

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติและความเป็นมาของมะขงชิด

ได้รับการขึ้นทะเบียนพันธุ์พืชเลขที่ 001/2553 ตามพระราชบัญญัติพันธุ์พืช พ.ศ. 2518 กรมวิชาการเกษตรมะขงชิดมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bouea burmanica* Griff. มีชื่อพ้องอีก 2 ชื่อคือ *Bouea oppositifolia* (Roxb.) Meissn. หรือ *Bouea microphylla* Griff. (กวิศร์และศิริวรรณ, 2552) เป็นพืชที่จัดอยู่ในวงศ์ Anacardiaceae (Cashew family) เช่นเดียวกับ มะม่วงหิมพานต์ มะม่วง มะกอก ไม้ผลในกลุ่มมะขงชิดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจแบ่งตามลักษณะของรสชาติแบ่งได้ 3 ชนิด คือ รสเปรี้ยว มีรสเปรี้ยวจัดแม้แต่ผลจะสุกก็ตาม รสหวาน มีรสหวานเมื่อสุก และมะขงผลมีรสหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย แบ่งออกเป็น 2 พวก คือ พวกที่มีรสหวานอมเปรี้ยว ให้ชื่อว่ามะขงชิด และพวกที่มีรสหวานอมเปรี้ยวมาก เรียกว่า มะขงห่าง (ชวนชม, 2550) มะขงชิดนั้นจะมีขนาดผลใหญ่กว่ามะปรางหวานมีเนื้อ มากเลี่ยนน้อย รสชาติหวานอมเปรี้ยว ปัจจุบันนิยมปลูกกันมากและสร้างรายได้ให้กับผู้ปลูกได้มากกว่าอย่างอื่นโดยพันธุ์มะขงชิดที่น่าสนใจ เช่น ทูลเกล้า พันธุ์หวานพวง ลูกชิด สวนสวรรค์ สุวรรณบาตร ปทุมทอง มหาชนก ไข่ห่าน (เพชรคลองลาน) เป็นต้น (ภาพที่ 2.1)



ภาพที่ 2.1 แสดงลักษณะต้นมะขงชิด ผลอ่อนมะขงชิด และผลสุกมะขงชิด

ที่มา :<http://www.rakbankerd.com> (2555)

คุณค่าทางอาหารของมะขงชิดในหนึ่งผล

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณคุณค่าทางอาหารของมะขงชิด

พลังงานและสารอาหาร	ปริมาณสารอาหาร
พลังงาน	60 กิโลแคลอรี
ความชื้น	83 เปอร์เซ็นต์
โปรตีน	0.8 กรัม
ไขมัน	0.1 กรัม
คาร์โบไฮเดรต	15.7 กรัม
แคลเซียม	12 กรัม
วิตามิน บี 1	0.04 มิลลิกรัม
วิตามิน บี 2	0.4 มิลลิกรัม
วิตามิน ซี	107 มิลลิกรัม
ไนอาซิน	0.4 มิลลิกรัม

ที่มา : (ศักรินทร์, 2557)

มะขงชิด เป็นผลไม้ที่ปลูกมากในจังหวัดนครนายกมีการปลูกกันหลายพันธุ์ด้วยกัน เช่น

- มะขงชิดพันธุ์ทุลเกล้า จะติดผลปีหนึ่ง 2 - 3 รุ่น เวลาติดผลจะดกมาก และผลมีขนาดเสมอกันทุกพวง เมล็ดลีบ มะขงชิดพันธุ์ทุลเกล้า ผลจะมีขนาดใหญ่กว่ามะขงชิดทั่วไป เนื้อในมาก เวลานำไปซังกิโลขายจะให้น้ำหนักดีมาก อยู่ระหว่าง 10 - 15 ผล ต่อ 1 กิโลกรัม

- มะขงห่าง ลักษณะภายนอกใกล้เคียงกับมะขงชิด แต่ต่างกันที่รสชาติ คือเปรี้ยวเสียมาก มีหวานผสมอยู่เพียงเล็กน้อย มะขงห่างไม่ค่อยนิยมปลูกเพื่อการค้า

- กาวาง รูปลักษณ์ภายนอกเหมือนมะขงชิด และมะขงห่าง แต่มีรสเปรี้ยวจัดใกล้เคียงกับมะดัน มีเรื่องเล่าว่า มีนกกาที่หัวโซ เห็นสีเหลืองสวยของไม้ผลชนิดนี้ ลองจิกเพื่อลิ้มรสดูแต่ ต้องรีบวาง จึงเรียกผลไม้ที่ว่า "กาวาง" (พนม, 2555)

2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์พันธุ์ทุลเกล้ามี ดังนี้

ต้น ต้นแม่พันธุ์อายุประมาณ 32 ปี ทรงพุ่มแผ่ออกเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 46.5 เซนติเมตร สูงประมาณ 5 เมตร ผิวเปลือกต้นค่อนข้างเรียบ เปลือกลาต้นสีน้ำตาลเข้ม

ใบ เป็นใบเดี่ยว ออกตรงข้ามกัน ใบสีเขียวเข้ม เป็นรูปรี รูปร่างฐานใบรูปกลม ปลายใบเรียวแหลม ขอบใบเรียบ แผ่นใบเรียบการนูนด้านบนแผ่นใบมีเส้นกลางใบนูนขึ้นอย่างชัดเจนส่วนด้านล่างของแผ่นใบจะสัมผัสความนูนของเส้นแขนงใบ

ดอก ออกเป็นช่อตามปลายยอด และตามซอกใบคล้ายดอกสะเดา ดอกมีสีเหลืองอ่อนความยาวช่อดอกประมาณ 2 นิ้ว การออกดอกขึ้นกับสภาพอากาศอุณหภูมิควรต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส และสลับร้อนจึงจะออกดอกหลายรุ่นระยะเวลาดอกบาน 7 - 10 วัน

ผล ผลยาวรีเป็นรูปไข่ ความยาวผลประมาณ 7 เซนติเมตร ความกว้างผลประมาณ 4 เซนติเมตร ผลดิบสีเขียว ผลแก่สีเหลืองปนส้มเนื้อค่อนข้างแข็งกรอบตำแหน่งการเปลี่ยนสีผลสุกจากปลายผลไปหาหัว ผลรสชาติของผลสุกจะมีรสหวานอมเปรี้ยว อายุเก็บเกี่ยวนับจากวันดอกบานจนเก็บเกี่ยวประมาณ 75 - 80 วัน

เมล็ด เนื้อเมล็ดเป็นสีม่วง รูปร่างยาวรี มีขนรอบเมล็ด ความกว้างของเมล็ดประมาณ 3 เซนติเมตร ความยาวประมาณ 5 เซนติเมตร

มะขงชิด เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญและเป็นไม้ผลที่สร้างชื่อให้กับจังหวัดนครนายก โดยจังหวัดนครนายกมีพื้นที่ปลูกมะขงชิดประมาณ 4,927 ไร่ ผลผลิตรวม 2,000 ตันต่อปี สามารถสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรประมาณ 200 ล้านบาทต่อปี และจังหวัดนครนายกได้จัดงานมะขงชิด-มะปร่างหวานเป็นประจำทุกปี (สวนเปรมปรี, 2555)

เกษตรกรผู้ปลูกมะขงชิดในจังหวัดนครนายกมีจำนวนมากทั้งรายเล็กและรายใหญ่ เกษตรกรส่วนหนึ่งมีการรวมกลุ่มในการพัฒนาการผลิตและการจำหน่ายแต่ยังมีเกษตรกรจำนวนมากที่ยังขาดเทคโนโลยีในการผลิตและแนวทางการตลาดมีการรวมตัวกันน้อยและเป็นการรวมตัวกันแบบหลวมๆเพื่อให้เกษตรกรมีความสามารถในการผลิตและมีการพัฒนาด้านการตลาด ดังนั้นสำนักงานเกษตรจังหวัดนครนายก จึงพิจารณาจัดทำโครงการส่งเสริมปรับปรุงคุณภาพมะขงชิด (บันทึกวังสระปทุมในความทรงจำ, 2551)

2.1.3 กระบวนการสุกของผลไม้

ในผลไม้จะมีอาหารสะสมในรูปอื่น เช่น กรดอินทรีย์ไขมัน โปรตีน เป็นต้น อาหารที่สะสมอยู่จะถูกใช้ในการหายใจในลักษณะที่คล้ายคลึงกับอาหารสะสมในรูปของคาร์โบไฮเดรต แต่จะได้พลังงานที่หายใจแตกต่างออกไป กรดอินทรีย์ เช่น กรดมาลิก และกรดซิตริก ที่ผลไม้บางชนิดเก็บเก็บสะสมในแวคิวโอ (vacuole) ทำให้เกิดรสชาติและกลิ่นเฉพาะ หรืออาจเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลซูโคส ซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาย้อนกลับของ Glycolysis แล้วน้ำตาลซูโคสแตกตัวเป็นน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรุกโตส ก่อนการจะเกิดปฏิกิริยา Glycolysis โดยใช้น้ำตาลทั้งสองเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการหายใจต่อไป

ผลไม้ประเภท climacteric มักเป็นผลไม้ที่มีการเก็บสะสมอาหารในรูปของแป้งหรือไขมัน ผลไม้เหล่านี้สามารถเก็บเกี่ยวแล้วนำมาทิ้งไว้ให้สุกได้ เนื่องจากในระหว่างการสุกของผลเกิดการหายใจจะสร้างก๊าซเอทิลีน ขึ้นภายในเนื้อเยื่อ ก๊าซเอทิลีนในเนื้อเยื่อที่ถูกสร้างขึ้นจะไปกระตุ้นให้เกิดการสุก ส่วนมะขงชนิดจัดเป็นผลไม้ในกลุ่ม non – climacteric เมื่อถูกเก็บเกี่ยวมาแล้วจะมีอัตราการหายใจค่อนข้างต่ำและคงที่ ตั้งแต่เริ่มเข้าสู่ระยะการสุกไปกระทั่งผลไม้ที่นั้นชราและตายไป ผลไม้เหล่านี้อาจมีการเก็บสะสมอาหารในรูปของน้ำตาลหรือกรดอินทรีย์ ผลไม้พวกนี้ไม่สามารถนำมาวางทิ้งไว้ให้สุกได้จึงจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวเมื่อสุกแล้วเท่านั้น ผลไม้พวก non – climacteric อาจมีการสร้างก๊าซเอทิลีนภายในเนื้อเยื่อในอัตราหรือปริมาณที่ต่ำทำให้กระบวนการสุกเกิดขึ้นช้าๆ นอกจากนี้ การใช้ก๊าซเอทิลีนกระตุ้นจากภายนอกให้เกิดการสุก ผลไม้เหล่านี้จะไม่ตอบสนองโดยมีอัตราการหายใจสูงขึ้นได้ตลอดระยะเวลาที่มีการใช้ก๊าซเอทิลีน เมื่อหยุดการใช้ก๊าซเอทิลีนกระบวนการหายใจของผลไม้ประเภท non – climacteric ก็จะกลับเข้าสู่ระดับเดิม โดยไม่มีการเพิ่มอัตราการหายใจให้สูงขึ้น แต่ยังมีสถานะต่างๆที่มีผลต่อปัจจัยการหายใจของผลไม้ ดังนี้

- อุณหภูมิ

มีอิทธิพลมากต่ออัตราเมตาบอลิซึมของผลไม้ เมื่ออุณหภูมิสูงอัตราการเกิดปฏิกิริยาการหายใจก็สูงตามไปด้วย

- องค์ประกอบของสภาพบรรยากาศ

องค์ประกอบของสภาพบรรยากาศที่ผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวจะได้รับมีอิทธิพลต่อการหายใจ

- ความชื้นของผลไม้

ปริมาณความชื้นภายในผลไม้ มีผลต่อการหายใจเมื่อความชื้นภายในผลไม้ลดลงผลไม้มีความชื้นต่ำอัตราการหายใจก็จะต่ำลงไปด้วยเมื่อเทียบกับผลไม้ที่มีความชื้นสูง

- บาดแผล

เซลล์ที่มีบาดแผลจะได้รับการกระตุ้นให้เนื้อเยื่อมีอัตราการหายใจสูงขึ้น บาดแผลเหล่านั้นอาจมาจากผลของการเก็บเกี่ยว ลม ฝน หรือศัตรูพืช (สังคม, 2536)

2.2 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (near infrared spectroscopy; NIRS)

เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (near infrared spectroscopy; NIRS) เป็นวิธีการวิเคราะห์โมเลกุลที่ไม่ทำลายตัวอย่าง โดยอาศัยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืน โดยตัวอย่างเป็นวิธีการที่ให้ผลที่ดีและรวดเร็ว ถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดผลิตภัณฑ์ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ตั้งแต่การตรวจสอบวัตถุดิบไปจนถึงการตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เมื่อฉายแสงในช่วงความยาวคลื่น NIR ลงไปบนตัวอย่างแสงที่มีพลังงานเพียงพอจะถูกดูดกลืนและกระตุ้นให้เกิดการสั่นของโมเลกุลใน functional groups ต่าง ๆ 2 ลักษณะ คือ การยืดหด (stretching) และการเปลี่ยนมุม (bending) ช่วงความถี่ overtones และ combination ของหมู่ฟังก์ชัน O-H, C-H, N-H และ O=H ซึ่งเป็น โมเลกุลหลักของสารอินทรีย์ถ้าโครงสร้างโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ตรวจวัดมีความซับซ้อนสเปกตรัมที่ได้จะยังมีการซ้อนทับกันมากขึ้น (Osborne *et al.* 1993)

near Infrared เป็นคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 800 - 2500 นาโนเมตร สามารถแบ่งช่วงความยาวคลื่นออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงคลื่นสั้นที่มีความยาวคลื่น 800 - 1100 นาโนเมตรและช่วงคลื่นยาวที่มีความยาวคลื่น 1100 - 2500 นาโนเมตร (Osborne *et al.*, 1993) ซึ่งจะมีผลทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นที่มีความถี่สูง โมเลกุลจะถูกกระตุ้นจาก ground vibrational level ไปยัง excited vibrational level คลื่นแสงเนียร์อินฟราเรด (near infrared; NIR) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ระหว่างช่วงคลื่นแสงวิสิเบิล (visible) และช่วงคลื่นแสงอินฟราเรดย่านกลาง (middle infrared; MIR) คลื่นแสง NIR สามารถแบ่งช่วงความยาวคลื่นออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงคลื่นสั้นที่มีความยาวคลื่น 800 - 1100 นาโนเมตร และช่วงคลื่นยาวที่มีความยาวคลื่น 1100 - 2500 นาโนเมตร พลังงานของคลื่นแสง NIR จะอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับการสั่น (vibration) ของพันธะภายในโมเลกุลหากการสั่นของพันธะใดเกิดที่ความถี่ที่ตรงกับความถี่ของคลื่นแสง NIR ก็จะเกิดการดูดกลืนขึ้น (ศิริพร, 2551) ซึ่ง

การดูดกลืนแสง NIR ใช้มากในการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพของสารประกอบอินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ

ตารางที่ 2.2 การแบ่งช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด

ช่วงคลื่น	ช่วงความยาวคลื่น (nm)	Wavenumber (cm ⁻¹)
Region I	800 – 1100	12500 – 9000
Region II	1200 – 1800	8500 – 5500
Region III	1800 – 2500	5500 – 4000

ที่มา : นิพนธ์ (2545)

เมื่อต้องการหาองค์ประกอบหนึ่งในตัวอย่างจะต้องเลือกความยาวคลื่นจำเพาะเพื่อให้องค์ประกอบนั้นดูดกลืนคลื่นแสง NIR ไว้ spectrum จาก NIR เป็น absorption spectrum จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนพลังงานกับความยาวคลื่นเมื่อต้องการหาองค์ประกอบหนึ่งในตัวอย่าง จะต้องเลือกความยาวคลื่นจำเพาะ เพื่อให้องค์ประกอบนั้นดูดกลืนคลื่นแสง NIR ไว้ spectrum จาก NIR เป็น absorption spectrum จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนพลังงานกับความยาวคลื่น

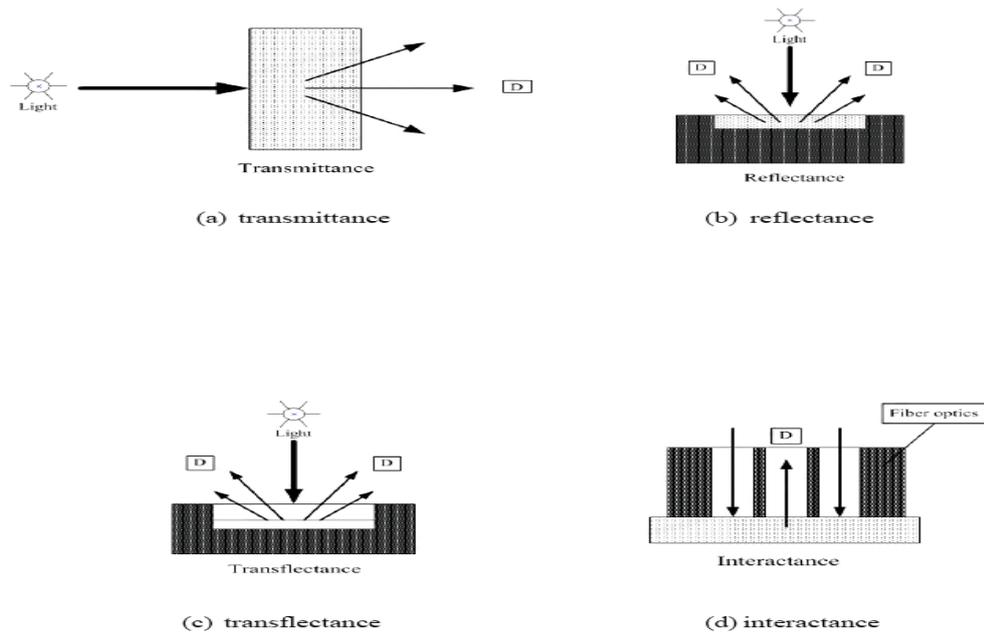
2.2.1 หลักการวัดของเครื่อง NIR spectroscopy มีด้วยกันหลายเทคนิค คือ (ศุมาพร, 2554)

2.2.1.1 transmission เป็นการวัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมาในด้านตรงกันข้ามกับด้านที่แสงตกกระทบ (ภาพ 2.2 a)

2.2.1.2 reflection แสงตกกระทบที่พื้นผิวของตัวอย่างวัดปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาโดยรวมถึงแสงที่สะท้อนจากเนื้อตัวอย่างส่วนที่ใกล้ผิวตัวอย่างได้อีกด้วย (ภาพ 2.2 b)

2.2.1.3 transflection แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบตัวอย่างผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบแผ่นเซรามิก ทอง หรืออะลูมิเนียมในชั้นใต้สุดแล้วสะท้อนกลับมายัง detector (ภาพ 2.2 c)

2.2.1.4 interaction ใช้ในกรณี fiber optics probe แสงจากแหล่งกำเนิดแสงย่าน NIR ส่งผ่านลงมายังตัวอย่างในวงแหวนคานนอก แล้วแสงที่สะท้อนออกมาจากเนื้อตัวอย่างถูกส่งไปยัง detector บริเวณส่วนกลาง (ภาพ 2.2 d)



ภาพที่ 2.2 รูปแบบการวัด (a) transmittance, (b) reflectance, (c) transflectance และ (d) interactance

ที่มา: Kawano (2002)

2.2.2 หลักการพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ (ศุมาพร, 2545)

2.2.2.1 การเตรียมตัวอย่างและการทำ calibration ตัวอย่างที่ใช้วัดควรมีขนาดรูปร่าง และพื้นที่ผิวของอนุภาคที่เหมือนกัน จำนวนตัวอย่างที่นำมาใช้ในการวัด NIRS จะต้องมียุ่จำนวนมากพอที่จะเป็นตัวแทนตัวอย่างได้ทั้งหมด และมีการกระจายค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ต้องการวัดสม่ำเสมอและครอบคลุมทุกค่าที่ต้องการวัดภายในอนาคต โดยตัวอย่างจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ calibration set กับ validation set หรือ test set จำนวนตัวอย่างของ calibration set จะมีมากกว่าตัวอย่างของ validation set เสมอ ตัวอย่างที่เตรียมมาทำการวัดโดยวิธี NIRS ควรจะเป็นตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกัน เพราะวิธี NIRS ใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์ที่วัดได้จากตัวอย่าง ดังนั้นตัวอย่างจึงควรมีขนาดสม่ำเสมอ และมีการควบคุมอุณหภูมิคงที่ หรือประมาณ 25 องศาเซลเซียส (หรือเป็นอุณหภูมิเดียวกับที่จะใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างในอนาคต การเตรียมตัวอย่างก่อนทำการวัด NIRS นั้นมีความสำคัญมากจะต้องควบคุมสภาวะให้คงที่ ไม่ทิ้งตัวอย่างให้นานเกินไป ไม่เช่นนั้นปริมาณความชื้นที่วัดได้หรือความเข้มข้นขององค์ประกอบทางเคมีจะไม่ตรงกับความเป็นจริง

เครื่องมือ NIRS ต้องทำ calibration เช่นเดียวกับเครื่องมือทั่วไปก่อนที่จะนำไปใช้วิเคราะห์ ในเชิงปริมาณและคุณภาพ จะแตกต่างกันที่วิธีการ calibration จะค่อนข้างยุ่งยาก ทั้งนี้เนื่องมาจากว่า สเปกตรัม NIR ที่ได้ (ซึ่งคือ ปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นในย่าน near infrared) จะมีจุดยอด (peaks) ไม่ชัดเจน เนื่องจากการซ้อนทับกันของจุดยอดหลายค่า (overlapping absorption bands) อย่างไรก็ตามวิธีการ calibrating statistics หลายวิธีสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ เช่น multiple linear regression (MLR), partial least squares regression (PLSR) หรือ principal components regression (PCR) เป็นต้น โดยวิธีดังกล่าวจะวิเคราะห์ความยาวคลื่นของสเปกตรัมที่มี ปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสงสัมพันธ์กับปริมาณองค์ประกอบทางเคมี ค่าทางเคมีที่ต้องการจะวัด นั้นต้องทำการทดสอบมาอย่างถูกต้อง เป็นค่าที่เชื่อถือได้ ซึ่งวิธีการวัดนั้นต้องเป็นวิธีการที่เป็นที่ ยอมรับกัน โดยค่าทางเคมีต้องทำอย่างน้อย 2 ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ย ค่าอ้างอิงที่ได้จากการวิเคราะห์ทาง เคมีนั้นจะมีผลต่อค่าความถูกต้องและแม่นยำต่อการวัดโดยใช้เทคนิค NIRS การทำ calibration ใน ปัจจุบันนี้ สมการที่ได้ต้องพิจารณาค่า standard error of prediction (SEP) และค่า bias ประกอบ การเลือกสมการที่เหมาะสมเป็นหัวใจสำคัญของการใช้เทคนิค NIRS ซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์และ ความชำนาญในการเลือก สมการที่ได้จะนำมาใช้ประโยชน์ โดยทดสอบการทำนายค่าจากตัวอย่างที่ เป็นอิสระว่าสามารถทำนายค่าได้ถูกต้องหรือไม่

เมื่อนำตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนการสร้างสมการ จะได้ข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากเครื่อง NIR กับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี จากนั้นจะนำข้อมูลที่รวบรวมได้มาสร้างสมการที่ใช้ ทำนาย ในการสร้างสมการสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ

- กำหนดตัวแปรอิสระ (independent variables) และตัวแปรตาม (dependent variables)
- การสร้างสมการที่ใช้ในการทำนายตัวแปรที่ทำการศึกษา
- เทคนิคการแปลงข้อมูลสเปกตรัมก่อนการสร้างสมการที่ใช้ในการทำนาย

การกำหนดตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่นำมาใช้ในการสร้างสมการ ตัวแปรอิสระที่ นำมาใช้ในการสร้างสมการจะเป็นข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากเครื่อง NIR เช่น ค่า $\log(1/R)$ หรือ ค่า OD เป็นต้น สำหรับตัวแปรตามจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี เช่น ปริมาณ ความชื้นจากการวิเคราะห์ด้วย oven drying ปริมาณ โปรตีนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Kjeldahl ปริมาณไขมันจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี soxhlet extraction เป็นต้น

2.2.2.2 การแปลงข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อสเปกตรัมมาก ได้แก่ ความชื้น และขนาดอนุภาค (particle size) ซึ่งจะทำให้สเปกตรัมที่ได้มีความแตกต่างกันอันเนื่องมาจากสภาพกระเจิงแสง และความแตกต่างที่เป็นผลมาจากความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการวัดซึ่งอาจจะทำให้เกิดความแตกต่างในผลเชิงบวก (additive scattering) สเปกตรัมเพิ่มขึ้นตามตลอดช่วงความยาวคลื่น หรือผลเชิงคูณ (multiplicative scattering) สเปกตรัมเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสูงขึ้น นอกจากนี้สเปกตรัมที่ได้จากการดูดกลืนแสงในย่านใกล้อินฟราเรด เป็นสเปกตรัมที่มีการเหลื่อมซ้อนทับกันอยู่ (overlapping band) ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงนำไปปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ก่อนเพื่อลดความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง วิธีที่นิยมใช้ มีหลายวิธี คือ

2.2.2.2.1 derivative

- first derivative เป็นการหาความชันของสเปกตรัม ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่นหรือการเลื่อนตัวของสเปกตรัมแกน Y เนื่องจากอิทธิพลของความชื้น และขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน การทำ first derivative ทำให้การแปลความหมายยาก ดังนั้นจึงนิยมใช้ second derivative มากกว่า first derivative นิยมใช้กับตัวอย่างที่มีเนื้อสม่ำเสมอและการกระจายตัวของอนุภาคทั่วถึง (อนุพันธ์, 2555)

- second derivative การใช้ second derivative จะเป็นการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัม สเปกตรัมที่ได้จะมีรูปร่างที่แตกต่างจากสเปกตรัมเริ่มต้น การหาการเปลี่ยนแปลงของความชัน สามารถแยกจุดยอดที่เหลื่อมซ้อนกันอยู่ สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี second derivative ที่ได้จะมีจุดยอดที่เป็นบวกในด้านซ้ายและด้านขวา ส่วนจุดยอดตรงกลางจะอยู่ตรงด้านซ้ายที่มีค่ามากที่สุดและตรงกับจุดยอดเริ่มต้น การคำนวณการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัมสามารถแยกจุดยอดของสเปกตรัมที่เหลื่อมซ้อนกันของสเปกตรัมเริ่มต้นได้ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี second derivative จึงเป็นที่นิยมมากกว่าวิธี first derivative (อนุพันธ์, 2555)

2.2.2.2.2 multiplicative scatter correction (MSC)

สเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืนย่านแสง NIRS แบบ diffuse reflectance และแบบ transmission มักจะเกิดการกระเจิงแสง (scatter light) ดังนั้น ได้มีการเสนอแนวทางโดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า MSC มาปรับแต่งสเปกตรัม เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ถูกต้องมากขึ้น

2.2.2.2.3 smoothing

การทำ smoothing เป็นวิธีปรับแต่งเส้นสเปกตรัมให้มีความราบเรียบมากขึ้น โดยอาจตัดช่วงความยาวคลื่นในส่วนที่มีสัญญาณรบกวนออก

2.2.2.2.4 normalization

เป็นการปรับสเกลของสเปกตรัมแต่ละเส้นให้เป็นมาตรฐานเดียวกันตามค่าอ้างอิงที่กำหนด การปรับแก้จะเป็นการปรับทีละตัวอย่าง โดยใช้ข้อมูลภายในตัวอย่างนั่นเอง (สุมาพร, อนุพันธ์และคณะ, 2554)

2.2.2.3 วิธีการสร้างสมการ calibration สมการ calibration ประกอบไปด้วยด้วยตัวแปร 2 ชนิด คือ ตัวแปรอิสระ X และตัวแปรตาม Y การหาตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรตามเป็นสิ่งสำคัญของการสร้างสมการ calibration ซึ่งแบ่งได้ 2 วิธีหลัก คือ

2.2.2.3.1 wavelength selection

wavelength selection เป็นการเลือกความยาวคลื่นเฉพาะซึ่งเป็นตัวแปรอิสระให้ความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรตามนั้น มีเทคนิคที่ช่วยในการพิจารณาเลือก คือ

- การใช้กราฟ correlogram หรือ correlation plot ซึ่งเป็นกราฟที่สร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า optical data กับค่า reference data ณ ความยาวคลื่นนั้น โดยพล็อตระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient : R) ขนาดความสัมพันธ์ดังกล่าวกับความยาวคลื่นนั้นๆ ค่า optical data อาจได้มาจากการแปลงข้อมูลโดยวิธีทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ second derivative ($d^2 \log 1/R$) ซึ่งทำให้ค่าลักษณะการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมกลับหัว การใช้ $d^2 \log 1/R$ จะช่วยลดอิทธิพลของ scattering และสามารถแยกปริมาณของการดูดกลืนแสงออกเป็น peak

แยกออกมาให้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งทำให้การพิจารณาเลือกความยาวคลื่นที่มีสัมพันธ์กับค่าตัวแปรตามทำได้สะดวกยิ่งขึ้น

- การพิจารณาเลือกจากเอกสารอ้างอิงที่มีผู้ได้ทำการศึกษามาก่อนหน้านี้ เช่น ปริมาณน้ำมีความสัมพันธ์กับสเปกตรัม NIR ที่ความยาวคลื่นประมาณ 1940 นาโนเมตร

สำหรับเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการคัดเลือกความยาวคลื่นที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวอย่าง เช่น วิธี simple linear regression (SLR) และวิธี multiple linear regression (MLR)

simple linear regression (SLR) เป็นวิธีวิเคราะห์ผลทางสถิติที่นำตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) หนึ่งตัว มาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) เพื่อสร้างสมการที่ใช้ทำนายค่าตัวแปร Y ในการสร้างสมการจะใช้หลักการของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด นอกจากนี้สมการที่ได้จะมีการวัดระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) โดยมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 ถ้ามีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามมาก แต่ถ้ามีค่าเป็นศูนย์แสดงว่าตัวแปรอิสระและตัวแปรตามไม่มีความสัมพันธ์กัน (ธงชัย และ ปิติพร, 2555)

สูตรสมการหาค่า R (กรกช, 2553)

$$R = \frac{\sum XY - n\bar{X}\bar{Y}}{\sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)(\sum Y^2 - n\bar{Y}^2)}} \dots\dots\dots(1)$$

X คือ ข้อมูลค่าที่วัดจริง ตัวแปรอิสระ

Y คือ ข้อมูลค่าทำนาย ตัวแปรตาม

N คือ จำนวนตัวอย่าง

multiple linear regression (MLR) เป็นวิธีการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่นำตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) มากกว่าหนึ่งตัว มาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) ในการนำวิธี MLR มาใช้ในสมการที่สร้างขึ้นมีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าตัวแปร Y ลดลง ในการนำวิธี MLR มาใช้ในการสร้างสมการเพื่อทำนายค่าทางเคมีที่ทำการศึกษา จะทำการกำหนดให้ตัวแปรอิสระเป็นค่าการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่น NIR และตัวแปรตามเป็นข้อมูลที่ได้จากการ

วิเคราะห์ทางเคมี ในการนำเทคนิค MLR มาใช้ในการวิเคราะห์ผล พบว่ามีข้อดีมากกว่าวิธี SLR หลายประการ เช่น สมการที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้กับตัวอย่างที่มีองค์ประกอบซับซ้อนได้ แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีข้อเสีย เช่น การคัดเลือกตัวแปรอิสระหรือค่าการคูณความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลทางเคมีต้องใช้เวลาอันยาวนาน จำนวนของตัวแปรอิสระหรือจำนวนของความยาวคลื่นที่นำมาใช้ในการสมการจะถูกจำกัดโดยจำนวนของตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบ ต้องมีตัวอย่างจำนวนมากเพื่อให้สมการจะถูกจำกัดโดยจำนวนของตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบ ต้องมีตัวอย่างจำนวนมากเพื่อให้สมการที่สร้างขึ้นมีความถูกต้องและแม่นยำ (ชงชัย และ ปิติพร, 2555)

ข้อเสียของสมการที่ใช้ในการทำนายที่สร้างขึ้นจากการใช้ตัวแปรอิสระที่ได้จากวิธี wavelength selection มาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตามนั้น จะเกิดขึ้นเนื่องจากในการคัดเลือกตัวแปรอิสระหรือความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดมาสร้างสมการอาจได้ข้อมูลที่ไม่ครอบคลุมมากพอ ทำให้ค่าที่ทำนายได้จากวิธีนี้มีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่แท้จริง จำนวนตัวอย่างที่นำมาใช้ในการสร้างสมการน้อยเกินไป หรือสมการที่สร้างขึ้นมีจำนวนของตัวแปรอิสระมากเกินไปทำให้ข้อมูลที่ได้อาจไม่น่าเชื่อถือ

2.2.2.3.2 full spectrum method

การที่จะพิจารณาเลือกความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่าองค์ประกอบที่ศึกษานั้นค่อนข้างทำได้ยาก เกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย การใช้ข้อมูลสเปกตรัมทั้งหมดหรือในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจ จะช่วยให้สมการ calibration ที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น ใช้เทคนิค NIR มีวิธีที่นิยมใช้ 2 วิธี คือ principle component regression (PCR) และ partial least square regression (PLSR) ทั้งสองวิธีนี้ต้องใช้ในการสร้างตัวแปรใหม่ ที่เรียกว่า แฟกเตอร์หรือองค์ประกอบ (ชงชัย และ ปิติพร, 2555)

PCR เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดจำนวนของตัวแปรอิสระ ในกรณีที่มีตัวแปรอิสระมีจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น วัดค่าสเปกตรัมที่ 700 ความยาวคลื่น จำนวนสเปกตรัมดังกล่าวก็คือจำนวนของตัวแปรอิสระนั่นเอง การลดจำนวนของตัวแปรมีวิธีการ คือ แบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่ เรียกว่า แฟกเตอร์ หรือองค์ประกอบ แฟกเตอร์ที่สร้างขึ้นอีกนัยหนึ่งก็คือผลรวมของค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นที่น้ำหนักแตกต่างกัน แฟกเตอร์จะมีได้หลายแฟกเตอร์ โดยแต่ละแฟกเตอร์จะแตกต่างกันที่น้ำหนักของแต่ละค่าสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น

ต่างๆ ซึ่งประกอบกันเป็นแฟกเตอร์นั้นๆ แฟกเตอร์แรกจะถูกสร้างขึ้นมาให้สามารถอธิบายความแปรปรวนที่เหลือ ซึ่งจะทำให้แฟกเตอร์แต่ละแฟกเตอร์แทบไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการวิเคราะห์ด้วย PCR เมื่อทำการหาแฟกเตอร์เรียบร้อยแล้ว นำแฟกเตอร์ที่ได้มาทำ regression กับค่าทางเคมีโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ก็จะได้ค่า calibration coefficient (ธงชัย และ ปิติพร, 2555)

PLSR วิธีจะคล้ายคลึงกับ PCR แต่จะต่างกันตรงที่วิธี PCR กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมจะเป็นอิสระจากกระบวนการทำสมการถดถอยของสมการ calibration ซึ่งใน PLSR ทั้งสองกระบวนการจะถูกเชื่อมโยงเข้าไว้ด้วยกัน โดยมีการนำค่าองค์ประกอบทางเคมีมาคิดรวมข้อมูลและเกี่ยวข้องกับประเมินค่าทางเคมีในกระบวนการหาแฟกเตอร์ด้วย ทำให้แฟกเตอร์ที่ได้จากวิธี PLSR สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลและเกี่ยวข้องกับการประเมินค่าทางเคมีในเวลาเดียวกัน สมการ calibration ที่ได้จากวิธี PLSR จึงประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น

2.2.2.4 การทำ validation เมื่อได้สมการ calibration แล้วจะต้องนำสมการที่ได้มา ทวนสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพของสมการว่าสามารถใช้ในการประเมินค่าได้แม่นยำมากน้อยเพียงใด วิธีที่นิยมใช้ในเทคนิค NIRS มี 2 วิธี คือ full cross validation วิธีนี้ตัวอย่างที่นำมาประเมินเป็นตัวอย่างชุดเดียวกับกลุ่ม calibration มีวิธีการ คือ

ขั้นแรก ตัดตัวอย่างที่ 1 ออกไปจากกลุ่ม calibration แล้วนำตัวอย่างที่เหลือมาสร้างสมการ calibration เมื่อได้สมการ calibration แล้วก็นำมาประเมินค่าตัวอย่างที่ 1 ที่ตัดไปก่อนหน้านี้

ขั้นสอง ตัดตัวอย่างที่ 2 ออกไป นำตัวอย่างที่ 1 กลับเข้ามาในกลุ่ม calibration รวมกับตัวอย่างอื่นๆ ที่เหลือเพื่อสร้างสมการ calibration เมื่อได้สมการ calibration นำมาประเมินค่าของตัวอย่างที่ 2 ทำซ้ำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งประเมินค่าตัวอย่างครบทุกตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างแต่ละตัวจะถูกตัดออก 1 ครั้งเท่านั้น

การทดสอบในลักษณะนี้เป็นการทดสอบภายใน (internal validation) ซึ่งวัดผลโดยการดูค่า RMSECV (root mean square error of cross validation) เป็นการวัดค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการประเมินโดยใช้สมการ calibration กับค่าที่วิเคราะห์ได้ (measured value or true value) ถ้ามีค่าแตกต่างน้อย แสดงว่าสมการ calibration ที่ใช้ทำการประเมินนั้นมีประสิทธิภาพ ให้ค่าที่ยอมรับได้ การใช้วิธี full cross validation มักใช้กับวิธีการวิเคราะห์โดยวิธี

PLSR ไม่นิยมใช้กับวิธีวิเคราะห์โดยวิธี MLR การใช้วิธีนี้ในกรณีที่มีตัวอย่างจำนวนน้อยๆ แต่ถ้าในกรณีที่มีตัวอย่างจำนวนมากๆ วิธีนี้จะไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการทดสอบเพราะผลที่ได้อาจจะไม่ถูกต้อง

2.2.2.5 การทดสอบผลการประเมิน (prediction testing) เป็นการทดสอบโดยนำกลุ่มตัวอย่างชุดใหม่ (testing set) มาประเมินค่าจากสมการ calibration ที่ได้ โดยตัวอย่างชุดใหม่ที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีวิธีการเตรียมตัวอย่าง การวัดสเปกตรัม สภาวะในการทดลอง รวมไปถึงการแปลงข้อมูลสเปกตรัมต้องเหมือนกับกลุ่ม calibration ข้อควรระวังก็คือ ตัวอย่างในกลุ่มใหม่จะต้องมีค่าที่ต้องการประเมินอยู่ในช่วงของกลุ่ม calibration การทดสอบลักษณะนี้เรียกว่า การทดสอบแบบภายนอก (external validation) ซึ่งมีวิธีการ คือ นำตัวอย่างกลุ่มใหม่มาวิเคราะห์หาค่าที่ต้องการ เช่น ค่าโปรตีน โดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบ reference methods แทนด้วยข้อมูล X และนำไปวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIRS แล้วนำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการ calibration แทนด้วยข้อมูลชุด Y นำผลที่ได้จากทั้งสองวิธีมาพิจารณาเปรียบเทียบโดยมีค่าทางสถิติที่ใช้วัดคือ SEP (standard error of prediction) หรือ RMSEP (root mean square error of prediction) และ bias ซึ่งค่าสถิติเหล่านี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสมการ calibration ถ้าค่าเหล่านี้มีค่าน้อยๆ แสดงว่าค่าที่ประเมินได้จากสมการ calibration ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จาก reference method สามารถนำไปใช้ประเมินค่าได้ (ธงชัย และ ปิติพร, 2555)

สูตรสมการหาค่า RMSEP (กรกช, 2553)

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum(X-Y)^2}{n-1}} \dots\dots\dots(2)$$

X คือ ข้อมูลค่าที่วัดจริง ตัวแปรอิสระ

Y คือ ข้อมูลค่าทำนาย ตัวแปรตาม

n คือ จำนวนตัวอย่าง

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้เทคนิค NIRS

2.2.3.1 ขนาดของอนุภาค เนื่องจากขนาดของตัวอย่างมีความสัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติขององค์ประกอบของสาร และจะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไม่ใช่ค่าจริง ขนาดของอนุภาคยังขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมตัวอย่างเพราะจะทำให้การวัดค่าองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน จึงควรใช้การเตรียมตัวอย่างแบบเดียวกันทุกครั้งที่ทำกรวัดและควรให้มีขนาดใกล้เคียงกัน

2.2.3.2 อุณหภูมิ อุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการวัดโดยใช้ NIRS อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการวัดองค์ประกอบทางเคมี ได้มีการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในพริกหยวกพบว่าเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างที่ -5 องศาเซลเซียส ความแน่นเนื้อที่วัดได้จะสูงกว่าการใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัสแต่เมื่อวัดค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างที่ 45 องศาเซลเซียส ความแน่นเนื้อที่วัดได้จะต่ำกว่าค่าจริง 0.5% (Guyer *et al.*, 2006) ทำการแก้ไขได้โดยควบคุมอุณหภูมิของห้องทดลองให้คงที่

2.2.3.3 ความชื้น เป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการอ่านค่าองค์ประกอบทางเคมีความชื้นอาจสูญเสียบ้างจากการเตรียมตัวอย่างและการเก็บตัวอย่าง ได้มีการศึกษาความแปรปรวนของความชื้นในลูกพลัมพบว่า ลูกพลัมที่มีความชื้นสูงจะทำให้การอ่านค่าผิดไปจากค่าจริงมาก (Greensill and Walsh, 2000)

2.2.3.4 เกรด สายพันธุ์ ฤดูกาล และสถานที่ ความแตกต่างทางเกรด สายพันธุ์ ฤดูกาลและสถานที่เก็บก็เป็นปัจจัยที่ทำให้การวัดค่าองค์ประกอบของตัวอย่างผิดพลาดได้ดังนั้นจึงควรมีการคัดเลือกตัวอย่างให้สม่ำเสมอตลอดทั้งการทดลอง

2.2.4 ส่วนประกอบของเครื่อง near infrared spectroscopy

2.2.4.1 แหล่งกำเนิดแสง (light source) เป็นแหล่งให้พลังงานแสง

2.2.4.2 โมโนโครมาเตอร์ (monochromator) เป็นอุปกรณ์แยกความคลื่นแสงออกเป็นแต่ละความยาวคลื่น โดยอาศัยเกรตติง (grating) ที่มีช่องผ่านแสงเข้าและแสงออก เพื่อควบคุมให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ

2.2.4.3 ตำแหน่งที่วางตัวอย่าง (sample presentation) โดยที่แสงจะกระทำกับตัวอย่างในรูปแบบที่ต้องการวิเคราะห์

2.2.4.4 ตัวตรวจวัดสัญญาณ (detector) เป็นอุปกรณ์ที่วัดความเข้มของแสงหรือค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง

2.2.4.5 เครื่องขยาย-แยกสัญญาณ (read out) เป็นตัวแปลค่าออกมา อาจเป็นตัวเลขหรือเป็นเส้นกราฟแล้วบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์

หลักการการทำงานของเครื่อง NIR คือ แสงจากแหล่งให้พลังงานแสง (light source) ที่มีการกระจายของแสง และควบคุมด้วยระบบโมโนโครมาเตอร์ (monochromator) ให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ แล้วส่งผ่านไปยังตัวอย่าง (sample) และวัดปริมาณแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนไว้ด้วยอุปกรณ์สำหรับตรวจวัด (detector) และแปลงเป็นสัญญาณส่งเข้าสู่ส่วนประมวลผล (read out) ด้วยโปรแกรม ให้ออกมาในรูปที่ผู้ใช้สามารถนำค่านั้นไปใช้ได้ แล้วบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์โดยจะบันทึกปริมาณแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนไว้เทียบกับความยาวคลื่นต่างๆ แล้วนำมาจับคู่กับค่าการวิเคราะห์เคมี (พรรณทิพย์, 2548)

2.3 การหาค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด

ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดใช้บ่งชี้ความเข้มข้นของอาหารเหลว เช่น น้ำเชื่อม น้ำผลไม้เข้มข้น ของแข็งที่ละลายได้น้ำคั้นจาก ผัก ผลไม้ เป็นผลรวมของของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ได้แก่ น้ำตาลชนิดต่างๆ เช่น น้ำตาลซูโครส น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรักโทส กรดอินทรีย์ เช่นกรดซิตริกกรดแลกติกและแร่ธาตุต่างๆ

2.4 การหาปริมาณกรดที่ไตเตรตได้

หลักการวิเคราะห์หาปริมาณกรดทั้งหมดในอาหาร เป็นการไทเทรตสารละลายอาหาร ตัวอย่างด้วยสารละลายค่ามาตรฐานการที่จะตัดสินว่าจุดยุติมีสีอย่างไรนั้น อาจทำได้ค่อนข้างยากหากในอาหารตัวอย่างมีบัพเฟอร์ปนอยู่ด้วย หรืออาหารตัวอย่างมีสีเข้มมาก อาจแก้ไขได้โดยใช้อินดิเคเตอร์ให้มากกว่าปกติ หรือใช้น้ำกลั่นที่ปราศจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เติมลงไป สารละลายอาหารให้สีจางลง หรือใช้การไทเทรตแบบ potentiometric titration ปริมาณกรดทั้งหมดในอาหารมักรายงานในรูปของกรดที่มีปริมาณอยู่มากที่สุดในการชนิดนั้นๆ เช่น ปริมาณกรดทั้งหมดในน้ำนมจะรายงานในรูปกรดแลกติก ผักและผลไม้ส่วนใหญ่รายงานในรูปกรดซิตริก แอปเปิลหรือน้ำแอปเปิลรายงานในรูปกรดมาลิก น้ำองุ่นและน้ำมะขามรายงานในรูปกรดทาร์ทาริก และน้ำส้มสายชูรายงานในรูปกรดแอซิติก เป็นต้น

2.5 การหาค่าความแน่นเนื้อ

ความแน่นเนื้อเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความนุ่มนวล หรือความกรอบของผลไม้ ซึ่งยังสามารถใช้ในการประเมินความสุกความสดโดยอ้อม ซึ่งจะช่วยประเมินการตัดสินใจต่อการเก็บเกี่ยวและการเลือกใช้วัตถุดิบนั้นๆ ซึ่งค่าที่ปรากฏจะบ่งบอกถึงแรงที่ใช้ในการเจาะวัตถุดิบให้เกิดรู แรงที่ใช้สามารถบ่งบอกความสุกของผลไม้แต่ละประเภทได้ ส่วนวิธีการคำนวณหาความแน่นเนื้อนั้นสามารถใช้เครื่องวัดความแน่นเนื้อแบบมือถือ (penetrometer) ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็วต่อการตรวจสอบคุณภาพ และสามารถประเมินระดับการสุกของผลไม้โดยไม่ต้องนำผลไม้วางตรวจสอบในห้องปฏิบัติการที่ต้องใช้ระยะเวลาานาน (บทปฏิบัติการการหาความแน่นเนื้อ, 2012)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Miyamoto *et al.* (1998) ได้ทำการตรวจวัดปริมาณกรดซิตริกในผลส้ม Satsuma mandarins ด้วยเทคนิค NIR พบว่าการทดสอบสมการผลส้มที่ปอกเปลือกให้ค่า R สูงกว่าของส้มทั้งผล

Mc Glone and Kawano (1998) ได้ประเมินความแน่นเนื้อ น้ำหนักแห้งและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของผลกีวีโดยใช้เทคนิคNIR ทำการวัดผลกีวีจากแหล่งต่างๆ กันทั้งหมด 5 กลุ่ม ในช่วงความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร และ 700 - 1000 นาโนเมตร นำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS โดยโปรแกรม Unscrambler

Peirs *et al.* (2000) ได้นำเทคนิคการดูดกลืนพลังงานแสงย่านตามองเห็นและย่านใกล้อินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น 380 - 2000 นาโนเมตร ไปใช้ในการประเมินระยะเวลาสำหรับการเก็บเกี่ยวของผลแอปเปิ้ลที่เหมาะสม โดยทำนายจากความหวาน ปริมาณกรดและความแน่นเนื้อ

Shao *et al.* (2007) ได้นำเทคนิควิธีการวัดการดูดกลืนแสงในย่านสายตามองเห็นและย่านใกล้อินฟราเรดมาใช้ในการประเมินคุณภาพภายในของมะเขือเทศ ได้แก่ ความแน่นเนื้อและความหวานแบบไม่ทำลายในช่วงความยาวคลื่น 350 - 2500 นาโนเมตร

Teerachaichayut *et al.* (2007) ได้ศึกษาการตรวจอาการเนื้อแก้ว ภายในผลมังคุด โดยนำเทคนิคการดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรดในช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่าน ความยาวคลื่น 640 - 980 นาโนเมตร ได้ผลการทำนายที่แม่นยำ

วรรณกนก (2546) ได้ศึกษาคุณภาพภายในของส้มเขียวหวานพันธุ์สายน้ำผึ้ง โดยใช้ความยาวคลื่นระหว่าง 700 - 1100 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงคลื่นสั้นเพื่อประเมินค่าทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) และปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (TA) สร้างสมการ calibration

ศุมาพร และคณะ (2552) ได้ทำการตรวจสอบคุณภาพภายในของส้มเขียวหวาน ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ และปริมาณกรดด้วยเทคนิค NIRS โดยใช้ส้ม 5 ชนิด คือ ธาราธรรมเบอร์วัน สายน้ำผึ้ง เขียวหวาน โขกุนและพริมองด์ ในช่วงความยาวคลื่นที่ 643 – 970 นาโนเมตร ซึ่งผลออกมาแสดงถึงความเป็นไปได้ในการเทคนิค NIRS ประกันคุณภาพของส้ม สามารถตรวจสอบคุณภาพได้ถึงภายในผลโดยปราศจากความเสียหาย

สิริลดา และ ศศิธร (2554) ศึกษาผลกระทบของอายุการเก็บเกี่ยว และอุณหภูมิในการเก็บรักษา ต่อการเปลี่ยนแปลงของมะขงชิด โดยนำมะขงชิดพันธุ์ทูลเกล้า ซึ่งมีอายุการเก็บเกี่ยว 65 และ 75 วัน หลังดอกบาน ตรวจสอบค่าสี ความแน่นเนื้อ ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้และปริมาณค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ช่วยลดการเปลี่ยนแปลง ความแน่นเนื้อและคุณภาพอื่นๆ ดีกว่าที่อุณหภูมิ 5 และ 13 องศาเซลเซียส และพบว่ามะขงชิดที่เก็บ 65 วันหลังดอกบานมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับดีกว่า 75 วันหลังดอกบาน

สมโภชน์ และ จิรายุ (2554) ศึกษาการหายใจ โดยติดแถบเมื่อติดผลและเลือกเก็บเกี่ยวผลที่มี ขนาดและสีที่สม่ำเสมอ (ระยะ 1 - 5) ที่ปราศจากโรค แมลง และรอยตำหนิ วัดอัตราการหายใจ ของผลแบบอากาศไหล พบว่าผลมะขงชิดมีการหายใจแบบ Non-climacteric ระยะผล M1 มีคุณภาพ ที่ไม่ดีเมื่อสุก คือผลเหี่ยวและมีรสเปรี้ยว ขณะที่ระยะ M4 และ M5 มีคุณภาพดีเหมาะสำหรับบริโภค คือมีรสหวานและสีพัฒนาเต็มที่

ตารางที่ 2.3 งานตีพิมพ์ทางด้านเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีที่เกี่ยวข้องกับผลไม้

ผลไม้	ผู้เขียนและปีที่พิมพ์	วิธีการทาง NIRS	องค์ประกอบที่วัด
เชอร์รี่	Lu (2001)	Refl, Oriel MS257	ค่าบรีกซ์ ความแน่นเนื้อ
พื้อ	Kawano <i>et al.</i> (1992)	Inter, NIRS6250	ค่าบรีกซ์
	Lu & Peng (2007)	NIRI, Specim InspectorV9	ค่าบรีกซ์
มะเขือเทศ	Slaughther <i>et al.</i> (1996)	Inter, NIRS6500	ค่าบรีกซ์
มะม่วง	Schmilovitch <i>et al.</i> (1999)	Inter, LIT Quantum1200	ค่าบรีกซ์ กรด ความแน่นเนื้อ ระยะเวลาเก็บรักษา
	Saranwong <i>et al.</i> (2001)	Inter, NIRS6500	ค่าบรีกซ์ น้ำหนักแห้ง
ส้ม	Kawano <i>et al.</i> (1993)	Trans, NIRS6250	ค่าบรีกซ์
	Gomez <i>et al.</i> (2006)	Refl, FieldSpec ProFR	ค่าบรีกซ์ ความแน่นเนื้อ
สาลี่	Liu <i>et al.</i> (2008)	Refl, ASD QualitySpec Pro	ค่าบรีกซ์ ความแน่นเนื้อ
แอปเปิ้ล	Lovasz <i>et al.</i> (1994)	Trans, Infratec 1225	ค่าบรีกซ์ กรด ความแน่นเนื้อ น้ำหนักแห้ง ของแข็งที่ ไม่ละลายในแอลกอฮอล์
	Peirs <i>et al.</i> (2001)	Refl, Rees OSA6602	ค่าบรีกซ์ กรด ความแน่นเนื้อ ระดับความแก่
	Paz, <i>et al.</i> (2009)	Refl, NIRS6500	ค่าบรีกซ์ ความแน่นเนื้อ ระยะเวลาเก็บรักษา