



# การจัดกลุ่มและการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักทางด้านลักษณะเหนียวนุ่ม ของข้าวโพดข้าวเหนียวด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปร

## Cluster Analysis and Principal Component Analysis of Stickiness Texture of Waxy Corns Based on Multivariate Analysis

ธีรวุฒิ วงศ์วรรตน์<sup>1,\*</sup> วรชมน มงคล<sup>2</sup> มณีรัตน์ รุจิณรงค์<sup>3</sup> และ ยิงยศ พาลูกา<sup>1,2,3</sup>

Theerawut Wongwarat<sup>1,\*</sup>, Wassamon Mongkol<sup>2</sup>, Maneerat Rujinarong<sup>3</sup> and Yingyod Paluka<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> ศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น ขอนแก่น 40000

<sup>2</sup> ศูนย์วิจัยพืชไร่ชัยนาท ชัยนาท 17150

<sup>3</sup> กองแผนงานและวิชาการ กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ 10900

<sup>1</sup> Khon Kaen Field Crops Research Center, Khon Kaen 40000

<sup>2</sup> Chai Nat Field Crops Research Center, Chai Nat 17150

<sup>3</sup> Planning and Technical Division, Department of Agriculture, Bangkok 10900

รับเรื่อง: 8 กรกฎาคม 2565 Received: 8 July 2022

ปรับแก้ไข: 25 ตุลาคม 2565 Revised: 25 October 2022

รับตีพิมพ์: 2 พฤศจิกายน 2565 Accepted: 2 November 2022

\* Corresponding author: theerawut6949@gmail.com

**ABSTRACT:** Waxy corn has unique eating characterized by its sticky texture when cooked. To classify waxy corn with varying degrees of stickiness, multivariate analysis is needed. This research aimed to apply cluster analysis and principal component analysis (PCA) methods to classify 30 waxy corn lines/varieties/hybrids based on their chemical properties, pasting properties, and isoamylase activities. The principal component analysis results revealed that the total variance captured was 68.8%, explained by two principal components (PC1 and PC2). PC1 was associated with gelatinization, while PC2 was correlated with retrogradation. K-means clustering was also used for classification. The waxy corn inbred lines PWHB01 and WTNGB003 and the waxy corn hybrids CNW1602 and CNW1627 were found to display mean values that were close to those of the commercial waxy corn hybrids. Based on cluster analysis, waxy corn lines/varieties/hybrids were categorized into two groups. The first group comprised 13 waxy corn lines/varieties/hybrids that shared similarities in the gelatinization component. The second group included 17 waxy corn lines/varieties/hybrids that were common in retrogradation components or setbacks. The flour from PWHB01, WTNGB003, CNW1602, and CNW1627 had high peak viscosity and breakdown but low setback, with the stickiness texture characters comparable to the check entries. The results obtained in this study should provide important information for further studies on the selection of waxy corn lines/varieties of good eating quality and high consumer acceptance in the future.

**Keywords:** Waxy corn, stickiness texture, principal component analysis, multivariate

## บทคัดย่อ

ข้าวโพดข้าวเหนียวมีลักษณะคุณภาพการบริโภคที่มีความจำเพาะโดยมีเนื้อสัมผัสเหนียวนุ่มใช้ในการจำแนกชนิดข้าวโพดข้าวเหนียวที่ต่างกันซึ่งจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลหลายตัวแปร (Multivariate) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดกลุ่มและวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญของพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว 30 พันธุ์/สายพันธุ์/ลูกผสม ด้วยวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปร ได้แก่ สมบัติทางเคมี สมบัติทางด้านความหนืด และการทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลส การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก พบว่าแบ่งได้เป็น 2 องค์ประกอบหลักครอบคลุมความแปรปรวนของตัวแปรทั้งหมดได้ร้อยละ 68.8 ประกอบด้วย องค์ประกอบที่ 1 เป็นองค์ประกอบของการเกิดเจลาตินในเซชัน องค์ประกอบที่ 2 เป็นองค์ประกอบของการเกิดเรโทรเกรเดชันหรือการคืนตัวของแป้ง เมื่อนำทั้งสององค์ประกอบมาจัดกลุ่มด้วย K-means clustering พบว่า ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ ได้แก่ PWHB01 และ WTNGB003 ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม ได้แก่ CNW1602 และ CNW1627 มีค่ากลางหรือค่าเฉลี่ยของหลายตัวแปรใกล้เคียงกับข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้า การจัดกลุ่มสามารถจัดได้ 2 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วย ข้าวโพดข้าวเหนียวจำนวน 13 พันธุ์/สายพันธุ์/ลูกผสม ข้าวโพดข้าวเหนียวในกลุ่มนี้มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบเกิดการเกิดเจลาตินในเซชัน กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วย ข้าวโพดข้าวเหนียวจำนวน 17 พันธุ์/สายพันธุ์/ลูกผสม ข้าวโพดข้าวเหนียวในกลุ่มนี้มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบเกิดการเรโทรเกรเดชัน พบว่า ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ PWHB01 และ WTNGB003 ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม CNW1602 และ CNW1627 มีค่าความหนืดสูงสุดและการแตกตัวของแป้งสูง แต่มีค่าการคืนตัวต่ำ เนื้อสัมผัสของฟลาวร์จะมีลักษณะเหนียวนุ่มใกล้เคียงพันธุ์เปรียบเทียบ ข้อมูลของหลายตัวแปรในงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญ ซึ่งนำมาใช้คัดเลือกข้าวโพดข้าวเหนียวให้ได้

พันธุ์ที่มีลักษณะเหนียวนุ่มและลักษณะคุณภาพการบริโภคที่ดีเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคต่อไป

**คำสำคัญ:** ข้าวโพดข้าวเหนียว, ลักษณะเหนียวนุ่ม, องค์ประกอบสำคัญ, ข้อมูลหลายตัวแปร

## บทนำ

ข้าวโพดข้าวเหนียว (*Zea mays var. ceratina*) เป็นข้าวโพดรับประทานฝักสด เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวมีความเหนียวนุ่มซึ่งเป็นคุณลักษณะพิเศษเฉพาะตัว ข้าวโพดข้าวเหนียวมีการผลิตและจำหน่ายในตลาดท้องถิ่นตลอดทั้งปี ปัจจุบันความต้องการบริโภคข้าวโพดฝักสดเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของเขตเมืองและกำลังซื้อของผู้บริโภค ลักษณะคุณภาพการบริโภคที่ดีของข้าวโพดข้าวเหนียวคือเมล็ดมีความเหนียวนุ่มและหวานเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลจากองค์ประกอบและโครงสร้างของแป้งภายในเมล็ด (Azanza, *et al.*, 1996) ในการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวให้เกิดความสำเร็จได้ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมที่มีลักษณะคุณภาพการบริโภคที่ดีเป็นที่ยอมรับของทั้งเกษตรกรและผู้บริโภคนั้น ต้องศึกษาเปรียบเทียบข้อมูลจากหลายตัวแปร การจัดกลุ่มความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมทำให้สามารถรวมพันธุ์ที่มีความใกล้ชิดกันทางพันธุกรรมให้อยู่ภายในกลุ่มเดียวกันได้ เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานความหลากหลายทางพันธุกรรมซึ่งมีความสำคัญในการนำไปใช้ประโยชน์ในขั้นตอนการปรับปรุงพันธุ์ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA) ใช้เพื่อลดมิติของตัวแปรและสร้างกลุ่มตัวแปรใหม่ที่มีความคล้ายคลึงกันเรียกกลุ่มตัวแปรใหม่นี้ว่าองค์ประกอบหลัก และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างและตัวแปรได้ (Shittu *et al.*, 2007; Vanichbuncha, 2008) งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาสมบัติทางเคมี (Chemical properties) ได้แก่ ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch) ปริมาณอะไมโลส (Amylose content) ปริมาณอะไมโล

เพคติน (Amylopectin content) สมบัติความหนืด (Viscosity properties) ได้แก่ ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) การแตกตัวของเม็ดแป้ง (Breakdown) และการคืนตัวของแป้ง (Setback) และระดับการทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลส (Isoamylase assay) มีรายงานการศึกษาว่าปริมาณแป้งทั้งหมดและปริมาณอะไมโลเพคตินมีสหสัมพันธ์กับลักษณะเหนียวนุ่มของข้าวโพดข้าวเหนียว (Simla, 2009) การเพิ่มขึ้นของอะไมโลเพคตินมีผลทำให้เนื้อสัมผัสมีความอ่อนนุ่มมากขึ้น (Simla, 2013) ปริมาณอะไมโลสมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในทางบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการแตกตัวของเม็ดแป้ง (Phapumma *et al.*, 2020) ปริมาณอะไมโลส ความยาว และจำนวนการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านมีความสำคัญต่อผลของสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้ง (Jane *et al.*, 1999; Syahariza *et al.*, 2013) ในการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวให้เกิดความสำเร็จได้ ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมที่มีลักษณะคุณภาพการบริโภคที่ดีเป็นที่ยอมรับของทั้งเกษตรกรและผู้บริโภคนั้น ต้องศึกษาเปรียบเทียบข้อมูลจากหลายตัวแปรทั้งสมบัติทางเคมี สมบัติความหนืด และความสามารถในการทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลส ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวางแผนการคัดเลือกพันธุ์กรรมสำหรับใช้ในโครงการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ดังนั้น การพิจารณาองค์ประกอบของตัวแปรต่าง ๆ พร้อมกันหลายตัวแปรในข้าวโพดข้าวเหนียวหลายพันธุ์ โดยใช้ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้าเป็นตัวเปรียบเทียบ เมื่อมีหลายตัวแปรและข้าวโพดข้าวเหนียวหลายพันธุ์/สายพันธุ์/ลูกผสม จึงมีความซับซ้อนในการพิจารณา งานวิจัยนี้จึงนำวิธีการจัดกลุ่มและการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยเพื่อกำหนดตัวแปรของลักษณะที่เหมาะสมสำหรับเป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกข้าวโพดข้าวเหนียวให้มีลักษณะคุณภาพการบริโภคที่ดีและจัดกลุ่ม (Cluster) พันธุ์กรรมตามลักษณะตัวแปรที่เหมาะสม

## อุปกรณ์และวิธีการ

### พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว

ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 1) ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ (Inbred lines) จำนวน 13 สายพันธุ์ ได้แก่ F4305, KKCW02, M80, PWHB01, UT111, UT122, WEWS003, WKA005, WPK018, WKNN016, WSJ003, WTNGHB003 และ YNB01 2) ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม (Hybrids) จำนวน 12 ลูกผสม ได้แก่ CNW142430505, CNW142430519, CNW1504, CNW1515, CNW1537, CNW1602, CNW1608, CNW1614, CNW1627, CNW1643, UT1120 และ UT1122 และ 3) ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้า (Commercial hybrids) จำนวน 5 พันธุ์ ได้แก่ Chai Nat 84-1, Fancy 111, Sweet Violet, Sweet Wax 254 และ Violet White 926

ปลูกข้าวโพดข้าวเหนียวทั้ง 30 พันธุ์/สายพันธุ์/ลูกผสม ในแปลงทดลองที่ศูนย์วิจัยพืชไร่ชัยนาท จังหวัดชัยนาท โดยเตรียมดิน ใส่ปุ๋ยรองพื้นสูตร 15-15-15 รองพื้น อัตรา 67 กิโลกรัมต่อไร่ โดยปลูกจำนวน 3-4 แถวต่อพันธุ์/สายพันธุ์/ลูกผสม ขึ้นอยู่กับขนาดของฝัก แถวยาว 5 เมตร ใช้ระยะปลูก 75 × 25 เซนติเมตร เมื่อข้าวโพดข้าวเหนียวอายุ 14 วัน ถอนแยกให้เหลือ 1 ต้นต่อหลุม หลังจากนั้นใส่ปุ๋ยแต่งหน้า 2 ครั้ง เมื่อข้าวโพดมีอายุได้ 20-25 วัน ใส่ปุ๋ยสูตร 46-0-0 อัตรา 22 กิโลกรัมต่อไร่ และเมื่ออายุ 35-40 วัน ใส่ปุ๋ยเคมี 46-0-0 อัตรา 22 กิโลกรัมต่อไร่ ให้น้ำตามความต้องการของข้าวโพดข้าวเหนียวแบบตามร่อง (Furrow) ฉีดพ่นสารป้องกันกำจัดโรคและแมลงตามความจำเป็น เมื่อถึงระยะออกดอกและออกไหม ทำการผสมตัวเอง เก็บเกี่ยวฝักสดหลังผสม 20 วัน จากนั้น นำไปตากจนแห้ง แยกเมล็ดออกจากฝัก และนำเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวที่แกะแล้วมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 1 คืน

## การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียว

### การเตรียมฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียว

บดเมล็ดแห้งข้าวโพดข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้ง ด้วยเครื่องบดจนได้เป็นผงละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงไนลอนที่มีขนาดรู 100 เมช (Mesh) นำฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ได้อบให้แห้งสนิทด้วยอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง แล้วบรรจุลงในหลอดที่มีฝาปิดสนิท และเก็บในโถดูดความชื้น

### การวิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมด

ชั่งฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวตัวอย่างละ 100 มิลลิกรัม ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 16 × 120 มิลลิลิตร และดำเนินการการวิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมดทำตามวิธีการของ American Association of Cereal Chemists (2000)

### การวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

#### การเตรียมสารมาตรฐานอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

ชั่งสารมาตรฐาน ได้แก่ สารมาตรฐานโปเตโตอะไมโลสและสารอะไมโลเพคติน อย่างละ 50 มิลลิกรัม ลงในหลอดทดลองฝาเกลียวขนาด 16 × 120 มิลลิลิตร เติมน้ำโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมล ปริมาตร 0.664 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง เขย่าจนกระทั่งสารมาตรฐานละลายหมด เติมน้ำกลั่นปราศจากไอออน 32.636 มิลลิลิตร ปิดฝาหลอดทดลอง แล้วนำหลอดทดลองไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที นำออกมาตั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ใช้เป็น stock solution (ร้อยละ 100) จากนั้น เจือจางสารมาตรฐานโดยการเติมน้ำโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.13 โมล ให้ได้ความเข้มข้นเป็นร้อยละของสารมาตรฐาน ดังนี้ 100 80 60 40 20 และ 0

### การสร้างกราฟมาตรฐาน

ดูดสารละลายกรดไตรคลอโรอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองฝาเกลียว เติมน้ำมาตรฐานอะไมโลสและอะไมโลเพคติน ความเข้มข้นร้อยละ 100 80 60 40 20 และ 0 ปริมาตร 300 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง แล้วตามด้วยสารละลายไอโอดีนปริมาตร 300 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากันทันที จะได้สารประกอบเชิงซ้อนของน้ำแป้งและสารละลายไอโอดีน ตั้งไว้ให้สารเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้น นำสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้มาวัดด้วยวิธี dual-wavelength colorimetric (DWC) ดังนี้ การวัดค่าปริมาณอะไมโลสวัดที่ค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 และ 440 นาโนเมตร ส่วนการวัดค่าปริมาณอะไมโลเพคตินวัดที่ค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560 และ 728 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.13 โมล เป็นแบบลดค่าการปรับค่าการดูดกลืนแสงให้เท่ากับศูนย์ ก่อนการวัดสารมาตรฐาน

#### การเตรียมน้ำฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียว

ชั่งฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียว 50 มิลลิกรัม ใส่ลงในหลอดทดลองฝาเกลียว เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) ความเข้มข้น 0.4 โมล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ปิดฝาหลอดทดลอง และนำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้น ตั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและใช้เป็นสารละลายตัวอย่าง

#### การวัดปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียว

วัดปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในตัวอย่างน้ำฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวด้วยวิธีเดียวกับการวัดสารมาตรฐานปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

### การวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดของฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียว

วัดความหนืดของฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวด้วยเครื่อง Rapid Visco Analysis (RVA 4500) ดำเนินการตามวิธี Newport Scientific method บันทึกค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ค่าแตกตัวของเม็ดแป้ง (Breakdown) และค่าการคืนตัวของแป้ง (Setback)

### การวิเคราะห์การทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลสของฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียว

ดูดสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตทความเข้มข้น 500 มิลลิโมลาร์ พีเอช 3.5 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ปริมาตร 0.075 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองขนาด 16 x 120 มิลลิลิตร ตามด้วยสารละลายแป้งความเข้มข้นร้อยละ 1 ผสมให้เข้ากัน นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เติมสารละลายเอนไซม์ไอโซอะไมเลสปริมาตร 0.075 มิลลิลิตร นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที จากนั้น เติมสารละลายไอโอดีน-โพแทสเซียมไอโอดेटความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ เติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 11.50 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 10,000 รอบต่อนาที นาน 5 นาที นำส่วนใสมาผ่านตัวกรองไซริงค์ขนาด 0.8 ไมครอน สารละลายแบบลงค์ทำเช่นเดียวกันแต่ใช้สารละลายเอนไซม์ไอโซอะไมเลสที่ผ่านการแช่น้ำเดือด 10 นาที เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ จากนั้น นำผลผลิตของปฏิกิริยาที่ได้ทั้งจากสารละลายแป้งและสารละลายแบบลงค์มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร

หนึ่งหน่วยการทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลส หมายถึง ปริมาณมอลโตโทรสและมอลโตโอลิโกแซคคาไรด์หรือมอลโตเด็กซ์ทรินที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาย่อยโซ่กิ่งของอะไมโลเพคตินในฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวด้วยเอนไซม์ไอโซอะไมเลสที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง

### การวิเคราะห์ทางสถิติ

#### การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนและการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลสมบัติทางเคมี สมบัติทางด้านความหนืด และการทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลสด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

#### การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis)

วิเคราะห์หาองค์ประกอบหลักเพื่อสร้างชุดตัวแปรขององค์ประกอบหลัก โดยกำหนดจำนวนองค์ประกอบหลักจากองค์ประกอบที่มีค่าไอเกน (Eigenvalues) มากกว่า 1 จากนั้น คัดเลือกตัวแปรที่มีค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละองค์ประกอบเกิน 0.2 ขึ้นไป

#### การวิเคราะห์จัดกลุ่ม (Cluster analysis)

วิเคราะห์จัดกลุ่ม โดยใช้ค่า Euclidean distance และสร้างเดนโดรแกรม แสดงผลการจัดกลุ่มของตัวอย่างข้าวโพดข้าวเหนียวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลนี้ใช้โปรแกรมชุดวิเคราะห์จัดกลุ่ม (Cluster analysis) โดยใช้ k-means และใช้ค่า Euclidean distance สร้างเดนโดรแกรม ด้วยโปรแกรมชุด Factoextra package ของโปรแกรม R (R Core Team, 2022)

#### ผลการทดลองและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิเคราะห์ตัวแปรจำนวน 7 ตัวแปร ดังนี้ การวิเคราะห์ตัวแปรของสมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณอะไมโลส และปริมาณอะไมโลเพคติน การวิเคราะห์ตัวแปรของสมบัติทางด้านความหนืด ได้แก่ ความหนืดสูงสุด การแตกตัวของเม็ดแป้ง และการคืนตัวของแป้ง และการวิเคราะห์ตัวแปรของระดับการทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลส

## ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียว

เมื่อพิจารณาปริมาณแป้งทั้งหมด พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ปริมาณแป้งทั้งหมดอยู่ระหว่างร้อยละ 50.33–82.57 ฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้าที่มีปริมาณแป้งทั้งหมดมากที่สุดคือ พันธุ์ Chai Nat 84–1 (ร้อยละ 77.25) และน้อยที่สุดคือ พันธุ์ Sweet Violet (ร้อยละ 63.36) ฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีปริมาณแป้งทั้งหมดน้อยกว่าพันธุ์ Sweet Violet ได้แก่ ฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ WPK018 (ร้อยละ 50.33) YNB01 (ร้อยละ 54.00) KKCW02 (ร้อยละ 58.14) WKA005 (ร้อยละ 60.51) และ UTI22 (ร้อยละ 62.86) และฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม CNW1643 (ร้อยละ 58.87) และ UT1120 (ร้อยละ 61.23) (Table 1) ความแตกต่างของปริมาณแป้งทั้งหมดในข้าวโพดข้าวเหนียวสอดคล้องกับรายงานของ Ketthaisong *et al.* (2015) ที่วิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวจำนวน 8 พันธุ์/สายพันธุ์ โดยพบว่ามีปริมาณแป้งร้อยละ 77.76–90.97

การวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ปริมาณอะไมโลสมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.73–10.11 ฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้าที่มีปริมาณอะไมโลสมากที่สุดคือ พันธุ์ Chai Nat 84–1 (ร้อยละ 9.46) และน้อยที่สุดคือ พันธุ์ Violet White 926 (ร้อยละ 1.68) ฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีปริมาณอะไมโลสน้อยกว่าพันธุ์ Violet White 926 มีเพียงฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ WPK018 (ร้อยละ 0.73) เท่านั้น เมื่อนำร้อยละปริมาณอะไมโลสมาคิดเป็นร้อยละปริมาณอะไมโลสต่อร้อยละของปริมาณแป้งทั้งหมด คิดได้เป็นปริมาณอะไมโลสร้อยละ 1.44–12.24 ของปริมาณแป้งทั้งหมด ตรงข้ามกับรายงาน

วิจัยการศึกษาปริมาณอะไมโลสในข้าวโพดข้าวเหนียวของ Ketthaisong *et al.* (2015) ที่พบว่า ฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวมีปริมาณอะไมโลสน้อยและไม่มี ความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ แต่ผลงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาปริมาณอะไมโลสในสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวของ Li *et al.* (2008) และ Pérez and Bertoft (2010) ที่รายงานว่ามีปริมาณอะไมโลสระหว่างร้อยละ 0–8 ขณะที่ สตาร์ชจากข้าวสาลีชนิดแว็กซ์ (Waxy wheat starch) พบว่ามีปริมาณอะไมโลสน้อยกว่าร้อยละ 15 ซึ่งสตาร์ชจากข้าวสาลีโดยทั่วไป (Normal wheat starch) สามารถวัดปริมาณอะไมโลสได้มากกว่าร้อยละ 30 (Hung *et al.*, 2007) แสดงให้เห็นว่า ข้าวโพดข้าวเหนียวมีอะไมโลสแต่น้อยกว่าข้าวโพดทั่วไป

การวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลเพคติน พบว่าปริมาณอะไมโลเพคตินมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สามารถวัดปริมาณอะไมโลเพคตินได้ระหว่างร้อยละ 50.28–74.56 ฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้าที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินมากที่สุดคือ พันธุ์ Chai Nat 84–1 (ร้อยละ 68.32) และน้อยที่สุดคือ พันธุ์ Sweet Violet (ร้อยละ 56.47) ฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินน้อยกว่าพันธุ์ Sweet Violet มีเพียงข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ YNB01 (ร้อยละ 50.28) เท่านั้น เมื่อนำร้อยละปริมาณอะไมโลเพคตินมาคิดเป็นร้อยละปริมาณอะไมโลเพคตินต่อ ร้อยละของปริมาณแป้งทั้งหมด พบว่ามีปริมาณอะไมโลเพคตินอยู่ระหว่างร้อยละ 90.29–99.06 ของปริมาณแป้งทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Simla *et al.* (2010) ที่รายงานการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลเพคตินจากฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียว 6 สายพันธุ์ ซึ่งเป็นพันธุ์ที่ได้รับความนิยมจากหลายพื้นที่ในประเทศไทย พบว่ามีปริมาณอะไมโลเพคตินมากกว่าร้อยละ 80 ของปริมาณแป้งทั้งหมด

## ผลการวิเคราะห์สมบัติทางด้านความหนืดของฟลาร์วีข้าวโพดข้าวเหนียว

การวิเคราะห์ความหนืดสูงสุดเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับลักษณะความเหนียวนุ่มของเนื้อเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียว (Ketthaisong *et al.*, 2015) งานวิจัยนี้พบว่าความหนืดสูงสุดมีค่าแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ฟลาร์วีข้าวโพดข้าวเหนียวมีค่าความหนืดสูงสุดระหว่าง 14.12–180.46 RVU (Table 1) ฟลาร์วีข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้าที่มีค่าความหนืดสูงสุดมากที่สุด คือ พันธุ์ Fancy 111 (153.54 RVU) และต่ำที่สุด คือ พันธุ์ Violet White 926 (56.29 RVU) ฟลาร์วีข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีค่าความหนืดสูงสุดน้อยกว่าพันธุ์ Violet White 926 ได้แก่ ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ WPK018 (14.12 RVU), YNB01 (33.91 RVU), WKNN016 (34.08 RVU) และ WKA005 (38.12 RVU) แสดงให้เห็นว่า สายพันธุ์ดังกล่าวมีลักษณะความเหนียวนุ่มของเนื้อเมล็ดน้อยกว่าพันธุ์เปรียบเทียบ ขณะที่ ฟลาร์วีข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมมีค่าความหนืดสูงสุดมากกว่าและ/หรือใกล้เคียงกับพันธุ์เปรียบเทียบชี้ให้เห็นว่า ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมมีความเหนียวนุ่มของเนื้อเมล็ดในระดับเดียวกันกับพันธุ์เปรียบเทียบ

ค่าการแตกตัวของเม็ดแป้งบ่งชี้ถึงการแตกตัวของเม็ดแป้งในช่วงการให้ความร้อนหรือการหุงต้ม หากการแตกตัวของเม็ดแป้งมีค่าต่ำแสดงว่าแป้งนั้นทนความร้อนได้มากเมื่อให้ความร้อน จะได้เจลที่มีลักษณะแห้งหรือแข็งกระด้าง (Liaotrakoon and Liaotrakoon, 2020) งานวิจัยนี้พบว่าค่าการแตกตัวของเม็ดแป้งของฟลาร์วีข้าวโพดข้าวเหนียวมีค่าระหว่าง 0.37–97.66 RVU (Table 1) ฟลาร์วีข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้าที่มีค่าการแตกตัวของเม็ดแป้งมากที่สุด คือ พันธุ์ Chai Nat 84–1 (66.45 RVU) และต่ำที่สุดคือ พันธุ์ Sweet Violet (23.12 RVU) ฟลาร์วีข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีค่าการแตกตัวของเม็ดแป้ง

ต่ำกว่าฟลาร์วีข้าวโพดข้าวเหนียวพันธุ์ Sweet Violet ได้แก่ ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ WKNN016 (0.37 RVU), YNB01 (0.37 RVU), WPK018 (0.50 RVU), UTI22 (11.20 RVU), PWHB01 (15.04 RVU), WKA005 (16.20 RVU), WTNGHB003 (19.25 RVU), และ UTI11 (20.04 RVU) และข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม CNW1537 (11.08 RVU) และ UT1120 (15.12 RVU) ดังนั้น เมื่อนำข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีค่าการแตกตัวของเม็ดแป้งต่ำดังกล่าวนี้ไปต้มจะทนความร้อนได้มาก ทำให้เจลที่ได้มีลักษณะแห้งและแข็งมากกว่าพันธุ์เปรียบเทียบ อย่างไรก็ตาม ข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีค่าการแตกตัวของเม็ดแป้งไม่แตกต่างทางสถิติกับฟลาร์วีข้าวโพดข้าวเหนียวพันธุ์ Sweet Violet หรือมีค่าการแตกตัวของเม็ดแป้งที่สูงกว่าจะเป็นสายพันธุ์แท้หรือเชื้อพันธุ์กรรมที่มีประโยชน์ต่อการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวให้มีคุณภาพการบริโภคที่ดี

ค่าการคืนตัวจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัส เมื่อให้ความร้อนแก่แป้งแล้วปล่อยให้เย็นลง แป้งที่มีค่าการคืนตัวต่ำเนื้อสัมผัสของแป้งจะยังคงเหนียวนุ่ม โดยงานวิจัยนี้พบว่าค่าการคืนตัวของแป้งมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่าการคืนตัวของฟลาร์วีข้าวโพดข้าวเหนียวอยู่ระหว่าง 6.29–60.70 RVU (Table 1) ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้าที่มีค่าการคืนตัวมากที่สุด คือ พันธุ์ Chat Nat 84–1 (23.29 RVU) และน้อยที่สุด คือ พันธุ์ Violet White 926 (10.37 RVU) ข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีค่าการคืนตัวสูงกว่าพันธุ์ Chat Nat 84–1 ได้แก่ ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ UTI11 (32.50 RVU) และ UTI22 (60.70 RVU) และข้าวโพดข้าวเหนียวพันธุ์ลูกผสม UT1122 (56.12 RVU) ข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีค่าการคืนตัวสูงมีแนวโน้มว่าเมื่อต้มสุกแล้วปล่อยให้เย็นจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งกว่าพันธุ์เปรียบเทียบ

**Table 1** Chemical properties, viscosity properties and isoamylase activities analysis of the flour from different waxy corns

Waxy corns	Type	Chemical properties			Viscosity properties			Isoamylase assay (unit/mL)
		Total starch content (%)	Amylose content (%)	Amylopectin content (%)	Peak viscosity (RVU)	Breakdown (RVU)	Setback (RVU)	
F4305	Inbred line	67.36 <sup>g-h</sup>	9.21 <sup>bc</sup>	58.27 <sup>lm</sup>	98.45 <sup>g</sup>	35.50 <sup>g</sup>	15.06 <sup>gh</sup>	1,309.77 <sup>n</sup>
KKCW02	Inbred line	58.14 <sup>m</sup>	2.39 <sup>kl</sup>	56.25 <sup>m</sup>	74.37 <sup>j</sup>	21.79 <sup>kl</sup>	11.95 <sup>kl</sup>	1,859.55 <sup>h-k</sup>
M80	Inbred line	80.92 <sup>b</sup>	8.41 <sup>cd</sup>	72.43 <sup>bc</sup>	82.29 <sup>j</sup>	38.97 <sup>f</sup>	13.70 <sup>jl</sup>	1,908.00 <sup>h-j</sup>
PWHB01	Inbred line	69.03 <sup>fs</sup>	8.98 <sup>bc</sup>	60.23 <sup>jk</sup>	64.29 <sup>mm</sup>	15.04 <sup>n</sup>	13.04 <sup>h-k</sup>	1,793.11 <sup>h-k</sup>
UTI11	Inbred line	66.13 <sup>jl</sup>	2.35 <sup>kl</sup>	58.49 <sup>lm</sup>	94.00 <sup>h</sup>	20.04 <sup>lm</sup>	32.50 <sup>c</sup>	1,680.88 <sup>k-m</sup>
UTI22	Inbred line	62.86 <sup>k</sup>	6.22 <sup>g</sup>	58.49 <sup>lm</sup>	72.91 <sup>jk</sup>	11.20 <sup>o</sup>	60.70 <sup>a</sup>	547.33 <sup>p</sup>
WEWS003	Inbred line	82.57 <sup>a</sup>	8.96 <sup>bc</sup>	73.76 <sup>ab</sup>	180.46 <sup>a</sup>	97.66 <sup>a</sup>	21.08 <sup>e</sup>	3,120.44 <sup>a</sup>
WKA005	Inbred line	60.51 <sup>l</sup>	6.66 <sup>fg</sup>	54.31 <sup>o</sup>	38.12 <sup>q</sup>	16.20 <sup>n</sup>	8.79 <sup>op</sup>	1,884.88 <sup>h-k</sup>
WPK018	Inbred line	50.33 <sup>o</sup>	0.73 <sup>m</sup>	91.06 <sup>e-g</sup>	14.12 <sup>r</sup>	0.50 <sup>p</sup>	6.29 <sup>q</sup>	1,793.11 <sup>h-k</sup>
WKNN016	Inbred line	70.04 <sup>f</sup>	8.55 <sup>c</sup>	61.48 <sup>jl</sup>	34.08 <sup>q</sup>	0.37 <sup>p</sup>	9.66 <sup>no</sup>	1,215.55 <sup>n</sup>
WSJ003	Inbred line	80.33 <sup>b</sup>	8.66 <sup>bc</sup>	71.67 <sup>cd</sup>	55.10 <sup>p</sup>	32.62 <sup>hi</sup>	8.12 <sup>p</sup>	2,734.88 <sup>b</sup>
WTNGHB003	Inbred line	63.47 <sup>f</sup>	8.78 <sup>bc</sup>	60.57 <sup>jk</sup>	75.87 <sup>j</sup>	19.25 <sup>m</sup>	15.25 <sup>gh</sup>	1,753.33 <sup>h-m</sup>
YNB01	Inbred line	54.00 <sup>n</sup>	3.88 <sup>h</sup>	50.28 <sup>p</sup>	33.91 <sup>q</sup>	0.37 <sup>p</sup>	11.54 <sup>lm</sup>	1,874.00 <sup>h-k</sup>
CNW142430505	Hybrid	78.52 <sup>c</sup>	8.65 <sup>bc</sup>	70.23 <sup>d</sup>	110.33 <sup>e</sup>	42.54 <sup>e</sup>	15.54 <sup>gh</sup>	1,982.66 <sup>f-h</sup>
CNW142430519	Hybrid	80.34 <sup>b</sup>	10.11 <sup>a</sup>	70.36 <sup>d</sup>	99.52 <sup>fg</sup>	42.49 <sup>e</sup>	13.60 <sup>jl</sup>	2,189.22 <sup>ef</sup>
CNW1504	Hybrid	81.59 <sup>ab</sup>	7.15 <sup>ef</sup>	74.56 <sup>a</sup>	109.04 <sup>e</sup>	56.70 <sup>c</sup>	15.45 <sup>gh</sup>	2,230.66 <sup>e</sup>
CNW1515	Hybrid	76.29 <sup>d</sup>	7.55 <sup>e</sup>	68.51 <sup>e</sup>	112.93 <sup>de</sup>	40.83 <sup>ef</sup>	17.77 <sup>f</sup>	1,974.66 <sup>f-h</sup>
CNW1537	Hybrid	65.11 <sup>i</sup>	2.73 <sup>h-k</sup>	62.30 <sup>hi</sup>	61.04 <sup>no</sup>	11.08 <sup>o</sup>	14.20 <sup>hi</sup>	2,278.44 <sup>de</sup>
CNW1602	Hybrid	68.26 <sup>f-h</sup>	2.57 <sup>jk</sup>	65.44 <sup>g</sup>	69.08 <sup>kl</sup>	22.45 <sup>k</sup>	13.04 <sup>h-k</sup>	1,643.77 <sup>lm</sup>
CNW1608	Hybrid	69.82 <sup>f</sup>	8.43 <sup>cd</sup>	62.78 <sup>hi</sup>	99.52 <sup>fg</sup>	42.40 <sup>e</sup>	13.66 <sup>jl</sup>	2,467.77 <sup>c</sup>
CNW1614	Hybrid	76.21 <sup>d</sup>	8.38 <sup>cd</sup>	67.65 <sup>ef</sup>	99.77 <sup>fg</sup>	41.75 <sup>e</sup>	16.18 <sup>g</sup>	2,295.11 <sup>cd</sup>
CNW1627	Hybrid	65.21 <sup>j</sup>	6.07 <sup>g</sup>	59.13 <sup>kl</sup>	73.29 <sup>jk</sup>	28.04 <sup>l</sup>	13.33 <sup>h-k</sup>	2,342.22 <sup>cd</sup>
CNW1643	Hybrid	58.87 <sup>m</sup>	3.25 <sup>h-j</sup>	56.77 <sup>n</sup>	103.33 <sup>f</sup>	34.20 <sup>gh</sup>	12.37 <sup>l</sup>	803.77 <sup>o</sup>
UTI120	Hybrid	61.23 <sup>i</sup>	3.49 <sup>hi</sup>	57.48 <sup>mn</sup>	67.84 <sup>lm</sup>	15.12 <sup>n</sup>	15.91 <sup>g</sup>	1,952.88 <sup>g-i</sup>



**Table 1** Cont.

Waxy corns	Type	Chemical properties			Viscosity properties			Isoamylase assay (unit/mL)
		Total starch content (%)	Amylose content (%)	Amylopectin content (%)	Peak viscosity (RVU)	Breakdown (RVU)	Setback (RVU)	
UT1122	Hybrid	66.57 <sup>h-j</sup>	2.76 <sup>k</sup>	63.57 <sup>h</sup>	114.65 <sup>d</sup>	23.70 <sup>k</sup>	56.12 <sup>b</sup>	1,712.00 <sup>j-m</sup>
Chai Nat 84-1	Commercial hybrid	77.25 <sup>cd</sup>	9.46 <sup>ab</sup>	68.32 <sup>e</sup>	140.88 <sup>c</sup>	66.45 <sup>b</sup>	23.29 <sup>d</sup>	1,316.88 <sup>n</sup>
Fancy 111	Commercial hybrid	72.68 <sup>e</sup>	6.40 <sup>fg</sup>	66.27 <sup>fg</sup>	153.54 <sup>b</sup>	57.91 <sup>c</sup>	22.33 <sup>d</sup>	1,529.55 <sup>m</sup>
Sweet Violet	Commercial hybrid	63.36 <sup>k</sup>	6.67 <sup>fg</sup>	56.47 <sup>n</sup>	58.95 <sup>op</sup>	23.12 <sup>k</sup>	11.16 <sup>lm</sup>	1,695.55 <sup>k-m</sup>
Sweet Wax 254	Commercial hybrid	72.74 <sup>e</sup>	7.66 <sup>de</sup>	65.96 <sup>g</sup>	98.12 <sup>s</sup>	51.04 <sup>d</sup>	13.25 <sup>h-k</sup>	2,144.00 <sup>e-g</sup>
Violet White 926	Commercial hybrid	67.01 <sup>hi</sup>	1.68 <sup>l</sup>	65.80 <sup>g</sup>	56.29 <sup>p</sup>	25.04 <sup>j</sup>	10.37 <sup>mn</sup>	1,769.11 <sup>h-k</sup>

In a column, means followed by different superscript letters were significantly different by Duncan's new multiple range test ( $P < 0.05$ ).  
 Inbred = waxy corn inbred lines, Hybrid = hybrid waxy corns, Commercial hybrid = commercial waxy corn hybrids

ในปัจจุบันยังไม่มีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพการบริโภคที่ดีของข้าวโพดข้าวเหนียว ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้าซึ่งเป็นที่ยอมรับของผู้ผลิตและผู้บริโภคมาเป็นพันธุ์เปรียบเทียบ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ลักษณะความเหนียวนุ่มของเนื้อเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวที่ใช้ในการทดลองมีความใกล้เคียงหรือดีกว่า (ค่าการคินตัวต่ำ) พันธุ์เปรียบเทียบ ดังนั้น ข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีค่าความหนืดสูงสุดและค่าการแตกตัวของเม็ดแป้งสูง แต่มีค่าการคินตัวของแป้งต่ำ หรือใกล้เคียงกับพันธุ์เปรียบเทียบ จะเป็นข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม หรือข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมการค้าที่มีคุณภาพการบริโภคที่ดี และสามารถใช้เป็นพันธุกรรมพื้นฐานของการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีคุณภาพการบริโภคที่ดี

### การวิเคราะห์การทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลสในฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียว

ผลการศึกษาระดับการทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลสพบว่า ระดับการทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลสมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อตัดจุดสายโซ่กิ่งก้านของอะไมโลเพคตินด้วยเอนไซม์ไอโซอะไมเลสในน้ำฟลาวัวร์ข้าวโพดข้าวเหนียว มีระดับการตัดกิ่งอยู่ระหว่าง 547.33–3,120.44 หน่วยต่อมิลลิลิตร (Table 1) ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้าที่มีระดับการตัดกิ่งมากที่สุด คือ พันธุ์ Sweet Wax 254 (2,144.00 หน่วยต่อมิลลิลิตร) และน้อยที่สุด คือ พันธุ์ Chat Nat 84-1 (ร้อยละ 1,316.88 หน่วยต่อมิลลิลิตร) ข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีระดับการตัดกิ่งน้อยกว่าพันธุ์ Chai Nat 84-1 ได้แก่ ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ UT12 (547.33 หน่วยต่อมิลลิลิตร) และข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม CNW1643 (803.77 หน่วยต่อมิลลิลิตร)

### การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

การศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายตัวที่มีผลต่อลักษณะคุณภาพการบริโภคนั้นสามารถนำเทคนิคการวิเคราะห์โดยการนำตัวแปรหลายตัวมารวมกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันไว้ในกลุ่มหรือองค์ประกอบเดียวกัน เพื่อลดมิติของตัวแปร เรียกกุ่มตัวแปรใหม่ว่าองค์ประกอบหลัก การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) โดยกำหนดให้สมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณอะไมโลส และปริมาณอะไมโลเพคติน สมบัติทางด้านความหนืด ได้แก่ ความหนืดสูงสุด การแตกตัวของเม็ดแป้ง และการคินตัวของแป้ง และระดับการทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลสเป็นตัวแปร และกำหนดจำนวนองค์ประกอบหลักจากองค์ประกอบที่มีค่า eigenvalues มากกว่า 1 คัดเลือกตัวแปรที่มีค่าถ่วงน้ำหนัก (Factor loading) ในแต่ละองค์ประกอบเกิน 0.2 ขึ้นไปเป็นองค์ประกอบสำคัญ (Boonlertnirun and Jompuk 2013; Inpik and Kongsamai, 2019) งานวิจัยนี้พบความแปรปรวนรวมของตัวแปรทั้งหมดร้อยละ 68.8 ดัง Table 2

องค์ประกอบหลักที่ 1 มีค่า eigenvalues 3.28 มีความแปรปรวนร้อยละ 46.898 มีตัวประกอบและค่าน้ำหนักองค์ประกอบ ดังนี้ ปริมาณแป้งทั้งหมด (0.439) ปริมาณอะไมโลส (0.509) ความหนืดสูงสุด (0.501) และการแตกตัวของเม็ดแป้ง (0.374) เมื่อน้ำฟลาวัวร์ได้รับอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) เป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไปอีก และมีการกวนอย่างต่อเนื่อง ทำให้โครงสร้างภายในเม็ดแป้งแตกตัว (Break down) เรียกว่าการเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization) ปริมาณแป้งทั้งหมดมีความสำคัญมากสำหรับการเกิดเจลาตินในเซชัน (Zhu *et al.*, 2016) มีรายงานการศึกษาผลของปริมาณแป้งทั้งหมดมีความสัมพันธ์ระดับสูงกับการเกิด

เจลลาตินในเซชันของแป้ง (Valach *et al.*, 2020) และการเกิดเจลที่ดีของแป้งแปรผันโดยตรงกับปริมาณอะไมโลส (Kim and Seib, 1993) เมื่อพิจารณาตัวประกอบทั้ง 4 ตัวองค์ประกอบหลักที่ 1 พบว่า เป็นความสัมพันธ์ที่มีความเกี่ยวข้องกับการเกิดเจลของน้ำแป้งเมื่อได้รับความร้อน จึงเรียกองค์ประกอบหลักที่ 1 ว่า องค์ประกอบของการเกิดเจลลาตินในเซชัน (Gelatinization component)

องค์ประกอบที่ 2 มีค่า eigenvalues 1.51 มีความแปรปรวนร้อยละ 21.503 มีตัวประกอบและค่าน้ำหนักองค์ประกอบ ดังนี้ การคั้นตัวของแป้ง (0.298) ระดับการทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลส (0.492) และปริมาณอะไมโลเพคติน (-0.706) เมื่อนำแป้งที่ผ่านการเจลลาตินเข้ามาแล้ว ปล่อยให้เย็นตัวลง

ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดจากการเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลอะไมโลสที่หลุดออกจากเม็ดแป้งหรือการคั้นตัวของแป้ง (Setback) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดเรโทรเกรเดชัน (Retrogradation) จึงเรียกองค์ประกอบที่ 2 ว่าองค์ประกอบของการเกิดเรโทรเกรเดชัน (Retrogradation component) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณอะไมโลเพคตินสูงและการกระจายตัวของสายโซ่กิ่งก้านของอะไมโลเพคตินน้อยมีผลต่อการเกิดเรโทรเกรเดชันหรือการคั้นตัวของแป้งต่ำ ตรงข้ามกับรายงานการศึกษาแป้งที่มีอัตราส่วนของอะไมโลเพคตินซึ่งเป็นสายโพลีเมอร์ที่มีสายโซ่กิ่งก้านมากจะมีผลทำให้การเกิดเรโทรเกรเดชันหรือการคั้นตัวของแป้งลดลง (Singh and Anderson, 2004)

**Table 2** Eigenvalues, variability, the two principal component, factor loadings of the seven traits evaluated in different waxy corns

Trait	Principle component	
	1*	2*
Total starch content	0.439	
Breakdown	0.374	
Amylopectin content		-0.706
Peak viscosity	0.501	
Amylose content	0.509	
Setback		0.298
Isoamylase activities		0.492
Eigenvalues	3.28	1.51
Percentage of variance	46.898	21.503

\* Component score coefficient

เมื่อนำตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักมาสร้างเป็นกราฟ PCA ดัง Figure 1 พบว่า แกนนอน (PC1) สามารถอธิบายความแปรปรวนได้ร้อยละ 49.6 มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณแป้งทั้งหมด (TotalS) ปริมาณอะไมโลส (AM) ความหนืด

สูงสุด (PeakVis) และการแตกตัวของเม็ดแป้ง (BreakD) แกนตั้ง (PC2) สามารถอธิบายความแปรปรวนได้ร้อยละ 21.5 มีความสัมพันธ์เชิงลบกับการคั้นตัวของแป้ง (SetD) และการทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลส (Isolate) และมีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณ

อะไมโลเพคติน (AMP)

การจัดกลุ่มข้าวโพดข้าวเหนียวโดยใช้วิธี K-means clustering (Figure 2) เมื่อพิจารณาภายในขอบเขตพื้นที่สีแดงซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้หลายตัวแปรของข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้า โดยมีค่ากลางหรือค่าเฉลี่ยของหลายตัวแปรเป็นจุดสีแดงเป็นจุดศูนย์กลาง (Centroid) ของขอบเขต ในขณะที่ขอบเขตพื้นที่สีน้ำเงินสร้างขึ้นจากหลายตัวแปรของข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ โดยมีค่ากลางหรือค่าเฉลี่ยของหลายตัวแปรเป็นจุดสีน้ำเงินเป็นจุดศูนย์กลางของขอบเขต ถ้าระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแต่ละขอบเขตคู่ใดต่อกันจะรวมขอบเขตนั้น ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ PWHB01 และ WTNGB003 และข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม CNW1602 และ CNW1627 อยู่ภายในขอบเขตสีแดง ซึ่งเป็นขอบเขตพื้นที่ของข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้า แสดงให้เห็นว่า สายพันธุ์แท้และลูกผสมดังกล่าวมีค่ากลางหรือค่าเฉลี่ยของหลายตัวแปรใกล้เคียง

กับข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้า นั่นคือมีลักษณะเหนียวนุ่มหรือลักษณะคุณภาพการบริโภคที่ดีมากกว่าข้าวโพดข้าวเหนียวที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลาง ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าสายพันธุ์ PWHB01 และ WTNGB003 มีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นพ่อแม่สำหรับสร้างคู่ผสม ส่วนลูกผสม CNW1602 และ CNW1627 มีลักษณะคุณภาพการบริโภคที่ดี สามารถนำไปวิเคราะห์ร่วมกับลักษณะผลผลิตและลักษณะทางการเกษตร เพื่อพิจารณาให้เป็นลูกผสมที่มีทั้งลักษณะผลผลิต ลักษณะทางการเกษตร และลักษณะคุณภาพการบริโภคที่ดีต่อไป ในทางตรงข้ามกับข้าวโพดข้าวเหนียวที่อยู่ห่างมากจากขอบเขตและจุดศูนย์กลางของข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้า ได้แก่ ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ YNB01, WPK018, WSJ003, WEWS003 และ UT122 และข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม UT1122 นั่นคือข้าวโพดข้าวเหนียวเหล่านี้มีลักษณะคุณภาพการบริโภคที่ไม่เพียงพอ

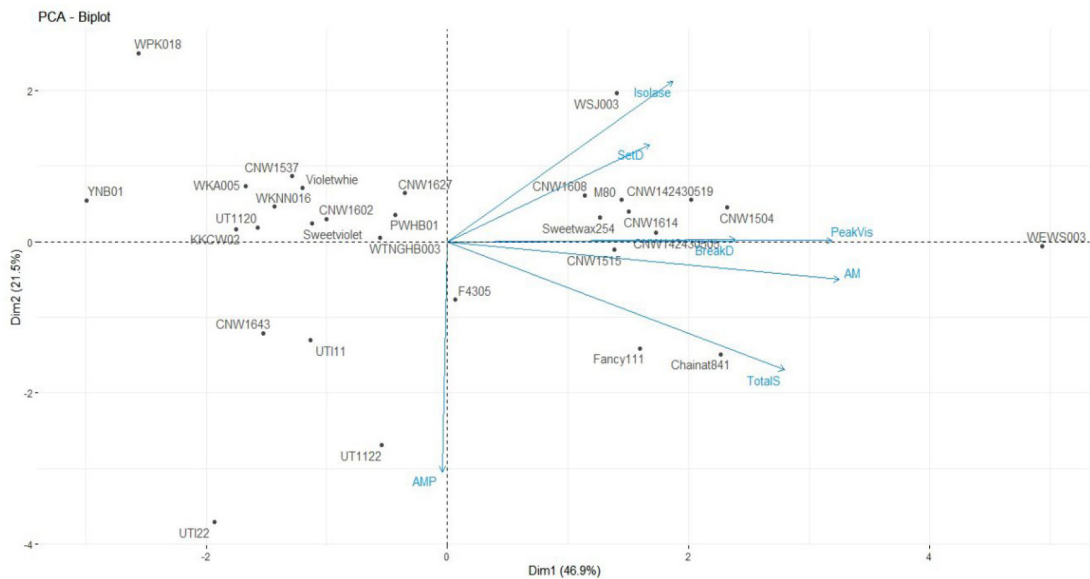


Figure 1 Principal component analysis (PCA) of the chemical properties, viscosity properties and isoamylase activities and plots of different waxy corn flours

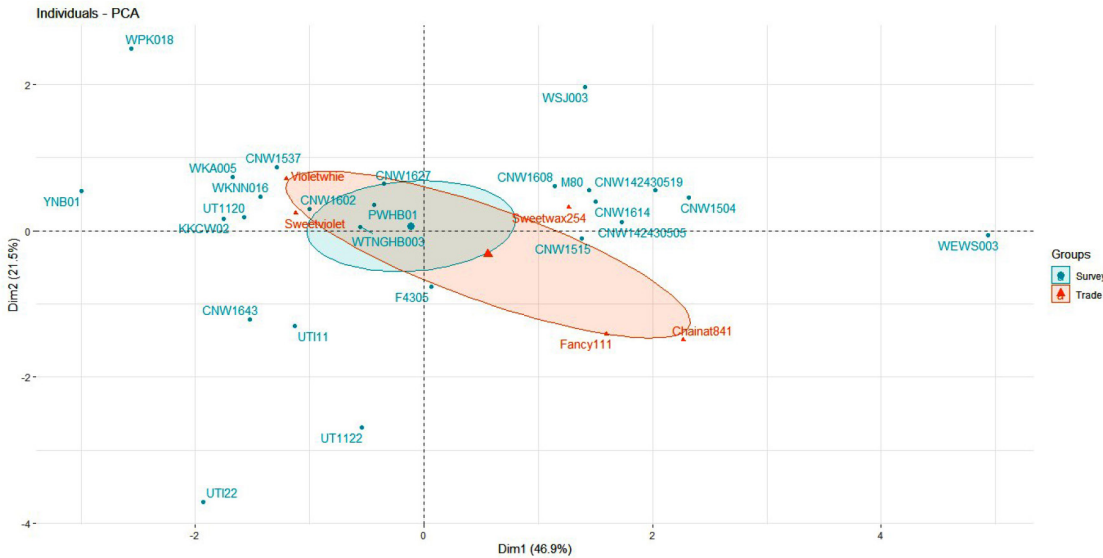


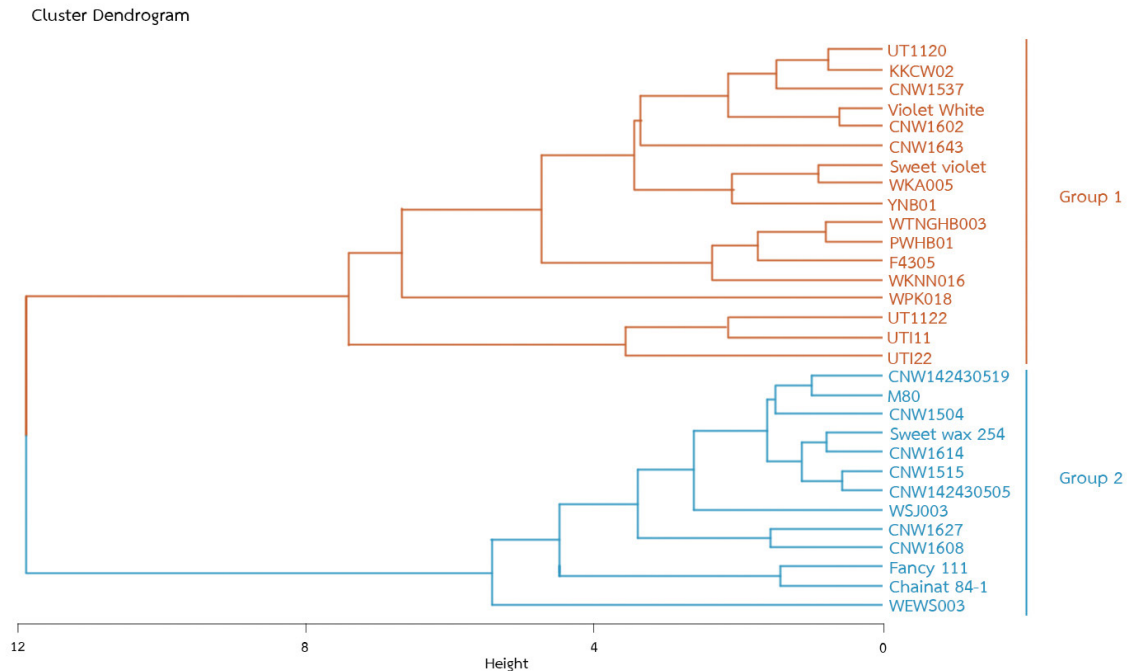
Figure 2 K-means clustering analysis for the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> component of principal component analysis

### การจัดกลุ่มโดยวิธีการวิเคราะห์กลุ่ม

เมื่อนำข้อมูลของลักษณะหลายตัวแปรที่แตกต่างกันขององค์ประกอบหลักมาจัดกลุ่มโดยวิธีการวิเคราะห์กลุ่ม ทำให้เห็นความแตกต่างของพันธุ์ที่มีตัวแปรใกล้เคียงกัน ซึ่งช่วยให้สามารถอธิบายลักษณะของกลุ่มได้ง่ายขึ้น และจำแนกความแตกต่างของพันธุ์ได้จากองค์ประกอบหลักแต่ละตัว การจัดกลุ่มโดยวิธีการวิเคราะห์กลุ่มสามารถจัดกลุ่มข้าวโพดข้าวเหนียวได้ 2 กลุ่ม ดังนี้ (Figure 3)

กลุ่มที่ 1 มีข้าวโพดข้าวเหนียวทั้งหมด 13 พันธุ์/สายพันธุ์/ลูกผสม ประกอบด้วย ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้า ได้แก่ Sweet Wax 254, Fancy 111 และ Chai Nat 84-1 ข้าวโพดข้าวเหนียว

สายพันธุ์แท้ ได้แก่ M80, WSJ003 และ WEWS003 และข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม ได้แก่ CNW142430519, CNW1504, CNW1614, CNW1515, CNW142430505, CNW1627 และ CNW1608 ข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีระยะห่างใกล้เคียงกันมากที่สุด คือ ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม CNW1515 กับ CNW142430505 ขณะที่ ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ WEWS003 มีระยะห่างไกลที่สุด เมื่อพิจารณาร่วมกับกราฟ PCA (Figure 2) จะเห็นได้ว่า ข้าวโพดข้าวเหนียวในกลุ่มที่ 1 มีความสัมพันธ์ในทิศทางบวกกับปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณอะไมโลส ความหนืดสูงสุด และการแตกตัวของเม็ดแป้ง ซึ่งเป็นองค์ประกอบของการเกิดเจลลาตินในเซชัน



**Figure 3** Clustering dendrogram of the data points in PCA score plot

กลุ่มที่ 2 มีข้าวโพดข้าวเหนียวทั้งหมด 17 พันธุ์/สายพันธุ์/ลูกผสม ประกอบด้วย ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้า ได้แก่ Violet White 926 และ Sweet Violet ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ ได้แก่ KKCW02, WKA005, YNB01, WTNGHB003, PWHB01, F4305, WKNN016, WPK018 และ UT111 UT122 และข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม ได้แก่ UT1120, CNW1537, CNW1602, CNW1643 และ UT1122 ข้าวโพดข้าวเหนียวที่มีระยะใกล้ชิดกันมากที่สุด คือ ข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้า Violet white 926 กับข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม CNW1602 ขณะที่ ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ UT111 และ UT122 และข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม UT1122 มีระยะห่างไกลที่สุด เมื่อพิจารณาร่วมกับกราฟ PCA (Figure 2) กลุ่มที่ 2 มีความสัมพันธ์ในทิศทางบวกกับการคืนตัวของแป้งและการทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลส และมีความสัมพันธ์ในทิศทางลบกับปริมาณอะไมโลเพคติน ซึ่งเป็นตัวแปรขององค์ประกอบการเกิดเรโทรเกรเดชัน

### สรุป

ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณอะไมโลส และปริมาณอะไมโลเพคตินมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความหนืดสูงสุดและการแตกตัวของเม็ดแป้ง การทำงานของเอนไซม์ไอโซอะไมเลสมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการคืนตัวของแป้ง แต่มีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณอะไมโลเพคติน การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักสามารถแบ่งได้เป็น 2 องค์ประกอบหลัก องค์ประกอบหลักที่ 1 เป็นองค์ประกอบของการเกิดเจลาตินไนเซชัน และองค์ประกอบที่ 2 เป็นองค์ประกอบของการเกิดเรโทรเกรเดชัน เมื่อนำทั้งสององค์ประกอบมาจัดกลุ่ม พบว่า ข้าวโพดข้าวเหนียวสายพันธุ์แท้ PWHB01 และ WTNGHB003 เหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นพันธุ์พ่อแม่คู่ผสม และข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสม CNW1602 และ CNW1627 มีลักษณะตัวแปรเดียวกับข้าวโพดข้าวเหนียวลูกผสมพันธุ์การค้า ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับงานด้านการปรับปรุงพันธุ์ร่วมกับการ



ค้นหาลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แป้งและลักษณะความเหนียวนุ่มของข้าวโพดข้าวเหนียว เพื่อให้ได้เครื่องหมายสปีส์มาใช้เป็นเครื่องมือช่วยคัดเลือกข้าวโพดข้าวเหนียวให้ได้พันธุ์ที่มีลักษณะเหนียวนุ่มเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้อยู่ภายใต้โครงการวิจัยปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดฝักสด การทดลองเรื่องพัฒนาเครื่องหมายโมเลกุลเพื่อจำแนกความเหนียวนุ่มของข้าวโพดข้าวเหนียวด้วยวิธี high-resolution melting (HRM) real-time PCR ทะเบียนวิจัยเลขที่ 01-13-59-01-02-00-09-60 ซึ่งได้รับงบประมาณสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยจาก สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)

## เอกสารอ้างอิง

- American Association of Cereal Chemists. 2000. Approve Methods of the American Association of Cereal Chemists. 10<sup>th</sup> edition. The American Association of Cereal Chemists, Minnesota, USA.
- Azanza, F., B.P. Klein and J.A. Juvik. 1996. Sensory characterization of sweet corn lines differing in physical and chemical composition. J. Food Sci. 61(1): 253–257.
- Boonlertnirun, K. and C. Jompuk. 2013. Waxy corn hybrid classification by multivariate analysis. RMUTSB Acad. J. 1(1): 41–50. (in Thai)
- Hung, P.V., T. Maeda and N. Morita. 2007. Study on physicochemical characteristics of waxy and high amylose wheat starches in comparison with normal wheat starch. Starch 59(3–4): 125–131.
- Inpik, N. and B. Kongsamai. 2019. Genetic diversity of some morphological characteristic of *Amorphophallus muelleri* Blume using multivariate analysis. JSTKU 8(2): 21–31. (in Thai)
- Jane, J., Y.Y. Chen, L.F. Lee, A.E. McPherson, K.S. Wong, M. Radosavljevic and T. Kasemsuwan. 1999. Effects of amylopectin branch length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. Cereal Chem. 76(5): 629–637.
- Ketthaisong, D., B. Suriharn, R. Tangwongchai, J.L. Jane and K. Lertrat. 2015. Physicochemical and morphological properties of starch from fresh waxy corn kernels. J. Food Sci. Technol. 52(10): 6529–6537.

- Kim, W.S. and P.A. Seib. 1993. Apparent restriction of starch swelling in cooked noodles by lipids in some commercial wheat flours. *Cereal Chem.* 70(4): 367–372.
- Li, L., H. Jiang, M. Campbell, M. Blanco and J.L. Jane. 2008. Characterization of maize amylose-extender (*ae*) mutant starches. Part I: Relationship between resistant starch contents and molecular structures. *Carbohydr. Polym.* 74(3): 396–404.
- Liaotrakoon, W. and V. Liaotrakoon. 2020. Effect of acid modification and pre-gelatinization methods on physicochemical properties of water chestnut flour. *JFTSU* 15(2): 82–95. (in Thai)
- Pérez, S. and E. Bertoft. 2010. The molecular structure of starch component and their contribution to the architecture of starch granules. *Starch.* 62: 389–420.
- Phapumma, A., T. Monkham, J. Sanitchon and S. Chankaew. 2020. Evaluation of amylose content, textural properties and cooking qualities of selected glutinous rice. *Khon Kaen Agr. J.* 48(3): 597–606. (in Thai)
- R Core Team. 2022. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Shittu, T.A., L.O. Sanni, S.O. Awonorin, B. Maziya-Dixon and A. Dixon. 2007. Use of multivariate techniques in studying the flour making properties of some CMD resistant cassava clones. *Food Chem.* 101(4): 1606–1615.
- Simla, S. 2009. Eating Quality Investigation and Improvement in Waxy Corn. PhD Thesis, Khon Kaen University, Khon Kaen.
- Simla, S. 2013. Eating quality in vegetable corns. *J. Sci. Technol. MSU.* 32(3): 337–342.
- Simla, S., K. Lertrat and B. Suriharn. 2010. Carbohydrate characters of six vegetable waxy corn varieties as affected by harvest time and storage duration. *Asian J. Plant Sci.* 9(8): 463–470.
- Singh, R.P. and B.A. Anderson. 2004. The major types of food spoilage: an overview, pp. 3–23. *In* R. Steele, ed. *Understanding and Measuring the Shelf-life of Food*. Woodhead Publishing, Cambridge, UK.
- Syahariza, Z.A., S. Sar, J. Hasjim, M.J. Tizzotti and R.G. Gilbert. 2013. The importance of amylose and amylopectin fine structures for starch digestibility in cooked rice grains. *Food Chem.* 136(2): 742–749.



- Valach, A., G. Moore and E.B. Perry. 2020. Impacts of dietary profile on starch content and gelatinization in canine diets. *J. Anim. Sci.* 98(Suppl. 4): 56.
- Vanichbuncha, K. 2008. *Statistics Analysis: Statistics for Management and Research*. Department of Statistics, Faculty of Commerce and Accountancy, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. 589 pp. (in Thai)
- Zhu, L., C. Jones, Q. Guo, L. Lewis, C.R. Stark and S. Alavi. 2016. An evaluation of total starch and starch gelatinization methodologies in pelleted animal feed. *J. Anim. Sci.* 94(4): 1501–1507.