่ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของปริมาณแอนโทไซยานินกับค่าสีของสารสกัดจากข้าว 51 สายพันธุ์ โดยการวัดค่าสีในระบบ CIE และรายงานผลในรูปของค่า L^* , a^* , b^* , Hue angle และ Chroma พบว่า ค่า L^* , b^* และ Chroma มีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณแอนโทไซยานิน Maisuthisakul และ Changchub (2012) ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าสีและปริมาณแอนโทไซยานิน ในข้าวไทย 9 สายพันธุ์ พบว่า เมื่อค่า a^* เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Hue angle ลดลง ($p < 0.01$) และสอดคล้องกับการศึกษาของ Yafang และคณะ (2011) ที่พบว่า ค่า a^* และค่า Hue angle มีความสัมพันธ์เชิงลบกัน ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดงและปริมาณแอนโทไซยานินมีความสัมพันธ์เชิงบวกกัน ($p < 0.01$) นั่นคือ เมื่อปริมาณแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเป็นสีแดงของสารสกัดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าสีของสารสกัดแอนโทไซยานินถูกนำมาคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของเอทานอล กรดซิตริก และเวลาการสกัดต่อค่าสี พบว่า สมการทางคณิตศาสตร์ของค่าสีมีค่าดังนี้

$$L^* = 67.53 - 2.26X_1 - 0.46X_2 - 0.70X_3 - 0.15X_1X_2 - 0.26X_1X_3 - 0.16X_2X_3 - 0.97X_1^2 + 0.26X_2^2 + 0.62X_3^2$$

$$a^* = 6.62 + 0.64X_1 + 0.23X_2 + 0.22X_3 + 0.017X_1X_2 + 0.007X_1X_3 + 0.085X_2X_3 - 0.042X_1^2 - 0.22X_2^2 - 0.34X_3^2$$

$$b^* = 11.38 - 1.12X_1 - 0.50X_2 - 0.16X_3 + 0.20X_1X_2 - 0.10X_1X_3 + 0.19X_2X_3 + 0.25X_1^2 + 0.20X_2^2 + 0.18X_3^2$$

$$\text{Hue angle} = 60.02 - 4.81X_1 - 1.77X_2 - 1.15X_3 + 0.10X_1X_2 - 0.27X_1X_3 + 0.050X_2X_3 + 0.97X_1^2 + 0.86X_2^2 + 1.27X_3^2$$

$$\text{Chroma} = 13.17 - 0.69X_1 - 0.34X_2 - 0.039X_3 + 0.22X_1X_2 - 0.074X_1X_3 + 0.21X_2X_3 + 0.26X_1^2 + 0.065X_2^2 - 0.004X_3^2$$

จากตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าสมการทางคณิตศาสตร์ของค่า a^* , b^* , Hue angle และ Chroma เป็นแบบกำลังสอง (Quadratic model) โดยสมการทางคณิตศาสตร์มีค่า p -value อยู่ในช่วง $< 0.0001 - 0.0015$ สมการจึงสามารถอธิบายผลของปัจจัยที่มีต่อค่าการตอบสนองได้ (Model, $p < 0.05$) มีค่าสหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ในช่วง $0.9982 - 0.9994$ และสมการทางคณิตศาสตร์ของค่า L^* , a^* , b^* และ Hue angle มีค่า Lack of fit อยู่ในช่วง $0.057 - 3.76$ แสดงว่า สมการทางคณิตศาสตร์ไม่มีความบกพร่อง (Lack of fit, $p \geq 0.05$) แต่อย่างไรก็ตาม สมการทางคณิตศาสตร์ของค่า Chroma มีค่าเท่ากับ 0.037 แสดงว่า สมการทางคณิตศาสตร์มีความบกพร่อง (Lack of fit, $p < 0.05$) จึงไม่สามารถนำสมการทางคณิตศาสตร์ของค่า Chroma มาใช้ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมได้ ดังนั้น สมการทางคณิตศาสตร์ของค่า a^* , b^* และ Hue angle จึงสามารถนำมาใช้ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องสังข์หยดได้

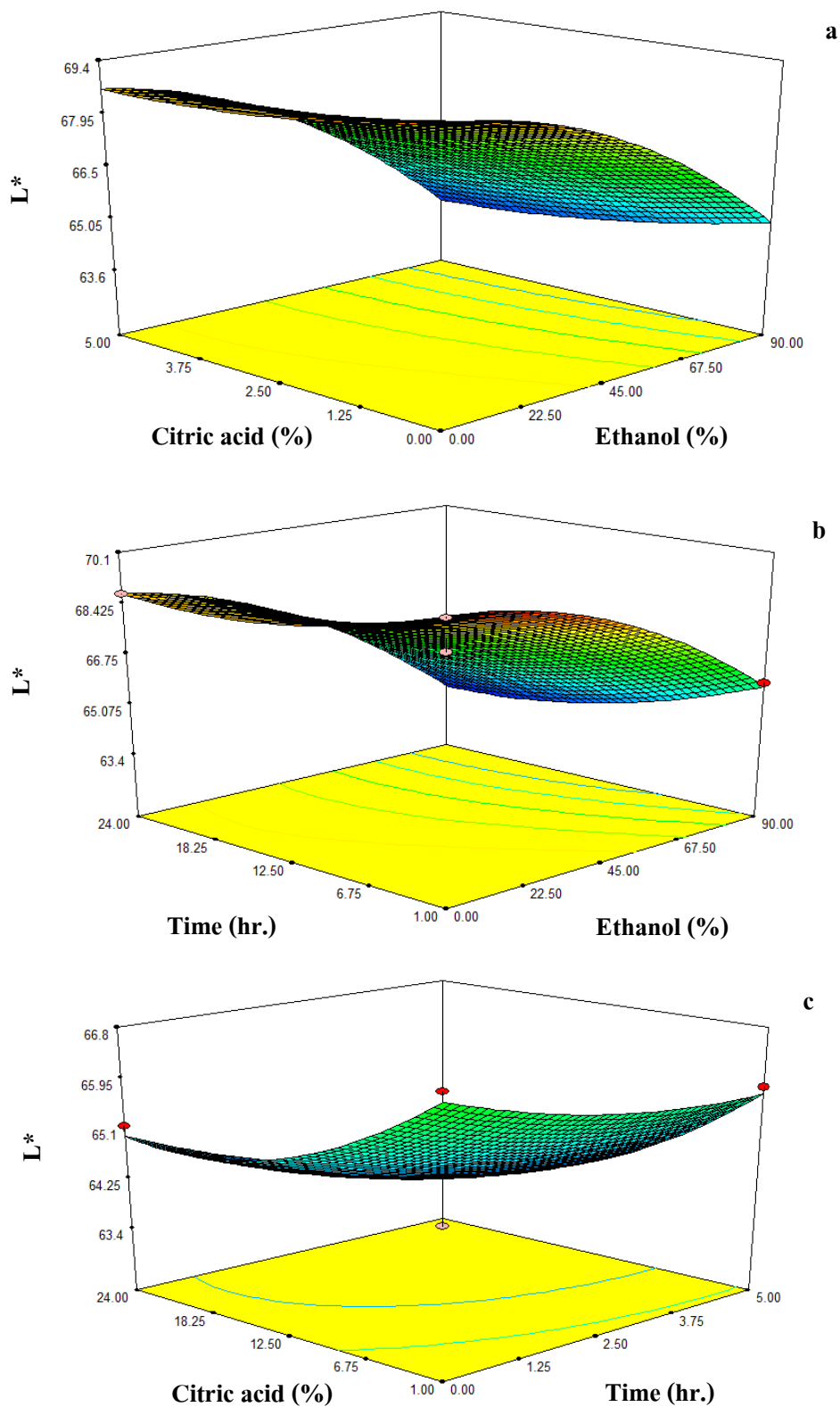


Figure 16 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on L* of Sangyod brown rice extract

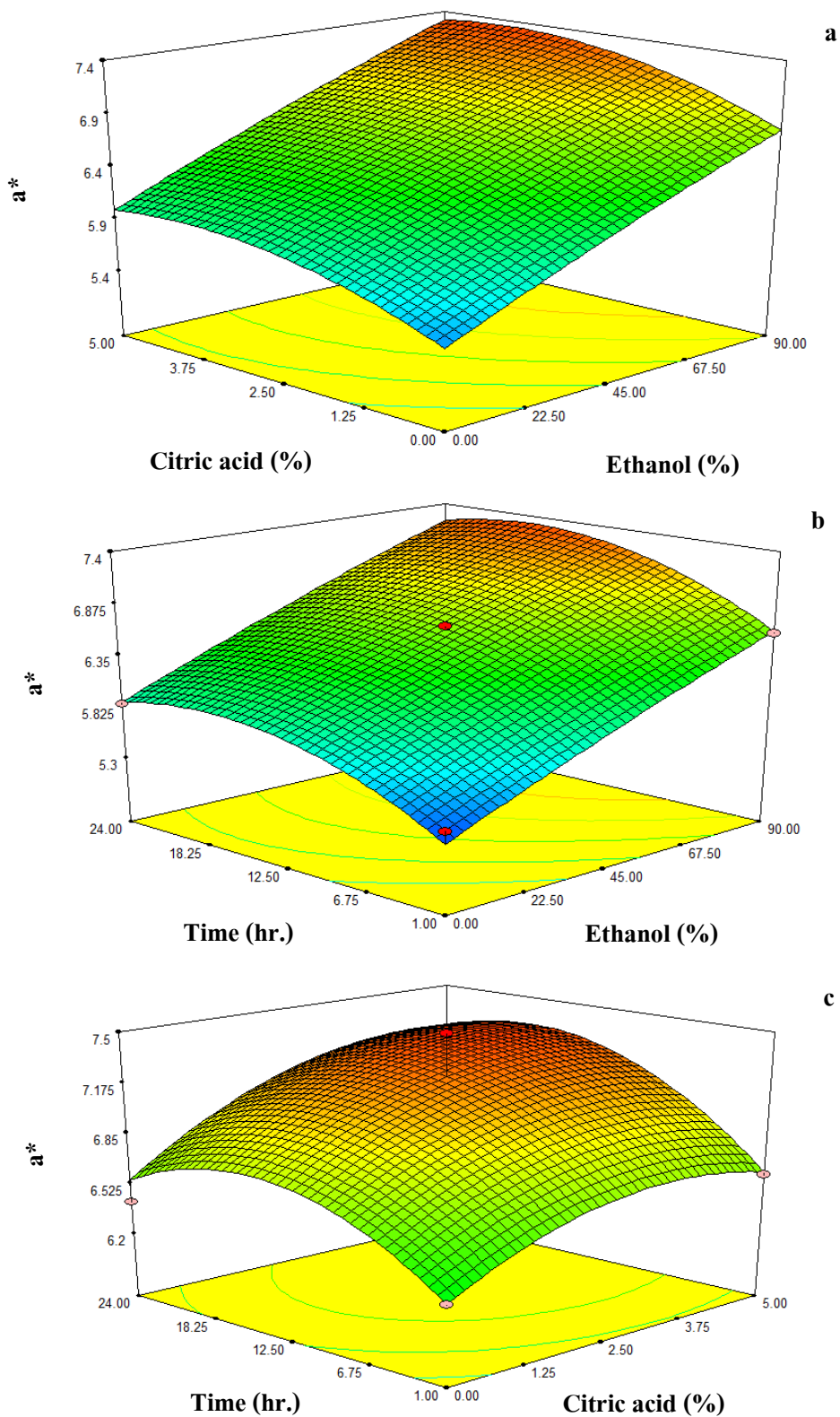


Figure 17 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on a^* of Sangyod brown rice extract

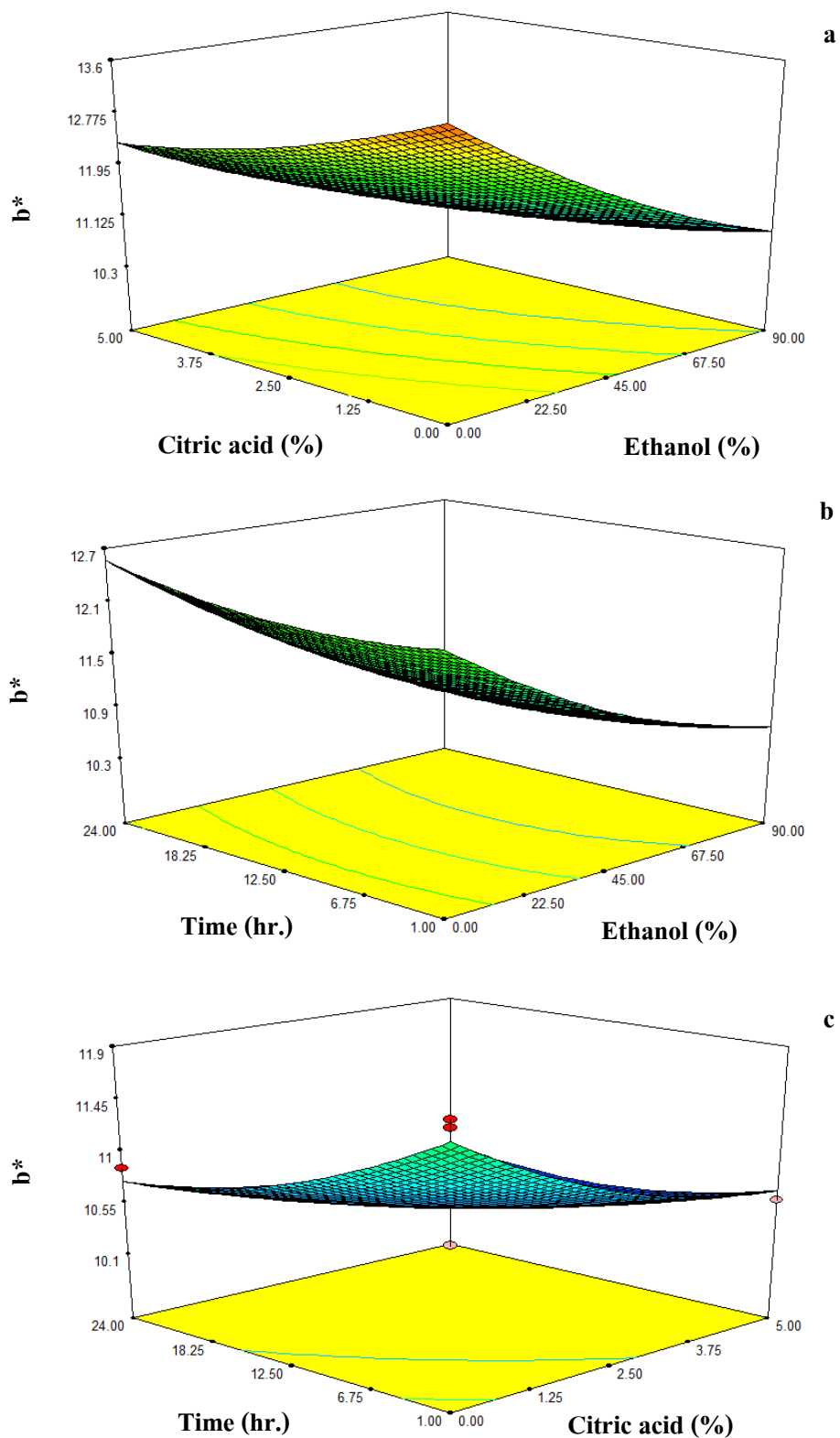


Figure 18 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on b^* of Sangyod brown rice extract

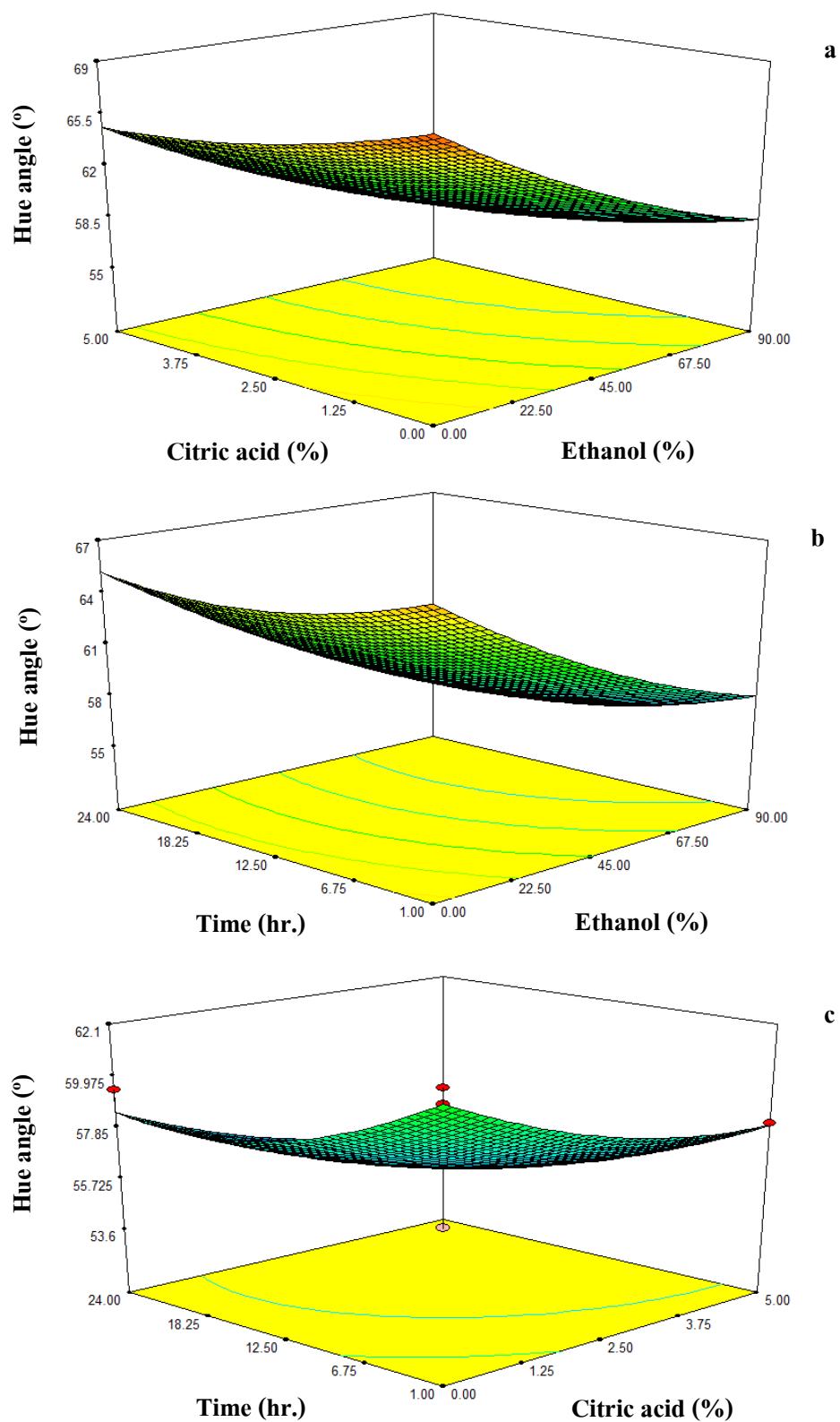


Figure 19 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on hue angle of Sangyod brown rice extract

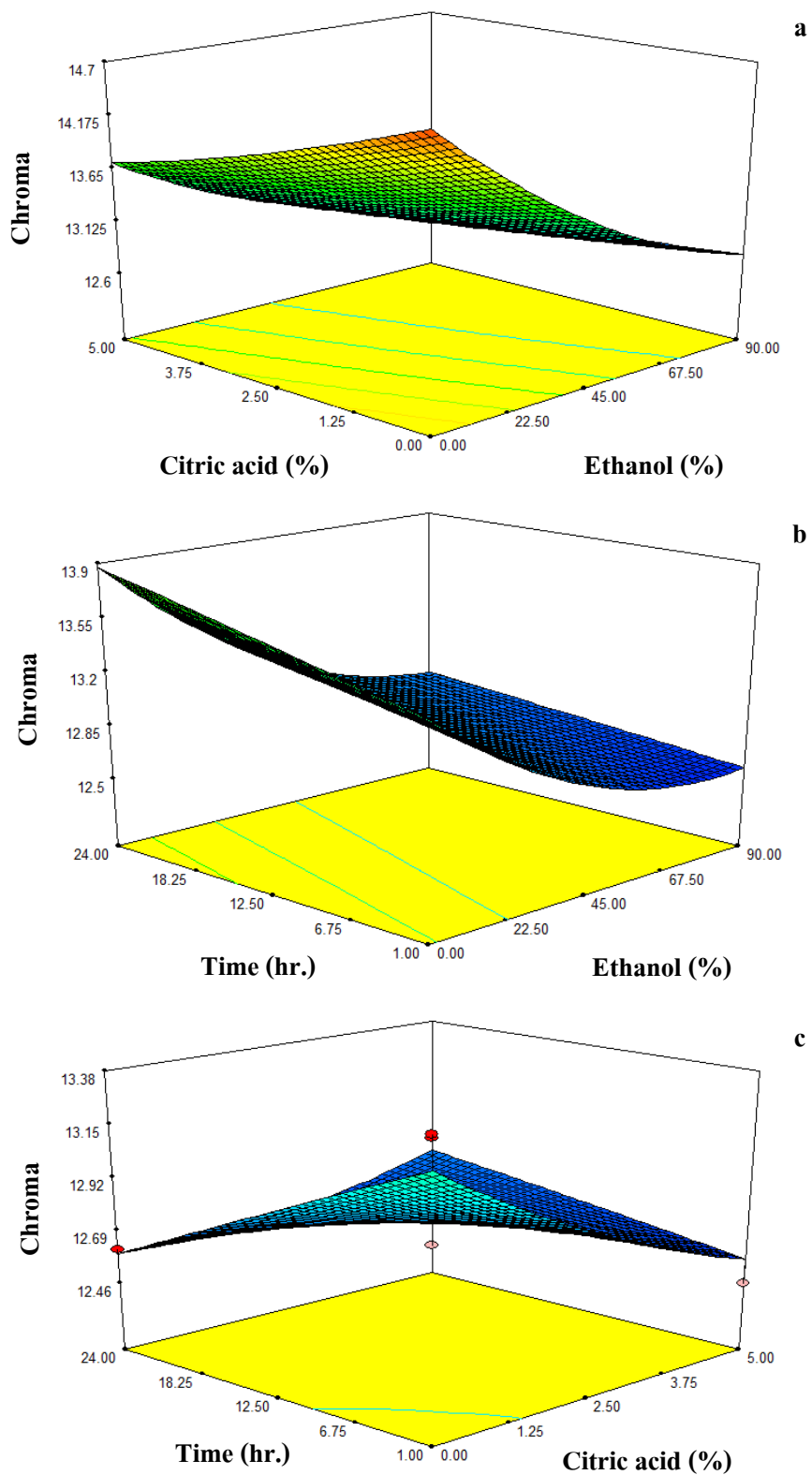


Figure 20 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on chroma of Sangyod brown rice extract

Table 6 The regression parameter coefficients physical properties using independent variables ethanol (X_1), citric acid (X_2) and extraction time (X_3) for color of Sangyod brown rice

Parameters	Regression parameter coefficients of product responses				
	L*	a*	b*	Hue angle	Chroma
Intercept	67.53	6.62	11.38	60.02	13.17
Ethanol (X_1)	-2.26	0.64	-1.12	-4.81	-0.69
Citric acid (X_2)	-0.46	0.23	-0.50	-1.77	-0.34
Extraction time (X_3)	-0.70	0.22	-0.16	-1.15	-0.039
Ethanol \times Citric acid (X_1X_2)	-0.15	0.017	0.20	0.10	0.22
Ethanol \times Extraction time (X_1X_3)	-0.26	0.007	-0.10	-0.27	-0.074
Citric acid \times Extraction time (X_2X_3)	-0.16	0.085	0.19	0.050	0.21
Ethanol \times Ethanol (X_1^2)	-0.97	-0.042	0.25	0.97	0.26
Citric acid \times Citric acid (X_2^2)	0.26	-0.22	0.20	0.86	0.065
Extraction time \times Extraction time (X_3^2)	0.62	-0.34	0.18	1.27	-0.004
<i>p</i> -value for model	0.0003	0.0006	0.0001	0.0015	<0.0001
R^2	0.9986	0.9991	0.9988	0.9994	0.9982
<i>p</i> -value for lack of fit	0.45	0.057	0.10	3.76	0.037

2.2 สมบัติทางเคมีของสารสกัด

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของเอทานอล กรดซิตริก และเวลาการสกัดต่อปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (ภาคผนวก ก. ตารางภาคผนวกที่ 2) เมื่อพิจารณาปริมาณแอนโทไซยานินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Abdel and Hulc และ วิธีพีเอชดีฟเฟอเรนเทียล พบว่า ปริมาณแอนโทไซยานินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Abdel and Hulc มีค่าระหว่าง 12.46-15.56 มิลลิกรัมของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธีพีเอชดีฟเฟอเรนเทียล ทำให้ได้ปริมาณแอนโทไซยานิน 0.30-0.44 มิลลิกรัมของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง Keawpeng และ Meenune (2012) รายงานปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวกล้องงอกสังข์หยด ที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร มีค่าเท่ากับ 15.60 มิลลิกรัมของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง จากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าพีเอชดีฟเฟอเรนเทียล จะทำให้ได้ปริมาณแอนโทไซยานินน้อยกว่าวิธีของ Abdel and Hulc ทั้งนี้เนื่องมาจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพีเอชดีฟเฟอเรนเทียล เป็นวิธีที่ใช้หลักความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสงของแอนโทไซยานิน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย เนื่องจากโครงสร้างของแอนโทไซยานิน จะเปลี่ยนแปลงเมื่อความเป็นกรด-ด่างเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงของแอนโทไซยานินเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยแอนโทไซยานินที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 1 จะมีโครงสร้างของอยู่ในรูปฟลาวิลเลียม ซึ่งมีสีแดงและมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 520 นาโนเมตร เมื่อความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 จะทำให้แอนโทไซยานินอยู่ในรูปคาร์บินอลเบส ซึ่งเป็นรูปที่ไม่มีสี จึงไม่มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร หากมีสารรบกวนอื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่าง การดูดกลืนแสงของสารนั้นก็ยังคงอยู่ ดังนั้น จึงสามารถนำค่าการดูดกลืนแสงที่ปรากฏขึ้นในสารละลายที่ความเป็นกรด-ด่าง 4.5 มาหักลบในการคำนวณ จึงทำให้ได้ปริมาณแอนโทไซยานินที่ตรงกับความเป็นจริง ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Abdel and Hulc จะวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดโดยตรง ดังนั้นหากมีสารอื่นซึ่งเป็นสารรบกวนที่สามารถดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่นเดียวกับแอนโทไซยานิน ทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินมากกว่าความเป็นจริง (Wrolstad *et al.*, 2005; Castaneda-Ovando *et al.* 2009) Lee และคณะ (2008) ศึกษาความสัมพันธ์ของวิธีพีเอชดีฟเฟอเรนเทียล และ HPLC ในการหาปริมาณแอนโทไซยานินในน้ำผลไม้ พบว่า ปริมาณแอนโทไซยานินจากวิธีพีเอชดีฟเฟอเรนเทียล และ HPLC มีค่าความสัมพันธ์กันในระดับสูง ($R \geq 0.925$, $p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hosseini และคณะ (2008) เกี่ยวกับการวิเคราะห์แอนโทไซยานินในข้าวสาลีสีม่วง โดยวิธี HPLC, LC-MS/MS และ วิธีพีเอชดีฟเฟอเรนเทียล พบว่า การใช้วิธีพีเอชดีฟเฟอเรนเทียลจะทำให้ได้ปริมาณแอนโทไซยานินไม่แตกต่างกับการวิเคราะห์ด้วย HPLC ($p > 0.05$) ดังนั้น วิธีพีเอชดีฟเฟอเรนเทียล จึงเป็นวิธีที่สามารถนำมาใช้ในการ

หาปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดได้ เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC อีกทั้งยังเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว และต้นทุนในการวิเคราะห์ไม่สูง เมื่อพิจารณาผลของสภาวะของการสกัดต่อปริมาณแอนโทไซยานิน พบว่า ความเข้มข้นของเอทานอล กรดซิตริก และเวลาการสกัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Abdel and Hulc และ วิธีพีเอชดีเฟอเรนเทียลเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 21 และ 22) เนื่องจากโครงสร้างของไซยานิดินประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 2 หมู่ที่ตำแหน่ง 3' และ 4' และเกิดพันธะกับไฮโดรเจนที่ตำแหน่ง 5' ดังนั้น การละลายของไซยานิดินจึงเกิดได้ดีในเอทานอล (Demian, 1999; Francis, 1989) และความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นจะทำให้ความมีขั้วของตัวทำละลายใกล้เคียงกับความเป็นขั้วของแอนโทไซยานิน ส่งผลให้การละลายของแอนโทไซยานินเกิดได้ดีขึ้น (Dai and Mumper, 2010) เมื่อพิจารณาผลของการเติมกรดซิตริก พบว่า ความเข้มข้นของกรดซิตริกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณแอนโทไซยานินที่ได้จากการสกัดเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) เนื่องจากกรดจะทำหน้าที่ทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้การละลายของแอนโทไซยานินออกจากเซลล์ได้ง่ายขึ้น (Anderson and Jordheim, 2006) Pedro และคณะ (2015) รายงานว่าใช้เอทานอลร่วมกับกรดซิตริกเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมต่อการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวสาลีดำ (*O. sativa* L.) เมื่อพิจารณาความเป็นกรด-ด่างของสารสกัด พบว่า ตัวทำละลายที่ไม่มีการเติมกรดจะมีค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 5.92-5.44 ในขณะที่ตัวทำละลายที่มีการเติมกรดจะมีค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 2.44-2.10 โดยระดับความเป็นกรด-ด่างที่ 2.10 จะทำให้ได้ปริมาณแอนโทไซยานินสูงที่สุด ($p < 0.05$) และปริมาณแอนโทไซยานินที่น้อยที่สุดพบในตัวทำละลายที่มีระดับความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.92 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับความเป็นกรด-ด่างส่งผลให้โครงสร้างของฟลาโวลีเนียมแคทไอออนเปลี่ยนไปอยู่ในรูปควิโนยด์ ซึ่งป็นรูปที่ไม่เสถียรและสามารถจับกับ โมเลกุลของน้ำเกิดเป็นซูโดเบสคาร์บินอลและซาโคล ซึ่งเป็นรูปที่ไม่มีสี (Bakker and Timberlake, 1985; Revilla *et al.*, 1998; Bakowska *et al.*, 2003; Wrolstad *et al.*, 2005) Sui และคณะ (2014) ศึกษาผลของระดับความเป็นกรด-ด่าง (2.2-6.0) ต่อความคงตัวของแอนโทไซยานินสกัดได้จากข้าวสาลีดำ พบว่า เมื่อระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความคงตัวของแอนโทไซยานินลดลง Kang และคณะ (2014) รายงานว่าเอทานอลร้อยละ 70 ที่ระดับความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 1 จะให้ปริมาณแอนโทไซยานินจากข้าวสาลีดำ (*O. sativa* L. Heugjinjubyeo) สูงที่สุด จากผลการวิเคราะห์ เมื่อพิจารณาผลของเวลาในการสกัด พบว่า เมื่อเวลาการสกัดเพิ่มขึ้นทำให้ได้ปริมาณแอนโทไซยานินเพิ่มมากขึ้น ($p < 0.05$) จากการศึกษาของ Thao และคณะ (2015) เกี่ยวกับระดับเวลาที่ใช้ในการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวสีม่วงของเวียดนาม โดยใช้เวลาในการสกัดตั้งแต่ 1-3 ชั่วโมง พบว่า เวลาการสกัดที่ 1.5-2.5 ชั่วโมง จะทำให้ได้ปริมาณแอนโทไซยานินสูงที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มเวลาการสกัดที่มากกว่า 2.5 ชั่วโมง จะทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินลดลง เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของโครงสร้างแอนโทไซยานินในระหว่างการสกัด

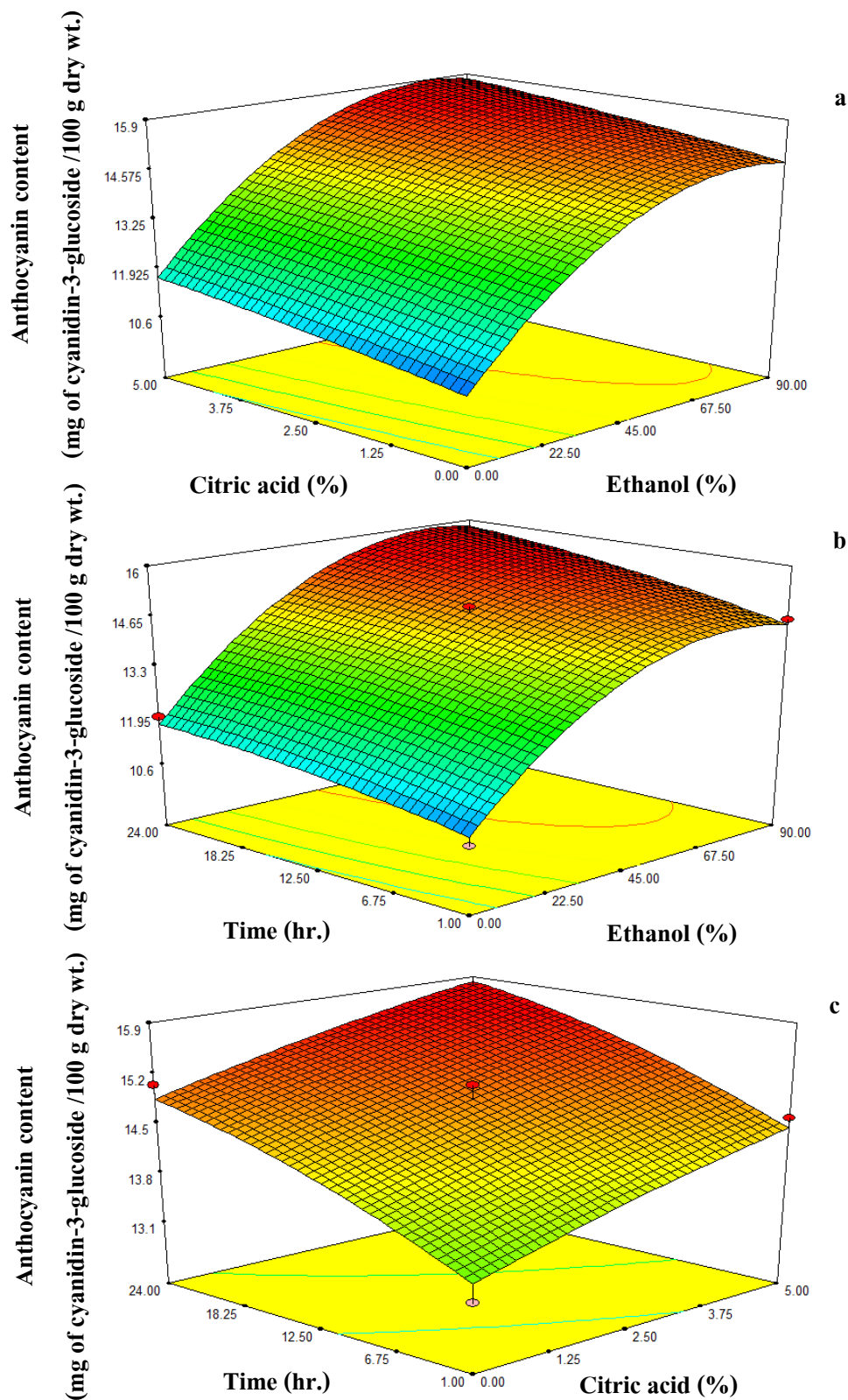


Figure 21 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on anthocyanin content determine by Abdel and Hulc method of Sangyod brown rice extract

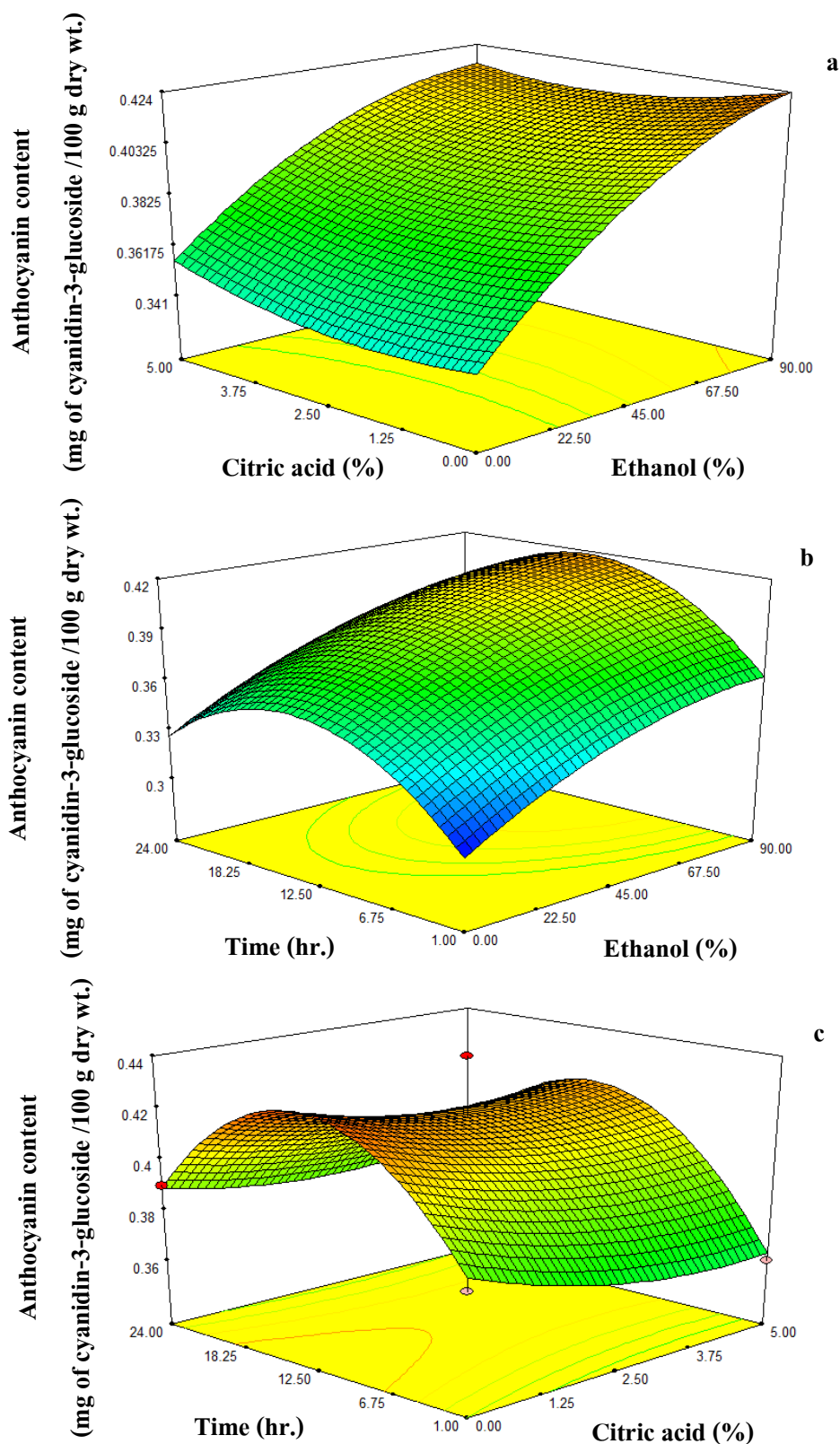


Figure 22 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on anthocyanin content determine by pH differential method of Sangyod brown rice extract

การศึกษาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในสารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องสังข์หยดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ซึ่งรายงานผลในรูปมิลลิกรัมของกรดเฟอรูลิก และศึกษาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และรายงานผลในรูปร้อยละของการต้านอนุมูลอิสระ DPPH พบว่า เมื่อความเข้มข้นของเอทานอล กรดซิตริก และเวลาการสกัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) (ภาพที่ 23 และ 24) โดยปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าระหว่าง 225.74-249.62 มิลลิกรัมของกรดเฟอรูลิกต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีค่าระหว่างร้อยละ 60.52-68.43 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดจะมีความเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายของสารประกอบฟีนอลิกที่เป็นองค์ประกอบในข้าวกล้องสังข์หยด ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกนี้จะหมายรวมถึงแอนโทไซยานินและกรดฟีนอลิก ดังนั้นจากการศึกษาจะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของเอทานอลที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดที่ได้มีค่าแตกต่างกัน ($p < 0.05$) และเวลาการสกัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณฟีนอลิกเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ในทางตรงกันข้ามในตัวทำละลายที่ไม่มีกรดเวลาการสกัดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดลดลง ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องมาจากการสารประกอบฟีนอลิกเป็นสารที่สามารถละลายตัวได้ง่าย ดังนั้นจึงสามารถเกิดการออกซิเดชันได้ในระหว่างกระบวนการสกัด นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณฟีนอลิกทำให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมีแนวโน้มเพิ่มตามไปด้วย ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากข้าวกล้องสังข์หยดนั้นจะมีแนวโน้มสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณแอนโทไซยานิน เนื่องจากแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่จัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิกและพบมากในกลุ่มข้าวที่มีสีแดง เช่น ข้าวสังข์หยด (Sompong *et al.*, 2011) จากการศึกษาของ Yodmanee และคณะ (2011) เกี่ยวกับปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด แอนโทไซยานินและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS⁺ ในข้าวมีสี พบว่า ในตัวอย่างข้าวมีสีที่มีปริมาณแอนโทไซยานิน และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระทั้งวิธี DPPH และ ABTS⁺ เพิ่มขึ้นด้วย ($p < 0.05$) ดังนั้น สภาวะการสกัดที่ทำให้ได้ปริมาณแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้นด้วย ตลอดจนฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระก็จะเพิ่มสูงขึ้น จากการศึกษาของ Sompong และคณะ (2011) เกี่ยวกับปริมาณของกรดฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากข้าวสีดำและสีแดงที่ได้จากไทย จีน และศรีลังกา พบว่า ข้าวสีแดงสายพันธุ์ไทยจะมีปริมาณฟีนอลิกสูงสุด และสอดคล้องกับฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่สูงสุด ($p < 0.05$) โดยกรดฟีนอลิกที่พบมากในข้าวสีแดง ได้แก่ กรดเฟอรูลิก กรดโปรโตแคทชอลิก และกรดวานิลลิก สารฟีนอลิกที่พบในข้าวส่วนใหญ่จะพบมากในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด (Tian *et al.*, 2004) ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกกำจัดในระหว่างกระบวนการขัดสี Butsat และ Siriamompun (2010) ศึกษาหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

ของสารสกัดจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากส่วนของเปลือก (แกลบ) เยื่อหุ้มเมล็ด (รำ) ข้าวกล้อง และข้าวขัดขาว พบว่า ส่วนของเปลือกมีปริมาณฟีนอลิกสูงที่สุด โดยส่วนใหญ่จะพบกรดวานิลลิกและกรดพาราคูมาริก ในขณะที่ส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดหรือรำข้าวจะพบกรดเพอรูติกเป็นส่วนใหญ่ ($p < 0.05$) ซึ่งปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกที่มากขึ้นส่งผลให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นข้าวกล้องสังข์หยดจึงจัดเป็นแหล่งของสารอาหารที่อุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น แอนโทไซยานิน และกรดฟีนอลิก ซึ่งมีผลต่อการต้านอนุมูลอิสระอันจะเป็นประโยชน์ต่อร่างกาย นอกจากนี้ค่าคุณภาพทางเคมีของสารสกัดแอนโทไซยานินถูกนำมาคำนวณหาสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของเอทานอล กรดซิตริก และเวลาในการสกัดต่อสมบัติทางเคมีของสารสกัด พบว่า สมการทางคณิตศาสตร์ของสมบัติทางเคมีมีค่าดังนี้

$$\text{Anthocyanin content (Abdel and Hulc method)} = 14.38 + 1.94 X_1 + 0.48 X_2 + 0.54 X_3 - 0.055 X_1 X_2 + 0.082 X_1 X_3 - 0.073 X_2 X_3 - 1.25 X_1^2 - 0.19 X_2^2 - 0.28 X_3^2$$

$$\text{Anthocyanin content (pH differential method)} = 0.39 + 0.035 X_1 - 0.001 X_2 + 0.007 X_3 - 0.005 X_1 X_2 + 0.0 X_1 X_3 + 0.005 X_2 X_3 - 0.013 X_1^2 + 0.007 X_2^2 - 0.043 X_3^2$$

$$\text{Phenolic content} = 239.61 + 6.05 X_1 + 3.24 X_2 + 2.97 X_3 + 0.92 X_1 X_2 + 1.55 X_1 X_3 - 0.26 X_2 X_3 - 1.53 X_1^2 + 0.97 X_2^2 - 3.39 X_3^2$$

$$\text{DPPH free radical scavenging activity} = 66.22 + 1.99 X_1 + 0.57 X_2 + 1.05 X_3 + 0.14 X_1 X_2 + 0.30 X_1 X_3 + 0.11 X_2 X_3 - 1.11 X_1^2 + 0.52 X_2^2 - 1.80 X_3^2$$

จากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่า สมการทางคณิตศาสตร์ของปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel and Hulc วิธีพีเอชดิฟเฟอเรนเทียล ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ เป็นแบบสมการกำลังสอง (Quadratic model) โดยสมการทางคณิตศาสตร์มีค่า p -value อยู่ในช่วง $< 0.0001 - 0.0058$ สมการทางคณิตศาสตร์จึงสามารถอธิบายผลของปัจจัยที่มีต่อการตอบสนองได้ (Model, $p < 0.05$) มีค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ระหว่าง 0.9885-0.9988 และสมการทางคณิตศาสตร์ของ ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel and Hulc ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ มีค่า Lack of fit อยู่ในช่วง 0.23-1.50 ซึ่งสมการทางคณิตศาสตร์ไม่มีความบกพร่อง (Lack of fit, $p \geq 0.05$) อย่างไรก็ตามสมการทางคณิตศาสตร์ของปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีพีเอชดิฟเฟอเรนเทียล มีค่า Lack of fit เท่ากับ 0.000427 แสดงว่า สมการทางคณิตศาสตร์มีความบกพร่อง (Lack of fit, $p < 0.05$) จึงไม่สามารถนำสมการทางคณิตศาสตร์ของปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีพีเอชดิฟเฟอเรนเทียลมาใช้ในการทำนายสถานะที่เหมาะสมได้ ดังนั้น สมการทางคณิตศาสตร์ของปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel and Hulc ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ จึงสามารถนำมาใช้ในการทำนายสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องสังข์หยด

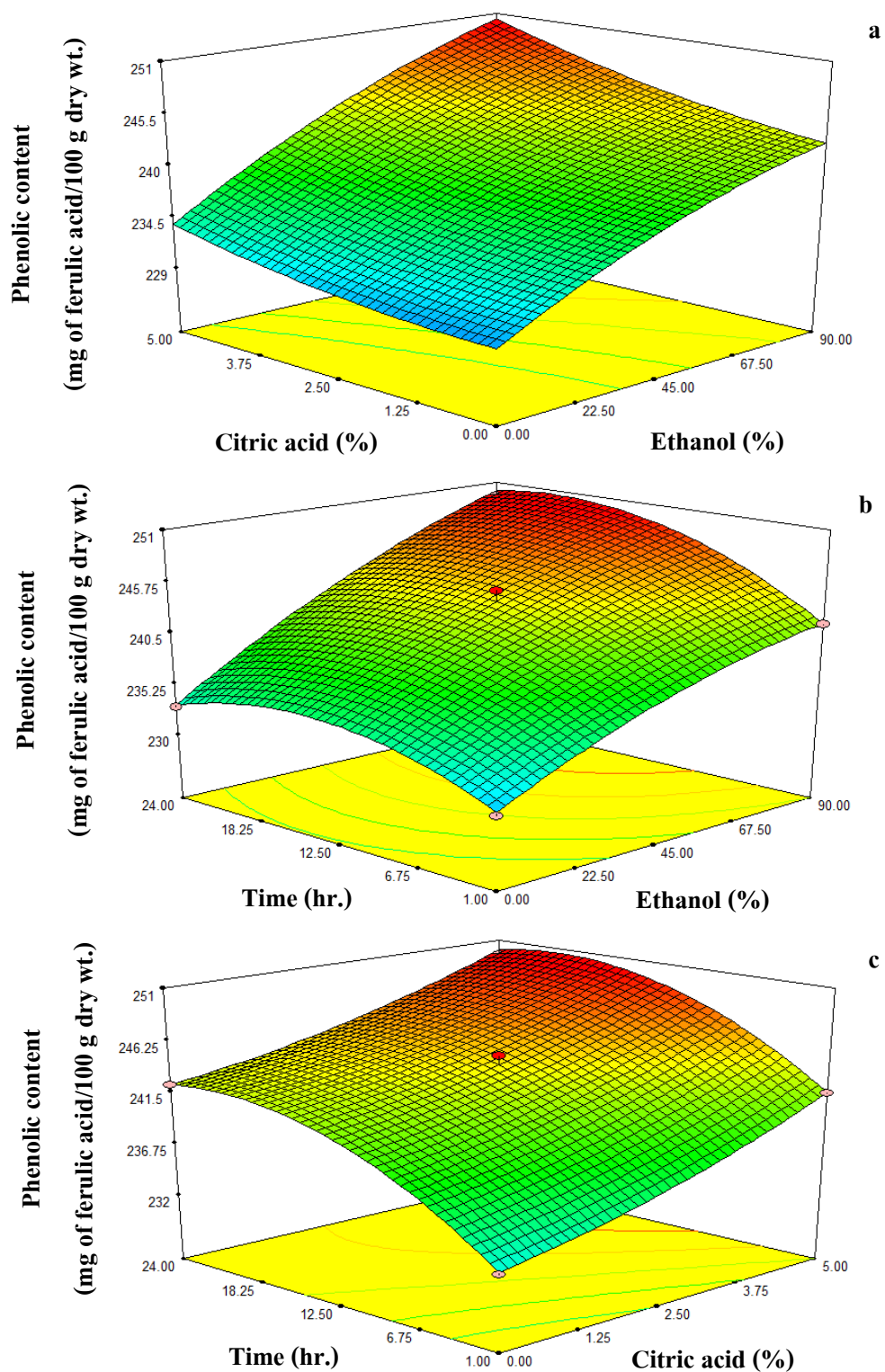


Figure 23 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on phenolic content of Sangyod brown rice extract

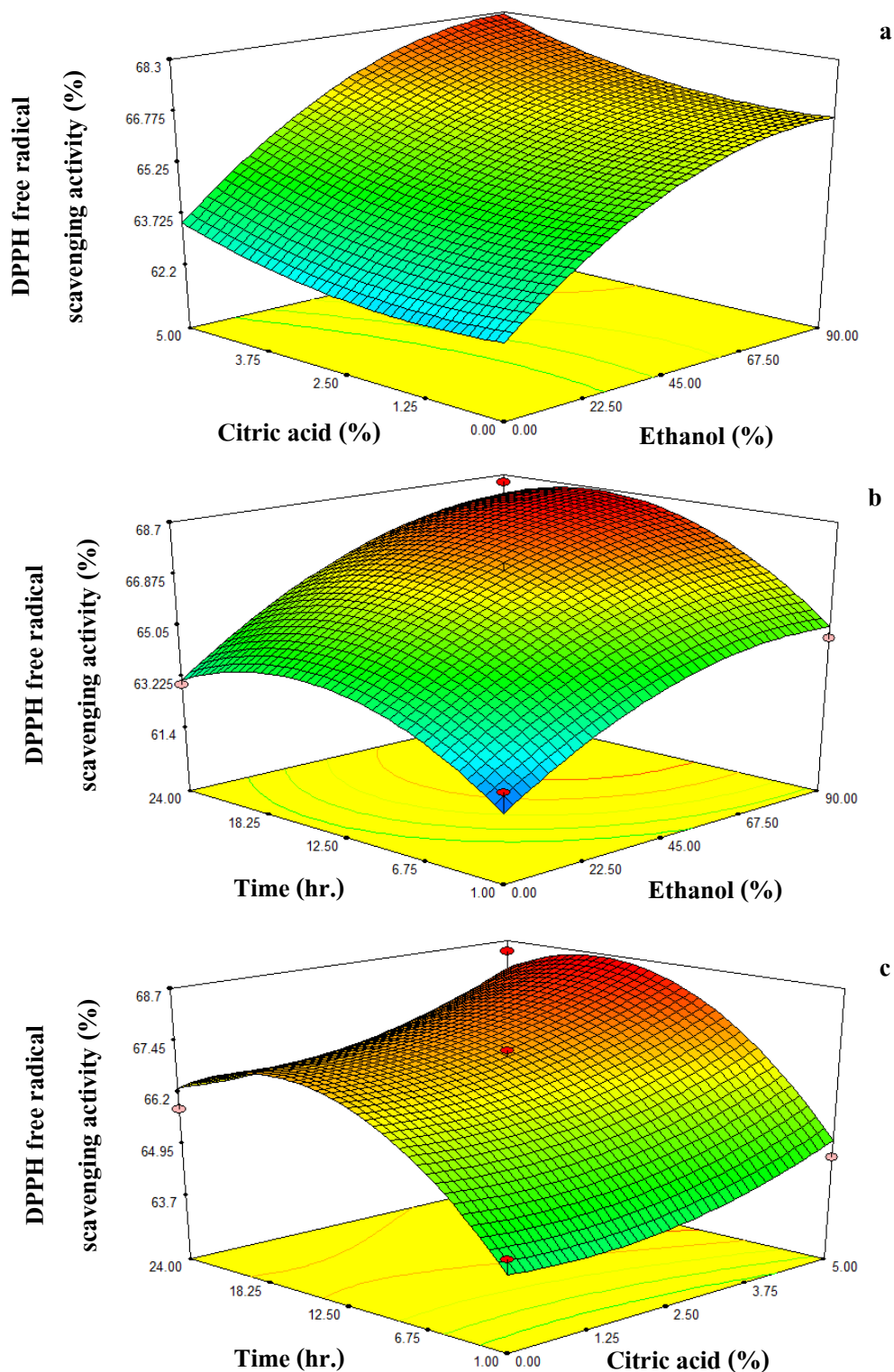


Figure 24 Effect of ethanol and citric acid (a), ethanol and extraction time (b) and citric acid and extraction time (c) on DPPH free radical scavenging activity of Sangyod brown rice extract

Table 7 The regression parameter coefficients chemical properties using independent variables ethanol (X_1), citric acid (X_2) and extraction time (X_3) for anthocyanin content, phenolic content and DPPH free radical scavenging activity of Sangyod brown rice

Parameters	Anthocyanin content		Phenolic content	DPPH free radical scavenging activity
	Abdel and Hule method	pH differential method		
Intercept	14.38	0.39	239.61	66.22
Ethanol (X_1)	1.94	0.035	6.05	1.99
Citric acid (X_2)	0.48	-0.001	3.24	0.57
Extraction time (X_3)	0.54	0.007	2.97	1.05
Ethanol \times Citric acid (X_1X_2)	-0.055	-0.005	0.92	0.14
Ethanol \times Extraction time (X_1X_3)	0.082	0.000	1.55	0.30
Citric acid \times Extraction time (X_2X_3)	-0.073	0.005	-0.26	0.11
Ethanol \times Ethanol (X_1^2)	-1.25	-0.013	-1.53	-1.11
Citric acid \times Citric acid (X_2^2)	-0.19	0.007	0.97	0.52
Extraction time \times Extraction time (X_3^2)	-0.28	-0.043	-3.39	-1.80
p -value for model	<0.0001	0.0058	<0.0001	0.0008
R^2	0.9988	0.9925	0.9885	0.9923
p -value for lack of fit	0.23	0.000427	1.50	0.77

2.3 การทำนายสมการที่ได้จากโปรแกรม Design Expert

ในการทำนายสภาวะการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องงอกสังข์หยด จะพิจารณาจากสมการทางคณิตศาสตร์ของสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ L^* , a^* , b^* , Hue angle และ Chroma รวมไปถึงสมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel and Hulc วิธีพีเอชดีฟเฟอร์นเทียล ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ พบว่า สมการทางคณิตศาสตร์ของค่า L^* , a^* , b^* , Hue angle ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel and Hulc ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ในการทำนายได้ เนื่องจากสมการทางคณิตศาสตร์ของสมบัติดังกล่าวมีค่าสหสัมพันธ์ (R^2) มากกว่า 0.75 สมการทางคณิตศาสตร์ไม่มีความบกพร่อง (Lack of fit, $p \geq 0.05$) และสมการทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายผลของปัจจัยที่มีต่อค่าการตอบสนองได้ (Model, $p < 0.05$) (Hu, 1999) ซึ่งพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90 ร่วมกับกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 4.25 และเวลาการสกัดที่ 24 ชั่วโมง สภาวะดังกล่าวมีค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 0.995 จากนั้นนำสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวมาสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องงอกสังข์หยด และวิเคราะห์ค่า L^* , a^* , b^* , Hue angle ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel and Hulc ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ จากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยทั้งนี้ค่าที่เปรียบเทียบกันจะต้องมีค่าแตกต่างกัน (Error) ไม่เกินร้อยละ 10 (Hu, 1999) จึงจะสามารถนำสภาวะการสกัดที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายมาใช้งานได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 8 พบว่า L^* , a^* , b^* และ Hue angle เท่ากับ 65.66, 7.62, 10.8765.66 และ 56.99 ตามลำดับ ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel and Hulc มีค่าเท่ากับ 16.06 มิลลิกรัมของ-3-กลูโคไซด์ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด เท่ากับ 256.40 มิลลิกรัมของกรดเฟอรูลิกต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้งและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ เท่ากับ ร้อยละ 70.66 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าคุณภาพที่ได้จากการทำนาย พบว่า L^* , a^* , b^* , Hue angle ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel and Hulc ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมีค่าความแตกต่าง เท่ากับ 3.11, 3.93, 4.23, 3.42, 3.67, 2.40 และ 2.93 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าความแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 10 ดังนั้นแสดงว่า สมการทางคณิตศาสตร์ของค่า L^* , a^* , b^* , Hue angle ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel and Hulc ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสามารถนำมาใช้ในการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องงอกสังข์หยดได้จริงและมีความเหมาะสมต่อการนำมาทำนายค่าคุณภาพที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากวิธีพีเอชดีฟเฟอร์นเทียล สมการทางคณิตศาสตร์มีความบกพร่อง ทำให้ไม่สามารถนำวิธีดังกล่าวไปใช้วิเคราะห์แอนโทไซยานินในตอนต่อไปได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีของ Abdel and Hulc ไปใช้วิเคราะห์หาปริมาณแอนโทไซยานินในการทดลองขั้นตอนต่อไป

Table 8 Prediction of equation and experiment for optimization on physical and chemical properties of Sangyod brown rice extraction

Properties	Predicted	Experiment	Error (%)
L*	63.62	65.66±0.15	3.11
a*	7.32	7.62±0.21	3.93
b*	10.41	10.87±0.19	4.23
Hue angle	55.04	56.99±0.046	3.42
Anthocyanin content by Abdel and Hulc method (mg of cyanidin-3-glucoside/100 g dry wt.)	15.47	16.06±0.32	3.67
Phenolic content (mg of ferulic acid/100 g dry wt.)	250.27	256.40±1.21	2.40
DPPH free radical scavenging activity (%)	68.59	70.662±0.11	2.93

3. ผลของวิธีการหุงสุกต่อคุณภาพและปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภค

การศึกษาผลของวิธีการหุงสุกที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื้อความดันสูง การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และการหุงสุกด้วยไมโครเวฟ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การหุงสุกข้าวกล้องสังข์หยดด้วยหม้อนึ่งมาเชื้อความดันสูง

ขั้นตอนการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื้อความดันสูงจะประกอบไปด้วยขั้นตอน การศึกษาหาระยะเวลาการให้ความร้อนเบื้องต้นที่เหมาะสมกับข้าวกล้องสังข์หยด ศึกษาระยะเวลาการมาเชื้อที่เหมาะสมแก่ข้าวกล้องสังข์หยดด้วยหม้อนึ่งมาเชื้อความดันสูง (F_0) หลังจากนั้นจึงนำระยะเวลาการให้ความร้อนเบื้องต้นและระยะเวลาการมาเชื้อที่เหมาะสมนำไปใช้ในการผลิตข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก ซึ่งผลการศึกษาในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 ระยะเวลาการให้ความร้อนเบื้องต้นที่เหมาะสมกับข้าวกล้องสังข์หยดก่อนการหุงสุก

การให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ข้าวก่อนการหุงสุก หรือการทำให้สุกบางส่วนเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้น้ำปริมาณมากเกินไป โดยทั่วไปจะใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำตั้งแต่อัตราส่วน 1:1 ถึง 1:4 (ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนัก) ร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิตั้งแต่ 20 ถึง 120 องศาเซลเซียส (Briffaz *et al.*, 2014) การให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ข้าวกล้องสังข์หยดก่อนมาเชื้อด้วยหม้อนึ่งมาเชื้อความดันสูง มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความชื้นในเมล็ดข้าว ให้เพียงพอต่อการเกิดเจลลิตินในเซชัน ทำให้สามารถลดระยะเวลาในการหุงสุก ซึ่งขั้นตอนการศึกษาระยะเวลาการให้ความร้อนเบื้องต้นที่เหมาะสมแก่ข้าวกล้องสังข์หยดก่อนการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื้อ เริ่มจากการนำข้าวกล้องสังข์หยดเต็มเมล็ด แช่ในน้ำปริมาณมากเกินไปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นลุ่มตัวอย่างทุก 2 นาที เพื่อนำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ และคุณภาพการหุงสุก

สมบัติทางกายภาพ

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดที่เวลาต่างกัน ได้แก่ ปริมาณ Starchy core ความกว้าง และความยาว แสดงดังตารางที่ 9 พบว่า ระยะเวลาการแช่ในน้ำเดือดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ Starchy core ลดลง ($p < 0.05$) ข้าวที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดตั้งแต่ 0 จนถึง 8 นาที จะมีปริมาณ Starchy core เท่ากับ 100 นั่นคือจะไม่พบการสุกของข้าว ในขณะที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเดือดตั้งแต่ 10 นาที จะเริ่มของพบการสุกของข้าวบางส่วน ซึ่งสังเกตได้จากการลดลงของปริมาณ Starchy core (ร้อยละ 93.33) จนกระทั่งที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำ

เดือดที่ 30 นาที ตรวจพบปริมาณของ Starchy core เท่ากับ 0 นั้นหมายถึงข้าวกล้องสังข์หยดจะมีการสุกอย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ Starchy core เป็นตัวบ่งบอกถึงระดับการสุกของข้าว การสุกของข้าวที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณ Starchy core ในเมล็ดข้าว (Ranghino, 1966) โดยทั่วไปเมื่อข้าวได้รับความร้อนพร้อมกับปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะทำให้เมล็ดข้าวเกิดการสุก โดยการเกิดเจลลิตินในเซชันจากรอบนอกของเมล็ด ทำให้ภายนอกของเมล็ดมีลักษณะใส ในขณะที่ส่วนกลางของเมล็ดข้าวยังมีส่วนที่ขาวขุ่น ทำให้พบปริมาณ Starchy core ได้ในเมล็ด นั้นแสดงถึงการสุกของข้าวบางส่วน (Partial gelatinization) จนกระทั่งเมื่อข้าวเกิดการเจลลิตินในเซชันอย่างสมบูรณ์ จะไม่พบส่วนขาวขุ่นภายในเมล็ด ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณ Starchy core ที่หมดไป ซึ่งระดับการสุกของของข้าวนี้มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน โดยเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ข้าวมีระดับการสุกเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย (Juliano, 1982) เมื่อพิจารณาความกว้างและยาวของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดที่เวลาต่างกัน พบว่าระยะเวลาการแช่ในน้ำเดือดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เมล็ดข้าวกล้องมีความกว้างและความยาวที่เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ดังนั้นจึงสามารถสังเกตเห็นลักษณะของเมล็ดข้าวกล้องที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดที่เวลาต่างกันจะทำให้เมล็ดมีขนาดเพิ่มขึ้น โดยลักษณะปรากฏของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดที่เวลาต่างกันแสดงดังภาพที่ 25 ซึ่งการขยายตัวของเมล็ดข้าวกล้องเป็นผลมาจากส่วนเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวกล้องถูกทำลายเนื่องจากความร้อนทำให้เกิดการแตกของเมล็ดตามแนวยาวของเมล็ด ส่งผลให้น้ำเข้าสู่เมล็ดข้าวกล้อง และเกิดการพองตัวของสตาร์ชแกรนูล โดยเมื่อระยะเวลาในการแช่ในน้ำเดือดที่เพิ่มขึ้นทำให้ เยื่อหุ้มเมล็ดถูกทำลายมากขึ้น ส่งผลให้น้ำมีโอกาสเข้าสู่ภายในเมล็ดและจับกับสตาร์ชแกรนูลภายในเมล็ดได้มากขึ้น จึงทำให้ความกว้างและความยาวของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดเพิ่มขึ้น (Briffaz *et al.*, 2014; Tian *et al.*, 2014)

Table 9 Physical properties of Sangyod brown rice after soaked in boiling water at various time

Soaking time (min)	Starchy core (%)	Breadth (mm)	Length (mm)
0	100.00±0.00 ^h	1.78±0.05 ^a	6.65±0.02 ^a
2	100.00±0.00 ^h	1.80±0.07 ^{ab}	6.82±0.08 ^a
4	100.00±0.00 ^h	1.85±0.02 ^{cb}	6.98±0.01 ^{bc}
6	100.00±0.00 ^h	1.91±0.01 ^{dc}	7.08±0.09 ^{ab}
8	100.00±0.00 ^h	2.07±0.04 ^c	7.13±0.09 ^{cd}
10	93.33±5.16 ^g	2.11±0.07 ^d	7.17±0.08 ^{cd}
12	80.00±5.48 ^f	2.07±0.09 ^{de}	7.21±0.06 ^{cd}
14	78.33±4.08 ^f	2.16±0.04 ^e	7.24±0.08 ^d
16	65.00±5.48 ^e	2.48±0.06 ^f	7.39±0.02 ^e
18	56.67±5.16 ^c	2.52±0.07 ^f	7.47±0.09 ^e
20	41.67±4.08 ^d	2.54±0.01 ^f	7.48±0.04 ^e
22	36.67±5.16 ^{cd}	2.64±0.06 ^f	7.55±0.03 ^f
24	26.67±5.16 ^c	2.66±0.02 ^f	7.62±0.03 ^g
26	11.67±4.08 ^b	2.96±0.04 ^{fg}	7.65±0.08 ^h
28	6.67±5.16 ^b	2.99±0.02 ^g	7.68±0.03 ^h
30	0.00±0.00 ^a	3.02±0.01 ^h	7.70±0.01 ^h

Note: Mean with the different letters in the same column are significantly different ($p < 0.05$).

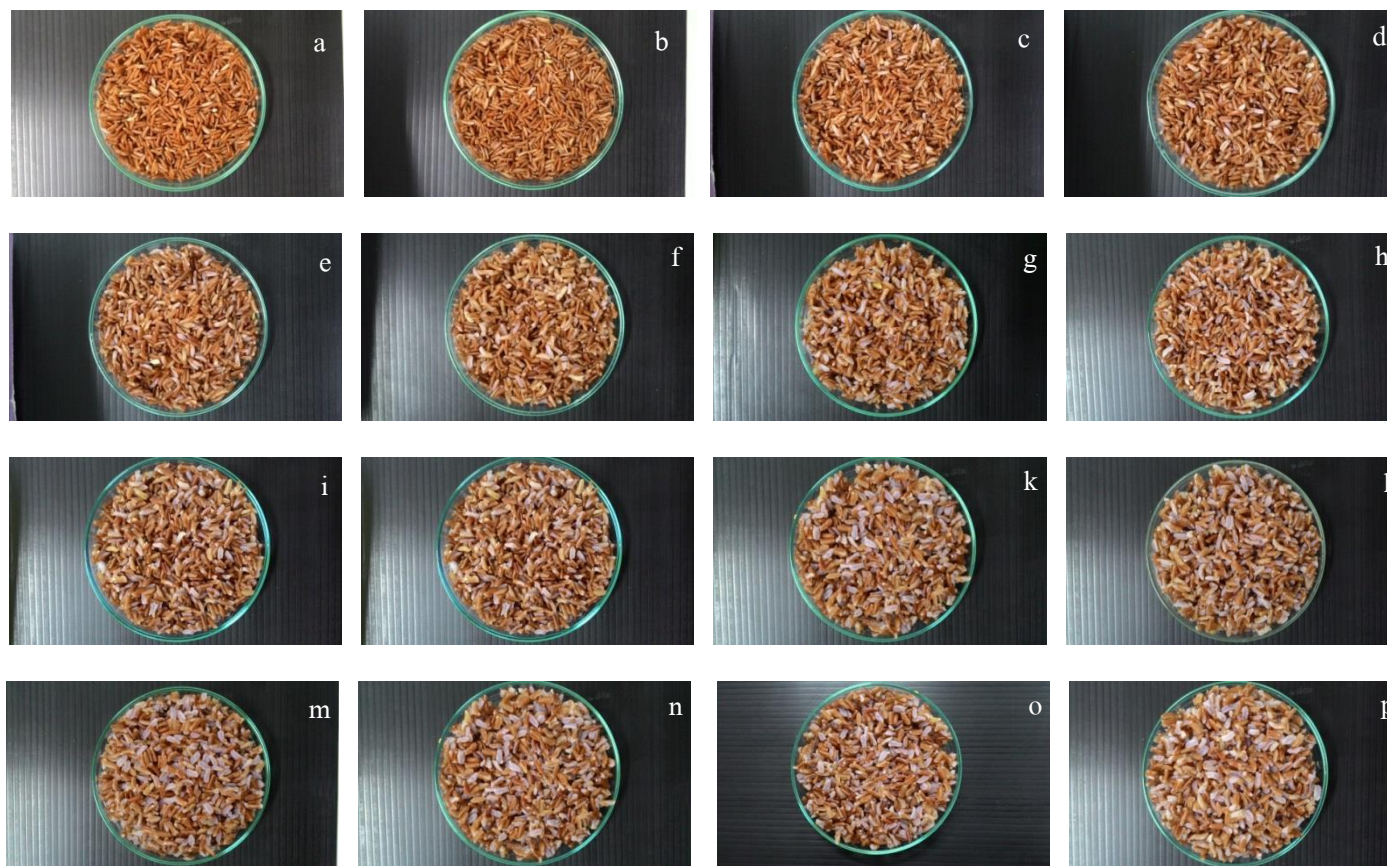


Figure 25 Appearance of Sangyod brown rice after soaked in boiling water at various time; 0 (a), 2 (b), 4 (c), 6 (d), 8 (e), 10 (f), 12 (g), 14 (h), 16 (i), 18 (j), 20 (k), 22 (l), 24 (m), 26 (n), 28 (o) and 30 (p) min

สมบัติทางเคมี

เมื่อพิจารณาปริมาณความชื้นในข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดที่เวลาต่างกัน พบว่า เมื่อระยะเวลาการแช่ในน้ำเดือดเพิ่มขึ้นส่งผลให้เมล็ดข้าวมีปริมาณความชื้นเพิ่มมากขึ้น ($p < 0.05$) (ภาพที่ 26) โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวจะเพิ่มขึ้นมากในช่วงแรกของการแช่ในน้ำเดือด จนกระทั่งเมื่อถึงระยะเวลาการให้ความร้อนนาน 16 นาที ปริมาณความชื้นในเมล็ดจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนกระทั่งระยะเวลาการให้ความร้อนตั้งแต่เวลาที่ 22 เป็นต้นไป ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวกล้องจึงเริ่มคงที่ การเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวกล้องเป็นผลมาจากส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวถูกทำลาย เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงในระหว่างการแช่ในน้ำเดือด ให้น้ำเข้าสู่ภายในเมล็ดอย่างรวดเร็ว โดยน้ำจะเข้าสู่เมล็ดได้มากในช่วงแรกของการให้ความร้อน จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล จึงทำให้ความชื้นของเมล็ดเริ่มคงที่ ซึ่งปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวเป็นสิ่งสำคัญที่สามารถบ่งบอกถึงสภาวะที่เหมาะสมที่นำมาใช้ในกระบวนการหุงสุก และเป็นสิ่งที่บ่งบอกได้ถึงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก (Miah *et al.*, 2002; Kasai *et al.*, 2005; Tamura *et al.*, 2014) สำหรับสภาวะการแช่ข้าวกล้องสังข์หยดในน้ำเดือดก่อนนำไปหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว ความชื้นสูงจะมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 63.63-70.66

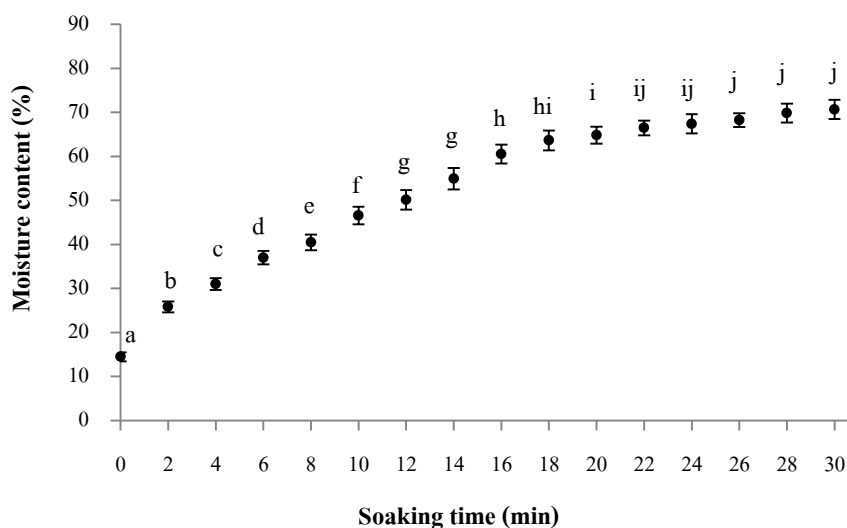


Figure 26 Moisture content of Sangyod brown rice after soaked in boiling water at various time

Note: Means with different letters are significantly different ($p < 0.05$).

สมบัติทางความร้อน

การเกิดเจลลิตในเซชันของเมล็ดข้าวเป็นสมบัติทางความร้อนอย่างหนึ่งที่ใช้บ่งชี้ถึงระดับการสุกของเมล็ดข้าว โดยระดับการเกิดเจลลิตในเซชันของสตาร์ชจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อน และกระบวนการที่ใช้ในการให้ความร้อน จากตารางที่ 10 แสดงถึงสมบัติการเกิดเจลลิตในเซชันของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดที่เวลาแตกต่างกัน พบว่า เมื่อระยะเวลาในการแช่ในน้ำเดือดเพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) อุณหภูมิ (T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (T_c) และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตในเซชัน (ΔH) มีค่าลดลง ($p < 0.05$) ในขณะที่ระดับการเกิดเจลลิตในเซชันของข้าวกล้องสังข์หยดมีค่าสูงขึ้น ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องมาจากเวลาการแช่ในน้ำเดือดนานขึ้น ส่งผลให้เมล็ดข้าวมีระดับการสุกที่เพิ่มขึ้น โดยจะเริ่มพบการสุกบางส่วนของข้าวกล้องสังข์หยดได้ตั้งแต่วันที่ 2 ของการแช่ในน้ำเดือด ซึ่งจะมีระดับการเกิดเจลลิตในเซชันเท่ากับ ร้อยละ 2.97 และระดับการเกิดเจลลิตในเซชันจะเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการแช่ในน้ำเดือดจนกระทั่งเวลาการแช่ในน้ำเดือดนาน 30 นาที เมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดมีระดับการเกิดเจลลิตในเซชันเท่ากับร้อยละ 100 นั่นคือ ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเดือดดังกล่าวจะทำให้ข้าวกล้องสังข์หยดเกิดการสุกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของระดับการเกิดเจลลิตในเซชันเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการให้ความร้อนน้ำเดือด ส่งผลให้เมล็ดข้าวเกิดการดูดซับน้ำเข้าสู่เมล็ดได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการจับกันของน้ำและสตาร์ชแกรนูลได้เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดการสูญเสียโครงสร้างของสตาร์ชแกรนูลได้มากขึ้น ส่งผลให้ระดับการเกิดเจลลิตในเซชันของข้าวเพิ่มขึ้น (Islam *et al.*, 2002; Saif *et al.*, 2004; Taghinezhad *et al.*, 2016) การศึกษาในครั้งนี้จะคัดเลือกสภาวะการให้ความร้อนเบื้องต้นที่เหมาะสมกับการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง โดยพิจารณาจากระดับการเกิดเจลลิตในเซชันตั้งแต่ร้อยละ 65-90 (อนลักษ์ณ์ โอฟารี โกวิท, 2546) ซึ่งจากผลการศึกษาการให้ความร้อนเบื้องต้นจะทำให้ได้ระยะเวลาการแช่ในน้ำเดือดที่เหมาะสมก่อนการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง ทั้งหมด 4 ระยะเวลา ได้แก่ 18, 20, 22 และ 24 นาที โดยมีค่าร้อยละการเกิดเจลลิตในเซชัน เท่ากับ 65.50, 74.31, 82.75 และ 87.79 ตามลำดับ) ซึ่งจะใช้สภาวะดังกล่าวที่ได้ไปใช้ในขั้นตอนการศึกษาการผลิตข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิทด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงต่อไป

Table 10 Thermal properties of Sangyod brown rice after soaked in boiling water at various time

Soaking time (min)	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH (J/g)	Gelatinization (%)
0	76.73±0.01 ^o	81.86±0.01 ^o	88.01±0.14 ^o	9.42±0.01 ^o	0.00±0.00 ^a
2	76.68±0.02 ⁿ	81.61±0.01 ⁿ	87.73±0.01 ⁿ	9.14±0.01 ⁿ	2.97±0.08 ^b
4	76.43±0.02 ^m	81.47±0.01 ^m	87.60±0.01 ^m	9.03±0.01 ^m	4.14±0.15 ^c
6	76.01±0.01 ^l	81.18±0.01 ^l	87.20±0.01 ^l	8.76±0.01 ^l	7.05±0.07 ^d
8	75.88±0.01 ^k	80.77±0.01 ^k	86.66±0.01 ^k	8.01±0.01 ^k	14.97±0.15 ^e
10	75.62±0.02 ^j	80.59±0.02 ^j	86.14±0.02 ^j	7.30±0.01 ^j	22.51±0.15 ^f
12	75.21±0.02 ⁱ	80.47±0.03 ⁱ	85.66±0.02 ⁱ	6.20±0.14 ⁱ	34.18±1.50 ^g
14	74.96±0.01 ^h	80.22±0.01 ^h	85.46±0.01 ^h	5.38±0.04 ^h	42.94±0.38 ^h
16	74.46±0.02 ^g	80.11±0.01 ^g	84.96±0.01 ^g	4.22±0.04 ^g	55.20±0.45 ⁱ
18	74.02±0.02 ^f	79.96±0.01 ^f	84.55±0.01 ^f	3.25±0.01 ^f	65.50±0.15 ^j
20	73.76±0.01 ^e	79.61±0.01 ^e	84.28±0.02 ^e	2.42±0.03 ^e	74.31±0.30 ^k
22	73.22±0.02 ^d	79.46±0.02 ^d	83.61±0.01 ^d	1.63±0.01 ^d	82.75±0.07 ^l
24	73.11±0.01 ^c	79.10±0.02 ^c	83.39±0.01 ^c	1.15±0.01 ^c	87.79±0.15 ^m
26	72.92±0.02 ^b	78.91±0.02 ^b	82.95±0.01 ^b	0.78±0.01 ^b	91.71±0.15 ⁿ
28	72.11±0.02 ^a	78.62±0.02 ^a	82.41±0.02 ^a	0.48±0.01 ^a	94.90±0.15 ^o
30	-	-	-	-	100.00±0.00 ^p

Note: Mean with the different letters in the same column are significantly different (p<0.05).

คุณภาพการหุงสุก

คุณภาพการหุงสุกของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่น้ำเดือดที่เวลาต่างกัน พิจารณาจาก อัตราการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าว และอัตราการยืดตัวของเมล็ด (ตารางที่ 11) พบว่า อัตราการดูดซับน้ำ และอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการแช่น้ำ เดือดเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ทั้งนี้เป็นผลมาจากเชื้อหุ้มเมล็ดถูกทำลายจากความร้อนที่ใช้ในการแช่ ทำให้น้ำเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในเมล็ดข้าวกล้อง ทำให้อะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่เป็นองค์ประกอบ ในสตาร์ชแกรนูลเกิดการจับกับโมเลกุลของน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เมล็ดเกิดการพองตัว โดยระยะเวลาการแช่น้ำเดือดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้น้ำสามารถแพร่เข้าสู่เมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดได้เพิ่มมากขึ้น ทำให้สตาร์ชแกรนูลสามารถดูดซับน้ำได้เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เมล็ดข้าวกล้องมีอัตราการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น ข้าวกล้องสังข์หยดจึงมีอัตราการยืดตัวเพิ่มขึ้น (Briffaz *et al.*, 2014; Tian *et al.*, 2014)

Table 11 Water uptake and elongation ratio of Sangyod brown rice after soaked in boiling water at various time

Soaking time (min)	Water uptake (g/g)	Elongation ratio
0	1.00±0.00 ^a	1.00±0.02 ^a
2	1.10±0.02 ^b	1.03±0.08 ^a
4	1.25±0.01 ^c	1.05±0.01 ^{bc}
6	1.45±0.01 ^d	1.06±0.09 ^{ab}
8	1.65±0.02 ^c	1.07±0.09 ^{cd}
10	1.87±0.03 ^f	1.08±0.08 ^{cd}
12	2.12±0.02 ^g	1.08±0.06 ^{cd}
14	2.40±0.01 ^h	1.09±0.08 ^d
16	2.57±0.01 ⁱ	1.11±0.02 ^e
18	2.65±0.03 ^j	1.12±0.09 ^e
20	2.70±0.02 ^k	1.12±0.04 ^e
22	2.73±0.03 ^k	1.14±0.03 ^f
24	2.79±0.02 ^l	1.15±0.03 ^g
26	2.82±0.02 ^l	1.15±0.02 ^g
28	2.87±0.02 ^m	1.15±0.03 ^g
30	2.89±0.01 ^m	1.16±0.01 ^h

Note: Mean with the different letters in the same column are significantly different ($p < 0.05$).

3.1.2 ศึกษาระยะเวลาการฆ่าเชื้อ

การศึกษาระยะเวลาการฆ่าเชื้อ เป็นขั้นตอนการหาระยะเวลาฆ่าเชื้อที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวกล้องสังข์หยดด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง การฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสปอร์ของเชื้อจุลินทรีย์ *Clostridium botulinum* ซึ่งเป็นเชื้อก่อโรคที่มีผลต่อระบบประสาท สามารถเจริญได้ในที่ที่ไม่มีอากาศ และสปอร์ของเชื้อมีความสามารถทนต่อความร้อนสูง เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกในภาชนะปิดสนิท จากการศึกษาพบว่าข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดที่เวลา 18, 20, 22 และ 24 นาที (ผลการทดลองจากการศึกษาระยะเวลาการให้ความร้อนเบื้องต้นที่เหมาะสมกับข้าวกล้องสังข์หยดก่อนการหุงสุกในข้อ 3.1.1) จะมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6.20, 6.22, 6.25 และ 6.27 ตามลำดับ ซึ่งจัดเป็นอาหารที่มีค่าความเป็นกรดต่ำ สำหรับอาหารที่มีค่าความเป็นกรดต่ำ (มีค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 4.6) (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข, 2556) จะถูกกำหนดใช้ระยะเวลาการฆ่าเชื้อ (F_0 Formula) เท่ากับ 4 นาทีเป็นอย่างต่ำ (Lewis and Heppell, 2000) ดังนั้นในการผลิตข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิท จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาหาระยะเวลาการฆ่าเชื้อที่เหมาะสม โดยตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาหาเวลาการฆ่าเชื้อที่เหมาะสม ได้แก่ ข้าวกล้องที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดเป็นเวลา 18, 20, 22 และ 24 นาที กำหนดสภาวะการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 118 องศาเซลเซียส ความดัน 23 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว กำหนดให้ค่า F_0 Formula เท่ากับหรือมากกว่า 4 นาที จากผลการศึกษาระยะเวลาการฆ่าเชื้อที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิท (ตารางที่ 12) พบว่า ข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดที่เวลา 18, 20, 22 และ 24 นาที จะใช้ระยะเวลาในการฆ่าเชื้อเท่ากับ 26.00, 24.30, 23.30 และ 22.30 นาทีตามลำดับ โดยมี F_0 General เท่ากับ 7.71, 7.65, 7.60 และ 7.56 นาที ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณ F_0 Formula (ค่า F_0 ที่คำนวณได้รวม Lethal rate ช่วง Cooling time) ของแต่ละเวลาการแช่ในน้ำเดือด จะได้เท่ากับ 4.12, 4.08, 4.06 และ 4.03 นาที ตามลำดับ (ตัวอย่างการคำนวณ F_0 แสดงในภาคผนวก ข) จะเห็นได้ว่า ตัวอย่างข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดที่เวลาต่างกันจะมี F_0 ที่แตกต่างกัน โดยระยะเวลาการแช่ในน้ำเดือดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ F_0 มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจาก ข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ภายในเมล็ดข้าวกล้องมีความชื้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการส่งผ่านความร้อนได้ดี ดังนั้นการคัดเลือกสภาวะของกระบวนการที่จะนำมาใช้ในการฆ่าเชื้อข้าวกล้องสังข์หยด จะเลือกสภาวะการฆ่าเชื้อตามการแช่ในน้ำเดือดที่เวลา 18 นาที ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีการส่งผ่านความร้อนได้ช้าที่สุด โดย เตรียมตัวอย่างด้วยการแช่ในน้ำเดือดที่เวลาแตกต่างกัน (18, 20, 22 และ 24 นาที) แล้วนำมาฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 118 องศาเซลเซียสความดัน 23 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

โดยระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างจนถึงอุณหภูมิฆ่าเชื้อที่กำหนด (Come up time) เท่ากับ 23 นาที ระยะเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อที่ 118 องศาเซลเซียส (Process time) เท่ากับ 26 นาที และเวลาในการลดอุณหภูมิของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการฆ่าเชื้อ (Cooling time) เท่ากับ 31 นาที รวมระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อทั้งหมด (Total process time) เท่ากับ 80 นาที ซึ่งจะทำให้ทุกตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดที่เวลาแตกต่างกัน มีค่า F_0 Formula มากกว่า 4 เมื่อนำตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดที่เวลาแตกต่างกัน (18, 20, 22 และ 24 นาที) มาฆ่าเชื้อตามสภาวะการฆ่าเชื้อดังกล่าวข้างต้น มาวิเคราะห์ความปลอดภัยเชื้อ (Sterility test) พบว่า ไม่พบการเจริญของเชื้อ *Clostridium botulinum* นั่นคือ การฆ่าเชื้อที่สภาวะดังกล่าว จะทำให้ทุกตัวอย่างมีความปลอดภัย และปลอดภัยต่อการบริโภค

Table 12 F_0 value of cooked Sangyod brown rice after soaked in boiling water at various time

Soaking time (min)	Replicate	Initial temperature of sample at cold point (°C)	Come up time (min)	Process time (min)	Cooling time (min)	Total process time (min)	F_0 formula (min)	F_0 general (min)
18	1	28.23	23.00	26.00	31.00	80.00	4.12	7.71
	2	28.26	22.30	25.30	30.30	77.90	4.10	7.67
20	1	28.24	22.30	24.30	29.30	75.90	4.08	7.65
	2	28.23	22.00	24.00	29.00	75.00	4.07	7.63
22	1	28.27	21.30	23.30	28.30	72.90	4.06	7.60
	2	28.25	21.00	23.00	28.00	72.00	4.05	7.58
24	1	28.28	20.30	22.30	27.30	69.90	4.03	7.56
	2	28.22	20.00	22.00	27.00	69.00	4.02	7.54

3.1.3 การผลิตข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิทด้วยหม้อนึ่งมาเชื่อความดันสูง

การผลิตข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิทด้วยหม้อนึ่งมาเชื่อความดันสูง โดยการนำข้าวกล้องสังข์หยดแช่ในน้ำเดือดที่เวลา 18, 20, 22 และ 24 นาที (ผลการทดลองจากข้อ 3.1.1) จากนั้นลดอุณหภูมิของตัวอย่าง บรรจุลงในถุงรีทอร์ทเพาว์ขนาด 11×13 เซนติเมตร น้ำหนักถูละ 125 กรัม มาเชื่อด้วยหม้อนึ่งมาเชื่อความดันสูงที่อุณหภูมิ 118 องศาเซลเซียส ความดัน 23 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างจนถึงอุณหภูมิมาเชื่อที่กำหนด เท่ากับ 23 นาที ระยะเวลาที่ใช้ในการมาเชื่อที่ 118 องศาเซลเซียส เท่ากับ 26 นาที และเวลาในการลดอุณหภูมิของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการมาเชื่อ เท่ากับ 31 นาที รวมระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการมาเชื่อทั้งหมด เท่ากับ 80 นาที (จากผลการทดลองในข้อ 3.1.2) จากนั้นนำตัวอย่างข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิทมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี โครงสร้างทางจุลภาค คุณภาพการหุงสุก และการทดสอบทางประสาทสัมผัส เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพกับการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว และไมโครเวฟ ซึ่งมีรายละเอียดแสดงดังข้อ 3.2

3.2 เปรียบเทียบคุณภาพข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

ข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ ข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิทด้วยหม้อนึ่งมาเชื่อความดันสูง (เตรียมโดยวิธีจากข้อ 3.1.3) ข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า เตรียมโดย นำข้าวกล้องสังข์หยดจำนวน 250 กรัม และใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 2 หุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกด้วยไมโครเวฟ เตรียมโดย ใช้ตัวอย่างข้าวกล้องสังข์หยด จำนวน 250 กรัม อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 2 หุงสุกด้วยไมโครเวฟ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที เมื่อครบเวลา กลับตัวอย่างให้ทั่ว แล้วนำเข้าไมโครเวฟอีกครั้ง โดยใช้กำลังไฟฟ้า เท่ากับ 850 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นปิดฝาตัวอย่างทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที นำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี เคมีเชิงฟิสิกส์ และการทดสอบทางประสาทสัมผัส ซึ่งผลการศึกษามีดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.1 สมบัติทางกายภาพ

ข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ได้แก่ การหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื่อความดันสูง (เวลาการแช่ในน้ำเดือดที่ 18, 20, 22 และ 24 นาที) การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไมโครเวฟ ถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพในด้านความยาวและความกว้างของเมล็ด เมื่อ

พิจารณาลักษณะปรากฏของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่ต่างกันอย่าง (ภาพที่ 27) พบว่าการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวเชิงความดันสูง (ทุกเวลาการแช่ในน้ำเดือด) จะพบการแตกของเมล็ดได้มากที่สุด ในขณะที่การหุงสุกด้วยไมโครเวฟจะมีการแตกของเมล็ดน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 13 จะเห็นได้ว่าการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวเชิงความดันสูง (ที่เวลาการแช่ในน้ำเดือด 24 นาที) จะมีความกว้างและความยาวของเมล็ดมากที่สุด ($p < 0.05$) ในขณะที่การหุงสุกด้วยไมโครเวฟจะมีความกว้างและความยาวน้อยที่สุด ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาขนาดข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวเชิงความดันสูงที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดที่เวลา 18 และ 20 นาที พบว่าเมล็ดข้าวกล้องมีความกว้างและความยาวที่ไม่แตกต่างกับการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ($p \geq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวเชิงความดันสูง จะมีขั้นตอนการแช่ในน้ำเดือดก่อนนำไปหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวเชิงความดันสูง ซึ่งการใช้ความร้อนเป็นเวลานานมีผลทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดถูกทำลาย อีกทั้งเมื่อนำไปหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวเชิงความดันสูง จะมีการใช้อุณหภูมิสูงร่วมกับความดันสูง ส่งผลให้เยื่อหุ้มเมล็ดถูกทำลายมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการแตกของเมล็ดได้เพิ่มขึ้น จึงเป็นการเพิ่มช่องทางการเคลื่อนที่ของน้ำเข้าสู่เมล็ดได้มากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ความกว้างและความยาวของเมล็ดมีค่ามากกว่าการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและไมโครเวฟ (Briffaz *et al.*, 2014; Tian *et al.*, 2014)

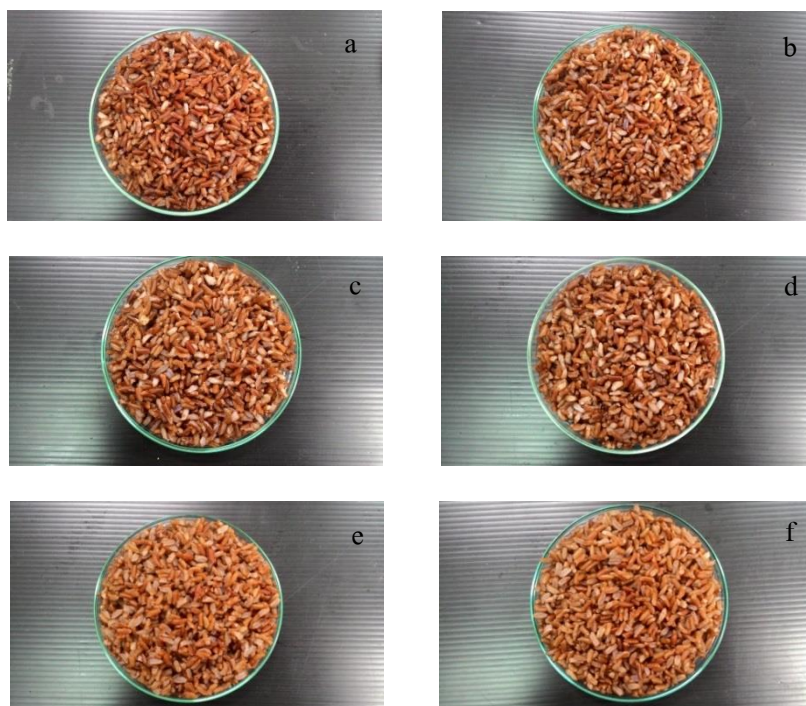


Figure 27 Cooked Sangyod brown rice from a retort at various soaking times; 18 (a), 20 (b), 22 (c), 24 (d) min, from an electric rice cooker (e) and from a microwave (f)

Table 13 Physical properties of Sangyod brown rice under various cooking method

Cooking method	Breadth (mm)	Length (mm)
Retort (soaked 18 min in boiling water)	2.59±0.06 ^b	7.51±0.02 ^b
Retort (soaked 20 min in boiling water)	2.64±0.03 ^b	7.58±0.08 ^b
Retort (soaked 22 min in boiling water)	2.70±0.02 ^c	7.65±0.02 ^c
Retort (soaked 24 min in boiling water)	2.76±0.07 ^d	7.72±0.03 ^d
Electric rice cooker	2.49±0.05 ^b	7.54±0.03 ^b
Microwave	2.36±0.04 ^a	7.44±0.04 ^a

Note: Mean with the different letters in the same column are significantly different ($p < 0.05$).

Breadth and length of raw Sangyod brown rice were 1.78±0.05 mm and 6.95±0.02 mm, respectively.

คำถึ

จากการวิเคราะห์ค่าสีของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน โดยรายงานผลในรูปของ L^* , a^* , b^* , Hue angle และ Chroma แสดงดังตารางที่ 14 เมื่อพิจารณาผลของวิธีการหุงสุก พบว่า วิธีการหุงสุกที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าสีของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยด ($p < 0.05$) การหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงที่ทุกเวลาการแช่น้ำเดือด (18, 20, 22 และ 24 นาที) จะมีค่า L^* , a^* และ Chroma ต่ำกว่าการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและไมโครเวฟ ($p < 0.05$) และค่า Hue angle สูงกว่าการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและไมโครเวฟ ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการแช่น้ำเดือดที่แตกต่างกันก่อนนำมาหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง พบว่าเมื่อระยะเวลาการแช่น้ำเดือดที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เมล็ดข้าวกล้องมีค่า L^* , a^* และ Chroma ลดลง ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่า Hue angle มีค่าเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากในกระบวนการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงมีการใช้อุณหภูมิและความดันสูง จึงส่งผลให้แอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นรงควัตถุที่มีอยู่ในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดเกิดการสลายตัว จึงทำให้ความเป็นสีแดงของเมล็ดข้าวกล้องลดลง ในขณะที่การลดลงของค่าความสว่างของเมล็ดข้าวกล้องนั้นเป็นผลมาจากในขั้นตอนการแช่น้ำเดือดทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดข้าวกล้องถูกทำลาย จึงทำให้เกิดรอยแตกของเมล็ด ส่งผลให้น้ำตาลรีดิคซ์ และกรดอะมิโนหลุดออกจากโครงสร้างเมล็ด ร่วมกับความร้อนในระหว่างการหุงสุกจึงเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดของเมล็ดข้าวกล้อง จึงทำให้เมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้น (Champagne, 1996; Wrolstad *et al.*, 2005; Lamberts *et al.*, 2006)

Table 14 Color values of cooked Sangyod brown rice from various cooking method

Cooking method	Color				
	L*	a*	b*	Hue angle (°)	Chroma
Retort (soaked 18 min in boiling water)	48.67±0.56 ^c	12.92±0.90 ^b	12.85±0.90 ^{NS}	38.05±1.07 ^b	18.22±0.97 ^c
Retort (soaked 20 min in boiling water)	47.96±0.53 ^c	12.18±0.32 ^b	12.56±0.66 ^{NS}	38.70±1.35 ^b	17.50±0.63 ^c
Retort (soaked 22 min in boiling water)	47.02±0.40 ^b	10.12±0.33 ^a	12.09±0.45 ^{NS}	40.99±1.07 ^c	16.09±0.73 ^b
Retort (soaked 24 min in boiling water)	46.00±0.50 ^a	9.54±0.38 ^a	12.20±0.58 ^{NS}	42.31±1.80 ^c	15.48±0.64 ^a
Electric rice cooker	52.44±0.71 ^d	14.36±0.21 ^b	12.07±0.72 ^{NS}	34.49±1.61 ^a	18.76±0.45 ^c
Microwave	52.71±0.54 ^d	14.86±0.30 ^b	12.82±0.50 ^{NS}	34.29±1.31 ^a	19.63±0.67 ^a

Note: Mean with the different letters in the same column are significantly different ($p < 0.05$).

L*, a*, b*, Hue angle and Chroma of raw Sangyod brown rice were 38.48±0.08, 12.43±0.07, 18.61±0.04, 56.26±0.16 and 22.38±0.08, respectively.

NS is non-significantly different ($p \geq 0.05$).

เนื้อสัมผัส

การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน จะรายงานผลในรูปค่าความแข็ง และค่าการเกาะติดของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยด ซึ่งเป็นสิ่งที่ใช้บ่งชี้ถึงคุณภาพการหุงสุกและการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวที่ผ่านการหุงสุก โดยการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหุงสุกข้าวจะพิจารณาจากลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเป็นสำคัญ (Briffaz *et al.*, 2014) เมื่อพิจารณาวิธีการหุงสุกที่แตกต่างกันต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก (ตารางที่ 15) พบว่า การหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง (ที่ทุกเวลาการแช่น้ำเดือด) จะทำให้เมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดมีค่าความแข็งน้อยกว่าการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไมโครเวฟ ตามลำดับ ($p < 0.05$) และมีค่าการเกาะติดของเมล็ดมากกว่า การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไมโครเวฟ ตามลำดับ ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาระยะเวลาการแช่น้ำเดือดที่แตกต่างกัน (18, 20, 22 และ 24 นาที) ก่อนนำไปหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง พบว่า เมื่อระยะเวลาการแช่น้ำเดือดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งของเมล็ดลดลง ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่าการเกาะติดของเมล็ดเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) โดยการแช่น้ำเดือดที่เวลา 24 นาที แล้วนำไปหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงจะทำให้ข้าวมีค่าความแข็งต่ำที่สุด ($p < 0.05$) ในขณะที่มีค่าการเกาะติดของเมล็ดสูงที่สุด ($p < 0.05$) ซึ่งลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกมีผลมาจากการดูดซับน้ำของสตาร์ชแกลนูลในเมล็ดข้าวระหว่างกระบวนการหุงสุก ส่งผลให้สตาร์ชแกลนูลเกิดการพองตัวและเกิดการเจลาติไนเซชัน นอกจากนี้จะไม่โลสและอะไมโลเพคตินบางส่วนหลุดออกจากสตาร์ชแกลนูล ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง และค่าการเกาะติดของเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น ซึ่งการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงมีการใช้อุณหภูมิและความดันสูงในการหุงสุก ส่งผลให้เมล็ดข้าวเกิดการเจลาติไนเซชันได้มากขึ้น และเกิดการหลุดออกของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินได้มาก ส่งผลให้ค่าความแข็งน้อยกว่าการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไมโครเวฟ และมีค่าการเกาะติดของเมล็ดมากกว่าการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไมโครเวฟ (Leelayuthsoontorn and Thipayarat, 2006; Tian *et al.*, 2014) และระยะเวลาในการแช่น้ำเดือดก่อนการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อะไมโลสและอะไมโลเพคตินสายสั้นหลุดออกจากโครงสร้างของสตาร์ชแกลนูลได้มากขึ้น ทำให้เมื่อเพิ่มเวลาการแช่น้ำเดือดนานขึ้นค่าความแข็งจึงลดลง และมีค่าการเกาะติดเพิ่มขึ้น (Chiang and Yeh, 2002; Han and Lim 2009; Rewthong *et al.*, 2011; Miao *et al.*, 2016) ดังนั้น ข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงจะทำให้ได้ข้าวหุงสุกที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่มเหนียวมากกว่าข้าวที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและไมโครเวฟ

Table 15 Texture of cooked Sangyod brown rice from various cooking method

Cooking method	Hardness (N)	Adhesiveness (N)
Retort (soaked 18 min in boiling water)	153.80±2.11 ^c	4.25±0.09 ^c
Retort (soaked 20 min in boiling water)	149.68±3.75 ^c	4.59±0.09 ^d
Retort (soaked 22 min in boiling water)	131.53±1.46 ^b	4.76±0.04 ^c
Retort (soaked 24 min in boiling water)	122.49±3.36 ^a	4.93±0.03 ^f
Electric rice cooker	223.17±5.63 ^d	2.47±0.05 ^a
Microwave	228.52±4.51 ^d	2.60±0.03 ^b

Note: Mean with the different letters in the same column are significantly different ($p < 0.05$).

3.2.2 สมบัติทางเคมี

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื้อความดันสูง (แช่น้ำเดือดเป็นเวลา 18, 20, 22 และ 24 นาที) การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และ ไมโครเวฟ โดยศึกษาผลของวิธีการหุงสุกต่อปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยด ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ชนิดและปริมาณของกรดฟีนอลิก และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH ซึ่งมีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 16 จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื้อความดันสูง (ทุกเวลาการแช่น้ำเดือด) จะมีปริมาณความชื้นสูงกว่าข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและไมโครเวฟ ($p < 0.05$) โดยข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่น้ำเดือดเป็นเวลา 24 นาที แล้วนำมาหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื้อความดันสูงจะทำให้มีปริมาณความชื้นสูงที่สุด ($p < 0.05$) ในขณะที่การหุงสุกด้วยไมโครเวฟข้าวมีปริมาณความชื้นต่ำที่สุด ($p < 0.05$) เนื่องมาจากการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื้อความดันสูงจะมีขั้นตอนการแช่น้ำเดือด เพื่อให้เมล็ดเกิดการเจลาติไนเซชันได้บางส่วนก่อนเข้าสู่กระบวนการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื้อความดันสูงต่อไป ซึ่งขั้นตอนการแช่น้ำเดือดจะมีบทบาทสำคัญที่ทำให้เกิดการแพร่ของน้ำเข้าสู่ภายในเมล็ดข้าว

กลิ้ง เนื่องจากความร้อนจะทำให้เมล็ดเกิดรอยแตกตามแนวยาวของเมล็ด น้ำจึงสามารถแพร่เข้าสู่เมล็ด ดังนั้นระยะเวลาการแช่ในน้ำเดือดที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Miah *et al.*, 2002; Briffaz *et al.*, 2014)

Table 16 Moisture content of cooked Sangyod brown rice from various cooking method

Cooking method	Moisture content (%)
Retort (soaked 18 min in boiling water)	59.86±0.59 ^c
Retort (soaked 20 min in boiling water)	60.90±0.46 ^c
Retort (soaked 22 min in boiling water)	62.89±0.34 ^d
Retort (soaked 24 min in boiling water)	64.53±0.66 ^e
Electric rice cooker	54.65±0.87 ^b
Microwave	52.62±0.22 ^a

Note: Mean with the different letters in the same column are significantly different ($p < 0.05$).

ปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างแสดงดังตารางที่ 17 พบว่ากระบวนการหุงสุกที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH ($p < 0.05$) โดยปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH ในข้าวกล้องสังข์หยดดิบมีค่าเท่ากับ 15.57 มิลลิกรัมของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง 238.40 มิลลิกรัมของกรดเฟอรูลิกต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง และ ร้อยละ 68.16 ตามลำดับ เมื่อผ่านกระบวนการหุงสุกด้วยวิธีที่ต่างกันจะทำให้ได้ปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และ ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีค่าแตกต่างกัน ($p < 0.05$) โดยการหุงสุกด้วยหม้อหนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณแอนโทไซยานิน และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้มากกว่าการหุงสุกด้วยไมโครเวฟ และหม้อหุงข้าวไฟฟ้าตามลำดับ ($p < 0.05$) แต่ทั้งนี้พบว่า ข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดนาน 18 นาทีก่อนนำไปหุงสุกด้วยหม้อหนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง จะมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและ ไมโครเวฟตามลำดับ ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากที่สภาวะการแช่ในน้ำเดือดนาน 18 นาทีร่วมกับการใช้ความร้อนและความดันสูงในขั้นตอนการหุงสุกด้วยหม้อหนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง ทำให้โครงสร้างของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดถูกทำลาย เป็นผลให้สารประกอบฟีนอลิกหลุดออกจากโครงสร้างภายใน

เมล็ดข้าว จึงทำให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไม่โครเวฟ อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาในการแช่น้ำเดือดนานขึ้น พบว่า ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดลดลง ($p < 0.05$) โดยข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่น้ำเดือดนาน 24 นาที ก่อนการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ความดันสูงจะเกิดการสูญเสียปริมาณแอนโทไซยานิน กรดฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH มากที่สุด ($p < 0.05$) เนื่องจากกระบวนการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ความดันสูงจะมีขั้นตอนการแช่น้ำเดือด ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แอนโทไซยานิน และกรดฟีนอลิกเกิดการสลายตัว รวมไปถึงในขั้นตอนการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ความดันสูง มีการใช้อุณหภูมิร่วมกับความดันสูงจึงเป็นอีกสาเหตุให้แอนโทไซยานินและกรดฟีนอลิกเกิดการสลายตัวได้มากขึ้น (Chatthongpisut *et al.*, 2015) ซึ่งกลไกการสลายตัวของแอนโทไซยานินจะเกิดจากความร้อนสามารถเหนี่ยวนำให้โครงสร้างของแอนโทไซยานินเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและพันธะโควาเลนต์ ในโครงสร้างของแอนโทไซยานินถูกเปิดออก ทำให้โครงสร้างของแอนโทไซยานินเกิดการเปลี่ยนแปลง (Markakis, 1982) และเนื่องจากแอนโทไซยานินและฟีนอลิกจัดเป็นสารประกอบที่มีขั้ว ดังนั้น จึงเป็นสารที่สามารถละลายน้ำได้และมีความไวต่อการสลายตัวเนื่องจากความร้อน (Xu and Chang, 2009) นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณแอนโทไซยานินและปริมาณฟีนอลิก ทั้งนี้เนื่องมาจากในข้าวกล้องสังข์หยดจะมีแอนโทไซยานิน และฟีนอลิกเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญที่มีบทบาทในการต้านอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก อาจเป็นผลมาจากวิตามินอี และแกมมาออโรซานอล ซึ่งสามารถเสื่อมสลายได้เนื่องจากความร้อนและความดันสูงในกระบวนการหุงสุก (Champagne *et al.*, 2004) การลดลงของปริมาณแอนโทไซยานิน และปริมาณฟีนอลิก จึงส่งผลให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระลดลงตามไปด้วย (Sompong *et al.*, 2011)

Table 17 Anthocyanin content, phenolic content and antioxidant activity of cooked Sangyod brown rice from various cooking method

Cooking method	Anthocyanin content (mg of cyanidin-3-glucoside/100 g dry wt.)	Phenolic content (mg of ferulic acid/100 g dry wt.)	DPPH scavenging activity (%)
Retort (soaked 18 min in boiling water)	10.47±0.18 ^d	188.78±2.02 ^f	40.35±0.72 ^d
Retort (soaked 20 min in boiling water)	9.50±0.09 ^c	170.01±2.02 ^c	39.17±0.30 ^c
Retort (soaked 22 min in boiling water)	8.96±0.06 ^b	159.09±2.23 ^b	36.88±0.21 ^b
Retort (soaked 24 min in boiling water)	8.01±0.11 ^a	151.44±2.27 ^a	35.34±0.44 ^a
Electric rice cooker	11.73±0.13 ^f	176.89±1.58 ^e	46.19±0.91 ^f
Microwave	11.22±0.09 ^e	170.19±2.31 ^d	44.91±0.51 ^e

Note: Mean with the different letters in the same column are significantly different ($p < 0.05$).

Anthocyanin content, phenolic content and DPPH scavenging activity of raw Sangyod brown rice were 15.57±0.14 mg of cyanidin-3-glucoside/100 g dry wt., 238.40±2.91 mg of ferulic acid/100 g dry wt. and 68.16±0.10 %, respectively.

ชนิดและปริมาณของกรดฟีนอลิก

การจำแนกชนิดและปริมาณของกรดฟีนอลิกในข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี โดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี จะใช้การสกัดแยกกรดฟีนอลิกในตัวอย่างข้าวกล้องสังข์หยดให้อยู่ในรูปกรดฟีนอลิกอิสระ และกรดฟีนอลิกยึดเหนี่ยว จากนั้นนำสารสกัดที่ได้ฉีดเข้าสู่เครื่อง HPLC เพื่อวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของกรดฟีนอลิกในข้าวกล้องสังข์หยด การวิเคราะห์หาชนิดของกรดฟีนอลิกจะใช้การเปรียบเทียบค่า Retention time (RT) จากโครมาโตแกรมของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกกับโครมาโตแกรมของสารมาตรฐานกรดฟีนอลิก (ภาคผนวก ก. ภาพภาคผนวกที่ 1 และตารางภาคผนวกที่ 3) เมื่อทราบค่า RT ของกรดฟีนอลิกแต่ละชนิดที่ปรากฏในโครมาโตแกรมของข้าวกล้องสังข์หยด จะคำนวณหาปริมาณของกรดฟีนอลิกแต่ละชนิด โดยวิเคราะห์แบบใช้สารมาตรฐานภายนอก (External standard) ซึ่งสารมาตรฐานกรดฟีนอลิกแต่ละชนิดจะเตรียมที่ความเข้มข้น 80, 100, 120, 140 และ 160 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ฉีดเข้าสู่เครื่อง HPLC เพื่อหาพื้นที่ใต้พีค (Peak area) ของกรดฟีนอลิกแต่ละความเข้มข้น จากนั้นนำพื้นที่ใต้พีคของสารมาตรฐานแต่ละชนิดมาสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคกับความเข้มข้นของสารมาตรฐาน ทำให้ได้สมการเส้นตรงของกรดฟีนอลิกแต่ละชนิด (ภาคผนวก ก. ภาพภาคผนวกที่ 2) หลังจากนั้นจึงนำพื้นที่ใต้พีคจากโครมาโตแกรมของตัวอย่างข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน (ทั้งในรูปฟีนอลิกอิสระ และฟีนอลิกยึดเหนี่ยว) มาแทนค่าลงในสมการเส้นตรงของกรดฟีนอลิกแต่ละชนิด เมื่อพิจารณาชนิดของกรดฟีนอลิกที่พบในข้าวกล้องสังข์หยดดิบ ทั้งในรูปกรดฟีนอลิกอิสระ และกรดฟีนอลิกยึดเหนี่ยว (ตารางที่ 18) พบว่า กรดฟีนอลิกที่พบในข้าวกล้องสังข์หยดมีด้วยกัน 6 ชนิด ได้แก่ กรดเฟอร์ูลิก กรดโปรโตแคทชูลิก กรดพาราควมาริก กรดพาราไฮดรอกซีเบนโซอิก กรดคาเฟอิก และกรดวานิลลิก โดยมีปริมาณ เท่ากับ 33.04, 16.60, 16.04, 12.58, 12.57 และ 12.48 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ภาคผนวก ก. ภาพภาคผนวกที่ 3) ในขณะที่กรดฟีนอลิกยึดเหนี่ยวแต่ละชนิดมีค่าเท่ากับ 55.42, 36.76, 26.00, 16.10, 21.60, 19.95 และ มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ภาคผนวก ก. ภาพภาคผนวกที่ 4) จะเห็นได้ว่ากรดฟีนอลิกในข้าวกล้องสังข์หยดจะพบในรูปกรดฟีนอลิกยึดเหนี่ยวจะมีปริมาณมากกว่ากรดฟีนอลิกอิสระ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sompong และคณะ (2011) ที่ศึกษาหาชนิดของกรดฟีนอลิกที่พบในข้าวมีสี พบว่า กรดฟีนอลิกอิสระที่พบมาก คือ กรดเฟอร์ูลิก กรดโปรโตแคทชูลิก และกรดวานิลลิก โดยกรดฟีนอลิกอิสระในข้าวสีดําจะพบ กรดพาราควมาริก และกรดวานิลลิก เป็นหลัก และฟีนอลิกยึดเหนี่ยวที่พบมากในข้าวมีสีแดงและสีดํา คือ กรดเฟอร์ูลิก กรดพาราควมาริก และกรดวานิลลิก ซึ่งข้าวกล้องสังข์หยดจัดเป็นข้าวที่มีรงควัตถุ

มีสีแดง ดังนั้น กรดฟีนอลิกที่พบในข้าวกล้องสังข์หยดส่วนใหญ่จะพบในส่วนของชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด และเป็นส่วนสำคัญที่มีบทบาทสำคัญในการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Butsat and Siriamornpun (2010) ที่ศึกษาเกี่ยวกับชนิดของกรดฟีนอลิกที่พบได้ในส่วนต่างๆ ของข้าวขาวดอกมะลิ พบว่า โดยส่วนใหญ่กรดฟีนอลิกที่พบในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดข้าว คือ กรดเฟอรูลิก โดยสีของชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของกรดฟีนอลิก โดยข้าวที่มีรงควัตถุจะสัมพันธ์กับปริมาณของกรดฟีนอลิกที่เพิ่มขึ้น (Goffman and Bergman, 2004) ซึ่งรงควัตถุส่วนใหญ่จะอยู่ในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด และจะถูกกำจัดออกในระหว่างขั้นตอนการขัดสี ดังนั้น ในระหว่างกระบวนการขัดสีจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียสารประกอบฟีนอลิก จากรายงานผลการศึกษานิตของกรดฟีนอลิกที่พบในข้าวที่มีสีแดงของ Massaretto และคณะ (2011) พบว่า กรดเฟอรูลิกพบได้มากในข้าวที่มีสีแดง และพบได้มากกว่าข้าวที่ไม่มีสีถึง 4 เท่า เช่นเดียวกับการศึกษาของ Min และคณะ (2012) เกี่ยวกับปริมาณของกรดฟีนอลิกทั้งในรูปฟีนอลิกอิสระและฟีนอลิกยึดเหนี่ยวในข้าวสายพันธุ์ต่างๆ ซึ่งมีสีของเยื่อหุ้มเมล็ดที่แตกต่างกัน พบว่า ในข้าวที่มีสีแดงจะมีปริมาณกรดฟีนอลิกทั้งในรูปฟีนอลิกอิสระ และฟีนอลิกยึดเหนี่ยวสูงกว่าข้าวสายพันธุ์อื่นๆ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าปริมาณของกรดฟีนอลิกยึดเหนี่ยวจะพบได้ปริมาณสูงกว่าฟีนอลิกอิสระ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Adom และ Liu (2002) ที่พบว่ากรดฟีนอลิกที่พบมากในข้าวจะเป็นฟีนอลิกยึดเหนี่ยว ซึ่งพบได้มากกว่ากรดฟีนอลิกอิสระถึงร้อยละ 62 ในขณะที่การศึกษาของ Maillard และ Berset (1996) พบว่า ในข้าวบาร์เลย์จะพบฟีนอลิกยึดเหนี่ยวมีปริมาณมากกว่าฟีนอลิกอิสระถึง 100 เท่า กรดเฟอรูลิกที่พบในรูปฟีนอลิกยึดเหนี่ยวส่วนใหญ่จะจับอยู่กับโครงสร้างของผนังเซลล์พืช ซึ่งสามารถเกิดพันธะเอสเทอร์กับเพคติน และอะราบิโนไซแลน หรือจับโพลีแซคคาไรด์ชนิดอื่นที่มีอยู่ในโครงสร้างของผนังเซลล์พืช โดยเฉพาะในส่วนของชั้นแอลิวโรน และชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด (Clifford, 1999) ซึ่งฟีนอลิกในรูปฟีนอลิกยึดเหนี่ยวนั้นจัดเป็นฟีนอลิกที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ เนื่องจากจัดเป็นฟีนอลิกที่มีความสามารถในการทนต่อการย่อยสลายของเอนไซม์จากลำไส้เล็ก รวมถึงการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ดังนั้น เมื่อฟีนอลิกยึดเหนี่ยวเข้าสู่ร่างกาย จึงทำให้ฟีนอลิกที่ได้รับมีประสิทธิภาพต่อร่างกายอย่างเต็มที่ (Adom and Liu, 2002; Andreassen *et al.*, 2001) เมื่อพิจารณาผลของวิธีการหุงสุกต่อชนิดและปริมาณกรดฟีนอลิก พบว่า กรดฟีนอลิกอิสระ และกรดฟีนอลิกยึดเหนี่ยวที่พบในข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (ภาคผนวก ก. ภาพภาคผนวกที่ 5 และ 6) การหุงสุกด้วยไมโครเวฟ (ภาคผนวก ก. ภาพภาคผนวกที่ 7 และ 8) และการหุงสุกด้วยหม้อนั่งมาเชื่อความดันสูง (ภาคผนวก ก. ภาพภาคผนวกที่ 9 และ 10) มีค่าแตกต่างกัน ข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดเป็นเวลา 24 นาที แล้วนำมาหุงสุกด้วยหม้อนั่งมาเชื่อ

ความดันสูงจะมีปริมาณกรดฟีนอลิกทั้งในรูปฟีนอลิกอิสระ และฟีนอลิกยึดเหนี่ยวน้อยที่สุด ซึ่งกระบวนการหุงสุกเป็นปัจจัยที่มีผลให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิก ทำให้สารประกอบฟีนอลิกมีปริมาณลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากในกระบวนการหุงสุกมีการใช้น้ำปริมาณมากเกินพอร่วมกับความร้อนจึงเป็นผลให้ส่วนที่สามารถละลายน้ำได้ โดยเฉพาะกรดฟีนอลิกอิสระหลุดออกจากโครงสร้างภายในเมล็ดข้าว และเกิดการสลายตัว จนนำไปสู่การลดลงของปริมาณฟีนอลิกในที่สุด โดยเฉพาะระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ส่วนของสารประกอบฟีนอลิกหลุดออกได้มากขึ้น (Massaretto *et al.*, 2011) ซึ่งการลดลงของกรดฟีนอลิกเป็นผลมาจากกระบวนการหุงสุกที่แตกต่างกัน โดยการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงมีการใช้อุณหภูมิสูงร่วมกับความดันสูงเป็นสาเหตุให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิกได้มากกว่าการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (Zhou *et al.*, 2004; Zhao *et al.*, 2013; Patras *et al.*, 2010) ในขณะที่การหุงสุกด้วยไมโครเวฟส่งผลให้ปริมาณของกรดฟีนอลิกลดลง เนื่องจากโครงสร้างของกรดฟีนอลิกเป็นสารที่มีขั้วจึงสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ทำให้เกิดการออกซิเดชันของกรดฟีนอลิก เป็นสาเหตุให้โครงสร้างของกรดฟีนอลิกเกิดการเปลี่ยนแปลง ปริมาณของกรดฟีนอลิกจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chatthongpisut และคณะ (2015) เกี่ยวกับผลของวิธีการหุงสุกต่อความคงตัวของกรดฟีนอลิกในข้าวสีม่วงของไทย โดยศึกษาผลของการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า หม้อความดัน และไมโครเวฟ พบว่า ในข้าวสีม่วงของไทยจะถูกพบกรดฟีนอลิกอิสระในรูป กรดโปรโตแคทชูลิก และกรดวานิลลิก เป็นหลัก กรดคาเฟอิก กรดวานิลลิก และกรดเฟอรูลิก จะถูกพบมากในรูปฟีนอลิกยึดเหนี่ยว ซึ่งการหุงสุกด้วยไมโครเวฟเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสลายตัวของกรดฟีนอลิกได้มากที่สุด ทั้งนี้เป็นผลมาจากการสลายตัวของกรดฟีนอลิก เนื่องจากความร้อน ซึ่งการสลายตัวของกรดวานิลลิกจะนำไปสู่การสร้างสารระเหยที่เป็นสารให้กลิ่นรส (Jiang and Peterson, 2010) ในขณะที่การลดลงของกรดฟีนอลิกประเภทไฮดรอกซีซินนามิก ได้แก่ กรดพาราควมาริก และกรดเฟอรูลิก จะเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน โดยความร้อนจะไปเร่งให้เกิดการแตกหักของพันธะระหว่างกรดพาราควมาริกกับลิกนิน และพันธะระหว่างกรดเฟอรูลิกกับอะราบีโนไซแลน (Maillard *et al.*, 1996)

Table 18 Phenolic acid content of cooked Sangyod brown rice various cooking method

Cooking method	Phenolic acid (mg/100 g dry wt.)											
	Free form						Bound form					
	PCCA	<i>p</i> -OH	VA	CFA	<i>p</i> -CA	FA	PCCA	<i>p</i> -OH	VA	CFA	<i>p</i> -CA	FA
Raw Sangyod brown rice	16.60	12.58	12.48	12.57	16.04	33.04	36.76	16.10	19.95	21.60	26.00	55.42
Retort (soaked 18 min in boiling water)	10.01	8.61	9.15	10.11	11.11	25.92	29.92	13.30	16.61	17.76	22.32	41.23
Retort (soaked 20 min in boiling water)	8.62	6.32	6.77	7.61	9.61	19.02	20.44	10.94	13.21	13.31	18.53	33.61
Retort (soaked 22 min in boiling water)	6.43	4.21	3.11	4.43	6.51	12.91	14.32	7.67	9.03	9.61	14.87	25.96
Retort (soaked 24 min in boiling water)	4.42	2.87	2.01	2.97	4.22	7.84	9.32	6.53	6.65	6.28	10.82	17.41
Electric rice cooker	8.04	4.32	3.99	5.90	6.78	10.69	11.57	10.03	8.31	10.67	14.09	21.51
Microwave	6.21	3.62	2.21	3.28	5.51	8.62	10.52	8.53	7.21	8.21	12.72	19.84

Note: PCCA, protocatechuic acid; *p*-OH, 4-hydroxybenzoic acid; VA, vanillic acid; CFA, caffeic acid; *p*-CA, *p*-coumaric acid and FA, ferulic acid

3.2.3 โครงสร้างทางจุลภาคของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก

ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของข้าวกล้องสังข์หยดดิบ ข้าวที่ผ่านการแช่น้ำเดือดเป็นเวลา 24 นาที และข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ไมโครเวฟ และหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงที่กำลังขยาย 50 เท่า แสดงดังภาพที่ 28a, 28d, 28g, 28j และ 28m ตามลำดับ พบว่า เมล็ดข้าวกล้องดิบจะมีความกว้างของเมล็ดเท่ากับ 1.60 มิลลิเมตร เมื่อผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่ต่างกันทั้ง 3 วิธี จะทำให้ขนาดของเมล็ดขยายเพิ่มขึ้น และปรากฏรอยแตกบนเมล็ดข้าวสุก โดยข้าวที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงจะมีความกว้างของเมล็ด ความกว้างและความลึกของรอยแตกสูงที่สุด คือ 2.28, 1.88 และ 0.84 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในขณะที่การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าจะมีความกว้างของเมล็ด ความกว้างและความลึกของรอยแตกรองลงมาเท่ากับ 2.08, 0.88 และ 0.80 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนการหุงสุกด้วยไมโครเวฟจะมีความกว้างของเมล็ด ความกว้างและความลึกของรอยแตกเท่ากับ 1.96, 0.80 และ 0.60 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ข้าวที่ผ่านการแช่น้ำเดือดเป็นเวลา 24 นาที ก่อนนำไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงจะมีการขยายตัว ความกว้างและความลึกของรอยแตกน้อยที่สุดเท่ากับ 1.80, 0.40 และ 0.40 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าข้าวที่ผ่านการหุงสุกจะทำให้เมล็ดข้าวขยายขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากในกระบวนการหุงสุกความร้อนจะทำลายเยื่อหุ้มเมล็ด ทำให้เกิดรอยแตกบนเมล็ด ส่งผลให้น้ำที่ใช้ในการหุงสุกเข้าสู่เมล็ดข้าว ทำให้เกิดการขยายตัว (Ogawa *et al.*, 2003) การหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงจะทำให้เมล็ดมีการขยายตัวสูงที่สุด เนื่องจากการใช้ความร้อนร่วมกับความดัน ทำให้เมล็ดข้าวเกิดรอยแตกที่มีขนาดกว้างและลึกมากที่สุด ทำให้น้ำเข้าสู่เมล็ดได้มาก เป็นผลให้เมล็ดเกิดการขยายตัวสูงที่สุด และจากการศึกษาของ Yu และคณะ (2015) ถึงผลของการใช้ความดันสูงต่อลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าวกล้องภายหลังการหุงสุก พบว่า การใช้ความดันสูงทำให้ชั้นเพอริคาร์พและชั้นแอลิวโรนของเมล็ดข้าวกล้องถูกทำลาย เป็นผลให้น้ำเข้าสู่ภายในเมล็ดได้ง่ายมากขึ้น

จากการวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคของข้าวกล้องสังข์หยดดิบ ข้าวที่ผ่านการแช่น้ำเดือด และข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ไมโครเวฟ และหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงที่กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงดังภาพที่ 28b, 28e, 28h, 28k และ 28n ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างของข้าวกล้องสังข์หยดดิบจะประกอบด้วยชั้นนอกสุด คือ ชั้นเพอริคาร์พ (Pericarp) ซึ่งเป็นส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดที่อยู่ชั้นนอกสุดของเมล็ดข้าว ถัดมาเป็นชั้นของแอลิวโรน (Aleurone layer) ในข้าวดิบชั้นแอลิวโรน จะมีองค์ประกอบของที่แอลิวโรนเกรน (Aleurone grain) อยู่ภายในแอลิวโรนเซลล์ (Aleurone cell) ภายในแอลิวโรนเซลล์จะมีส่วนประกอบของสตาร์ช โปรตีน ไขมัน ซึ่งในข้าวดิบชั้นแอลิวโรนจะมี

องค์ประกอบของแอลิวโรนเกรนจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น และชั้นสุดท้ายเป็นส่วนของเนื้อแป้ง (Endosperm layer) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่อยู่ภายในของเมล็ดข้าว มีสตาρχเป็นองค์ประกอบหลัก จัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น ข้าวที่ผ่านการหุงสุกจะทำให้องค์ประกอบของชั้นเยื่อหุ้มเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเกิดการขยายตัวและช่องว่างภายในแอลิวโรนเซลล์ เนื่องจากในกระบวนการหุงสุกมีการใช้ความร้อนร่วมกับปริมาณน้ำที่มากเกินไป จึงมีผลทำลายชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด จึงทำให้สตาρχเกิดการเจลาติไนเซชัน อีกทั้งโปรตีนและไขมันซึ่งอยู่ในชั้นแอลิวโรนก็เกิดการเสียสภาพและละลายออกมากับน้ำที่ใช้ในการหุงสุก หลังจากนั้นเมื่อน้ำระเหยออกจากองค์ประกอบที่ละลายออกมา จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันและสร้างเป็นชั้นเคลือบบริเวณพื้นผิวของเมล็ดข้าว (Coat film) (Ogawa *et al.*, 2003) ดังนั้นข้าวที่ผ่านการหุงสุกมีชั้นเพอริคาร์พที่หนาขึ้น ข้าวที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อมีการขยายของชั้นแอลิวโรนสูงที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากความร้อนร่วมกับความดันที่ใช้ในการหุงสุกมีผลให้ชั้นแอลิวโรนเกิดการขยายตัวได้มาก และข้าวที่ผ่านการหุงสุกจะทำให้มองเห็นผนังเซลล์ (Cell wall) ของชั้นแอลิวโรนได้ชัดเจนขึ้น เนื่องจากชั้นผนังเซลล์ของแอลิวโรนไม่ถูกทำลายด้วยความร้อนภายหลังการหุงสุก ทำให้เกิดช่องว่างภายในชั้นแอลิวโรนเป็นผลให้น้ำที่ใช้ในการหุงสุกเข้าสู่ชั้นของเอนโดสเปิร์ม ทำให้สตาρχที่อยู่ภายในถูกทำลาย จึงเกิดโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb-like matrix) ในชั้นเนื้อแป้ง ซึ่งลักษณะดังกล่าวที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากเมล็ดข้าวเกิดการดูดซับน้ำในระหว่างกระบวนการหุงสุก เมื่อน้ำระเหยออกจากเมล็ดข้าวจึงทำให้เกิดรูบริเวณเนื้อแป้งทำให้มีลักษณะคล้ายรังผึ้ง (Wu *et al.*, 2016)

ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของข้าวกล้องสังข์หยดดิบ ข้าวที่ผ่านการแช่น้ำเดือดเป็นเวลา 24 นาที และข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ไมโครเวฟ และหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงดังภาพที่ 28c, 28f, 28i, 28l และ 28o ตามลำดับ พบว่า สตาρχเกรนูลของข้าวกล้องดิบจะมีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยม (Polyhedral) และสังเกตเห็นลักษณะเหลี่ยมมุมของสตาρχเกรนูลได้อย่างชัดเจน (ภาพที่ 28c) เมื่อผ่านการหุงสุกทั้ง 3 วิธี จะทำให้สตาρχเกรนูลสูญเสียลักษณะรูปหลายเหลี่ยม ทำให้สตาρχเกรนูลมีลักษณะเรียบ (ภาพที่ 28i, 28l และ 28o) ทั้งนี้เนื่องมาจากในกระบวนการหุงสุกมีผลทำให้สตาρχเกรนูลเกิดการเจลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์ (Fully gelatinization) เนื่องจากความร้อนร่วมกับน้ำปริมาณมากเกินไป ในขณะที่ข้าวที่ผ่านการแช่น้ำเดือดจะสังเกตเห็นทั้งส่วนที่มีลักษณะเรียบและสตาρχเกรนูลเป็นรูปหลายเหลี่ยมบางส่วน เนื่องจากในกระบวนการแช่น้ำเดือดสตาρχเกรนูลเกิดการเจลาติไนเซชันได้บางส่วน (Partial gelatinization) (Ahromrit *et al.*, 2007)

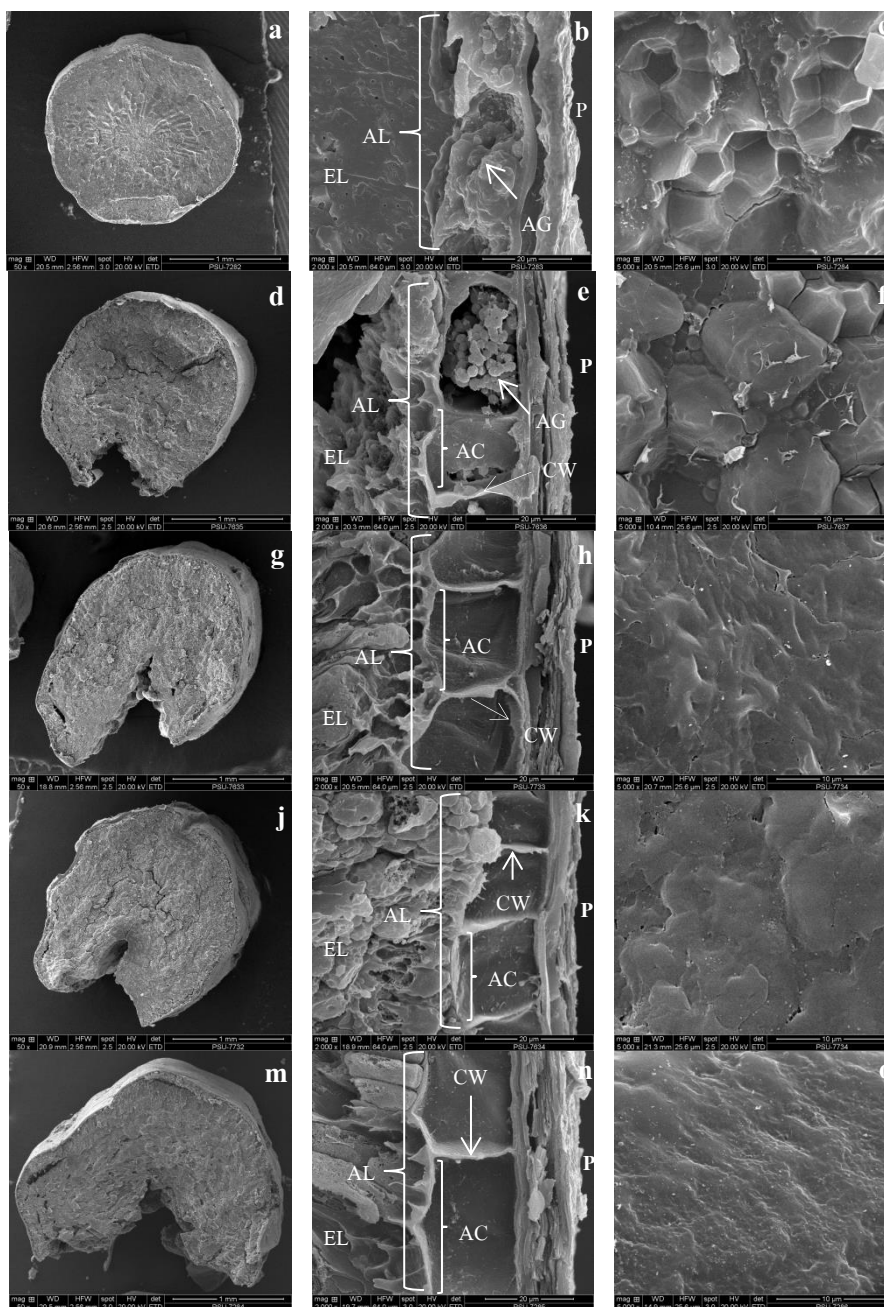


Figure 28 Cross section of raw Sangyod brown rice (a), soaked rice 24 min (d), cooked rice by electric rice cooker (g), cooked rice by microwave (j) and cooked rice by retort (m) at magnification 50X; Cross section of outer layer of raw Sangyod brown rice (b), soaked rice (e), cooked rice by electric rice cooker (h), cooked rice by microwave (k) and cooked rice by retort (n) at magnification 2,000X; Starch granule of raw Sangyod brown rice (c), soaked rice (f), cooked rice by electric rice cooker (i), cooked rice by microwave (l) and cooked rice by retort (o) at magnification 5,000X observed by SEM (accelerating voltage 20 kv)

Note: P, pericarp; AL, aluerone layer; AG, aluerone grain; AC, aluerone cell; EL, endosperm layer and CW, cell wall

3.2.4 คุณภาพการหุงสุก

ผลการวิเคราะห์คุณภาพข้าวกล้องงอกสังข์หยดที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ความดันสูง (แช่ในน้ำเดือดนาน 18, 20, 22 และ 24 นาที) การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และ ไมโครเวฟ โดยพิจารณาจากอัตราการยืดตัว และอัตราการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าวกล้อง (ตารางที่ 19) พบว่า วิธีการหุงสุกด้วยที่แตกต่างกันส่งผลต่ออัตราการยืดตัวและการดูดซับน้ำของข้าวกล้องสังข์หยด ($p < 0.05$) การหุงสุกด้วยไมโครเวฟมีอัตราการยืดตัวและค่าการดูดซับน้ำน้อยที่สุด ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงที่เวลาการแช่ในน้ำเดือด 18 และ 20 นาที มีอัตราการยืดตัวและค่าการดูดซับน้ำมีค่าไม่แตกต่างกับข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ($p \geq 0.05$) ในขณะที่การหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงที่เวลาการแช่ในน้ำเดือด 24 นาทีจะทำให้เมล็ดข้าวกล้องมีอัตราการยืดตัวและการดูดซับน้ำสูงที่สุด ($p < 0.05$) จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าอัตราการยืดตัวจะมีความสัมพันธ์กับค่าการดูดซับน้ำเข้าสู่เมล็ดของข้าวกล้อง โดยเมื่อค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้เมล็ดข้าวกล้องมีอัตราการยืดตัวเพิ่มสูงขึ้น การหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงจะมีการแช่ในน้ำเดือด เพื่อเป็นการให้ความร้อนเบื้องต้นก่อนการฆ่าเชื้อด้วยอุณหภูมิ และความดันสูง จึงส่งผลให้เชื้อหุ้มเมล็ดถูกทำลาย ทำให้น้ำแพร่เข้าสู่เมล็ด จนทำให้สตาร์ชแกรนูลเกิดการพองตัว จึงส่งผลให้เมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดมีการขยายตัว โดยเฉพาะเวลาการแช่ในน้ำเดือดที่เพิ่มมากขึ้นทำให้น้ำเข้าสู่เมล็ดได้มาก ค่าการดูดซับน้ำจึงเพิ่มขึ้น นำไปสู่การขยายตัวของเมล็ดได้มากขึ้น จึงทำให้อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดเพิ่มขึ้น (Yadav and Jindal, 2007; Briffaz *et al.*, 2014)

Table 19 Cooking quality of cooked Sangyod brown rice various cooking method

Cooking method	Water uptake (g/g)	Elongation ratio
Retort (soaked 18 min in boiling water)	2.80±0.03 ^b	1.23±0.01 ^b
Retort (soaked 20 min in boiling water)	2.83±0.02 ^b	1.25±0.03 ^b
Retort (soaked 22 min in boiling water)	2.87±0.01 ^c	1.32±0.05 ^c
Retort (soaked 24 min in boiling water)	2.91±0.02 ^d	1.65±0.02 ^d
Electric rice cooker	2.85±0.02 ^b	1.25±0.02 ^b
Microwave	2.74±0.02 ^a	1.19±0.02 ^a

Note: Mean with the different letters in the same column are significantly different ($p < 0.05$).

3.2.5 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ในด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธี 9-point Hedonic scale ใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน พบว่า วิธีการหุงสุกที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อคะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สี และรสชาติ ($p \geq 0.05$) แต่อย่างไรก็ตามวิธีการหุงสุกที่แตกต่างกันมีผลต่อคะแนนความชอบในด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ($p < 0.05$) (ตารางที่ 20) โดยข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่น้ำเดือดเป็นเวลา 24 นาทีแล้วนำไปหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื่อความดันสูงจะให้คะแนนความชอบในด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมสูงที่สุดเท่ากับ 8.00 และ 7.83 ตามลำดับ ($p < 0.05$) ในขณะที่การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและไม่โครเวฟจะมีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) ทั้งนี้ความแตกต่างของคะแนนด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากวิธีการหุงสุกที่แตกต่างกันมีผลทำให้ข้าวมีความแข็งที่ต่างกัน ซึ่งคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสจะเพิ่มขึ้นตามความแข็งของข้าวที่ลดลง และค่าการเกาะติดที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ลักษณะเนื้อสัมผัสจะเป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อความชอบของผู้บริโภค และความแตกต่างของคะแนนในการยอมรับโดยรวมมีความสัมพันธ์กับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส (Prakash *et al.*, 2005; Miao *et al.*, 2016) ดังนั้น จึงเลือกสถานะการแช่น้ำเดือดนาน 24 นาที ไปใช้ในการทดลองในขั้นต่อไป

Table 20 Sensory evaluation of Sangyod brown rice under various cooking method

Cooking method	Appearance	Color	Taste	Texture	Overall acceptability
Retort (soaked 18 min in boiling water)	7.77±0.19 ^{NS}	7.67±0.53 ^{NS}	7.30±0.15 ^{NS}	7.80±0.26 ^b	7.73±0.11 ^b
Retort (soaked 20 min in boiling water)	7.67±0.38 ^{NS}	7.50±0.29 ^{NS}	7.27±0.21 ^{NS}	7.77±0.37 ^b	7.69 ±0.32 ^b
Retort (soaked 22 min in boiling water)	7.43±0.15 ^{NS}	7.47±0.50 ^{NS}	7.27±0.32 ^{NS}	7.67±0.12 ^b	7.60±0.10 ^b
Retort (soaked 24 min in boiling water)	7.32±0.35 ^{NS}	7.39±0.38 ^{NS}	7.37±0.31 ^{NS}	8.00±0.10 ^c	7.83±0.11 ^c
Electric rice cooker	7.76±0.24 ^{NS}	7.30±0.32 ^{NS}	7.21±0.28 ^{NS}	6.97±0.21 ^a	7.03±0.11 ^a
Microwave	7.87±0.39 ^{NS}	7.43±0.15 ^{NS}	7.27±0.31 ^{NS}	6.89±0.13 ^a	7.00 ±0.21 ^a

Note: Mean with the different letters in the same column are significantly different ($p < 0.05$).

NS is non-significantly different ($p \geq 0.05$).

4. ผลของการเก็บรักษาข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิท

ข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การหุงสุกด้วยหม้อนั่งมา เชื้อ ความดันสูง หม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไมโครเวฟ ถูกนำมาศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี เคมีเชิงฟิสิกส์ และการทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 คุณภาพของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกันระหว่างการเก็บรักษา

ข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกันทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การหุงสุกด้วยหม้อนั่งมาเชื้อ ความดันสูง หม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไมโครเวฟ โดยจะใช้ข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อนั่งมาเชื้อ ความดันสูง จากข้อ 3.1.3 (เลือกสภาวะการแช่ในน้ำเดือด 24 นาที จากผลการทดลองในตอนที่ 3) ส่วนข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไมโครเวฟ จากข้อ 3.2 ถูกนำมาบรรจุลงในถุง nylon/LLDPE ขนาด 11×13 เซนติเมตร ฤๅละ 125 กรัม และนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน สุ่มตัวอย่างวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี เคมีเชิงฟิสิกส์ และทดสอบทางประสาทสัมผัส ในวันที่ 0, 3 และ 7 ของการเก็บรักษา โดยมีรายละเอียดผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

4.1.1 สมบัติทางกายภาพ

ค่าสี

ค่าสีของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 7 วัน จะรายงานผลในรูปของ L^* , a^* , b^* , Hue angle และ Chroma (ตารางที่ 21) โดยพบว่า วิธีการหุงสุกที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าสีของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก ($p < 0.05$) การหุงสุกด้วยหม้อนั่งมาเชื้อ ความดันสูงมีผลให้ค่า L^* , a^* และ Chroma มีค่าต่ำที่สุด ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่า Hue angle มีค่าสูงที่สุด ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก พบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษาส่งผลต่อค่าสีของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกทั้ง 3 วิธี ($p < 0.05$) โดยจะพบการเปลี่ยนแปลงค่าสีในวันที่ 7 ของการเก็บรักษา ค่า L^* , a^* และ Chroma ($p < 0.05$) จะลดลง ในขณะที่ค่า Hue angle มีค่าเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า การเก็บรักษานานขึ้นส่งผลให้เมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกมีสี

คล้ายกัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาเมตาบอลิซึมในระหว่างการเก็บรักษา (Champagne, 1996) และความเป็นสีแดงของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากระยะเวลาเก็บรักษาที่นานขึ้นซึ่งส่งผลให้แอนโทไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุที่ให้สีแดงในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดเกิดการสลายตัว ทำให้ความเป็นสีแดงของเมล็ดมีค่าลดลง (Wrolstad *et al.*, 2005)

เนื้อสัมผัส

การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกันจะติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งและค่าการเกาะติดในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 7 วัน พบว่า วิธีการหุงสุกที่แตกต่างกันมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก ($p < 0.05$) การหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื้อความดันสูงจะมีค่าความแข็งต่ำที่สุด ($p < 0.05$) และมีค่าการเกาะติดสูงที่สุด ($p < 0.05$) (ภาพที่ 29) เนื่องจากการใช้ความดันและอุณหภูมิสูงในระหว่างกระบวนการหุงสุกส่งผลให้เยื่อหุ้มเมล็ดถูกทำลาย น้ำจึงสามารถเข้าสู่ภายในเมล็ด จึงทำให้สตาร์ชแกรนูลเกิดการพองตัว ส่งผลให้ข้าวที่ผ่านการหุงสุกมีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่ม (Tian *et al.*, 2014) ในขณะที่การหุงสุกด้วยไมโครเวฟจะมีความแข็งสูงที่สุดในทางกลับกันค่าการเกาะติดของเมล็ดข้าวจะมีค่าต่ำที่สุด ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก พบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก ($p < 0.05$) โดยจะพบการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็ง ($p < 0.05$) และการลดลงของค่าการเกาะติดของเมล็ด ในวันที่ 7 ของการเก็บรักษา ($p < 0.05$) การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็ง และการลดลงของค่าการเกาะติดของเมล็ดเป็นผลมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากสตาร์ชแกรนูลเกิดการพองตัวและแตกออกระหว่างกระบวนการเกิดเจลลาติไนเซชัน ส่งผลให้อะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่อยู่ภายในสตาร์ชแกรนูลกระจายออกนอกสตาร์ชแกรนูล เมื่อลดอุณหภูมิลงอะไมโลสและอะไมโลเพคตินสายสั้นเกิดการจัดเรียงตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเป็นร่างแหสามมิติ ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวนี้จะไม่สามารถอุ้มน้ำได้อีก และเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง ดังนั้นจึงส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษาจึงมีความแข็งเพิ่มขึ้น และทำให้ค่าการเกาะติดของเมล็ดมีค่าลดลง (BeMiller and Whistler, 1996; Philpot *et al.*, 2006; Manaois, 2009) ดังนั้นจากผลการศึกษายืนยันได้ว่าข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกทั้ง 3 วิธี ได้แก่ หม้อนึ่งมาเชื้อความดันสูง หม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไมโครเวฟ จะพบการเพิ่มขึ้นของความแข็งและการลดลงของค่าการเกาะติดในระหว่างการเก็บรักษา

Table 21 Color value of cooked Sangyod brown rice under various cooking methods during storage at 4°C

Cooking method	Storage time		Color			
	(days)	L*	a*	b*	Hue angle (°)	Chroma
Electric rice cooker	0	52.44±0.71 ^{d,B}	14.36±0.21 ^{d,B}	12.07±0.42 ^{NS,NS}	34.49±1.61 ^{a,A}	18.76±0.45 ^{d,B}
	3	51.67±0.62 ^{cd,AB}	13.89±0.17 ^{d,B}	12.02±0.55 ^{NS,NS}	35.54±1.18 ^{ab,AB}	18.34±0.30 ^{cd,AB}
	7	51.20±0.35 ^{c,A}	13.41±0.27 ^{c,A}	11.87±0.38 ^{NS,NS}	35.93±0.82 ^{b,B}	17.91±0.22 ^{c,A}
Microwave	0	52.71±0.54 ^{d,B}	14.86±0.30 ^{d,B}	12.82±0.50 ^{NS,NS}	34.29±1.31 ^{a,A}	19.63±0.67 ^{c,B}
	3	52.12±0.44 ^{d,B}	14.26±0.37 ^{d,B}	12.72±0.52 ^{NS,NS}	36.07±1.31 ^{ab,AB}	19.11±0.43 ^{c,B}
	7	51.32±0.20 ^{c,A}	13.82±0.16 ^{c,A}	12.52±0.41 ^{NS,NS}	36.35±0.72 ^{b,B}	18.65±0.47 ^{d,A}
Retort	0	46.00±0.50 ^{b,B}	9.54±0.38 ^{b,B}	12.20±0.58 ^{NS,NS}	42.31±1.80 ^{c,A}	15.48±0.64 ^{b,B}
	3	45.50±0.32 ^{ab,AB}	9.32±0.24 ^{b,B}	12.12±0.51 ^{NS,NS}	42.47±1.09 ^{cd,AB}	15.29±0.21 ^{ab,AB}
	7	45.26±0.14 ^{a,A}	8.90±0.17 ^{a,A}	11.94±0.48 ^{NS,NS}	42.93±0.52 ^{d,B}	14.89±0.39 ^{a,A}

Note: Means with different small letters in the same column and capital letters in the same cooking method are significantly different ($p < 0.05$).

NS is non-significantly different ($p \geq 0.05$)

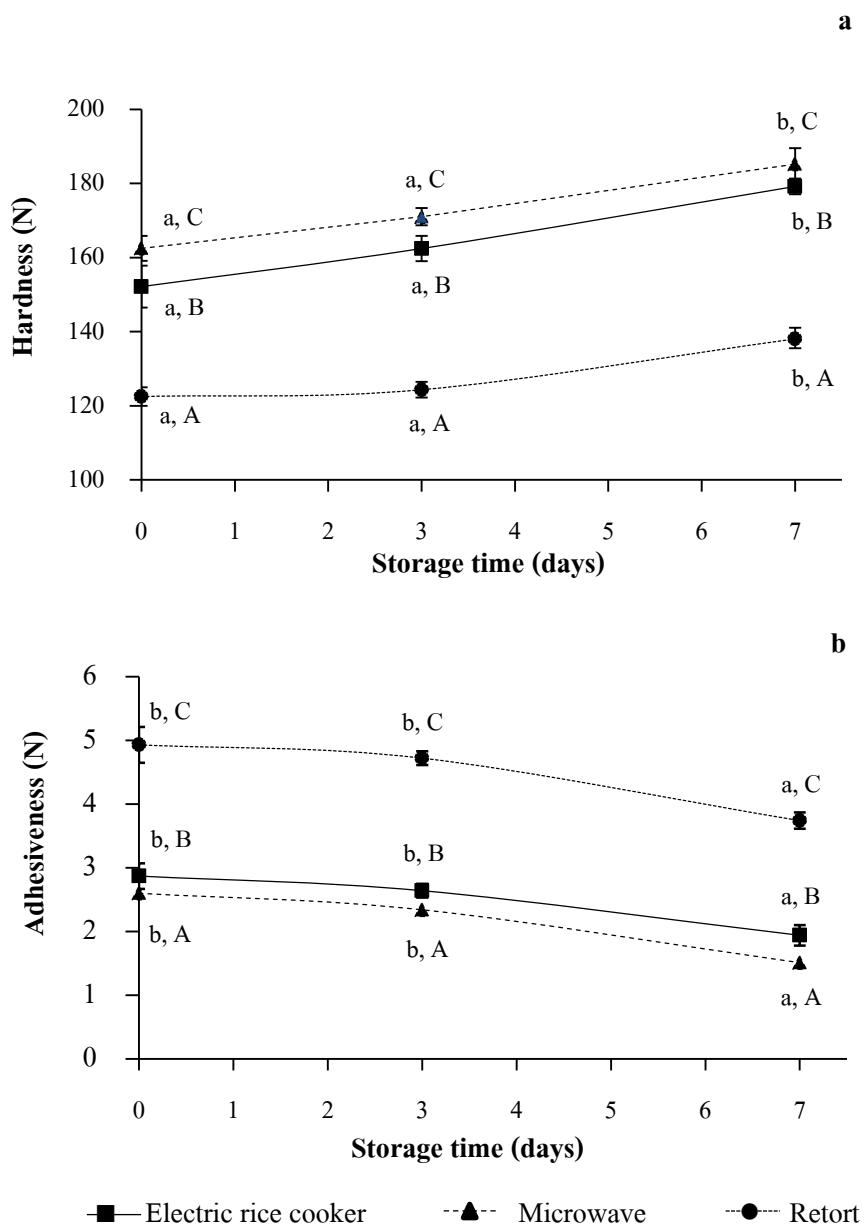


Figure 29 Hardness (a) and adhesiveness (b) of cooked Sangyod brown rice under various cooking method during storage at 4°C

Note: Means with different small letters in each line are significantly different during storage ($p < 0.05$).

Means with the different capital letters in each day are significantly different among three different cooking methods ($p < 0.05$).

4.1.2 สมบัติทางเคมี

ความชื้น

จากการศึกษาปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 7 วัน (ภาพที่ 30) พบว่า วิธีการหุงสุกที่แตกต่างกันมีผลต่อปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก ($p < 0.05$) โดยการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวความดันสูงทำให้มีปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวกล้องสูงที่สุด ($p < 0.05$) และระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อปริมาณความชื้นในข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกทั้ง 3 วิธี ($p < 0.05$) โดยปริมาณความชื้นลดลงตลอดระยะเวลาการเก็บรักษานาน 7 วัน ($p < 0.05$) การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวความดันสูงจะมีปริมาณความชื้นสูงที่สุด ($p < 0.05$) ในขณะที่การหุงสุกด้วยไมโครเวฟจะมีปริมาณความชื้นต่ำสุด ($p < 0.05$) ในวันที่ 7 ของการเก็บรักษา ทั้งนี้การสูญเสียความชื้นของข้าวหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษาเป็นผลมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นการจัดเรียงโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินให้เกิดเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำในโครงสร้างของสตาร์ชถูกบีบออกจากเมล็ด (Syneresis) จึงเป็นผลให้ความชื้นลดลงภายหลังการเก็บรักษา (ปาริตา ขุนแอ, 2550)

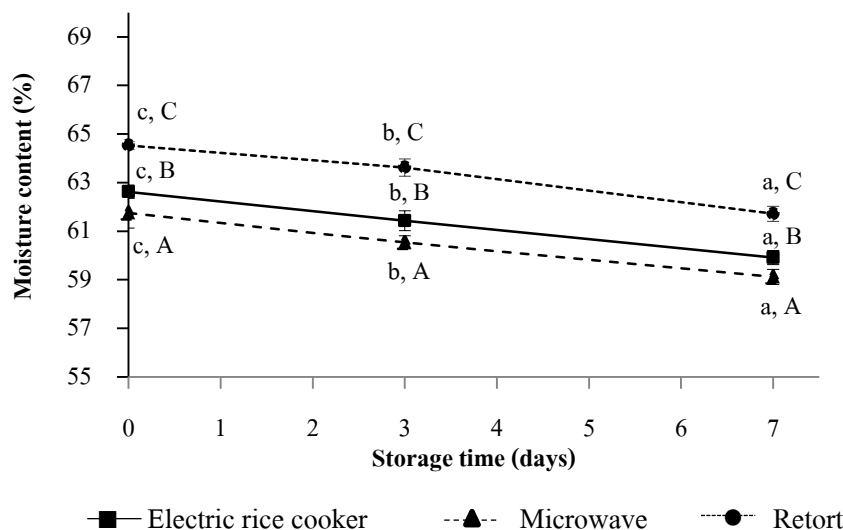


Figure 30 Moisture content of cooked Sangyod brown rice under various cooking method during storage at 4°C

Note: Means with different small letters in each line are significantly different during storage ($p < 0.05$).

Means with the different capital letters in each day are significantly different among three different cooking methods ($p < 0.05$).

ปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

การวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 7 วัน (ภาพที่ 31) พบว่า วิธีการหุงสุกที่แตกต่างกันทั้ง 3 วิธีมีผลต่อปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ($p < 0.05$) ข้าวที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงจะมีปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเหลือน้อยที่สุด ($p < 0.05$) ในขณะที่การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าจะมีปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเหลืออยู่สูงที่สุด ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ พบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษาส่งผลต่อปริมาณแอนโทไซยานิน และฟีนอลิกทั้งหมด ($p < 0.05$) การหุงสุกทั้ง 3 วิธีจะพบการลดลงของปริมาณแอนโทไซยานิน และฟีนอลิกทั้งหมด ในวันที่ 7 ของการเก็บรักษา โดยเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 7 วัน ข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ไมโครเวฟ และหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงจะมีปริมาณแอนโทไซยานิน ลดลงเหลือ 10.92, 10.62 และ 8.01 มิลลิกรัมของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ลดลงเหลือ 164.42, 166.01 และ 141.72 มิลลิกรัมของกรดเฟอรูลิกต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ลดลงเหลือร้อยละ 39.71, 40.98 และ 28.37 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากแอนโทไซยานิน และกรดฟีนอลิกเป็นสารที่ไม่คงตัวในระหว่างการเก็บรักษาสามารถเกิดการสลายตัวได้เนื่องจากแสง ออกซิเจน และอุณหภูมิในการเก็บรักษา ดังนั้นระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้นจึงส่งผลให้เกิดการสลายตัวของแอนโทไซยานิน และกรดฟีนอลิก ส่งผลให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของข้าวหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษาลดลง (Rice-Evans *et al.*, 1996; Oancea *et al.*, 2012)

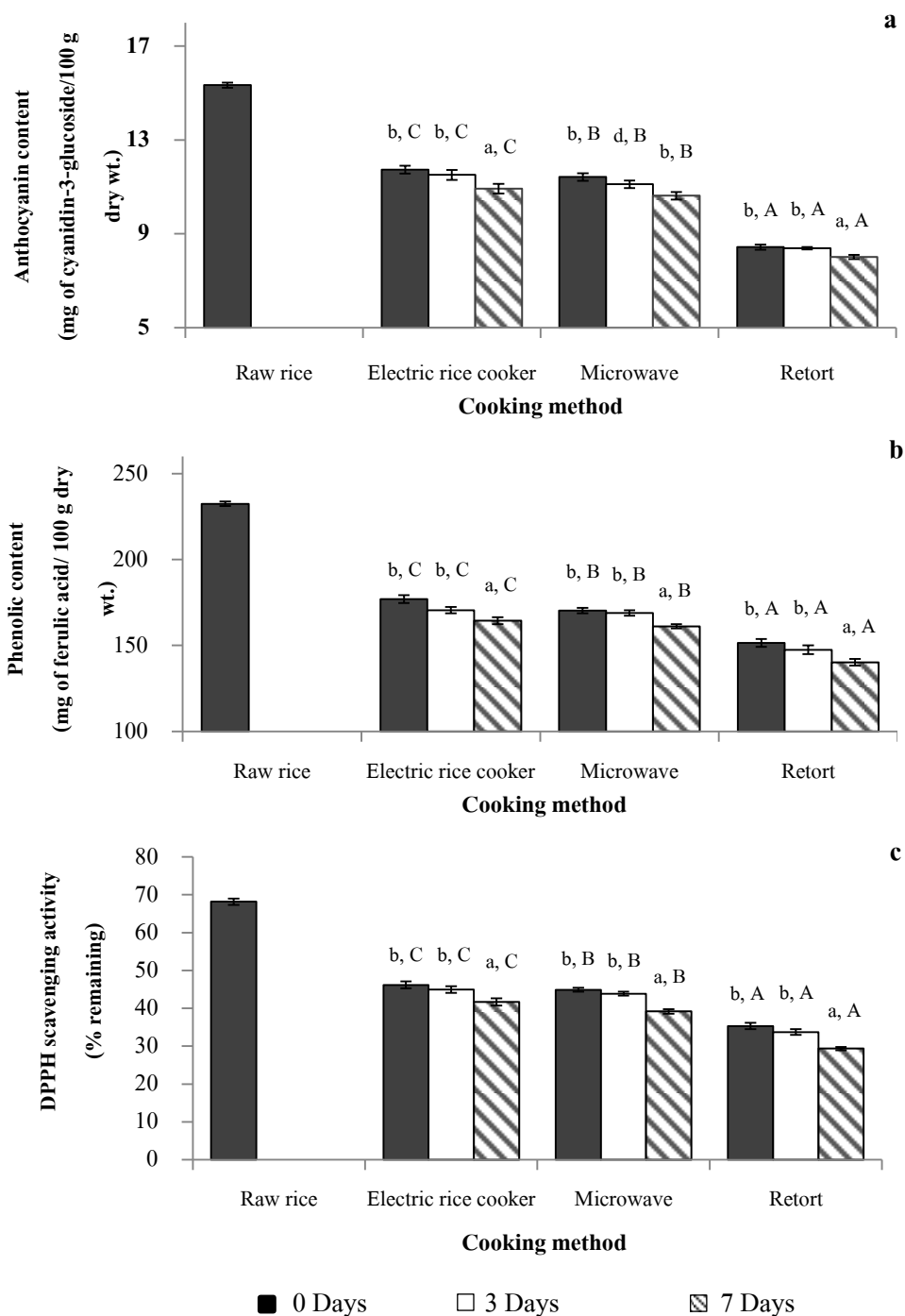


Figure 31 Anthocyanin content (a), phenolic content (b) and DPPH scavenging activity (c) of raw rice and cooked Sangyod brown under various cooking method during storage at 4°C

Note: Means with different small letters in each cooking method are significantly different during storage ($p < 0.05$).

Means with the different capital letters in each day are significantly different among three different cooking methods ($p < 0.05$).

ชนิดและปริมาณของกรดฟีนอลิก

ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของกรดฟีนอลิกในข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 7 วัน ดัง ตารางที่ 22 พบว่า กรดฟีนอลิกอิสระและกรดฟีนอลิกยึดเหนี่ยวที่พบในข้าวกล้องสังข์หยดมีด้วยกัน 6 ชนิด ได้แก่ กรดพาราไฮดรอกซีเบนโซอิก กรดเบนโซอิก กรดวานิลลิก กรดคาเฟอิก กรดพาราควมาริก และกรดเฟอร์ูลิก โดยจะพบกรดฟีนอลิกในรูปยึดเหนี่ยวสูงกว่าในรูปอิสระ เมื่อพิจารณาผลของวิธีการหุงสุกทั้ง 3 วิธีต่อชนิดและปริมาณของกรดฟีนอลิก พบว่า กรดฟีนอลิกทั้ง 6 ชนิดทั้งในรูปอิสระและยึดเหนี่ยวจะพบมากที่สุดในช่วงการสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ไมโครเวฟ และหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อชนิดและปริมาณของกรดฟีนอลิก พบว่า กรดฟีนอลิกทั้ง 6 ชนิด ทั้งในรูปอิสระและยึดเหนี่ยวจะมีปริมาณลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tananuwong และ Tangsrianugul (2013) ที่พบว่า การเก็บรักษาข้าวหอมแดงหุงสุกเป็นระยะเวลาสั้นส่งผลให้กรดฟีนอลิกเกิดการสลายตัวได้ในระหว่างการเก็บรักษา ส่งผลให้ปริมาณของกรดฟีนอลิกลดลง เมื่อผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลานาน 7 วัน จะเห็นได้ว่าการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงจะมีปริมาณของกรดฟีนอลิกทั้ง 6 ชนิดน้อยที่สุด ในขณะที่การหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าจะพบปริมาณกรดฟีนอลิกแต่ละชนิดมากที่สุด ทั้งนี้จะพบปริมาณของกรดฟีนอลิกยึดเหนี่ยวสูงกว่าฟีนอลิกอิสระเมื่อผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลา 7 วัน เนื่องจากกรดฟีนอลิกยึดเหนี่ยวจะจับอยู่กับองค์ประกอบอื่นในโครงสร้างของข้าวกล้องสังข์หยด ดังนั้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ทำให้กรดฟีนอลิกยึดเหนี่ยวมีความคงตัวในระหว่างการเก็บรักษา ในขณะที่กรดฟีนอลิกอิสระสามารถเกิดการออกซิเดชันได้ง่าย จึงทำให้เกิดการสลายตัวได้ระหว่างการเก็บรักษา (Clifford, 1999)

Table 22 Phenolic acid of cooked Sangyod brown rice under various cooking method during storage at 4°C

Cooking method	Storage (days)	Phenolic acid (mg/100 g dry wt.)											
		Free form					Bound form						
		PCCA	<i>p</i> -OH	VA	CFA	<i>p</i> -CA	FA	PCCA	<i>p</i> -OH	VA	CFA	<i>p</i> -CA	FA
Electric rice cooker	0	8.04	4.32	3.99	5.90	6.78	10.69	11.57	10.03	8.31	10.67	14.09	21.51
	3	7.89	4.30	3.97	5.88	6.75	10.67	11.55	10.00	8.28	10.65	14.05	21.49
	7	7.61	4.21	3.91	5.83	6.70	10.61	11.46	9.93	8.22	10.60	13.97	21.41
Microwave	0	6.21	3.62	2.21	3.28	5.51	8.62	10.52	8.53	7.21	8.21	12.72	19.84
	3	6.17	3.60	2.19	3.27	5.48	8.60	10.50	8.50	7.19	8.20	12.70	19.80
	7	6.11	3.54	2.11	3.24	5.43	8.52	10.45	8.44	7.14	8.16	12.67	19.75
Retort	0	4.42	2.87	2.01	2.97	4.22	7.84	9.32	6.53	6.65	6.28	10.82	17.41
	3	4.38	2.86	1.98	2.93	4.20	7.82	9.30	6.50	6.62	6.26	10.80	17.38
	7	4.33	2.80	1.93	2.84	4.17	7.77	9.25	6.47	6.58	6.20	10.76	17.32

Note: PCCA, protocatechuic acid; *p*-OH, 4-hydroxybenzoic acid; VA, vanillic acid; CFA, caffeic acid; *p*-CA, *p*-coumaric acid and FA, ferulic acid

4.1.2 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์

รีโทรเกรเดชัน

จากการศึกษาผลของวิธีการหุงสุกที่แตกต่างกัน 3 วิธีต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวกล้องงอกสังข์หยดที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน แสดงดังตารางที่ 23 พบว่า วิธีการหุงสุกที่แตกต่างกันส่งผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวกล้องงอกสังข์หยดหุงสุก ($p < 0.05$) โดยการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงจะทำให้อุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) อุณหภูมิสูงสุด (T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (T_c) และพลังงานในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (ΔH) ($p < 0.05$) มีค่าต่ำกว่าการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและไมโครเวฟ ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวกล้องงอกสังข์หยดหุงสุก พบว่า ระหว่างการเก็บรักษาที่นานขึ้นจะพบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) อุณหภูมิสูงสุด (T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (T_c) และพลังงานในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (ΔH) ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาพลังงานในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (ΔH) ในวันที่ 7 ของการเก็บรักษา พบว่า การหุงสุกด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง หม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไมโครเวฟ เท่ากับ 0.15, 0.24 และ 0.27 จูลต่อกรัม ซึ่งพลังงานในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (ΔH) ที่เพิ่มขึ้นเป็นสิ่งบ่งชี้ถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันที่เพิ่มขึ้นของข้าวหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tian และคณะ (2014) ที่เกี่ยวกับผลของการหุงสุกโดยใช้ความดันสูงต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวหุงสุก พบว่า การหุงสุกโดยใช้ความดันสูงในระหว่างการเก็บรักษาจะทำให้ข้าวเกิดรีโทรเกรเดชันน้อยกว่าการหุงสุกโดยใช้ความดันบรรยากาศ ทั้งนี้เนื่องมาจากการหุงสุกโดยใช้ความดันสูงจะช่วยป้องกันการกระจายตัวของอะไมโลสออกนอกสตาร์ชแกรนูล ทำให้อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันลดลง (Leelayuthsoontorn and Thipayarat, 2006, Hu *et al.*, 2011) จากการศึกษาของ Perdon และคณะ (1999) ติดตามการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษา พบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวหุงสุกที่เพิ่มขึ้นจาก 24 ชั่วโมงเป็น 96 ชั่วโมงมีผลให้อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้นจาก 0.27 เป็น 1.30 จูลต่อกรัม การเกิดรีโทรเกรเดชันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 48 ชั่วโมง กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชันในขั้นตอนการเกิดผลึกของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะเกิดขึ้นได้ในตัวอย่างที่มีความชื้นร้อยละ 60 ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสซึ่งปริมาณความชื้นในตัวอย่างข้าวกล้องงอกสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกทั้ง 3 วิธีมีค่าระหว่างร้อยละ 59.12-64.53 ดังนั้น การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีผลทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้มากขึ้น ซึ่งอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เนื้อสัมผัสของข้าวมีความแข็ง และมีความแน่นเนื้อมากขึ้น จึงสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของข้าวหุงสุกระหว่างการเก็บรักษา (Slade *et al.*, 1987)

Table 23 Thermal properties of cooked Sangyod brown rice under various cooking method during storage at 4°C

Cooking method	Storage (days)	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH (J/g)
Electric rice cooker	0	56.57±0.01 ^{d,A}	60.51±0.02 ^{d,A}	62.05±0.01 ^{d,A}	0.00±0.00 ^{a,A}
	3	56.62±0.03 ^{e,B}	60.55±0.01 ^{e,B}	62.09±0.02 ^{e,B}	0.16±0.02 ^{c,B}
	7	56.68±0.02 ^{f,C}	60.60±0.01 ^{f,C}	62.13±0.03 ^{f,C}	0.24±0.01 ^{d,C}
Microwave	0	56.60±0.02 ^{d,A}	60.53±0.02 ^{d,A}	62.07±0.01 ^{d,A}	0.00±0.00 ^{a,A}
	3	56.64±0.01 ^{e,B}	60.57±0.01 ^{e,B}	62.11±0.02 ^{e,B}	0.14±0.01 ^{c,B}
	7	56.66±0.02 ^{f,C}	60.62±0.02 ^{f,C}	62.16±0.02 ^{f,C}	0.27±0.02 ^{d,C}
Retort	0	54.49±0.01 ^{a,A}	56.57±0.01 ^{a,A}	58.17±0.01 ^{a,A}	0.00±0.00 ^{a,A}
	3	54.52±0.02 ^{b,B}	56.64±0.02 ^{b,B}	58.22±0.03 ^{b,B}	0.09±0.02 ^{b,B}
	7	54.57±0.02 ^{c,C}	56.72±0.01 ^{c,C}	58.28±0.02 ^{c,C}	0.15±0.03 ^{c,C}

Note: Means with different small letters in the same column and capital letters in the same cooking method are significantly different ($p < 0.05$).

ทดสอบทางประสาทสัมผัส

การทดสอบทางประสาทของข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธีระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 7 วัน โดยใช้การทดสอบความชอบแบบ 9-point hedonic scale ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน ทดสอบความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ผลแสดงดังตารางที่ 24 พบว่า คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี และรสชาติไม่มีความแตกต่างในระหว่างการเก็บรักษา ($p \geq 0.05$) ในขณะที่ระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นจะส่งผลให้คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมลดลง ($p < 0.05$) ในวันที่ 7 ของการเก็บรักษาข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าจะมีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมลดลงจาก 6.97 เหลือเท่ากับ 6.56 และ 7.03 และ 6.72 ตามลำดับ ($p < 0.05$) ในขณะที่การหุงสุกด้วยไมโครเวฟจะมีคะแนนคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมลดลงจาก 6.89 เหลือเท่ากับ 6.51 และ 7.00 เหลือเท่ากับ 6.56 ตามลำดับ ($p < 0.05$) และการหุงสุกด้วยหม้อนั่งฆ่าเชื้อความดันสูงจะมีคะแนนคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมลดลงจาก 8.00 เหลือเท่ากับ 7.67 และ 7.83 เหลือเท่ากับ 7.65 ตามลำดับ ($p < 0.05$) ทั้งนี้คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษามีผลมาจากการเกิดรีโทกรเดชันของอะไมโลส และอะไมโลเพคติน ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของข้าวมีความแข็งเพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บรักษา จึงทำให้คะแนนความชอบในด้านเนื้อสัมผัส และคะแนนความชอบโดยรวมลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้น (Slade *et al.*, 1987; Perdon *et al.*, 1999)

Table 24 Sensory evaluation score of Sangyod brown rice under various cooking method during storage at 4°C

Cooking method	Storage (days)	Appearance	Color	Taste	Texture	Overall acceptability
Electric rice cooker	0	7.76±0.24 ^{NS, NS}	7.30±0.32 ^{NS, NS}	7.21±0.28 ^{NS, NS}	6.97±0.21 ^{b, B}	7.03±0.11 ^{b, B}
	3	7.56±0.36 ^{NS, NS}	7.27±0.23 ^{NS, NS}	7.10±0.18 ^{NS, NS}	6.87±0.13 ^{b, B}	6.93±0.29 ^{ab, AB}
	7	7.20±0.46 ^{NS, NS}	7.19±0.17 ^{NS, NS}	6.87±0.27 ^{NS, NS}	6.56±0.15 ^{a, A}	6.72±0.14 ^{a, A}
Microwave	0	7.87±0.39 ^{NS, NS}	7.43±0.15 ^{NS, NS}	7.27±0.31 ^{NS, NS}	6.89±0.13 ^{b, B}	7.00 ±0.21 ^{b, B}
	3	7.63±0.31 ^{NS, NS}	7.37±0.25 ^{NS, NS}	7.10±0.24 ^{NS, NS}	6.77±0.16 ^{ab, AB}	6.95±0.21 ^{ab, AB}
	7	7.50±0.27 ^{NS, NS}	7.03±0.22 ^{NS, NS}	6.69±0.36 ^{NS, NS}	6.51±0.22 ^{a, A}	6.56±0.41 ^{a, A}
Retort	0	7.32±0.35 ^{NS, NS}	7.39±0.38 ^{NS, NS}	7.37±0.31 ^{NS, NS}	8.00±0.10 ^{d, B}	7.83±0.11 ^{d, B}
	3	7.22±0.36 ^{NS, NS}	7.31±0.26 ^{NS, NS}	7.23±0.44 ^{NS, NS}	7.88±0.20 ^{cd, AB}	7.80±0.26 ^{cd, AB}
	7	7.16±0.49 ^{NS, NS}	7.20±0.18 ^{NS, NS}	7.20±0.49 ^{NS, NS}	7.67±0.16 ^{c, A}	7.65±0.11 ^{c, A}

Note: Means with different small letters in the same column and capital letters in the same cooking method are significantly different ($p < 0.05$).

NS is non-significantly different ($p \geq 0.05$).

4.2 คุณภาพของข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนิพจนานุกรมในภาชนะบรรจุปิดสนิทในระหว่างการเก็บรักษา

ข้าวกล้องสังข์หยดในภาชนะบรรจุปิดสนิทพร้อมบริโภคนิพจนานุกรมที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมา เชื้อความดันสูง ถูกนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 4 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 6 เดือน จากนั้นสุ่มตัวอย่างวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี เคมี เชิงฟิสิกส์ และทดสอบทางประสาทสัมผัส ซึ่งมีรายละเอียดผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

4.2.1 สมบัติทางกายภาพ

ค่าสี

ค่าสีของข้าวกล้องสังข์หยดในภาชนะบรรจุปิดสนิทพร้อมบริโภคนิพจนานุกรมในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องและ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 เดือน รายงานค่าสีในรูป L^* , a^* , b^* , Hue angle และ Chroma แสดงดังตารางที่ 25 จากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าค่า L^* , a^* , b^* และ Chroma ของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกระหว่างการเก็บรักษาจะมีค่าลดลง ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่า Hue angle จะมีค่าเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาผลอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา พบว่า อุณหภูมิที่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษามีผลต่อค่าสีของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก ($p < 0.05$) โดยการเก็บรักษาในเดือนที่ 0 ข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกจะมีค่า L^* , a^* , b^* , Hue angle และ Chroma เท่ากับ 46.00, 9.54, 12.20, 42.21 และ 15.49 ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการเก็บรักษาในเดือนที่ 6 การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะมีค่า L^* , a^* , b^* , Hue angle และ Chroma เท่ากับ 44.03, 7.76, 11.30, 44.10 และ 13.71 ตามลำดับ ในขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง จะมีค่า L^* , a^* , b^* , Hue angle และ Chroma เท่ากับ 42.29, 6.19, 11.00, 46.62 และ 12.62 ตามลำดับ โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องจะมีการลดลงของค่า L^* , a^* , b^* และ Chroma ในขณะที่มีการเพิ่มขึ้นของค่า Hue angle สูงกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าสีของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษาเป็นผลมาจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงจะมีผลทำให้เกิดการสลายตัวของแอนโทไซยานินได้สูงกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (Wrolstad *et al.*, 2005) จึงส่งผลให้ในระหว่างการเก็บรักษา a^* มีค่าลดลง และค่า Hue angle มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงการลดลงของความเป็นสีแดงในเมล็ดข้าวกล้อง ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของค่า Chroma นั่นคือความเข้มของสีแดงลดลงตามไปด้วย ในขณะที่ค่า L^* ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าต่ำกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงขึ้นมีผลในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดในเมล็ดข้าว (Champagne, 1996; Lamberts *et al.*, 2006) ส่งผลให้สีของเมล็ดมีความคล้ำเพิ่มขึ้น ค่า L^* จึงมีค่าลดลง ดังนั้น การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสจึงสามารถลดการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวกล้องสังข์หยดในภาชนะบรรจุปิดสนิทพร้อมบริโภคนิพจนานุกรมในระหว่างการเก็บรักษาได้มากกว่าการเก็บที่อุณหภูมิห้อง

Table 25 Color values of cooked Sangyod brown using retort at 118 °C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperature

Storage time (months)	L*			a*			b*			Hue angle (°)			Chroma		
	4°C	RT	4°C	4°C	RT	4°C	4°C	RT	4°C	4°C	RT	4°C	RT	4°C	RT
0	46.00±0.50 ^{1F}	46.00±0.50 ^{1G}	9.54±0.38 ^{1C}	9.54±0.38 ^{1F}	12.20±0.08 ^{1D}	12.20±0.08 ^{1C}	42.21±0.60 ^{1A}	42.21±0.60 ^{1A}	42.21±0.60 ^{1A}	42.21±0.60 ^{1A}	15.49±0.39 ^{1E}	15.49±0.39 ^{1E}	15.49±0.39 ^{1E}	15.49±0.39 ^{1E}	15.49±0.39 ^{1E}
1	45.16±0.17 ^{1E}	45.03±0.13 ^{1F}	8.85±0.27 ^{1B}	8.64±0.07 ^{1E}	11.93±0.18 ^{1B}	11.93±0.18 ^{1B}	43.00±0.29 ^{1B,AB}	43.14±1.12 ^{1B}	43.00±0.29 ^{1B,AB}	43.14±1.12 ^{1B}	14.85±0.28 ^{1B}	14.85±0.28 ^{1B}	14.85±0.28 ^{1B}	14.85±0.28 ^{1B}	14.59±0.19 ^{1D}
2	45.23±0.24 ^{1D}	44.45±0.15 ^{1E}	8.51±0.18 ^{1B}	7.87±0.15 ^{1D}	11.85±0.12 ^{1B}	11.85±0.12 ^{1B}	43.47±0.27 ^{1B}	44.06±0.27 ^{1C}	43.47±0.27 ^{1B}	44.06±0.27 ^{1C}	14.59±0.11 ^{1B}	14.59±0.11 ^{1B}	14.59±0.11 ^{1B}	14.59±0.11 ^{1B}	13.88±0.27 ^{1C}
3	44.86±0.17 ^{1C}	43.55±0.08 ^{1D}	8.45±0.15 ^{1B}	7.11±0.07 ^{1C}	11.78±0.13 ^{1B}	11.78±0.13 ^{1B}	43.49±0.28 ^{1B,BC}	45.22±0.58 ^{1D}	43.49±0.28 ^{1B,BC}	45.22±0.58 ^{1D}	14.50±0.24 ^{1B}	14.50±0.24 ^{1B}	14.50±0.24 ^{1B}	14.50±0.24 ^{1B}	13.32±0.24 ^{1B}
4	44.39±0.08 ^{1B}	43.01±0.09 ^{1C}	8.11±0.27 ^{1A}	6.72±0.16 ^{1B}	11.41±0.10 ^{1B,A}	11.41±0.10 ^{1B,A}	43.62±0.54 ^{1B,BC}	45.86±.31 ^{1E}	43.62±0.54 ^{1B,BC}	45.86±.31 ^{1E}	14.00±0.25 ^{1A}	14.00±0.25 ^{1A}	14.00±0.25 ^{1A}	14.00±0.25 ^{1A}	13.06±0.25 ^{1B,AB}
5	44.21±0.19 ^{1E,AB}	42.68±0.15 ^{1B}	8.02±0.23 ^{1A}	6.44±0.15 ^{1B}	11.35±0.17 ^{1B,A}	11.35±0.17 ^{1B,A}	43.70±0.22 ^{1B,BC}	46.29±0.42 ^{1E}	43.70±0.22 ^{1B,BC}	46.29±0.42 ^{1E}	13.90±0.18 ^{1A}	13.90±0.18 ^{1A}	13.90±0.18 ^{1A}	13.90±0.18 ^{1A}	12.86±0.26 ^{1B,AB}
6	44.03±0.15 ^{1A}	42.29±0.16 ^{1A}	7.76±0.18 ^{1A}	6.19±0.09 ^{1A}	11.30±0.08 ^{1B,A}	11.30±0.08 ^{1B,A}	44.10±0.24 ^{1C}	46.62±0.51 ^{1E}	44.10±0.24 ^{1C}	46.62±0.51 ^{1E}	13.71±0.11 ^{1A}	13.71±0.11 ^{1A}	13.71±0.11 ^{1A}	13.71±0.11 ^{1A}	12.62±0.31 ^{1A}

Note: RT, room temperature

Means with different small letters in the same month and capital letters in the same storage temperature are significantly different (p<0.05).

เนื้อสัมผัส

ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกเป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถบ่งบอกคุณภาพของข้าวหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษา การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนิถนาในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง เป็นเวลานาน 6 เดือน รายงานผลในรูปของค่าความแข็งและค่าการเกาะติดของเมล็ด แสดงดังภาพที่ 32 จากการวิเคราะห์พบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนิถนา ($p < 0.05$) โดยความแข็งของข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) (ภาพที่ 31a) ในขณะที่ค่าการเกาะติดของเมล็ดจะมีค่าลดลง ($p < 0.05$) (ภาพที่ 31b) ค่าความแข็งของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกจะเพิ่มขึ้นมากในช่วงเวลา 3 เดือนของการเก็บรักษา ในขณะที่ค่าการเกาะติดของเมล็ดจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน ($p < 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลส ในขณะที่ระยะเวลาการเก็บรักษาตั้งแต่ 3 เดือนเป็นต้นไปจะพบการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งอย่างช้าตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ในขณะที่ค่าการเกาะติดก็จะลดลงอย่างช้าตามไปด้วย เนื่องมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลเพคติน (Ding *et al.*, 2003; Yu *et al.*, 2009) และอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนิถนา ($p < 0.05$) โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสจะส่งผลให้เมล็ดข้าวมีความแข็งสูงกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่าการเกาะติดของเมล็ดข้าวมีค่าต่ำกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ($p < 0.05$) ทั้งนี้ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้สตาร์ชมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีความใกล้ชิดกันมากขึ้น จึงส่งผลให้โครงสร้างร่างแหสามมิติแน่นมากขึ้น ดังนั้นโครงสร้างของเมล็ดข้าวกล้องมีความแข็งแรง เนื้อสัมผัสของข้าวจึงมีความแข็งเพิ่มขึ้น (ปาริตา ชุนแอ, 2550; Colwell, 1969) Perdon และคณะ (1999) รายงานผลของการเก็บรักษาข้าวหุงสุกที่อุณหภูมิต่างกัน (3, 20 และ 36 องศาเซลเซียส) ต่อลักษณะเนื้อสัมผัส พบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสส่งผลให้ข้าวหุงสุกมีความแน่นเนื้อและความเหนียวมากที่สุด ในขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส ทำให้มีความแน่นเนื้อและความเหนียวของเมล็ดน้อยที่สุด ดังนั้นการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้สตาร์ชเกิดรีโทรเกรเดชันได้เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้น

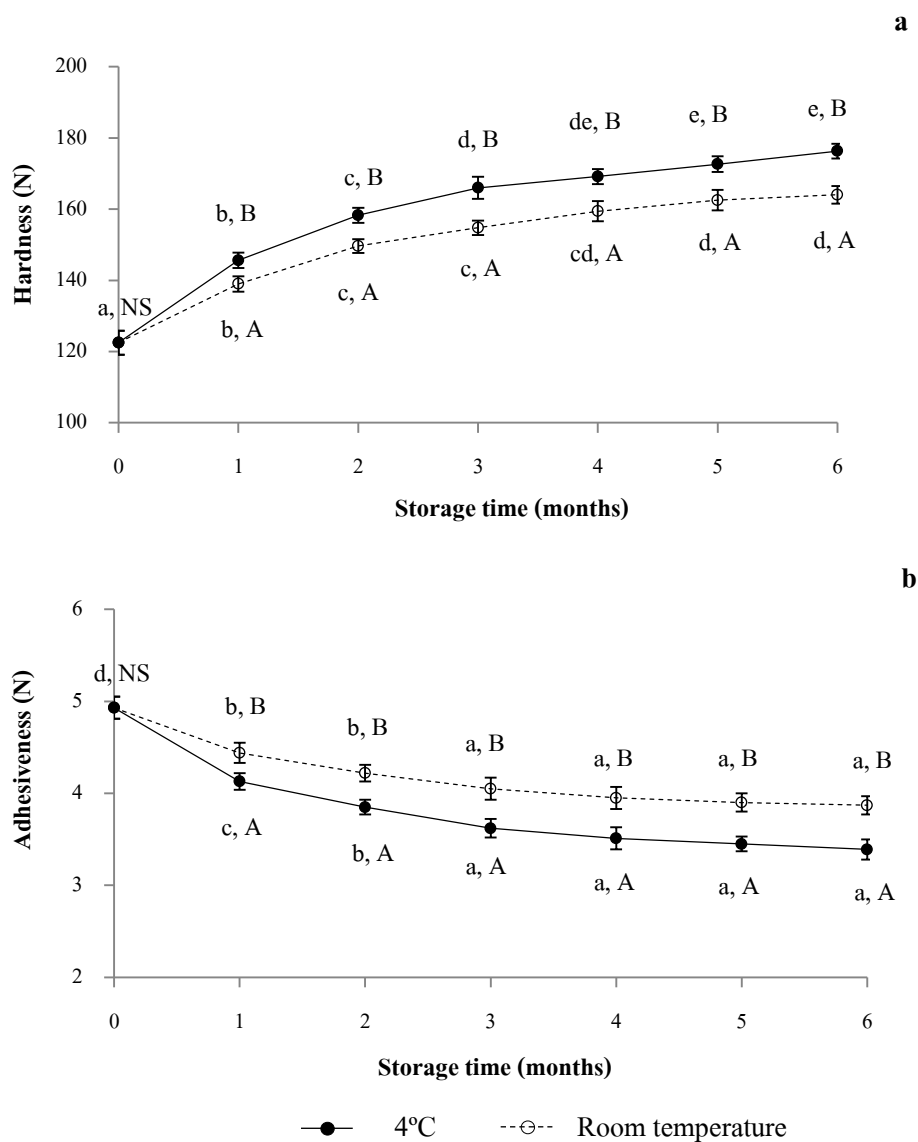


Figure 32 Hardness (a) and adhesiveness (b) of cooked Sangyod brown using retort at 118 °C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperatures

Note: Means with the different small letters in each line are significantly different during storage ($p < 0.05$).

Means with the different capital letters in each month are significantly different among two different storage temperatures ($p < 0.05$).

NS is non-significantly different among two different storage temperatures ($p \geq 0.05$).

4.2.2 สมบัติทางเคมี

ความชื้น

จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิทและเก็บรักษาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 2 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 เดือน แสดงดังภาพที่ 33 พบว่า ระยะเวลาการเก็บเพิ่มขึ้นรักษาส่งผลให้ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยดลดลง ($p < 0.05$) และอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษามีผลต่อปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวกล้องสังข์หยด ($p < 0.05$) โดยปริมาณความชื้นในข้าวกล้องสังข์หยดที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องมีค่าลดลงเล็กน้อยในระหว่างการเก็บรักษา ในขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะพบการลดลงของปริมาณความชื้นมากกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ($p < 0.05$) โดยเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการเก็บรักษาในเดือนที่ 6 พบว่า การเก็บรักษาข้าวที่อุณหภูมิห้องมีปริมาณความชื้นลดลงจากร้อยละ 64.53 เหลือเท่ากับ ร้อยละ 58.69 ในขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสจะทำให้ปริมาณความชื้นลดลงจากร้อยละ 64.53 เหลือเท่ากับ ร้อยละ 54.01 ทั้งนี้เนื่องมาจากในระหว่างการเก็บรักษาข้าวที่ผ่านการหุงสุกจะเกิดการซีเนอริซิส (Syneresis) ทำให้น้ำถูกบีบออกจากโครงสร้างภายในเมล็ด ส่งผลให้ปริมาณความชื้นภายในเมล็ดลดลง (Aguirre *et al.*, 2011; Parnsakhorn and Noomhorm, 2012)

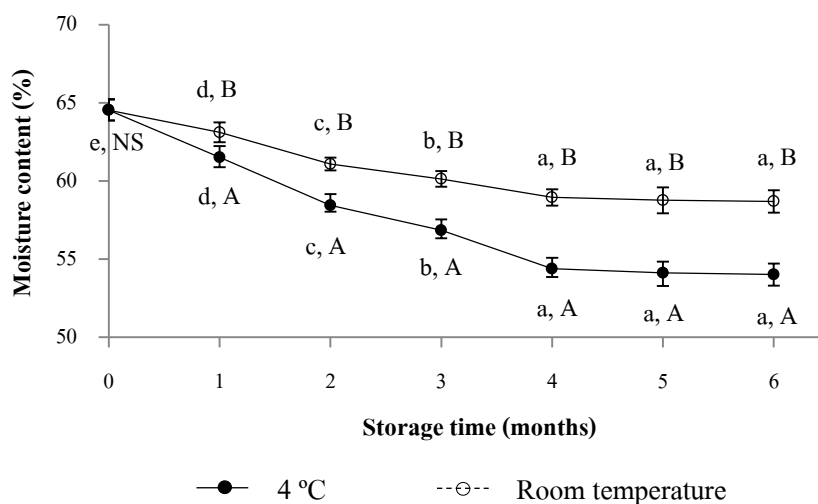


Figure 33 Moisture content of cooked Sangyod brown rice using retort at 118°C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperatures

Note: Means with the different small letters in each line are significantly different during storage ($p < 0.05$).

Means with the different capital letters in each month are significantly different among two different storage temperatures ($p < 0.05$).

NS is non-significantly different among two different storage temperatures ($p \geq 0.05$).

ปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

แอนโทไซยานินจัดเป็นสารประกอบฟีนอลิกชนิดหนึ่งที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสามารถสลายตัวได้ง่ายในระหว่างกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษา (Chatthongpisut *et al.*, 2015) ดังนั้น การวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิทในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 6 เดือน เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอนโทไซยานินและฟีนอลิกทั้งหมด จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้นส่งผลให้ปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH ลดลง ($p < 0.05$) และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน พบว่า อุณหภูมิในการเก็บรักษามีผลต่อปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH ($p < 0.05$) การเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องมีปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระต่ำกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาระยะเวลาการเก็บรักษาในเดือนที่ 6 พบว่า การเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 7.93 มิลลิกรัมของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง 133.49 มิลลิกรัมของกรดเฟอรูลิกต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง และ ร้อยละ 21.84 ตามลำดับ ในขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องจะมีปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 7.5 มิลลิกรัมของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง 122.33 มิลลิกรัมของกรดเฟอรูลิกต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง และ ร้อยละ 19.87 ตามลำดับ (ตารางที่ 26) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้แอนโทไซยานิน และสารประกอบฟีนอลิกเกิดการสลายตัว (Zhou *et al.*, 2004; Chanphrom, 2007) ส่งผลให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษาลดลงตามไปด้วย ($p < 0.05$) จากการศึกษาของ Sui และคณะ (2016) เกี่ยวกับความคงตัวของแอนโทไซยานินที่สกัดได้จากข้าวที่มีสีดำหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4, 25, 45 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำเท่ากับ 4 องศาเซลเซียส จะทำให้แอนโทไซยานินมีความคงตัวมากที่สุด ในขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิเท่ากับ 65 องศาเซลเซียส การสูญเสียแอนโทไซยานินเกิดขึ้นสูงที่สุด ส่งผลให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของข้าวหุงสุกลดลง

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าการเก็บรักษาข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะช่วยชะลอการสูญเสียแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระได้ในระหว่างการเก็บรักษา

Table 26 Chemical properties of cooked Sangyod brown rice using retort at 118 °C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperature

Storage time (months)	Anthocyanin content (mg of cyanidin-3-glucoside/100 g dry wt.)		Phenolic content (mg of ferulic acid/100 g dry wt.)		DPPH scavenging activity (%)	
	4°C	RT	4°C	RT	4°C	RT
0	8.81±0.11 ^{f,E}	8.81±0.11 ^{f,F}	151.44±2.27 ^{f,C}	151.44±2.27 ^{f,F}	31.64±0.44 ^{f,D}	31.64±0.44 ^{f,F}
1	8.66±0.14 ^{c,D}	8.52±0.12 ^{e,E}	147.92±2.23 ^{ef,BC}	142.61±3.18 ^{e,E}	30.89±0.15 ^{ef,CD}	27.21±0.26 ^{c,E}
2	8.48±0.09 ^{de,CD}	8.31±0.08 ^{d,D}	144.63±2.61 ^{e,B}	137.44±2.74 ^{e,E}	27.98±0.26 ^{e,C}	24.11±0.21 ^{d,D}
3	8.30±0.10 ^{d,C}	8.00±0.06 ^{c,C}	141.76±1.88 ^{e,B}	134.65±1.23 ^{d,D}	24.76±0.77 ^{d,B}	22.13±0.34 ^{cd,CD}
4	8.12±0.06 ^{c,B}	7.87±0.05 ^{b,B}	138.99±2.17 ^{d,AB}	130.63±2.11 ^{c,C}	23.28±0.47 ^{cd,AB}	21.65±0.11 ^{c,C}
5	8.01±0.09 ^{bc,AB}	7.65±0.11 ^{a,A}	135.02±1.98 ^{d,A}	126.87±1.28 ^{b,B}	22.19±0.16 ^{c,A}	20.61±0.29 ^{b,B}
6	7.93±0.10 ^{b,A}	7.53±0.03 ^{a,A}	133.49±1.76 ^{d,A}	122.33±1.37 ^{a,A}	21.84±0.20 ^{c,A}	19.87±0.21 ^{a,A}

Note: RT, room temperature

Means with different small letters in the same month and capital letters in the same storage temperature are significantly different ($p < 0.05$).

ชนิดและปริมาณของกรดฟีนอลิก

การศึกษาชนิดและปริมาณของกรดฟีนอลิกในข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนอกในภาชนะบรรจุปิดสนิท เพื่อจำแนกชนิดของกรดฟีนอลิก และติดตามความคงตัวของกรดฟีนอลิกต่างชนิดในระหว่างการเก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง เป็นเวลานาน 6 เดือน ทั้งในรูปกรดฟีนอลิกอิสระและฟีนอลิกยึดเหนี่ยว พบว่า ปริมาณกรดฟีนอลิกทั้งในรูปกรดฟีนอลิกอิสระและกรดฟีนอลิกยึดเหนี่ยวลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา พบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องจะพบการลดลงของปริมาณกรดฟีนอลิกอิสระ และกรดฟีนอลิกยึดเหนี่ยวมากกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาระยะเวลาการเก็บรักษาในเดือนที่ 6 พบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องจะส่งผลให้ปริมาณกรดฟีนอลิกแต่ละชนิดเหลือน้อยกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 27) ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิสูงจะเร่งการสลายตัวของกรดฟีนอลิกอิสระ ในขณะที่กรดฟีนอลิกยึดเหนี่ยวจะเกิดสลายตัวจากการที่อุณหภูมิสูงจะเร่งให้เกิดออกซิเดชันของกรดฟีนอลิกที่จับอยู่กับเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์ของพืช และเร่งการทำงานของเอนไซม์ในการย่อยสลายพันธะระหว่างกรดฟีนอลิกและเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้กรดฟีนอลิกอิสระ และฟีนอลิกยึดเหนี่ยวมีปริมาณลดลงในระหว่างการเก็บรักษา (Zhou *et al.*, 2004; Htwe *et al.*, 2010)

Table 27 Phenolic acid of cooked Sangyod brown rice using retort at 118 °C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperatures

Phenolic acid form	Storage time (months)	Phenolic acid (mg/100 g dry wt.)																
		PCCA			<i>p</i> -OH			VA			CFA			<i>p</i> -CA			FA	
		4°C	RT	4°C	4°C	RT	4°C	4°C	RT	4°C	4°C	RT	4°C	4°C	RT	4°C	RT	
Free phenolic	0	4.42	4.42	2.87	2.87	2.01	2.01	2.97	2.97	2.01	2.97	2.97	2.97	4.22	4.22	7.84	7.84	
	1	4.40	4.36	2.86	2.83	2.00	2.00	2.96	2.96	2.00	2.92	2.92	2.92	4.21	4.18	7.83	7.80	
	2	4.38	4.32	2.85	2.80	1.98	1.97	2.94	2.86	1.97	2.86	2.86	2.86	4.18	4.14	7.81	7.77	
	3	4.35	4.28	2.84	2.76	1.97	1.95	2.94	2.82	1.95	2.82	2.82	2.82	4.18	4.08	7.79	7.73	
	4	4.31	4.25	2.81	2.72	1.97	1.92	2.93	2.80	1.92	2.80	2.80	2.80	4.16	4.03	7.79	7.70	
	5	4.28	4.20	2.78	2.70	1.95	1.87	2.91	2.76	1.87	2.76	2.76	2.76	4.14	3.95	7.77	7.67	
6	4.27	4.18	2.75	2.68	1.93	1.82	2.90	2.74	1.82	2.74	2.74	2.74	4.12	3.91	7.75	7.52		
Bound phenolic	0	9.32	9.32	6.53	6.53	6.65	6.65	6.28	6.28	6.65	6.65	6.28	6.28	10.82	10.82	17.41	17.41	
	1	9.31	9.28	6.51	6.48	6.63	6.60	6.27	6.25	6.60	6.60	6.27	6.25	10.80	10.80	17.40	17.37	
	2	9.29	9.24	6.48	6.44	6.60	6.55	6.25	6.20	6.60	6.55	6.25	6.20	10.77	10.77	17.38	17.31	
	3	9.27	9.20	6.47	6.39	6.58	6.52	6.23	6.18	6.58	6.52	6.23	6.18	10.74	10.72	17.36	17.26	
	4	9.26	9.18	6.45	6.37	6.55	6.48	6.21	6.13	6.55	6.48	6.21	6.13	10.73	10.68	17.32	17.20	
	5	9.24	9.16	6.43	6.32	6.52	6.44	6.18	6.10	6.52	6.44	6.18	6.10	10.71	10.63	17.27	17.12	
6	9.23	9.11	6.40	6.28	6.50	6.41	6.14	6.05	6.50	6.41	6.14	6.05	10.68	10.55	10.24	17.07		

Note: RT, room temperature; PCCA, protocatechuic acid; *p*-OH, 4-hydroxybenzoic acid; VA, vanillic acid; CFA, caffeic acid; *p*-CA, *p*-coumaric acid and FA, ferulic acid

สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์

รีโทรเกรเดชัน

การเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษาส่งผลต่อคุณภาพ การยอมรับ และอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ สำหรับการวิเคราะห์สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่ผ่านเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 6 เดือน โดยติดตามจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานระหว่างการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH) ในระหว่างการเก็บรักษา (ตารางที่ 28) พบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) อุณหภูมิสูงสุด (T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (T_c) และพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH) มีค่าเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH) จะเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วง 3 เดือนแรกของการเก็บรักษา และระหว่างการเก็บรักษาเดือนที่ 4-6 จะไม่พบความแตกต่างของพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH) ($p \geq 0.05$) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลส เนื่องจากโครงสร้างของอะไมโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรง จึงสามารถเกิดผลึกได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่อะไมโลเพคตินจะมีบทบาทในการเกิดรีโทรเกรเดชันในระยะยาว เนื่องจากโครงสร้างของอะไมโลเพคตินมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน การสร้างผลึกจึงต้องใช้เวลาานกว่าอะไมโลส (Yu *et al.*, 2009) เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษา พบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างกันมีผลต่ออุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) อุณหภูมิสูงสุด (T_p) และอุณหภูมิสุดท้าย (T_c) และพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH) การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีการเพิ่มขึ้นของพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH) สูงกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ($p < 0.05$) โดยพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH) ในเดือนที่ 6 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง มีค่าเท่ากับ 1.77 และ 0.90 จูลต่อกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องมาจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำจะเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าการเก็บที่อุณหภูมิห้อง (Vandeputte *et al.*, 2003; Aguirre *et al.*, 2011)

ดังนั้น จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่า การเก็บรักษาข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิทเป็นเวลานาน 6 เดือน ส่งผลให้เกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้นตลอดการเก็บรักษา โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

Table 28 Thermal properties of Sangyod brown rice using retort at 118 °C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperature

Storage time (months)	T _o (°C)		T _p (°C)		T _c (°C)		ΔH (J/g)
	4°C	RT	4°C	RT	4°C	RT	
0	54.49±0.01 ^{a,A}	54.49±0.01 ^{a,A}	56.57±0.01 ^{a,A}	56.57±0.01 ^{a,A}	58.17±0.01 ^{a,A}	58.17±0.01 ^{a,A}	0.00±0.00 ^{a,A}
1	54.64±0.02 ^{cd,B}	54.53±0.02 ^{b,B}	56.80±0.03 ^{d,B}	56.64±0.01 ^{b,B}	58.32±0.02 ^{c,B}	58.20±0.01 ^{b,B}	1.02±0.01 ^{f,B}
2	54.65±0.02 ^{d,B}	54.56±0.02 ^{b,B}	56.84±0.02 ^{de,BC}	56.66±0.03 ^{bc,BC}	58.37±0.02 ^{cd,C}	58.26±0.03 ^{c,C}	1.33±0.02 ^{g,C}
3	54.72±0.03 ^{e,D}	54.61±0.01 ^{c,C}	56.86±0.01 ^{e,C}	56.70±0.02 ^{c,C}	58.42±0.02 ^{e,D}	58.29±0.05 ^{c,C}	1.59±0.01 ^{h,D}
4	54.84±0.02 ^{f,D}	54.67±0.02 ^{d,D}	56.90±0.03 ^{ef,CD}	56.72±0.02 ^{cd,CD}	58.49±0.01 ^{f,E}	58.36±0.02 ^{d,D}	1.72±0.02 ^{i,E}
5	54.90±0.03 ^{g,E}	54.73±0.03 ^{e,E}	56.95±0.02 ^{f,D}	56.74±0.01 ^{d,D}	58.54±0.02 ^{g,f}	58.42±0.02 ^{e,E}	1.75±0.02 ^{i,E}
6	54.97±0.02 ^{h,F}	54.76±0.02 ^{e,E}	56.99±0.02 ^{f,D}	56.79±0.04 ^{d,D}	58.59±0.03 ^{g,f}	58.44±0.02 ^{e,E}	1.77±0.03 ^{i,E}

Note: RT, room temperature

Means with different small letters in the same month and capital letters in the same storage temperature are significantly different (p<0.05).

ทดสอบทางประสาทสัมผัส

การทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 6 เดือน เพื่อประเมินคุณภาพของข้าวกล้องสังข์หยดในระหว่างการเก็บรักษา โดยการทดสอบความชอบแบบ 9-point hedonic scale ใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน ทดสอบความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ผลแสดงดังตารางที่ 29 พบว่า คะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สีและรสชาติของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกไม่แตกต่างกันระหว่างการเก็บรักษานาน 6 เดือน ($p \geq 0.05$) อย่างไรก็ตาม เวลาการเก็บรักษานานขึ้นส่งผลให้คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมลดลง ($p < 0.05$) และอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่แตกต่างกันมีผลต่อคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก ($p < 0.05$) โดยการเก็บรักษาข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกในเดือนที่ 0 จะมีคะแนนความชอบด้านลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม เท่ากับ 8.00 และ 7.83 เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน พบว่า การเก็บรักษาข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทำให้มีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม เท่ากับ 6.51 และ 6.48 ตามลำดับ ในขณะที่การเก็บรักษาข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่อุณหภูมิห้องจะมีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม เท่ากับ 6.76 และ 6.75 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมของการเก็บรักษาข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่อุณหภูมิห้องสูงกว่าการเก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องมาจากการเก็บที่อุณหภูมิต่ำจะเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษา ทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวมึความแข็งเพิ่มขึ้น คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสจึงมีค่าลดลง (Pardon *et al.*, 1999; Vandeputte *et al.*, 2003)

Table 29 Sensory evaluation of Sangyod brown rice using retort at 118 °C for 26 min and storage for 6 months under various storage temperature

Storage time (months)	Appearance			Color			Taste			Texture			Overall acceptability		
	4°C	RT	4°C	4°C	RT	4°C	4°C	RT	4°C	4°C	RT	4°C	4°C	RT	
0	7.12±0.57 ^{ns,NS}	7.12±0.57 ^{ns,NS}	7.27±0.68 ^{ns,NS}	7.37±0.21 ^{ns,NS}	7.37±0.21 ^{ns,NS}	7.37±0.21 ^{ns,NS}	8.00±0.44 ^{d,C}	8.00±0.44 ^{d,D}	8.00±0.44 ^{d,D}	7.83±0.52 ^{d,D}	7.83±0.52 ^{d,D}	7.83±0.52 ^{d,D}	7.83±0.52 ^{d,D}	7.83±0.52 ^{d,D}	
1	7.18±0.43 ^{ns,NS}	7.02±0.62 ^{ns,NS}	7.19±0.54 ^{ns,NS}	7.22±0.31 ^{ns,NS}	7.18±0.51 ^{ns,NS}	7.22±0.31 ^{ns,NS}	7.00±0.16 ^{b,B}	7.32±0.31 ^{c,C}	7.32±0.31 ^{c,C}	7.08±0.21 ^{c,C}	7.41±0.66 ^{c,C}	7.08±0.21 ^{c,C}	7.08±0.21 ^{c,C}	7.41±0.66 ^{c,C}	
2	7.01±0.46 ^{ns,NS}	7.00±0.26 ^{ns,NS}	7.12±0.48 ^{ns,NS}	7.18±0.27 ^{ns,NS}	7.18±0.41 ^{ns,NS}	7.18±0.27 ^{ns,NS}	6.89±0.22 ^{b,B}	7.24±0.26 ^{c,C}	7.24±0.26 ^{c,C}	6.92±0.23 ^{b,B}	7.22±0.54 ^{c,C}	6.92±0.23 ^{b,B}	6.92±0.23 ^{b,B}	7.22±0.54 ^{c,C}	
3	6.93±0.45 ^{ns,NS}	6.89±0.38 ^{ns,NS}	7.09±0.21 ^{ns,NS}	7.16±0.17 ^{ns,NS}	7.14±0.35 ^{ns,NS}	7.16±0.17 ^{ns,NS}	6.72±0.21 ^{b,B}	7.18±0.33 ^{b,B}	7.18±0.33 ^{b,B}	6.78±0.34 ^{ab,Ab}	7.15±0.21 ^{bc,BC}	6.78±0.34 ^{ab,Ab}	6.78±0.34 ^{ab,Ab}	7.15±0.21 ^{bc,BC}	
4	6.79±0.31 ^{ns,NS}	6.79±0.32 ^{ns,NS}	7.05±0.34 ^{ns,NS}	7.12±0.21 ^{ns,NS}	7.11±0.34 ^{ns,NS}	7.12±0.21 ^{ns,NS}	6.65±0.18 ^{ab,AB}	7.06±0.24 ^{b,B}	7.06±0.24 ^{b,B}	6.62±0.28 ^{ab,Ab}	7.03±0.19 ^{b,B}	6.62±0.28 ^{ab,Ab}	6.62±0.28 ^{ab,Ab}	7.03±0.19 ^{b,B}	
5	6.73±0.32 ^{ns,NS}	6.74±0.28 ^{ns,NS}	6.92±0.23 ^{ns,NS}	7.07±0.29 ^{ns,NS}	6.96±0.27 ^{ns,NS}	7.07±0.29 ^{ns,NS}	6.60±0.11 ^{ab,AB}	6.89±0.34 ^{ab,AB}	6.89±0.34 ^{ab,AB}	6.63±0.21 ^{ab,AB}	6.92±0.25 ^{ab,AB}	6.63±0.21 ^{ab,AB}	6.63±0.21 ^{ab,AB}	6.92±0.25 ^{ab,AB}	
6	6.67±0.23 ^{ns,NS}	6.70±0.18 ^{ns,NS}	6.84±0.10 ^{ns,NS}	7.03±0.15 ^{ns,NS}	6.78±0.13 ^{ns,NS}	7.03±0.15 ^{ns,NS}	6.51±0.12 ^{a,A}	6.76±0.12 ^{b,A}	6.76±0.12 ^{b,A}	6.48±0.11 ^{a,A}	6.75±0.15 ^{a,A}	6.48±0.11 ^{a,A}	6.48±0.11 ^{a,A}	6.75±0.15 ^{a,A}	

Note: RT, room temperature

Means with different small letters in the same month and capital letters in the same storage temperature are significantly different ($p < 0.05$).

ns is non-significantly different during storage ($p \geq 0.05$).

NS is non-significantly different among two different storage temperatures ($p \geq 0.05$).

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

ข้าวกล้องสังข์หยดเป็นข้าวที่มีรูปร่างเมล็ดเรียวยาว มีสีแดง เนื่องจากมีองค์ประกอบของแอนโทไซยานินอยู่ในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และเยื่อใยในปริมาณสูง และมีปริมาณอะไมโลสต่ำ เมื่อผ่านกระบวนการหุงสุก ทำให้เนื้อสัมผัสมีลักษณะนุ่ม อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตีในเซชัน อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลลิตีในเซชัน อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลิตีในเซชัน และการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปี มีค่าเท่ากับ 76.73, 81.86, 88.01 องศาเซลเซียส และ 9.42 จูลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ รูปแบบโครงสร้างผลึกเป็นชนิด A มีปริมาณผลึกเท่ากับร้อยละ 30.68 ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดสุดท้าย และค่าการคืนตัว เท่ากับ 75.05, 127.42 และ 61.58 RVU ตามลำดับ และอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดมีค่าเท่ากับ 93.75 องศาเซลเซียส

ในการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องสังข์หยด เมื่อใช้ความเข้มข้นของเอทานอล กรดซิตริก และเวลาการสกัดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สารสกัดมีสีแดงเพิ่มมากขึ้น ปริมาณแอนโทไซยานิน (ทั้งวิธีของ Abdel and Hulc และ วิธีพีเอชดีฟเฟอเรนเทียล) ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องสังข์หยดจากการทำนายโดยใช้โปรแกรม Design expert คือ เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90 ร่วมกับกรดซิตริกร้อยละ 4.25 สกัดเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ทั้งนี้สมการทางคณิตศาสตร์ของค่า L^* , a^* , b^* Hue angle ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel and Hulc ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสามารถใช้เป็นสมการที่ทำนายการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องสังข์หยด และสามารถใช้ในการทำนายค่าคุณภาพที่ต้องการได้ ทั้งนี้สมการทางคณิตศาสตร์ของวิธีพีเอชดีฟเฟอเรนเทียลมีความบกพร่อง ดังนั้นจึงเลือกใช้การวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel and Hulc ไปใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป

การผลิตข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนิภาชนะบรรจุปิดสนิทด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูง ประกอบด้วยการขึ้นตอนการแช่น้ำเดือดเป็นเวลา 18, 20, 22 และ 24 นาที ซึ่งมีปริมาณ Starchy core อยู่ในช่วงร้อยละ 26.67-56.67 ค่าการเกิดเจลลิตีในเซชันอยู่ในช่วงร้อยละ 65.50-87.79 และปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 63.63-70.66 จากนั้นนำทุกชุดการทดลองมาบรรจุในถุงรีทอร์ทเพาว์ช ถุงละ 125 กรัม ปิดผนึก หม่าเชื้อที่อุณหภูมิ 118 องศาเซลเซียส ความดัน 23 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งมีระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างจนถึงอุณหภูมิหม่าเชื้อที่กำหนด เท่ากับ 23 นาที เวลาที่ใช้ในการหม่าเชื้อที่อุณหภูมิ 118 องศาเซลเซียส เท่ากับ 26 นาที และเวลาในการลดอุณหภูมิ เท่ากับ 31 นาที รวมระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการหม่าเชื้อทั้งหมด เท่ากับ 80 นาที (F_0

Formula เท่ากับ 4.12) เมื่อนำข้าวที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื่อความดันสูงตามสภาวะดังกล่าว มาวิเคราะห์คุณภาพเปรียบเทียบกับการหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไมโครเวฟ พบว่า การหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื่อความดันสูง จะทำให้มีการแตกของเมล็ดที่สูงที่สุด และมีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่มกว่าการหุงด้วยหม้อหุงข้าว และไมโครเวฟ ในขณะที่ปริมาณแอนโทไซยานิน ฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมีค่าน้อยกว่าการหุงด้วยหม้อหุงข้าว และไมโครเวฟ จากการวิเคราะห์หาชนิดของกรดฟีนอลิกที่พบในข้าวสังข์หยดพบว่ามี 6 ชนิด ได้แก่ กรดเฟอร์ูลิก กรดโปรโตแคทชูลิก กรดพาราควมาริก กรดพาราไฮดรอกซีเบนโซอิก กรดคาเฟอิก และกรดวานิลลิก เมื่อผ่านกระบวนการหุงสุกทำให้กรดฟีนอลิกทุกชนิดมีปริมาณลดลง และตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือด 24 นาที ก่อนนำมาหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื่อความดันสูง จะทำให้มีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงที่สุด โดยในสภาวะดังกล่าวจะมีอัตราการดูดซับน้ำและอัตราการยืดตัว เท่ากับ 2.79 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และ 1.15 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกสภาวะการแช่ในน้ำเดือด 24 นาที ไปใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป

ข้าวกล้องสังข์หยดพร้อมบริโภคนาในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื่อความดันสูง (แช่ในน้ำเดือดนาน 24 นาที) หม้อหุงข้าวไฟฟ้า และไมโครเวฟ ถูกนำมาเก็บรักษานาน 7 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่า มีการลดลงของค่า L^* , a^* , Chroma ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณ ฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณของกรดฟีนอลิกทั้ง 6 ชนิด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในวันที่ 7 ของการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามจะพบการเพิ่มขึ้นของความแข็ง เนื่องจากการเกิดรีโทเรเดชันระหว่างการเก็บรักษา ทำให้คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมลดลง เมื่อนำข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการแช่ในน้ำเดือดนาน 24 นาที ก่อนนำมาหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื่อความดันสูงมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิห้อง นาน 6 เดือน พบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะมีค่าความแข็ง การเกิดรีโทเรเดชัน ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณของกรดฟีนอลิกทั้ง 6 ชนิด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมีค่าต่ำกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

ดังนั้นสภาวะการหุงสุกที่เหมาะสมต่อการเตรียมข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภค คือ การแช่ในน้ำเดือดนาน 24 นาที แล้วจึงนำไปหุงสุกด้วยหม้อนึ่งมาเชื่อความดันสูงที่อุณหภูมิ 118 องศาเซลเซียส ความดัน 23 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มาเชื่อเป็นเวลา 26 นาที ซึ่งระยะเวลาการเก็บรักษา 6 เดือน ข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกพร้อมบริโภคยังคงเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

เอกสารอ้างอิง

- กรมการข้าว. 2559. สถานการณ์การผลิตและการตลาดข้าวของโลก ปีการผลิต 2559. กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมส่งเสริมการเกษตร. 2560. สถานการณ์การปลูกข้าวสังข์หยด. กรมส่งเสริมการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมทรัพย์สินทางปัญญา. 2560. ข้าวสังข์หยด ขึ้นทะเบียน GI ใน EU. กรมทรัพย์สินทางปัญญา. กระทรวงพาณิชย์.
- นิพัทธา ซาคีสวรรณ และ วริพัทธ์ อารีกุล. 2553. ความสัมพันธ์ของปริมาณแอนโทไซยานินต่อปริมาณโพลีฟีนอล และความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันในข้าวสีและไม่มีสีสายพันธุ์ต่างๆ. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า . 1: 77-86.
- ประกาศกระทรวงสาธารณสุข. 2556. เรื่อง อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท. กระทรวงสาธารณสุข. ฉบับที่ 355. กรุงเทพฯ.
- ปาริดา ขุนแอ. 2550. ผลของการตัดแปรด้วยวิธีความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางรีโอโลยีและการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ผดุงศักดิ์ วานิชชัง, ใจทิพย์ วานิชชัง และเพ็ญขวัญ วานิชชัง. 2556. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการผลิตข้าวเก่าจากข้าวสารด้วย เครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก. 6(2): 15-20.
- ยุพาพร ผลาขจรศักดิ์. 2547. การสกัดและความคงตัวของแอนโทไซยานินที่สกัดได้จากเปลือกมังคุด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- วิไล รังสาดทอง. 2543. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ.
- สวนีย์ หอรั้งสิวัฒน์ และ นันทวัน เทอดไทย. 2558. ผลของวิธีการหุงสุกต่อคุณภาพของข้าวหอมมะลิ. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53 กรุงเทพฯ. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 3-6 กุมภาพันธ์ 2558. หน้า 1019-1026.

- สำเร็จ แซ่ตัน และ รุจิรา ปรีชา . 2548. การผลิตและการแปรรูปเพิ่มมูลค่า: ข้าวสังข์หยดพัทลุง. การประชุมวิชาการ ข้าวและธัญพืชเมืองหนาว ประจำปี 2548. กรมวิชาการเกษตร สถาบันวิจัยข้าว. 7-8 มีนาคม. 2548. หน้า 170-171.
- สำเร็จ แซ่ตัน, รุจิรา ปรีชา, ขวัญใจ คชภักดี, อมรศักดิ์ แววศักดิ์ และ ประสิทธิ์ ศรีทองแก้ว. 2550. ข้าวพันธุ์พื้นเมืองภาคใต้. กรมการข้าว สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว ศูนย์วิจัยข้าวพัทลุง. พัทลุง.
- อนลลักษณ์ โอพาริโกวิท. 2546. การผลิตข้าวพร้อมบริโภคในรีทอร์ตแพซ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุไรวรรณ วัฒนกุล, วัฒนา วัฒนกุล, นพรัตน์ มะเห, และ พิฑูรย์ จรุงรัตน์. 2558. ผลของอายุการเก็บเกี่ยวและการเก็บรักษาต่อคุณสมบัติทางโภชนาการของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกสังข์หยดพัทลุง. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ 14: 51-58.
- A.O.A.C. 2000. Official Method of Analysis of Association of Official Analysis Chemist 17th . Virginia: The Association of Official Analytical Chemists, Inc.
- Abdel-Aal, E.-S. M. and Hucl, P. 1999. A rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. *Cereal Chemistry*. 76: 350-354.
- Abdel-Aal, E.S., Young, J.C. and Rabalski, I. 2006. Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple, and red cereal grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54: 4696-4704.
- Acosta-Estrada, B.A., Gutiérrez-Urbe, J.A. and Serna-Saldívar, S.O. 2014. Bound phenolics in foods, a review. *Food Chemistry*. 152: 46-55.
- Adebowale, K.O and Lawal, O.S. 2003. Microstructure, physicochemical properties and retrogradation behaviour of mucuna bean (*Mucuna pruriens*) starch on heat moisture treatment. *Food Hydrocolloids*. 17: 265-272.
- Adom, K.K. and Liu, R. H. 2002. Antioxidant activity of grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 50(21): 6182-6187.
- Adom, K.K., Sorrels, M.E. and Liu, R.H. 2003. Phytochemical profiles and antioxidant activity of wheat varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 51: 7825-7834.

- Aguirre, J.F., Osell, C.A., Carrara, C.R., Sanchez, H.D. and Buera, M.D.P. 2011. Effect of storage temperature on starch retrogradation of bread staling. *Starch*. 63: 587-593.
- Ahromrit, A. Ledward, D.A. and Niranjana, K. 2007. Kinetics of high pressure facilitated starch gelatinization in Thai glutinous rice. *Journal of Food Engineering*. 79: 834-841.
- Ahuja, U., Ahuja, S.C., Chaudhary, N. and Thakrar, R. 2007. Red rices -past, present and future. *Asian Agri-History*. 11: 291-304.
- Ali, B.H., Blunden, G., Tanira, M.O. and Nemmar, A. 2008. Some phytochemical, pharmacological and toxicological properties of ginger (*Zingiber officinale Roscoe*): A review of recent research. *Food and Chemical Toxicology*. 46: 409-420.
- Amelia, F., Nur, Afnani, G.N., Musfiroh, A., Fikriyani, A.N., Ucche, S. and Murrukmihadi, M. 2013. Extraction and stability test of anthocyanin from Buni fruits (*Antidesma Bunius L.*) as an alternative natural and safe food colorants. *Journal of Food and Pharmaceutical Sciences*. 1: 49-53.
- Anderson, O.M. and Jordheim, M. 2006. The anthocyanins. *In: Flavonoids: Chemistry, Biochemistry and Applications*. (Andersen, O.M. and Markham, K.R., eds). p. 471-552. Boca Raton. Florida.
- Anderson, O.M. and Markham, K.R. 2006. Flavonoids: Chemistry. *Biochemistry and Applications*. p. 472-478, 508-515. Boca Raton. Florida.
- Andreasen, M.F. and Kroon, P.A., Williamson, G. and Garcia-Conesa, M. T. 2001. Intestinal release and uptake of phenolic antioxidant diferilic acids. *Free Radical Biology and Medicine*. 31: 304-314.
- Ayumi H, Masatsune M and Seiichi H. 1999. Analyses of free and bound phenolics in rice. *Food Science Technology Research*. 5: 74-79.
- Azmir, J., Zaidul, I.S.M., Rahman, M.M., Sharif, K.M., Mohamed, A., Sahena, F., Jahurul, M.H.A., Ghafoor, K., Norulaini, N.A.N. and Omar, A.K.M. 2013. Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *Journal of Food Engineering*. 117: 426-436.

- Bacteriological Analytical Manual. 2001. Examination of Canned Foods. U.S. Food and Drug Administration, Washington, D.C.
- Bakker, J. and Timberlake, C.F. 1985. The distribution of anthocyanin in grape skin extracts of port wine cultivars as determined by high performance liquid chromatography. *Journal of Science Food Agriculture*. 36: 1315-1324.
- Bakowska, A., Kucharska, A.Z. and Ozmianski, J. 2003. The effects of heating, UV irradiation, and storage on stability of the anthocyanin-polyphenol copigment complex. *Food Chemistry*. 81(3): 349-355.
- Ball, C.O. and Olson, F.C.W. 1957. *Sterilization in Food Technology*. (Ball, C.O. ed.). p. 654. McGraw-Hill Publishing. New York.
- Banchathanakij, R. and Supphantharika, M. 2009. Effect of different β -glucans on the gelatinisation and retrogradation of rice starch. *Food Chemistry*. 114(1): 5-14.
- Banchuen, J., Thammarutwasik, P., Ooraikul, B., Wuttijumnong, P. and Sirivongpaisal, P. 2010. Increasing the bio-active compounds contents by optimizing the germination conditions of Southern Thai brown rice. *Songklanakarin. Journal of Science and Technology*. 32(3): 219-230.
- Batey, I.L. 2007. Interpretation of RVA curves. In *The RVA handbook*. (Crosbie, G.B. and Ross, A.S., eds.). p. 19-30. AACC International. St Paul, Minnesota.
- BeMiller, J.N. and Whistler, R.L. 1996. Carbohydrates. *In: Food Chemistry*. (Fennema, O.R., eds.). pp.157-223. Boca Raton, Florida.
- BeMiller, J.N. 2007. *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists*. 2nd ed. AACC International. p. 389. St. Paul, Minnesota.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E. and Berset, C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology*. 28: 25-30.
- Briffaz, A., Bohuon, P., Méot, J.M., Pons, B., Matencio, F., Dornier, M. and Mestres, C. 2014. Modelling of brown rice and limited-water cooking modes and its potential use for texture prediction. *Journal of Food Engineering*. 141: 99-106.

- Brownmiller, C., Howard, L.R. and Prior, R.L. 2008. Processing and storage effects on monomeric anthocyanins, percent polymeric colour, and antioxidant capacity of processed blueberry products. *Journal of Food Science*. 73: 72-79.
- Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V. and Ball, S. 1998. Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal Biological Microbiology*. 23: 85-112.
- Bunzel, M., Allerdings, E., Sinnwell, V., Ralph, J. and Steinhart, H., 2002. Cell wall hydroxycinnamates in wild rice (*Zizania aquatica* L.) insoluble dietary fibre. *European Food Research and Technology*. 214: 482-488.
- Butsat, S. and Siriamornpun, S. 2010. Antioxidant capacities and phenolic compounds of the husk, bran and endosperm of Thai rice. *Food Chemistry*. 119: 606-613.
- Byun, Y., Hong, S.I., Mangalassay, S., Bae, H.J., Cooksey, K., Park, H.J. and Whiteside, S. 2010. The performance of organic and inorganic coated retort pouch materials on the shelf life of ready-to-eat rice products. *Food Science and Technology*. 43: 862-866.
- Castaneda-Ovando, A., Pacheco-Hernandez, M.L., Paez-Hernandez, M.E., Rodriguez, J.A. and Galan-Vidal, C.A. 2009. Chemical studies of anthocyanins: A review. *Food Chemistry*. 113: 859-871.
- Champagne, E.T., Wood, D.F., Juliano, B.O. and Bechtel, D.B. 2004. The rice grain and its gross composition. *In: Rice*. (Champagne, E.T., eds.). p.77-107. St. Paul. Minnesota.
- Champagne, E.T. 1996. Rice starch composition and characteristics. *Cereal Foods World*. 41: 833-838.
- Chandrasekhar, J., Madhusudhan, M.C. and Raghavarao, K.S.M.S. 2012. Extraction of anthocyanins from red cabbage and purification using adsorption. *Food Bioproduct Processing*. 90: 615-623.
- Chanphrom, P. 2007. Antioxidants and antioxidant activities of pigmented rice varieties and rice bran. Dissertation. Mahidol University.

- Chatthongpisut, R., Schwartz, S.J. and Yongsawatdigul, J. 2015. Antioxidant activities and antiproliferative activity of Thai purple rice cooked by various methods on human colon cancer cells. *Food Chemistry*. 188: 99-105.
- Chaudhary, R.C. 2003. Specialty rice of the world: Effect of WTO and IPR on its production trend and marketing. *Journal of Food Agriculture and Environment*. 1: 34-41.
- Chiang, P.Y. and Yeh, A.I. 2002. Effect of soaking on wet-milling of rice. *Journal of Cereal Science*. 35(1): 85-94.
- Chung, Y.C., Chang, C.T., Chao, W.W., Lin, C.F. and Chou, S.T. 2002. Antioxidative activity and safety of the 50% ethanolic extract from red bean fermented by *Bacillus subtilis* IMR-NK1. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 50: 2454-2458.
- Clifford, M.N. 1999. Review: Chlorogenic acids and other cinnamate nature, occurrence and dietary burden. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 79: 326-373.
- Colwell, K.H., Axford, D.W.E., Chamberlain, N. and Elton, G.A.H. 1969. Effect of storage temperature on the ageing of concentrated wheat starch gels. 20(9): 550-555.
- Copeland, L., Blazek, J., Salman, H. and Tang, M.C. 2009. Form and functionality of starch. *Food Hydrocolloids*. 23: 1527-1534.
- Cowan, M.M. 1999. Plant products as antimicrobial agents. *Clinical Microbiology Reviews*. 12: 564-582.
- Cui, L., Pan, Z., Yue, T., Atungulu, G.G. and Berrios, J. 2010. Effect of Ultrasonic Treatment of Brown Rice at Different Temperatures on Cooking Properties and Quality. *Cereal Chemistry*. 87(5): 403-408.
- Dai, J. and Mumper, R.J. 2010. Plant phenolics: extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. *Molecules*. 15(10): 7313-7352.
- Dao, L.T., Takeoka, G.R., Edwards, R.H. and Berrios, J.J. 1998. Improved method for the stabilization of anthocyanidins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 46: 3564-3569.

- Daomukda, N., Moongngarm, A., Payakapol, L. and Noisuwan, A. 2011. Effect of cooking methods on physicochemical properties of brown rice. In Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Science and Technology IPCBEE. Singapore. 26 February 2011. P. V1-1-V1-4.
- D'Archivio, M., Filesi, C., Di Benedetto, R., Gargiulo, R., Giovannini, C. and Masella, R. 2007. Polyphenols, dietary sources and bioavailability. *Ann. Ist. Super. Sanita.* 43. 348-361.
- Delgado-Vargas, F., Jiménez A.R. and Paredes-López O. 2000. Natural pigments: carotenoids, anthocyanins, and betalains-characteristics, biosynthesis, processing, and stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition.* 40: 173-289.
- Demian, J.M. 1999. Principles of Food Chemistry. Aspen publication. p. 252-257. Maryland. U.S.A.
- Ding, W.P., Wang, Y.H. and Ding, X.L. 2003. Study on the mechanism of gelatinization and retrogradation of rice starch. *Cereal & Feed Industry (Chinese)*.3: 11-16.
- Durge, A.V., Sarkar, S. and Singhal, R.S. 2013. Stability of anthocyanins as pre-extrusion colouring of rice extrudates. *Food Research International.* 50: 641-646.
- Durst, R.W. and Wrolstad, R.E. 2001. Separation and characterization of anthocyanins by HPLC. *In: Current Protocols in Food Analytical Chemistry.* (Wrolstad, R.E., eds.). New York.
- Escribano-Bailon, M.T., Santos-Buelga, C. and Rivas Gonzalo, J.C. 2004. Anthocyanins in cereals. *Journal of Chromatography A.* 1054: 129-141.
- Francis, F.J. 1989. Food colorants: anthocyanins, Critical reviews. *Food Science and Nutrition.* 28: 273-314.
- Giusti, M.M. and Wrolstad, R.E. 2001. Characterization and measurement of anthocyanins by UV visible spectroscopy. *In: Current Protocols in Food Analytical Chemistry* (Wrolstad, R.E., ed.). p. F.1.2.1-F.1.2.13. New York.
- Goffman, F.D. and Bergman, C.J. 2004. Rice kernel phenolic content and its relationship with antiradical efficiency. *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 84: 1235-1240.

- Gomez, K.A. 1979. Effect of environment on protein and amylose content of rice. International Rice Research Institute. p. 64-65. Los Nanos. Philipines.
- Han, J.A. and Lim, S.T. 2009. Effect of presoaking on textural, thermal, and digestive properties of cooked brown rice. *Cereal Chemistry*. 86(1): 100-105.
- Hebrero, E., García, M.C., Santos-Buelga, C. and Rivas-Gonzalo, J.C. 1989. Analysis of anthocyanins by HPL-diode array spectroscopy in a hybrid grape variety (*Vitis vinifera* × *Vitis berlandieri* 41B). *American Journal of Enology and Viticulture*. 40: 283-291.
- Hiemori, M., Koh, E. and Mitchell, A.E. 2009. Influence of cooking on anthocyanins in black rice (*Oryza sativa* L. *japonica* var. SBR). *Journal of agriculture Food Chemistry*. 57: 1908-1914.
- Hosseinian, F.S., Li, W. and Beta, T. 2008. Measurement of anthocyanins and other phytochemicals in purple wheat. *Food Chemistry*. 109(4): 916-924.
- Hou, Z., Qin, P., Zhang, Y., Cui, S. and Ren, G. 2013. Identification of anthocyanins isolated from black rice (*Oryza sativa* L.) and their degradation kinetics. *Food Research International*. 50: 691-697.
- Htwe, N.N., Srilaong, V., Tanprasert, K., Tongchitpakdee, S., Kanlayanarat, S. and Uthairatanakij, A. 2010. Effects of storage time and temperature on radical scavenging activities and bioactive compounds in coloured rice varieties. *Journal of Food Agriculture and Environment*. 8: 26-31.
- Hu, X., Xu, X., Jin, Z., Tian, Y., Bai, Y. and Xie, Z. 2011. Retrogradation properties of rice starch gelatinised by heat and high hydrostatic pressure (HHP). *Journal of Food Engineering*. 106(3): 262-266.
- Hu, R. 1999. *Food Product Design: a computer-aided statistical approach*. 225p. Technomic Publishing Co., Inc. Lancaster. England.
- Inpun, R. 2014. *Studies of glycemic index of rice and flour rice indigenous southern Thai rice: Sangyod Phatthalung*. Master Dissertation. Prince of Songkla University.

- Iqbal, S., Bhanger, M. and Anwar, F. 2005. Antioxidant properties and components of some commercially available varieties of rice bran in Pakistan. *Food Chemistry*. 93: 265-272.
- Islam, M.R., Shimizu, N., and Kimura, T. 2002. Effect of processing conditions on thermal properties of parboiled rice. *Food Science and Technol. Research*. 8:131-136.
- Islam, M.Z., Taneya, M.L.J., M. Ud-Din, S., Syduzzaman, M. and Hoque, M.M. 2012. Physicochemical and Functional Properties of Brown Rice (*Oryza sativa*) and Wheat (*Triticum aestivum*) Flour and Quality of Composite Biscuit Made Thereof. *The Agriculturists*. 10(2): 20-28.
- Jackman, R.L., Yada, R.Y., Tung, M.A. and Speers, R.A. 1987. Anthocyanins as food colorant review. *Journal of Food Biochemistry*. 11: 201-247.
- Jacobs, D.R., Meyer, H.E. and Solvoll, K. 2001. Reduced mortality among whole grain bread eaters in men and women in the Norwegian County Study. *European Journal of Clinical Nutrition*. 55: 137-143.
- Jane, J.L. 2007. Structure of starch granules. *Journal of Applied Glycoscience*. 54: 31-36.
- Jiang, D. and Peterson, D.G. 2010. Role of hydroxycinnamic acids in food flavor: a brief overview. *Phytochemistry Reviews*. 9: 187-193.
- Juliano, B.O. 1985. *Rice: Chemistry and Technology*. 2nd. American Association of Cereal Chemists. St. Paul. Minnesota.
- Kang, Y.J., Jung, S.W. and Lee, S.J. 2014. An optimal extraction solvent and purification adsorbent to produce anthocyanins from black rice (*Oryza sativa* cv. Heugjinjubyeo). *Food Science and Biotechnology*. 23: 97-106.
- Kasai, M., Leis, A., Marica, F., Ayabe, S., Hatae, K. and Fyfe, C.A. 2005. NMR imaging investigation of rice cooking. *Food Research International*. 38: 403-410.
- Kaur, K., and Singh, N. 2000. Amylose-lipid complex formation during cooking of rice flour. *Food Chemistry*. 71: 511-517.

- Keawpeng, I. and Meenune, M. 2012. Effect of storage and processing condition on properties of organic Sungyod rice and its extrudate product. Ph.D. Dissertation. Prince of Songkla University.
- Khoddami, A., Wilkes, M. A and Roberts, T. H. 2013. Techniques for analysis of plant phenolic compounds. *molecules* .18: 2328-2375.
- Kim, S.H., Yu, B.R. and Chung, I.M. 2015. Changes in the contents and profiles of selected phenolics, soyasapogenols, tocopherols, and amino acids during soybean-rice mixture cooking: Electric rice cooker vs electric pressure rice cooker. *Food Chemistry*. 176: 45-53.
- Kim, D.Y., Nishiyama, Y., Wada, M. and Kuga, S. 2001. High-yield carbonization of cellulose by sulfuric acid impregnation. *Cellulose*. 8: 29-33.
- Kock, S., Minnaar, A., Berry, D. and Taylor, J. 1995. The effect of freezing rate on the quality of cellular and non-cellular par-cooked starchy convenience foods. *LWT - Food Science and Technology*. 28(1): 87-95.
- Konwatchara, T. and Ahromrit, A. 2014. Effect of cooking on functional properties of germinated black glutinous rice (KKU-ULR012). *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 36 (3): 283-290.
- Kroon, P.A., Faulds, C.B., Ryden, P., Robertson, J.S. and Williamson, G. 1997. Release of covalently bound ferulic acid from fiber in the human colon. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 45: 661-667.
- Krygier, K., Sosulski, S. and Hogge, L. 1982. Free, esterified, and insoluble-bound phenolic acids. 1. Extraction and purification procedure. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 30(2): 330-334.
- Laleh, G.H., Frydoonfar, H., Heidary, R., Jameei, R. and Zare, S. 2006. The effect of light, temperature, pH and species on stability of anthocyanin pigments in four barberries species. *Journal of Nutrition*. 5: 90-92.

- Lamberts, L., Brijs, K., Mohamed, R., Verhelst, N. and Delcour, J.A. 2006. Impact of browning reactions and bran pigments on color of parboiled rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54(26): 9924-9929.
- Lapornik, B., Prosek, M. and Wondra, A.G. 2005. Comparison of extracts prepared from plant by-products using different solvents and extraction time. *Journal of Food Engineering*. 71: 214-222.
- Lee, J., Rennaker, C. and Wrolstad, R.E. 2008. Correlation of two anthocyanin quantification methods: HPLC and spectrophotometric methods. *Food Chemistry*. 110(3): 782-786.
- Leelayuthsoontorn, P. and Thipayarat, A. 2006. Textural and morphological changes of Jasmine rice under various elevated cooking conditions. *Food Chemistry*. 96(4): 606-613.
- Lewis, M. and Heppell, N. 2000. *Continuous thermal processing of foods: Pasteurization and UHT sterilization* Aspen Publishers, Gaithersburg.
- Lii, C.Y., Tsai, M.L. and Tseng, K.H. 1996. Effect of amylose content on the rheological property of rice starch. *Cereal Chemistry*. 73: 415-420.
- Lima, I. and Singh, R.P. 1993. Objective measurement of retrogradation in cooked rice during storage. *Journal of Food Quality*. 16(5): 321-337.
- Liu, R. 2007. Whole grain phytochemicals and health. *Journal of Cereal Science*. 46(3): 207-219.
- Lou, X., Janssen, H. and Cramers, C.A. 1997. Parameters affecting the accelerated solvent extraction of polymeric samples. *Analytical Chemistry*. 69: 1598-1603.
- Luangmalawat, P., Prachayawarakorn, S., Nathakarakule, A. and Soponronnarit, S. 2008. Effect of temperature on drying characteristics and quality of cooked rice. *LWT - Food Science and Technology*. 41(4): 716-723.
- Madsen, M. H., and Christensen, D. 1996. Changes in viscosity properties of potato starches during growth. *Starch*. 48: 245-249.

- Maillard, M.N., Soum, M.H. and Boivin, P. 1996. Antioxidant activity of barley and malt: relationship with phenolic content. *LWT- Food Science and Technology*. 29(3): 238-44.
- Main, J.H., Cydesdale, F.M. and Francis, F.J. 1978. Spray drying anthocyanin concentrates for use as food colorants. *Journal of Food Science*. 43: 1693-1697.
- Maisuthisakul, P. and Changchub, L. 2012. Effect of cooking on total phenolic and anthocyanin contents of 9 genotypes from Thai rice grains. *Journal of Agricultural Science*. 43(2): 669-672.
- Manaois R.V. 2009. Modification of rice starch properties by addition of amino acid at various pH levels. Master Dissertation. Louisiana state university and Agricultural and Mechanical College. Louisiana.
- Markakis, P. 1982. Stability of anthocyanins in foods. *In: Anthocyanins as food colors*. (Markakis, P., ed.). p. 163-180. Academic Press. New York.
- Marshall, W.E. and Wadsworth, J.I. 1994. *Rice Science and Technology*. Marcel Dekker: New York.
- Massaretto, I.L, Alves, M.F.M., Carmona, N.V.M., de Mira, A.K. and Marquez, U.M.L. 2011. Phenolic compounds in raw and cooked rice (*Oryza sativa* L.) and their inhibitory effect on the activity of angiotensin I-converting enzyme. *Journal of Cereal Science*. 54:236-240.
- Mattila, P., Pihlava, J.M. and Hellström, J. 2005. Contents of phenolic acids, alkyland alkenylresorcinols, and avenanthramides in commercial grain products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 53: 8290-8295.
- Matz, S.A. 1970. Manufacture of breakfast cereals. *In: Cereal Technology*. (Matz, S.A., ed). p. 221. Avi Publishing Co. Inc. Westport. Connecticut.
- Mazza, G. and Miniati, E. 1993. Anthocyanins in Fruits, Vegetables, and Grains. (Mazza, G. and Miniati, E., eds.). p. 1-362. Boca Raton. Florida.
- Mazza, G. 2007. Anthocyanins and heart health. *Ann Ist Super Sanità*. 43: 369-374.

- Miah, M.A.K., Haque, A., Douglass, M.P. and Clarke, B. 2002. Parboiling of rice: II Effect of hot soaking time on the degree of starch gelatinization. *International Journal of Food Science & Technology*. 37(5): 539-545.
- Miao, W., Lufeng, W., Xiaoyun, X. and Siyi, P. 2016. Evaluation of cooked rice texture using a novel sampling technique. *Measurement*. 89: 21-27.
- Min, B., Gu, L., McClung, A.M. Bergman, C.J. and Chen, M.H. 2012. Free and bound total phenolic concentrations, antioxidant capacities, and profiles of proanthocyanidins and anthocyanins in whole grain rice (*Oryza sativa* L.) of different bran colours. *Food Chemistry*. 133(3): 715-722.
- Morais, H., Ramos, C., Forgacs, E., Cserhati, T. and Oliveira, J. 2002. Influence of storage conditions on the stability of monomeric anthocyanins studied by reversed-phase high performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography B*. 770: 297-301.
- Narkrugs, W. and Saeleaw, M. 2009. The retrogradation of canned rice during storage. *KMITL Science and Technology Journal*. 9: 1-8.
- Oancea, S., Stoia, M. and Coman, D. 2012. Effects of extraction conditions on bioactive anthocyanin content of *Vaccinium corymbosum* in the perspective of food applications. *Procedia Engineering*. 42: 489-495.
- Ogawa, Y., Glenn, G.M., Orts, W.J. and Wood. 2003. Histological structures of cooked rice grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 51(24): 7019-7023.
- Park, J.K., Kim, S.S. and Kim, K.O. 2001. Effect of milling ratio on sensory properties of cooked rice and on physicochemical properties of milled cooked rice. *Cereal Chemistry*. 78(2): 151-156.
- Parnsakhorn, S. and Noomhorm, A. 2012 Effects of storage temperature on physical and chemical properties of brown rice, parboiled brown rice and parboiled paddy. *Thai Journal of Agricultural Science*. 45(4): 221-231.

- Patil, G., Madhusudhan, M.C., Ravindra, B. and Raghavarao, K.S.M.S. 2009. Extraction, dealcoholisation and concentration of anthocyanin from red radish peels. *Chemical Engineering and Processing*. 48: 364-369.
- Patras, A., Brunton, N.P., Donnell, C.O. and Tiwari, B.K. 2010. Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. *Trends Food Science and Technology*. 21: 3-11.
- Pedro, A.C., Granato, D. and Rosso, N.D., 2015. Extraction of anthocyanins and polyphenols from black rice (*Oryza sativa* L.) by modeling and assessing their reversibility and stability. *Food Chem*. 191: 12-20.
- Peng, C., Lin, Z., Lin, G. and Chen., S. 2006. The anti-photooxidation of anthocyanins rich leaves of a purple rice cultivar. *Science in China Series*. 49: 543-551.
- Pengkumsri, N., Chaiyasut, C., Saenjum, C., Sirilun, S., Peerajan, S., Suwannalert, P., Sirisattha, S. and Sivamaruthi, B.S. 2015. Physicochemical and antioxidative properties of black, brown and red rice varieties of northern Thailand. *Food Science and Technology*. 35(2): 331-338.
- Perdon, A., Siebenmorgen, T., Buescher, R. and Gbur, E. 1999. Starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage. *Journal of Food Science*. 64(5): 828-832.
- Philpot, K., Martin, M., Butardo, V. Jr., Willoughby, D. and Fitzgerald, M. 2006. Environmental factors that affect the ability of amylose to contribute to retrogradation in gels made from rice flour. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54: 5182-5190.
- Prakash, M., Ravi, R. Sathish, H.S., Shyamala, J.C., Shwetha, M.A. and Rangara, G.C.P. 2005. Sensory and instrumental texture measurement of thermally process rice. *Journal of Sensory Studies*. 20: 410-420.
- Ranghino, F. 1966. Valuation of rice resistance to cooking. *RISO*. 15:17-127.
- Revilla, E., Ryan, J.M. and Martín-Ortega, G. 1998. Comparison of several procedures used for extraction of anthocyanins from red grapes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 46: 4952-4597.

- Rewthong, O., Soponronnarit, S., Taechapairoj, C., Tungtrakul, P. and Prachayawarakorn, S. 2011. Effects of cooking, drying and pretreatment methods on texture and starch digestibility of instant rice. *Journal of Food Engineering*. 103(3): 258-264.
- Rice-Evans, C.A., Miller, N.J., Bolwell, P.G., Bramley, P.M. and Pridham, J.B. 1995. The relative antioxidant activities of plant-derived polyphenolic flavonoids. *Free Radical Research*. 22: 375-383.
- Rice-Evans, C.A., Miller, N.J. and Paganga, G. 1996. Structure-antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids. *Free Radical Biology and Medicine*. 20: 933-956.
- Rivas-Gonzalo, J.C. 2003. Analysis of anthocyanins. *In: Methods in Polyphenol Analysis*. (Santos-Buelga, C. and Williamson, G., eds.). p. 338-358. Cambridge. UK.
- Rodriguez-Sanoa, L.E. and Wrolstad, R.E. 2001. Extraction, isolation and purification of anthocyanins. *In Current Protocols in Food Analytical Chemistry*. (Wrolstad, R.E., eds.). New York.
- Ryu, S.N., Park, S.Z. and Ho, C.T. 1998. High performance liquid chromatographic determination of anthocyanin pigments in some varieties of black rice. *Journal Food Drug Analysis*. 6: 729-736.
- Saeed, F. and Mohammad, R.A. 2013. An investigation of the effects of harvesting time and milling moisture content of paddy on the quality of milled rice. *International Journal of Biosciences*. 3(10): 133-138.
- Saif, S.M.H., Suter, D.A. and Lan, Y. 2004. Effects of processing conditions and environmental exposure on the tensile properties of parboiled rice. *Biosystems Engineering*. 89(3): 321-330.
- Sajilata, M.G., Singhal, R.S. and Kulkarni, P.R. 2006. Resistant starch-A review. *Food Science and Food Safety*. 5: 1-17.
- Santos-Buelga, C., García-Viguera, C. and Tomás-Barberán, F.A 2003. On-line identification of flavonoids by HPLC coupled to diode array detection. *In: Methods in Polyphenol Analysis*. (Santos-Buelga, C. and Williamson, G., eds.). p. 92-127. Cambridge. UK.

- Sarneckis, C., Damberg, R.G., Jones, P., Mercurio, M.D., Herderich, M.J. and Smith, P.A. 2006. Quantification of condensed tannins by precipitation with methyl cellulose: Development and validation of an optimized tool for grape and wine analysis. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 12: 39-49.
- Sayre, R.N., Saunders, R.M., Enochian, R.V., Schultz, W.G. and Beagle, E.C. 1982. Review of rice bran stabilization systems with emphasis on extrusion cooking. *Cereal Foods World*. 27: 317-322.
- Sharifi, A. and Hassani B. 2012. Extraction methods and stability of color extracted from barberry pigments. *International Journal of Agricultural Sciences*. 2: 320-327.
- Sikorski, Z.E. 2007. *Chemical and Functional Properties of Food Components*. 2nd ed. Boca Raton, Florida.
- Singh, N., Sodhi, N.S., Kaur, M. and Saxena, S.K. 2003. Physicochemical, morphological, thermal, cooking and textural properties of chalky and translucent rice kernels. *Food Chemistry*. 82(3): 433-439.
- Singh, V., Haken, A. E., Niu, Y.X., Sou, S.H., and Eckhoff, S.R. 1998. Wet-milling characteristics of selected yellow dent corn hybrids as influenced by storage conditions. *Cereal Chemistry*. 75: 235-240.
- Singh, V., Johnston, D.B., Naidu, K., Rausch, K.D., Belyea R.L. and Tumbleson, M.E. 2005. Comparison of modified dry grind corn process for fermentation characteristics and DDGS comparison. *Cereal Chemistry*. 82: 187-190.
- Singleton, V.L. and Rossi, J. A. Jr. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdicphosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*. 16: 144-158.

- Singleton, V.L., Orthofer, R. and Lamuela-Raventos, R.M. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*. 299: 152-178.
- Slade, L. and Levine, H. 1987. Recent advances in starch retrogradation. *In: Industrial polysaccharides: The impact of biotechnology and advanced methodologies* (Vittorio, C. and Dea, I.C.M., eds.). p. 387-430. Gordon and Breach Science Publishers. New York. U.S.A.
- Sompong, R., Siebenhandl-Ehn, S. Linsberger-Martin, G. and Berghofer, E. 2011. Physicochemical and antioxidative properties of red and black rice varieties from Thailand, China and Sri Lanka. *Food Chemistry*. 124: 132-140.
- Srisawas, W. and Jindal, V.K. 2006. Sensory evaluation of cooked rice in relation to water-to-rice ratio and physicochemical properties. *Journal of Texture Studies*. 38:21-41.
- Strack, D. and Wray, V. 1989. Anthocyanins. *In: Methods in Plant Biology*. (Harborne, J.B., ed.). p. 325-356. Academic Press/Harcourt Brace Jovanovich. London.
- Sui, X., Dong, X. and Zhou, W. 2014. Combined effect of pH and high temperature on the stability and antioxidant capacity of two anthocyanins in aqueous solution. *Food Chemistry*. 163: 163-170.
- Sui, X., Bary, S. and Zhou, W. 2016. Changes in the color, chemical stability and antioxidant capacity of thermally treated anthocyanin aqueous solution over storage. *Food Chemistry* 192: 516-524.
- Sun, H., Ge, X., Lv, Y. and Wang, A., 2012. Application of accelerated solvent extraction in the analysis of organic contaminants, bioactive and nutritional compounds in food and feed. *Journal of Chromatography A*. 1237: 1-23.
- Sutharut, J. and Sudarat, J. 2012. Total anthocyanin content and antioxidant activity of germinated colored rice. *International Food Research Journal*. 19: 215-221.

- Taghinezhada, E., Khoshtaghazab, M.H., Minaeib, S., Suzukic, T. and Brenner, T. 2016. Relationship Between Degree of Starch Gelatinization and Quality Attributes of Parboiled Rice During Steaming. 23(6): 339-344.
- Tamura, M., Nagai, T., Hidaka, Y., Noda, T., Yokoe, M. and Ogawa, Y. 2014. Changes in histological tissue structure and textural characteristics of rice grain during cooking process. 1(2): 164-170.
- Tananuwong, K. and Malila, Y. 2011. Changes in physicochemical properties of organic hulled rice during storage under different conditions. Food Chemistry. 125: 179-185.
- Tananuwong, K. and Tangsrianugul, N. 2013. Effects of storage conditions and cooking on colour and antioxidant activities of organic pigmented rice. International Journal of Food Science and Technology. 48: 67-73.
- Tang, M.C., and Copeland, L. 2007. Analysis of complexes between lipids and wheat starch. Carbohydrate Polymers. 67: 80-85.
- Tang, Y., Cai, W. and Xu, B. 2016. From rice bag to table: Fate of phenolic chemical compositions and antioxidant activities in waxy and non-waxy black rice during home cooking. Food Chemistry. 191: 81-90.
- Teo, C.H., Karim, A.A., Cheah, P.B., Norziah, M.H. and Seow, C.C. 2000. On the roles of protein and starch in the ageing of non-waxy rice flour. Food Chemistry. 69: 229-236.
- Tester, R.F. and Morrison, W.R. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches II Waxy rice starches. Cereal Chemistry. 67: 558-563.
- Thao, N.L., Dao, T.K.T., Le, P.T., Than, T.U.X. and DSM Nguyen, T.N.T. 2015. Effect of ethanol on the anthocyanin extraction from the purple rice of Vietnam. Journal of Food and Nutrition Sciences. 3(1-2): 45-48.
- Ti, H., Zhang, R., Li, Q., Wei, Z. and Zhang, M. 2015. Effects of cooking and in vitro digestion of rice on phenolic profiles and antioxidant activity. Food Research International. 76: 813-820.

- Tian, S., Nakamura, K. and Kayahara, H. 2004. Analysis of phenolic compounds in white rice, brown rice, and germinated brown rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 52: 4808-4813.
- Tian, Y., Zhao, J., Xie, Z., Wang, J., Xu, X. and Jin, Z. 2014. Effect of different pressure-soaking treatments on color, texture, morphology and retrogradation properties of cooked rice. *LWT- Food Science and Technology*. 55(1): 368-373.
- Vandeputte, G., Vermeulen, R., Geeroms, J. and Delcour, J. 2003. Rice starches. III. Structural aspects provide insight in amylopectin retrogradation properties and gel texture. *Journal of Cereal Science*. 38(1): 61-68.
- Varavinit, S., Shobsngob, S., Varayanond, W., Chinachoti, P. and Naivikul, O. 2003. Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation and pasting properties of flours from different cultivars of Thai rice. *Starch*. 55: 410-415.
- Vichit, W. and Seawan, N. 2015. Antioxidant activities and cytotoxicity of Thai pigmented rice. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*. 7(7): 329-334.
- Wadsworth, J.I., Matthews, J. and Spadaro, J.J. 1982. Moisture content variation in freshly harvested rice associated with kernel thickness. *Transactions of the ASAE*. 25: 1127-1130.
- Wani, A.A., Singh, P., Shah, M.A., Wani, I.A., Götz, A., Schott, M. and Zacherl, C. 2013. Physico-chemical, thermal and rheological properties of starches isolated from newly released rice cultivars grown in Indian temperate climates. *LWT - Food Science and Technology*. 53: 176-183.
- Wong, D. W. S. 2006. Feruloyl esterase: A key enzyme in biomass degradation. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 133(2): 87-112.
- Wrolstad R.E., Durst R.W., Lee J. 2005. Tracking color and pigment changes in anthocyanin products. *Trends Food Science and Technology*. 16: 423-428.
- Wu, X.B., Liu, J.X., Li, D.Q. and Liu, C.M. 2016. Rice caryopsis development II: Dynamic changes in the endosperm. *Journal of Integrative Plant Biology*. 58: 786-798.

- Xie, L., Chen, N., Duan, B., Zhu, Z. and Liao, X. 2008. Impact of proteins on pasting and cooking properties of waxy and non-waxy rice. *Journal of Cereal Science*. 47: 372-379.
- Xu, B. and Chang, S.K.C. 2009. Total phenolic, phenolic acid, anthocyanin, flavan-3-ol, and flavonol profiles and antioxidant properties of pinto and black beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by thermal processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 57: 4754-4764.
- Yadav, V.K. and Jindal, B.K. 2007. Modeling changes in milled rice (*Oryza sativa* L.) kernel dimensions during soaking by image analysis. *Journal of Food Engineering*. 80(1): 359-369.
- Yafang, S., Gan, Z. and Jinsong, B. 2011. Total phenolic content and antioxidant capacity of rice grains with extremely small size. *African Journal of Agricultural Research*. 6: 2289-2293.
- Yamasaki, H., Sakihama, Y. and Ikehara, N. 1997. Flavonoid-peroxidase reaction as a detoxification mechanism of plant cells against H₂O₂. *Plant Physiology*. 115: 1405-1412.
- Yodmanee, S., Karrila, T.T. and Pakdeechanuan, P. 2011. Physical chemical and antioxidant properties of pigmented rice grown in Southern Thailand. *Food Research International*. 18: 901-906.
- Yu, S., Ma, Y. and Sun D.W. 2009. Impact of amylose content on starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage. *Journal of Cereal Science*. 50: 139-144.
- Yu, Y., Lingyan, G., Zhu, S., Zhan, Y. and Zhang, Q. 2015. Effect of presoaking high hydrostatic pressure on the cooking properties of brown rice. *Journal of Food Science and Technology*. 52(12): 7904-7913.
- Zaupá, M., Calani, L., Del Rio, D., Brighenti, F. and Pellegrini, N. 2015. Characterization of total antioxidant capacity and (poly) phenolic compounds of differently pigmented rice varieties and their changes during domestic cooking. *Food Chemistry*. 187: 338-347.
- Zhao, S., Xiong, S., Qiu, C. and Xu, Y. 2007. Effect of microwaves on rice quality. *Journal of Stored Products Research*. 43: 496-502.

- Zhao, H., Li, H., Sun, G., Yang, B. and Zhao, M. 2013. Assessment of endogenous antioxidative compounds and antioxidant activities of lager beers. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 93: 910-917.
- Zhou Z., Robards, K., Helliwell, S. and Blanchard, C. 2002. Composition and functional properties of rice. *International Journal of Food Science and Technology*. 37: 849-868.
- Zhou, K.Q., Su, L. and Yu, L.L. 2004. Phytochemicals and antioxidant properties in wheat bran. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 52: 6108-6114.
- Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S. and Blanchard, C., 2007. Effect of fatty acids on rice starch properties. *Food Research International*. 40: 209-214.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ภาพและตารางประกอบการศึกษาทดลอง

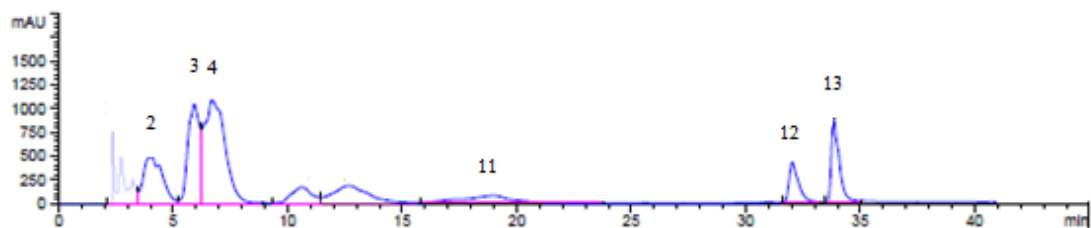
Appendix Table 1 Physical properties of anthocyanin extract from Sangyod brown rice

Treatment	Ethanol (%)	Citric acid (%)	Time (hr.)	Color				
				L*	a*	b*	Hue angle (°)	Chroma
1	0.00	0.00	1.00	69.97±0.22 ⁱ	5.12±0.08 ^a	13.97±0.12 ⁱ	69.87±0.41 ⁱ	14.88±0.12 ^h
2	0.00	0.00	24.00	69.75±0.17 ⁱ	5.28±0.09 ^a	13.71±0.22 ⁱ	68.94±0.53 ⁱ	14.69±0.11 ^h
3	0.00	2.50	12.50	69.22±0.31 ^h	5.77±0.05 ^c	12.89±0.09 ^h	67.89±0.72 ⁱ	14.12±0.09 ^g
4	0.00	5.00	1.00	69.96±0.30 ⁱ	5.42±0.03 ^b	12.23±0.18 ^g	66.10±0.67 ^h	13.38±0.08 ^e
5	0.00	5.00	24.00	68.76±0.18 ^h	5.86±0.07 ^c	12.45±0.15 ^g	64.79±0.66 ^{gh}	13.76±0.14 ^f
6	45.00	0.00	12.50	68.24±0.26 ^g	6.25±0.05 ^d	11.76±0.10 ^f	62.01±0.44 ^f	13.32±0.11 ^{de}
7	45.00	2.50	1.00	68.96±0.22 ^h	5.89±0.08 ^c	11.81±0.09 ^f	63.49±0.65 ^g	13.20±0.14 ^{cd}
8	45.00	2.50	12.50	67.86±0.20 ^f	6.52±0.04 ^f	11.47±0.10 ^e	60.38±0.48 ^c	13.19±0.10 ^{cd}
9	45.00	2.50	12.50	67.82±0.33 ^f	6.55±0.02 ^f	11.50±0.09 ^e	60.34±0.39 ^c	13.23±0.08 ^d
10	45.00	2.50	12.50	67.90±0.35 ^f	6.58±0.04 ^f	11.54±0.10 ^e	60.31±0.47 ^c	13.28±0.12 ^{de}
11	45.00	2.50	24.00	66.85±0.40 ^e	6.78±0.02 ^h	11.12±0.19 ^{cd}	58.63±0.26 ^c	13.02±0.10 ^{bc}
12	45.00	5.00	12.50	66.86±0.18 ^e	6.66±0.03 ^g	11.21±0.10 ^d	59.28±0.28 ^d	13.04±0.08 ^c
13	90.00	0.00	1.00	66.74±0.19 ^e	6.28±0.03 ^d	11.82±0.13 ^f	62.02±0.31 ^f	13.38±0.06 ^e
14	90.00	0.00	24.00	65.16±0.25 ^c	6.41±0.02 ^e	10.86±0.11 ^c	59.45±0.33 ^d	12.61±0.13 ^b
15	90.00	2.50	12.50	63.42±0.20 ^b	7.49±0.05 ^j	10.17±0.15 ^a	53.63±0.45 ^a	12.63±0.09 ^b
16	90.00	5.00	1.00	65.82±0.32 ^d	6.59±0.05 ^f	10.58±0.16 ^b	58.08±0.46 ^c	12.46±0.10 ^a
17	90.00	5.00	24.00	63.90±0.18 ^b	7.12±0.03 ⁱ	10.67±0.12 ^{bc}	56.29±0.35 ^b	12.83±0.11 ^b

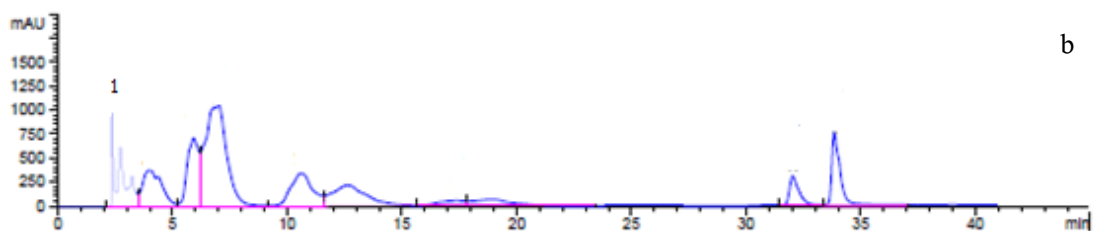
Appendix Table2 Chemical properties of anthocyanin extract from Sangyod brown rice

Treatment	Ethanol (%)	Citric acid (%)	Time (hr.)	Anthocyanin content (mg of cyanidin-3-glucoside/100g)	pH differential method		Phenolic content (mg of ferulic acid/100g)	DPPH free radical scavenging activity (%)
					Abdel and Hule method	pH differential method		
1	0.00	0.00	1.00	10.01±0.09a	0.30±0.01a	0.30±0.01a	225.74±1.11a	60.52±0.26a
2	0.00	0.00	24.00	10.53±0.06b	0.31±0.02ab	0.31±0.02ab	228.69±1.03b	62.66±0.31bc
3	0.00	2.50	12.50	10.96±0.05c	0.33±0.01b	0.33±0.01b	232.75±0.98c	62.24±0.39b
4	0.00	5.00	1.00	10.62±0.10b	0.32±0.01ab	0.32±0.01ab	230.43±0.86b	62.11±0.43b
5	0.00	5.00	24.00	11.92±0.12d	0.33±0.01b	0.33±0.01b	232.92±1.23c	62.97±0.27c
6	45.00	0.00	12.50	13.73±0.09f	0.39±0.02cd	0.39±0.02cd	237.73±0.75d	65.98±0.22e
7	45.00	2.50	1.00	13.68±0.07f	0.34±0.02bc	0.34±0.02bc	233.77±0.99c	62.98±0.37c
8	45.00	2.50	12.50	14.22±0.08g	0.39±0.02cde	0.39±0.02cde	238.62±0.92e	66.72±0.26f
9	45.00	2.50	12.50	14.19±0.10g	0.39±0.01d	0.39±0.01d	238.53±0.83e	66.75±0.21f
10	45.00	2.50	12.50	14.18±0.11g	0.39±0.02cde	0.39±0.02cde	238.66±0.61e	66.66±0.20f
11	45.00	2.50	24.00	14.78±0.09i	0.37±0.02cd	0.37±0.02cd	240.20±0.52f	65.12±0.39e
12	45.00	5.00	12.50	14.92±0.06ij	0.42±0.01e	0.42±0.01e	244.96±0.93g	66.77±0.37e
13	90.00	0.00	1.00	13.13±0.10e	0.38±0.03cd	0.38±0.03cd	232.59±0.89c	64.21±0.21d
14	90.00	0.00	24.00	15.05±0.11jk	0.39±0.01d	0.39±0.01d	242.31±1.16e	65.83±0.42e
15	90.00	2.50	12.50	15.56±0.08k	0.44±0.02e	0.44±0.02e	249.62±1.15h	68.43±0.17h
16	90.00	5.00	1.00	14.59±0.06h	0.36±0.01c	0.36±0.01c	241.54±1.09e	64.65±0.39d
17	90.00	5.00	24.00	15.15±0.05k	0.37±0.02cd	0.37±0.02cd	244.94±1.12g	67.25±0.40g

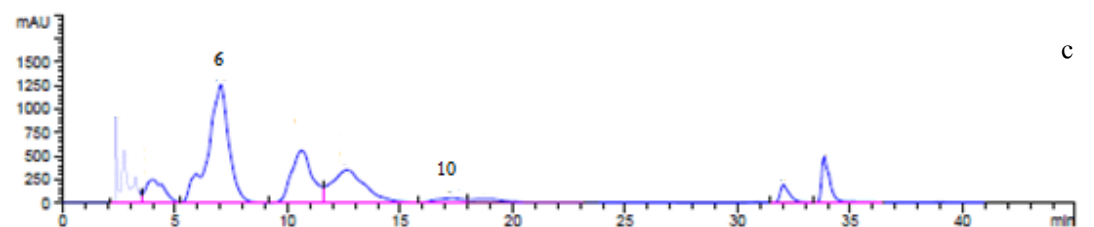
a



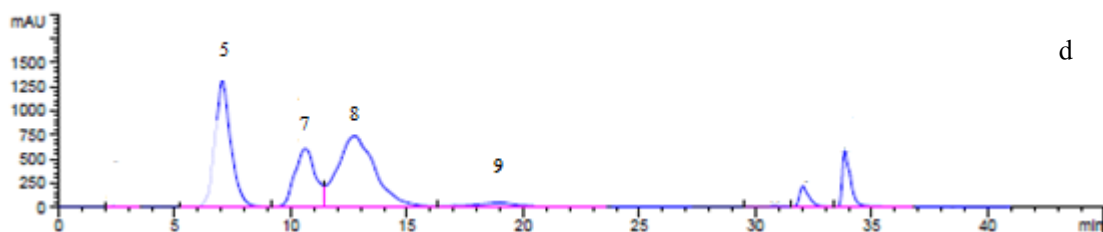
b



c



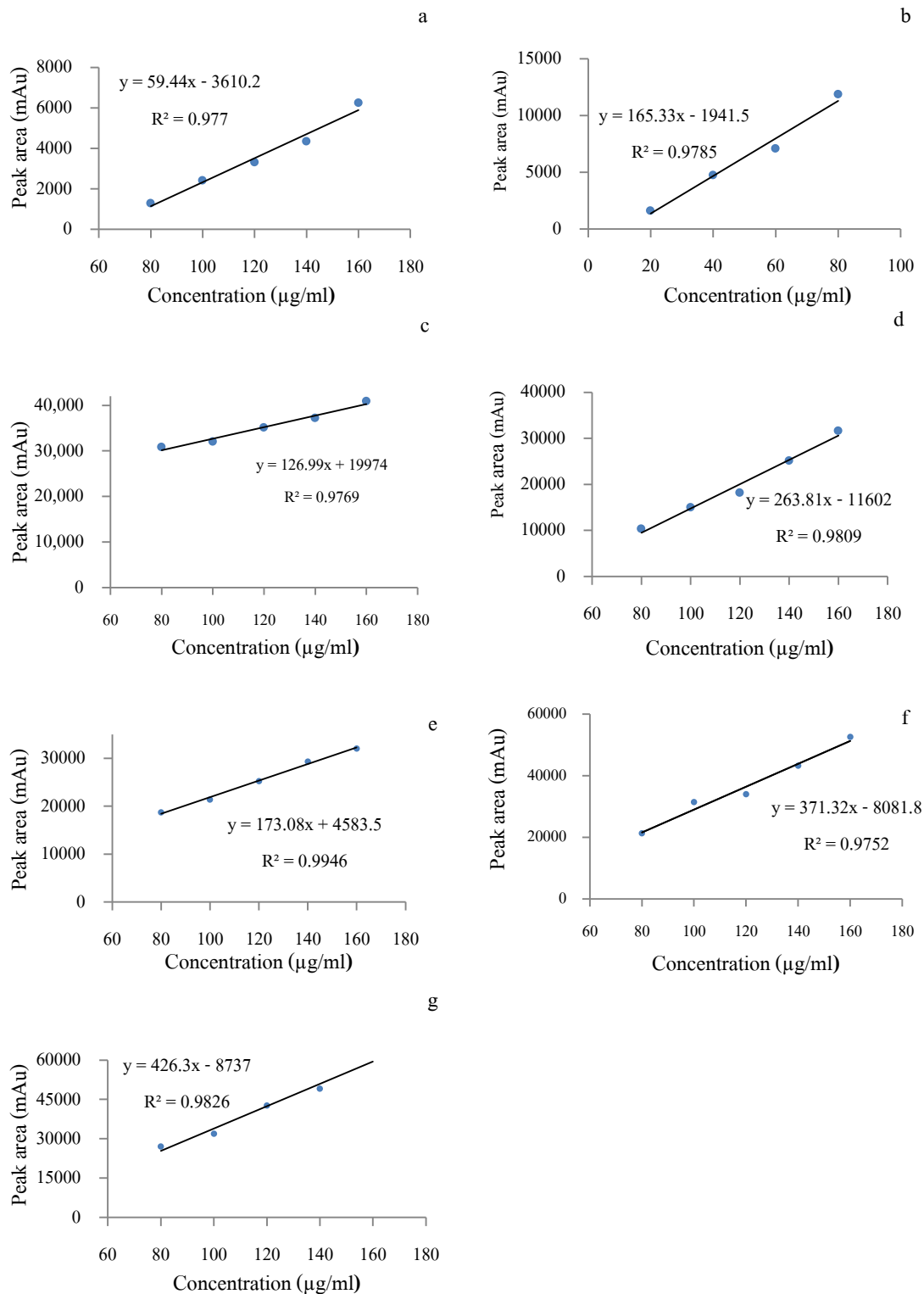
d



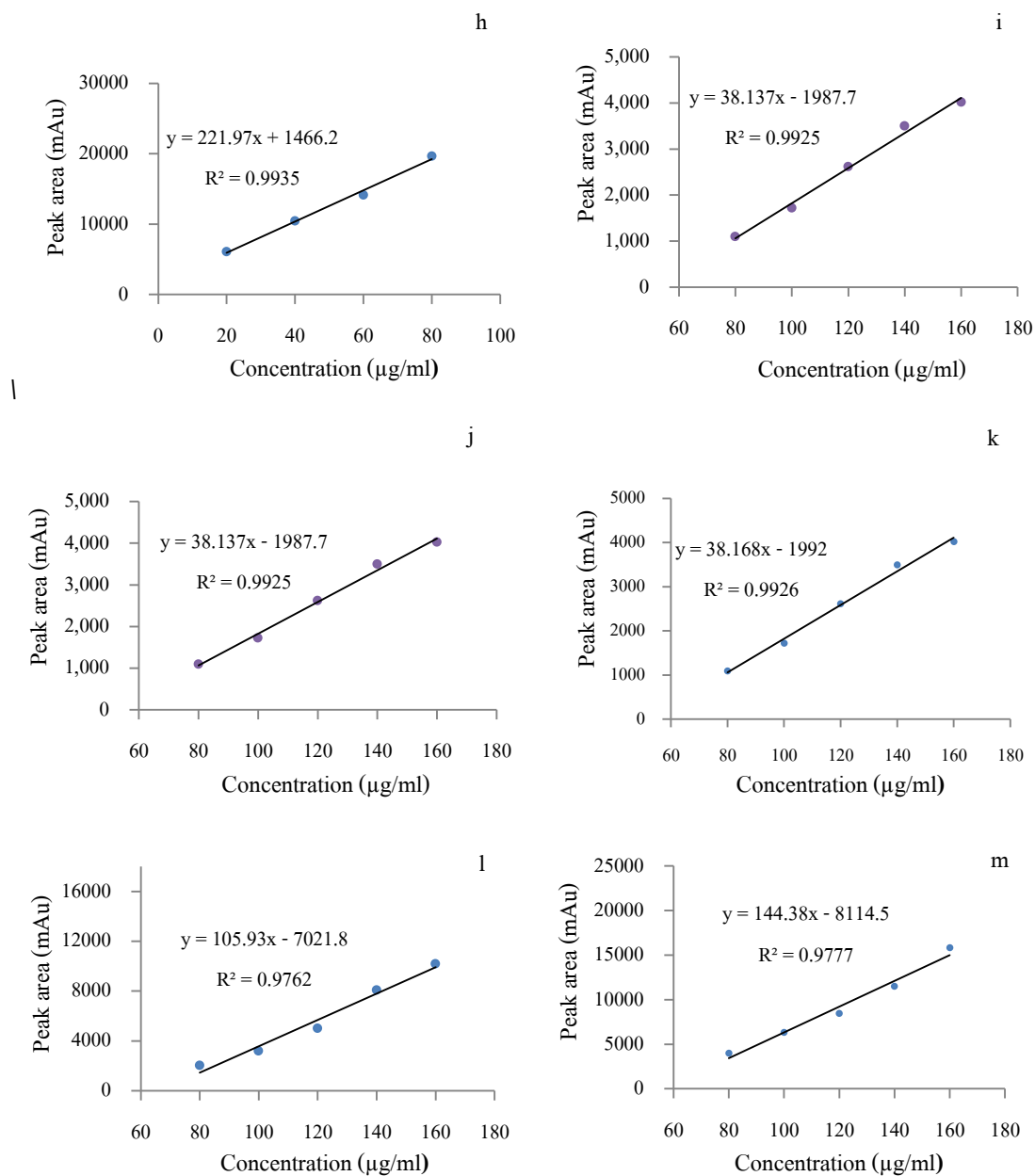
Appendix Figure 1 HPLC chromatogram of phenolic acid standard and peak identification at 260 (a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm.; Gallic acid (1), protocatechuic acid (2), 4-hydroxybenzoic acid (3), vanillic acid (4), caffeic acid (5), syringic acid (6), *p*-coumaric acid (7), ferulic acid (8), sinapic acid (9), *p*-cresol (10), rutin (11), quercetin dehydrate (12), kaempferol (13)

Appendix Table 3 Maximum wavelength and retention time (RT) of phenolic acid standard

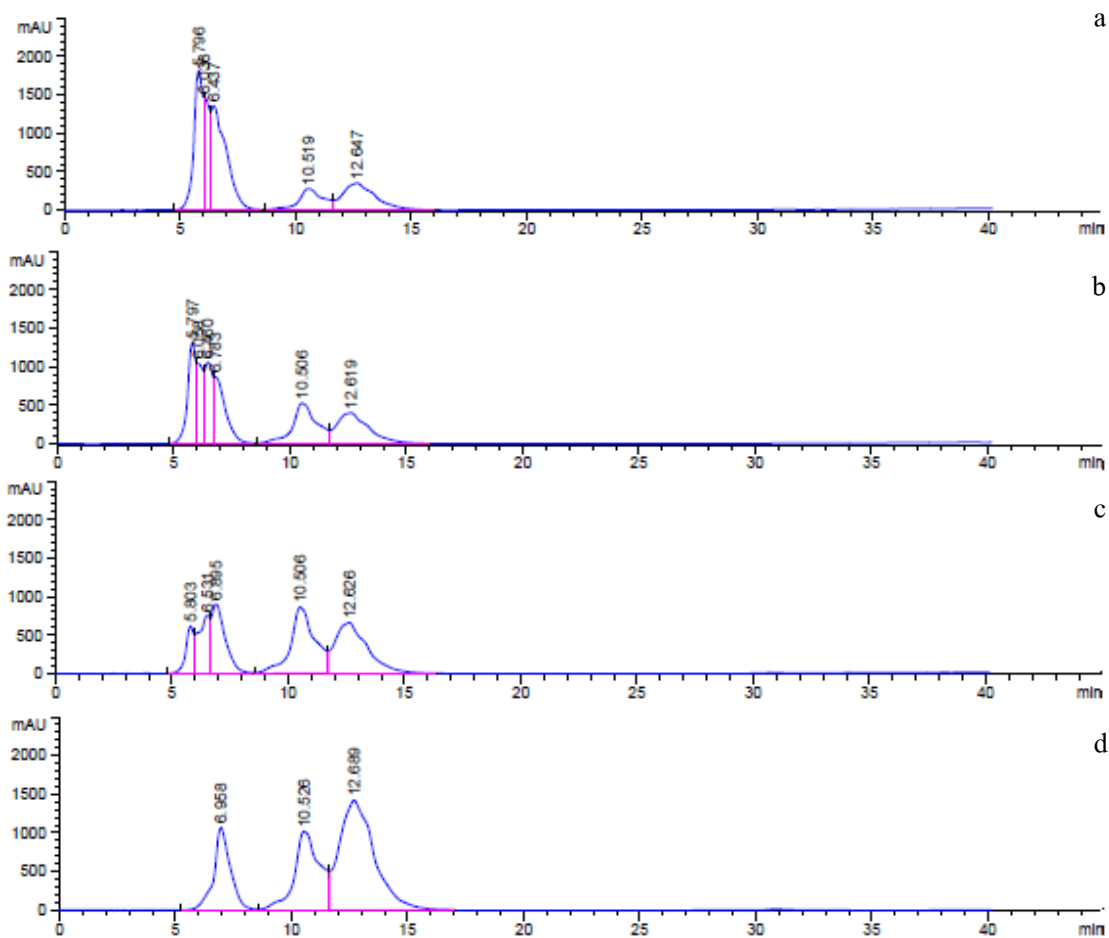
No.	Phenolic acid standards	Molecular weight	Maximum wavelength (nm)	Retention time (min)	Peak area (mAU)
1	Gallic acid	170.12	270	2.395	4,348.10
2	Protocatechuic acid	154.12	260	4.112	11,859.70
3	4-hydroxybenzoic acid	138.12	260	5.982	19,749.70
4	Vanillic acid	168.15	260	6.678	10,510.40
5	Caffeic acid	180.16	325	7.091	17,544.00
6	Syringic acid	198.17	280	7.154	8,423.22
7	<i>p</i> -coumaric acid	164.16	325	10.588	19,755.90
8	Ferulic acid	194.18	325	12.490	19,830.50
9	Sinapic acid	224.21	325	13.137	17,241.70
10	<i>p</i> -cresol	108.14	280	17.295	4,882.82
11	Rutin	290.27	260	18.291	4,651.83
12	Quercetin dehydrate	286.24	260	31.945	4,352.97
13	Kaempferol	338.27	260	33.798	5,799.310



Appendix Figure 2 Standard curve of phenolic standard; gallic acid (a), protocatechuic acid (b), 4-hydroxybenzoic acid (c), vanillic acid (d), caffeic acid (e), syringic acid (f) and *p*-coumaric acid

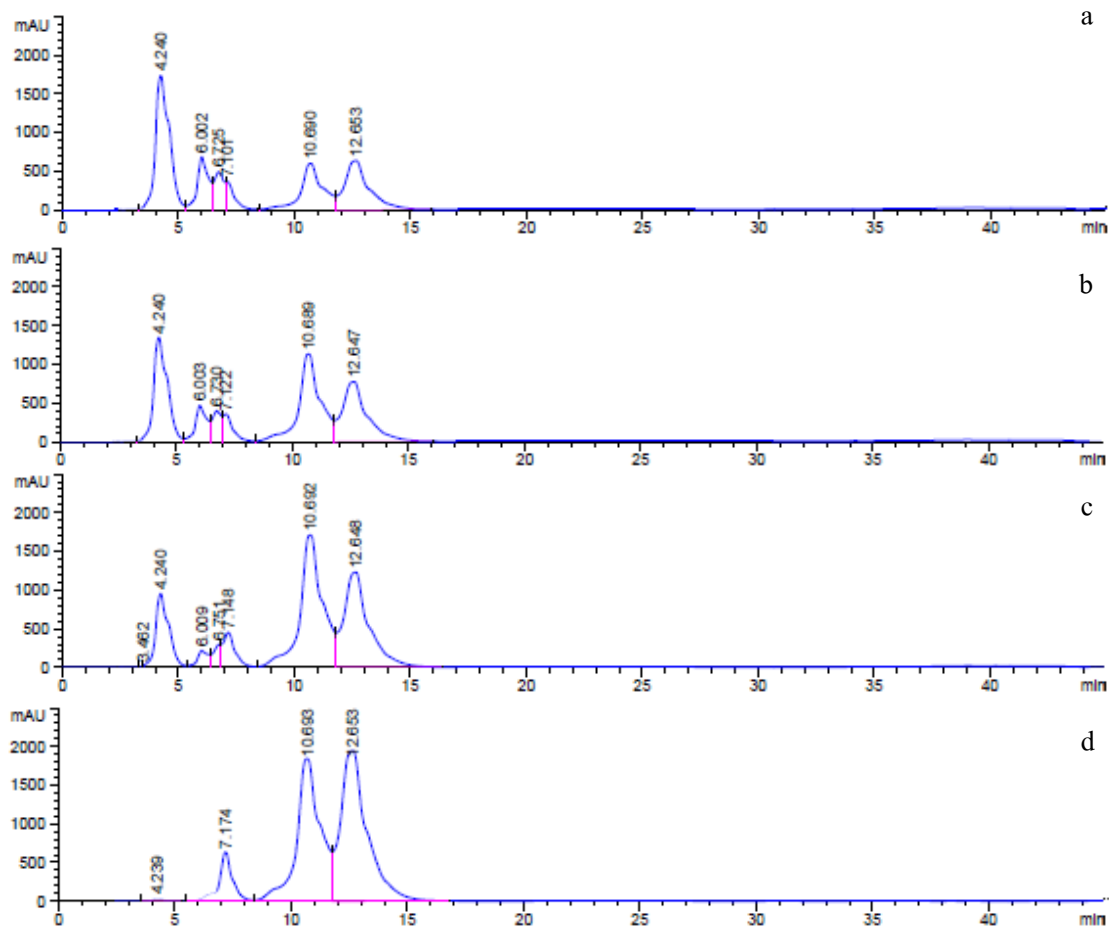


Appendix Figure 2 (con.) Standard curve of phenolic standard; ferulic acid (h), sinapic acid (i), *p*-cresol (j), rutin (k), quercetin dehydrate (l) and Kaempferol (m)

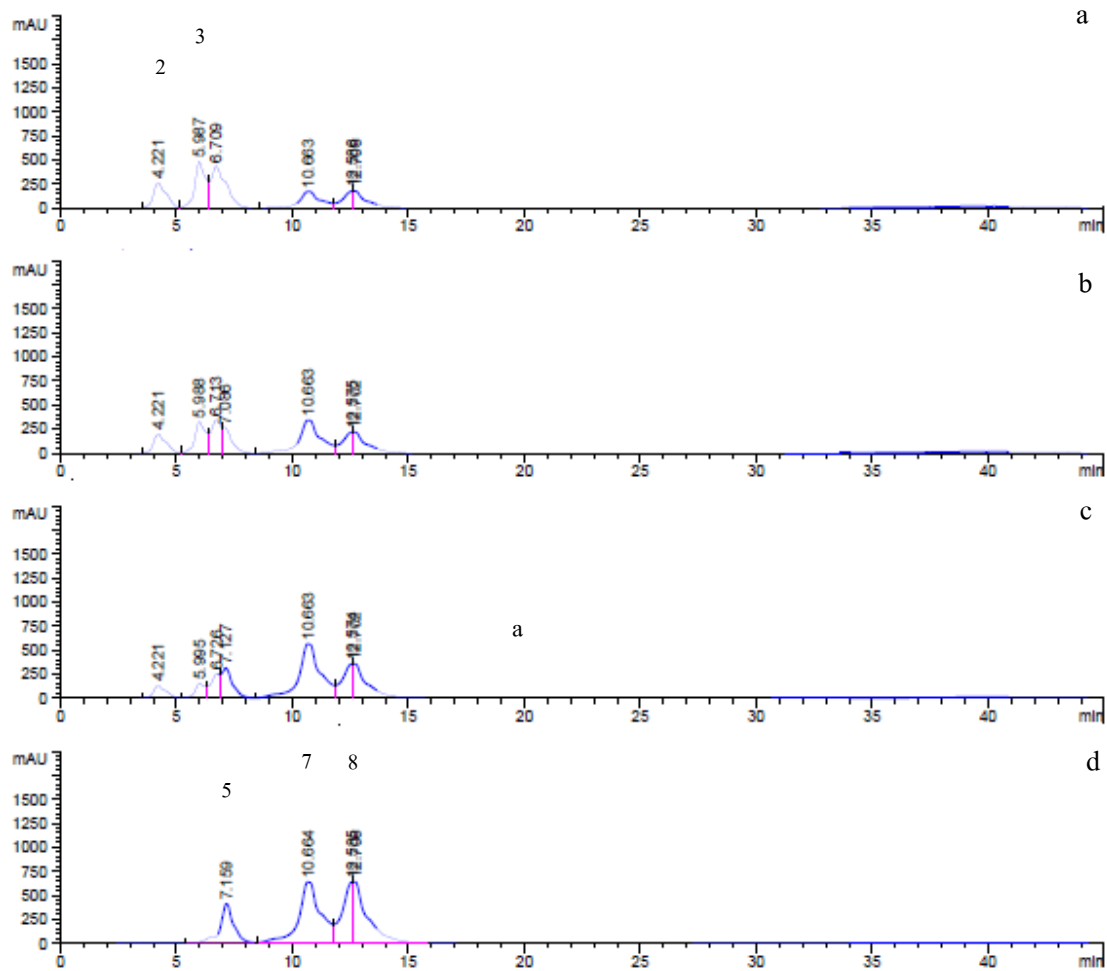


Appendix Figure 3 HPLC chromatogram of free phenolic acid and peak identification at 260

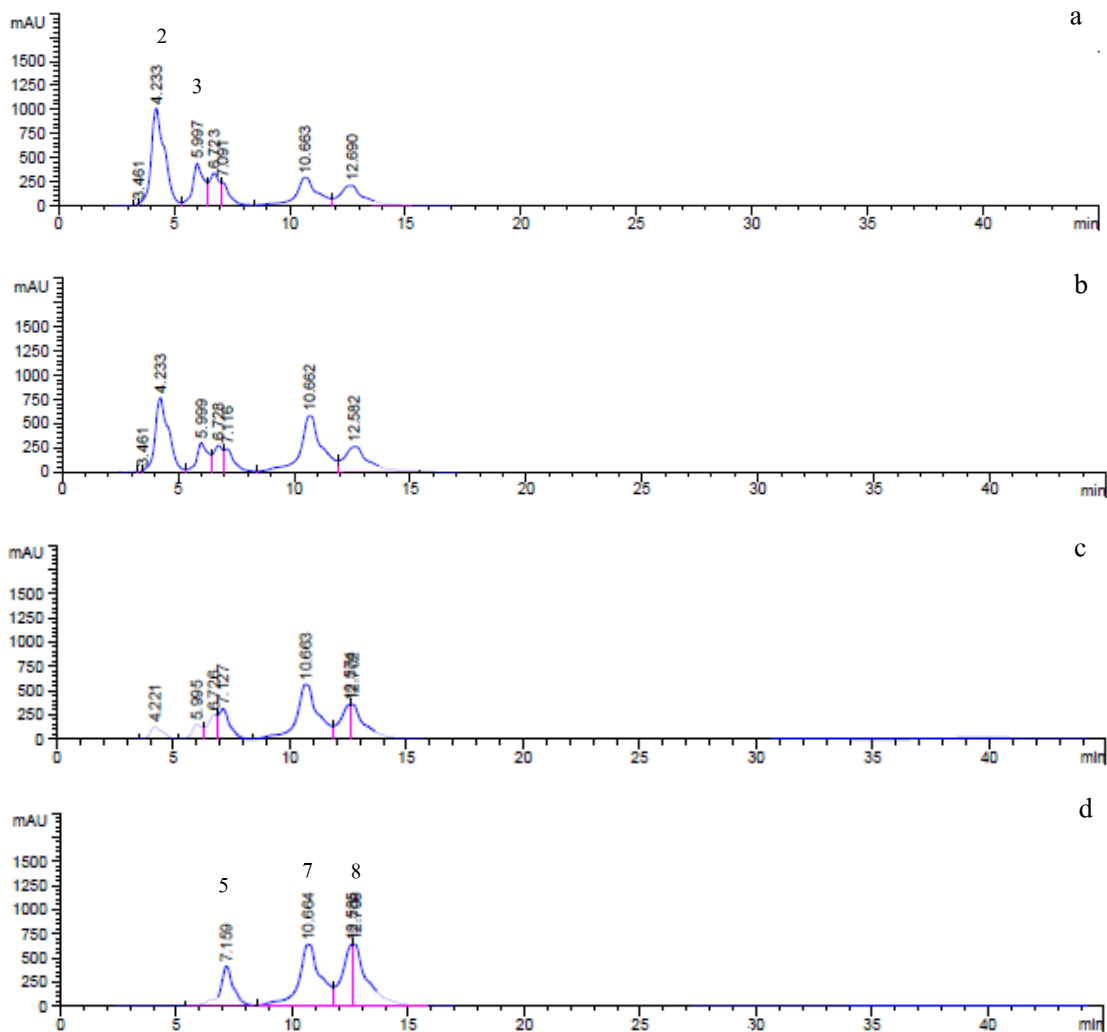
(a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm in raw Sangyod brown



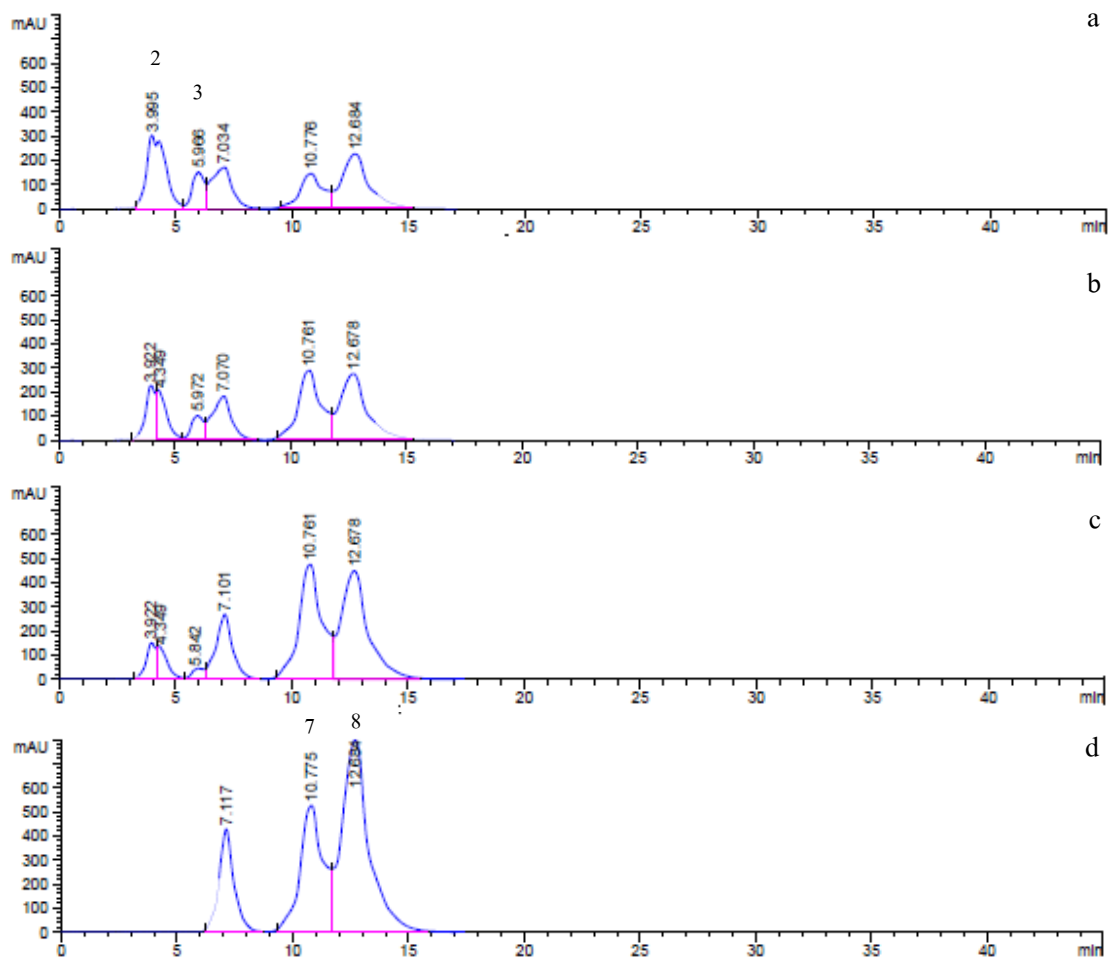
Appendix Figure 4 HPLC chromatogram of bound phenolic acid and peak identification at 260 (a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm in raw Sangyod brown



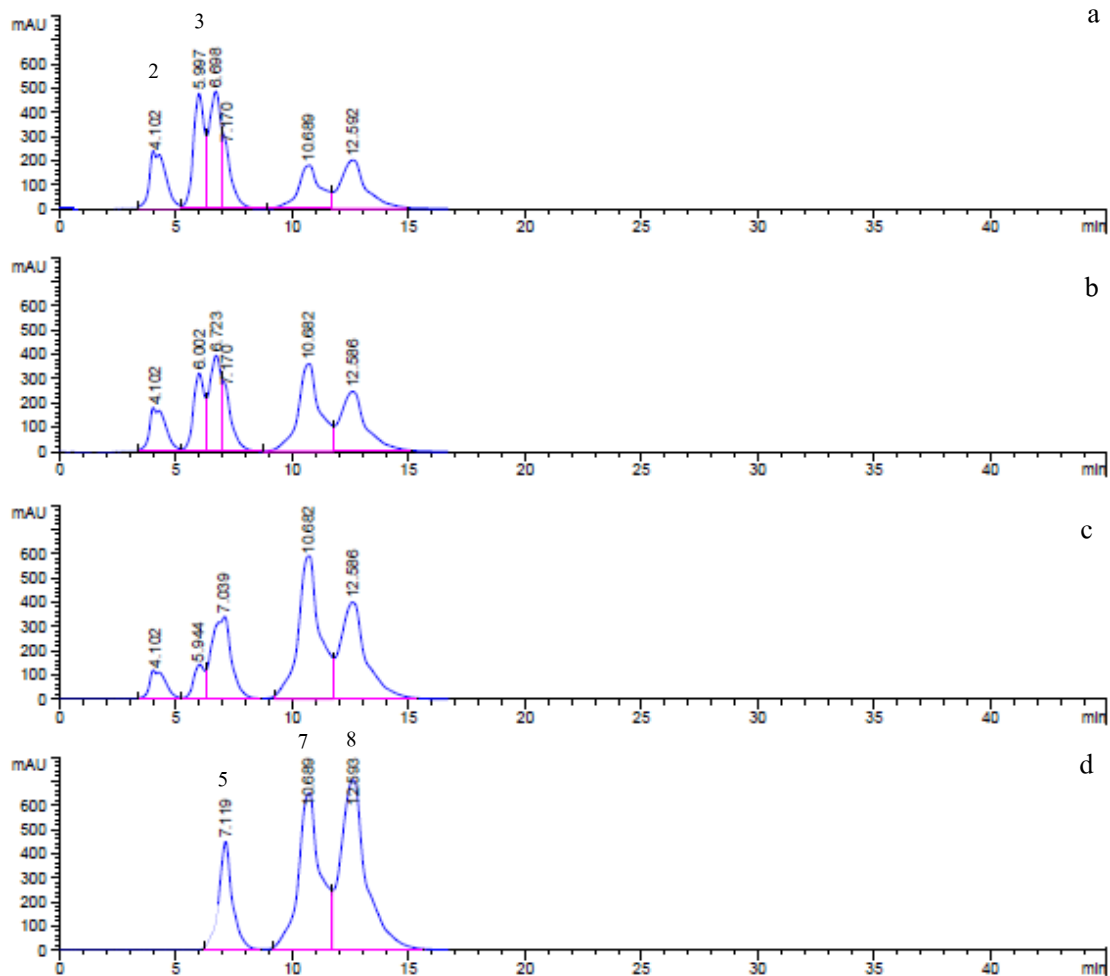
Appendix Figure 5 HPLC chromatogram of free phenolic acid and peak identification at 260 (a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm in cooked Sangyod brown rice by electric rice cooker



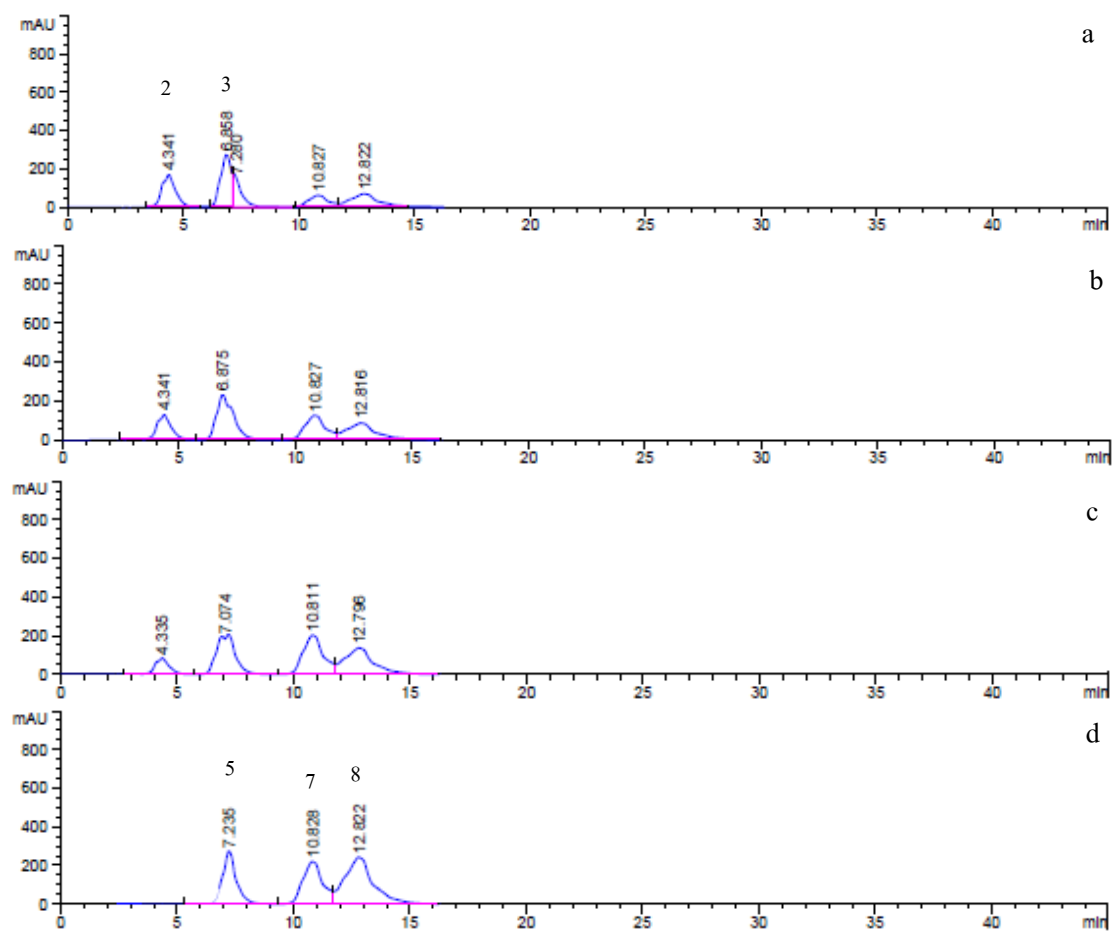
Appendix Figure 6 HPLC chromatogram of bound phenolic acid and peak identification at 260 (a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm in cooked Sangyod brown rice by electric rice cooker



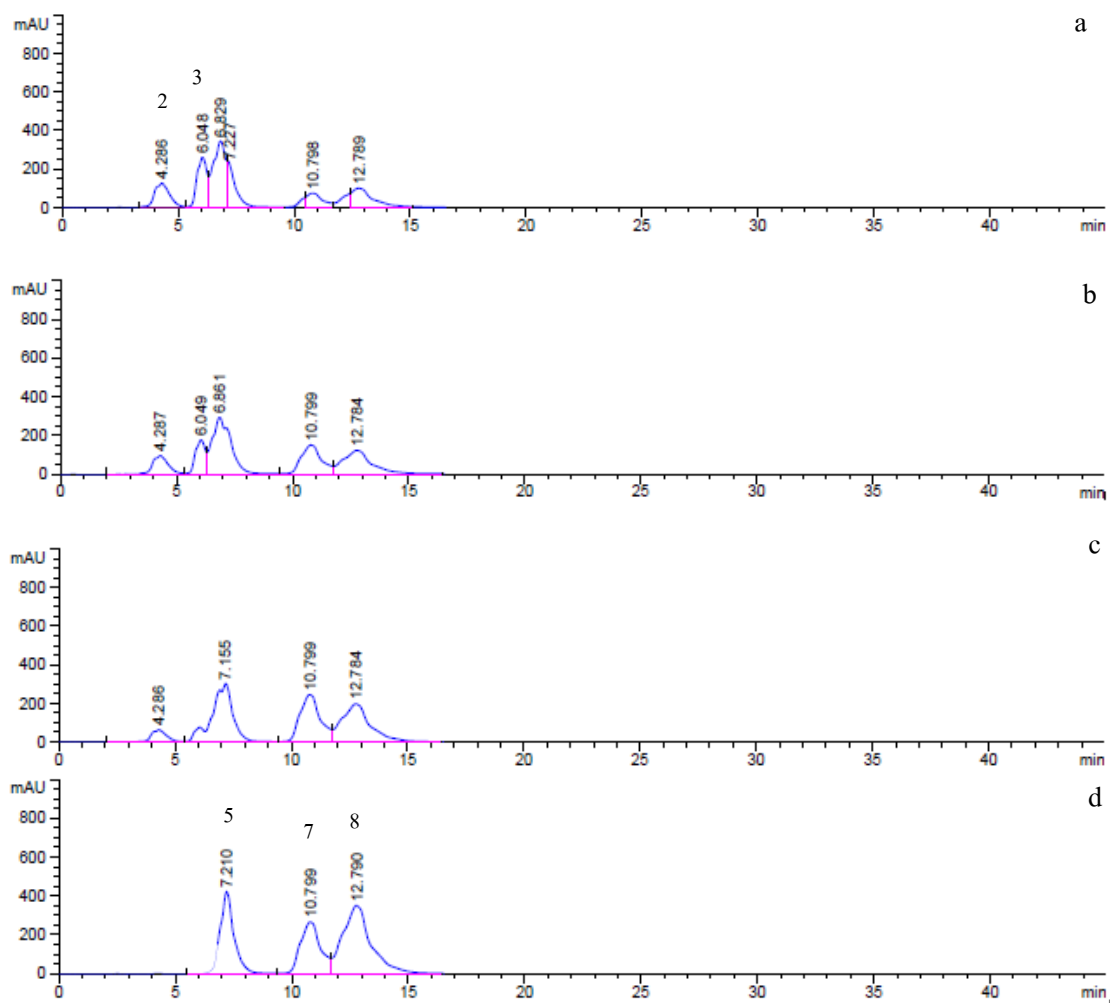
Appendix Figure 7 HPLC chromatogram of free phenolic acid and peak identification at 260 (a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm in cooked Sangyod brown rice by microwave



Appendix Figure 8 H7PLC chromatogram of bound phenolic acid and peak identification at 260 (a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm in cooked Sangyod brown rice by microwave



Appendix Figure 9 HPLC chromatogram of free phenolic acid and peak identification at 260 (a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm in cooked Sangyod brown rice by retort



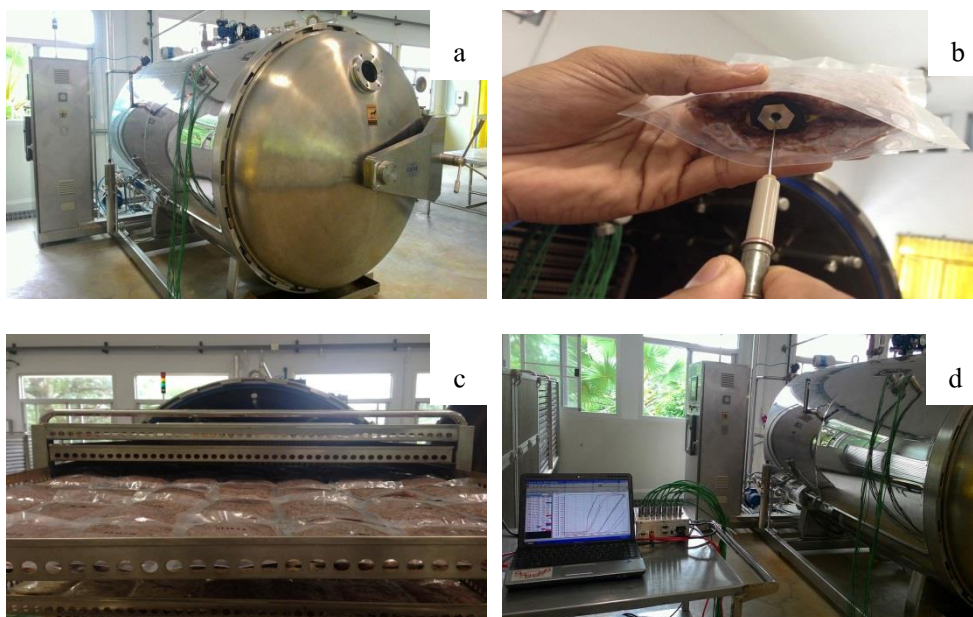
Appendix Figure 10 HPLC chromatogram of bound phenolic acid and peak identification at 260

(a), 270 (b), 280 (c) and 325 (d) nm in cooked Sangyod brown rice by retort

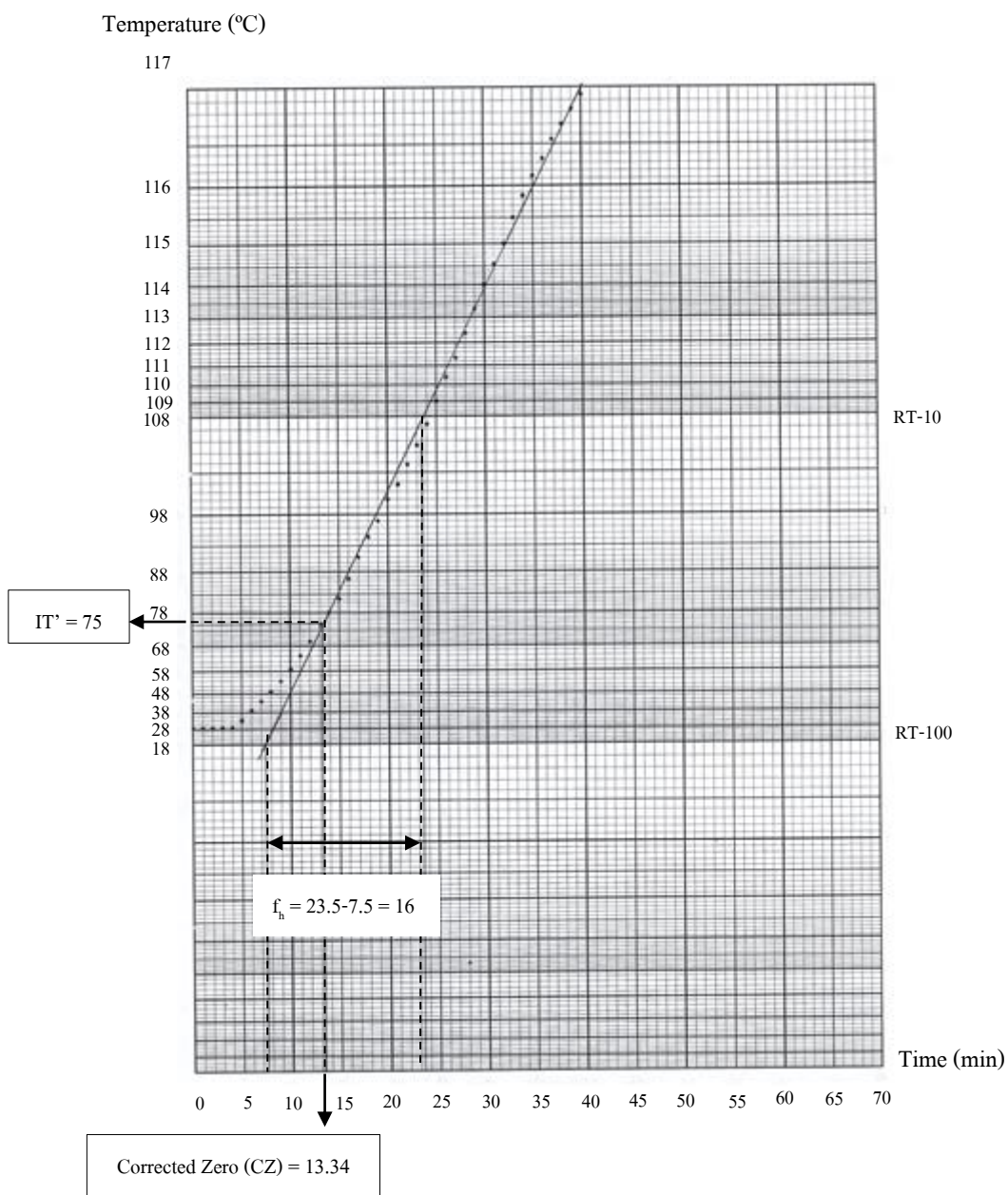
ภาคผนวก ข. การผลิตข้าวกล้องงอกแห้งหุงสุกพร้อมบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิท



Appendix Figure 11 Retort pouch was inserted probe at the half of its height



Appendix Figure 12 A horizontal water spray retort was used in this research (a), probe position in a retort pouch (b), The arrangement of samples on the tray of retort (c), The probe of retort was connected with recorder (d)



Appendix Figure 13 Semi-logarithmic between temperature and time for calculating F_0 formula of Sangyod brown rice

Note: Sangyod brown rice was soaked in boiling water for 24 min before cooking by retort

การคำนวณหาค่า F_0 (Ball and Olson, 1957)

ใช้ตัวอย่างข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการลวกในน้ำเดือดเป็นเวลา 24 นาที สามารถหาค่าต่างๆจากภาพภาคผนวกที่ 13 เพื่อใช้ประกอบการคำนวณได้ดังนี้

Corrected Zero (CZ) คือ เวลาเริ่มต้นของกระบวนการให้ความร้อน คิดจากร้อยละ 58 ของระยะเวลาตั้งแต่เปิดไอน้ำเข้าหม้อหนึ่งฆ่าเชื้อจนกระทั่งหม้อหนึ่งฆ่าเชื้อมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิการฆ่าเชื้อที่กำหนด (Come-up time, CUT)

$$\begin{aligned}\text{Corrected Zero (CZ)} &= \text{CUT} \times 0.58 \\ &= 23 \times 0.58 \\ &= 13.34\end{aligned}$$

Pseudo-initial temperature (IT') คือ อุณหภูมิเริ่มต้นเทียม หาได้จากการลากเส้นตรงจากจุด Corrected Zero ไปตัดของส่วนที่เป็นเส้นตรงของกราฟแล้วลากเส้นตรงที่แกน y อ่านอุณหภูมิที่ได้

$$\text{Pseudo-initial temperature (IT')} = 75 \text{ องศาเซลเซียส}$$

f_h คือ ระยะเวลาที่กราฟส่วนที่เป็นเส้นตรงเปลี่ยนไป 1 log cycle

$$\begin{aligned}f_h &= 23.5 - 7.5 \\ &= 16 \text{ นาที}\end{aligned}$$

RT คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ (Retort temperature) เท่ากับ 118 องศาเซลเซียส

B_p คือ ระยะเวลาฆ่าเชื้อ (Process time) เท่ากับ 26 นาที

จากสูตร

$$\begin{aligned}jI &= \text{RT} - \text{IT}' \\ &= 118 - 75 \\ &= 43 \text{ องศาเซลเซียส}\end{aligned}$$

เปลี่ยนหน่วยของ jI จากองศาเซลเซียสให้เป็นองศาฟาเรนไฮด์ โดยการคูณด้วย 1.8

$$\begin{aligned}
 \text{จะได้} \quad jI &= 43 \times 1.8 \\
 &= 77.4 \\
 \log jI &= \log 77.4 \\
 &= 1.8887 \\
 \log g &= \log jI - \frac{B_B}{f_h} \\
 &= \frac{1.8887 - 26}{16} \\
 &= 0.264
 \end{aligned}$$

ค่า f_h/U หาได้จากการนำค่า $\log g$ เท่ากับ 0.264 ไปเปิดตารางความสัมพันธ์ระหว่างค่า f_h/U และ $\log g$ จะได้เท่ากับ 1.8965 (Ball and Olson, 1957)

นำค่าอุณหภูมิการฆ่าเชื้อที่ 118 องศาเซลเซียส ไปเปิดตารางความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิการฆ่าเชื้อและค่า F_i จะได้เท่ากับ 2.046 (Ball and Olson, 1957)

นำค่า f_h/U และ F_i แทนค่าในสูตร

$$\begin{aligned}
 F_0 &= \frac{f_h}{(f_h/U \times F_i)} \\
 &= \frac{16}{(1.8965 \times 2.046)} \\
 &= 4.12 \text{ นาที}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ขบวนการสังเคราะห์ยดที่ผ่านการลวกในน้ำเดือดเป็นเวลา 24 นาที เมื่อนำไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 118 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 26 นาที จะทำให้มีค่า F_0 เท่ากับ 4.12 นาที

ภาคผนวก ค. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

1. ขนาดเม็ดสีขาว (Wadsworth *et al.*, 1982)

อุปกรณ์

เวอร์เนียร์

วิธีการ

ส้อมขาวตัวอย่างละ 10 เมล็ด วัดขนาดความยาว และความกว้างของเม็ด หาค่าเฉลี่ยและรายงานผลในรูปอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเม็ด (L/B ratio)

2. น้ำหนักเม็ดสีขาว (Wadsworth *et al.*, 1982)

อุปกรณ์

เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง

วิธีการ

ส้อมตัวอย่างเม็ดผสมบรรจุจำนวน 100 เมล็ด ชั่งน้ำหนักเป็นกรัม หาค่าเฉลี่ยและรายงานผลในรูปน้ำหนักต่อ 100 เมล็ด

3. ค่าสี (Durge *et al.*, 2013)

อุปกรณ์

เครื่องวัดค่าสี Hunter Lab รุ่น Color Quest XT

วิธีการ

1. เลือกโปรแกรม Hunter Lab ระบบ CIE วัดค่าสีในรูป L*, a* และ b* (Illuminate = D65, Observe = 10⁰)

2. ปรับมาตรฐานด้วยแผ่นสีค่ามาตรฐานและสีขาวมาตรฐาน

3. นำเม็ดสีขาวใส่ในคิวเวตประมาณ 1 ใน 4 ของคิวเวต

4. นำคิวเวตไปวางในตำแหน่งวัดค่าสี ค่าที่วัดได้เป็น L*, a* และ b*

L* บ่งบอกถึงค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 (สีดำ) ถึง 100 (สีขาว)

a* บ่งบอกถึงสีแดงและสีเขียว (a* เป็นบวกบ่งบอกความเป็นสีแดงและ a* เป็นลบ บ่งบอกความเป็นสีเขียว)

b* บ่งบอกถึงสีเหลืองและสีน้ำเงิน (b* เป็นบวกบ่งบอกความเป็นสีเหลืองและ b* บ่งบอกความเป็นสีน้ำเงิน)

5. คำนวณค่า Chroma และ Hue (Francis, 1980) จากสูตร

$$\text{Chroma} = [(a^2 + b^2)]^{1/2}$$

$$\text{Hue} = \arctan (b/a)$$

4. เนื้อสัมผัส (Toe *et al.*, 2000)

อุปกรณ์

1. เครื่องวัดเนื้อสัมผัส

วิธีการ

1. นำเมล็ดข้าวที่ผ่านการหุงสุกจำนวน 10 เมล็ดวางลงบนเพลท โดยจัดเรียงเมล็ดในแนวนอนจำนวน 5 แถว แถวละ 2 เมล็ด (แสดงในภาคผนวกภาพที่ 3)

2. เลือกโปรแกรม Texture expert English ในการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของข้าวกล้องหุงสุก โดยใช้หัววัดแบบ Cylinder probe P35 ใช้แรงกดสำหรับการวัดค่าความแข็ง (Hardness) ด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อวินาที หลังจากนั้นเป็นการวัดค่าความเหนียวติดกัน (Adhesiveness) โดยหัววัดจะถูกดึงขึ้นจากตัวอย่างด้วยความเร็วสุดท้าย 10 มิลลิเมตรต่อวินาที

ภาคผนวก ง. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

1. ปริมาณความชื้น (A.O.A.C., 2000)

อุปกรณ์

1. ภาชนะอลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น (Moisture can) พร้อมฝาปิด
2. ตู้อบลมร้อน
3. โถดูดความชื้นที่มีสารดูดความชื้น
4. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง

วิธีการ

1. อบภาชนะอลูมิเนียมพร้อมฝาปิดในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำออกจากตู้อบไฟฟ้าใส่ลงในโถดูดความชื้น หลังจากนั้นชั่งน้ำหนัก
2. ทำซ้ำตามวิธีการในข้อ 1 จนกระทั่งน้ำหนักทั้งสองครั้งที่ติดต่อกันมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม
3. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่แน่นอน 1-3 กรัมใส่ลงในภาชนะอลูมิเนียมเกลี่ยตัวอย่างให้กระจายสม่ำเสมอ
4. นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
5. นำออกจากตู้อบลมร้อนใส่ลงในโถดูดความชื้นทิ้งไว้ให้เย็น และชั่งน้ำหนัก
6. อบซ้ำครั้งละประมาณ 30 นาทีจนกระทั่งน้ำหนักทั้งสองครั้งที่ติดต่อกันมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม
7. กำหนดหาปริมาณความชื้น จากสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ(กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)}} \times 100$$

2. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (A.O.A.C., 2000)

อุปกรณ์

1. เครื่องย่อยโปรตีน
2. เครื่องคักจับไอกรด
3. เครื่องกลั่นโปรตีน
4. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. หลอดย่อยโปรตีน (Kjeldahl flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
6. ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และ 1 ลิตร

7. ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
8. ปีเปตขนาด 5 และ 10 มิลลิลิตร
9. บิวเรตขนาด 25 และ 50 มิลลิลิตร

วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่างอาหารบนกระดาษกรองที่ปราศจากสารไนโตรเจนให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.5-1 กรัมใส่ในหลอดย่อยโปรตีน
2. เติมสารเร่งปฏิกิริยา 40 กรัม และเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 120 มิลลิลิตร
3. นำไปย่อยด้วยชุดเครื่องย่อยโปรตีน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส กระทั่งสารละลายในหลอดย่อยโปรตีนใส
4. ทิ้งไว้ให้เย็น
5. นำมาถ่ายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และใช้น้ำกลั่นล้างหลอดย่อยให้หมดสารละลายตัวอย่าง ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร
6. จัดอุปกรณ์กลั่นวิเคราะห์โปรตีน เปิดสวิตซ์ให้ความร้อน และเปิดน้ำหล่อเย็นเครื่องควบแน่น
7. เติมกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 4 ปริมาณ 30 มิลลิลิตรลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 125 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร และอินดิเคเตอร์รวมสำหรับรองรับของเหลวที่กลั่นได้โดยให้ส่วนปลายของอุปกรณ์ควบแน่นจุ่มลงในสารละลายกรด
8. ดูดสารละลายตัวอย่างปริมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในช่องใส่ตัวอย่าง เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 35 ปริมาตร 120 มิลลิลิตร
9. กลั่นประมาณ 10 นาที ล้างปลายอุปกรณ์ควบแน่นด้วยน้ำกลั่นลงในขวดรองรับ
10. ไตรเททสารละลายที่ได้ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.02 นอร์มัล จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีม่วง
11. คำนวณหาปริมาณโปรตีนจากสูตร

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

เมื่อ A คือ ปริมาตรกรดที่ใช้ไตรเททกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B คือ ปริมาตรกรดที่ใช้ไตรเททกับแบลนค์ (มิลลิลิตร)

N คือ ความเข้มข้นของกรด (นอร์มัล)

F คือ แฟกเตอร์ (ข้าวเจ้าและผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 5.95) (FAO, 1986)

W คือ น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

3. ปริมาณไขมัน (A.O.A.C., 2000)

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน ประกอบด้วย ขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร ซอกเลต (Soxhlet) อุปกรณ์ควบแน่น และเตาให้ความร้อน
2. หลอดใส่ตัวอย่าง
3. กระดาษกรองเบอร์ 1
4. ตู้อบไฟฟ้า
5. เครื่องชั่งไฟฟ้า
6. โถดูดความชื้น
7. เครื่องระเหยแบบสุญญากาศ

วิธีการ

1. ออบขวดก้นกลมในตู้อบไฟฟ้า ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก
2. ทำซ้ำข้อ 1 จนผลต่างของน้ำหนักขวดก้นกลมที่ชั่ง 2 ครั้ง ติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม
3. ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนักประมาณ 3-5 กรัม ห่อให้มีดซิดใส่ลงในหลอดใส่ตัวอย่าง แล้วใส่ลงในซอกเลต
4. เติมปิโตรเลียมอีเทอร์ลงในขวดก้นกลมที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนปริมาตร 200 มิลลิลิตร วางขวดก้นกลมบนเตา
5. ประกอบอุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน พร้อมทั้งเปิดน้ำหล่ออุปกรณ์ควบแน่นและเปิดสวิทซ์เตาให้ความร้อน
6. ปรับความร้อนให้หยดของสารละลายกลั่นตัวจากอุปกรณ์ควบแน่นด้วยอัตรา 150 หยดต่อนาที ใช้เวลาในการสกัดไขมันนาน 14 ชั่วโมง
7. นำหลอดใส่ตัวอย่างออกจากซอกเลต ทิ้งให้ตัวทำละลายไหลออกจากซอกเลตลงในขวดก้นกลมจนหมด
8. นำขวดก้นกลมไประเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยแบบสุญญากาศ
9. นำขวดก้นกลมมาอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จนแห้ง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก
10. ทำซ้ำข้อ 9 จนผลต่างของน้ำหนักขวดก้นกลมที่ชั่ง 2 ครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม
11. คำนวณ

$$\text{ปริมาณไขมัน (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักไขมันหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

4. ปริมาณเก่า (A.O.A.C., 2000)

อุปกรณ์

1. เตาเผา
2. ถ้วยกระเบื้องเคลือบ
3. โถดูดความชื้นที่มีสารดูดความชื้น
4. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง

วิธีการ

1. เตาถ้วยกระเบื้องเคลือบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ข้ามคืน ใส่ในโถดูดความชื้นทิ้งไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 3 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องเคลือบที่ทราบน้ำหนักแน่นอนนำไปเผาในตู้ควันจนกระทั่งหมดควัน
3. นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลาข้ามคืน จนกระทั่งถ้ามีลักษณะเป็นสีขาว

4. ใส่ในโถดูดความชื้นทิ้งไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
5. คำนวณปริมาณเก่า จากสูตร

$$\text{ปริมาณเก่า (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักเก่า}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

5. ปริมาณเยื่อใย (โดยใช้เครื่อง ANKOM²⁰⁰)

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์หาปริมาณเยื่อใย (ANKOM²⁰⁰) ประกอบด้วย เครื่องย่อย ชั้นสำหรับใส่ตัวอย่าง (Bag suspender)
2. ถังกรองสำหรับใส่ตัวอย่าง
3. เครื่องชั่งไฟฟ้า
4. เครื่องปิดผนึกถุง
5. ตู้อบลมร้อน
6. เตาเผา
7. ถ้วยกระเบื้องเคลือบ
8. โถดูดความชื้น
9. บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
10. กระดาษลิตมัส

สารเคมี

1. กรดซัลฟูริก เข้มข้นร้อยละ 1.25 (น้ำหนักต่อปริมาตร)
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1.25 (น้ำหนักต่อปริมาตร)
3. ปีโตรเลียมอีเทอร์

วิธีการ

1. ชั่งน้ำหนักถุงกรองสำหรับใส่ตัวอย่าง
2. นำถุงกรองสำหรับใส่ตัวอย่างบรรจุตัวอย่างประมาณ 0.95-1 กรัม
3. ปิดผนึกถุงกรองสำหรับใส่ตัวอย่างให้สนิท โดยให้รอยปิดผนึกห่างจากขอบด้านบนของถุงกรองสำหรับใส่ตัวอย่างประมาณ 4 มิลลิเมตร
4. ชั่งน้ำหนักถุงกรองที่นำมาทำแบลงค์ (ไม่ต้องใส่ตัวอย่าง)
5. สกัดไขมันออกจากตัวอย่าง โดยนำถุงกรองที่บรรจุตัวอย่างเรียบร้อยแล้วใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมปีโตรเลียมอีเทอร์จนท่วมตัวอย่าง (ใส่ได้ไม่เกิน 8 ถุงต่อบีกเกอร์) แช่ไว้นาน 10 นาทีแล้วนำออกมาวางให้แห้งในบีกเกอร์เปล่า
6. นำถุงกรองที่บรรจุตัวอย่างเรียบร้อยแล้วใส่ในชั้นสำหรับใส่ตัวอย่าง โดยชั้นสำหรับใส่ตัวอย่าง ประกอบด้วยชั้น 9 ชั้น แต่ละชั้นสามารถใส่ถุงกรองได้ 3 ถุง สามารถใส่ตัวอย่างได้ทั้งหมด 8 ชั้น ส่วนชั้นที่ 9 ห้ามใส่ถุงกรองแต่จะใส่แท่งเหล็ก เพื่อกดทับตัวอย่างให้จมอยู่ใต้สารละลาย
7. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 1.25 ลงในช่องใส่ตัวอย่างจนท่วมตัวอย่างทั้งหมด
8. กดปุ่ม Agitate และ Heat แกนกลางของชั้นใส่ตัวอย่างจะมีการเคลื่อนที่ จากนั้นปิดฝาช่องใส่ตัวอย่าง รอให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 100 องศาเซลเซียส แล้วจับเวลาในการสกัดนาน 40 นาที
9. เมื่อครบกำหนดเวลาสกัด กดปุ่ม Heat และ Agitate เปิดวาล์วปล่อยสารละลายทิ้งจนหมดแล้วปิดวาล์ว
10. เปิดช่องใส่ตัวอย่าง เติมน้ำร้อนให้ท่วมชั้นใส่ตัวอย่าง กดปุ่ม Agitate รอประมาณ 5 นาที จากนั้นเปิดวาล์วปล่อยน้ำทิ้ง ทำเช่นนี้จนหมดความเป็นกรด (ทดสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส)
11. เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1.25 ลงในช่องใส่ตัวอย่างจนท่วมตัวอย่างทั้งหมด
12. กดปุ่ม Agitate และ Heat แกนกลางของชั้นใส่ตัวอย่างจะมีการเคลื่อนที่ จากนั้นปิดฝาช่องใส่ตัวอย่าง รอให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 100 องศาเซลเซียส แล้วจับเวลาในการสกัดนาน 40 นาที
13. เมื่อครบกำหนดเวลาสกัด กดปุ่ม Heat และ Agitate เปิดวาล์วปล่อยสารละลายทิ้งจนหมดแล้วปิดวาล์ว

14. เปิดช่องใส่ตัวอย่าง เดิมน้ำร้อนให้ท่วมชั้นใส่ตัวอย่าง กดปุ่ม Agitate รอประมาณ 5 นาที จากนั้นเปิดวาล์วปล่อยน้ำทิ้ง ทำเช่นนี้จนหมดความเป็นด่าง (ทดสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส)

15. นำชั้นใส่ตัวอย่างออกจากเครื่องหาปริมาณเชื้อย

16. นำถุงกรองทั้งหมดใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เดิมอะซิโตนจนท่วมตัวอย่าง (ใส่ได้ไม่เกิน 8 ถุงต่อบีกเกอร์) แช่ไว้นาน 5 นาทีแล้วนำออกมาวางให้แห้งในบีกเกอร์เปล่า

17. นำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น

18. นำไปอบซ้ำครั้งละ 30 นาที ทำซ้ำข้อ 17 จนผลต่างของน้ำหนักที่ชั่ง 2 ครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม

19. นำตัวอย่างใส่ลงในถ้วยกระเบื้องเคลือบที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว เเปที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ปิดสวิทซ์เตาเผาเพื่อให้อุณหภูมิเตาเผาตกลงเหลือ 200 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นในโถดูด ความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก

20. นำไปเผาซ้ำครั้งละ 30 นาที ทำซ้ำข้อ 19 จนผลต่างของน้ำหนักที่ชั่ง 2 ครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม

21. คำนวณปริมาณเชื้อย จากสูตร

$$\text{ปริมาณเชื้อย (ร้อยละ)} = \frac{[(W_4 - W_3) - (W_1 - C_1)]}{W_2} \times 100$$

เมื่อ	W_1	คือ	น้ำหนักถุงกรอง (กรัม)
	W_2	คือ	น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)
	W_3	คือ	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)
	W_4	คือ	น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)
	C_1	คือ	ปริมาณเถ้าของแบลงค์ (กรัม)

6. ปริมาณอะไมโลส (Juliano *et al.*, 1985)

อุปกรณ์

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

สารเคมี

1. เอทานอลร้อยละ 95
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มอล
3. กรดอะซิติก 1 นอร์มอล

4. สารละลายไอโอดีน (ชั่งไอโอดีน 0.2 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2.0 กรัม ละลายในน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร)

5. อะไมโลสบริสุทธิ์

วิธีการ

1. ชั่งแป้ง 0.1000 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 จำนวน 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ เพื่อให้แป้งกระจายตัว

2. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์มอล จำนวน 9 มิลลิลิตร

3. นำไปต้มในน้ำเดือดนาน 10 นาที ทิ้งให้เย็น ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ค้างคืน

4. ใช้ปิเปตดูดสารละลายแป้งที่เตรียมไว้มา 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร กรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มอล จำนวน 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน จำนวน 2 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที

5. นำตัวอย่างไปวัดค่าความเข้มสีของสารละลายโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร อ่านค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) เปรียบเทียบกับแบลนก์ (Blank)

6. นำอะไมโลสบริสุทธิ์ 0.0400 กรัม เตรียมให้เป็นสารละลายแป้งเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ไว้ค้างคืน เขย่าให้เข้ากัน ดูดสารละลายแป้งมาตรฐานมา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่นประมาณ 50 มิลลิลิตร กรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มอล จำนวน 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ และสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที อ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร เขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของอะไมโลสกับค่าการดูดกลืนแสง

7. คำนวณปริมาณอะไมโลสจากการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับกราฟมาตรฐาน แล้วแสดงค่าเป็นร้อยละของน้ำหนัก

7. ค่าความเป็นกรด-ด่างโดยใช้เครื่องวัดพีเอชมิเตอร์ (A.O.A.C., 2000)

อุปกรณ์

เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

วิธีการ

นำน้ำสกัดจากแป้งข้าว (อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ เท่ากับ 1 ต่อ 2 มาวัดค่าพีเอชด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 องศาเซลเซียส)

8. ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Singleton *et al.*, 1999)

อุปกรณ์

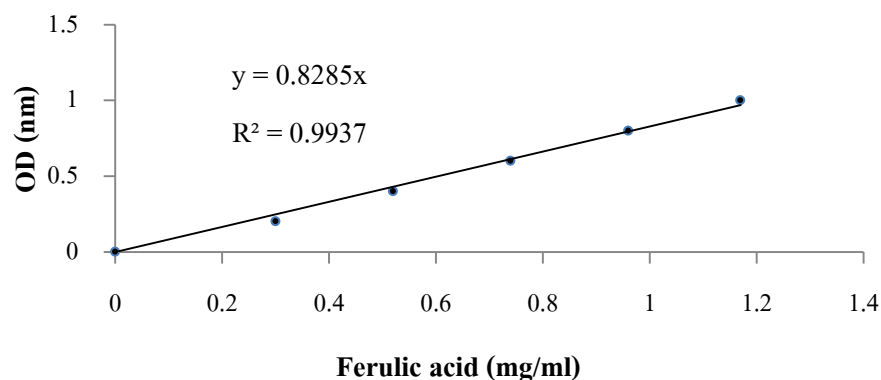
เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

สารเคมี

1. สารละลาย Folin-Ciocalteu ความเข้มข้นร้อยละ 10
2. สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 75 กรัมต่อลิตร
3. สารละลายมาตรฐานกรดเฟอร์ูลิกความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

วิธีการ

1. เติมสารละลาย Folin-Ciocalteu ความเข้มข้นร้อยละ 10 ปริมาตร 600 ไมโครลิตร ลงในสารสกัดตัวอย่างปริมาตร 120 ไมโครลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 นาที
2. เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 75 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 760 ไมโครลิตร ลงในสารผสมในข้อ 1 ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
3. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 760 นาโนเมตรด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
4. คำนวณปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด โดยการเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดเฟอร์ูลิก และรายงานค่าในรูปของมิลลิกรัมของกรดเฟอร์ูลิกต่อ 100 กรัมตัวอย่าง (น้ำหนักแห้ง)



Appendix Figure 14 Standard curve of ferulic acid

9. ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (Brand-Williams *et al.*, 1995)

อุปกรณ์

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

สารเคมี

สารละลาย DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) (DPPH จำนวน 4.73 มิลลิกรัม ละลายในเอทานอลปริมาตร 100 มิลลิลิตร)

วิธีการ

1. นำสารสกัดตัวอย่างปริมาตร 300 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลาย DPPH ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 40 นาทีในที่มืด
2. นำสารละลาย DPPH ในเอทานอล (A_{control}) และสารผสมระหว่างสารสกัดตัวอย่างกับ DPPH (A_{sample}) ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตรด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
3. คำนวณปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ จากสูตร

$$\text{กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ (ร้อยละ)} = \frac{A_{\text{control}} - A_{\text{sample}} \times 100}{A_{\text{control}}}$$

10. ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีของ Abdel-Aal and Hucl (Abdel-Aal and Hucl, 1999)

อุปกรณ์

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

สารเคมี

1. นำตัวอย่างสารสกัดแอนโทไซยานิน มาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 535 นาโนเมตร

2. คำนวณปริมาณแอนโทไซยานิน จากสูตร

$$\text{ปริมาณแอนโทไซยานิน (มิลลิกรัมต่อกรัม)} = \frac{A \times V \times MW \times 1,000}{\epsilon \times \text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}}$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัด

ϵ คือ molar absorptivity (ไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ = 29,600 ลิตรต่อโมล

ต่อเซนติเมตร)

V คือ ปริมาตรทั้งหมดของสารสกัด

MW คือ มวลโมเลกุลของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ = 449.2

11. ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีฟิเออริฟเฟอเรนเชียล (Sutharut and Sudarat, 2012)

อุปกรณ์

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

สารเคมี

1. สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์บัฟเฟอร์ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 1.0
2. สารละลายโซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5

วิธีการ

1. นำตัวอย่างสารสกัดแอนโทไซยานินปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด ขวดแรกปรับปริมาตรด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์บัฟเฟอร์ ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 1.0 และขวดที่สองปรับปริมาตรด้วยโซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 เขย่าให้เข้ากันวางทิ้งไว้ 15 นาทีในที่มืด

2. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 และ 700 นาโนเมตร (การวัดค่าการดูดกลืนแสงจะทำภายใน 15 นาที หลังการเติมบัฟเฟอร์) โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นแบลคค์

3. คำนวณปริมาณแอนโทไซยานิน จากสูตร

$$\text{ปริมาณแอนโทไซยานิน (มิลลิกรัมต่อกรัม)} = \frac{(A \times MW \times DF \times 1,000)}{\epsilon \times l \times \text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}}$$

โดยที่ A คือ ค่าการดูดกลืนแสงรวมคำนวณจากสูตร

$$A = (A_{510} - A_{700})_{\text{pH } 1.0} - (A_{510} - A_{700})_{\text{pH } 4.5}$$

MW คือ มวลโมเลกุลของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ เท่ากับ 449.2

DF คือ Dilution factor

ϵ คือ โมลาร์แอบซอร์บติวิตี (molar absorptivity) ของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ เท่ากับ 26,900 (ลิตรต่อโมลต่อเซนติเมตร)

l คือ ความกว้างของ cuvette (เท่ากับ 1 เซนติเมตร)

12. ชนิดและปริมาณกรดฟีนอลิกด้วยวิธี HPLC

อุปกรณ์

1. เครื่องบดของแห้ง
2. ตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมโครเมตร
3. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง
4. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
5. เครื่องหมุนเหวี่ยง
6. เครื่องระเหยสุญญากาศ
7. อ่างส่งคลื่นความถี่สูง (Sonicate bath)
8. คอลัมน์ชนิด reverse phase (Hypersil ODS ขนาด 4.6×250 นาโนเมตร, 4 ไมโครเมตร)

9. เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) (Agilent 1200 series, Germany)

สารเคมี

1. เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 80
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์
3. กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 6 โมลาร์
4. เอทิลอะซิเตท
5. สารละลายมาตรฐานของกรดฟีนอลิกประกอบด้วย protocatechuic acid, 4-hydroxybenzoic acid, vanillic acid, caffeic acid, *p*-coumaric acid, ferulic acid, quercetin dehydrate, gallic acid, syringic acid, catechin, sinapic acid, kaempferol และ *p*-cresol
6. กรดไตรฟลูออโรอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 0.05 ในน้ำ
7. กรดไตรฟลูออโรอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 0.05 ในอะซิโตไนไตรล์

วิธีการสกัดฟีนอลิกอิสระ (Free phenolic) และฟีนอลิกยึดเหนี่ยว (Bound phenolic) (Krygier *et al.*, 1982; Adom *et al.*, 2003; Mattila *et al.*, 2005; Sompong *et al.*, 2011)

ข้าวกล้องงอกแห้งเต็มเมล็ดถูกนำไปอบเพื่อให้ละเอียดด้วยเครื่องบดของแห้ง แล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมโครเมตร จากนั้นนำมาสกัดด้วยเอทานอลร้อยละ 80 ในอัตราส่วนข้าว: ตัวทำละลายเท่ากับ 1: 4 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใช้ตัวอย่างข้าวจำนวน 5 กรัม เติมเอทานอลร้อยละ 80 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร สกัดนาน 30 นาที โดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที นาน 10 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นำส่วนของแข็งมาสกัดซ้ำอีกครั้ง นำส่วนใสที่ได้รวมกัน นำไประเหยด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จากนั้นปรับปริมาตรสุดท้ายให้ได้เท่ากับ 4 มิลลิลิตร ด้วยเอทานอลร้อยละ 80 เก็บรักษาที่ -20 องศาเซลเซียส ส่วนของแข็งที่เหลือจากการหมุนเหวี่ยงจะถูกนำมาใช้ในการสกัดฟีนอลิกยึดเหนี่ยว โดยส่วนของแข็งจะถูกผสมเข้ากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ปริมาตร 60 มิลลิลิตร วางไว้ในที่มืดโดยมีการเขย่าตลอดเวลานาน 16 ชั่วโมง ปรับความเป็นกรด-ด่างของสารผสมเท่ากับ 3 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 6 โมลาร์ จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที นาน 10 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แยกส่วนของเหลวและของแข็งจากการหมุนเหวี่ยง สกัดส่วนของเหลวด้วยกรวยแยก โดยการเติมเอทิลอะซิเตทปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าและไขเพื่อเก็บส่วนของเอทิลอะซิเตท ส่วนของเหลวที่เหลือในกรวยแยกจะทำการสกัดซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เก็บส่วนเอทิลอะซิเตททั้ง 3 ส่วนรวมกัน และส่วนของแข็งที่ได้จากการหมุนเหวี่ยงจะเติมเอทิลอะซิเตท

ปริมาตร 15 มิลลิลิตร สกัด นาน 30 นาที ด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วจึงนำไปหมนเหวี่ยงที่ 2,500 รอบต่อนาที นาน 10 นาที สกัดซ้ำจำนวน 3 ครั้ง นำส่วนของเอทิลอะซิเตทที่ได้จากการหมนเหวี่ยงรวมกัน และนำไปรวมกับส่วนของเอทิลอะซิเตทที่แยกได้จากกรวยแยก และนำไปประเหยด้วยเครื่องระเหยสูญญากาศที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จนแห้ง ละลายตัวอย่างที่สกัดได้ด้วยเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 80 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วย HPLC

การเตรียมสารละลายมาตรฐานกรดฟีนอลิก

สารละลายมาตรฐานของกรดฟีนอลิกที่ใช้ประกอบด้วย protocatechuic acid, 4-hydroxybenzoic acid, vanillic acid, caffeic acid, *p*-coumaric acid, ferulic acid, quercetin dehydrate, gallic acid, syringic acid, catechin, sinapic acid, kaempferol และ *p*-cresol เตรียมสารละลายกรดฟีนอลิกแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 4,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (Stock solution) โดยการชั่งกรดฟีนอลิกแต่ละชนิดจำนวน 2 มิลลิกรัม ละลายในเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 80 ปริมาตรเป็น 500 ไมโครลิตร ปิเปตสารละลายกรดฟีนอลิกแต่ละชนิดจำนวน 10 ไมโครลิตร ปริมาตรด้วยเอทานอลร้อยละ 80 ให้ได้ปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 500 ไมโครลิตร จะได้ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแต่ละชนิดเท่ากับ 80 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร เพื่อใช้ในการหา Retention time (RT) ของกรดฟีนอลิกแต่ละชนิด

เตรียมสารละลายมาตรฐานผสมของกรดฟีนอลิก (Mixed standard) ที่ความเข้มข้น 80, 100, 120, 140 และ 160 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จากสารละลายมาตรฐานของกรดฟีนอลิกความเข้มข้น 4,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (ตารางภาคผนวกที่ 4) ปริมาตรด้วยเอทานอลร้อยละ 80 ให้ได้ปริมาตรสุดท้ายเป็น 500 ไมโครลิตร เพื่อใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐานของกรดฟีนอลิก

Appendix Table 4 Preparation of phenolic acid mixed standard

Concentration of mixed standard ($\mu\text{g/ml}$)	Volume of each phenolic acid from stock solution (μl)	Total volume (μl)	Volume of 80% ethanol (μl)
80	10	130	370
100	12.5	162.5	337.5
120	15	195	305
140	17.5	227.5	272.5
160	20	260	240

วิเคราะห์ชนิดและปริมาณของกรดฟีนอลิกด้วย HPLC (ดัดแปลงจาก Sompong *et al.*, 2011)

การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณฟีนอลิกด้วยเครื่อง HPLC ใช้คอลัมน์ชนิด Reverse phase C18 Hypersil ODS (ขนาด 4.0×250 นาโนเมตร, 4 ไมโครเมตร) โดยใช้ กรดไตรฟลูออโรอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 0.05 ในน้ำ HPLC grade (ตัวทำละลาย A) และกรดไตรฟลูออโรอะซิติกร้อยละ 0.05 ในอะซิโตไนไตรล์ (ตัวทำละลาย B) โดยตัวทำละลายทั้งหมดที่ใช้จะต้องมีการกำจัดฟองอากาศ (Degas) ด้วยอ่างส่งคลื่นความถี่สูง (Sonicate bath) เป็นเวลา 30 นาที การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณฟีนอลิกด้วยเครื่อง HPLC เริ่มต้นโดยใช้ตัวทำละลาย B ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 จากนั้นในนาทีที่ 3 เพิ่มความเข้มข้นตัวทำละลาย B เป็นร้อยละ 7 เมื่อถึงนาทีที่ 5 เพิ่มความเข้มข้นเป็นร้อยละ 10 ในนาทีที่ 10 เพิ่มเป็นร้อยละ 12 นาทีที่ 12 เพิ่มเป็นร้อยละ 15 ที่เวลา 15 นาทีรักษาระดับความเข้มข้นของตัวทำละลาย B เท่ากับร้อยละ 12 ในนาทีที่ 20 เพิ่มความเข้มข้นของตัวทำละลาย B จากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 18 ต่อมานาทีที่ 25 ปรับความเข้มข้นของตัวทำละลาย B เพิ่มเป็นร้อยละ 20 นาที นาทีที่ 30 ปรับเป็นร้อยละ 40 นาที นาทีที่ 36 ปรับเป็นร้อยละ 60 นาที นาทีที่ 38 ปรับเป็นร้อยละ 80 จากนั้นนาทีที่ 45 รักษาระดับความเข้มข้นที่ร้อยละ 80 และนาทีที่ 47 ปรับลดความเข้มข้นเป็นร้อยละ 10 อัตราการไหลของสารเท่ากับ 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที ฉีดสารตัวอย่างเข้าสู่ระบบครั้งละ 40 ไมโครลิตร ใช้ตัวตรวจวัดชนิด Diode array detector (DAD) ที่ความยาวคลื่น 260, 270 และ 280 นาโนเมตร การจำแนกชนิดของกรดฟีนอลิกจะใช้การเปรียบเทียบ RT ของตัวอย่างกับสารละลายมาตรฐานกรดฟีนอลิก คำนวณหาปริมาณของสารฟีนอลิกแต่ละชนิดจากพื้นที่ใต้กราฟเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน

ตัวอย่างการคำนวณ

Peak ที่ 1: protocathuic acid

จาก Peak area ของ protocathuic acid ในตัวอย่างปริมาณ 2 มิลลิลิตร เท่ากับ 74,034.00 mAu ฉะนั้นในตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร จึงมี peak area เท่ากับ $\frac{74,034}{2} = 37,017$ mAu

2

นำค่า peak area ที่ได้แทนค่า y ในสมการเส้นตรงของสารมาตรฐาน protocathuic acid (Figure 17b)

$$\text{ดังนั้น } y = 165.33x - 1941.5$$

$$x = (37,017 + 1941.5) / 165.33$$

$$= 235.64 \mu\text{g/ml}$$

ในตัวอย่างข้าวสังข์หยดจำนวน 4.45 กรัม น้ำหนักแห้ง มี protocathuic acid เท่ากับ 235.64 $\mu\text{g/ml}$ ดังนั้น ในข้าวสังข์หยดจำนวน 1 กรัม น้ำหนักแห้ง จึงมี protocathuic acid เท่ากับ 36.76 mg/100g

ภาคผนวก จ. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์

1. สมบัติการเกิดเจลลิตินในเซชัน (Teo *et al.*, 2000)

อุปกรณ์

1. เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC)
2. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง
3. ถ้วยอะลูมิเนียม

วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่าง 2 มิลลิกรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ถ้วยอะลูมิเนียมและเติมน้ำกลั่น 6 มิลลิกรัม ให้น้ำหนักที่แน่นอนในถ้วยอะลูมิเนียม
2. ปิดผนึกถ้วยอะลูมิเนียมและเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 12 ชั่วโมง
3. วิเคราะห์โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 30 ถึง 150 องศาเซลเซียส โดยอัตราให้ความร้อนที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
4. อ่านช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันและค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินในเซชัน จากเทอร์โมแกรม (T_o = Onset temperature, T_p = Peak temperature, T_c = Conclusion temperature และ ΔH = Enthalpy)

5. กำหนดระดับการเกิดเจลลิตินในเซชัน จากสูตร

$$\text{ระดับการเกิดเจลลิตินในเซชัน (ร้อยละ)} = \frac{(\Delta H_{\text{เริ่มต้น}} - \Delta H_{\text{สุดท้าย}}) \times 100}{\Delta H_{\text{เริ่มต้น}}}$$

2. รูปแบบโครงสร้างและปริมาณผลึก (Kim *et al.*, 2001)

อุปกรณ์

- เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

วิธีการ

1. นำตัวอย่างข้าวที่ผ่านการบดและร้อนด้วยตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาวางในภาชนะใส่ตัวอย่าง
2. ตั้งค่าเครื่อง XRD โดยใช้ความต่างศักย์เท่ากับ 40 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 30 มิลลิแอมแปร์ มุมที่ใช้วิเคราะห์ (2θ) ระหว่าง 4-40 องศา สแกนด้วยอัตรา 0.05 องศาต่อนาที โดยใช้ทองแดงเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์

3. วัดพื้นที่ใต้กราฟของส่วนที่เป็นผลึกและพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด

4. นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาปริมาณผลึกจากสูตร

$$\text{ปริมาณผลึก (ร้อยละ)} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟของส่วนที่เป็นผลึก} \times 100}{\text{พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด}}$$

3. พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืด (Zhou *et al.*, 2007)

อุปกรณ์

เครื่อง Rapid visco analyzer (RVA)

วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่าง 3 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ผสมกับน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร
2. ของผสมจะถูกกวนด้วยความเร็ว 960 รอบต่อนาที เวลา 10 วินาที และเปลี่ยนเป็น 160 รอบต่อนาที ส่วนผสมถูกเก็บที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 12 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงอุณหภูมิไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส นาน 2.5 นาที และลดอุณหภูมิลงถึง 50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 12 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงอุณหภูมิไว้ 5 นาที ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity; PV) อุณหภูมิที่เกิดความหนืดสูงสุด (Ptemp) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity; FV) และ ค่าการคืนตัว (Setback viscosity; SBV)

4. ปริมาณ Starchy core (Juliano, 1985)

อุปกรณ์

1. กระจกนาฬิกา
2. ช้อน

วิธีการ

1. สุ่มข้าวสุก 10 เมล็ด วางบนแผ่นกระจกนาฬิกา จากนั้นใช้ช้อนกดเมล็ดข้าว สังเกตลักษณะข้าวขุ่นในส่วนกลางของเมล็ด
2. คำนวณค่าในรูปของค่าเฉลี่ย

$$\text{ปริมาณ Starchy core} = \frac{\text{จำนวนเมล็ดข้าวที่มีส่วนข้าวขุ่น (เมล็ด)} \times 100}{\text{จำนวนเมล็ดข้าวทั้งหมด (เมล็ด)}}$$

5. สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Teo *et al.*, 2000)

อุปกรณ์

1. เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC)

2. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง
3. ถ้วยอะลูมิเนียม
4. ตู้อบลมร้อน
5. เครื่องบดของแห้ง

วิธีการ

1. นำตัวอย่างข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกแช่อะซิโตน เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
2. อบที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำตัวอย่างไปบดและร่อนผ่านตะแกรง
4. ชั่งตัวอย่าง 2 มิลลิกรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ถ้วยอะลูมิเนียมและเติมน้ำกลั่น 6 มิลลิกรัม ใ้ได้น้ำหนักที่แน่นอนในถ้วยอะลูมิเนียม
5. ปิดฝีกถ้วยอะลูมิเนียมและเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 12 ชั่วโมง
6. วิเคราะห์โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 30 ถึง 150 องศาเซลเซียส โดยอัตราให้ความร้อนที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
7. อ่านช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันและค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน จากเทอร์โมแกรม (T_o = Onset temperature, T_p = Peak temperature, T_c = Conclusion temperature และ ΔH = Enthalpy)

6. โครงสร้างทางจุลภาค

อุปกรณ์

เครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

วิธีการ

1. แช่เมล็ดข้าวหุงสุกในสารละลายเอทานอลร้อยละ 30, 50, 70, 90 และ Absolute ethanol ตามลำดับ แต่ละความเข้มข้นแช่นาน 10 นาที
2. นำไปทำแห้งด้วยวิธี Critical-point-dried โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์
3. หักเมล็ดข้าวตามขวางขนาด 2 มิลลิเมตร แล้วฉาบผิวหน้าชั้นตัวอย่างด้วยทองคำ
4. นำเมล็ดข้าวที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างแล้วมาส่องผ่านกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 50, 100, 2000 และ 5000 เท่า โดยกำหนดค่า accelerating voltage 20 kv

ภาคผนวก ฉ. การวิเคราะห์สมบัติการหุงสุก

1. ความสามารถในการดูดซับน้ำของข้าวสุก (Zhou *et al.*, 2007)

อุปกรณ์

เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง

วิธีการ

1. สุ่มตัวอย่างข้าวกล้องงอกสังข์หยด และข้าวกล้องงอกสังข์หยดหุงสุกชั่งน้ำหนัก
2. กำหนดความสามารถในการดูดซับน้ำของข้าวสุกจากสูตร

$$\text{ความสามารถในการดูดซับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักของเมล็ดข้าวสุก (กรัม)}}{\text{น้ำหนักของเมล็ดข้าวกล้อง (กรัม)}}$$

2. อัตราการยืดตัวของข้าวสุก (Singh *et al.*, 2005)

อุปกรณ์

เวอร์เนีย

วิธีการ

1. สุ่มตัวอย่างข้าวกล้องงอกสังข์หยดหุงสุก ตัวอย่างละ 10 เมล็ด เพื่อวัดความยาวเมล็ด
2. กำหนดหาอัตราการยืดตัวจากสูตร

$$\text{อัตราการยืดตัวของข้าวสุก} = \frac{\text{ความยาวเฉลี่ยของเมล็ดข้าวสุก (มิลลิเมตร)}}{\text{ความยาวเฉลี่ยของเมล็ดข้าวกล้อง (มิลลิเมตร)}}$$

3. สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Teo *et al.*, 2000)

อุปกรณ์

1. เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC)
2. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง
3. ถ้วยอะลูมิเนียม
4. ตู้อบลมร้อน
5. เครื่องบดของแห้ง

วิธีการ

1. นำตัวอย่างข้าวกล้องงอกสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกแช่อะซิโตน เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
2. อบที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำตัวอย่างไปบดและร่อนผ่านตะแกรง

4. ชั่งตัวอย่าง 2 มิลลิกรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ด้วยอะลูมิเนียมและเติมน้ำกลั่น 6 มิลลิกรัม ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนในถ้วยอะลูมิเนียม
5. ปิดผนึกด้วยอะลูมิเนียมและเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 12 ชั่วโมง
6. วิเคราะห์โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 30 ถึง 150 องศาเซลเซียส โดยอัตราให้ความร้อนที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
7. อ่านช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันและค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาตินในเซชัน จากเทอร์โมแกรม (T_o = Onset temperature, T_p = Peak temperature, T_c = Conclusion temperature และ ΔH = Enthalpy)

ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์ทางจุลินทรีย์

1. ทดสอบ Sterility test (Landry *et al.*, 2001)

อาหารเลี้ยงเชื้อ

1. Chopped liver
2. Bromcresol purple dextrose broth

วิธีการ

1. บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 35 และ 55 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 14 วัน
2. นำตัวอย่างที่ผ่านการบ่มมา 1-2 กรัมใส่ในอาหารเลี้ยงเชื้อ Chopped liver และ Bromcresol purple dextrose broth นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในสภาวะมีอากาศและไม่มีอากาศ นำไปบ่มเป็นระยะเวลา 5 วัน
3. ผลการตรวจ Sterility test จะต้องไม่พบเชื้อจุลินทรีย์

ภาคผนวก ข. การทดสอบทางประสาทสัมผัส

การทดสอบความชอบของผู้บริโภคต่อข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่ต่างกันโดยใช้วิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9-point Hedonic scales กำหนดให้คะแนน 1 หมายถึงไม่ชอบมากที่สุดไปจนถึงระดับคะแนน 9 หมายถึงชอบมากที่สุด โดยกำหนดผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คน มีช่วงอายุ 20-30 ปี และเป็นผู้ที่ไม่ปฏิเสธการรับประทานข้าวกล้อง การทดสอบชิมจะใช้ตัวอย่างข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่ต่างกันทั้ง 3 วิธี โดยข้าวกล้องสังข์หยดที่ผ่านการหุงสุกด้วยหม้อนั่งมาเชื้อความดันสูงนำมาตัดถุง ให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟที่ 850 วัตต์ นาน 90 วินาที ใช้ตัวอย่างจำนวน 10 กรัม (1 ช้อนโต๊ะ) ใส่ถ้วยแก้วใสขนาด 50 มิลลิลิตร ปิดฝาด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟลอยด์ จัดเสิร์ฟให้แก่ผู้ทดสอบชิมครั้งละ 1 ตัวอย่าง โดยจะบ้วนปากด้วยน้ำเปล่าระหว่างตัวอย่างทุกครั้ง และพัก 5 นาที หลังจากนั้นจะให้ผู้ทดสอบชิมประเมินคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม

ขั้นตอนในการทดสอบทางประสาทสัมผัส

1. ตัวอย่างที่ผู้ทดสอบชิมได้รับท่านได้รับตามรหัสที่มาพิจารณาสมบัติของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุกในด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม
 2. บันทึกคะแนนความชอบลงในแบบทดสอบความชอบของข้าวกล้องสังข์หยดหุงสุก 3 .
- หลังชิมแต่ละตัวอย่างเสร็จ ให้กลืนปากด้วยน้ำที่จัดไว้ให้ก่อนชิมตัวอย่างถัดไป

แบบทดสอบความชอบข้าวกล้องงัดขี้หยดหุงสุก

ชื่อผู้ทดสอบชิม.....วันที่

คำอธิบาย : กรุณาทดสอบชิมตัวอย่างที่นำเสนอตามรหัสตัวอย่างที่ปรากฏในแบบสอบถามแล้วให้คะแนนตามความชอบที่ใกล้เคียงกับความรู้สึกของท่านมากที่สุด โดยกำหนดคะแนนดังต่อไปนี้

- 1 = ไม่ชอบมากที่สุด 2 = ไม่ชอบมาก 3 = ไม่ชอบปานกลาง
 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย 5 = ไม่สามารถระบุได้ว่าชอบหรือไม่ชอบ 6 = ชอบเล็กน้อย
 7 = ชอบปานกลาง 8 = ชอบมาก 9 = ชอบมากที่สุด

คุณลักษณะ	ตัวอย่าง			

ลักษณะปรากฏ				
สี				
รสชาติ				
เนื้อสัมผัส				
ความชอบโดยรวม				

ข้อเสนอแนะ

.....

.....

.....

.....

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาววิไลพร กลาย

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5611020026

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555

ทุนการศึกษา

ทุนอุดหนุนการวิจัยบัณฑิตศึกษา สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ทุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Klay, W. and Meenune, M. 2016. Cooking quality and anthocyanin stability as affected by cooking methods and storage time of sangyod brown rice *In*: Proceeding of 18th Food Innovation Asia Conference 2016, 16-18 June 2016. Bitec Bangna, Bangkok, Thailand. pp. 255-263.

วิไลพร กลาย และ มุกิตา มีนุ่น. 2559. ผลของสภาวะสกัดต่อปริมาณแอนโทไซยานินจากข้าวกล้องสังข์หยด. การประชุมวิชาการข้าวแห่งชาติ ครั้งที่ 4. ณ. โรงแรมเซ็นทรา ศูนย์ราชการและคอนเวนชันเซ็นเตอร์. กรุงเทพฯ. 1-3 กันยายน 2559. หน้า 388-392.