

# แบบจำลองการประเมินคุณภาพของมะม่วงไทยด้วยวิธีมอนติคาร์โล (ส่วนที่ 1)

## The Model of Mango Quality Assessment Using Monte Carlo Simulation (Part I)

สว่าง แป้นจันทร์

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

Email: sawang26@yahoo.com

### บทคัดย่อ

มะม่วงเป็นผลไม้ส่งออกที่สำคัญชนิดหนึ่งของไทยที่มีการส่งออกไปยังตลาดต่างประเทศเป็นจำนวนมาก ทั้งตลาดที่มีอำนาจซื้อระดับสูงและต่ำ ซึ่งประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกเป็นอันดับ 3 ของโลก ปัญหาสำคัญที่ทำให้มะม่วงไทยมีศักยภาพการแข่งขันต่ำกว่าคู่แข่ง คือ ขาดความสม่ำเสมอของผลผลิต การจัดการข้อมูลการผลิตที่ไม่มีประสิทธิภาพ ต้นทุนการผลิตสูง และสินค้ามีราคาสูงกว่าคู่แข่ง ทำให้ผู้บริโภคส่วนใหญ่ตัดสินใจซื้อมะม่วงจากคู่แข่ง โดยปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อมะม่วง คือ ข้อมูลคุณภาพสินค้า ราคา รสชาติ และรูปลักษณะภายนอก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวทำให้ต้องมีการศึกษาระบบการประเมินคุณภาพของมะม่วงที่สอดคล้องกับแนวทางการจัดการระบบห่วงโซ่อุปทาน ตั้งแต่กิจกรรมต้นน้ำจนถึงปลายน้ำทั้งหมด จากการวิจัยพบว่า รูปแบบการประเมินคุณภาพของมะม่วงไทยด้วยเทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C สำหรับทุกช่วงเวลาการจัดเก็บ ตั้งแต่การเก็บเกี่ยวจนถึงการจำหน่ายสินค้าไปยังผู้บริโภค ทำให้ผู้ที่เกี่ยวข้องได้ทราบถึงระดับคุณภาพของมะม่วงไทยได้ทุกช่วงเวลาและนำข้อมูลมาประกอบการตัดสินใจเชิงธุรกิจ หรือการบริหารจัดการคุณภาพของมะม่วงได้อย่างเหมาะสม ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับระดับคุณภาพอยู่ 3 ปัจจัย คือ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และความแน่นเนื้อ แบ่งคุณภาพออกเป็น 4 ระดับ คือ ระดับไม่สุก ระดับสุกบางส่วน ระดับสุกพร้อมรับประทาน และระดับเน่าเสีย ข้อมูลดังกล่าวได้นำมาสร้างแบบจำลองการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C ณ.ช่วงการจัดเก็บ 1-45 วัน โดยใช้เทคนิคการพิจารณาความสอดคล้องของการแจกแจงความน่าจะเป็นและการทดสอบทางสถิติ ซึ่งมีความถูกต้องเหมาะสมกับข้อมูลจริง มีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองโดยเฉลี่ย  $0.6876 \pm 0.0449$  และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) โดยเฉลี่ย  $0.8881 \pm 0.0076$  แสดงว่ารูปแบบประเมินค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพ มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับข้อมูลจริงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

**คำสำคัญ:** มะม่วงไทย การประเมินคุณภาพและการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล

### Abstract

Mango is considered as one of the Thailand's major exporting fruits, achieving its massive export volume in foreign markets with different levels of purchasing power. Thailand is reportedly ranked the third for the world's largest mango exporter. Also, there are many factors

that decrease the competitiveness of the Thai mango including lack of production consistency, inferior production management, excessive production cost, and the soaring selling prices. In consequence, a large number of consumers decided to purchase mangoes from other business competitors. Admittedly, significant factors that influence the consumer's buying decision are the information of product quality, reasonable price, desirable taste and appearance. In order to solve the mentioned problems, it is necessary to study the quality assessment of Thai Mangoes related to the entire supply chain management from upstream to downstream. According to the study, the quality assessment of Thai Mangoes using Monte Carlo Simulation at the temperature of 13 °C throughout every stage of the storage, from harvesting to distributing the mangoes to the consumers, assure the quality level of the mangoes which benefits for the business decision making process or the quality management of Thai Mangoes. There are three significant factors that influence the quality level comprising total soluble solid, titratable acidity, and firmness. However, the quality level can be divided into four levels which are unripe, half-ripe, ripe and over-ripe. So, the data were modeled the quality index assessment of Thai Mangoes at the temperature of 13 °C, during storage time from 1-45 days with maximum likelihood estimation and statistical test. The result showed that the model had mean square error at  $0.6876 \pm 0.0449$  and coefficient of determination ( $R^2$ ) is  $0.8881 \pm 0.0076$  show that the model of quality index assessment is appropriate and corresponds to the actual data at an acceptable level.

**Keywords:** Mango, Quality Level Assessment and Monte Carlo

## บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่ประสบความสำเร็จในการเปิดตลาดการส่งออกผลไม้สดจากประเทศไทยเข้าสู่ตลาดต่างประเทศเป็นจำนวนมาก ในปี พ.ศ.2559 ที่ผ่านมามีประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกผลไม้ไทยไปจำหน่ายยังตลาดต่างประเทศจำนวน 71,088 ล้านบาท คิดเป็นมูลค่า 3,200 ล้านบาท โดยมีมูลค่าการส่งออกเพิ่มสูงขึ้นจากปี พ.ศ.2558 ร้อยละ 1.83 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2560) มีประเทศคู่ค้าที่สำคัญ คือ ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา เกาหลีใต้ เวียดนาม ออสเตรเลีย เยอรมัน และเนเธอร์แลนด์ ตามลำดับ เนื่องจากประเทศผู้นำเข้าเหล่านี้มีผลผลิตภายในประเทศไม่เพียงพอต่อความต้องการและมีต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ทำให้ต้องนำเข้าผลไม้สดจากประเทศคู่ค้าเป็นจำนวนมาก ทั้งจากประเทศไทย ฟิลิปปินส์ และอินเดีย ปัจจุบันประเทศไทยมีแหล่งผลิตผลไม้สดกระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาค ซึ่งมีกลุ่มเกษตรกร ผู้รวบรวม และผู้ประกอบการ เป็นผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องต่อการผลิต การแปรรูป และการจำหน่ายทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยผ่านกระบวนการคัดแยก ล้างน้ำ อบไอน้ำ แปรรูป และบรรจุภัณฑ์ นอกจากนี้ การเคลื่อนย้ายผลไม้สดไปยังตลาดเป้าหมายนั้นสามารถดำเนินการได้หลายรูปแบบ ทั้งการขนส่งทางถนน ทางเรือ ทางอากาศ และทางราง ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมีระยะเวลาการขนส่ง ต้นทุนค่าใช้จ่าย อัตราความเสียหาย และระดับความเสี่ยงแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความพึงพอใจและความสะดวก

ของกลุ่มผู้ประกอบการ อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมการส่งออกผลไม้สดจากประเทศไทยยังมีความเสี่ยงต่อการประสบปัญหาด้านคุณภาพจากวัตถุดิบที่มาจากภาคการเกษตรของไทยในระดับสูง ทั้งด้านความสดใหม่ ปริมาณผลผลิต และการพบสารปนเปื้อนในผลผลิต เนื่องจากคุณภาพของผลไม้สดจะสัมพันธ์กับระยะเวลาและอุณหภูมิการจัดเก็บผลผลิต โดยเฉพาะในช่วงฤดูการเก็บเกี่ยวที่มีผลผลิตออกมาสู่ท้องตลาดเป็นจำนวนมาก ทำให้ผู้ผลิตต้องซื้อและจัดเก็บวัตถุดิบเอาไว้เป็นวัตถุดิบจำนวนมาก ซึ่งเสี่ยงต่อการเน่าเสีย และต้นทุนต่อหน่วยที่เพิ่มสูงขึ้น รวมถึงการเลือกรูปแบบการขนส่งสินค้าที่ไม่สอดคล้องกับความสามารถในการจัดเก็บสินค้าเพื่อคงระดับคุณภาพสินค้าตามที่ลูกค้าต้องการ ดังนั้นหากมีการศึกษาแบบจำลองการประเมินคุณภาพของมะม่วงไทยด้วยวิธีมอนิเตอร์โลได้อย่างถูกต้องแม่นยำนั้น จะทำให้ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องสามารถนำผลการทำนายระดับคุณภาพของมะม่วงไทยไปเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเลือกรูปแบบการขนส่ง ระยะเวลาการจัดเก็บ หรือแนวทางการผลิตสินค้าที่เหมาะสมกับมะม่วงไทยได้ เนื่องจากแบบจำลองสามารถคาดการณ์สัดส่วนการเน่าเสีย และการสุกของมะม่วงไทยตามระยะเวลาการจัดเก็บที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C ได้ ทำให้ผู้ประกอบการสามารถลดต้นทุนการขนส่งต่อหน่วย เพิ่มระดับความพึงพอใจของลูกค้า อัตราผลกำไรต่อหน่วย และศักยภาพด้านการแข่งขันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## วิธีการดำเนินการวิจัย

### ศึกษาการประเมินคุณภาพของผลไม้จากดัชนีการสุก (Ripening Index, RPI)

การประเมินคุณภาพของมะม่วงไทยในปัจจุบันจะพิจารณาจากค่าดัชนีการสุกของมะม่วงที่ได้จากการตรวจวัดค่าผ่านการทดลองจากกลุ่มตัวอย่าง ทั้งค่าที่ได้จากการสังเกตและการตรวจวัดจากเครื่องมือ อาทิเช่น การสังเกตสีเปลือก และการนำสีมาทำการตรวจวัดค่าความแน่นเนื้อ กลิ่น และการเกิดจุดสีน้ำตาลหรือสีดำบนเปลือกมะม่วง เป็นต้น ซึ่งแต่ละสายพันธุ์จะมีวิธีการวิเคราะห์ และประมวลผลของปัจจัยที่มีผลต่อการสุกแตกต่างกัน โดยปัจจัยที่มีผลต่อความสุกของมะม่วง คือ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total Soluble Solid, TSS) ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Titratable Acidity, TA) และความแน่นเนื้อหรือค่าสี (Firmness, FN) โดยค่าของปัจจัยเหล่านี้จะนำไปคำนวณดัชนีการสุกของมะม่วงไทยได้ (Crisosto, 1994; Mahayothee, 2004) นอกจากนี้ เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาของมะม่วงไทยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกัน แต่ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และค่าความแน่นเนื้อจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาการจัดเก็บของผลไม้ อีกทั้งข้อมูลสัดส่วนของกรดและน้ำตาลจะสามารถทำนายคุณภาพของมะม่วงได้แม่นยำกว่าปริมาณของกรด หรือปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เพียงปัจจัยเดียว (Mahayothee, 2004; Vásquez-Caicedo et al., 2005) จะเห็นได้ว่าการพิจารณาดัชนีการสุกจากหลายปัจจัยจะมีความแม่นยำมากกว่าการพิจารณาดัชนีการสุกเพียงปัจจัยเดียว ทำให้มีการพัฒนารูปแบบการทำนายดัชนีการสุกของมะม่วง (Ripening Index, RPI) โดยการนำหลายๆ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องมาพิจารณาร่วมกันเพื่อทำการประเมินคุณภาพของมะม่วง หรือผลไม้ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน เพื่อความถูกต้องและแม่นยำของผลการทำนาย (Prange et al., 1998)

อย่างไรก็ตาม การศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อดัชนีการสุกของมะม่วงนั้น พบว่า มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องอยู่ 3 ปัจจัย คือ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (TSS) ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (TA) และความแน่นเนื้อ (FN) (Mahayothee, 2004) ซึ่งค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงจะเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบ

ต่อดัชนีการสุกมากที่สุด ส่วนปัจจัยด้านปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของมะม่วงนั้น จะมีผลกระทบต่อดัชนีการสุกในสัดส่วนเท่าๆ กัน โดยนำดัชนีการสุก (RPI) มาใช้ตรวจสอบระดับการสุกหลังการเก็บเกี่ยวของมะม่วงสด (Mahayothee, 2004) ซึ่งค่าดัชนีการสุกสามารถคำนวณจากสมการที่ (1)

$$RPI = \ln \left( \frac{100 \times FN \times TA}{TSS} \right) \quad (1)$$

เมื่อค่าดัชนีการสุกมีค่าลดลง แสดงว่า ผลมะม่วงไทยจะมีสภาวะการสุกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าดัชนีการสุกจะแปรผกผันกับสภาวะการสุกของผลมะม่วงสด โดยดัชนีการสุกของมะม่วงได้พัฒนามาจากข้อมูลคุณสมบัติเฉพาะของมะม่วง ที่ได้มาจากการจัดเก็บข้อมูลของผลการทดลองที่ต้องทำลายผลผลิต เพื่อทำการตรวจวัดค่าสำหรับทุกๆ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำนายดัชนีการสุก และนำผลการทดลองดังกล่าวมาพัฒนาเป็นสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายดัชนีการสุกของมะม่วงต่อไป ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นของปัจจัยดัชนีการสุกของมะม่วงสดแบบไม่ทำลายผลผลิตที่เกิดขึ้น พบว่า มีรูปแบบความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับการประเมินดัชนีการสุกของมะม่วงสดแบบทำลายผลผลิต (อาทิ กลิ่น และสีเปลือก) ส่งผลให้สมการทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวสามารถนำมาใช้เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะม่วงไทยได้ (Mahayothee, 2004) นอกจากนี้ดัชนีการสุกของมะม่วงได้มีการแบ่งระดับการสุก หรือระดับคุณภาพออกเป็น 4 ระดับ คือ ระดับไม่สุก ระดับสุกบางส่วน ระดับสุกพร้อมรับประทาน และระดับเน่าเสีย (Vasquez-Caicedo et al., 2005) ซึ่งเกณฑ์การแบ่งแยกประเภทแต่ละระดับการสุกสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของระดับดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทย

| อันดับ | ค่าดัชนีการสุก (RPI) | ระดับคุณภาพ |
|--------|----------------------|-------------|
| 1      | $RPI > 5$            | ดิบ         |
| 2      | $4 < RPI \leq 5$     | สุกบางส่วน  |
| 3      | $2 < RPI \leq 4$     | สุก         |
| 4      | $RPI \leq 2$         | เน่าเสีย    |

ที่มา : Mahayothee et al., 2007; Vasquez-Caicedo et al., 2005

### ทฤษฎีการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล

การจำลองสถานการณ์ คือ การสร้างสถานการณ์สมมติโดยอาศัยข้อเท็จจริงเสมือนสถานการณ์เพื่อทดลอง ตัดสินใจ แก้ปัญหา และวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้รับจากการทดลองก่อนนำไปใช้แก้ปัญหาในสถานการณ์จริงต่อไป การจำลองสถานการณ์เป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจในกระบวนการแก้ปัญหาซึ่งมีมานานแล้ว แบบจำลองสถานการณ์วิธีมอนติคาร์โลจัดเป็นแบบจำลองสถานการณ์ความน่าจะเป็นโดยมีการแจกแจงแบบไม่ต่อเนื่อง และเป็นวิธีพยากรณ์เชิงปริมาณ แบบจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับ

ระบบงานที่มีองค์ประกอบของระบบในรูปแบบที่มีพฤติกรรมการทำงานไม่แน่นอน หรือระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ที่ต้องใช้ตัวเลขสุ่มเป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหา ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นในกรณีการหาคำตอบของปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนเกินกว่าจะใช้ระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Analysis) ในการหาคำตอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาที่มีลักษณะของการปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยหลายๆ ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

จุดเด่นของระเบียบวิธีมอนติคาร์โล คือ สามารถควบคุมตัวแปรแทรกซ้อนและดำเนินการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลได้อย่างสมบูรณ์ รวมทั้งยังสามารถทำการทดลองซ้ำๆ กันภายใต้สภาพแวดล้อมเดิมๆ ได้หลายครั้ง ส่วนการทดลองจริงนั้นไม่สามารถทำได้ เพราะไม่สามารถรักษาสภาพแวดล้อมให้คงที่ได้เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป

หลักการสำคัญของระเบียบวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) คือ การนำเอาตัวเลขสุ่ม (Random Number) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนได้ ซึ่งมีขั้นตอนที่สำคัญดังนี้

1. การสร้างตัวเลขสุ่ม การสร้างแบบจำลองสถานการณ์ในทุกเหตุการณ์จะต้องกำหนดองค์ประกอบและความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบด้วยค่าเชิงปริมาณ

2. การสร้างค่าตัวแปรสุ่ม จะดำเนินการหลังจากสร้างค่าเลขสุ่มด้วยการแจกแจงแบบสมมาตรมาตรฐาน

3. การนำตัวเลขสุ่มมาประยุกต์ใช้กับปัญหา ขั้นตอนนี้เป็น การนำตัวเลขสุ่มไปสร้างตัวแปรตามลักษณะการแจกแจงของปัญหาที่ดำเนินการศึกษา

4. ดำเนินการทดลองซ้ำๆ กันหลายครั้ง ซึ่งหลักการสำคัญประการหนึ่งของระเบียบวิธีมอนติคาร์โล คือ ต้องมีการทดลองซ้ำๆ กันหลายครั้ง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของคำตอบที่ได้ (Hamersley and Handscomb, 1964) และสามารถสรุปคำตอบในรูปแบบของความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์สำหรับปัญหาดังกล่าวได้

5. คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่าประมาณเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดได้ โดยอ้างอิงผลการคำนวณจากการทดลองซ้ำๆ กันจำนวน  $n$  รอบ

6. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เพื่อประเมินความเหมาะสมของฟังก์ชันตัวแปรสุ่มของทุกปัจจัยการประเมินคุณภาพ และความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ ซึ่งค่า  $R^2$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้า  $R^2$  มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า ฟังก์ชันตัวแปรสุ่มของปัจจัยการประเมินคุณภาพของมะม่วงไทยที่ได้มานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลจริง สามารถนำไปเพื่อพยากรณ์ค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพได้ดี เนื่องจากค่าที่ได้จากตัวแปรสุ่มมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับข้อมูลจริงของปัจจัยการประเมินคุณภาพของมะม่วง แต่ถ้า  $R^2$  มีค่าเข้าใกล้ 0 หมายความว่า ฟังก์ชันตัวแปรสุ่มของปัจจัยการประเมินคุณภาพของมะม่วงไทย สามารถนำมาใช้เพื่อพยากรณ์ค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงได้ไม่ดี เนื่องจากค่าที่ได้จากตัวแปรสุ่มไม่มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับข้อมูลจริงของปัจจัยการประเมินคุณภาพของมะม่วงไทย

### ทฤษฎีการสร้างตัวเลขสุ่ม

การสร้างตัวเลขสุ่มเพื่อให้ได้ข้อมูลใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมากที่สุดนั้น ต้องทราบการแจกแจงของตัวแปรสุ่ม หรือปัจจัยที่ต้องการศึกษาและเกี่ยวข้องทั้งหมด ซึ่งในการสร้างแบบจำลองนั้นต้องสร้างตัวแปรสุ่ม (random variables) แทนข้อมูลของปัจจัยนำเข้า หรือปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตาม (Independent Variables) ที่มีการแจกแจงตามระบบจริงที่ศึกษา ซึ่งหลักการสร้างตัวแปรสุ่มจะเริ่มจากการสร้างเลข วิธีที่นิยมใช้สร้างเลขสุ่ม คือวิธี Multiplicative Congruential Generator โดยจะให้เลขสุ่มที่เรียกว่า เลขสุ่มเทียม (Pseudo-random number) เนื่องจากเป็นเลขที่เกิดจากการดำเนินการด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ และซอฟต์แวร์ (วิลลวอร์น, 2545) ซึ่งการสร้างตัวเลขสุ่มเทียมที่เหมาะสมสำหรับใช้งานทั่วไป ต้องผ่านการทดสอบทางสถิติทั้งหมดก่อนนำไปใช้งานจริงได้ ขั้นตอนการสร้างเลขสุ่มเริ่มจากกำหนดค่าฟังก์ชัน

1) การสร้างตัวเลขสุ่มด้วยการแจกแจงแบบเอกรูปต่อเนื่อง (Continuous uniform distribution) โดยตัวเลขที่เลือกจะต้องมาจากการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเอกรูป สามารถสร้างโดยใช้การแจกแจงแบบสะสม (Cumulative distribution function) ซึ่งค่าที่ได้ของตัวเลขสุ่มแบบเอกรูปแบบอุดมคติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ( $x \sim U(0,1)$ ) โดยมีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นดังสมการ (2)

$$F(x) = \begin{cases} 0 & ; x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & ; a \leq x < b \\ 1 & ; x \geq b \end{cases} \quad (2)$$

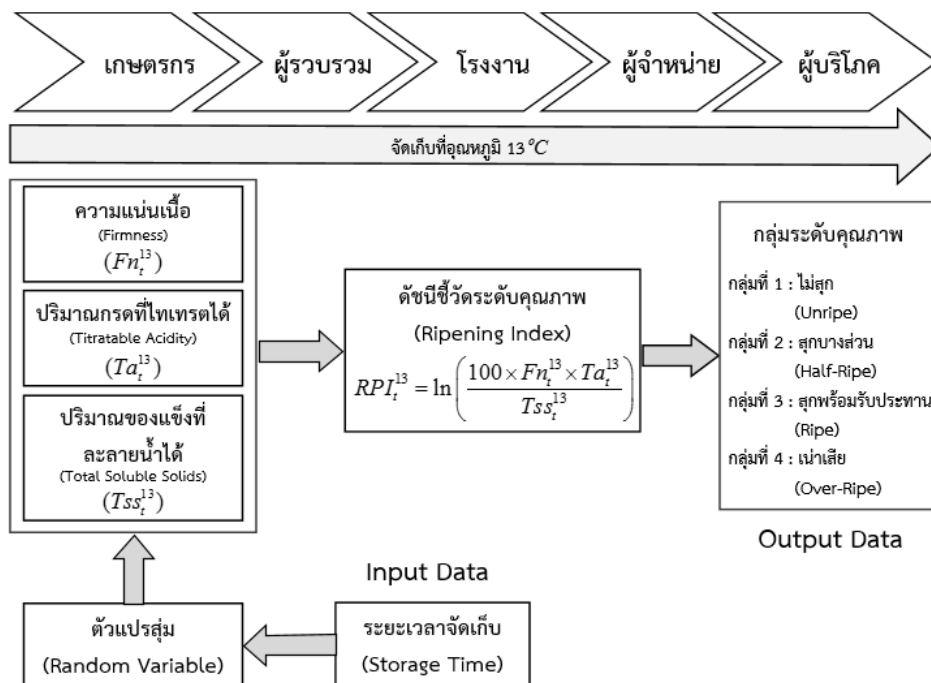
2) การแปลงแบบผกผันของฟังก์ชันการแจกแจงข้อมูล (Inverse Transformation) จะดำเนินการสร้างตัวเลขสุ่ม  $x$  จากฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม  $F(x)$  โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการแปลงแบบผกผัน (inverse transformation) ซึ่งจะดำเนินการแปลงผกผันฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative probability function,  $F(x)$ ) ของตัวแปรสุ่ม  $x$  ดังนั้นการกำหนดค่าของตัวแปรสุ่ม  $x$  ที่มีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นที่เกิดจากความน่าจะเป็นสะสมของตัวแปรสุ่ม  $x$  สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$\begin{aligned} U &= F(x) \\ x &= F^{-1}(U) \end{aligned} \quad (3)$$

### วิธีการสร้างฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อการประเมินคุณภาพของมะม่วงไทย

สำหรับรูปแบบการพัฒนาฟังก์ชันการประเมินคุณภาพของมะม่วงไทยนั้น ผู้วิจัยได้นำเทคนิควิธีการสร้างตัวแปรสุ่มจากฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Function) ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพมาพิจารณาหาความสัมพันธ์ที่ทำให้ได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบข้อมูลในสถานการณ์จริง โดยปัจจัยที่มีผลต่อดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยประกอบด้วย ค่าความแน่นเนื้อ ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และค่าปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Rungpichayapichet et al., 2016) เนื่องจากผู้ประกอบการและผู้ประเมินคุณภาพของมะม่วงไทยไม่สามารถหาข้อมูลพื้นฐานมาประกอบการประเมินคุณภาพได้ เพราะการได้มาของข้อมูลสำหรับปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการประเมิน

คุณภาพผลไม้มักต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดเตรียมวัตถุดิบ การทดลอง และการทำลายของเสียเป็นจำนวนมาก รวมทั้งยังต้องใช้ระยะเวลาในการทดลองเป็นเวลานานอีกด้วย ดังนั้นการประเมินคุณภาพมะม่วงไทยโดยใช้เทคนิควิธีการสร้างตัวแปรสุ่มและตัวแบบจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการตรวจรับ และการจัดเตรียมข้อมูลเพื่อประกอบการตัดสินใจของผู้ประกอบการในธุรกิจผลไม้มักจะได้เป็นอย่างดี โดยมีรูปแบบการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพที่ได้กำหนดรูปแบบของฟังก์ชันการประเมินคุณภาพของมะม่วงไทยตามลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลสำหรับทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีชี้วัดการสุกของมะม่วงไทยที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C ดังภาพที่ 1 ซึ่งเริ่มตั้งแต่การกำหนดระยะเวลาการประเมินคุณภาพ แล้วนำมาสร้างตัวแปรสุ่มตามช่วงระยะเวลาการจับเก็บ ( $U_t$ ) สำหรับทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้อง หลังจากนั้นนำมาประเมินหาค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพและจัดแบ่งระดับคุณภาพของมะม่วงไทยต่อไป



ภาพที่ 1 กระบวนการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C

การประเมินจะครอบคลุมทุกช่วงระยะเวลาการจับเก็บที่เป็นไปได้ (1-28 วัน) ทั้งหมดที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C นอกจากนี้ ยังมีการหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของฟังก์ชัน ( $R^2$ ) เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมและความสอดคล้องของข้อมูลที่ได้จากการพยากรณ์กับข้อมูลจริง โดยมีรายละเอียดของการสร้างแบบจำลองสถานการณ์การประเมินค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพและจัดแบ่งระดับคุณภาพ ดังนี้

1. ศึกษา ทดลอง และเก็บรวบรวมข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทย (ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และความแน่นเนื้อ) โดย

ทำการทดลองกับผลมะม่วงที่เป็นกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 56 ตัวอย่าง (จากโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ที่ระดับอำนาจการทดสอบ 0.8 และระดับนัยสำคัญ 0.05) ด้วยวิธีการสุ่มอย่างง่ายตามระยะเวลาการจัดเก็บที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C

2. วิเคราะห์ความสอดคล้องของการแจกแจงความน่าจะเป็นกับข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองจริง โดยการทดสอบสมมติฐานด้วยการทดสอบของโคโมโกรอฟ-สเมอร์นอฟ (Kolmogorov-Smirnov Test) สำหรับกรณีข้อมูลมีจำนวนน้อย ( $n < 100$ ) เนื่องจากการทดสอบไคสแควร์มีข้อจำกัดด้านความไวต่อจำนวนช่วงของฮิสโตแกรม (Histogram) ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะของฮิสโตแกรมได้เมื่อขนาดของกลุ่มตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงขึ้น

3. สร้างฟังก์ชันตัวแปรสุ่มสำหรับทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C ประกอบด้วย ความแน่นเนื้อ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้

4. สร้างแบบจำลองการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C จากฟังก์ชันตัวแปรสุ่ม และตัวเลขสุ่มของปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด

5. ดำเนินการทดลองการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C ซ้ำๆ กันหลายครั้ง เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพและลดความคลาดเคลื่อนของคำตอบที่ได้จากฟังก์ชันตัวแปรสุ่มที่ได้จากการทดลองจริง

6. คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่าประมาณเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดได้ โดยอ้างอิงผลการคำนวณจากการทดลองซ้ำๆ กันจำนวน 5,000 รอบ ซึ่งพิจารณาจากค่าระดับความผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้

7. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เพื่อประเมินความเหมาะสมและความสอดคล้องของฟังก์ชันตัวแปรสุ่มกับข้อมูลจริง ซึ่งค่า  $R^2$  ที่ได้ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 จึงสามารถสรุปได้ว่าฟังก์ชันตัวแปรสุ่มของปัจจัยการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยดังกล่าว มีความเหมาะสมและความสอดคล้องกับข้อมูลจริง สามารถนำฟังก์ชันตัวแปรสุ่มไปใช้พยากรณ์ค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพสำหรับทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้ดี เนื่องจากค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยที่ได้จากตัวแปรสุ่มมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง

## ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอรูปแบบการประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล เพื่อประเมินคุณภาพของมะม่วงไทยที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C ที่เกิดขึ้นช่วงระยะเวลาตั้งแต่การเก็บเกี่ยวจนถึงการจำหน่ายสินค้าไปยังผู้บริโภค เพื่อให้ผู้ที่เกี่ยวข้องได้ทราบถึงระดับคุณภาพในแต่ละช่วงการจัดเก็บมะม่วงไทย และนำข้อมูลดังกล่าวมาประกอบการตัดสินใจในเชิงธุรกิจหรือการบริหารจัดการด้านคุณภาพสำหรับมะม่วงไทยได้อย่างเหมาะสม ซึ่งในการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยนั้นได้มีปัจจัยที่มีผลต่อระดับคุณภาพอยู่ 3 ปัจจัย คือ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และความแน่นเนื้อ โดยมีการแบ่งระดับการสุกหรือระดับคุณภาพออกเป็น 4 ระดับ คือ ระดับไม่สุก ระดับสุกบางส่วน ระดับสุกพร้อมรับประทาน และระดับเน่าเสีย ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อนำ



ผลการศึกษามาดำเนินการสร้างแบบจำลองการประเมินชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C โดยใช้เทคนิคการพิจารณาความสอดคล้องของการแจกแจงความน่าจะเป็น และการทดสอบเชิงตัวเลขด้วยสมมติฐานทางสถิติโดยการทดสอบของโคโมโกรอฟ-สเมอร์นอฟ สามารถดำเนินการสร้างแบบจำลองสถานการณ์การประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพ คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่าประมาณเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ เพื่อสังเกตพฤติกรรม ความถูกต้อง และความสอดคล้องของค่าประมาณเทียบกับผลการทดลองจริงของดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยที่อุณหภูมิ 13 °C ซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้

1. ฟังก์ชันตัวแปรสุ่มสำหรับทุกปัจจัยการประเมินคุณภาพมะม่วงไทย จากผลการทดลองและเก็บข้อมูลสำหรับทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีชี้วัดคุณภาพ ได้นำมาวิเคราะห์ความสอดคล้องของการแจกแจงความน่าจะเป็นด้วยฟังก์ชันการวิเคราะห์ข้อมูลนำเข้า (Input Analyzer) จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปด้านการจำลองสถานการณ์ และมีค่าความผิดพลาดน้อยกำลังสองที่สุด ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความสอดคล้องของฟังก์ชันความน่าจะเป็นสำหรับทุกปัจจัยที่อุณหภูมิ 13 °C

| ช่วงเวลา  | ปัจจัย               | การแจกแจง                    | ฟังก์ชันการแจกแจง          | Sq Error | p-val |
|-----------|----------------------|------------------------------|----------------------------|----------|-------|
| 1-7 วัน   | Firmness             | Normal Dist <sup>ln</sup>    | NORM(6.9, 1.45)            | 0.1550   | 0.15  |
|           | Total soluble solids | Beta Dist <sup>ln</sup>      | 4+8*BETA(1.76, 1.48)       | 0.0229   | 0.15  |
|           | Titrateable Acidity  | Lognormal Dist <sup>ln</sup> | 0.78+LOGN(0.476, 0.224)    | 0.0038   | 0.15  |
| 8-14 วัน  | Firmness             | Beta Dist <sup>ln</sup>      | 12*BETA(2.87, 1.93)        | 0.0015   | 0.15  |
|           | Total soluble solids | Gamma Dist <sup>ln</sup>     | 8+GAMM(1.16, 3.38)         | 0.0062   | 0.15  |
|           | Titrateable Acidity  | Lognormal Dist <sup>ln</sup> | 0.63+LOGN(0.357, 0.234)    | 0.0053   | 0.15  |
| 15-21 วัน | Firmness             | Lognormal Dist <sup>ln</sup> | LOGN(4.89, 4.03)           | 0.0076   | 0.15  |
|           | Total soluble solids | Normal Dist <sup>ln</sup>    | NORM(14.6, 1.42)           | 0.0433   | 0.15  |
|           | Titrateable Acidity  | Normal Dist <sup>ln</sup>    | NORM(0.832, 0.12)          | 0.0077   | 0.15  |
| 22-28 วัน | Firmness             | Lognormal Dist <sup>ln</sup> | 0.14+LOGN(0.519, 0.289)    | 0.0044   | 0.15  |
|           | Total soluble solids | Normal Dist <sup>ln</sup>    | NORM(15.7, 0.842)          | 0.0212   | 0.15  |
|           | Titrateable Acidity  | Gamma Dist <sup>ln</sup>     | 0.26+GAMM(0.069, 4.4)      | 0.0038   | 0.15  |
| 29-45 วัน | Firmness             | Beta Dist <sup>ln</sup>      | 0.05+0.51*BETA(2.67, 4.29) | 0.0074   | 0.15  |
|           | Total soluble solids | Gamma Dist <sup>ln</sup>     | 14+GAMM(0.61, 4.2)         | 0.0160   | 0.15  |
|           | Titrateable Acidity  | Lognormal Dist <sup>ln</sup> | 0.07+LOGN(0.21, 0.0908)    | 0.0105   | 0.15  |

หมายเหตุ: ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการพิจารณาความสอดคล้องของฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นกับผลการทดลองจริงสำหรับทุกปัจจัยการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C ทั้งความแน่นเนื้อ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ สามารถสรุปฟังก์ชันการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพได้ดังนี้

1.1 ฟังก์ชันการประเมินค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงตามระยะเวลาจัดเก็บที่อุณหภูมิ 13 °C สามารถสร้างฟังก์ชันตัวแปรสุ่มได้ ดังสมการที่ (4)

$$FN_t^{13} = \begin{cases} F_N^{-1}(U_t, 6.90, 1.45) & ; 1 \leq t \leq 7 \\ 12 \times F_B^{-1}(U_t, 2.87, 1.93) & ; 7 < t \leq 14 \\ \ln \{ F_{LN}^{-1}(U_t, 4.890, 4.03) \} & ; 14 < t \leq 21 \\ 0.14 + \ln \{ F_{LN}^{-1}(U_t, 0.519, 0.289) \} & ; 21 < t \leq 28 \\ 0.05 + 0.51 \times F_B^{-1}(U_t, 2.67, 4.29) & ; 28 < t \leq 45 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{โดยที่ } U_t = \begin{cases} U(0.275, 1.00) & ; 1 \leq t \leq 7 \\ U(0.10, 0.80) & ; 7 < t \leq 14 \\ U(0.18, 0.92) & ; 14 < t \leq 21 \\ U(0.11, 1.00) & ; 21 < t \leq 28 \\ U(0.00, 1.00) & ; 28 < t \leq 45 \end{cases}$$

1.2 ฟังก์ชันการประเมินค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของมะม่วงตามระยะเวลาจัดเก็บที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C สามารถสร้างฟังก์ชันตัวแปรสุ่มได้ ดังสมการที่ (5)

$$TSS_t^{13} = \begin{cases} 4 + 8 \times F_B^{-1}(U_t, 1.76, 1.48) & ; 1 \leq t \leq 7 \\ 8 \times F_{GM}^{-1}(U_t, 1.16, 3.38) & ; 7 < t \leq 14 \\ F_N^{-1}(U_t, 14.60, 1.42) & ; 14 < t \leq 21 \\ F_N^{-1}(U_t, 15.70, 0.842) & ; 21 < t \leq 28 \\ 14 + F_{GM}^{-1}(U_t, 0.61, 4.20) & ; 28 < t \leq 45 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{โดยที่ } U_t = \begin{cases} U(0.08, 0.70) & ; 1 \leq t \leq 7 \\ U(0.30, 0.90) & ; 7 < t \leq 14 \\ U(0.02, 0.95) & ; 14 < t \leq 21 \\ U(0.00, 1.00) & ; 21 < t \leq 28 \\ U(0.28, 0.91) & ; 28 < t \leq 45 \end{cases}$$

1.3 ฟังก์ชันการประเมินค่าปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของมะม่วงตามระยะเวลาจัดเก็บที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C สามารถสร้างฟังก์ชันตัวแปรสุ่มได้ ดังสมการที่ (6)

$$TA_t^{13} = \begin{cases} 0.78 + \ln \{ F_{LN}^{-1}(U_t, 0.476, 0.224) \} & ; 1 \leq t \leq 7 \\ 0.63 + \ln \{ F_{LN}^{-1}(U_t, 0.357, 0.234) \} & ; 7 < t \leq 14 \\ F_N^{-1}(U_t, 0.832, 0.120) & ; 14 < t \leq 21 \\ 0.26 + F_{GM}^{-1}(U_t, 0.069, 4.400) & ; 21 < t \leq 28 \\ 0.07 + \ln \{ F_{LN}^{-1}(U_t, 0.210, 0.091) \} & ; 28 < t \leq 45 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{โดยที่ } U_t = \begin{cases} U(0.15, 0.98) & ; 1 \leq t \leq 7 \\ U(0.11, 0.94) & ; 7 < t \leq 14 \\ U(0.00, 1.00) & ; 14 < t \leq 21 \\ U(0.75, 0.90) & ; 21 < t \leq 28 \\ U(0.05, 1.00) & ; 28 < t \leq 45 \end{cases}$$

1.4 ฟังก์ชันการประเมินค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงตามระยะเวลาจัดเก็บที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C สามารถสร้างฟังก์ชันการพยากรณ์ค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพได้ ดังสมการที่ (7)

$$RI_t^{13} = \ln \left( \frac{100 \times Fn_t^{13} \times Ta_t^{13}}{Tss_t^{13}} \right) \quad (7)$$

ซึ่ง  $F_B^{-1}(U_t, \alpha, \beta)$  คือ ฟังก์ชันผกผันการแจกแจงแบบเบต้า ด้วยพารามิเตอร์  $U_t, \alpha$  และ  $\beta$

$F_N^{-1}(U_t, \mu, \sigma)$  คือ ฟังก์ชันผกผันการแจกแจงแบบปกติ ด้วยพารามิเตอร์  $U_t, \mu$  และ  $\sigma^2$

$F_{LN}^{-1}(U_t, \mu, \sigma)$  คือ ฟังก์ชันผกผันการแจกแจงแบบล็อกปกติ ด้วยพารามิเตอร์  $U_t, \mu$  และ  $\sigma$

$F_{GM}^{-1}(U_t, \alpha, \beta)$  คือ ฟังก์ชันผกผันการแจกแจงแบบแกมมา ด้วยพารามิเตอร์  $U_t, \alpha$  และ  $\beta$

$Ta_t^{13}$  คือ ค่าปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ที่อุณหภูมิ 13 °C ณ ช่วงเวลาจัดเก็บ t วัน

$Fn_t^{13}$  คือ ค่าความแน่นเนื้อที่อุณหภูมิ 13 °C ณ ช่วงเวลาจัดเก็บ t วัน

$Tss_t^{13}$  คือ ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิ 13 °C ณ ช่วงเวลาจัดเก็บ t วัน

$RI_t^{13}$  คือ ค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงที่อุณหภูมิ 13 °C ณ ช่วงเวลาจัดเก็บ t วัน

$U_t$  คือ ตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ ณ ช่วงเวลาจัดเก็บ t วัน

t คือ ระยะเวลาการจัดเก็บสินค้าตั้งแต่เก็บเกี่ยวจนถึงเวลาประเมิน (วัน)

2. แบบจำลองสถานการณ์การประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วง ที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C จากผลการวิเคราะห์รูปแบบฟังก์ชันตัวแปรสุ่มและการสร้างตัวเลขสุ่มของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถนำมาสร้างแบบจำลองสถานการณ์การประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วง เพื่อสังเกตพฤติกรรมและความถูกต้องของระดับคุณภาพของมะม่วงที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินของแบบจำลองสถานการณ์โดยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) เป็นเทคนิคการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์โดยนำค่าตัวเลขสุ่มและฟังก์ชันตัวแปรสุ่มที่สอดคล้องกับการกระจายข้อมูลของแต่ละปัจจัยที่เกี่ยวข้องมาจำลองข้อมูลดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงภายใต้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การจำลองสถานการณ์การประเมินคุณภาพของมะม่วงโดยวิธีมอนติคาร์โล ที่อุณหภูมิ 13 °C

| วันที่<br>จัดเก็บ | การสร้างตัวเลขสุ่ม |                  |                 | การสร้างค่าตัวแปรสุ่ม |              |             | $RI_t^{13}$ | กลุ่มคุณภาพ |
|-------------------|--------------------|------------------|-----------------|-----------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
|                   | $U_t^{Fn}(0,1)$    | $U_t^{Tss}(0,1)$ | $U_t^{Ta}(0,1)$ | $Fn_t^{13}$           | $Tss_t^{13}$ | $Ta_t^{13}$ |             |             |
| 1                 | 0.3932             | 0.4067           | 0.3917          | 6.51                  | 7.86         | 1.19        | 4.59        | Half-Ripe   |
| 2                 | 0.2849             | 0.5175           | 0.8334          | 6.08                  | 8.53         | 1.47        | 4.65        | Half-Ripe   |
| 3                 | 0.6859             | 0.6373           | 0.6646          | 7.60                  | 9.24         | 1.35        | 4.71        | Half-Ripe   |
| 4                 | 0.7466             | 0.6566           | 0.2710          | 7.86                  | 9.35         | 1.12        | 4.54        | Half-Ripe   |
| 5                 | 0.4924             | 0.6486           | 0.3565          | 6.87                  | 9.31         | 1.17        | 4.46        | Half-Ripe   |
| 6                 | 0.6607             | 0.0891           | 0.6130          | 7.50                  | 5.52         | 1.32        | 5.19        | Unripe      |
| 7                 | 0.5730             | 0.6056           | 0.1644          | 7.17                  | 9.05         | 1.04        | 4.41        | Half-Ripe   |
| 8                 | 0.3487             | 0.3138           | 0.3915          | 6.24                  | 9.65         | 0.92        | 4.09        | Half-Ripe   |
| 9                 | 0.3232             | 0.3086           | 0.4986          | 6.03                  | 9.62         | 0.99        | 4.12        | Half-Ripe   |
| 10                | 0.4586             | 0.8945           | 0.1859          | 7.06                  | 16.51        | 0.78        | 3.50        | Ripe        |
| 11                | 0.4169             | 0.5027           | 0.3231          | 6.75                  | 10.89        | 0.88        | 4.00        | Ripe        |
| 12                | 0.7588             | 0.8523           | 0.4830          | 9.16                  | 15.32        | 0.98        | 4.07        | Half-Ripe   |
| 13                | 0.2069             | 0.6770           | 0.1573          | 5.01                  | 12.49        | 0.75        | 3.41        | Ripe        |
| 14                | 0.4310             | 0.7208           | 0.1862          | 6.86                  | 13.02        | 0.78        | 3.71        | Ripe        |
| 15                | 0.6533             | 0.2390           | 0.8039          | 6.48                  | 13.59        | 0.93        | 3.80        | Ripe        |
| 16                | 0.2025             | 0.3447           | 0.0949          | 1.53                  | 14.03        | 0.67        | 2.00        | Over-Ripe   |
| 17                | 0.8887             | 0.3364           | 0.7194          | 9.81                  | 14.00        | 0.90        | 4.15        | Half-Ripe   |
| 18                | 0.3435             | 0.6548           | 0.6911          | 3.27                  | 15.17        | 0.89        | 2.96        | Ripe        |
| 19                | 0.8100             | 0.8630           | 0.6985          | 8.43                  | 16.15        | 0.89        | 3.84        | Ripe        |
| 20                | 0.2268             | 0.6929           | 0.4509          | 1.87                  | 15.32        | 0.82        | 2.30        | Ripe        |
| 21                | 0.8211             | 0.4449           | 0.9905          | 8.60                  | 14.40        | 1.11        | 4.20        | Half-Ripe   |
| 22                | 0.1980             | 0.6297           | 0.8280          | 0.41                  | 15.98        | 0.44        | 0.12        | Over-Ripe   |

| วันที่<br>จัดเก็บ | การสร้างตัวเลขสุ่ม |                  |                 | การสร้างค่าตัวแปรสุ่ม |              |             | $RI_t^{13}$ | กลุ่มคุณภาพ |
|-------------------|--------------------|------------------|-----------------|-----------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
|                   | $U_t^{Fn}(0,1)$    | $U_t^{Tss}(0,1)$ | $U_t^{Ta}(0,1)$ | $Fn_t^{13}$           | $Tss_t^{13}$ | $Ta_t^{13}$ |             |             |
| 23                | 0.6596             | 0.5414           | 0.7580          | 0.78                  | 15.79        | 0.31        | 0.42        | Over-Ripe   |
| 24                | 0.5128             | 0.4491           | 0.8057          | 0.67                  | 15.59        | 0.38        | 0.48        | Over-Ripe   |
| 25                | 0.2910             | 0.7737           | 0.8101          | 0.50                  | 16.33        | 0.39        | 0.17        | Over-Ripe   |
| 26                | 0.6264             | 0.0486           | 0.7892          | 0.75                  | 14.30        | 0.35        | 0.60        | Over-Ripe   |
| 27                | 0.4579             | 0.1587           | 0.8013          | 0.63                  | 14.86        | 0.37        | 0.44        | Over-Ripe   |
| 28                | 0.5464             | 0.5959           | 0.8520          | 0.69                  | 15.90        | 0.53        | 0.84        | Over-Ripe   |
| 29                | 0.7869             | 0.8182           | 0.5893          | 0.32                  | 18.55        | 0.30        | -0.66       | Over-Ripe   |
| 30                | 0.3723             | 0.4559           | 0.7121          | 0.21                  | 15.14        | 0.33        | -0.78       | Over-Ripe   |
| 31                | 0.8675             | 0.6303           | 0.9403          | 0.35                  | 16.24        | 0.42        | -0.09       | Over-Ripe   |
| 32                | 0.1571             | 0.8587           | 0.0537          | 0.15                  | 19.42        | 0.13        | -2.25       | Over-Ripe   |
| 33                | 0.6877             | 0.8357           | 0.2732          | 0.29                  | 18.89        | 0.23        | -1.07       | Over-Ripe   |
| 34                | 0.0405             | 0.7618           | 0.7200          | 0.11                  | 17.64        | 0.33        | -1.60       | Over-Ripe   |
| 35                | 0.8522             | 0.7714           | 0.5473          | 0.34                  | 17.78        | 0.29        | -0.58       | Over-Ripe   |
| 36                | 0.2317             | 0.8371           | 0.3522          | 0.17                  | 18.92        | 0.25        | -1.49       | Over-Ripe   |
| 37                | 0.7204             | 0.6961           | 0.3025          | 0.30                  | 16.85        | 0.23        | -0.89       | Over-Ripe   |
| 38                | 0.1195             | 0.7747           | 0.2915          | 0.14                  | 17.82        | 0.23        | -1.71       | Over-Ripe   |
| 39                | 0.6570             | 0.5705           | 0.8760          | 0.28                  | 15.79        | 0.38        | -0.38       | Over-Ripe   |
| 40                | 0.2552             | 0.7930           | 0.8309          | 0.18                  | 18.11        | 0.37        | -1.01       | Over-Ripe   |
| 41                | 0.9451             | 0.8428           | 0.7376          | 0.40                  | 19.05        | 0.34        | -0.35       | Over-Ripe   |
| 42                | 0.8768             | 0.6573           | 0.5784          | 0.35                  | 16.47        | 0.30        | -0.44       | Over-Ripe   |
| 43                | 0.2393             | 0.9055           | 0.5517          | 0.18                  | 20.84        | 0.29        | -1.40       | Over-Ripe   |
| 44                | 0.1719             | 0.4477           | 0.4732          | 0.16                  | 15.10        | 0.27        | -1.26       | Over-Ripe   |
| 45                | 0.1473             | 0.8156           | 0.6208          | 0.15                  | 18.50        | 0.31        | -1.39       | Over-Ripe   |

3. การวิเคราะห์ความถูกต้องของรูปแบบการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C จากแบบจำลองสถานการณ์โดยวิธีมอนติคาร์โลมาทำการทดลองภายใต้ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดลองจริง ซึ่งหากผลลัพธ์ที่ได้มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกับค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองจริง แสดงว่ารูปแบบการประเมินมีความถูกต้อง สามารถนำมาใช้ประเมินคุณภาพของมะม่วงสดได้ แต่หากมีค่าแตกต่างกันแสดงว่ารูปแบบการประเมินยังไม่มี ความแม่นยำอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งมีการทดสอบความถูกต้องตามสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) และสมมติฐานรอง ( $H_1$ ) ได้ดังนี้

$H_0$  : รูปแบบการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพเหมาะสมกับข้อมูลจริง

$H_1$  : รูปแบบการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพไม่เหมาะสมกับข้อมูลจริง

ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการวิเคราะห์ความถูกต้องของรูปแบบการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C ณ ช่วงเวลาการจัดเก็บทั้ง 5 ช่วง คือ 1-7 วัน, 8-14 วัน, 15-21 วัน, 22-28 วัน และ 29-45 วัน โดยนำค่าผลลัพธ์ (Output) ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงที่ได้จากการทดลอง ซึ่งผลการวิเคราะห์ความถูกต้องของรูปแบบการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพ คือ มีค่า t-test เท่ากับ 1.860, -0.090, -1.080, -1.000 และ 0.850 ตามลำดับ ได้ค่า P-value เท่ากับ 0.0790, 0.9330, 0.2950, 0.3300 และ 0.4090 ตามลำดับ มากกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ทำให้ยอมรับสมมติฐานหลัก แสดงว่ารูปแบบการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพเหมาะสมกับข้อมูลจริง สามารถนำรูปแบบการประเมินดังกล่าวมาใช้จำลองสถานการณ์เพื่อประเมินคุณภาพของมะม่วงไทยในช่วงระยะเวลาการจัดเก็บ 1-45 วัน ได้

4. การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนกำลังสองของแบบจำลองสถานการณ์การประเมินคุณภาพของมะม่วงไทยที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C โดยวิธีมอนติคาร์โลภายใต้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทย แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงของดัชนีชี้วัดคุณภาพที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน วิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์จำนวน 5,000 รอบ ทั้งปัจจัยด้านความแน่นเนื้อ, ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้, ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทย ได้ผลลัพธ์โดยเฉลี่ย คือ  $4.2651 \pm 0.4773$ ,  $4.4548 \pm 0.3700$ ,  $0.0379 \pm 0.0031$  และ  $0.6876 \pm 0.0449$  ตามลำดับ

5. การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) สำหรับรูปแบบประเมินค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพมะม่วงไทยที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C เป็นการวิเคราะห์ความเหมาะสมและความสอดคล้องของข้อมูลที่ได้จากการพยากรณ์ค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพด้วยเทคนิคการจำลองสถานการณ์กับข้อมูลจริง ซึ่งได้มาจากการนำผลลัพธ์ของการจำลองสถานการณ์จำนวน 5,000 รอบ โดยนำค่าตัวเลขสุ่มและฟังก์ชันตัวแปรสุ่มที่สอดคล้องกับการกระจายข้อมูลของแต่ละปัจจัยที่เกี่ยวข้องมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพที่ประกอบด้วย ความแน่นเนื้อ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทย โดยเฉลี่ย คือ  $0.6807 \pm 0.0325$ ,  $0.6585 \pm 0.0246$ ,  $0.7795 \pm 0.0170$  และ  $0.8881 \pm 0.0076$  ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า รูปแบบประเมินค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพด้านปัจจัยความแน่นเนื้อ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ ที่ระดับอุณหภูมิ 13 °C สามารถพยากรณ์ค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยได้ดี เนื่องจากค่าที่ได้จากการสร้างตัวแปรสุ่มมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับข้อมูลจริงของทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และฟังก์ชันตัวแปรสุ่มสามารถอธิบายความผันแปรของค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพสำหรับทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยได้ร้อยละ 68.07  $\pm$  3.25, 65.85  $\pm$  2.46, 77.95  $\pm$  1.70 และ 88.81  $\pm$  0.76 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการประเมินดังกล่าวทำให้สามารถประเมินค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงไทยได้อย่างถูกต้องแม่นยำและอยู่ในระดับความน่าเชื่อถือที่สามารถยอมรับได้

## สรุปผลและอภิปรายผล

ผลจากการวิจัย พบว่า ระบบการประเมินคุณภาพของมะม่วงไทยที่สอดคล้องกับการจัดการห่วงโซ่อุปทานของมะม่วงไทยเป็นระบบที่นำมาใช้เป็นเครื่องมือเพื่อใช้ดำเนินการประมวลผลข้อมูลด้านระดับคุณภาพของมะม่วงหลังการจัดเก็บสำหรับทุกช่วงเวลา ณ อุณหภูมิ 13 °C โดยนำมาใช้เป็นข้อมูลและสนับสนุนประกอบการตัดสินใจเพื่อการบริหารจัดการและปรับปรุงกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สามารถควบคุมคุณภาพสินค้า ลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มศักยภาพการแข่งขันของผู้ประกอบการได้ โดยเฉพาะตลาดที่มีอำนาจการซื้อขายสูงและมีอำนาจการต่อรองที่แข็งแกร่ง ซึ่งการจัดเตรียมข้อมูลควบคู่กับการเก็บรักษาและควบคุมคุณภาพที่ดี สามารถลดความเสี่ยงจากการตัดสินใจที่ผิดพลาดได้ ทำให้ผู้ประกอบการมีความสามารถในการแข่งขันเพิ่มมากขึ้น โดยความสัมพันธ์ของข้อมูลสำหรับปัจจัยที่มีผลต่อระบบการประเมินคุณภาพของมะม่วงไทย พบว่า ปัจจัยด้านความแน่นอนในทุกช่วงระยะเวลาการจัดเก็บส่วนใหญ่มีการแจกแจงแบบเบต้า ปัจจัยด้านปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่มีการแจกแจงแบบเบต้า และปัจจัยด้านปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ส่วนใหญ่มีการแจกแจงแบบปกติ โดยรูปแบบการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงที่ได้มีความแม่นยำและเที่ยงตรง สามารถพยากรณ์ค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพของมะม่วงได้ดี เนื่องจากข้อมูลมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับข้อมูลจริงของทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

อย่างไรก็ตาม ระบบยังมีข้อจำกัดอยู่หลายด้าน ส่วนหนึ่งเกิดจากปริมาณข้อมูลที่ทำการทดลองและจัดเก็บ ระดับอุณหภูมิที่ทำการประเมินจากระบบ และความหลากหลายของระดับคุณภาพจากการทดลองที่มีจำนวนน้อย เนื่องจากการทดลองและจัดเก็บข้อมูลจริงมีอัตราต้นทุนสูง มีปริมาณผลผลิตที่มีจำนวนจำกัด และมีผลผลิตออกมาเป็นช่วงฤดูกาลเท่านั้น ส่งผลให้ข้อมูลสำหรับการวิจัยมีจำนวนจำกัด ทำให้ระบบการประเมินคุณภาพสินค้าเกิดความผิดพลาดและมีความเที่ยงตรงอยู่ในระดับปานกลาง ดังนั้นผู้ประกอบการที่ต้องการนำรูปแบบการประเมินคุณภาพดังกล่าวไปใช้งานจริง ควรทำการทดลองเพื่อวัดระดับคุณภาพสินค้าในแต่ละช่วงอายุและระดับอุณหภูมิการจัดเก็บให้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นและเพียงพอ โดยเฉพาะความหลากหลายของอายุการเก็บเกี่ยวผลผลิตต่อระดับอุณหภูมิการจัดเก็บผลผลิตให้มีความหลากหลายเพิ่มมากขึ้น เพื่อลดความผิดพลาดของผลลัพธ์ที่ได้จากระบบการประเมินคุณภาพของผลผลิตสำหรับทุกช่วงเวลาการจัดเก็บให้อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยบรรลุผลสำเร็จได้ดีเนื่องด้วยได้รับความร่วมมือและความช่วยเหลือจากบุคคลสำคัญต่าง ๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำวิจัยครั้งนี้ทุกท่าน

## เอกสารอ้างอิง

- วิมลวรรณ ปัทมรัตน์. (2545). การวิเคราะห์ระบบแถวคอยในการให้บริการลูกค้าของที่ทำกรไปรษณีย์ โทรเลข. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2560). ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตร ประจำปี พ.ศ. 2560. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, กรมส่งเสริมการเกษตร, กรุงเทพฯ.

- Crisosto, C.H. (1994). Stone fruit maturity indices: A descriptive review. *Postharvest News and Information*. 5: 65-68.
- Hammersley, J.M. and D.C. Handscomb. (1964). *Monte Carlo Methods*. Wiley, New York.
- Mahayothee, B., S. Neidhart, R. Carle and W. Muhlbauer. (2007). Effects of variety, ripening condition and ripening stage on the quality of sulphite-free dried mango slices. *European Food Research and Technology*. 225(5): 723-732.
- Mahayothee B, Muhlbauer W, Neidhart S and Carle R. (2004). Influence of postharvest ripening process on appropriate maturity drying mangoes 'Nam Dokmai' and 'Kaew'. *Acta Horticulturae*. 645: 241-248.
- Prange, R.K., Kalt, W., Daniels-Lake, B., Liew, C.L., Page, R.T., Walsh, J.R., Dean, P., Coffin, R. (1998). Using ethylene as a sprout control agent in stored 'Russet Burbank' potatoes. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 123: 463–469.
- Rungpichayapichet, P., B. Mahayothee, M. Nagle, P. Khuwijitjaru and J. Muller. (2016). Robust NIRS models for non-destructive prediction of postharvest fruit ripeness and quality in mango. *Postharvest Biology and Technology*. 111: 31-40.
- Vásquez-Cañedo, A.L., P. Sruamsiri, R. Carle and S. Neidhart. (2005). Accumulation of all-trans- $\beta$ -carotene and its 9-cis and 13-cis stereoisomers during postharvest ripening of nine Thai mango cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 53(12): 4827–4835.