

รายงานผลงานเรื่องเติมการทดลองที่สิ้นสุด

1. แผนงานวิจัย : วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์
2. โครงการวิจัย : การประเมินคุณภาพผักและผลไม้สดโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี
3. ชื่อการทดลอง (ภาษาไทย) : การประเมินและคัดแยกคุณภาพผลไม้สดด้วยเครื่อง NIR-Online ในระบบสายพานลำเลียง
ชื่อการทดลอง (ภาษาอังกฤษ) : Fruit Quality Evaluation Using Near Infrared (NIR) spectrometer on the Conveyor Belt
4. คณะผู้ดำเนินงาน :

หัวหน้าการทดลอง	นางสาวปรารค์ทอง กวานห้อง	กวป.
ผู้ร่วมงาน	นางศิริกานต์ ศรีธัญรัตน์	กวป.
	นางสาวคมจันทร์ สรงจันทร์	กวป.

5. บทคัดย่อ

งานวิจัยในครั้งนี้ เป็นการศึกษาผลการประเมินคุณภาพผลไม้แบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (NIRs) ในระบบสายพานลำเลียง ด้วยการสร้างสมการเทียบมาตรฐานความสัมพันธ์ของค่าคุณภาพภายในที่ต้องการประเมินกับการดูดกลืนพลังงานย่านใกล้อินฟราเรดที่วัดได้จากเครื่อง NIR ในระบบการวัดแบบสะท้อนกลับที่ช่วงความยาวคลื่นสั้นระหว่าง 700-1,100 นาโนเมตร โดยเป็นการประเมินคุณภาพของผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง พิจารณาจากปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (TA) และค่าอัตราส่วนของ TSS/TA และการทำนายอาการเนื้อแก้วในผลมังคุดโดยพิจารณาจากค่าความถ่วงจำเพาะ ผลการวิเคราะห์สมการพบว่า เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ค่า R) ของสมการเทียบมาตรฐาน ผลการประเมินคุณภาพผลมะม่วงด้วยสมการค่า TSS และค่าอัตราส่วน TSS/TA สามารถใช้ทำนายค่าได้ในระดับการประมาณค่าอย่างหยาบ ๆ ขณะที่สมการค่า TA สามารถทำนายค่าได้ในระดับนำไปประยุกต์ใช้หรืองานวิจัย อย่างไรก็ตาม เมื่อนำมาทดสอบการทำนายค่าในระบบการคัดแยกด้วยสายพานลำเลียงเพื่อประเมินความแม่นยำของสมการพบว่า สมการที่ได้ยังให้ผลการทำนายค่าไม่แม่นยำมากพอจะนำไปใช้ในการคัดเกรดด้วยระบบสายพานลำเลียงอย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนการประเมินสมการเทียบมาตรฐานในการคัดแยกผลมังคุดที่มีอาการเนื้อแก้วพบว่า สมการที่สร้างได้มีความแม่นยำของการทำนายค่าในระดับต่ำ เนื่องจากมีค่า R ที่ค่อนข้างต่ำ

Abstract

This research was to study the non-destructive evaluation of fruit quality with near infrared spectroscopy (NIRs) technique in a conveyor belt system by establishing a calibration equation to correlate the internal quality to the measured near-infrared spectra in interreflectance mode at the wavelength region of 700-1,100 nanometres. The internal quality of mango fruits CV. Namdokmai Srithong were evaluated with total soluble solid content (TSS), titratable acidity content (TA) and the TSS/TA ratio, while the translucent disorder of mangosteen fruits was determined by the specific gravity. The results of equation analysis which based on the correlation coefficient (R value) of the calibration equations in this study showed that the mango quality evaluation equations of the TSS and the TSS/TA ratio could be used to predict those values at the rough screening, while the TA equation could be predicted at a useable level, with caution for most applications including research. However, after testing the prediction equations to assess the accuracy of mango fruit equations in the conveyor belt system for NIR applications, the prediction results were insufficiently accurate and had low potential for use in fruit monitoring and grading systems. At the same time, evaluation of efficiency equation for the translucent screening of mangosteen fruits was found that the the specific gravity equation had poor prediction accuracy.

6. คำนำ :

ประเทศไทยสามารถผลิตผลไม้ได้หลากหลายชนิด และได้รับการยอมรับว่ามีผลไม้ที่รสชาติดีเป็นที่นิยม จนมีการส่งออกไปในหลาย ๆ ประเทศ รวมถึงชาวต่างชาติที่ตั้งใจเข้ามาท่องเที่ยวในประเทศไทยเพื่อรับประทานผลไม้ไทย อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่เป็นอุปสรรคสำคัญในการส่งออกผลไม้ไทย คือ ปัญหาด้านคุณภาพของผลไม้ ผลไม้ทุกผลจำเป็นต้องมีคุณภาพทั้งภายนอกและภายในที่ดีตรงตามความต้องการของผู้บริโภค โดยสิ่งที่คุณบริโภคต้องการเมื่อตัดสินใจซื้อผลไม้สด คือ ความคาดหวังที่จะได้ผลไม้ที่มีคุณภาพและรสชาติที่ดี ซึ่งพฤติกรรมของผู้บริโภคส่วนใหญ่มักมีการเลือกหยิบผลไม้ขึ้นมาตรวจสอบสภาพภายนอกที่ละผล ก่อนตัดสินใจเลือกซื้อ และแม้ว่าจะเลือกผลไม้ที่มีสภาพภายนอกเป็นที่ต้องการแล้วแต่อาจมีผลไม้อย่างหนึ่งที่ มีคุณภาพภายในหรือรสชาติไม่เป็นไปตามที่คาดหวัง นอกจากนี้ ในขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพโดยการหยิบจับผลไม้ของผู้บริโภคแต่ละครั้งมีผลทำให้เกิดอาการบอบช้ำ และเกิดความเสียหายแก่ตัวผลไม้ ทำให้ผู้จำหน่ายได้รับผลกระทบ เพราะผลไม้ที่เหลือจากการเลือกซื้อที่มีคุณภาพที่ด้อยลง หรืออาจเกิดความเสียหายจนเกิดสภาพเน่าและ เช่นเดียวกันในการส่งออกผลไม้สด หากผู้บริโภคปลายทางซื้อสินค้าไปแล้ว ได้ผลไม้ที่มีคุณภาพไม่เป็นไปตามที่คาดหวัง ส่งผลให้ผู้บริโภคผิดหวังและไม่อยากกลับมาซื้ออีก ทำให้เป็นอุปสรรคในการขยายตลาดผลไม้สดของประเทศไทย ซึ่งการประเมินคุณภาพของผลไม้สดนั้น คุณภาพ

ภายนอกสามารถตรวจสอบและคัดแยกได้ด้วยตาเปล่า แต่การประเมินคุณภาพภายในของผลไม้ เช่น ความหวาน ความเปรี้ยว สารอาหาร และความผิดปกติที่เกิดขึ้นในเนื้อผล เป็นต้น ไม่สามารถบอกได้จากลักษณะภายนอก ต้องนำผลไม้ไปวิเคราะห์หาซึ่งต้องมีการทำลายตัวอย่าง ใช้เครื่องมือเฉพาะ ใช้เวลานาน และอาจต้องใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย ทำให้มีต้นทุนการวิเคราะห์สูง ดังนั้น ถ้าสามารถใช้วิธีการประเมินคุณภาพผลไม้ได้โดยไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหาย ใช้เวลาสั้น ก็จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการตกลงซื้อขาย ทำให้สามารถคัดเลือกผลไม้ที่มีคุณภาพตามความต้องการได้อย่างถูกต้อง ผู้บริโภคได้สินค้าตามความต้องการ

เทคนิคสเปกโตรสโกปีด้วยแสงย่านใกล้อินฟราเรดหรือเรียกว่า “เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy; NIRs)” เป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นแสงแม่เหล็กไฟฟ้าในการตรวจสอบคุณภาพโดยไม่ทำความเสียหายแก่ตัวอย่าง (non-destructive technology) มีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 700-2,500 นาโนเมตร แบ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นสองช่วงคลื่น คือ ช่วงคลื่นสั้น มีความยาวคลื่นในช่วง 700-1,100 นาโนเมตร และช่วงคลื่นยาว มีความยาวคลื่นในช่วง 1,100-2,500 นาโนเมตร ซึ่งจากการทดสอบความสามารถในการทะลุผ่านของแสงทั้งสองช่วงความยาวคลื่นกับเนื้อแอปเปิ้ล พบว่าแสงในช่วงคลื่นสั้นมีความสามารถในการทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อแอปเปิ้ลได้ดีกว่าแสงในช่วงคลื่นยาว (Lammertyn et al., 2000) ทำให้คลื่นแสงช่วงสั้นเหมาะสำหรับการประเมินองค์ประกอบของสารที่อยู่ลึกเข้าไปในเนื้อ เช่น การหาองค์ประกอบภายในเนื้อผลไม้ด้วยการวัดผลไม้ทั้งผล ทั้งนี้ การใช้เทคนิค NIRs สามารถใช้ทำนายค่าทางเคมีได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยเป็นเทคนิคที่ใช้ระยะเวลาสั้น ประหยัดแรงงาน และลดต้นทุนการใช้สารเคมี จึงเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตในระยะยาวได้ (Osborne et al., 1993) ซึ่งคุณสมบัติเด่นของแสงเนียร์อินฟราเรดที่สำคัญที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์คือ เมื่อยิงแสงนี้ไปยังวัตถุแล้ว จะมีการถ่ายเทพลังงานทำให้โมเลกุลของวัตถุนั้น ๆ เกิดการสั่นแต่ไม่ถึงกับทำให้โมเลกุลแตกหรือหลุดออกจากกัน เช่น โมเลกุลที่เป็นการเกาะกันระหว่าง C-H N-H หรือ O-H โดยที่องค์ประกอบของสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนพลังงานแสงเนียร์อินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ แตกต่างกันไป จึงถูกนำมาใช้ในการประเมินหาองค์ประกอบต่าง ๆ ของสารแต่ละชนิดโดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ทางสถิติในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับค่าวิเคราะห์ทางเคมี เพื่อให้ได้สมการเทียบมาตรฐานในการทำนายปริมาณสารชนิดนั้น ๆ

NIRs เป็นการตรวจสอบสินค้าโดยวิธีการแบบไม่ทำลายวิธีหนึ่งที่มีศักยภาพสูง ถือเป็นนวัตกรรมด้านการประเมินคุณภาพสินค้าแบบไม่ทำลายให้ตรงกับความต้องการของภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะสินค้าด้านการเกษตรจำพวกผลไม้ซึ่งประเทศไทยมีศักยภาพในการส่งออกไปขายในต่างประเทศและสร้างรายได้เข้าประเทศ จึงเป็นเทคนิคที่มีการพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้กับการหาคุณสมบัติภายในของผลไม้โดยไม่ทำลายอย่างกว้างขวางมากขึ้น แม้ว่าการใช้เทคนิค NIRs ในการควบคุม ตรวจสอบ และคัดแยกคุณภาพสินค้ามีการวิจัยและพัฒนาเพิ่มขึ้นและเป็นเทคนิคที่ได้รับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย แต่การศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคนิค NIRs สำหรับสินค้าเกษตรเพื่อใช้ประเมิน ตรวจสอบ และคัดแยกคุณภาพผลไม้สดชนิดต่าง ๆ ยังมีการพัฒนาอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการ การนำไปใช้ในระดับเชิงพาณิชย์ยัง

มีไม่มากนักและอยู่ในระดับที่จำกัดเฉพาะบางพืช จึงยังต้องมีการสร้างและพัฒนาสมการสำหรับการตรวจสอบคุณภาพเพื่อใช้สำหรับเครื่องมือในการประเมินคุณภาพผลิตผลสดด้วยเทคนิค NIRs เป็นการพัฒนาเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากเทคนิคการตรวจสอบและประเมินคุณภาพผลิตผลสดด้วยระบบ NIRs นี้ เป็นวิธีการที่ทำได้รวดเร็วโดยไม่ต้องมีการทำลายตัวอย่าง ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประโยชน์ในการจัดการคุณภาพผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวได้

การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับเทคนิค NIRs ในการประเมินคุณภาพผลิตผลเกษตรมีมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยแต่ละงานวิจัยมีวัตถุประสงค์ของการวัดเพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์แตกต่างกันไป สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคนิค NIRs ในการหาองค์ประกอบทางเคมีในผลมะม่วงสด ได้แก่ Kawano et al. (1992) ได้นำเทคนิค NIRs มาใช้เพื่อตรวจวัดปริมาณน้ำตาลในผลพีช โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 700-1,100 นาโนเมตร กับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ พบว่า NIRs สามารถวัดปริมาณน้ำตาลของผลพีชได้โดยที่มีค่า SEC (standard error of calibration) เท่ากับ 0.48 บริกซ์ ค่า SEP (standard error of prediction) เท่ากับ 0.50 บริกซ์ และค่า bias เท่ากับ 0.01 บริกซ์ ขณะที่ Saranwong และคณะ (2003) ได้ใช้เทคนิค NIRs ด้วยเครื่อง FT 20 และ NIRSystem 6500 ในช่วงคลื่นสั้น 700-1,100 นาโนเมตร เพื่อตรวจสอบค่าบริกซ์ (brix value) ของมะม่วง พบว่า เครื่อง NIR ทั้งสองชนิดสามารถตรวจวัดค่าบริกซ์ได้และมีความแม่นยำสูง มีค่า SEP เท่ากับ 0.40 บริกซ์ ทั้งสองเครื่อง และยังใช้เทคนิค NIRs ในการทำนายคุณภาพของมะม่วงที่พร้อมรับประทานในขณะที่ยังเป็นผลดิบ ซึ่งพบว่า มีความสัมพันธ์กันของปริมาณน้ำหนักแห้งและแป้งในผลมะม่วงดิบที่ส่งผลต่อปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดในผลสุก (Saranwong et al., 2004)

นอกจากการนำเทคนิค NIRs มาใช้ประเมินหาองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ แล้ว ยังมีการนำมาใช้เพื่อตรวจสอบอาการผิดปกติในผลไม้ซึ่งรวมถึงอาการเนื้อแก้วในผลมังคุด ได้แก่ การศึกษาการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเพื่อคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิค NIRs ของสิรินาฏและคณะ (2553) โดยการสุ่มผลมังคุดสำหรับการทดลอง จำนวน 220 ผล (มังคุดเนื้อแก้ว 37 ผล และมังคุดปกติ 183 ผล) นำผลมังคุดทั้งหมดวัดค่าความถ่วงจำเพาะ และวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIR Spectrophotometer แบบพกพา (FQA-NIR GUN) ช่วงคลื่น 700-1,100 นาโนเมตร แบบ Interactance ที่จุดกึ่งกลางด้านข้างของแต่ละผล บนแนวเส้นอีควาเตอร์ (equatorial line) ในแนวตั้งฉากกับรอบผล จำนวน 4 ด้าน ในการวิเคราะห์เริ่มจากปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี 2D MSC และ SNV แล้วใช้เทคนิค partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) เพื่อเลือกความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันระหว่างมังคุดเนื้อแก้วและมังคุดปกติ แล้ววิเคราะห์การจำแนกกลุ่มด้วยวิธี discriminant analysis โดยใช้ตัวแปรจำแนกกลุ่ม คือ ความยาวคลื่นที่เลือกมาจากการทำ PLS-DA และค่าความถ่วงจำเพาะ (SG) พบว่า ให้ผลความถูกต้องในการจัดกลุ่มที่ดีที่สุด 84.8 เปอร์เซ็นต์ และในการทำนายอาการเนื้อแก้วจากน้ำมังคุดโดยใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงในช่วงเนียร์อินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น 1,100-2,500 นาโนเมตร มาใช้ในการทำนายอาการเนื้อแก้ว โดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของน้ำมังคุดเพื่อนำมาสร้างสมการเพื่อใช้ทำนายอาการเนื้อแก้วจากกลุ่มของมังคุดปกติและมังคุดเนื้อแก้ว จากผลในการนำสมการทั้งสองไป

ใช้ทำนาย พบว่า สมการน้ำมั่งคุดปกติได้ผลการทำนายที่แม่นยำในกลุ่มของมั่งคุดปกติ และให้ผลการทำนายที่ไม่ดีในกลุ่มของมั่งคุดเนื้อแก้ว นอกจากนี้ มีการศึกษาโดยใช้เทคนิคคัดแยกจากสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่น 1,444 นาโนเมตร และค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 0.756 สามารถใช้ในการคัดแยกผลมั่งคุดที่มีอาการเนื้อแก้วออกจากผลปกติได้แม่นยำ 82.5 เปอร์เซ็นต์ กล่าวได้ว่า การใช้เทคนิค NIRs มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายและคัดแยกมั่งคุดเนื้อแก้วได้ (สนธิสุขและคณะ, 2553)

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับ NIRs ในระบบสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง เป็นระบบการประเมินคุณภาพของผลไม้ที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่ผลไม้และช่วยตรวจสอบคุณภาพภายในผลได้ในระยะเวลาอันรวดเร็ว ได้มีความพยายามในศึกษาและพัฒนาระบบการตรวจสอบแบบต่อเนื่องเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการคัดแยกคุณภาพของผลไม้หลายชนิด ได้แก่ การศึกษาของ Masud et al. (2009) ที่ได้ทำการประยุกต์ใช้เทคนิคการจำแนกโดยกลุ่มแบบออนไลน์ (on-line ensemble-classification) ซึ่งสามารถนำกลุ่มตัวอย่างเพิ่มเติมเข้าไปใช้ในการสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายคุณภาพมะม่วงได้ เพื่อให้การประเมินคุณภาพมีประสิทธิภาพมากขึ้น และจากการศึกษาของจักรพงษ์และคณะ (2554) ซึ่งทำการพัฒนาชุดสายพานลำเลียงเพื่อคัดแยกคุณภาพของผลไม้ด้วยความหวานจากเครื่องต้นแบบสายจัดเรียงมะม่วงตามคุณภาพเพื่อใช้กับมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ ส้มพันธุ์สายน้ำผึ้ง และมะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์ โดยมีผลลัพธ์จากการวิจัย ได้แก่ ชุดสายพานลำเลียงเพื่อคัดแยกคุณภาพผลไม้ ผลการวิเคราะห์คุณภาพผลไม้แบบทั่วไป ผลการวิเคราะห์คุณภาพผลไม้ด้วยการจำแนกโดยกลุ่มแบบออนไลน์ จากผลการวิจัยพบว่า ชุดสายพานลำเลียงที่พัฒนาขึ้นสามารถคัดแยกคุณภาพผลไม้ด้วยความหวานได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิภาพ

ดังนั้น การประยุกต์ใช้เทคนิค NIRs เพื่อวัดและคัดแยกคุณภาพผลิตผลสดที่ได้จากการประเมินองค์ประกอบทางเคมีของผลไม้ หรือการคัดแยกอาการผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในผล มีแนวโน้มที่ดีในการนำมาใช้ประเมินคุณภาพเบื้องต้นและลดความเสียหายของตัวอย่างจากการนำมาวิเคราะห์คุณภาพ และสามารถนำวิธีการนี้ไปตรวจสอบคุณภาพสินค้าทั้งที่โรงคัดบรรจุ ส่วนตรวจสอบคุณภาพ รวมทั้งตลาดปลายทางได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

7. วิธีดำเนินการ :

- อุปกรณ์

- 1) ผลไม้สด ได้แก่ มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ มั่งคุด
- 2) เครื่อง NIRs ที่ติดตั้งในระบบสายพานลำเลียง มีช่วงความยาวคลื่น 700-1,100 นาโนเมตร และมีอันตรกิริยา (interaction) แบบสะท้อนกลับจากด้านใน (interactance) สามารถวัดสะท้อนลงได้ลึก 0.5-1 เซนติเมตร
- 3) อุปกรณ์และสารเคมีในการวิเคราะห์คุณภาพผลไม้ในห้องปฏิบัติการ

- วิธีการ

1. นำตัวอย่างผลไม้สด (มะม่วง มังคุด) จากแปลงเกษตรกรรมมีคุณภาพและความแก่สม่ำเสมอ ขนส่งมายังห้องปฏิบัติการหลังการเก็บเกี่ยวพืชสวน
2. แบ่งตัวอย่างผลไม้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เป็นตัวแทนสำหรับใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐาน (calibration set; Cset) ใช้จำนวนร้อยละ 70 ของตัวอย่างทั้งหมด และกลุ่มที่เป็นตัวแทนสำหรับใช้ในการทดสอบความแม่นยำของสมการที่สร้างขึ้น (validation set; Vset) ใช้จำนวนร้อยละ 30 ของตัวอย่างทั้งหมด
3. นำผลไม้กลุ่ม Cset มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง NIR ผ่านระบบสายพานลำเลียง (Figure 1) โดยทำเครื่องหมายบนผลไม้เพื่อกำหนดบริเวณที่จะทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งผลิตผลบนสายพานจะถูกลำเลียงผ่านหัววัดของเครื่อง NIR ซึ่งมีเซ็นเซอร์ตรวจจับอยู่ เมื่อเซ็นเซอร์ตรวจจับผลิตผลได้ หัววัดจะทำการวัดและบันทึกค่าสเปกตรัมของผลิตผล (จำนวน 1 จุดต่อครั้ง)

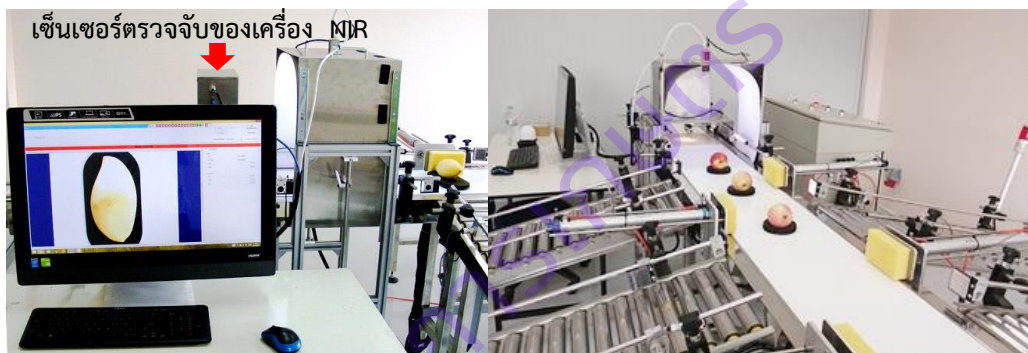


Figure 1 Near infrared spectroscopy on conveyor system

4. นำผลิตผลสดที่ผ่านการวัดค่าการดูดกลืนแสงแล้วมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าทางเคมีหรือคุณภาพอื่น ๆ ที่ต้องการในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เนื้อผลไม้ส่วนเดียวกับที่วัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIR ได้แก่
 - ผลมะม่วง --> ค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (total soluble solids; TSS) ใช้บ่งบอกความหวาน
 - ค่าปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (titratable acidity; TA) ใช้บ่งบอกความเปรี้ยว และค่าอัตราส่วน TSS/TA
 - ผลมังคุด --> ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ใช้บ่งบอกการเกิดเนื้อแก้วในผล
5. หลังจากได้ค่าสเปกตรัมจากเครื่อง NIR และค่าวิเคราะห์ทางเคมีของตัวอย่างผลไม้แล้ว นำทั้งสองค่าที่ได้ไปเข้าโปรแกรมเพื่อหาความสัมพันธ์และสร้างเป็นสมการมาตรฐานสำหรับทำนายค่าที่มีข้อมูลมากขึ้น เพื่อให้ได้สมการที่ครอบคลุมมากขึ้น
6. หลังจากสร้างสมการมาตรฐานแล้วนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยค่าทางสถิติที่ใช้ตรวจสอบความแม่นยำของสมการเบื้องต้น ได้แก่
 - ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient; R) หากมีค่าสูง แสดงว่าเป็นสมการที่ดี
 - ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มสร้างสมการ (standard error of calibration; SEC) ควรมีค่าต่ำเข้าใกล้ศูนย์

7. นำสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างได้ มาทำการทดสอบความแม่นยำในการทำนายค่ากับผลไม้สดในกลุ่ม Vset โดยนำผลิตผลมาวัดผ่านระบบสายพานลำเลียงเช่นเดียวกับกลุ่ม Cset ค่าที่อ่านได้จากเครื่องจะเป็นค่าทำนายของค่าวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของผลิตผลสด จากนั้น นำผลิตผลไปทำการวิเคราะห์คุณภาพในห้องปฏิบัติการเพื่อนำค่าจริงที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ทำนายได้จากเครื่อง NIR

8. นำค่าที่อ่านได้จากเครื่อง NIR และค่าวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการของผลไม้กลุ่ม Vset ไปทำการคำนวณเทียบกับสมการ แล้วทำการพิจารณาค่าทางสถิติเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการอีกครั้ง ได้แก่

- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) ควรมีค่าสูง [มากกว่า 0.9]

- ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มทดสอบสมการ (standard error of prediction; SEP) ถ้ามีค่าเท่ากับค่า SEL [standard error of laboratory] แสดงว่าเป็นสมการที่ดี

- ค่าความเอนเอียง (bias) ควรมีค่าต่ำ

9. หากสมการเทียบมาตรฐานที่ได้มีค่า R สูง ค่า SEC SEP และ bias ต่ำ แสดงว่า สมการที่ได้มีความแม่นยำพอจะนำไปพัฒนาต่อเพื่อใช้ในการประเมินคุณภาพผลไม้ได้ หากสมการที่ได้ยังไม่ดีพอ สามารถทำการปรับปรุงสมการโดยการนำตัวอย่างผลไม้มากทำการตรวจสอบเพิ่มและคำนวณเพื่อสร้างสมการอีกครั้ง

10. เมื่อปรับปรุงจนได้สมการมาตรฐานที่มีความแม่นยำแล้ว นำมาทดสอบกับผลิตผลสดเพื่อประเมินคุณภาพในระบบการทำงานจริงบนสายพานลำเลียง โดยให้เครื่องมือและสายพานมีการประเมินคุณภาพแบบต่อเนื่อง เพื่อตรวจสอบความแม่นยำในการทำนายค่าและหาค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนาย

11. ตรวจสอบความแม่นยำของสมการของค่าที่ทำนายได้ โดยนำผลไม้ที่ผ่านการทำนายค่าด้วยเครื่อง NIR บนสายพานลำเลียงไปวิเคราะห์คุณภาพในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบค่าจากการทำนายกับค่าจริงจากการวิเคราะห์

- เวลาและสถานที่

เวลา เริ่มต้น 1 ตุลาคม 2558 – สิ้นสุด 30 กันยายน 2563

สถานที่ทำการทดลอง อาคารปฏิบัติการหลังการเก็บเกี่ยวพืชสวน

กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร

กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ

8. ผลการทดลองและวิจารณ์ :

มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง

ค่าการดูดกลืนแสง (สเปกตรัม) ของตัวอย่างผลมะม่วงสดพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองจากเครื่อง NIR ในระบบสายพานลำเลียงในช่วงความยาวคลื่นสั้นระหว่าง 700-1,100 นาโนเมตร มีค่าแสดงดัง Figure 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า การที่ผลไม้มีปริมาณน้ำเป็นองประกอบหลักร้อยละ 80-90 (มากกว่าปริมาณองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ) จึงทำให้เห็นพีคของน้ำที่ตำแหน่ง 970 นาโนเมตร จากเส้นสเปกตรัมได้เด่นชัดกว่า และบดบังพีคที่เป็นลักษณะเด่นขององค์ประกอบอื่น ๆ เช่น น้ำตาล โปรตีน เป็นต้น

สเปกตรัมจากเทคนิค NIRs เกิดจากการรวมกันของฟิสิกส์โอเวอร์โทนและฟิสิกส์คอมบิเนชันของกลุ่มฟังก์ชันต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้กันเป็นจำนวนมาก ทำให้สเปกตรัมมีความซับซ้อนมาก นอกจากนั้น สเปกตรัมยังมีความซับซ้อนเพิ่มจากการกระเจิงแสง ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อเยื่อสัญญาณรบกวนในเครื่องมือ สภาพแวดล้อม และแหล่งความแปรปรวนอื่น ๆ ที่ส่งผลให้เกิดการดุดกกลืนที่แตกต่างกันตามความยาวคลื่น สำหรับปัจจัยที่เกิดจากเครื่องมือส่วนใหญ่จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (noise) ที่ส่งผลให้สเปกตรัมไม่เรียบ ผลที่ตามมาคือ การระบุความยาวคลื่นที่มีต่อการดูดกลืนแสงของกลุ่มฟังก์ชันเฉพาะจะเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะถ้าเป็นการระบุความยาวคลื่นที่องค์ประกอบทางเคมีดูดกลืนยิ่งยากมากขึ้น ดังนั้น ในการดึงข้อมูลที่ฝังอยู่ในสเปกตรัมจะต้องใช้เทคนิคทางสถิติแบบตัวแปรพหุ (multivariate statistical technique) หรือที่เรียกว่า เคมีเมทริกซ์ (chemometrics) ซึ่งเป็นหลักการที่อาศัยหลักทางเคมีร่วมกับหลักทางสถิติ ในการวิเคราะห์แบบตัวแปรเชิงพหุเทคนิคนี้เป็นการใช้การวิเคราะห์ความถดถอย การสร้างตัวแปรใหม่ ร่วมกับการปรับสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์ข้อมูล

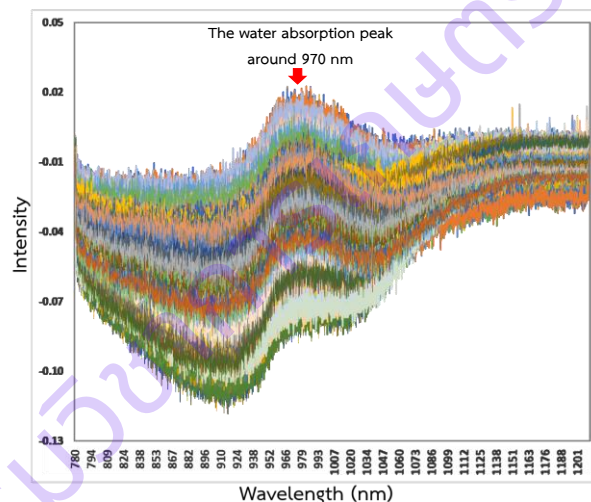


Figure 2 Original NIR spectra of fresh mango fruits cv. Nam Dok Mai Srithong after using nearinfrared spectroscopy scanning on conveyor system at wavelengths between 700-1100 nanometres.

ตัวอย่างผลมะม่วงที่วัดค่าการดูดกลืนแสงแล้ว เมื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ปริมาณ TSS และ TA เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง (reference) ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ของค่า TSS TA และอัตราส่วน TSS/TA พบว่า มีค่าวิเคราะห์คุณภาพของปริมาณ TSS จากตัวอย่างจำนวน 386 ตัวอย่าง ระหว่าง 6.70-12.08 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.51 เปอร์เซ็นต์ ส่วนปริมาณ TA จากตัวอย่างจำนวน 354 ตัวอย่าง มีค่าระหว่าง 7.72-36.47 กรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 23.69 กรัมต่อลิตร ขณะที่ค่าอัตราส่วน TSS/TA จากตัวอย่างจำนวน 356 ตัวอย่าง มีค่าระหว่าง 1.12-8.51 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.70 ขณะที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; S.D.) บอกถึงความแตกต่างของคุณภาพทางเคมีในตัวอย่างผลมะม่วงแต่ละผล โดยมีค่าเท่ากับ 1.12 5.98 และ 1.31 ตามลำดับ (Table 1)

Table 1 Chemical analysis of fresh mango fruits cv. Nam Dok Mai Srithong.

parameters	no. of samples	range	mean	standard deviation (S.D.)	unit
total soluble solids (TSS)	386	6.69-12.08	8.51	1.12	%
titratable acidity (TA)	354	7.72-36.47	23.69	5.98	g/L
TSS/TA ratio	356	1.12-8.51	3.70	1.31	-

เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างผลมะม่วงที่ได้จากเครื่อง NIR และค่าวิเคราะห์คุณภาพที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ปริมาณ TA TSS และค่าอัตราส่วน TSS/TA มาสร้างสมการความสัมพันธ์โดยอาศัยวิธีการทางสถิติ PLS regression ที่คำนวณโดยใช้โปรแกรมการคำนวณทางสถิติ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า สมการสำหรับทำนายค่าปริมาณ TSS จากตัวอย่างมะม่วงจำนวน 386 ตัวอย่าง แบ่งเป็นกลุ่ม Cset จำนวน 274 ตัวอย่าง มีค่าวิเคราะห์ระหว่าง 6.80-11.97 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความสัมพันธ์ของสมการ คือ ค่า R ของกลุ่ม Cset เท่ากับ 0.90 ค่า SEC เท่ากับ 0.51 เปอร์เซ็นต์ และค่า bias เท่ากับ 1.72×10^{-6} เปอร์เซ็นต์ ส่วนกลุ่ม Vset จำนวน 112 ตัวอย่าง มีค่าวิเคราะห์ระหว่าง 6.69-12.08 เปอร์เซ็นต์ ค่า R ของกลุ่ม Vset เท่ากับ 0.85 ขณะที่ค่า SEP และ Bias เท่ากับ 0.59 และ 0.07 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Table 2)

Table 2 Number of samples, total soluble solids (TSS) and statistics of calibration equation of mango fruits cv. Nam Dok Mai Srithong.

item	no. of samples	range	mean	SD	R	SEC / SEP	bias
Cset	274	6.80 – 11.97 %	8.52 %	1.19 %	0.90	0.51 %	1.72×10^{-6} %
Vset	112	6.69 – 12.08 %	0.98 %	0.03 %	0.85	0.59 %	0.07 %

กราฟการกระจายตัว (scatter plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TSS ที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับค่าทำนาย ในกลุ่ม Cset (Figure 3) และ Vset (Figure 4) แสดงให้เห็นว่า ข้อมูลกระจายตัวที่อยู่ใกล้เส้นเป้าหมาย (target line) บ่งบอกถึงความถูกต้องในการทำนายค่า TSS ของผลมะม่วงด้วยเทคนิค NIRs เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจริงของค่า TSS ที่วัดได้จากวิธีทำลายตัวอย่างด้วยเครื่อง digital refractometer อย่างไรก็ตาม ยังมีค่าข้อมูลในบางตัวอย่างที่มีการกระจายตัวออกห่างจากเส้นเป้าหมาย ซึ่งหมายถึงความแม่นยำที่ลดลงในการทำนายค่าของสมการเทียบมาตรฐาน โดยเฉพาะในกลุ่ม Vset ซึ่งเป็นกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการ

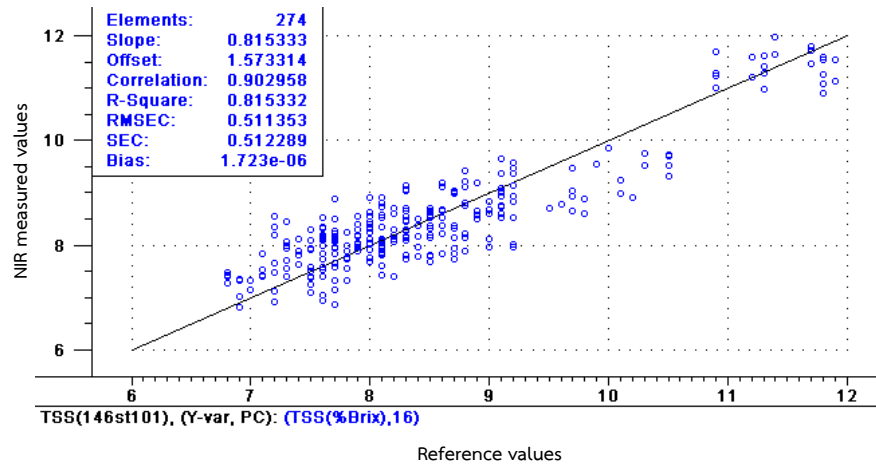


Figure 3 Scatter plot of calibration set between total soluble solids content determined by laboratory procedures and estimated by NIR spectroscopy in mango fruits.

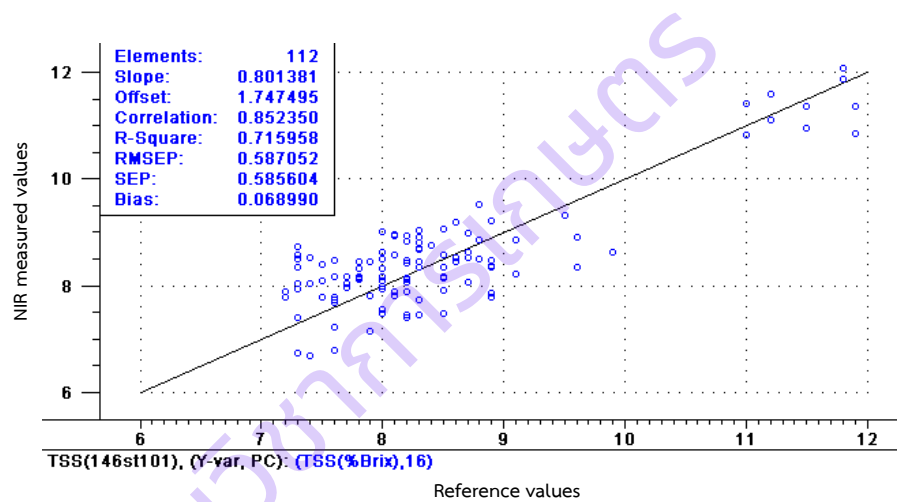


Figure 4 Scatter plot of validation set between total soluble solids content determined by laboratory procedures and estimated by NIR spectroscopy in mango fruits.

ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ของสมการทำนายค่า TSS ในผลมะม่วงสด (Figure 5) พบว่า มีค่าความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่า TSS ที่ตำแหน่ง 888 900 913 930 1,015 และ 1,056 นาโนเมตร ซึ่งเป็นพีคที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ฟรุคโตส มีการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 888 นาโนเมตร และซูโครส มีการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 913 นาโนเมตร (Williams and Norris, 1987; Schmilovitch et al., 2000) โดยที่ตำแหน่งความยาวคลื่นเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านรสหวาน (องค์อร, 2553) นอกจากนี้ ยังพบตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 970 นาโนเมตร ที่มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างน้ำ (second overtone ของหมู่ O-H) (Osborne et al., 1981; Saranwong et al., 2004)

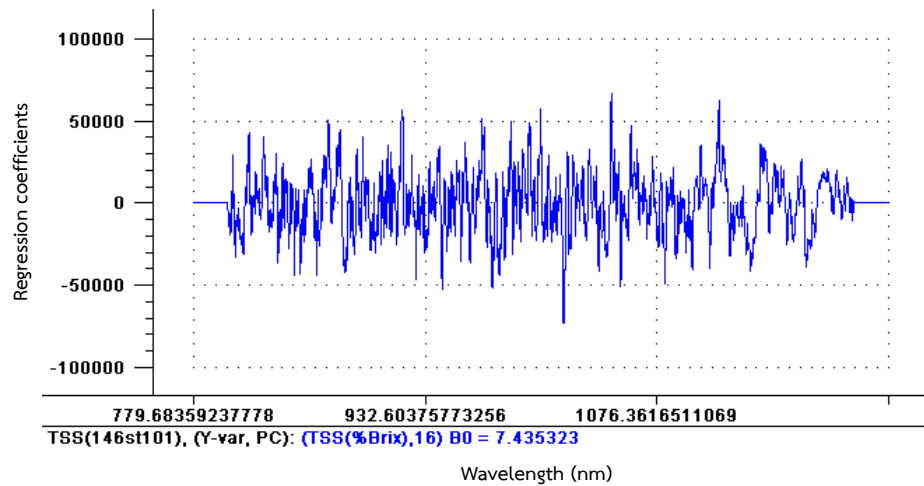


Figure 5 Regression coefficients to estimate total soluble solids content from the NIR spectra in mango fruits.

เมื่อพิจารณาจากค่า R ของสมการเทียบมาตรฐานเบื้องต้นที่พบว่า ค่า R ของกลุ่ม Cset เท่ากับ 0.90 และกลุ่ม Vset มีค่าเท่ากับ 0.85 เมื่อนำมาเทียบกับตารางแปลความหมายค่า R ของ Williams (2007) สามารถตีความได้ว่า สมการมีความแม่นยำเพียงพอสำหรับใช้ทำนายค่าได้ในระดับการประมาณค่าอย่างหยาบ ๆ (Table 3)

Table 3 Interpretation of R and R² values of the regression equation (Williams, 2007)

Value of R	Value of R ²	Interpretation
Up to ± 0.5	Up to ± 0.25	Not usable in NIRS calibration
± 0.51 to 0.70	0.26 to 0.49	Poor correlation, Research the reasons
± 0.71 to 0.80	0.50 to 0.64	Rough screening
± 0.81 to 0.90	0.66 to 0.81	Screening and approximate calibration
± 0.91 to 0.95	0.83 to 0.90	Usable with caution for most applications including research
± 0.96 to 0.98	0.92 to 0.96	Usable in most application including quality assurance
$\pm 0.99 >$	0.98 >	Usable in any applications

สมการผลการทำนายค่าปริมาณ TA ด้วยเทคนิค NIRs จากตัวอย่างผลมะม่วงจำนวน 354 ตัวอย่าง พบว่า ในกลุ่ม Cset ตัวอย่างจำนวน 258 ตัวอย่าง มีค่าวิเคราะห์ระหว่าง 7.72-36.47 กรัมต่อลิตร มีค่าความสัมพันธ์ของสมการ คือ ค่า R เท่ากับ 0.94 ค่า SEC เท่ากับ 2.16 กรัมต่อลิตร และค่า bias เท่ากับ 1.53×10^{-6} กรัมต่อลิตร ส่วนกลุ่ม Vset จำนวน 96 ตัวอย่าง มีค่าวิเคราะห์ระหว่าง 12.02-36.33 กรัมต่อลิตร มีค่า R เท่ากับ 0.92 ขณะที่ค่า SEP และ Bias เท่ากับ 2.47 และ 0.06 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Table 4)

Table 4 Number of samples, titratable acidity (TA) and statistics of calibration equation of mango fruits cv. Nam Dok Mai Srithong.

item	no. of samples	range	mean	SD	R	SEC / SEP	bias
Cset	258	7.72 – 36.47 g/L	23.66 g/L	6.27 g/L	0.94	2.16 g/L	1.53 ^{e-06} g/L
Vset	96	12.02 – 36.33 g/L	23.76 g/L	6.18 g/L	0.92	2.47 g/L	0.06 g/L

จากกราฟการกระจายตัวระหว่างค่า TA ที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับค่าทำนายในกลุ่ม Cset และ Vset จะเห็นได้ว่า ข้อมูลการกระจายตัวของค่า TA ในกลุ่ม Cset ค่อนข้างเกาะกลุ่มกันอยู่ใกล้เส้นเป้าหมาย (Figure 6) ซึ่งบ่งบอกถึงความถูกต้องของสมการทำนายค่าในผลมะม่วงด้วยเทคนิค NIRs เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจริงของค่า TA ที่วัดได้ด้วยวิธีการหาปริมาณกรดจากการไทเทรต อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากข้อมูลการกระจายตัวของค่า TA ในกลุ่ม Vset (Figure 7) ค่าที่ได้ยังคงมีการเกาะกลุ่มใกล้เส้นเป้าหมาย เช่นเดียวกับกลุ่ม Cset แต่มีระยะที่ห่างเส้นเป้าหมายมากกว่า แสดงให้เห็นถึงผลของความแม่นยำในการทำนายค่าของสมการที่ลดลง สอดคล้องกับค่า R ของกลุ่ม Cset ที่มีค่าสูงกว่า และค่า SEC ของกลุ่ม Cset มีค่าต่ำกว่าค่า SEP ของกลุ่ม Vset

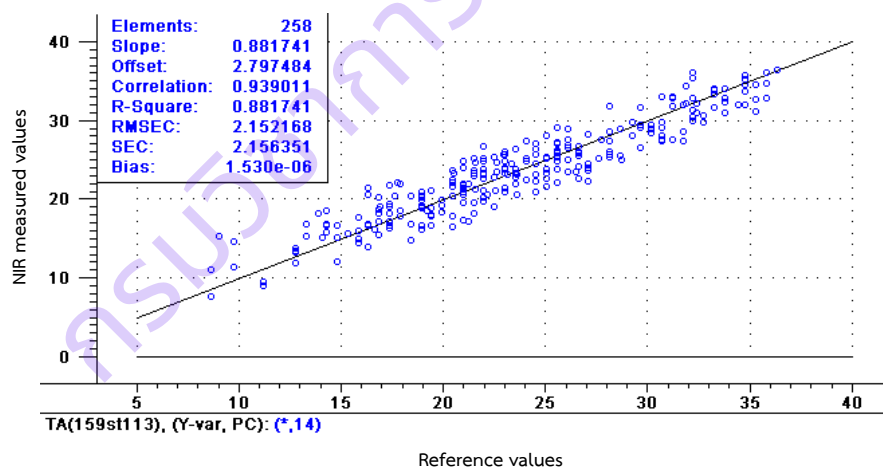


Figure 6 Scatter plot of calibration set between titratable acidity content determined by laboratory procedures and estimated by NIR spectroscopy in mango fruits.

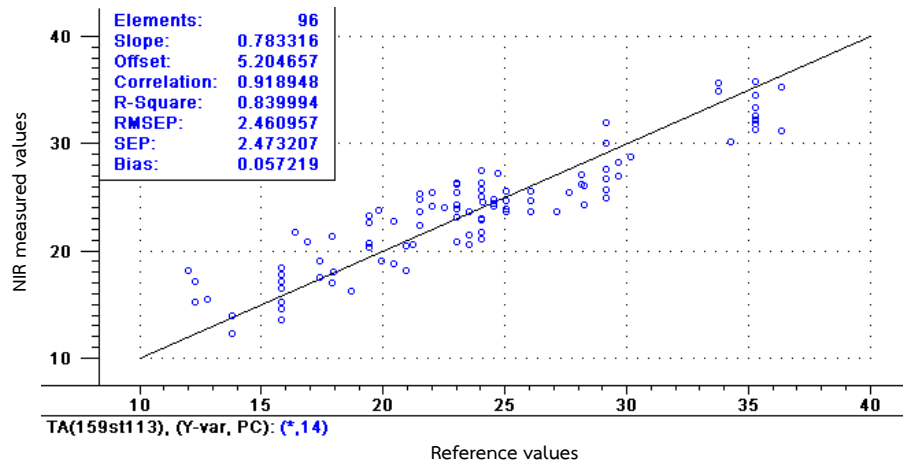


Figure 7 Scatter plot of validation set between titratable acidity content determined by laboratory procedures and estimated by NIR spectroscopy in mango fruits.

ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของมะม่วงในการทำนายค่า TA พบว่า ค่าความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่า TA อยู่ที่ตำแหน่ง 792 880 910 942 และ 972 นาโนเมตร (Figure 8) เช่น C-H ซึ่งเป็นโมเลกุลหลักของสารอินทรีย์ มีการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 880 นาโนเมตร สอดคล้องกับรายงานของ Miyamoto et al. (1998) ที่ว่าช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 890-930 นาโนเมตร คือ ช่วงความยาวคลื่นที่พบว่าการดูดกลืนแสงของกรดซิตริก

สมการมาตรฐานเบื้องต้นในการทำนายค่า TA เมื่อนำค่า R มาพิจารณาเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการที่พบว่า ค่า R ของสมการในกลุ่ม Cset และ Vset ที่มีค่าเท่ากับ 0.94 และ 0.92 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า สามารถใช้ทำนายค่าได้ในระดับนำไปประยุกต์ใช้หรืองานวิจัย (Table 3)

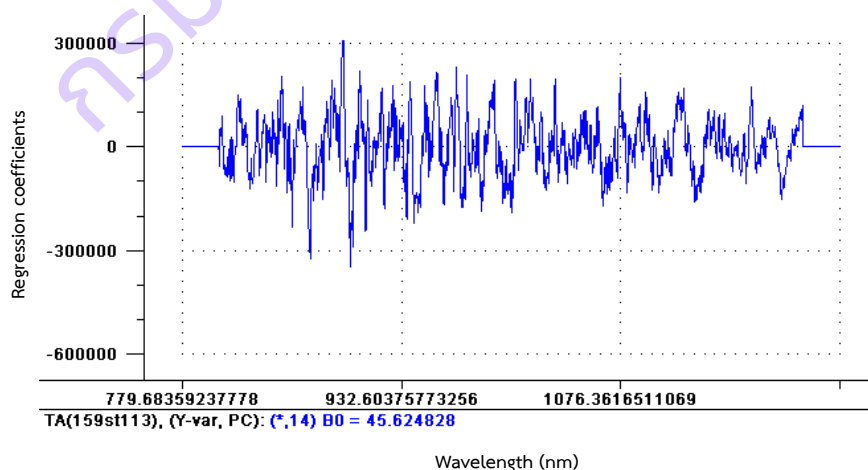


Figure 8 Regression coefficients to estimate titratable acidity content from the NIR spectra in mango fruits.

สำหรับสมการผลการทำนายค่าอัตราส่วน TSS/TA ด้วยเทคนิค NIRs จากตัวอย่างผลมะม่วงจำนวน 356 ตัวอย่าง พบว่า ในกลุ่ม Cset ตัวอย่างจำนวน 256 ตัวอย่าง มีค่าวิเคราะห์ระหว่าง 1.12-8.51 โดยมีค่าความสัมพันธ์ของสมการ คือ ค่า R เท่ากับ 0.90 ค่า SEC เท่ากับ 0.63 และค่า bias เท่ากับ 1.89×10^{-6} ส่วนกลุ่ม Vset จำนวน 100 ตัวอย่าง มีค่าวิเคราะห์ระหว่าง 1.41-7.11 มีค่า R เท่ากับ 0.77 ขณะที่ค่า SEP และ Bias เท่ากับ 0.73 และ 0.07 ตามลำดับ (Table 5)

Table 5 Number of samples, TSS/TA ratio and statistics of calibration equation of mango fruits cv. Nam Dok Mai Srithong.

item	no. of samples	range	mean	SD	R	SEC / SEP	bias
Cset	256	1.12 – 8.51	3.77	1.46	0.90	0.63	1.89×10^{-6}
Vset	100	1.41 – 7.11	3.50	1.11	0.77	0.73	0.07

จากกราฟการกระจายตัวระหว่างค่าอัตราส่วน TSS/TA ที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับค่าทำนายในกลุ่ม Cset และ Vset จะเห็นว่า ข้อมูลกระจายตัวของค่าอัตราส่วน TSS/TA ในกลุ่ม Cset ค่อนข้างเกาะกลุ่มกันอยู่ใกล้เส้นเป้าหมาย (Figure 9) ขณะที่ข้อมูลกระจายตัวของค่าอัตราส่วน TSS/TA ในกลุ่ม Vset มีความห่างจากเส้นเป้าหมายมากกว่ากลุ่ม Cset (Figure 10) แสดงให้เห็นว่า การทำนายค่าของสมการเมื่อนำมาทดสอบมีความแม่นยำลดลง สอดคล้องกับค่า R ของสมการที่กลุ่ม Cset มีค่าสูงกว่ากลุ่ม Vset ซึ่งบ่งบอกให้ทราบถึงความถูกต้องที่ลดลงในการทำนายค่าอัตราส่วน TSS/TA ของผลมะม่วงด้วยเทคนิค NIRs เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจริง

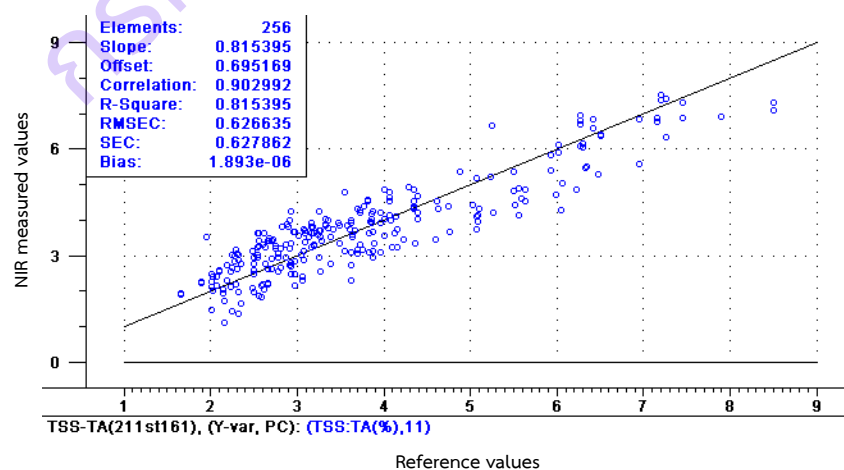


Figure 9 Scatter plot of calibration set between TSS/TA ratio determined by laboratory procedures and estimated by NIR spectroscopy in mango fruits.

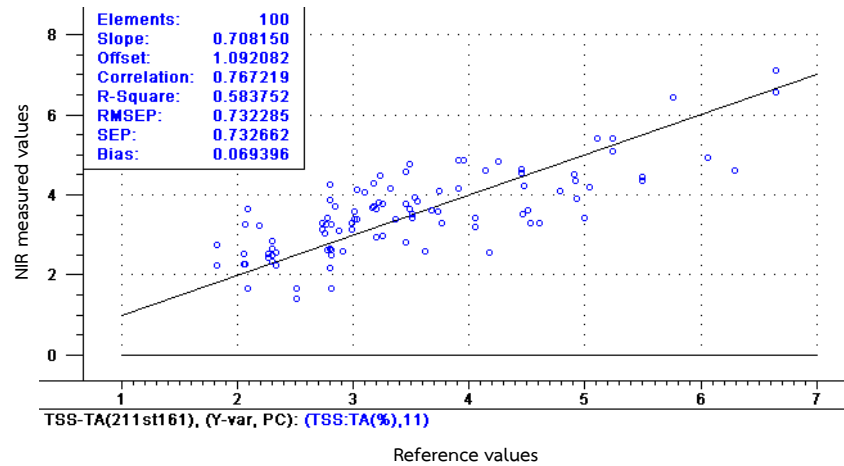


Figure 10 Scatter plot of validation set between TSS/TA ratio determined by laboratory procedures and estimated by NIR spectroscopy in mango fruits.

ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของมะม่วงในการทำนายค่าอัตราส่วน TSS/TA สามารถมองเห็นค่าความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่า TSS และ TA ที่ตำแหน่ง 792 880 888 900 910 913 930 942 972 1,015 และ 1,056 นาโนเมตร ซึ่งเป็นพีคที่มีน้ำตาลและกรดซิตริกเป็นองค์ประกอบหลัก รวมทั้งความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของน้ำที่ตำแหน่ง 970 นาโนเมตร (Figure 11)

สมการมาตรฐานเบื้องต้นในการทำนายค่าอัตราส่วน TSS/TA เมื่อพิจารณาจากค่า R ของสมการที่พบว่า กลุ่ม Cset มีค่า R เท่ากับ 0.90 และกลุ่ม Vset มีค่า R เท่ากับ 0.77 แสดงว่า สามารถใช้ทำนายค่าได้ในระดับการประมาณค่าอย่างหยาบ ๆ (Table 3)

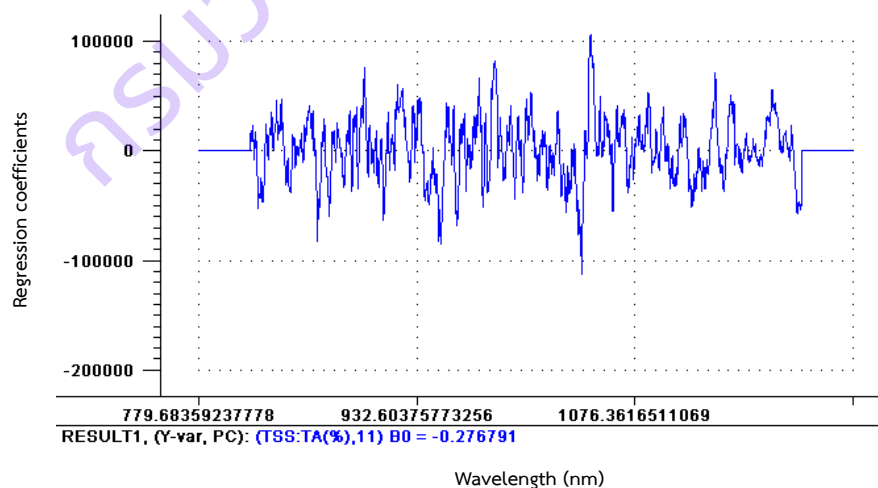


Figure 11 Regression coefficients to estimate TSS/TA ratio from the NIR spectra in mango fruits.

จากผลการวิเคราะห์สมการเทียบมาตรฐานค่า TSS TA และอัตราส่วน TSS/TA ของผลมะม่วงสดพันธุ์ น้ำดอกไม้สีทอง เมื่อพิจารณาจากค่า R ของสมการ พบว่า สมการเทียบมาตรฐานค่า TA มีความแม่นยำ สูงกว่าสมการเทียบมาตรฐานค่า TSS และอัตราส่วน TSS/TA ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการ พิจารณาความแม่นยำของสมการจะใช้ค่า R เป็นเกณฑ์ แต่ค่า SEC และ SEP ของสมการก็ส่งผลต่อความ ถูกต้องแม่นยำด้วยเช่นกัน โดยสมการที่มีค่า SEC และ SEP เข้าใกล้ศูนย์ จัดว่ามีความแม่นยำสูงกว่าค่าที่ ห่างจากค่าศูนย์มากกว่า ซึ่งจากสมการเทียบมาตรฐานของผลมะม่วงที่สร้างได้ พบว่า สมการเทียบ มาตรฐานของ TA มีค่า SEC และ SEP สูงกว่าสมการเทียบมาตรฐานของอัตราส่วน TSS/TA และ TSS ตามลำดับ โดยผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้อาจได้รับผลมาจากอิทธิพลของปริมาณและการตอบสนองต่อ แสง NIR ขององค์ประกอบของตัวอย่างแต่ละผล (Williams and Norris, 2001) เนื่องจากผลผลิตผลมะม่วง แต่ละผลมีสภาพทางกายภาพภายนอก เช่น สี ความหนาและลักษณะของผนังผล รวมถึงองค์ประกอบ ภายในผล เช่น ปริมาณน้ำตาล ปริมาณกรด ปริมาณวิตามินต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน

ทั้งนี้ เมื่อได้สมการมาตรฐานการทำนายค่าของเครื่อง NIR แล้วนำไปทดสอบการทำนายค่าในระบบ สายพานลำเลียงเพื่อจำลองสภาพการใช้งานจริงในระบบการคัดเกรดคุณภาพ ก่อนนำไปเปรียบเทียบกับ ค่าวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินความแม่นยำของสมการ พบว่า สมการที่ได้ยังให้ผลในการ ทำนายค่าไม่แม่นยำมากพอจะนำไปใช้ในการคัดเกรดด้วยระบบสายพานลำเลียงอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากความหลากหลายและไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างผลมะม่วงแต่ละผล และปัจจัยจาก ภายนอก เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้ส่งผลต่อการดูดกลืนแสงและองค์ประกอบทาง เคมีของผลมะม่วง รวมถึงข้อจำกัดของตัวโปรแกรมและระบบการประมวลผลของเครื่อง NIR ที่มีผลทำให้ ความแม่นยำในการทำนายค่าของสมการลดลงเมื่อทดสอบการใช้งานจริงในระบบสายพานลำเลียง

มังคุด

ในการศึกษาเพื่อการคัดคุณภาพผลมังคุดที่มีอาการเนื่อแก้วออกจากผลปกติ (Figure 12) โดยใช้ เทคนิค NIRs ในระบบสายพานลำเลียง มีค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างผลมังคุดสดแสดงใน Figure 14 และเมื่อนำตัวอย่างที่วัดค่าการดูดกลืนแสงแล้วไปทดสอบอาการเนื่อแก้ว โดยพิจารณาจากค่าความ ถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของผลมังคุดที่ระยะต่าง ๆ พบว่า จากผลมังคุดทั้งหมด 511 ตัวอย่าง แบ่งเป็นผลปกติ (218 ตัวอย่าง) ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 0.91-1.01 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.96 และ ค่า SD เท่ากับ 0.02 ผลที่แสดงอาการเนื่อแก้ว (242 ตัวอย่าง) มีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 0.94-1.04 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.00 และค่า SD เท่ากับ 0.02 ผลที่ไม่มีเนื่อแก้วแต่มีอาการยางไหล (12 ตัวอย่าง) มีค่า ความถ่วงจำเพาะระหว่าง 0.96-1.01 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.99 และค่า SD เท่ากับ 0.01 และผลที่แสดง อาการเนื่อแก้วและยางไหล (39 ตัวอย่าง) มีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 0.97-1.04 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.01 และค่า SD เท่ากับ 0.02 ดังแสดงใน Table 6 ทั้งนี้ ผลมังคุดที่มีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1 ส่วนใหญ่ เป็น ผลที่มีการเกิดอาการเนื่อแก้ว (ประมาณร้อยละ 56) ขณะที่ผลมังคุดปกติมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ กว่า 1 อย่างไรก็ตาม ผลปกติอาจพบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1 ได้เช่นกัน แต่อยู่ในระดับต่ำเพียง

ประมาณร้อยละ 3 และผลมังคุดบางผลที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1 (ค่ามากกว่า 0.9) ก็มีอาการเนื้อแก้วเกิดขึ้นได้เช่นเดียวกัน แต่แสดงอาการเล็กน้อยและอยู่ในระดับที่ยังยอมรับได้ (Figure 13) ดังนั้น ในการทดลองครั้งนี้จึงกำหนดให้ผลมังคุดที่มีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1 เป็นผลที่มีอาการเนื้อแก้วในระดับที่ไม่สามารถยอมรับได้ และใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดแยกผลเนื้อแก้วออกจากผลปกติ



Figure 12 Characteristics of mangosteen fruits with normal (A) and translucent flesh (B)

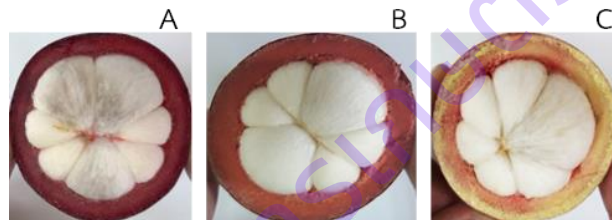


Figure 13 Characteristics of mangosteen fruits with translucent flesh and specific gravity greater than 1 (A), normal fruits with specific gravity less than 1 (B) and translucent-fleshed fruits but has a specific gravity less than 1 (C).

Table 6 Specific gravity of normal-, translucent-, gamboge-, and translucent and gamboge-fleshed mangosteen fruits.

characteristics	no. of samples	specific gravity			
		minimum value	maximum value	mean	standard deviation
normal-flesh	218	0.91	1.01	0.96	0.02
translucent-flesh	242	0.94	1.04	1.00	0.02
gamboge-flesh	12	0.96	1.01	0.99	0.01
translucent and gamboge-flesh	39	0.97	1.04	1.01	0.02
Total	511	0.91	1.04	0.98	0.03

ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างผลมังคุดสดที่วัดได้จากเครื่อง NIR ในระบบสายพานลำเลียงที่ช่วงความยาวคลื่นสั้นระหว่าง 700-1,100 นาโนเมตร มีความคล้ายคลึงกับผลไม้ชนิดอื่น ๆ คือ เห็นพีคของน้ำชัดเจนที่ตำแหน่ง 970 นาโนเมตร และบดบังพีคที่เป็นลักษณะเด่นขององค์ประกอบอื่น ๆ (Figure 14) เนื่องจากมังคุดมีปริมาณน้ำเป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 80

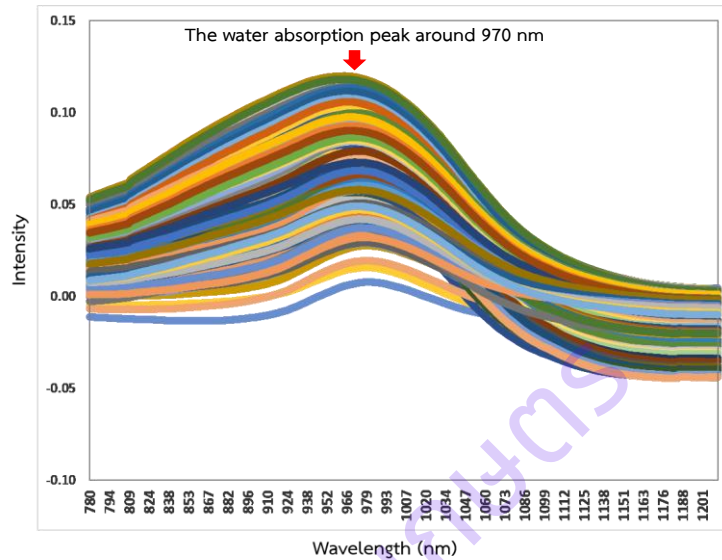


Figure 14 Original NIR spectra of mangosteen fruits after using near-infrared spectroscopy scanning on conveyor system at wavelengths between 700-1100 nanometres.

ตัวอย่างผลมังคุดที่ผ่านการวัดค่าการดูดกลืนแสง แล้วนำไปหาค่าความถ่วงจำเพาะของผลแต่ละผล พร้อมทั้งผ่าผลเพื่อตรวจสอบยืนยันอาการเนื้อแก้วสำหรับใช้เป็นค่าอ้างอิงในการสร้างสมการความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงกับความถ่วงจำเพาะผลมังคุด พบว่า ผลมังคุดกลุ่ม Cset จำนวน 361 ตัวอย่าง มีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 0.91-1.04 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.98 โดยที่ค่าความสัมพันธ์ของสมการ คือ ค่า R มีค่าเท่ากับ 0.66 ขณะที่ค่า SEC และค่า bias มีค่าเท่ากับ 0.02 และ 2.46×10^{-8} ตามลำดับ ส่วนกลุ่ม Vset จำนวน 150 ตัวอย่าง มีค่าวิเคราะห์ระหว่าง 0.92-1.04 โดยมีค่า R เท่ากับ 0.63 ขณะที่ค่า SEP และ Bias เท่ากับ 0.02 และ 0.001 ตามลำดับ (Table 7)

Table 7 Number of samples, specific gravity and statistics of calibration equation of mangosteen fruits.

item	no. of samples	range	mean	SD	R	SEC / SEP	bias
Cset	361	0.91 – 1.04	0.98	0.03	0.66	0.02	2.46×10^{-8}
Vset	150	0.92 – 1.04	0.98	0.03	0.63	0.02	0.001

จากกราฟการกระจายตัวระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับค่าทำนายในกลุ่ม Cset (Figure 15) และ Vset (Figure 16) จะเห็นได้ว่า ข้อมูลกระจายตัวของค่าความถ่วงจำเพาะในกลุ่ม Cset มีการเกาะกลุ่มกันอยู่ใกล้เส้นเป้าหมาย แต่ยังมีค่าที่กระจายตัวอยู่ห่างจากเส้นเป้าหมายค่อนข้างกว้าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความแม่นยำของสมการในการทำนายค่าด้วยเทคนิค NIRs เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจริงที่วัดได้ในระดับต่ำ เช่นเดียวกับข้อมูลการกระจายตัวของค่าความถ่วงจำเพาะในกลุ่ม Vset ซึ่งมีค่าที่อยู่ห่างจากเส้นเป้าหมาย แสดงถึงผลของความแม่นยำในการทำนายค่าของสมการที่ลดลงเช่นกัน สอดคล้องกับค่า R ของกลุ่ม Cset และ Vset ที่มีค่าค่อนข้างต่ำ คือ 0.66 และ 0.63 ตามลำดับ แม้ว่าจะมีค่า SEC และ SEP ที่เข้าใกล้ศูนย์มากก็ตาม สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของผลมั่งคุดในการทำนายค่าความถ่วงจำเพาะ แสดงดัง Figure 17 พบว่า พิกของค่าความยาวคลื่นมีความถี่สูง ไม่แยกออกมาเป็นพิกที่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับค่า R ของสมการที่มีค่าค่อนข้างต่ำ แสดงถึงความถูกต้องแม่นยำของสมการที่มีค่าต่ำเช่นเดียวกัน

โดยเมื่อพิจารณาจากค่า R ของสมการมาตรฐานเบื้องต้นที่สร้างขึ้นนี้ สามารถตีความได้ว่า สมการเทียบมาตรฐานของค่าความถ่วงจำเพาะผลมั่งคุดมีการทำนายค่าได้ในระดับต่ำ และยังไม่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายค่า (Table 3) ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากความแตกต่างกันของสภาพทางกายภาพภายนอก เช่น สี ความหนาและลักษณะของผนังผล และองค์ประกอบภายในผล เช่น ปริมาณน้ำตาล ปริมาณกรด ปริมาณวิตามินต่าง ๆ รวมถึงอาการผิดปกติที่เกิดขึ้นในผลมั่งคุดแต่ละผล ได้แก่ อาการเนื้อแก้ว อาการยางไหล อาการเนื้อแก้วยางไหล ที่มีลักษณะและความรุนแรงที่ไม่เท่ากัน ทำให้ส่งผลต่อค่าการดูดกลืนแสงที่วัดจากเครื่อง NIR นอกจากนี้ ค่าความถ่วงจำเพาะที่นำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานของผลมั่งคุดไม่สามารถคัดแยกอาการเนื้อแก้วในผลมั่งคุดได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเห็นได้จากการที่ผลมั่งคุดที่มีอาการเนื้อแก้วบางผลมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1 ขณะที่ผลมั่งคุดปกติอาจพบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1 ได้เช่นเดียวกัน จึงเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำของสมการที่ใช้ในการทำนายค่า

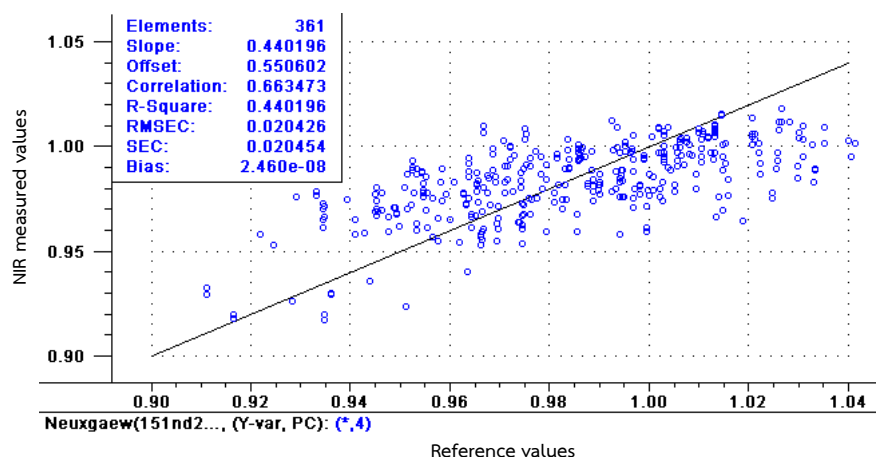


Figure 15 Scatter plot of calibration set between specific gravity values determined by laboratory procedures and estimated by NIR Spectroscopy in mangosteen fruits.

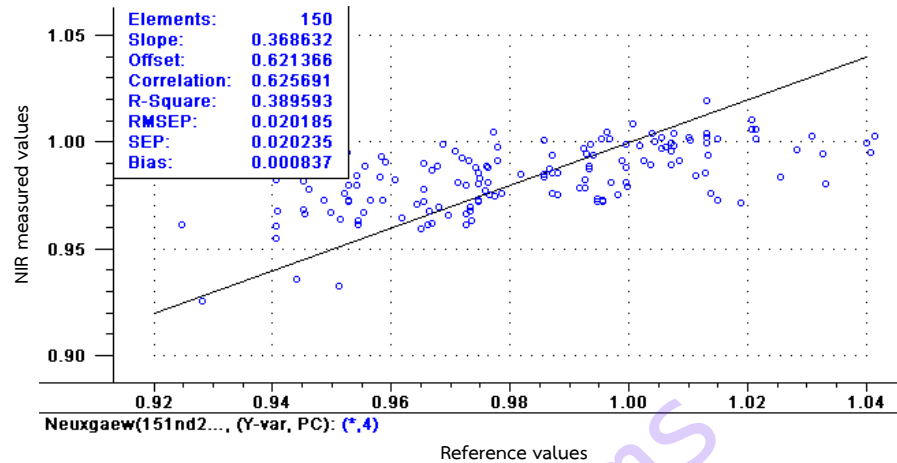


Figure 16 Scatter plot of validation set between specific gravity values determined by laboratory procedures and estimated by NIR Spectroscopy in mangosteen fruits.

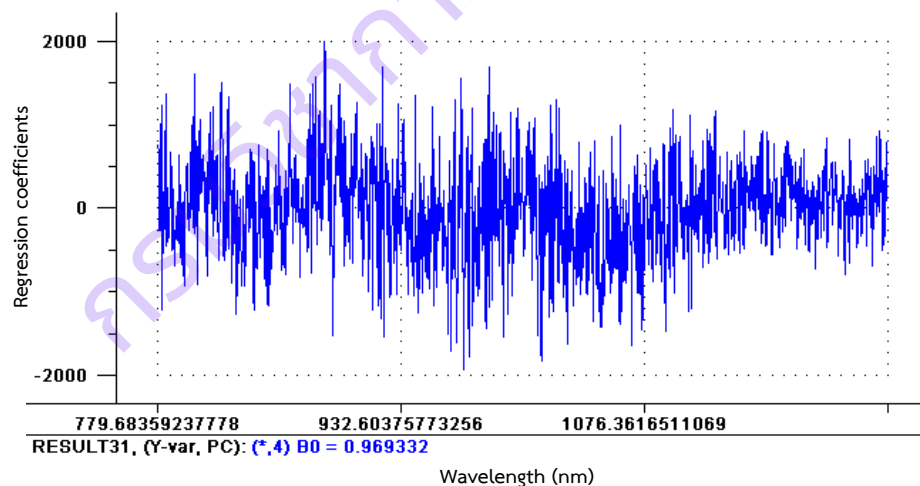


Figure 17 Regression coefficients to estimate the specific gravity from the NIR spectra in mangosteen fruits.

9. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ :

สมการเทียบมาตรฐานของปริมาณ TSS TA และอัตราส่วน TSS/TA ของผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง และอาการเนื้อแก้วในผลมังคุด ที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่อง NIR ในช่วงความยาวคลื่นสั้นระหว่าง 700-1,100 นาโนเมตร ที่ติดตั้งอยู่ในระบบสายพานลำเลียงกับค่าวิเคราะห์

คุณภาพในท้องปฏิบัติการ มีผลการวิเคราะห์ข้อมูล คือ ผลการประเมินความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานของปริมาณ TSS และอัตราส่วน TSS/TA ในผลมะม่วง พบว่า สามารถใช้ทำนายค่าได้ในระดับการประมาณค่าอย่างหยาบ ๆ ขณะที่สมการเทียบมาตรฐานของปริมาณ TA มีผลการประเมินความแม่นยำในระดับที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้หรืองานวิจัยได้ แต่จากการทดสอบการทำนายค่าในระบบสายพานลำเลียงในสภาพจำลองการใช้งานจริง พบว่า สมการที่ได้ยังให้ผลในการทำนายค่าไม่แม่นยำมากพอจะนำไปใช้ในการคัดเกรดด้วยระบบสายพานลำเลียงอย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่สมการเทียบมาตรฐานในการคัดแยกผลมังคุดที่มีอาการเนื้อแก้วด้วยค่าความถ่วงจำเพาะ มีค่า R ค่อนข้างต่ำ แสดงให้เห็นว่า สามารถใช้ทำนายค่าได้ในระดับต่ำ

10. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ :

1. เป็นข้อมูลในการปรับปรุงและพัฒนาสมการทำนายค่าคุณภาพผลมะม่วงและมังคุดให้มีความแม่นยำมากขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการคัดคุณภาพผลิตผล
2. เผยแพร่ในรูปแบบโปสเตอร์หรือบรรยาย เพื่อเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการของประเทศไทย
3. เผยแพร่ในวารสารวิชาการ

11. คำขอบคุณ (ถ้ามี) : -

12. เอกสารอ้างอิง :

- จักรพงษ์ นาทวิชัย สมชาย พัฒนา วิบูลย์ ช่างเรือ ปารีชาติ เทียนจุมพล พิเชษฐ์ น้อยมณี รัฐพล พรประสิทธิ์ บวรศักดิ์ ศรีสังสิทธิสันติ และศศิธร การะบุญ. 2554. การประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีบนชุดสายพานลำเลียงเพื่อคัดแยกคุณภาพของผลไม้ด้วยความหวาน. คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาบันวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่. 122 หน้า.
- สนธิสุข อีระชัยชยุติ อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล จุฑามาศ ผลอุดม และวรรณชยา เอี่ยมเสถียรพร. 2553. การทำนายอาการเนื้อแก้วจากน้ำมังคุดโดยใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด. ว. วิทย. กษ. 41: 385-388.
- สิรินาฏ น้อยพิทักษ์ อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล และศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์. 2553. การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเพื่อคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วแบบไม่ทำลายโดยสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. ว. วิทย. กษ. 41: 393-396.
- องค์อร กล้าเจริญ. 2553. การทำนายสมบัติทางประสาทสัมผัสของมะม่วงสุกด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.

- Kawano, S., H. Watanabe and M. Iwamoto. 1992. Determination of sugar content in intact peaches by near infrared spectroscopy with fiber optics in interactance mode. *J JPN Soc Hortic Sci.* 61: 445-451.
- Lammertyn, J., A. Peirs, J. De Baerdemaeker and B. Nicolai. 2000. Light penetration properties of NIR radiation in fruit with respect to non-destructive quality assessment. *Postharvest Biol. Technol.* 18: 121-132.
- Masud, M.M., J. Gao, L. Khan, J. Han and B. Thuraisingham. 2009. A multi-partition multi-chunk ensemble technique to classify concept-drifting data streams. *In: Theeramunkong, T., B. Kijirikul, N. Cercone, T.B. Ho (Eds.) Advances in Knowledge Discovery and Data Mining.* Springer Berlin Heidelberg, Germany. pp 363-375.
- Miyamoto, K., M. Kawauchi and T. Fukuda. 1998. Classification of high acid fruits by partial least squares using the near Infrared transmittance spectra of intact satsuma mandarins. *J. Near Infrared Spectrosc.* 6: 267-271.
- Osborne, B.G. 1981. Principles and practice of near infra-red (NIR) reflectance analysis. *Int. J. Food Sci. Technol.* 16: 13-19.
- Osborne, B.G., T. Fearn, and P.H. Hindle. 1993. *Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis.* 2nd ed. Longman Group UK limited. 227 p.
- Sarangwong, S., J. Sornsrivichi and S. Kawano. 2003. Performance of a portable near infrared instrument for brix value determination of intact mango fruit. *J. Near Infrared Spectrosc.* 11: 175-181.
- Sarangwong, S., J. Sornsrivichi and S. Kawano. 2004. Prediction of ripe-stage eating quality of mango fruit from its harvest quality measured nondestructively by near Infrared spectroscopy. *Postharvest Biol. Technol.* 31: 137-145.
- Schmilovitch, Ze'ev., A. Mizrach, A. Hoffman, H. Egozi and Y. Fuchs. 2000. Determination of mango physiological indices by near-infrared spectrometry. *Postharvest Biol. Technol.* 19: 245-252.
- Williams, P. 2007. Application to agricultural and marine products. *In: Ozaki Y., W.F. McClure and A.A. Christy (Eds.) Near-Infrared Spectroscopy in Food Science and Technology.* John Wiley and Sons Inc. Publication, New Jersey, USA. pp. 165-218.
- Williams, P. and K. Norris. 1987. Near-infrared technology in the agricultural and food industries. Jackson, D.S. and L.W. Rooney (Eds) *American Association of Cereal Chemists*, St. Paul, Minnesota, USA. pp. 246.

Williams, P. and K.H. Norris. 2001. Variables affecting near infrared spectroscopic analysis.
In: Williams, P. and K.H. Norris (Eds.) Near-infrared technology in the agricultural and food industries (2nd ed.). American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, USA. pp. 171-185.

13. ภาคผนวก :-

กรมวิชาการเกษตร