เอกสารประกอบการอบรมการจัดการองค์ความรู้

“ การประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (NIRS) ในการประเมินคุณภาพผลิตผลเกษตรอย่างรวดเร็ว”

กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร

บทนำ

การพัฒนาด้านเทคโนโลยีและนวัตกรรม เป็นหนทางหนึ่งในการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ ซึ่งการเพิ่มศักยภาพของภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมที่ถือเป็นรากฐานทางเศรษฐกิจในการนำรายได้เข้าสู่ประเทศจึงถือว่าเป็นเรื่องสำคัญ ในการพัฒนาต้องอาศัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมที่ทันสมัยเพื่อให้กระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพมีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และมีมาตรฐานตามที่ประเทศคู่ค้ากำหนด จะเห็นได้ว่าตลาดทั้งภายในและต่างประเทศ ล้วนเน้นเรื่องการตรวจสอบหรือการควบคุมคุณภาพทั้งสิ้น ในปัจจุบันเริ่มมีการนำเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (near infrared spectroscopy: NIRS) ซึ่งเป็นการตรวจสอบคุณภาพสินค้าโดยไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive quality evaluation) มาใช้ในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องสำอางและยา อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมเคมีและ โพลิเมอร์ และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากเป็นเทคนิคที่สามารถทำนายค่าทางเคมีได้อย่างรวดเร็ว ลดต้นทุน ลดการใช้เครื่องมือ และลดการใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย รวมถึงไม่จำเป็นต้องใช้ผู้มีประสบการณ์สูงในการวิเคราะห์

เทคโนโลยีด้านอินฟราเรด (Infrared) เริ่มต้นเมื่อปี ค.ศ. 1800 Sir William Herschel ได้ศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ความร้อน (heating effect) ในช่วงต่าง ๆ ของสเปกตรัม โดยค้นพบ heating effect สูงสุดในแถบแสงที่อยู่ถัดไปจากแสงสีแดง (red end) แต่ไม่สามารถมองเห็นสเปกตรัมได้ จึงเรียกรังสีที่ค้นพบว่า รังสีย่านอินฟราเรด (infrared radiation) การค้นพบครั้งนี้ถือเป็นการค้นพบที่ยิ่งใหญ่เพราะรังสี infrared ประกอบด้วย 3 ช่วงความยาวคลื่นที่สำคัญ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่างกัน คือ ช่วงรังสีย่านใกล้ (near infrared) จะอยู่ในช่วงรังสี infrared โดยมีตำแหน่งติดกับรังสีอินฟราเรดย่านกลาง (mid infrared) และรังสีวิสิเบิล (visible light) มีช่วงความยาวคลื่น 800-2,500 นาโนเมตร (ตารางที่ 1) ช่วงรังสี mid infrared มีช่วงความยาวคลื่น 2,500-25,000 นาโนเมตร และช่วงรังสีย่านไกล (far infrared) มีช่วงความยาวคลื่น 25,000-100,000 นาโนเมตร (ศุมาพร, 2545)

ตารางที่ 1 การแบ่งช่วงคลื่นย่าน Infrared spectroscopy

ช่วงคลื่น	ช่วงความยาวคลื่น (nm)	จำนวนคลื่น (cm^{-1})
Near infrared	800-2,500	12,500-4,000
Mid infrared	2,500-25,000	4,000-400
Far infrared	25,000-100,000	400-10

NIRS เป็นวิธีการตรวจสอบคุณภาพสินค้าโดยไม่ทำลายตัวอย่าง โดยอาศัยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 800-2,500 นาโนเมตร ตัวอย่างจะมีการดูดกลืนและจะกระตุ้นให้เกิดการสั่นของโมเลกุลใน functional groups ต่าง ๆ 2 ลักษณะ คือการยืดหด (stretching) และการเปลี่ยนมุม (blending) ช่วงความถี่ overtones และ combination ของหมู่ฟังก์ชั่น O-H, C-H, N-H และ O=H ซึ่งเป็นโมเลกุลหลักของสารอินทรีย์และแสดงออกมาเป็นแถบรังสีหรือที่เรียกว่า สเปกตรัม (Spectrum) โดยแต่ละสเปกตรัมที่แสดงออกมาจะเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิดที่ดูดกลืน จึงสามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative analysis) และ

ปริมาณองค์ประกอบของตัวอย่างเป็นสัดส่วนกับปริมาณที่ดูดกลืนที่ตำแหน่งความยาวคลื่นจำเพาะ จึงสามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ (quantitative analysis) การใช้ประโยชน์จากเทคนิค NIRS ในประเทศไทย มีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายด้าน (ตารางที่ 2)ยกตัวอย่างเช่น

- **ด้านเภสัชกรรม** มีการใช้ตรวจวิเคราะห์วัตถุดิบของยาต้านไวรัสเอดส์ (AZT, Stavudine, Lamivudine และ Nevirapine) และยา Metformin, Glibenclamide, Simvastatin และ Amlodipine โดยองค์การเภสัชกรรม และการตรวจวิเคราะห์วัตถุดิบและยา เช่น amoxicillin และ clavulanic acid ของบริษัท อาร์เอ็กซ์ แมนูแฟคเจอริ่ง จำกัด (พัทรียา, 2553)

- **ด้านไม้และกระดาษ** ใช้ NIRS ในการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีในไม้และผลผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส

- **ด้านปิโตรเคมี** ใช้ NIRS ในการตรวจสอบหาเมทิลเอสเทอร์ (methyl ester) ในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม

- **ด้านการเกษตร** มีการใช้ NIRS ในการประเมินค่าทางเคมีของอาหารกุ้ง การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของมันสำปะหลังแผ่นและมันอัดเม็ด การประเมินคุณภาพข้าว เช่น ปริมาณอะไมโลส แป้ง โปรตีน และความชื้น การตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ การวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช เป็นต้น

- **ด้านอาหาร** มีการใช้ NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพของน้ำปลา เช่น ปริมาณไนโตรเจน โซเดียมคลอไรด์ ความหนาแน่น และสารประกอบอะโรมาติก การตรวจสอบองค์ประกอบของนมและผลิตภัณฑ์นม เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน การวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ การประเมินคุณภาพผลไม้และการคัดแยกเกรดผลพืช ของมูลนิธิโครงการหลวง การประเมินคุณภาพอ้อยและน้ำตาลทราย เช่น ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด น้ำตาลซูโครส และเส้นใยอ้อย การประเมินคุณภาพแป้งจากข้าวสาลี การวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์จากไวน์และเบียร์ เป็นต้น

- **ด้านอื่น ๆ** เช่น การหาความชื้นในแผ่นยางดิบในเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 2 การใช้ประโยชน์เทคนิค NIRS ในประเทศไทย

ชนิดอุตสาหกรรม	ชนิดของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์	องค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์
ยา	ยาต้านไวรัสเอดส์	AZT, Stavudine, Lamivudine และ Nevirapine
	วัตถุดิบยา antibiotic	Amoxicillin, Clavulanic acid
ไม้และกระดาษ	ผลผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส	องค์ประกอบทางเคมี
ปิโตรเคมี	ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม	เมทิลเอสเทอร์
มันสำปะหลัง	มันแผ่นและมันอัดเม็ด	ความชื้น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เส้นใย เถ้า
ข้าว	ข้าว	อะไมโลส คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ความชื้น
น้ำมันพืช	วัตถุดิบ เช่น ถั่วเหลือง รำข้าว ปาล์ม ผลิตภัณฑ์	ความชื้น โปรตีน น้ำมัน กรดไขมันอิสระ
น้ำปลา	น้ำปลา	ไนโตรเจน โซเดียมคลอไรด์ ความหนาแน่น สารประกอบอะโรมาติก
นมและผลิตภัณฑ์นม	น้ำนมดิบ นมผง นมหวาน	โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน
อาหารสัตว์	ข้าวโพด ข้าวสาลี ปลาป่น กระดูกป่น ถั่วเหลืองป่น ปลายข้าว	ความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า กรดอะมิโน
ผลไม้	มะม่วง ส้ม พีช	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด
อ้อยและน้ำตาลทราย	อ้อย	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด
	ผลิตภัณฑ์	น้ำตาลซูโครส เส้นใยอ้อย
แป้ง (ข้าวสาลีและอื่น ๆ)	วัตถุดิบ (สินค้านำเข้า)	ความชื้น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เส้นใย เถ้า กลูเตน (gluten)
เครื่องดื่ม	ไวน์ เบียร์	แอลกอฮอล์
ยาง	แผ่นยางดิบ	ความชื้น

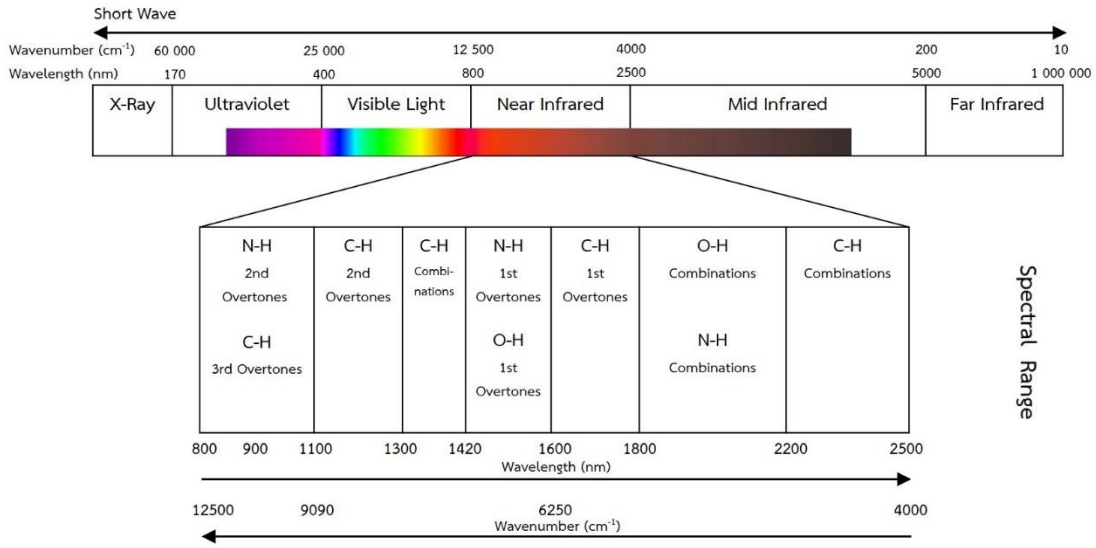
สำหรับข้อดีของการใช้ NIRS คือ เป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ทำให้ตัวอย่างที่นำมาตรวจสอบสามารถนำไปใช้ต่อได้ วิธีการเตรียมตัวอย่างไม่ยุ่งยากและใช้ตัวอย่างในปริมาณน้อย สามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ให้ผลการตรวจสอบที่แม่นยำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมการที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายค่าคุณภาพ นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่สามารถใช้ทดแทนการวิเคราะห์ทางเคมีได้ในระยะยาว จึงสามารถประหยัดต้นทุนการผลิต อีกทั้งไม่ใช้สารเคมีในการเตรียมตัวอย่าง จึงเป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและสภาพแวดล้อม

แต่อย่างไรก็ตามการใช้ NIRS ยังมีข้อจำกัดในด้านความรู้และความเข้าใจในเทคนิค NIRS และการใช้งานเครื่อง NIRS ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ซึ่งต้องมีสมการที่เป็นสมการของตัวอย่างนั้น ๆ โดยเฉพาะ เพราะองค์ประกอบของตัวอย่างแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันทางเคมี ดังนั้น แต่ละสมการจึงต้องจำเพาะกับตัวอย่างแต่ละชนิดและต้องอาศัยค่าทางสถิติมาคำนวณ ทำให้ต้องใช้จำนวนตัวอย่างที่เพียงพอที่จะทำให้สมการมีความผิดพลาดต่ำที่สุด นอกจากนี้การใช้เทคนิค NIRS ในด้านต่าง ๆ ยังไม่แพร่หลายมากนัก เอกสารฉบับนี้จึงจะนำแนวทางการใช้เทคนิค NIRS มาเรียบเรียงให้เข้าใจง่าย เพื่อให้สามารถนำเทคนิค NIRS ไปใช้ได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น

บทที่ 1
หลักการของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปคโตรสโคปี
(Near Infrared Spectroscopy: NIRS)

1.1 Near Infrared Spectroscopy (NIRS)

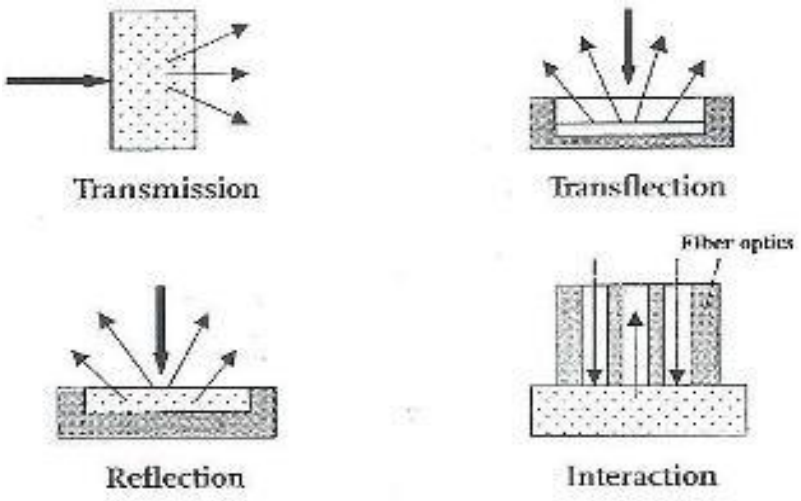
แสงในธรรมชาติจะประกอบด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ เช่น รังสีแกมมา (gamma rays) เอ็กซ์เรย์ (x-rays) อัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) แสงที่มองเห็นได้ (visible light) อินฟราเรด (infrared : IR) ไมโครเวฟ (microwaves) คลื่นวิทยุ (radio waves) เป็นต้น รังสีเนียร์อินฟราเรด (near infrared : NIR) คือ แสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 800-2500 นาโนเมตร หรือ 12,500-4,000 wave number (cm^{-1}) อยู่ระหว่างแสงที่มองเห็นได้ และอินฟราเรด (ภาพที่ 1.1) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงคลื่นสั้นความยาวคลื่น 800–1100 นาโนเมตร เป็นช่วงคลื่นที่มีพลังงานสูง สามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อในของตัวอย่างได้ดี โดยทั่วไปสามารถทะลุผ่านเข้าไปในตัวอย่างได้ถึง 1 เซนติเมตร จึงสามารถใช้ในการวัดตัวอย่างผลไม้มีเปลือก เช่น มังคุด ส้ม เป็นต้น สำหรับช่วงคลื่นยาว คือ 1100–2500 นาโนเมตร มีพลังงานต่ำ ลำแสงสามารถทะลุผ่านตัวอย่างได้ไม่เกิน 5 มิลลิเมตร เหมาะกับตัวอย่างที่เป็นของแข็งและของเหลวเป็นช่วงที่ให้ข้อมูลทางเคมีมากกว่าช่วงคลื่นสั้น สสารที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับรังสีเนียร์อินฟราเรด คือ สสารที่โมเลกุลประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจน อันตรกิริยาดังกล่าว คือ โมเลกุลดูดกลืนรังสีเนียร์อินฟราเรดเข้าไป จะมีผลต่อการสั่นของพันธะต่าง ๆ ในโมเลกุล รังสีบางส่วนจะถูกดูดกลืน (absorption) เอาไว้ในตัวอย่างบางส่วนจะผ่านออกมา (transmission) และบางส่วนจะเกิดการสะท้อนออกมา (reflection) ปรากฏการณ์เหล่านี้อาจเกิดเพียงอันใดอันหนึ่งหรือเกิดพร้อมกันได้โดยแสงที่ส่องผ่านจะไม่ทำลายตัวอย่าง แสงย่านนี้จะทำให้สารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของพันธะคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับแสงนั้น เช่น C-H, O-H, C-N, S-H เป็นต้น



ภาพที่ 1.1 การดูดกลืนของโมเลกุล X-H ทำให้เกิดพีคชนิดต่าง ๆ ในสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด
ที่มา : ศุมาพร (2552)

1.2 ลักษณะการส่งผ่านแสงเข้าวัตถุ

เมื่อวัตถุได้รับแสง วัตถุจะดูดกลืนแสงในลักษณะต่าง ๆ ขึ้นกับชนิดของวัตถุ ซึ่งมีรูปแบบต่าง ๆ แบบที่ 1 ลักษณะที่แสงจะผ่านทะลุวัตถุที่มีลักษณะใส เช่น น้ำ ของเหลว การส่งผ่านแบบนี้เรียก Transmission แบบที่ 2 ลักษณะแสงไม่สามารถผ่านวัตถุที่มีลักษณะทึบ ผิวมัน เช่น กระจก แผ่นโลหะ แสงจะสะท้อนกลับเรียก Reflection แบบที่ 3 แสงจะผ่านไปในเนื้อวัตถุจนถึงส่วนล่างแล้วสะท้อนกลับขึ้นมาเรียก Transfection แบบที่ 4 กรณีใช้ probe ภายใน probe จะมีช่องให้แสงผ่าน และแสงจะสะท้อนกลับทางช่องใน probe อีกช่อง (ภาพที่ 1.2) (Kawano, 2002)



ภาพที่ 1.2 ลักษณะการผ่านของแสงในวัตถุตัวอย่างแบบต่าง ๆ Transmission, Transfection, Reflection and Interaction

ที่มา : Kawano (2002)

ปริมาณการดูดซับแสง (light absorption)

เมื่อแสงผ่านสาร แสงส่วนหนึ่งจะถูกสารดูดซับไว้ การดูดซับแสง (absorption) ของวัตถุจะเป็นไปตามหลัก Beer-Lambert Law ดังนี้

$$A = \log 1/T = abc$$

โดยที่ A = ปริมาณการดูดซับแสง (absorbance)

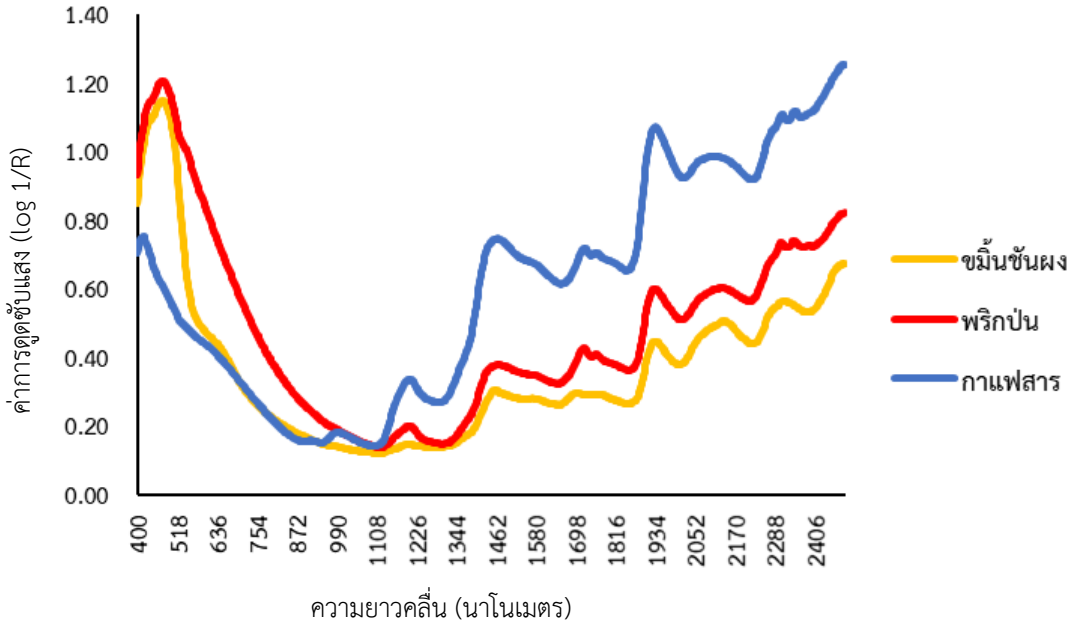
T/R = การส่งผ่านแสงให้ผ่านวัตถุไป (Transmittance)/ค่าการสะท้องกลับของแสงหลังจากตกกระทบ (Reflectance)

a = ค่าคงที่สำหรับแต่ละสารประกอบ (absorption coefficient)

b = ความหนาของตัวอย่าง (path length)

c = ความเข้มข้นของสารประกอบที่ดูดกลืนแสง (concentration)

เมื่อโมเลกุลของสารในวัตถุได้รับแสงจะเกิดการสั่น เมื่อดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ลักษณะของการสั่นก็จะเกิดต่างกัน ปริมาณการดูดซับแสงก็จะต่างกัน ซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของเส้นสเปคตรัม (spectrum) สารหรือพันธะโมเลกุลจะมีความสามารถในการดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน เครื่อง NIR spectrometer แสดงค่าออกมาให้เห็นในรูปสเปคตรัมที่มีแกนนอน (x axis) แสดงค่าความยาวคลื่นแสง NIR (Wavelength) แกนตั้ง (y axis) แสดงค่าการดูดซับแสงสารต่างชนิดกันจะให้ลักษณะของสเปคตรัมต่างกัน (ภาพที่ 1.3)



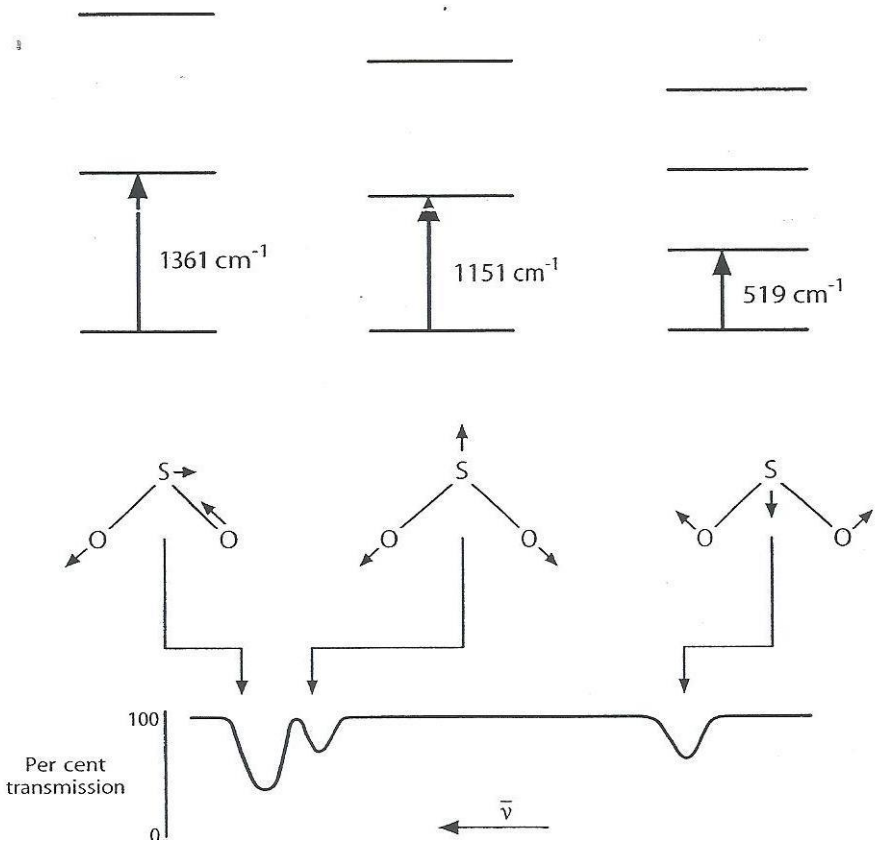
ภาพที่ 1.3 ลักษณะของเส้นสเปคตรัมของเมล็ดกาแฟสาร พริกป่น และขมิ้นชันผง

1.3 หลักการการดูดซับแสง

ที่ความยาวคลื่นต่างกันสารจะดูดซับแสง และถ่ายทอดพลังงานต่างกัน ซึ่งจะมีการถ่ายทอดพลังงาน 2 รูปแบบ

1.3.1. การถ่ายทอดพลังงานแบบ Harmonic

การดูดซับแสงในย่าน IR สารแต่ละชนิดจะดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นเดียว เช่น การดูดซับแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร ของโมเลกุลอมิโลส ที่ 320 นาโนเมตร ของโมเลกุลแอฟาทอกซิน เป็นต้น หลักการนี้เรียกว่า Harmonic Approximation เมื่อวัตถุได้รับพลังงานในย่าน IR โมเลกุลของสารจะดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นหนึ่งแล้วพลังงานที่ได้จากแสงจะทำให้สารเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก Ground state ไปยัง Active state แล้วจะปลดปล่อยพลังงานออกมาจนเสถียรหรือระดับ Ground state อีกครั้ง และทุกระดับของพลังงานจะเท่ากัน ซึ่งการถ่ายทอดพลังงานรูปแบบนี้ เรียก การถ่ายทอดพลังงานแบบ Harmonic (ภาพที่ 1.4) โดยพีค (peak) ที่เกิดในย่าน IR เป็น Fundamental bands

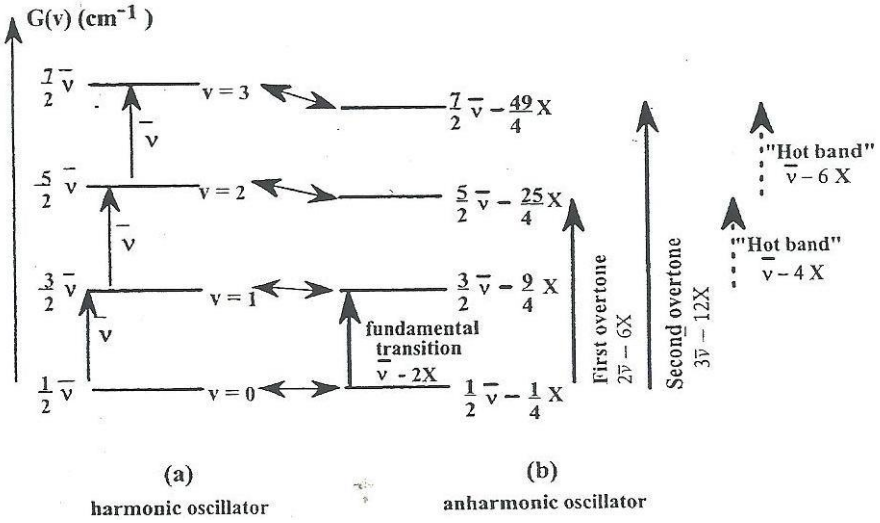


ภาพที่ 1.4 พีคขนาดต่าง ๆ ของ SO_2 รับพลังงานในเขต IR ที่เกิดการถ่ายทอดพลังงานแบบ Harmonic
ที่มา : Bokobza (2002)

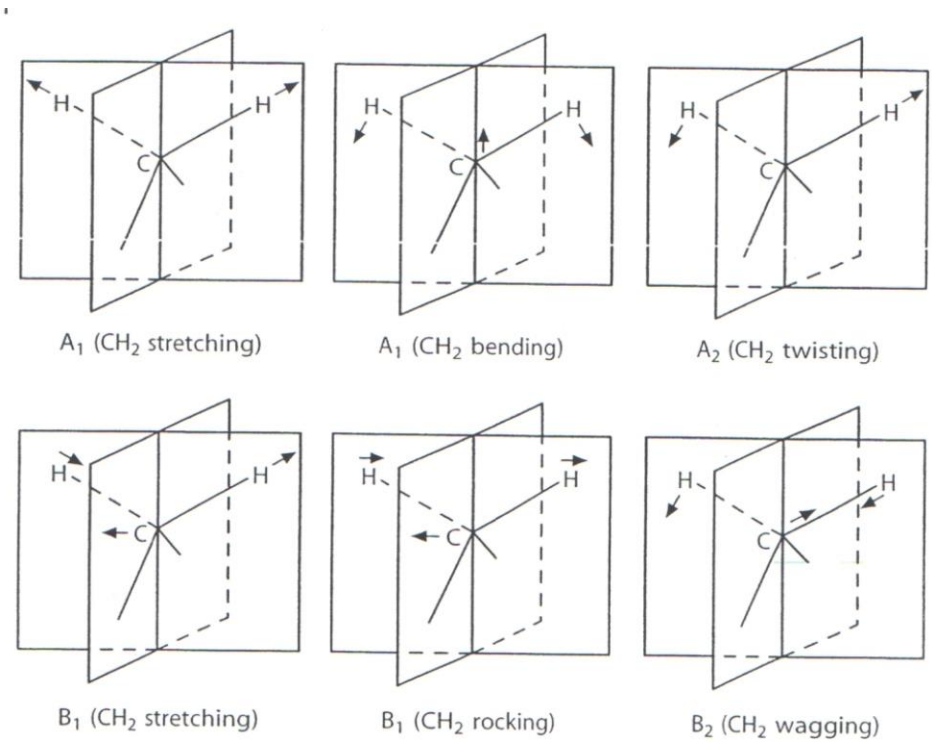
1.3.2. การถ่ายทอดพลังงานแบบ Anharmonic

เมื่อสารได้รับแสงที่ความยาวคลื่นในย่านเนียร์อินฟราเรด โมเลกุลของสารจะดูดซับแสง และได้รับพลังงานสูงขึ้น ในแต่ละระดับของการถ่ายทอดพลังงานจะไม่เท่ากัน การปลดปล่อยก็จะไม่เท่ากัน เรียกว่าเกิดการถ่ายทอดพลังงานแบบ Anharmonic (ภาพที่ 1.5) จะทำให้เห็นว่าสารชนิดเดียวกันแต่จะเกิดได้หลายพีคโมเลกุลของสารเมื่อได้รับพลังงานจะเกิดการสั่นในหลายรูปแบบ จำนวนเท่ากับ 3N-6 ในกรณีที่โมเลกุลเป็นเส้นตรงการดูดซับพลังงานและปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบนี้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า Overtone และ Combination bands

Overtone band จะเกิดเมื่อโมเลกุลได้รับแสงที่ความยาวคลื่นที่มีพลังงานที่มีความต่างในแต่ละระดับมากกว่า 1 (จากการคำนวณ) ส่วน Combination band เกิดเมื่อความต่างของพลังงานในแต่ละระดับ $\neq 0$ การรับพลังงานในรูปแบบนี้ทำให้โมเลกุลของสารเกิดการสั่นในรูปแบบต่าง ๆ จำนวนรูปแบบจะเท่ากับ (3N-6) เช่น โมเลกุลของ CH_2 จะมีรูปแบการสั่น จำนวน (3 x 3) - 6 = 3 แบบ จะรวมกับการสั่นของ Fundamental bands อีก 3 แบบ รวมเป็น 6 แบบ ดังภาพที่ 1.6 และทำให้เกิดพีค (bands) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน เช่น กรณีพันธะ H-C-H ทำให้เกิดพีคแบบ Overtone และ Combination bands ในความยาวคลื่นต่าง ๆ

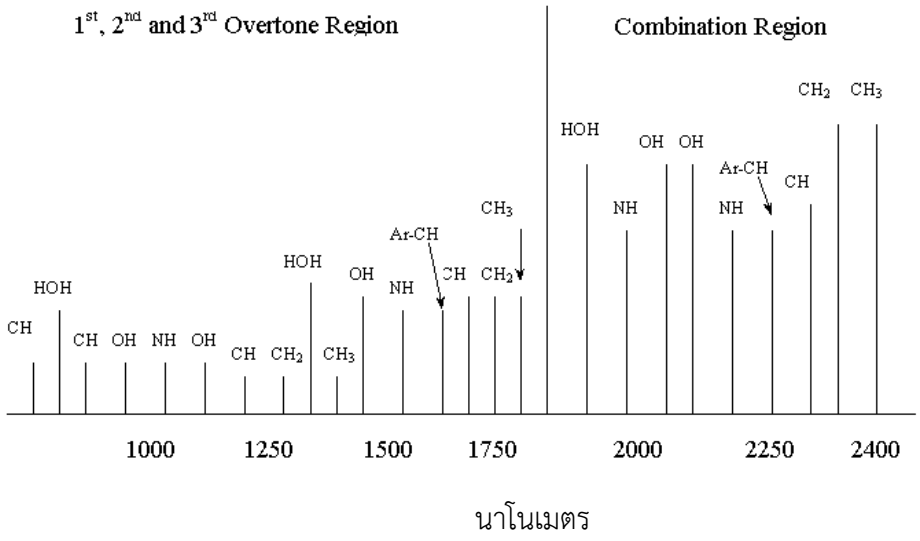


ภาพที่ 1.5 ระดับพลังงานและการถ่ายทอดพลังงานแบบ (a) Harmonic และ (b) แบบ Anharmonic
ที่มา : Bokobza (2002)



ภาพที่ 1.6 รูปแบบการสั่นแบบต่าง ๆ ของ CH_2
ที่มา : Bokobza (2002)

พันธะของโมเลกุลที่เกิดปฏิกิริยาในแสงย่าน NIRS ทำให้เกิดการดูดซับแสง 2 แบบ คือ Overtone และ Combination ซึ่ง Overtone จะเกิดในย่านช่วงคลื่นแสงสั้น ส่วน Combination จะเกิดในย่านช่วงคลื่นแสงยาวกว่า (ภาพที่ 1.7)



ภาพที่ 1.7 ตำแหน่งของพันธะที่ความยาวคลื่นอยู่ในเขต Overtone และ Combination

1.4 ความสามารถในการแทรกซึมของแสง

แสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ จะมีความสามารถในการแทรกซึมของแสงต่างกัน ตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่าย่านการเกิด Overtone ของพันธะ C-H ในช่วงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นสูงระหว่าง 3380-3510 นาโนเมตร ความเข้มข้นของแสงมากแต่แสงสามารถแทรกซึมเข้าไปในวัตถุได้เพียง 0.01 มม. ส่วนแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ในย่าน NIRS จะเกิด Overtone ในแบบ First overtone (1^{st} overtone) ที่ความยาวคลื่น 1690-1755 นาโนเมตร และ 2^{nd} 3^{rd} และ 4^{th} Overtone ที่ความยาวคลื่น 1127-1170 845-878 และ 690-780 นาโนเมตร ตามลำดับ แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นความเข้มข้นของแสงจะต่ำ จะสามารถแทรกซึมเข้าวัตถุได้ลึกกว่าความยาวคลื่นยาวกว่า (Workman, 2004)

ตารางที่ 1.1 ลักษณะของการเกิดพีคและการแทรกซึมของแสงที่ความยาวคลื่นในย่านต่าง ๆ

ลักษณะพีค	ย่านความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นแสง (เปอร์เซ็นต์)	ระยะการแทรกซึมแสง (มม.)
Fund. (n)	3380 – 3510	100	0.01
1^{st} over. (2n)	1690 - 1755	1	1.0
2^{nd} over.(3n)	1127 – 1170	0.1	1.0
3^{rd} over. (4n)	845 - 878	0.01	10.0
4^{th} over. (5n)	690 - 780	0.005	10.0

Osborne (1993) ได้สรุปไว้ในตารางผนวกที่ 1 เช่น โมเลกุลน้ำ พันธะ O-H เมื่อได้รับแสงที่ความยาวคลื่นต่างกัน เช่น ที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร เกิด O-Hstr. และ Overtone ขณะที่ 970 นาโนเมตรเกิด O-H str.

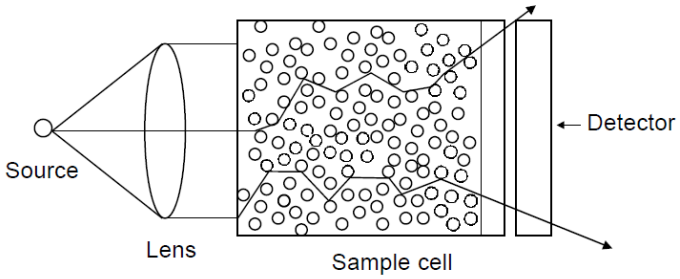
Second overtone ที่ 1450 นาโนเมตรเกิด O-H str. First overtone และที่ 1940 นาโนเมตร เกิด O-H str. + O-H def. โปรตีนเกิดรูปแบบของ Overtone และเกิด Combination bands ที่ความยาวคลื่น 910 1020 1510 1980 2050 และ 2180 นาโนเมตร เป็นต้น

ดังนั้น การใช้เทคนิค NIRS ถ้าเครื่อง NIR Spectrometer มีความยาวคลื่นกว้างตั้งแต่ 800-2500 นาโนเมตร ก็จะสามารถรวบรวมพลังงานที่เกิดขึ้นจากทุกพันธะของสารนั้น ทำให้สามารถเกิด Overtone และ Combination bands ได้หมด ทำให้เกิดความถูกต้องของค่าที่ประเมินสูงกว่าเครื่องที่มีช่วงความยาวคลื่นแคบทำให้รวบรวมพลังงานได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ก็จะทำให้ความถูกต้องลดน้อยลง

จึงเป็นหลักในการเลือกซื้อเครื่องมือต้องรู้วัตถุประสงค์ของการใช้เครื่องว่าต้องการใช้ประเมินสารใดโดยเฉพาะหรือไม่ และต้องรู้ว่าพันธะของสารที่จะประเมิน ดูดซับแสงในช่วงคลื่นสั้นหรือยาว เพื่อจะเลือกซื้อได้ถูกต้อง และเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายได้ส่วนหนึ่ง เช่น ถ้าต้องการประเมินปริมาณโปรตีนในอาหารสัตว์ สามารถใช้ความยาวคลื่นที่พันธะในโมเลกุลโปรตีนดูดซับพลังงานสูง ที่ความยาวคลื่น 910 1020 1510 1980 2050 และ 2180 นาโนเมตร หรือจะใช้เครื่องที่มีความยาวคลื่นสูง (1000-2000 นาโนเมตร) เป็นต้น

บทที่ 2
ขั้นตอนการวัดตัวอย่าง

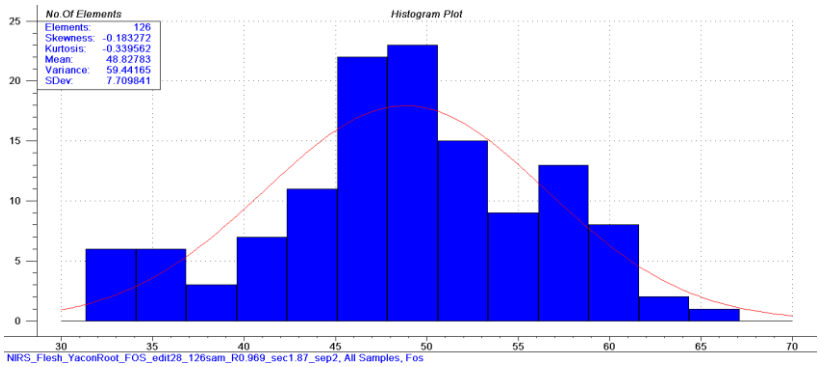
จากหลักการของเทคนิค NIRS คือ การส่งผ่านแสงในย่าน NIR (800-2500 นาโนเมตร) ไปยังตัวอย่าง แล้วจะเกิดการดูดซับแสง แต่แสงที่ผ่านเข้าไปภายในเนื้อของตัวอย่าง เมื่อจะวัดการดูดซับแสง (scan) ต้องนำตัวอย่างใส่ในเซลล์หรือภาชนะที่บรรจุตัวอย่าง ซึ่งมีหลายแบบ จะกล่าวในขั้นตอนต่อไป จากนั้นนำเซลล์ใส่ในเครื่อง NIR Spectrometer แสงจะผ่านเข้าไปในเนื้อตัวอย่าง อนุภาคภายในของตัวอย่างจะดูดซับแสง แสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างจะเกิดการเดินทางหักเหของแสง (ภาพที่ 2.1) ทำให้ปริมาณการดูดซับแสงจะต่างกันเกิดขึ้น ซึ่งความแตกต่างจะเกิดจากปัจจัยหลายๆ อย่าง



ภาพที่ 2.1 การหักเหของแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่าง (Osborne, 2006)

การคัดเลือกตัวอย่าง

คัดเลือกตัวอย่างให้มีคุณภาพที่แตกต่างกัน ตัวอย่างที่ใช้ในการทำสมการต้องมีค่าการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการที่มีความหลากหลาย มีการกระจายตัวกว้าง ตามลักษณะของระฆังคว่ำ (parabola) (ภาพที่ 2.2) ความหลากหลายในที่นี้หมายถึง พันธุ์ พื้นที่การผลิต ฤดูการผลิต ความแก่ เป็นต้น ทั้งนี้จะมีผลต่อการนำสมการไปใช้ประเมินค่า ถ้าตัวอย่างที่จะประเมินมีค่าการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการต่ำหรือสูงกว่าค่าในสมการก็จะมีความถูกต้องต่ำลง กล่าวคือถ้าต้องการให้สมการที่ได้สามารถใช้ได้กับตัวอย่างที่มีความหลากหลาย กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำสมการนั้นจะต้องมีความหลากหลายด้วย จำนวนตัวอย่างควรจะมากที่สุดเท่าที่ทำได้ และไม่ควรต่ำกว่า 100 ตัวอย่าง เพื่อให้สมการที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำ

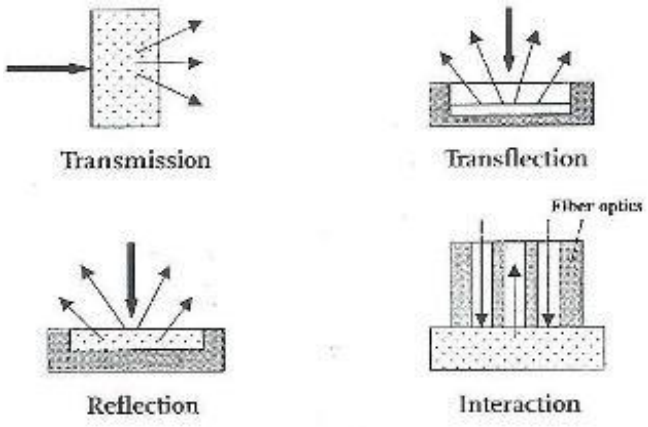


ภาพที่ 2.2 การกระจายตัวตามลักษณะของระฆังคว่ำ (Parabola)

การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างสำหรับเทคนิค NIRS มีความสำคัญมาก เนื่องจาก แสงจะต้องผ่านตัวอย่างเพื่อวัดค่าการดูดซับแสง การหักเหของแสง ดังนั้นช่องอากาศภายในภาชนะที่ใส่ตัวอย่าง ถ้าไม่เหมือนกันก็จะมีผลต่อการดูดซับแสง

การเลือก mode ของการส่งผ่านแสง จะเลือกจากลักษณะของตัวอย่าง ถ้าตัวอย่างเป็นเมล็ด หรือผง ก็จะใช้ Reflectance mode ถ้าเป็นของเหลวไม่ทึบแสงก็ใช้ Transmittance mode ถ้าเป็นผลไม้ ก็ใช้ Transfectance mode สภาพของตัวอย่างที่นำมาใช้ ต้องอยู่ในสภาพที่เหมือนกัน หรือใกล้เคียงกัน เช่น เมล็ด ต้องมีขนาดใกล้เคียงกัน แป้ง หรือของเหลว ต้องมีความสม่ำเสมอของการแขวนลอย กรณีถ้ามีอนุภาคแขวนลอย หรือเนื้อเดียวกัน เช่น น้ำ หรือน้ำมัน เป็นต้น



ภาพที่ 2.3 ลักษณะการผ่านของแสงในวัตถุตัวอย่างแบบต่าง ๆ Transmission, Transfection, Reflection และ Interaction (Kawano, 2002)

โดยทั่วไปแล้วตัวอย่างที่ใช้จะอยู่ในรูปของของเหลว แป้ง และของแข็ง โดยตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีวิธีการเตรียมตัวอย่างที่แตกต่างกันออกไป ดังนี้

1. ของเหลว ได้มาจากการคั้นน้ำ ซึ่งถ้ามีหลายตัวอย่าง และใช้เครื่องคั้นน้ำเครื่องเดียว จะทำให้เกิดการปนเปื้อนของแต่ละตัวอย่างได้ จึงต้องมีการล้างเครื่องคั้นด้วยน้ำสะอาด และคั้นตัวอย่างนำก่อนหนึ่งครั้ง และใช้น้ำคั้นจากการคั้นครั้งต่อไป เพื่อลดการปนเปื้อนของตัวอย่าง ในกรณีของตัวอย่างที่เป็นของเหลวที่ไม่สม่ำเสมอ เช่นน้ำนมดิบ ต้องทำให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนทำการสแกน โดยใช้เครื่องที่ทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenizer) ซึ่งจะสามารถลดความคลาดเคลื่อนลงได้

2. ผง ได้มาจากการบด เช่น นำเมล็ดถั่วเหลือง มาบดให้เป็นผง และผสมกันให้ทั่วถึงเป็นเนื้อเดียวกัน เครื่องบด (Grinder) ควรบดได้ละเอียด ได้การกระจายตัวของอนุภาคที่แน่นอน คงที่ เครื่องบดที่ดีไม่ควรทำให้ตัวอย่างร้อนขึ้นมากเกินไป และควรทำความสะอาดได้ง่าย เพื่อป้องกันการปนเปื้อนระหว่างตัวอย่าง นอกจากนี้การบดอาจส่งผลให้ตัวอย่างที่มีองค์ประกอบเป็นสารระเหยมีการเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นจึงต้องป้องกันการเกิดการสูญเสียไว้ด้วย

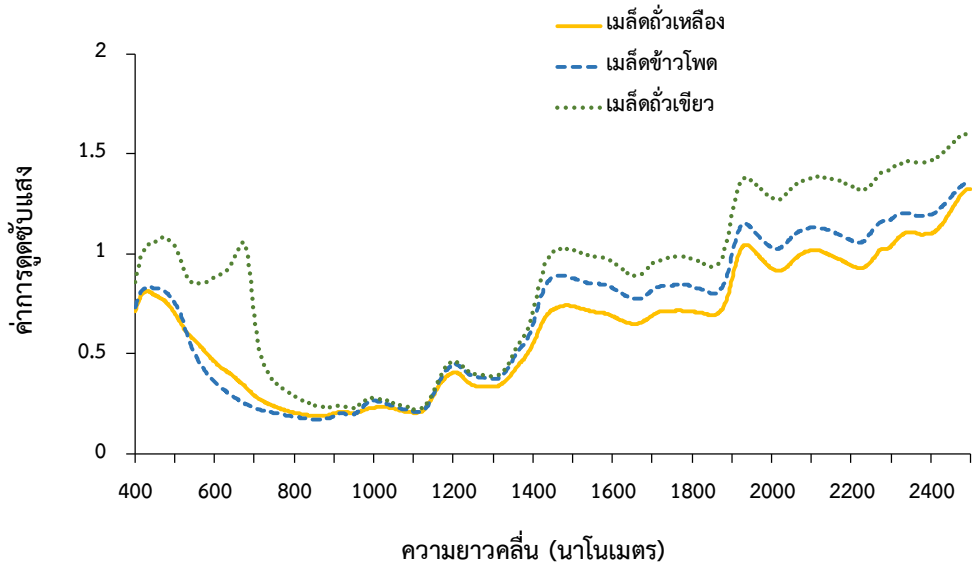
3. ของแข็ง เช่นเมล็ดพืช ควรคัดเลือกเมล็ดที่สมบูรณ์ สะอาด ปราศจากโรค แมลงและสิ่งเจือปน มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

การบรรจุตัวอย่างลงในอุปกรณ์ใส่ตัวอย่าง (Sample cells) และสภาพของตัวอย่าง

การบรรจุตัวอย่างแต่ละตัวอย่างต้องให้ใกล้เคียงกันมากที่สุดเพราะจะมีผลต่อระดับการดูดซับแสง เช่น ความหนาแน่นของตัวอย่างภายในเซลล์ ขนาดของเซลล์ เป็นต้น

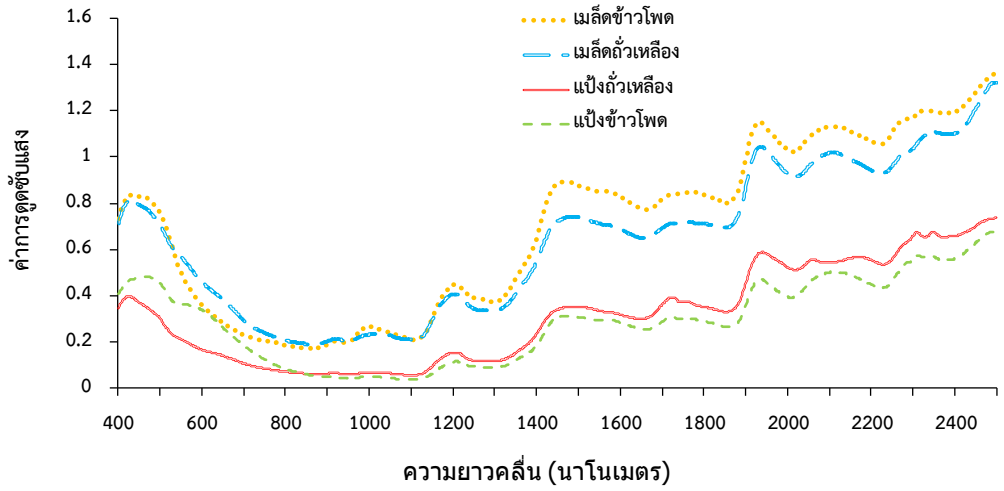
1. ขนาดอนุภาคของตัวอย่าง

จากการศึกษาพบว่าขนาดของอนุภาคของตัวอย่าง จะทำให้การดูดซับแสงต่างกัน (ภาพที่ 2.4) การดูดซับแสงของเมล็ดขนาดใหญ่จะต่ำกว่าเมล็ดขนาดเล็ก เช่น เมล็ดถั่วเหลืองมีขนาดใหญ่กว่าถั่วเขียวและข้าว เป็นต้น รูปร่างของเมล็ดที่ต่างกัน มีผลต่อการดูดซับเช่นเดียวกัน จึงควรทำให้ขนาดของอนุภาคในตัวอย่างใกล้เคียงกันมากที่สุด



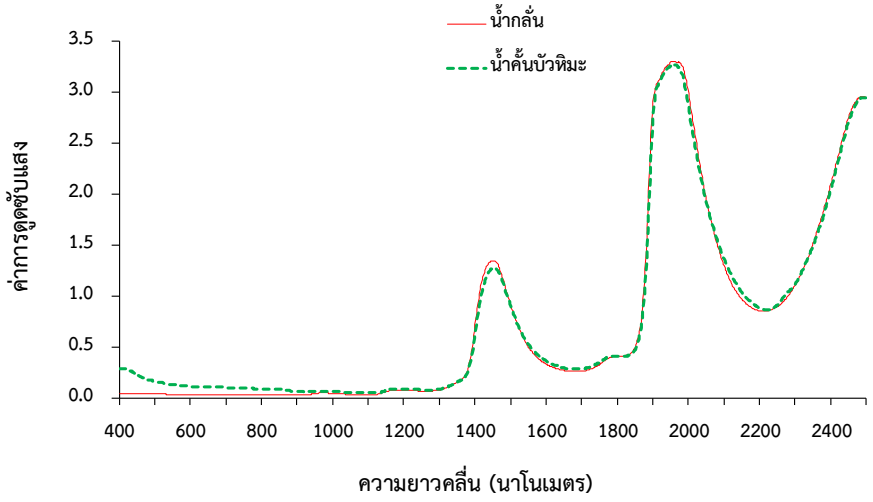
ภาพที่ 2.4 การดูดซับแสงของเมล็ดพืชที่มีขนาดและอนุภาคต่างกัน

แป้งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเมล็ดจะมีการดูดซับแสงสูงกว่าเมล็ด จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่า ถ้าอนุภาคมีขนาดยิ่งเล็ก แสงยิ่งถูกดูดซับได้มาก (ภาพที่ 2.5)



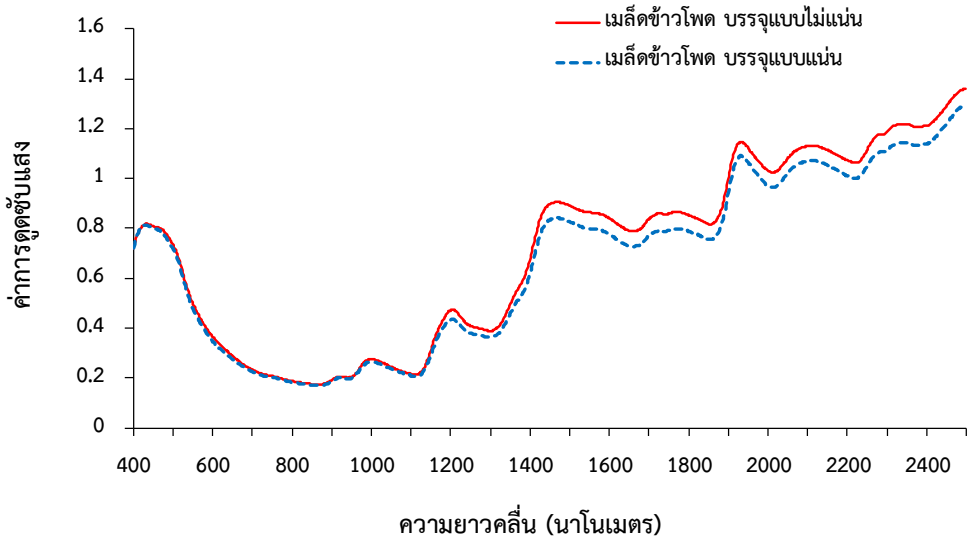
ภาพที่ 2.5 การดูดซับแสงของแป้งและเมล็ดพืชซึ่งมีขนาดและอนุภาคต่างกัน

ของเหลว ที่มีความใส ความเหนียว และความขุ่น และมีเนื้อของอนุภาคต่างกัน ควรมีลักษณะเดียวกัน (ภาพที่ 2.6)



ภาพที่ 2.6 การดูดซับแสงที่แตกต่างกันของตัวอย่างที่มีความใสต่างกัน

จากความรู้ดังกล่าว ทำให้เห็นว่าถ้าสามารถบรรจุให้อนุภาคแน่นที่สุดการดูดซับแสงจะดีกว่าการบรรจุแบบหลวมๆ หรือมีช่องอากาศมาก (ภาพที่ 2.7)



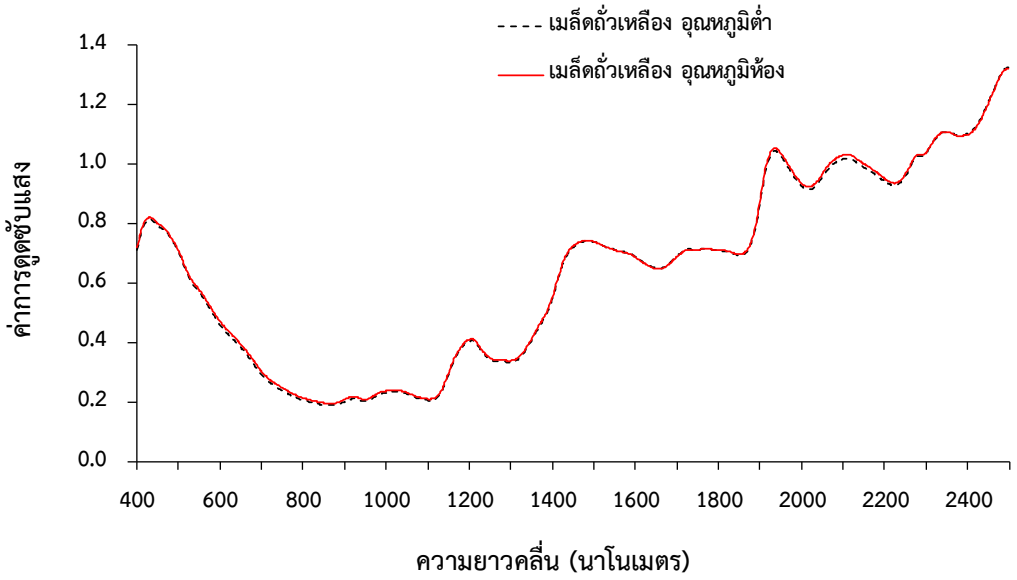
ภาพที่ 2.7 การดูดซับแสงที่แตกต่างกันของตัวอย่างที่มีการบรรจุแบบแน่นและแบบไม่แน่น

2. อุณหภูมิของตัวอย่าง

ตัวอย่างที่จะนำมาทำสมการ มีคุณภาพที่ต้องการประเมินให้หลากหลายและต้องมีจำนวนมาก ดังนั้น การรวบรวมตัวอย่างจึงมีความจำเป็นแล้วมาเก็บรักษาไว้ก่อนที่จะนำมา scan และวิเคราะห์ บางครั้งต้องเก็บในตู้เย็น ซึ่งก่อนการ scan ต้องเตรียมตัวอย่างทั้งหมดให้มีสภาพใกล้เคียงกันมากที่สุด เช่น นำออกมาจากตู้เย็นต้องนำออกมา

เตรียมในห้องที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส หรือตัวอย่างที่อยู่นอกตู้เย็นก็ต้องนำมาอยู่ในสภาพ 25 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกัน

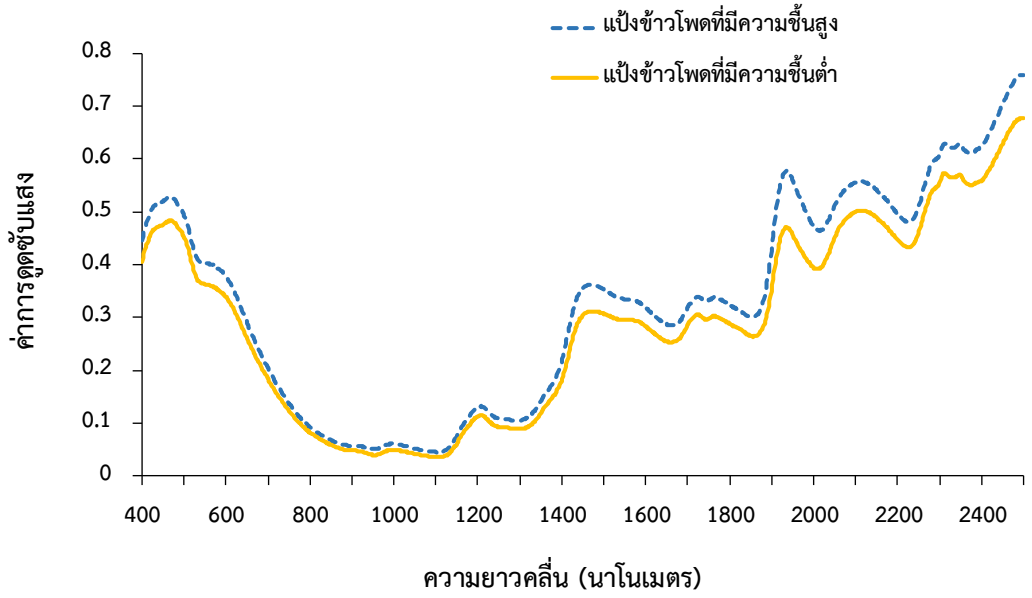
สเปคตรัมย่านใกล้อินฟราเรดจะได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิของตัวอย่าง ซึ่งอุณหภูมิจะทำให้น้ำในตัวอย่างเกิดการเคลื่อนที่ ดังนั้นถ้าตัวอย่างที่นำมาทำนายค่าทางเคมีมีอุณหภูมิแตกต่างจากตัวอย่างที่นำมาใช้สร้างสมการ จะเกิดการคลาดเคลื่อนขึ้น (ภาพที่ 2.8) ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างก่อนทำการวัดด้วยสเปกโตรสโคปีย่านใกล้ (Kawano and Abe, 1995)



ภาพที่ 2.8 การดูดซับแสงที่แตกต่างกัน ของตัวอย่างที่มีอุณหภูมิต่างกัน

3. ความชื้นของตัวอย่าง

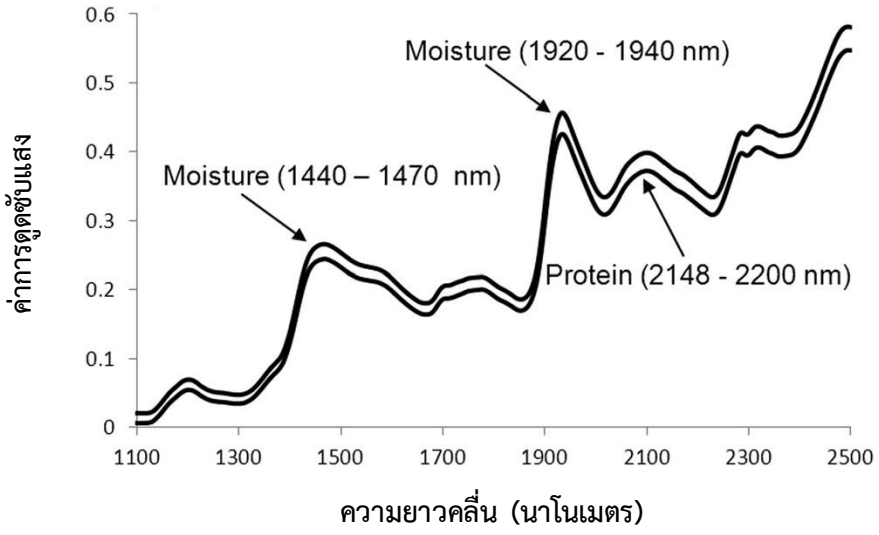
ความชื้นมีผลต่อสเปคตรัมของตัวอย่างที่วัด โดยน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีการดูดกลืนแสงเป็นอย่างมาก และรูปร่างสเปคตรัมของน้ำจะมียอดสูง ซึ่งจะไปบดบังหรือลดบทบาทของยอดสเปคตรัมที่เกิดจากการดูดกลืนแสงขององค์ประกอบอื่นได้ (วารุณี, 2555) (ภาพที่ 2.9)



ภาพที่ 2.9 การดูดซับแสงที่แตกต่างกัน ของตัวอย่างที่มีความชื้นต่างกัน

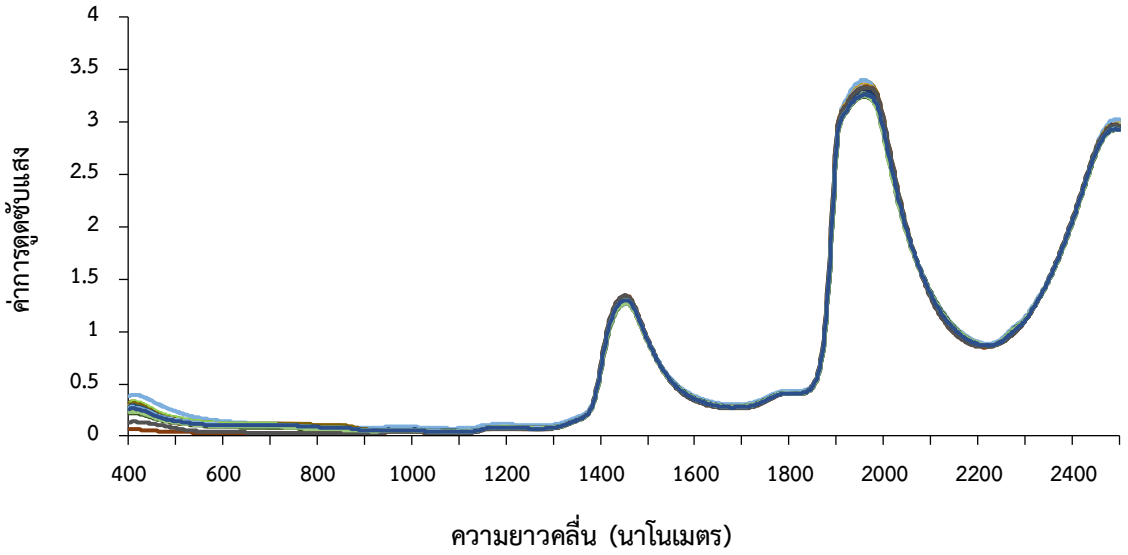
4. การวัดค่าการดูดซับแสง (Absorption)

ค่าการดูดซับแสงได้จากการที่ส่องผ่านแสงในย่าน NIR ไปยังตัวอย่าง แสงจะถูกดูดซับด้วยตัวอย่าง และ ผ่านออกมา เครื่องจะสามารถวัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมา จึงนำเอาค่ามาคำนวณค่าการดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ โดยเห็นเป็นสเปคตรัมที่มีพีค (peak) (ภาพที่ 2.10)



ภาพที่ 2.10 การดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ มีลักษณะเป็นสเปคตรัมที่มีพีค (peak) (Manley, 2014)

เส้นสเปคตรัมที่ดีต้องเป็นเส้นที่เรียบ อยู่บน base line ที่เป็นแนวนอน แต่ถ้าไม่เป็นแนวนอน ทุกตัวอย่างต้องอยู่บน base line เดียวกัน (ภาพที่ 2.11)



ภาพที่ 2.11 เส้นสเปคตรัมที่อยู่บน base line เดียวกัน

สภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ แสง และอุณหภูมิของตัวอย่าง ต้องใกล้เคียงกันในการ scan ทุกตัวอย่างเพราะปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อลักษณะของ spectrum จะทำให้สมการที่ได้ไม่ถูกต้อง เมื่อ scan แล้ว เห็นเส้นสเปคตรัมที่ไม่ดี ควรปรับปัจจัยที่มีผล แล้วทำการ scan ใหม่

การวัดค่าการดูดซับแสงหลาย ๆ ครั้ง อาจจะวัดในเวลาเดียวกัน หรืออาจวัดในวันอื่น ทำให้สภาพแวดล้อม เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และความพร้อมของเครื่อง ต่างกัน อาจทำให้การดูดซับแสงต่างกันได้ ถ้าสามารถวัดได้ควรวัดในเวลาเดียวกัน ถ้าไม่สามารถทำได้ ควรจัดตัวอย่างที่เป็นซ้ำเดียวกันวัดในเวลาเดียวกัน ส่วนวันต่อไป ควรใช้ตัวอย่างเดิมสัก 2-3 ตัวอย่าง นำมาวัดใหม่ และพยายามปรับปรุงอุณหภูมิ ความชื้นในห้องเพื่อให้ค่าการดูดซับแสงเท่าหรือใกล้เคียงกับตัวอย่างเดิมที่วัดมาก่อน ดังนั้นการใช้เครื่อง NIR Spectrometer จึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องมือหากเกิดความร้อนสูงจะส่งผลต่ออุปกรณ์เกี่ยวกับระบบแสงทำให้เกิดปัญหาความคลาดเคลื่อนของระยะความยาวคลื่นและระดับความเข้มแสงที่วัดได้

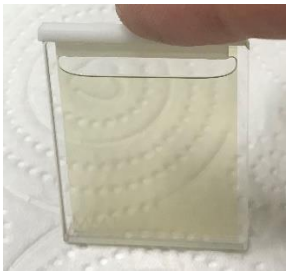
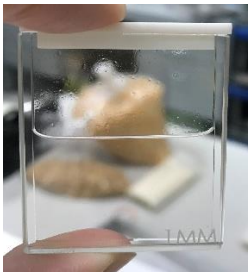
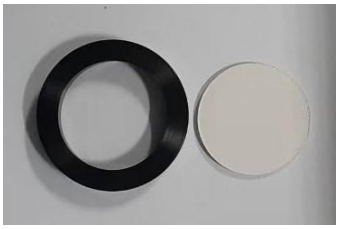
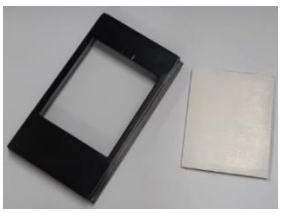
การบรรจุตัวอย่างลงในอุปกรณ์ใส่ตัวอย่าง (Sample cells) ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบ จึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับตัวอย่างแต่ละชนิด โดยคำนึงถึงหลักการส่งผ่านของแสง ขนาด และปริมาณของตัวอย่าง ถ้าใส่ตัวอย่างในอุปกรณ์ใส่ตัวอย่างไม่ดีจะมีผลต่อเส้นสเปคตรัมได้

- อุปกรณ์ใส่ตัวอย่างที่เป็นของเหลว ควรใช้อุปกรณ์ที่ทำให้ตัวอย่างมีความหนาน้อย ๆ เพื่อน้ำจะได้ไม่ดูดกลืนแสงมากจนไม่สามารถวัดแสงที่ส่องผ่านได้ และการใส่ตัวอย่างควรใส่ตัวอย่างให้เต็มภาชนะเพื่อให้แสงส่องผ่านบริเวณตัวอย่างอย่างทั่วถึง

- อุปกรณ์ใส่ตัวอย่างที่เป็นผง มักจะถูกออกแบบให้ได้ความหนาเพียงพอที่จะไม่ให้แสงทะลุผ่านไปถึงด้านล่างของอุปกรณ์ได้ ดังนั้นเวลาใส่ตัวอย่างต้องใส่ตัวอย่างให้มีความหนาเพียงพอที่จะไม่ให้แสงทะลุผ่านไปได้

- อุปกรณ์ใส่ตัวอย่างที่เป็นเมล็ดธัญพืช การใส่ตัวอย่างควรใส่ตัวอย่างให้เต็มภาชนะ และต้องมีความหนาเพียงพอที่จะไม่ให้แสงทะลุผ่านไปได้

ตารางที่ 2.1 อุปกรณ์ใส่ตัวอย่างชนิดต่าง ๆ (Sample cells) และการบรรจุตัวอย่างที่ถูกต้อง และไม่ถูกต้อง

ลำดับ	อุปกรณ์ใส่ตัวอย่างชนิดต่าง ๆ (Sample cells)	ชนิดตัวอย่าง	การบรรจุตัวอย่าง	การบรรจุตัวอย่างที่ไม่ถูกต้อง
1		- ของเหลว		
2		- แป้ง		
3		- เมล็ด		
4		- เมล็ด - ผล		

การวิเคราะห์ข้อมูลในห้องปฏิบัติการ

เมื่อ scan เสร็จ ควรนำตัวอย่างเดียวกันไปวิเคราะห์คุณภาพ ในเวลาที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด เพราะคุณภาพบางอย่างจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น ความชื้น เป็นต้น วิธีวิเคราะห์คุณภาพที่ใช้ในห้องปฏิบัติการต้องเป็นวิธีการที่ได้การยอมรับตามมาตรฐานสากล เช่น American Association of Cereal Chemists International (AACCI) , Official Methods of Analysis International (AOAC) , American Oil Chemist Society (AOCS) , European Society of Brewing Chemists (ESBC) , International Association for Cereal Science and Technology (ICC) เป็นต้น

ความถูกต้องในการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ต้องใช้วิธีที่เป็นมาตรฐาน เช่น การวิเคราะห์โปรตีน ใช้วิธี Kjeldhal (1883) ความชื้นใช้ AOAC (1990) อมิโลสใช้ Juliano (1971) เป็นต้น และค่าการวิเคราะห์ต้องมีความถูกต้อง แม่นยำสูง เมื่อนำไปทำสมการในขั้นต่อไปจะได้มีความถูกต้อง แม่นยำสูงด้วย ถ้าการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเกิดความผิดพลาดขึ้นโดยไม่รู้ตัวก็จะมีผลต่อสมการที่ได้ ทำให้มีความแม่นยำในการประเมินลดต่ำลง ดังนั้นผู้วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการจึงควรมีความรู้ ความเข้าใจ ความเชี่ยวชาญในกระบวนการวิเคราะห์นั้น ๆ

การสร้างสมการ

เมื่อได้ค่าการดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ในย่าน NIR (เป็นค่า multi factors = $x_{a....z}$) และค่าการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ (เป็นค่า แปรปรวน y) แล้วนำค่าดังกล่าวไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ แบบ partial Least regression ต่อไป โดยใช้วิธีทางสถิติ หรืออาจใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อให้ได้ค่า R^2, R, SEC, SEP bias, factors เป็นต้น

การปรับปรุงสมการ

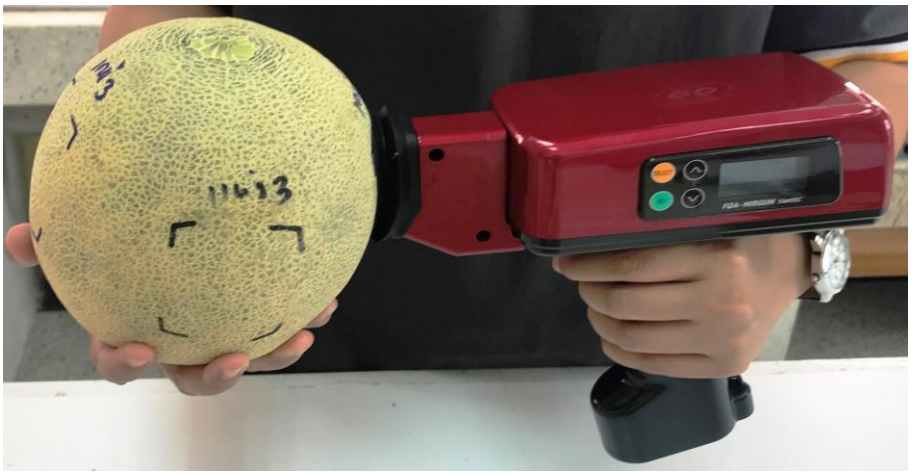
สมการที่มีประสิทธิภาพ ควรมีค่า R^2 และค่า R ใกล้เคียง 1 ค่า SEC และ SEP ต่ำ แต่เนื่องจากปัญหาหลาย ๆ แบบ อาจทำให้ค่าดังกล่าวไม่ดีนัก จึงต้องทำการปรับปรุงสมการโดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์

การวัดความถูกต้องของสมการ

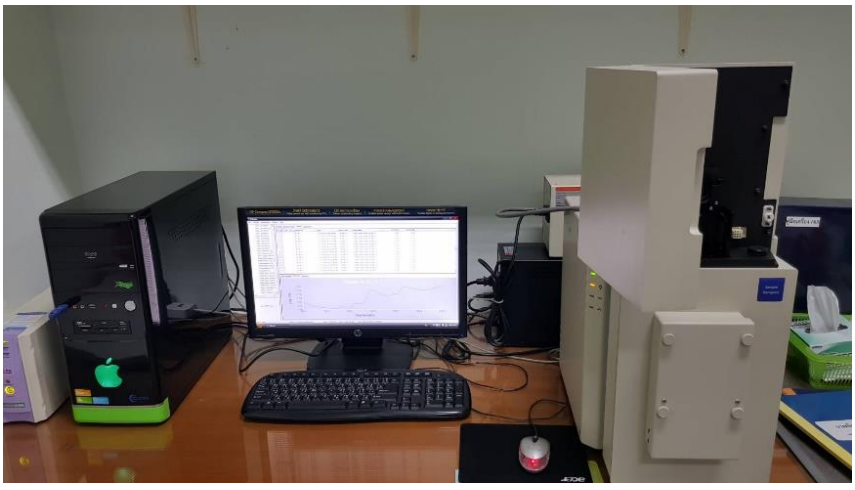
ถ้าได้สมการที่มีประสิทธิภาพ นอกจากที่ได้ทดสอบประสิทธิภาพทางสถิติแล้ว อย่างไรก็ตาม สมการย่อมมีความผิดพลาดเมื่อนำไปใช้ได้ ดังนั้นจึงควรมีการนำสมการที่ได้ไปทดสอบก่อนนำไปใช้จริง ถ้ามีความถูกต้องมากกว่าค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานในเปอร์เซ็นต์ที่สูงไม่สามารถยอมรับได้ก็ไม่ควรนำไปใช้

ชนิดของเครื่อง NIR

เครื่อง NIRS มีหลากหลายรูปแบบ ขึ้นกับชนิดของตัวอย่างและวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 2.12 FQA - NIR GUN (Fantec, Japan) แบบพกพา
ช่วงความยาวคลื่น 700 – 1,100 นาโนเมตร



ภาพที่ 2.13 FOSS 6500 System II Vertical Denmark (FOSS, Denmark)
ช่วงความยาวคลื่น 400 – 2,500 นาโนเมตร

ภาพที่ 2.14 Scio (Consumer Physics, Israel) แบบพกพา
ช่วงความยาวคลื่น 740 – 1,070 นาโนเมตร
(สืบค้นจาก https://www.wired.co.uk/article/scio-molecular-sensor-shipping-to-developers)

ภาพที่ 2.15 Viavi MicroNIR (VIAVI Solutions, United States) สำหรับในพื้นที่การผลิต
ช่วงความยาวคลื่น 950 – 1,650 นาโนเมตร
(สืบค้นจาก https://www.viavisolutions.com/en-us/osp/products/micronir-onsite-w#technical)

ภาพที่ 2.16 MPA II (Bruker, Germany) ช่วงความยาวคลื่น 500-2500 นาโนเมตร
(สืบค้นจาก https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/
8-PDF-Docs/OpticalSpectrospcopy/FT-NIR/MPA/Brochures/MPA_II_Brochure_EN.pdf)

ภาพที่ 2.17 MATRIX-F (Bruker, Germany) ช่วงความยาวคลื่น นาโนเมตร
(สืบค้นจาก https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/
8-PDF-Docs/OpticalSpectrospcopy/FT-NIR/MATRIX-F/Brochures/MATRIX-F_Brochure_EN.pdf)

ภาพที่ 2.18 FOSS DS2500 (FOSS, Denmark) Flour Analyser
ช่วงความยาวคลื่น 400 -2,500 นาโนเมตร
(สืบค้นจาก https://www.fossanalytics.com/en/products/nirs-ds2500-flour-analyser)

ภาพที่ 2.19 Nirflex n-500 (Buchi, Switzerland) ช่วงความยาวคลื่น 800–1,660 nm นาโนเมตร
(สืบค้นจาก https://www.buchi.com/en/products/nirsolutions/nirflex-n-500)

ภาพที่ 2.20 Inframatic 8800 (Perten Instruments, Sweden) NIR Grain Analyzer
ช่วงความยาวคลื่น 850-1,050 นาโนเมตร
(สืบค้นจาก https://www.perten.com/Products/Inframatic-8800/Specifications)

ภาพที่ 2.21 MicroPHAZIR™ (Thermoscientific, United States) แบบพกพา
ช่วงความยาวคลื่น 1,600 – 2,400 นาโนเมตร
(สืบค้นจาก http://tools.thermofisher.com/content/sfs/manuals/microPHAZIR-User-Manual.pdf)

ภาพที่ 2.22 IR3000 (Moist Tech, North and South Africa)
(สืบค้นจาก https://www.summit.dk/wp-content/uploads/
2019/09/MoistTech-IR-3000-Online-Brochure-1.pdf)

ภาพที่ 2.23 SisuCHEMA ใช้ในอุตสาหกรรมยา
ช่วงความยาวคลื่น 970 – 2500 นาโนเมตร
(สืบค้นจาก https://www.channelsystems.ca/sites/default/files/documents/pharma_ver0509.pdf)

บทที่ 3
การสร้างสมการ (Model Construction)

การสร้างสมการ คือ การนำค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ในย่าน NIR (เป็นค่า multi factors = $x_{a....z}$) และค่าการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ (เป็นค่า แปรปรวน, y) ไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ แบบ partial Least regression โดยใช้วิธีทางสถิติ หรืออาจใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เช่น WINISI, Vision, OPUS, NIRLab, GRAMS, MATLab และ The Unscrambler เป็นต้น การคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อหา multiple regression โดยใช้วิธี Partial Least Square (PLS) จะได้สมการที่บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและคุณภาพของตัวอย่าง สามารถพิจารณาได้จากค่าวิเคราะห์ทางสถิติต่างๆ เช่น R^2 R SEC SEP bias และ factors เป็นต้น

การสร้างสมการ calibration (Development of calibration model)

การสร้างสมการ calibration เป็นการใช้ข้อมูลการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ในย่าน NIR (800-2500 นาโนเมตร) เป็นค่าความแปรปรวนคงที่ (fixed variable) ซึ่งจำนวนจะขึ้นกับความยาวคลื่นที่วัด และระยะห่างของแต่ละครั้งที่ตั้งไว้ เช่น ข้อมูลที่ความยาวคลื่น 800-2000 นาโนเมตร โดยวัดทุก 100 นาโนเมตร ก็จะมีข้อมูล 13 ค่าต่อตัวอย่าง เป็นต้น จำนวนที่มีมากกว่า 1 ค่า ทำให้เป็น multiple variables และค่าคุณภาพที่ต้องการประเมินเป็นค่าความแปรปรวนผันแปร (variable, y) จำนวน 1 ค่า นำมาวิเคราะห์ทางสถิติ แบบ multiple regression โดยใช้การคำนวณแบบ Partial Least Square (PLS) เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าทั้ง 2 กลุ่ม ได้สมการเพื่อนำไปใช้ในการประเมินตัวอย่างอื่นต่อไป ดังสมการนี้

$$y = b_0+b_1x_1 + b_2x_2 + ... + b_nx_n +c$$

โดย y คือ ค่าแปรปรวนผันแปร

b_0 คือ ค่าคงที่

$b_{(1-n)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปรคงที่ หมายถึง ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ตั้งแต่ 1 ถึง n

$x_{(1-n)}$ คือ ค่าความแปรปรวนคงที่ ในที่นี้ คือ ค่าการดูดกลืนแสง ตั้งแต่ค่าที่ 1 ถึง ค่าที่ n

c คือ ค่าความแปรปรวนอื่นๆ

สมการที่มีประสิทธิภาพจะต้องสามารถนำไปใช้ประเมินลักษณะที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำ สามารถพิจารณาจากค่า R, SEC, SEP, F และ SD โดยใช้หลักเกณฑ์ในการพิจารณา คือ การเลือกสมการที่มีความสัมพันธ์สูงระหว่างค่าการดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ และค่าจากการวิเคราะห์ ซึ่งแสดงในค่าสหสัมพันธ์ (R^2) หรือ R สูง ค่าความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ (calibration) หรือค่า Standard Error of Calibration (SEC) ควรต่ำเช่นเดียวกับค่าความคลาดเคลื่อนในการประเมิน (Standard Error of Prediction: SEP) ต่ำ เพราะเมื่อนำสมการไปประเมินค่าตัวอย่างอื่น ค่า SEP ต่ำ จะทำให้ค่าการประเมินมีค่าความถูกต้องสูง โดยค่า SEP ต้องต่ำกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ค่า F จะบอกถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องในสมการ

ตัวอย่างค่าวิเคราะห์ทางสถิติต่างๆของสมการที่ได้แสดง ตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของสมการประเมินปริมาณโปรตีนในเมล็ดและแป้งข้าวโพดที่ความยาวคลื่น 400-2500 นาโนเมตร และ 800-2500 นาโนเมตร

Sampls	Math method	Wavelength (nm)	R	SEC	SEP	Bias	F	SD	N
Grain	Original	400-2500	0.93	0.26	0.34	-0.0009	20	7.92	151
Flour	Original	800-2500	0.94	0.30	0.32	-0.0005	7	0.91	183

R: Coefficient of correlation, SEC: Standard error of calibration, SEP: Stand error of prediction; Bias: The average difference between actual value and NIRS value, F: The number of factors used in the calibration equation, N: Number of sample SD: Standard deviation of average

1. ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (coefficient of correlation, R) ในการคำนวณ (calibration) คือความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ในย่าน NIR และค่าการวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการ ถ้าค่า R มีค่าสูงใกล้ 1 แสดงว่าค่าทั้ง 2 มีความสัมพันธ์กันสูงสามารถใช้ทดแทนกันได้ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ในย่าน NIR สามารถใช้แทนค่าวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการได้ เกณฑ์การพิจารณายอมรับค่า R ดังตารางที่ 3.2 (Williams and Norris, 2001)

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์การพิจารณายอมรับค่า R และ R^2 (Williams, 2007)

R	R^2	ความหมาย
ถึง +/- 0.5	ถึง 0.25	ไม่สามารถใช้ในสมการ NIRS calibration
+/- 0.51 – 0.70	0.26 – 0.49	เป็นความสัมพันธ์ที่ไม่ดี ควรหาเหตุผล
+/- 0.71 – 0.80	0.50 – 0.64	เหมาะสำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) อย่างหยาบๆ
+/- 0.81 – 0.90	0.66 – 0.81	เหมาะสำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบๆ
+/- 0.91 – 0.95	0.83 – 0.90	ควรใช้ด้วยความระมัดระวัง ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงงานวิจัย
+/- 0.96 – 0.98	0.92 – 0.96	ใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
+/- 0.99>	0.98>	ดีเยี่ยม สามารถนำไปใช้ได้กับการประเมินค่าจริง

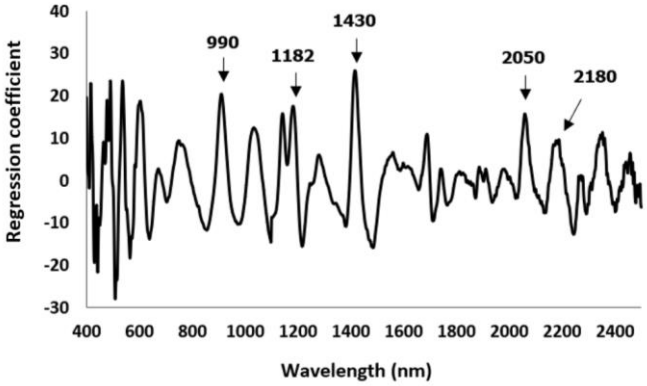
2. ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มสร้างสมการ (standard error of calibration, SEC) คือค่าคลาดเคลื่อนในการคำนวณในการสร้างสมการค่าการดูดกลืนแสงและค่าการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ สมการที่มีความสัมพันธ์จะให้ค่า SEC ต่ำ

3. ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มทดสอบสมการ (standard error of prediction, SEP) คือค่าคลาดเคลื่อนในการนำสมการไปใช้ในการประเมิน ถ้าค่า SEP สูงกว่าค่า standard deviation (SD) ของค่าการวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการ แสดงว่าสมการไม่มีประสิทธิภาพในการนำไปใช้ประเมินตัวอย่างอื่นๆ

4. Factor (F) คือ ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องสมการ เป็นปัจจัยจากภายใน คือ ข้อมูลที่ใช้ในการทำสมการ เช่น ค่าที่มีผลต่อการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่นของปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวเลี้ยงสัตว์ เช่น เมื่อวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในเมล็ดพืช ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของสมการ เช่น น้ำ แป้ง โปรตีน เส้นใย หรือ อื่นๆ ที่มีผลต่อปริมาณโปรตีนในสมการนั้น เห็นได้จากค่า regression coefficient ที่ความยาวคลื่น 400-2500 นาโนเมตร โดยปัจจัยที่มีผลต่อการประเมินปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวโพด มีค่า F = 10 แสดงว่า ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของสมาการคือ 10 ปัจจัย เช่นความยาวคลื่น 990 1182 1430 2050 และ 2180 นาโนเมตร (ภาพที่ 3.1) ซึ่งที่ความยาวคลื่นดังกล่าวเกี่ยวข้องกับพันธะ O-H และ N-H ในตัวอย่าง ตามลำดับ (Osborne *et al*., 1993)

5. ผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิงกับค่าที่ได้จาก NIRS (averages of difference between actual and NIR values, Bias) คือ ค่าเฉลี่ยของการทำนายข้อมูลของข้อมูลชุด X และ Y มีความแตกต่างกันหรือไม่ ค่าที่คำนวณได้มีค่าน้อย

6. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) คือ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่าง ข้อมูลแต่ละตัวกับค่าเฉลี่ยรวมของข้อมูล



ภาพที่ 3.1 กราฟแสดงค่า Regression coefficient ของปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ความยาวคลื่น 400-2500 นาโนเมตร

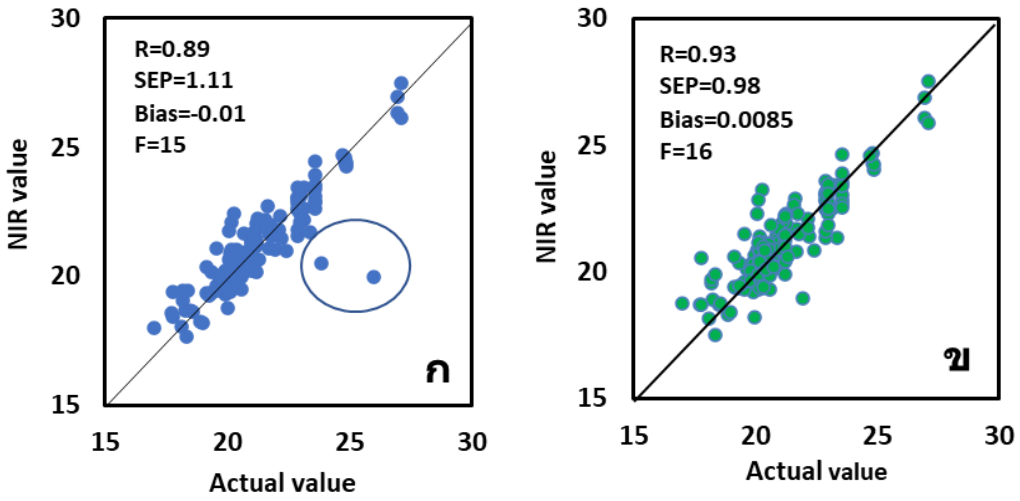
สาเหตุที่ทำให้สมการไม่มีประสิทธิภาพ ประกอบด้วย

1. Outlier ซึ่งหมายถึง ตัวอย่างบางตัวที่มีความสัมพันธ์น้อยมากระหว่างค่าจากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการและค่าจากการประเมิน เพื่อให้สมการที่ได้มีความถูกต้องในการ calibrate สูง อาจต้องมีการตัดตัวอย่างที่เป็น outlier ออกบ้าง (ภาพที่ 3.2) ซึ่งจะทำให้ค่า R สูงขึ้น ทำให้สมการมีความน่าเชื่อถือ แต่ไม่ควรตัดเกิน 10% เพราะจะทำให้ความถูกต้องลดลง

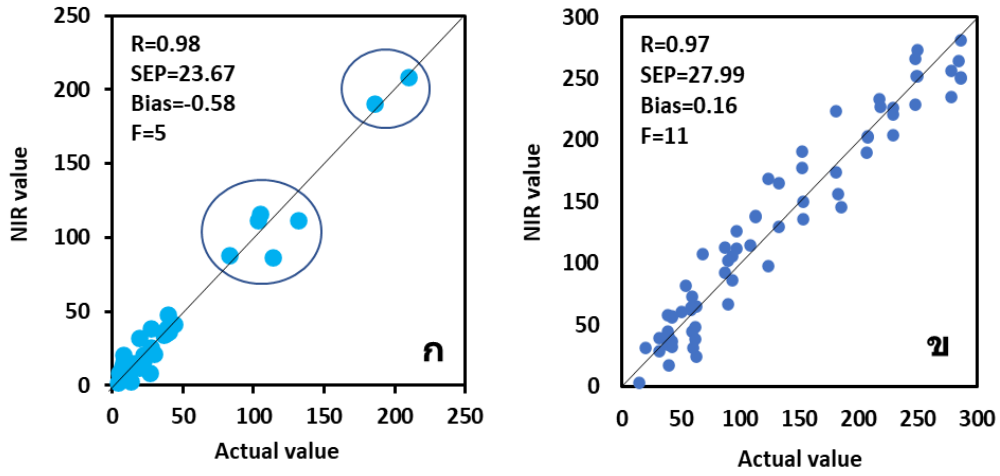
2. ขาดข้อมูลบางช่วง บางกรณีสมการมีค่า R สูง แต่เป็นสมการที่ไม่น่าเชื่อถือเพราะค่าวิเคราะห์มีเพียง 3 กลุ่ม (ภาพที่ 3.3) จึงควรตัดค่าสูงสุดออก หรือหาตัวอย่างที่อยู่ระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดเพิ่มเติม หรือหาตัวอย่างที่มีค่าวิเคราะห์ให้กระจายตัวอยู่ในรูประฆังคว่ำ เป็นต้น

3. การ scan ที่ไม่เหมาะสมอาจเกิดจาก เช่น ปริมาณตัวอย่างน้อยเกินไป มีผลทำให้เส้นสเปกตรัมผิดจากสเปกตรัมปกติ หรือเส้นสเปกตราไม่เรียบ (noise) เนื่องจากมีการรบกวนระหว่างการวัดค่าการดูดซับแสง ความชื้น สัมพัทธ์ การบรรจุ และขนาดอนุภาค เป็นต้น (ภาพที่ 3.4)

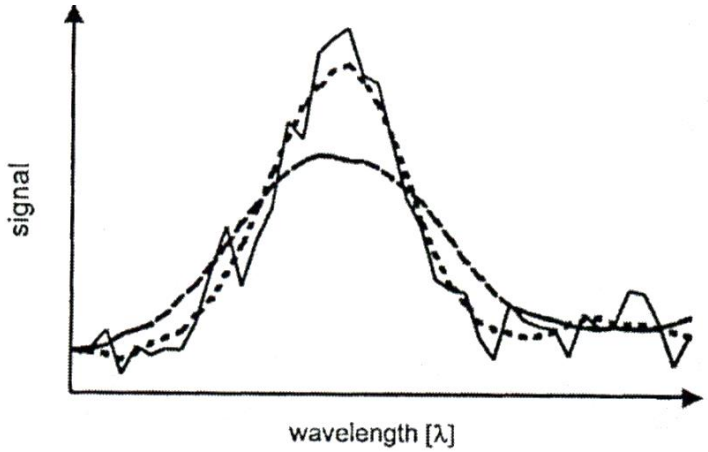
4. การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ (reference analysis) มีความผิดพลาด หรือมีค่าคลาดเคลื่อนสูง เมื่อนำผลที่ได้มาสร้างสมการทำให้ได้สมการที่มีค่า R ต่ำ หรือในกรณีที่มีค่า R สูง แต่จำนวนตัวอย่างน้อยเกินไป ซึ่งอาจดูได้จากค่า SEP ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนในการนำสมการไปประเมินตัวอย่าง



ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างจากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการและค่าจากการทำนายด้วย NIR (ก) มีค่า outlier คือ ตัวอย่างที่อยู่นอกกลุ่มจำนวน 2 ตัวอย่าง (ข) ผลการวิเคราะห์เมื่อตัดตัวอย่างที่เป็น outlier ออก



ภาพที่ 3.3 ตัวอย่างจากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการและค่าการทำนายด้วย NIR (ก) ตัวอย่างมีค่า 3 กลุ่ม ที่ไม่กระจายตัว (ข) เพิ่มจำนวนตัวอย่างที่อยู่ระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด



ภาพที่ 3.4 เส้นสเปกตราที่ไม่เรียบ (noise) เนื่องจากมีการรบกวนระหว่างการวัดค่าการดูดซับแสง สามารถปรับให้เรียบได้โดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ (Heise and Winzen, 2002)

การปรับปรุงสมการโดยวิธีทางคณิตศาสตร์

เส้นสเปกตรัมที่ได้จากการสแกนด้วยเครื่อง NIR spectrometer มีความสัมพันธ์ระหว่างแกน X ซึ่งแสดงช่วงความยาวคลื่น (wavelength) หรือ เลขคลื่น (wavenumber) กับแกน Y ซึ่งแสดงค่าการดูดกลืน (absorbance) หรือ log 1/R นั้น อาจมีลักษณะแตกต่างและส่งผลต่อการสร้างสมการ ทำให้ความแม่นยำในการประเมินค่าลดลง โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะเส้นสเปกตรัมอาจเนื่องจากสาเหตุ 3 ประการ ดังนี้

1. เครื่อง NIR spectrometer ที่ใช้ในการวัดแต่ละเครื่องมีประสิทธิภาพต่างกัน เครื่องที่ขาดการซ่อมบำรุงรักษาอาจทำให้เกิดสัญญาณรบกวนซึ่งมีผลต่อสเปกตรัม การสั่นสะเทือนของเครื่อง หรือการเปลี่ยนแปลงการทำงานของเครื่องที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ดังนั้นจึงต้องควบคุมอุณหภูมิของตัวเครื่องให้สม่ำเสมอ ถ้าหากบางส่วนของเครื่องมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากเครื่องได้

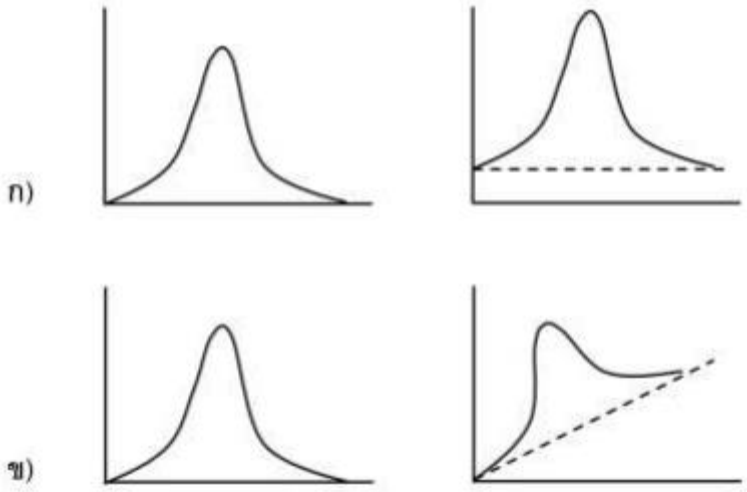
2. ผลิตผลแต่ละชนิดมีส่วนประกอบทางเคมี ลักษณะทางกายภาพ และความหนาแน่นแตกต่างกันนอกจากนั้นอุณหภูมิของผลิตผลที่แตกต่างกันมีผลต่อสเปกตรัมที่ได้ เพราะอุณหภูมิมีผลต่อโมเลกุลของน้ำในผลิตผล ทำให้ได้สเปกตรัมที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความแม่นยำของสมการ นอกจากนั้นพื้นที่ผิว และโครงสร้างของผลิตผลที่ส่งผลต่อการสะท้อนแสง NIR เช่น ผิวผลิตผลที่ไม่เรียบจะสะท้อนแสงได้น้อยกว่ากว่าผลิตผลที่มีผิวสม่ำเสมอ โครงสร้างที่ซับซ้อนของผลิตผลมีผลต่อการดูดกลืนแสง และการกระเจิงแสง เช่น ผลส้มที่มีขนาดใหญ่สามารถดูดกลืนแสงได้มากกว่าผลส้มขนาดเล็ก

3. อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมมีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่อง และเส้นสเปกตรัมของส่วนประกอบทางเคมีในผลิตผล นอกจากนั้นการใช้เทคนิค NIRS วัดคุณภาพของผักและผลไม้ ความแตกต่างของอุณหภูมิในสภาพบรรยากาศมีผลต่อการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (calibration model) และการทดสอบความแม่นยำ (validation model) ทำให้เกิด bias ของการทำนาย โดยอาจพบ bias สูงถึง 0.3% ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส (ดนัย และคณะ, 2563)

4.

เทคนิคการลดผลกระทบจากปัจจัยที่มีต่อสเปกตรัม

เส้นสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีจะมีลักษณะแถบการดูดกลืนของแต่ละเลขคลื่นหรือความยาวคลื่นที่ซ้อนทับกัน (overlapping) และเส้นสเปกตรัมอาจได้รับผลกระทบจากการกระเจิงแสงอันเนื่องมาจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวอย่างและการวิเคราะห์



ภาพที่ 3.5 สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบแบบเบสไลน์ออฟเซ็ต (ก) และแบบเบสไลน์ชิฟต์เชิงเส้น (ข)

ผลกระทบจากการกระเจิงแสงทำให้เกิดการเลื่อนขึ้นของเส้นสเปกตรัมในแนวดิ่ง (ตามแนวแกน Y) เรียกว่า เบสไลน์ออฟเซ็ต (baseline offset) (ภาพที่ 3.5ก) หรือเส้นสเปกตรัมเกิดการเอียงขึ้นไปทางด้านขวาที่เลขคลื่นหรือความยาวคลื่นสูงขึ้น เรียกว่า เบสไลน์ชิฟต์เชิงเส้น (linear baseline shift) (ภาพที่ 3.5ข) ซึ่งปัญหาเหล่านี้อาจทำให้ผลวิเคราะห์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นเทคนิคการลดผลกระทบจากปัจจัยที่มีต่อสเปกตรัมจึงมีความจำเป็นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว โดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ (mathematical processing หรือ pre-treatment) ที่เป็นที่นิยมใช้มี 4 วิธี ได้แก่

1. การแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์ (derivative transformation)
2. การปรับแก้การกระเจิงแบบพหุคูณ (multiplicative scatter correction, MSC)
3. การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (standard normal variate, SNV) และการปรับแนวโน้ม (detrending)
4. การปรับค่าเป็นมาตรฐาน (normalization)

ซึ่งวิธีการทางคณิตศาสตร์ (pre-treatment) ที่นำมาใช้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์ (derivative transformation)

การแปลงค่าอนุพันธ์ของเส้นสเปกตรัมใช้ในการแก้ปัญหาแถบการดูดกลืนที่ซ้อนทับกัน การเกิดเบสไลน์ออฟเซ็ต และเบสไลน์ชิฟต์เชิงเส้น ปกตินิยมแปลงเป็นค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first derivative) หรืออนุพันธ์อันดับสอง (second derivative) ซึ่งอนุพันธ์แต่ละอันดับมีวิธีการคำนวณผลลัพธ์ และข้อจำกัดที่แตกต่างกัน มีรายละเอียดดังนี้

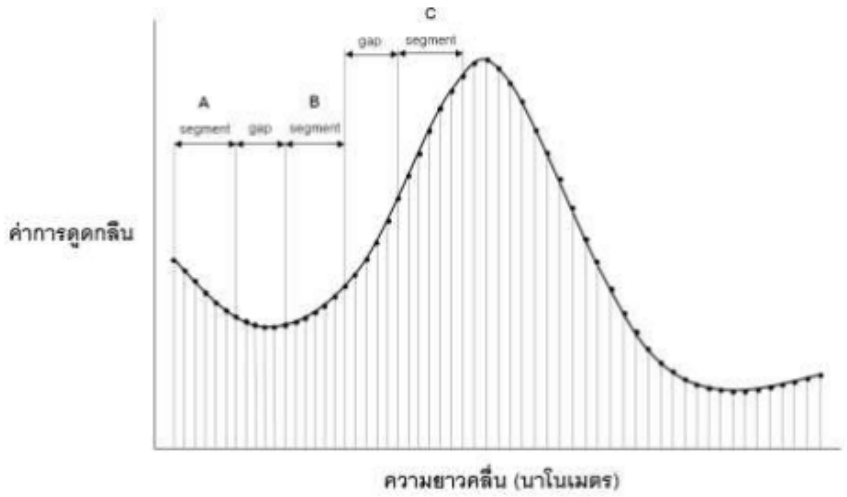
การแปลงค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first derivative) ก่อนการคำนวณต้องกำหนดขนาดของเซกเมนต์ (segments) และขนาดของช่องห่าง (gap size) จากภาพที่ 3.6 เป็นตัวอย่างการคำนวณ แบ่งเส้นสเปกตรัมให้แต่ละจุดห่างกัน 2 นาโนเมตร ขนาดของเซกเมนต์เท่ากับ 12 นาโนเมตร และขนาดของช่องห่างเป็น 10 นาโนเมตร เริ่มต้นจากการหาค่าเฉลี่ยของเซกเมนต์แรกจากเส้นสเปกตรัมทั้ง 7 จุด จะได้ค่า A เป็นตัวแทนของเซกเมนต์ที่หนึ่ง และทำอย่างเดียวกันกับเซกเมนต์ถัดไป จะได้ค่า B เป็นตัวแทนของเซกเมนต์ที่สอง นำค่า A หักลบออกจากค่า B ตามสมการ

อนุพันธ์อันดับหนึ่ง = B – A

โดย

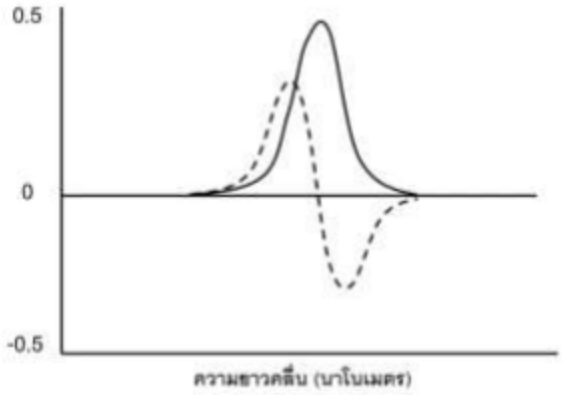
A และ B เป็นค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมของเซกเมนต์ที่อยู่ติดกัน และมีช่วงเซกเมนต์เท่ากัน

นำผลลัพธ์ที่ได้ไปแทนค่าสเปกตรัมที่จุดแรกของเซกเมนต์ที่หนึ่ง การคำนวณจะทำต่อเนื่องกันไปทุกเซกเมนต์ตลอดความยาวคลื่นทั้งหมด จากนั้นขยับเซกเมนต์ไปทางขวาหนึ่งจุด (จากตัวอย่างคือ 2 นาโนเมตร) แล้วคำนวณซ้ำจนเสร็จสมบูรณ์



ภาพที่ 3.6 ขนาดของเซกเมนต์และขนาดของช่องห่างที่กำหนดในสเปกตรัมเพื่อคำนวณค่าอนุพันธ์ (วารุณี และคณะ, 2555)

การแปลงค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งจะให้เส้นสเปกตรัมที่มีค่าความชันตรงกับจุดยอดของ เส้นสเปกตรัมเดิม (ภาพที่ 3.7) ใช้ได้ผลดีกับตัวอย่างที่มีขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ



ภาพที่ 3.7 สเปกตรัมเดิม (เส้นทึบ) และอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first derivative) ของสเปกตรัม (เส้นประ) (Hruschks, 1987)

สำหรับการแปลงค่าอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative) คือ การคำนวณผลลบของอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ที่เซกเมนต์อยู่ติดกัน ดังสมการ

อนุพันธ์อันดับสอง = อนุพันธ์อันดับหนึ่งแรก – อนุพันธ์อันดับหนึ่งถัดมา

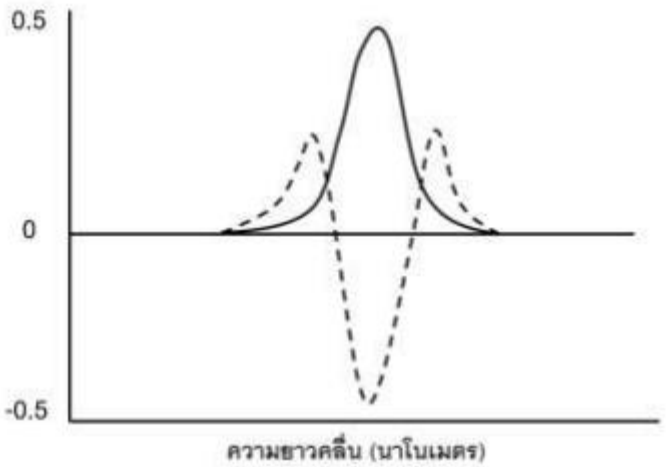
= (B – A) – (C – B)

= 2B – A – C

โดย A, B และ C เป็นค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมของเซกเมนต์ที่อยู่ติดกัน และมีช่วงเซกเมนต์เท่ากัน

การคำนวณอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative) คล้ายกับการหาอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ต่างกันที่การหาจุดแรกของอนุพันธ์ อันดับสองต้องหาค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมในช่วงที่สามหรือค่า C (ภาพที่ 3.8) ผลลัพธ์สุดท้ายจากสมการด้านบนนำไปแทนค่าสเปกตรัมจุดแรกของเซกเมนต์ที่หนึ่ง การคำนวณจะทำต่อเนื่องกันไปทุกเซกเมนต์ตลอดความยาวคลื่นทั้งหมด จากนั้นขยับเซกเมนต์ไปทางขวาหนึ่งจุด (จากตัวอย่างในภาพที่ 3.8 คือ 2 นาโนเมตร) แล้วคำนวณซ้ำจนเสร็จสมบูรณ์ การแปลงค่าอนุพันธ์อันดับสอง จะให้เส้นสเปกตรัมที่มีจุดยอดตรงกับจุดยอดของ เส้นสเปกตรัมเดิม โดยเป็นจุดยอดในลักษณะกลับหัว (ภาพที่ 3.10) ใช้ได้ผลดีกับตัวอย่างที่มีขนาด อนุภาคแตกต่างกันผสมผสานกันอยู่ภายในตัวอย่าง เมื่อเปรียบเทียบภาพที่ 3.9 และ 3.10 จะพบว่าอนุพันธ์อันดับสองสามารถแก้ปัญหาที่เกิดจากการซ้อนทับกันของแถบการดูดกลืนได้ดีกว่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง เนื่องจากสามารถแยกจุดยอด ที่เหลื่อมซ้อนกันออกมาได้ชัดเจนกว่า นอกจากนี้อนุพันธ์อันดับสองยังสามารถแก้ปัญหาเบสไลน์ชิฟต์เชิงเส้นได้อีกด้วย เพราะอนุพันธ์อันดับสองของเส้นตรงมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนอนุพันธ์อันดับหนึ่งเหมาะสำหรับใช้แก้ปัญหาเบสไลน์ออฟเซ็ต และสามารถแก้ปัญหาอื่นๆ ได้เช่นเดียวกันกับการทำอนุพันธ์อันดับสองแต่มีความชัดเจนน้อยกว่า

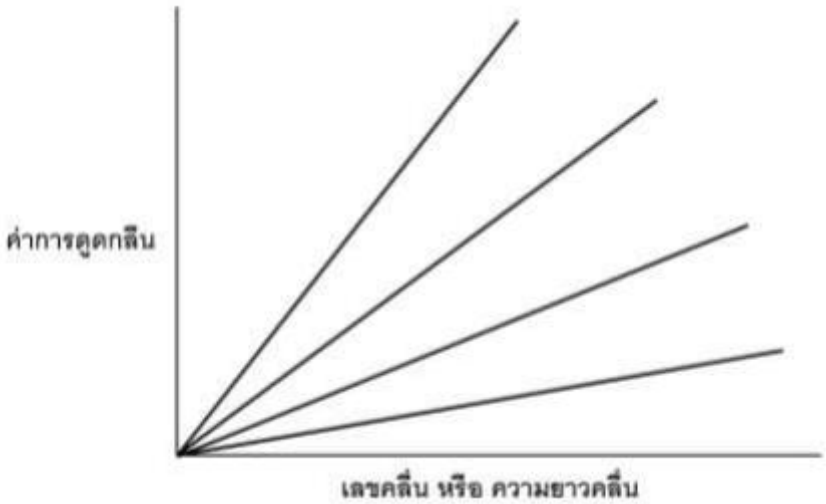
แม้อนุพันธ์อันดับที่สูงกว่าจะสามารถแก้ปัญหาได้ดีกว่า แต่มีข้อเสียคือสเปกตรัมที่ได้จะมีสัญญาณรบกวนมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากสัญญาณรบกวนมักจะปรากฏเป็นจุดยอดเล็ก ๆ บนเส้นสเปกตรัม การทำอนุพันธ์ทำให้จุดยอดเล็กๆ นั้นแยกจากกันชัดเจนขึ้น นอกจากนี้การทำอนุพันธ์อันดับที่สูงกว่าอันดับสอง ให้ผลเป็นเส้นสเปกตรัมที่แตกต่างกับเส้นสเปกตรัมเดิมมาก แปรผลเทียบกับเส้นสเปกตรัมเดิมได้ยาก จึงไม่นิยมใช้ในเทคนิค NIRS



ภาพที่ 3.8 สเปกตรัมเดิม (เส้นทึบ) และอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative) ของสเปกตรัม (เส้นประ) (Hruschks, 1987)

2. การปรับแก้การกระเจิงแบบพหุคูณ (multiplicative scatter correction, MSC)

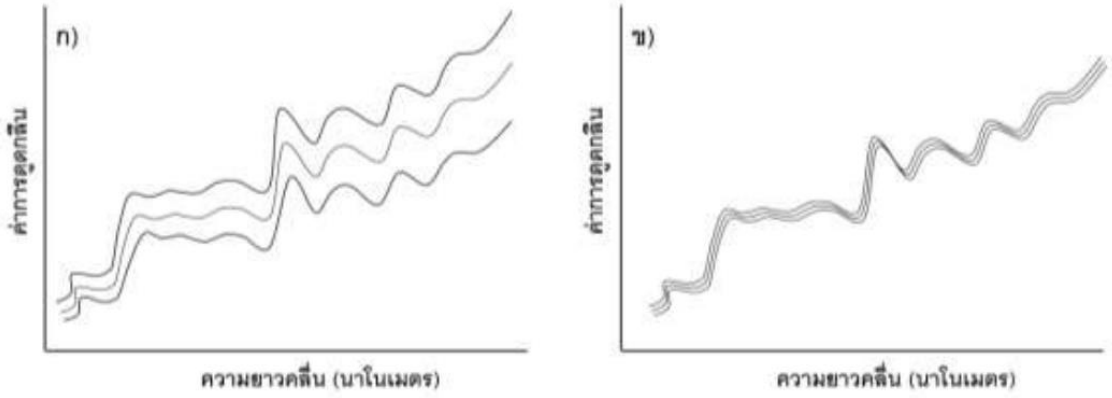
สเปกตรัมที่ได้จากการวัดด้วยระบบการวัดแบบส่องผ่านและสะท้อนแบบแพร่จะ ได้รับผลกระทบจากการกระเจิงแสง (scattered light) เพราะความไม่สม่ำเสมอของอนุภาคในตัวอย่าง ทำให้ความชันโดยรวมของสเปกตรัมเปลี่ยนไป เสมือนว่าสเปกตรัมถูกทำให้หมุนรอบจุดที่ความยาวคลื่นต่ำสุดของสเปกตรัม หรือเรียกว่าผลกระทบแบบคูณ (multiplicative effect) ถ้าสมมติให้สเปกตรัมเป็นเส้นตรงที่ได้รับผลกระทบจากการกระเจิงแสง เส้นตรงจะถูกหมุนไป (ดังภาพที่ 3.9) การปรับแก้การกระเจิงแบบพหุคูณเป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้สเปกตรัมแต่ละเส้นหมุนเข้าใกล้เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างทั้งหมดให้มากที่สุด โดยขั้นแรกจะต้องนำสเปกตรัมทั้งหมดของตัวอย่างมาเฉลี่ยเพื่อให้ได้สเปกตรัมเฉลี่ยก่อน จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความยาวคลื่นของแต่ละตัวอย่างมาหาความสัมพันธ์กับค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างทั้งหมดทุกความยาวคลื่น จะได้เส้นตรงที่มีค่าความชันไม่เท่ากับหนึ่ง ถ้าตัวอย่างใดมีสเปกตรัมเหมือนกับสเปกตรัมเฉลี่ย ค่าความชันจะมีค่าเท่ากับหนึ่ง



ภาพที่ 3.9 สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบจากการกระเจิงแสง

ขั้นตอนการหมุนสเปกตรัมแต่ละเส้นให้เข้าใกล้เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยทำได้โดย หาค่าคงที่ค่าหนึ่งมาลบออกจากเส้นสเปกตรัมเพื่อลดผลกระทบจากการเลื่อนตัวของเส้นสเปกตรัม และหาค่าคงที่อีกค่าหนึ่งมาหารค่าการดูดกลืนแสงทุกความยาวคลื่นเพื่อปรับความชันของเส้น สเปกตรัมที่เปลี่ยนไป หมายถึงปรับค่าการดูดกลืนแสงให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นสัดส่วนเพื่อให้มีค่าตรง กับเส้นสเปกตรัมเฉลี่ย ค่าคงที่ดังกล่าวคำนวณได้จากสมการวิเคราะห์ความถดถอย (regression)

ตัวอย่างสเปกตรัมที่ปรับแก้ด้วยวิธีการกระเจิงแบบพหุคูณแสดง (ภาพที่ 3.10) ซึ่งสเปกตรัมที่ถูกปรับแก้จะเสมือนกับถูกหมุนให้เข้ามาใกล้กับสเปกตรัมเฉลี่ย ซึ่งรูปร่างของสเปกตรัมที่ ได้จะแตกต่างกับสเปกตรัมที่ได้จากการทำอนุพันธ์ โดยเส้นสเปกตรัมหลังการปรับแก้ด้วยวิธีการกระเจิงแบบพหุคูณจะมีรูปร่างไม่ต่างจากเส้นสเปกตรัมเดิมมากนัก



ภาพที่ 3.10 สเปกตรัมเดิมที่ได้รับผลกระทบแบบคูณ (ก) และสเปกตรัมหลังการปรับแก้การกระเจิงแบบพหุคูณ (ข)

<u>ข้อจำกัด</u> คือ ถ้าใช้การปรับแก้การกระเจิงแบบพหุคูณกับสเปกตรัมตัวอย่างเพื่อสร้างสมการวิเคราะห์ตัวอย่างก็จะต้องใช้การปรับแก้นี้กับกลุ่มตัวอย่างที่จะนำมาประเมินค่าทางเคมีในอนาคตด้วย และเส้นสเปกตรัมเฉลี่ยต้องเป็นเส้นเดียวกัน

3. วิธีปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (standard normal variate, SNV) และการปรับแนวโน้ม (detrending)

สเปกตรัมจากตัวอย่างที่ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการสะท้อนแบบแพร่จะมีความแตกต่างกัน เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการกระเจิงแสง และขนาดของการกระเจิงแสงขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสง ขนาดอนุภาค การกระจายตัวของอนุภาค และดัชนีหักเหของตัวอย่าง ดังนั้นตลอดช่วงของเส้นสเปกตรัมจึงเกิดการกระเจิงแสงไม่เท่ากัน โดยทั่วไปเส้นสเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบจากการกระเจิงแสงจะมีการเลื่อนตัวตามแนวดิ่ง มีการหมุนของเส้นสเปกตรัม หรือทำ

ให้เส้นสเปกตรัมมีความโค้งเพิ่มขึ้น ซึ่งผลกระทบจากการกระเจิงแสงจะพบมากที่ช่วงปลายของเส้นสเปกตรัม หรือที่ความยาวคลื่นสูง ทำให้เห็นเป็นสเปกตรัมในลักษณะปากแตร (ภาพที่ 3.10ก)

วิธีการกำจัดผลกระทบจากการกระเจิงแสงออกจากเส้นสเปกตรัม นอกจากการปรับแก้การกระเจิงแบบพหุคูณยังสามารถใช้วิธีปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานซึ่งจะให้ผลลัพธ์คล้ายคลึงกัน แต่มีความแตกต่างกันที่วิธีนี้ไม่ต้องใช้เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยเป็นสเปกตรัมอ้างอิง ทำได้โดยปรับแก้ค่าการดูดกลืนให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน (normalization) โดยปรับแก้ให้ค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมมีค่าเป็นศูนย์ด้วยการนำค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมของตัวอย่างนั้น ๆ มาลบออกจากค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความยาวคลื่นตลอดช่วงของเส้นสเปกตรัม และปรับแก้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานให้เท่ากับหนึ่ง โดยนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้จากค่าการดูดกลืนแสงตลอดช่วงของเส้นสเปกตรัมมาหารค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความยาวคลื่น

ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะคำนวณมาจากค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมแต่ละเส้นที่ต้องการปรับแก้ของตัวอย่างนั้น ๆ โดยอิสระ เมื่อปรับแก้แล้วจะได้เส้นสเปกตรัมดังภาพที่ 3.10ข

การปรับแนวโน้มอาจทำต่อจากการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานเพื่อลด ความโน้มเอียงของเส้นสเปกตรัม ซึ่งการปรับแนวโน้มต้องทำต่อจากการปรับความแปรปรวนให้เป็น มาตรฐานเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้เพียงลำพังวิธีเดียว ผลที่ได้จากการปรับแนวโน้มคือลดผลกระทบ จากเบสไลน์ชิฟต์เชิงเส้นและช่วยเน้นยอดสเปกตรัมให้เด่นชัดขึ้น แต่โดยทั่วไปวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานอย่างเดียวก็เพียงพอสำหรับการกำจัดผลกระทบจากการกระเจิงแสงออกจากเส้นสเปกตรัม

4. การปรับค่าเป็นมาตรฐาน (normalization)

เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้กำจัดความแปรปรวนในเส้นสเปกตรัม โดยนำค่าการดูดกลืนแสงอ้างอิงหรืออาจเป็นค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดมาลบออกจากค่าการดูดกลืนแสงในสเปกตรัมเดียวกันที่ความยาวคลื่นอื่น ๆ ทั้งหมด หรืออาจนำค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นอ้างอิงมาหารค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความยาวคลื่น ดังสมการต่อไปนี้

การปรับค่าเป็นมาตรฐานด้วยการลบ

$$A'\lambda i = A\lambda i - A\lambda *$$

การปรับค่าเป็นมาตรฐานด้วยการหาร

$$A'\lambda i = A\lambda i \,/\, A\lambda *$$

โดย $A\lambda i$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความยาวคลื่นของสเปกตรัมเดิม

$A\lambda *$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นอ้างอิง

วิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบพหุคูณที่กล่าวมาแล้วก็เป็นการปรับค่าให้เป็นปกติเช่นกัน และสามารถนำค่าอ้างอิงมาลบและหารได้ในคราวเดียวกัน ดังนั้น ในปัจจุบันวิธีการปรับค่าเป็นมาตรฐานจึงไม่นิยมนำมาใช้ เนื่องจากการลบและการหารต้องทำแยกกันทีละขั้นตอน ทำให้ยุ่งยากต่อการคำนวณ

ข้อแนะนำในการเลือกวิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัม (วารุณี และคณะ, 2555)

การเลือกวิธีการในการปรับเส้นสเปกตรัมสามารถสรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1. ถ้าสเปกตรัมมีสัญญาณ (noise) รบกวนมาก หรือสเปกตรัมมีลักษณะเป็นยอดแหลมเล็กกระจายตลอดช่วงความยาวคลื่นบนสเปกตรัม อาจพิจารณาใช้วิธีการทำให้สเปกตรัมเรียบ (smoothing) เพื่อปรับให้สเปกตรัมเรียบขึ้น
2. ถ้าสเปกตรัมมีการเลื่อนตัวในแนวแกน y (baseline shift or offset) อันเนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ ควรใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first derivative) ปรับสเปกตรัม หรือใช้วิธีอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative)
3. ถ้าสเปกตรัมมีการเลื่อนตัวในแนวแกน y และเกิดการหมุนทำให้ที่ความยาวคลื่นสูง มีค่าเบี่ยงเบนมากกว่าที่ความยาวคลื่นต่ำ และถ้าต้องการให้แยกยอดสเปกตรัมออกจากกัน ในกรณีสเปกตรัมเหลื่อมซ้อนกัน อันเนื่องมาจากแถบคอมบิเนชัน (combination bands) ควรใช้วิธีอนุพันธ์อันดับสอง
4. ถ้าต้องการแก้ปัญหาอิทธิพลของขนาดตัวอย่าง ให้เลือกใช้วิธีการปรับให้เป็นปกติ (normalization)
5. ถ้าต้องการแก้ปัญหาอิทธิพลของการกระเจิงแสง (scattering) ที่ทำให้สเปกตรัมเลื่อนตัวตามแกน y และเกิดการหมุนตัวเช่นเดียวกับข้อ 3 ควรใช้วิธี MSC (multiplicate scatter correction)

ไม่ควรเลือกใช้วิธีหลายๆ วิธีที่ให้ผลการปรับสเปกตรัมเหมือนกัน และควรศึกษาพิจารณารูปร่างสเปกตรัมโดยรวมก่อนว่า น่าจะเกิดจากอิทธิพลจากอะไร แล้วจึงเลือกใช้วิธีการปรับแต่งตามข้อ 1 ถึงข้อ 5 ดังนั้น วิธีการปรับแต่งสเปกตรัม NIR ที่ดีที่สุด คือ วิธีที่ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้สมการแคลิเบรชัน (calibration model) ที่มีความสามารถในการประเมินค่าการวิเคราะห์ทางเคมี (chemical analysis) ของตัวอย่างในอนาคตได้แม่นยำที่สุด โดยต้องเข้าใจความหมาย และคำนึงถึงข้อดีหรือข้อเสียของแต่ละวิธีให้ชัดเจน โดยทั่วไปอาจต้องใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial and test)

การทดสอบสมการเพื่อประเมินคุณภาพ (validation)

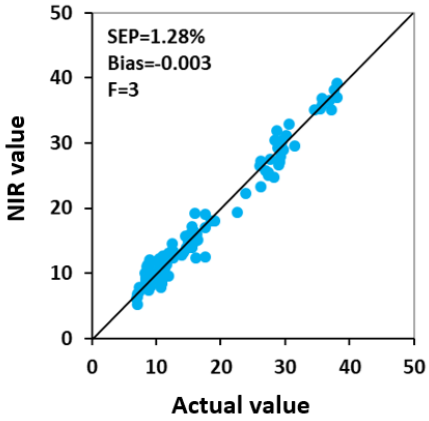
หลังจากที่ได้สมการประเมินคุณภาพ (calibration model) ที่มีค่าทางสถิติที่แสดงถึงความมีประสิทธิภาพแล้ว จะต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพของสมการนั้นก่อนนำไปใช้จริง การทดสอบสมการประเมินค่าทางเคมีที่มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี ที่นิยมแพร่หลาย (ศุมาพร, 2555)

1. การทดสอบสมการภายใน (internal validation)

โดยวิธี Full cross validation สามารถทดสอบได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป (โปรแกรมเดียวกับที่คำนวณสมการ) มีวิธีการ คือ นำตัวอย่างเดียวกับที่นำมาทำสมการมาประเมินคุณภาพ ดังนี้

แต่ละครั้งที่ทดสอบจะมีการตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้สร้างสมการประเมินทางเคมี จากนั้นใช้ตัวอย่างมาตรฐานที่เหลือทำการคำนวณหาสมการ เมื่อได้สมการจึงนำมาประเมินคุณภาพตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ขั้นต่อไปใส่ตัวอย่างมาตรฐานที่ 1 กลับคืนและตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 2 ออกจากชุด

ตัวอย่างมาตรฐาน ทำสมการและใช้สมการที่ได้ประเมินเช่นเดียวกับวิธีของมาตรฐานตัวที่ 1 ทำขั้นตอนข้างต้นซ้ำจนกระทั่งหาคุณภาพของตัวอย่างมาตรฐานครบทั้งชุด ดังนั้นตัวอย่างมาตรฐานจะถูกตัดออกจากชุดตัวอย่างละ 1 ครั้งเท่ากัน (ภาพที่ 3.11) โปรแกรมสำเร็จรูปสามารถทำขั้นตอนนี้ได้ในเวลาสั้น ค่าที่แสดงให้เห็นจะสามารถบอกได้ว่าสมการที่ได้มีความถูกต้องมากน้อยเพียงไร จากค่าที่แสดงความเชื่อมั่นทางสถิติ คือ Standard Error of Prediction: SEP, Standard Error of Estimate หรือ %Variance (R^2) เป็นต้น



ภาพที่ 3.11 การประเมินภายใน (Internal validation) ของสมการที่มีค่า SEP= 1.28% โดยใช้ Full cross validation

2. **การทดสอบสมการแบบภายนอก (external validation)**

เป็นการทดสอบสมการ (prediction testing) โดยการเตรียมหรือนำตัวอย่างชุดใหม่มาทำการวิเคราะห์ในสภาวะการทดลองเช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐาน รวมถึงการ treatment สเปกตรัม ก็ต้องเป็นแบบเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐาน เช่น ถ้าชุดสมการใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ชนิดใดก็ต้องใช้กับตัวอย่างทดสอบด้วย ใช้ความยาวคลื่นเท่าใดก็ต้องใช้ให้เหมือนกับตัวอย่างในสมการ วิธีการเตรียมตัวอย่างก็ทำเช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐานทุกขั้นตอน เรียกชุดตัวอย่างที่นำมาทดสอบสมการมาตรฐานนี้ว่า ชุดทดสอบ (testing set) แต่จุดที่ต้องระวังก็คือ ปริมาณค่าคุณภาพที่เราจะหาในตัวอย่างชุดทดสอบต้องอยู่ภายในช่วงชุดมาตรฐาน หลังจากได้สเปกตรัมของชุดทดสอบ ก็นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณจากสมการประเมินคุณภาพ จากนั้นดูผลการคำนวณที่ได้และค่าทางสถิติ ค่าทางสถิติที่ควรพิจารณาได้แก่ ค่าความคลาดเคลื่อน (bias) คือค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธี NIR กับค่าจากวิธีอ้างอิง และค่า Standard Error of Prediction (SEP) ถ้าผลการหาปริมาณใกล้กับผลของค่าจากห้องปฏิบัติการ ถือว่าดี นั้นแสดงว่าสมการประเมินค่าทางเคมีนั้นสามารถยอมรับได้ และนำไปประเมินหาปริมาณตัวอย่างอื่นต่อไป ได้ถูกต้อง

บทที่ 4
การประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS ในประเทศไทย

Near-infrared Spectroscopy (NIRS) ได้ถูกนำมาใช้งานในช่วงปลายของทศวรรษ 1970 เป็นวิธีการวิเคราะห์คุณภาพที่ไม่ทำลายตัวอย่าง มีการศึกษาและประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมน้ำมัน อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมอาหารและเกษตรที่นำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพผลิตผลทั้งผัก ผลไม้ เมล็ดพันธุ์ รวมถึงเมล็ดพืช โดยใช้ในการจำแนกองค์ประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของตัวอย่างทั้งในเชิงปริมาณ (quantitative) และเชิงคุณภาพ (qualitative) ได้เป็นอย่างดีตั้งแต่การตรวจสอบวัตถุดิบไปจนถึงการตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ปัจจุบัน เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถนำมาใช้ในงานวิเคราะห์ประจำวันได้

การประยุกต์ใช้งาน NIRS ในงานพืชสวน

การใช้ประโยชน์ของเทคนิค NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้สดของประเทศไทย เริ่มมีความต้องการมากขึ้น ในปัจจุบันมีการทำงานวิจัยโดยนำ NIRS มาใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี การตรวจหาแมลงปนเปื้อน และการตรวจวิเคราะห์สารตกค้างในผลิตผลสด เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย

ชนิดผลไม้	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
กระเจี๊ยบเขียว	คัดแยกหนอนภายในฝัก	NIR Spectrometer ระบบส่องทะลุผ่าน	650-1,100 nm	การสร้างแบบจำลองการคัดแยกด้วยวิธี PLSDA มีความแม่นยำในการคัดแยกกลุ่มที่มีหนอนได้อย่างถูกต้อง 90%	รณฤทธิ์ และคณะ (2557)
กะหล่ำปลี (น้ำคั้น)	ปริมาณสารคลอร์ไพริฟอสตกค้าง ปริมาณสารไซเปอร์มีทรินตกค้าง	NIRSystem 6500	1,100-2,500 nm	ค่า R เท่ากับ 0.99 ค่า SEP เท่ากับ 54.91 ppm ค่า Bias เท่ากับ 9.92 ppm ค่า R เท่ากับ 0.98 ค่า SEP เท่ากับ 139.77 ppm ค่า Bias เท่ากับ 2.20 ppm	ปาริชาติ และคณะ (2554)
ขิง	การเกิดเชื้อราปนเปื้อน	NIR Flex N-500	1,000-2,500 nm	พบการดูดกลืนคลื่นของหมู่ฟังก์ชัน $CONH_2$ CH_2 และ CH_3 ซึ่งเป็นส่วนประกอบในโครงสร้างของเชื้อรา	กรรณพต และคณะ (2561)
คะน้า	ปริมาณไนเตรทในใบ	Q-Interline Quant FT-NIR	1,000-2,500 nm	ค่า R เท่ากับ 0.95 ค่า SEP เท่ากับ 44.83 ppm ค่า Bias เท่ากับ 13.84 ppm	ระจิตร และนภณัฏฐ์ (2557)

ตารางที่ 4.1 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย

ชนิดผลไม้	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
แคนตาลูปพันธุ์ซันเลดี	ปริมาณความหวาน (Brix value) ความแน่นเนื้อ	NIRS แบบพกพารุ่น FQA-NIR GUN	700-1,100 nm	ค่า R เท่ากับ 0.86 ค่า RMSEP เท่ากับ 1.27% ค่า Bias เท่ากับ -0.002% ค่า R เท่ากับ 0.79 ค่า RMSEP เท่ากับ 0.03 N ค่า Bias เท่ากับ -0.006 N	ธีระวัฒน์ และคณะ (2561)
ชมพู่พันธุ์ทับทิมจันท์	ปริมาณความหวาน	FT-NIR รุ่น MPA FQA-NIR GUN	700-1,100 nm	ค่า R เท่ากับ 0.92 ค่า SEP เท่ากับ 0.62% ค่า Bias เท่ากับ 0.03%	พีรพงษ์ และคณะ (2557)
แตงโมตัดแต่ง	ปริมาณไลโคปีน ปริมาณความหวาน	FQA-NIR GUN FT-NIR Spectrometer	600-1,100 nm 800-2,500 nm	ค่า R^2 เท่ากับ 0.86 ค่า SEP เท่ากับ 0.09 ppm ค่า Bias เท่ากับ -0.01 ppm ค่า R^2 เท่ากับ 0.78 ค่า RMSEP เท่ากับ 0.65% ค่า Bias เท่ากับ 0.03%	ศิวดล (2557)
ถั่วฝักยาว	ปริมาณสารคลอร์ไพริฟอสตกค้าง	FT-NIR รุ่น MPA	800-2,500 nm	ค่า R^2 เท่ากับ 0.85 ค่า RMSECV เท่ากับ 23.4 ppm ค่า Bias เท่ากับ 0.60 ppm	เอลียาห์ และคณะ (2558)

ตารางที่ 4.1 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดผลไม้	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
ทุเรียน	ปริมาณน้ำหนักแห้ง (ประเมินความแก่ของผล)	FT-NIR รุ่น MPA	800-2,857 nm	ค่า R เท่ากับ 0.69 ค่า RMSEP เท่ากับ 3.57% ค่า Bias เท่ากับ -0.02% สามารถจำแนกกลุ่มทุเรียนออกเป็นสี่กลุ่มความแก่โดยการวัดผลผ่านเปลือกได้ด้วยความถูกต้อง 87.48%	อริยนันท์ และอนุพันธ์ (2560)
	ปริมาณความหวาน	FQA-NIR GUN	700–1,050 nm	ค่า R^2 เท่ากับ 0.83 ค่า SEP เท่ากับ 1.67% ค่า Bias เท่ากับ -3.52%	อัมรา และพีระศักดิ์ (2561)
	ปริมาณน้ำหนักแห้ง			ค่า R^2 เท่ากับ 0.69 ค่า SEP เท่ากับ 10.36% ค่า Bias เท่ากับ-4.84%	
ปาล์มน้ำมัน	ปริมาณน้ำมัน	FQA-NIR GUN	700-1,100 nm	ค่า R เท่ากับ 0.95 ค่า SEP เท่ากับ 3.88% ค่า Bias เท่ากับ 0.01%	รณฤทธิ์ และคณะ (2554)
		FT-NIR Spectrometer รุ่น MPA	1,100-2,500nm	ค่า R เท่ากับ 0.97 ค่า RMSEP เท่ากับ 4.10% ค่า Bias เท่ากับ 0.20%	

ตารางที่ 4.1 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดผลไม้	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
ปาล์มน้ำมัน	ปริมาณน้ำมัน ปริมาณความชื้น	Diode Array NIR Spectrometer	627-1,060 nm	ค่า R เท่ากับ 0.90 ค่า SEP เท่ากับ 3.32% ค่า Bias เท่ากับ 0.24% ค่า R เท่ากับ 0.93 ค่า SEP เท่ากับ 2.14% wb ค่า Bias เท่ากับ 0.16% wb	รณฤทธิ์ และคณะ (2555)
ผักกาดหอม (น้ำค้น)	ปริมาณสารคลอร์ไพริฟอสตกค้าง ปริมาณสารไซเปอร์มีทรินตกค้าง	NIR Flex N-500	1,400-2,500 nm	ค่า R เท่ากับ 0.93 ค่า SEP เท่ากับ 176.15 ppm ค่า Bias เท่ากับ -1.61 ppm ค่า R เท่ากับ 0.94 ค่า SEP เท่ากับ 134.36 ppm ค่า Bias เท่ากับ -0.43 ppm	ปาริชาติ และคณะ (2554)
ฝรั่ง	ปริมาณความหวาน ปริมาณวิตามินซี	FQA-NIR GUN	700-1,100 nm	ค่า R เท่ากับ 0.94 ค่า SEP เท่ากับ 0.54% ค่า Bias เท่ากับ -0.08% ค่า R เท่ากับ 0.74 ค่า SEP เท่ากับ 0.20 $mg.g^{-1}$ ค่า Bias เท่ากับ 0.03 $mg.g^{-1}$	รณฤทธิ์ และคณะ (2551)

ตารางที่ 4.1 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดผลไม้	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
ฝรั่ง	ปริมาณความหวาน	FQA-NIR GUN	700-1,050 nm	ค่า R เท่ากับ 0.96 ค่า SEP เท่ากับ 0.83 ค่า Bias เท่ากับ -0.20	ดลพร และคณะ (2554)
		FT-NIR Spectrometer	900-2,500 nm	ค่า R เท่ากับ 0.93 ค่า SEP เท่ากับ 0.73 ค่า Bias เท่ากับ -0.07	
	ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด	FQA-NIR GUN	700-1,050 nm	ค่า R เท่ากับ 0.85 ค่า SEP เท่ากับ 4.46 ค่า Bias เท่ากับ -0.30	
		FT-NIR Spectrometer	900-2,500 nm	ค่า R เท่ากับ 0.76 ค่า SEP เท่ากับ 4.52 ค่า Bias เท่ากับ 0.32	
ฝรั่งพันธุ์แป้นสีทอง	ปริมาณความหวาน	NIR-online ระบบสะท้อนกลับสำหรับการวัดสเปกตรัมบนสายพานลำเลียง	450-950 nm	ค่า R เท่ากับ 0.87 ค่า SEP เท่ากับ 0.46% ค่า Bias เท่ากับ 0.05%	รณฤทธิ์ และคณะ (2554)
ฝรั่งพันธุ์หนองข้างคอก (กลมสาลี่)	ปริมาณความหวาน	FT-NIR Spectrometer รุ่น TANGO	800-2,500 nm	ค่า R เท่ากับ 0.81 ค่า RMSEP เท่ากับ 0.61% ค่า Bias เท่ากับ 0.08%	กรรณพต และคณะ (2561)
	วิตามินซี			ค่า R เท่ากับ 0.63 ค่า RMSEP เท่ากับ 0.05 mg ค่า Bias เท่ากับ -0.01 mg	

ตารางที่ 4.1 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดผลไม้	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
พริก (บดละเอียด)	ปริมาณสารแคปไซซิน	FT-NIRS รุ่น MPA	800-2,500 nm	ค่า R^2 เท่ากับ 0.97 ค่า RMSEP เท่ากับ 0.54 ppm ค่า Bias เท่ากับ -0.01 ppm	รติพร และคณะ (2559)
พริกพันธุ์จินดา	สารคลอไพริฟอสตกค้าง	FT-NIRS รุ่น MPA	800-2,500 nm	ค่า R^2 เท่ากับ 0.94 ค่า RMSECV เท่ากับ 13.1 ppm ค่า Bias เท่ากับ -0.08 ppm	พรธเรศ และคณะ (2558)
พริกหวานสีเขียว (น้ำคั้น)	ปริมาณสารคลอร์ไพริฟอสตกค้าง ปริมาณสารไซเปอร์มีทรินตกค้าง	NIR Flex N-500	1,400-2,500 nm	ค่า R เท่ากับ 0.98 ค่า SEP เท่ากับ 82.64 ppm ค่า Bias เท่ากับ 0.05 ppm ค่า R เท่ากับ 0.98 ค่า SEP เท่ากับ 122.84 ppm ค่า Bias เท่ากับ 8.71 ppm	ปาริชาติ และคณะ (2554)
พลับ	ปริมาณความหวาน	FT-NIR Spectrometer	704-2,500 nm	ค่า R^2 เท่ากับ 0.76 ค่า SEP เท่ากับ 0.61% ค่า Bias เท่ากับ -0.01%	กรุณรัตน์ และคณะ (2559)
พลับพันธุ์ Xichu	ปริมาณแทนนิน (ประเมินความฝาดและความขม)	NIRS PureSpect FQA-NIR GUN	660-960 nm 600-1,100 nm	การใช้ FQA-NIR GUN สแกนที่บริเวณขั้วให้ค่าทำนายที่มีความความถูกต้อง 97.1% โดยมีค่า R เท่ากับ 0.95 ค่า RMSEP เท่ากับ 0.17% w/wค่า RPD เท่ากับ 3.25	Noypitak et al. (2015)

ตารางที่ 4.1 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดผลไม้	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
มะเขือเทศ	ปริมาณความหวาน	InfraAlyzer 500	1,100-2,500 nm	ค่า R เท่ากับ 0.86 ค่า SEP เท่ากับ 0.35% ค่า Bias เท่ากับ -0.01%	กฤตกร (2553)
	ปริมาณไลโคปีน			ค่า R เท่ากับ 0.78 ค่า SEP เท่ากับ 0.10 mg.100g^{-1} ค่า Bias เท่ากับ -0.02 mg.100g^{-1}	
	ปริมาณวิตามินซี	FQA-NIR GUN	700-1,100 nm	ค่า R เท่ากับ 0.80 ค่า SEP เท่ากับ 3.64 mg.100g^{-1} ค่า Bias เท่ากับ 0.23 mg.100g^{-1}	
	ปริมาณเบต้าแคโรทีน			ค่า R เท่ากับ 0.79 ค่า SEP เท่ากับ 0.02 mg.100g^{-1} ค่า Bias เท่ากับ 0.00 mg.100g^{-1}	
มะนาวพันธุ์แป้นและพันธุ์ไข่	คัดแยกพันธุ์มะนาว	NIRFlex N-500	1,000-2,500 nm	สามารถคัดแยกมะนาวพันธุ์แป้นและพันธุ์ไข่ได้อย่างถูกต้อง 100%	สนธิสุข (2558)
		FQA-NIR GUN	588-1,089 nm	สามารถคัดแยกมะนาวพันธุ์แป้นและพันธุ์ไข่ได้อย่างถูกต้อง 100%	
	ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (กรดซิตริก)	FQA-NIR GUN	588-1,089 nm	ค่า R เท่ากับ 0.82 ค่า RMSEP เท่ากับ 0.37%	

ตารางที่ 4.1 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดผลไม้	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
มะนาวพันธุ์แป้นและพันธุ์ไข่	ปริมาณความหวาน	Vis-NIRs โหมด reflectance	900-1,700 nm	ค่า R เท่ากับ 0.81 ค่า RMSEP เท่ากับ 0.24%	สนธิสุข (2558)
	ค่า pH	Vis-NIRs โหมด reflectance	900-1,700 nm	ค่า R เท่ากับ 0.95 ค่า RMSEP เท่ากับ 0.06	
มะพร้าวอ่อนน้ำหอม	ความบริบูรณ์ของผล (ประเมินจากความหนาของเนื้อผลบริเวณตาใหญ่)	FQA-NIR GUN	600-1,100 nm	สามารถคัดแยกมะพร้าวเจียทรงหัวแหลมที่มีเนื้อ 0-1 ชั้น ได้อย่างถูกต้อง 92% และผลที่มีเนื้อ 1.5-2.5 ชั้น ได้อย่างถูกต้อง 100% หรือมีความถูกต้องรวม 98.3%	พีรพงษ์ และคณะ (2554)
มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้	ไข่และหนอนของแมลงวันผลไม้	FQA-NIR GUN	700-1,100 nm	คัดแยกมะม่วงที่มีการปนเปื้อนไข่และหนอนแมลงวันผลไม้หลังการวางไข่ 48 ชั่วโมง ได้อย่างถูกต้อง 96 และ 98% ในผลมะม่วงดิบและสุก ตามลำดับ	วารุณี และคณะ (2551)
	อาการสะท้านหนาว (chilling injury) (ประเมินจากปริมาณความชื้นของเนื้อมะม่วง)	NIRSystem 6500	700-1,100 nm	ค่า R^2 เท่ากับ 0.85 ค่า RMSECV เท่ากับ 0.53% ค่า RMSEP เท่ากับ 0.72%	ระจิตรและปาริชาติ (2554)

ตารางที่ 4.1 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดผลไม้	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา

มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้	คัดแยกผลที่เกิดโรคแอนแทรคโนส	HandySpec Field 1000	780-1,100 nm	การสร้างสมการจากเทคนิค PLS-DA สามารถทำนายจุดสีดำบนผลมะม่วงที่ไม่เกิดแอนแทรคโนสได้ถูกต้อง 100% และจุดที่เป็นแอนแทรคโนสได้ถูกต้อง 87.50%	สาวิตรี (2556)
	ปริมาณความหวาน	NIRS 6500	700-1,100 nm	ค่า R^2 เท่ากับ 0.88 โดยมีความถูกต้องในการทำนายค่า 99%	Watanawan et al. (2014)
มะยงชิด	ปริมาณความหวาน	Mobile-NIR รุ่น HKN Engineering	571-1,031 nm	ค่า R^2 เท่ากับ 0.92 ค่า SEP เท่ากับ 0.49%	ธีรวัต และคณะ (2561)
มะละกอพันธุ์แขกดำ	ปริมาณความหวาน	FQA-NIR GUN	600-1,050 nm	ค่า R เท่ากับ 0.87 ค่า SEP เท่ากับ 0.80% ค่า Bias เท่ากับ 0.06%	รณฤทธิ์ และคณะ (2554)
	ค่าวัดสีเนื้อ a*			ค่า R เท่ากับ 0.80 ค่า SEP เท่ากับ 3.31 ค่า Bias เท่ากับ 0.03	
มะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย	ปริมาณวิตามินซี	FQA-NIR GUN	700-1,050 nm	ค่า R เท่ากับ 0.93 ค่า SEP เท่ากับ 0.78 mg.100 ml^{-1} ค่า Bias เท่ากับ -0.03 mg.100 ml^{-1}	พีรพงษ์ และคณะ (2554)
	ปริมาณความหวาน	FQA-NIR GUN	700-1,150 nm	ค่า R เท่ากับ 0.94 ค่า SEP เท่ากับ 0.90% ค่า Bias เท่ากับ 0.04%	สุพรพรรณ และคณะ (2554)

ตารางที่ 4.1 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดผลไม้	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
มังคุด	ปริมาณความหวาน	SW-NIRS	665-955 nm	ค่า R เท่ากับ 0.90 ค่า SEP เท่ากับ 0.71%	สนธิสุข และคณะ(2551)
	คัดแยกอาการเนื้อแก้วโดยใช้ค่าความถ่วงจำเพาะ	FQA-NIR GUN	700-1,100 nm	วิเคราะห์โดยใช้ตัวแปรจำแนกกลุ่มด้วยความยาวคลื่นที่เลือกมาจากการทำ PLS-DA ร่วมกับค่าความถ่วงจำเพาะ ให้ผลการจำแนกที่ดีที่สุด 84.8%	สิรินาฏ และคณะ (2553)
	คัดแยกอาการเนื้อแก้วและยางไหล	NIRS ของ SAIKA Technological Institute Foundation	700-955 nm	สามารถคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วได้ถูกต้อง 88% และคัดแยกผลที่เป็นยางไหลได้ถูกต้อง 76%	วารุณี และคณะ (2553)
ลองกองพันธุ์ตันหยง	ปริมาณความหวาน	NIRS ระบบส่องทะลุผ่าน ของ SAIKA Technological Institute Foundation	665-955 nm	ค่า R เท่ากับ 0.90 ค่า SEP เท่ากับ 0.60% ค่า Bias เท่ากับ 0.11%	อาทิตย์ และคณะ (2553)
		NIRS ระบบสะท้อนกลับแบบพกพา	600-1,100 nm	ค่า R เท่ากับ 0.80 ค่า SEP เท่ากับ 0.81% ค่า Bias เท่ากับ 0.12%	

ตารางที่ 4.1 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดผลไม้	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
ลำไยพันธุ์เบี้ยวเขียว	ปริมาณความหวาน	FQA-NIR GUN	600-1,100 nm	ค่า R เท่ากับ 0.80 ค่า SEP เท่ากับ 1.15% ค่า Bias เท่ากับ -0.24%	อาทิตย์ และคณะ (2554)
		NIRS ของ SAIKA Technological Institute Foundation	665-955 nm	ค่า R เท่ากับ 0.91 ค่า SEP เท่ากับ 0.78% ค่า Bias เท่ากับ -0.18%	
	ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ตกค้างที่เปลือกลำไย	NIRS วัดแบบการสะท้อนกลับ	800-2,200 nm	ค่า R เท่ากับ 0.84 ค่า RMSECV เท่ากับ 629.44 ppm ค่า Bias เท่ากับ 11.47 ppm	ปิยาภรณ์ และคณะ (2559)
	ปริมาณ SO_2 ตกค้างในเนื้อลำไย			ค่า R เท่ากับ 0.75 ค่า RMSECV เท่ากับ 315.52 ppm ค่า Bias เท่ากับ 6.75 ppm	
ส้ม (ธนาธรนัมเบอร์วัน สายน้ำผึ้ง เขียวหวาน โชกุน และฟรีมองต์)	ปริมาณความหวาน	NIRS PureSpect	643-970 nm	ค่า R เท่ากับ 0.94 ค่า RMSEP เท่ากับ 0.65%	ศุมาพร และคณะ (2552)
	ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (กรดซิตริก)			ค่า R เท่ากับ 0.72 ค่า RMSEP เท่ากับ 0.13%	
ส้มพันธุ์สายน้ำผึ้ง	อาการฟ่ามของผล (ประเมินจากปริมาณความชื้น)	NIRSystem 6500	700-1,100 nm	ค่า R เท่ากับ 0.87 ค่า RMSECV เท่ากับ 1.67% ค่า Bias เท่ากับ 0.004%	กัมพล และคณะ (2560)

ตารางที่ 4.1 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดผลไม้	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
สับปะรด	คัดแยกอาการไส้สีน้ำตาล	NIR Spectrometer ระบบส่องทะลุผ่าน	670-950 nm	การวัดสเปคตรัมที่ตำแหน่งขั้วผล และสร้างแบบจำลองการคัดแยก ด้วยวิธี PCA ให้ผลการคัดแยก สับปะรดไส้สีน้ำตาลที่ดีที่สุดด้วย ความถูกต้อง 99.33%	รณฤทธิ์ และคณะ (2556)
สับปะรดพันธุ์ภูแล	คัดแยกอาการไส้สีน้ำตาล (ประเมินจากเปอร์เซ็นต์การ รั่วไหลของสารอีเล็กโตรไลต์)	NIRSystem 6500	700-1,100 nm	ค่า R เท่ากับ 0.83 ค่า SEP เท่ากับ 7.62% ค่า Bias เท่ากับ -0.20%	ณัชชา และคณะ (2555)
สาลี่พันธุ์ SH-078	คัดแยกผลที่มีความผิดปกติไส้ฉ่ำน้ำ	PureSpect	700-850 nm	สามารถตรวจสอบและคัดแยกผล ที่มีความผิดปกติไส้ฉ่ำน้ำ โดยใช้ แบบจำลอง PCA ได้ถูกต้อง 95%	รณฤทธิ์ และคณะ (2553)
เสาวรสสีม่วง	ปริมาณความหวาน	NIRSystem 6500	700-1,100 nm	ค่า R เท่ากับ 0.83 ค่า SEP เท่ากับ 0.29% ค่า Bias เท่ากับ 0.07%	พิมพ์ใจ และคณะ (2559)
แอปเปิ้ล	ปริมาณความหวาน	FT-NIR Spectrometer รุ่น Matrix 1	704-2,500 nm	ค่า R^2 เท่ากับ 0.83 ค่า SEP เท่ากับ 0.34% ค่า Bias เท่ากับ -0.04%	นฤทธิ์ และคณะ (2559)

การประยุกต์ใช้งาน NIRS ในงานพืชไร่

การใช้ประโยชน์ของเทคนิค NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพพืชไร่ของประเทศไทย มีการทำงานวิจัยโดยนำ NIRS มาใช้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี คุณภาพทางโภชนาการ การตรวจวิเคราะห์สารตกค้างและการปนเปื้อนของสารพิษในผลิตผล เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพพืชไร่ชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย

ชนิดพืช	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
ข้าว	- คุณภาพการสีข้าว	- NIR Infra scan: Bruin instrument	- 1400-2600		- ใจทิพย์ และคณะ (2559)
	- ปริมาณไนโตรเจน		- 700-1075		- Setia et al. (2016)
	- ความชื้น	- NIRSystems 6500	- 1400-1900	- SEP=0.14 R=0.93	- ปาริชาติและคณะ (2549)
	- Resistant Starch				- Luo et al. (2016)
	- นน.เมล็ด,อมิโลส และนน.ข้าวกล้อง		- 1100-2500		- Wu and Shi (2004)
	- ปริมาณโปรตีน	- NIRSystems 6500	- 1100-2500	- SEP=2.52 R=0.95	- ศิราพร และคณะ (2550)
	- การปน	- NIRSystems 6500	- 1100-2500		- ศศิวิมล และคณะ (2553)
	- *Aspergillus flavus*	- NIRSystems 6500	- 1100-2500	- SEP=4.18 R=0.82	- ร่งนภา และคณะ (2554)
ธัญพืช	ความชื้น, ผลผลิต และไนโตรเจน	NIR spectroscopy for online	1000		Cozzolino et al. (2015)
ข้าวบาร์เลย์	เชื้อ Fusarium	AvaSpec-NIR256-2.2-TEC	1175-2170		Lim, Jong Guk, et al. (2017)
ข้าวสาลี	- โปรตีน	- AvaSpec-ULS2048X16 and AvaSpec-ULS2048XL-EVO	800-1100		
	- wet gluten			- SEP=1.149 R=0.95	-Dandan et al. (2016)

ตารางที่ 4.2 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพพืชไร่ชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดพืช	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
มันสำปะหลัง	- แคโรทีนอยด์ - น้ำหนักแห้ง	- FOSS 6500 - portable Vis/NIRS system	- 400-2500		- Belalcazar et al. (2016) - Ugochukwu et al. (2017)
ทานตะวัน	- Oil Content and Fatty Acid - Tocopherol and Sterol	- nuclear magnetic resonance (NMR) on an Oxford 4000 analyzer - NIR Systems model 6500 - FOSS NIR System 6500	 - 400-2500 - 400-2500		- Perez-Vich et al. (1998) - Gotor et al. (2007)
ถั่วเหลือง	- ความชื้น, ไขมัน, โปรตีน - ความชื้น	- FT-NIRS - NIRSystems 6500	 - 1100 - 2500	 - SEP = 0.36 R= 0.94	- Zhenyin et al. (2018) - วรินทร และคณะ (2551)
อ้อย	- ความหวาน - ccs - ความหวาน - ไข	- Near infrared reflectance spectroscopy - NIR Mobile - portable Vis/SWNIR	 - 570-1031	- R=0.97 - R=0.97	- Berding et al. (1991) - อนิรุธ และคณะ (2559) - Arthit etal. (2019)
ข้าวโพดหวาน	- เนื้อสัมผัส - ของแข็งที่ละลายน้ำได้ - ความชื้น - แป้ง	- NIR spectrometer แบบพกพา - FT-NIR spectrometer - NIR hyperspectral imaging	- 588-1089 - 1000-2500 - 910-1700	R =0.85 R = 0.91 R = 0.65 R = 0.89	สนธิสุข และ ภานุวัฒน์, (2559)

ตารางที่ 4.2 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพพืชไร่ชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดพืช	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
ข้าวโพด	- ความชื้น - อะฟลาทอกซิน บี 1	- ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer (FT-NIR), รุ่น MPA, Bruker Optics, ๖ (Germany)	- 4000-12500 cm^{-1}	SEP = 0.64 R= 0.96	- รติพร (2561)
	- ปริมาณโปรตีน		- 400-2500		- สุทธิพร และคณะ (มปป.)
	- ความผิดปกติของเมล็ด	- FT- near infrared (NIR) spectroscopy	- 4000-12500 cm^{-1}	- ทำนายกลุ่มความผิดปกติจากเชื้อราถูกต้อง 89.19% กลุ่มความผิดปกติกายภาพถูกต้อง 76.98% และกลุ่มเมล็ดดีถูกต้อง 76%	- ยุรนันท์ และคณะ (2557)
ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	- *Aspergillus flavus*	- NIRSystems 6500	- 400-2500		- ธวัชชัย และคณะ (2554)
ข้าวโพดข้าวเหนียว	- โปรตีน	- NIRSystems 6500		- SEP= 0.6168 R= 0.94	- พจนา และคณะ (2556)
	- ปริมาณน้ำตาล	- NIRSystems 6500		- SEP= 6.098 R^2= 0.98	- บุลผา และคณะ (2556)

ตารางที่ 4.2 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพพืชไร่ชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดพืช	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
พริกไทย	- ความชื้น - อะฟลาทอกซิน บี 1	ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer (FT-NIR), รุ่น MPA, Bruker Optics, ๖ (Germany)	4000-12500cm^{-1}	SEP = 0.45 R= 0.97	รติพร (2561)
น้ำอ้อย	- **%brix** - **%pol**			- r2 = 0.988, SEP = 0.333 - r2 = 0.986, SEP = 0.283	R Kuswurjanto and Triantarti (2019)
ถั่วลิสง	- ความชื้น - อะฟลาทอกซิน บี 1 - อะฟลาทอกซิน บี 1 - น้ำมัน	- ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer (FT-NIR), รุ่น MPA, Bruker Optics, ๖ (Germany) - visible–near-infrared (Vis-NIR) spectroscopy	- 4000-12500 cm^{-1} - 400–2500 nm	-SEP = 1.10 R= 0.95 -SEP = 7.72	- รติพร (2561) - Tao et al. (2019) - Babankumar et al. (2015)

ตารางที่ 4.2 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพพืชไร่ชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย (ต่อ)

ชนิดพืช	คุณภาพที่ตรวจสอบ	เครื่องมือ NIRS ที่ใช้	ความยาวคลื่น	ผลลัพธ์	ที่มา
วานิลลา	สารให้กลิ่น	NIR Spectrometer แบบพกพา รุ่น FQA-NIRGUN	588-1100	SEP = 1.79 R= 0.94	พีรณัฐ และ คณะ (2556)
กาแฟ	- ความชื้น	- NIRSystems 6500	- 1100-2500	การทำนายเปอรเซ็นตความชื้นของกาแฟเมล็ดมีคาเฉลี่ยของผลตางระหวางคาที่ไดจากวิธีมาตรฐานกับคาที่ไดจากการวัดดวย NIR (bias) เทากับ 0.02%	- กุลริศา และคณะ (2556)
	- คุณภาพหลังการเก็บเกี่ยว	- NIRSystems 6500	- 1100-2500	- สามารถจำแนกสเปกตรัมออกเปน 3 กลุมตามระดับของเยอี่หุมเมล็ดที่ปนเปอนดวย PC1 และ PC2 คือ เมล็ดที่ไมมีเยื่อหุมเมล็ด (0% พื้นที่ผิว) เมล็ดที่มี เยื่อหุมตดิอยูปานกลาง (<50%พื้นที่ผิว) และเมล็ดที่มีเยื่อหุมตดิอยูมาก (> 50% พื้นที่ผิว)	- ณัฏฐวัฒน์ และคณะ (2562)

บทที่ 5
งานวิจัยเกี่ยวกับเทคนิค NIRS ในกรมวิชาการเกษตร

งานวิจัยของกรมวิชาการเกษตรในส่วนที่เกี่ยวกับเทคนิค NIRS มีทั้งในการตรวจสอบคุณภาพผักและผลไม้สด การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี การตรวจหาแมลงปนเปื้อน และการตรวจวิเคราะห์สารตกค้างในผลิตผลสด การตรวจสอบคุณภาพพืชไร่ วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี คุณภาพทางโภชนาการ การตรวจวิเคราะห์สารตกค้างและการปนเปื้อนของสารพิษในผลิตผล เป็นต้น (ตารางที่ 5.1 และ 5.2)

ตารางที่ 5.1 การใช้เทคนิค Near Infrared Spectroscopy ในพืชไร่

ชื่อผลงาน	พืช/ผลิตภัณฑ์	ค่าที่ตรวจสอบ	สมการ			ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
			R	SEC	SEP	
การประเมินสารสำคัญในผลิตผลเกษตร โดยใช้เทคนิคการไม่ทำลายตัวอย่างด้วย Near Infrared Spectroscopy	กาแฟคั่วบด	สารให้กลิ่น 2-methylfuran	0.85	-	16.67	800-2,500
		สารให้กลิ่น 2-butanone	0.85	-	32.23	800-2,500
	ข้าวกล้องงอก	กรดแกมมาอะมิโนบิวทิริก (กาบา)	0.93	1.56	2.42	800-2,500
	แป้งฟลาวข้าวกล้องงอก		0.91	2.58	3.34	800-2,500
	ถั่วเหลือง		0.90	2.53	2.80	800-2,500
	ถั่วเหลืองเพาะงอก		0.90	42.84	55.17	800-2,500
	แป้งฟลาวถั่วเหลือง		0.92	1.61	1.91	800-2,500
	แป้งฟลาวถั่วเหลืองเพาะงอก		0.91	29.91	47.31	800-2,500
	ถั่วเขียว		0.90	1.95	2.02	800-2,500
	ถั่วเขียวเพาะงอก		0.90	20.96	28.13	800-2,500
	แป้งฟลาวถั่วเขียว		0.93	1.61	1.75	800-2,500
	แป้งฟลาวถั่วเขียวเพาะงอก		0.90	17.36	22.15	800-2,500

ตารางที่ 5.1 การใช้เทคนิค Near Infrared Spectroscopy ในพืชไร่ (ต่อ)

ชื่อผลงาน	พืช/ผลิตภัณฑ์	ค่าที่ตรวจสอบ	สมการ			ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
			R	SEC	SEP	
การประเมินคุณภาพแป้งในพืชไร่ชนิดต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคการไม่ทำลายตัวอย่างด้วย Near Infrared Spectroscopy	เมล็ดถั่วเหลือง	โปรตีน	0.85	0.90	1.13	800-2,500
	แป้งฟลาวถั่วเหลือง		0.95	0.58	0.71	800-2,500
	เมล็ดถั่วเขียว		0.85	0.46	0.61	800-2,500
	แป้งฟลาวถั่วเขียว		0.85	0.46	0.65	800-2,500
	เมล็ดถั่วเหลือง	คาร์โบไฮเดรต	0.86	1.56	2.14	800-2,500
	แป้งฟลาวถั่วเหลือง		0.86	1.39	1.97	800-2,500
	เมล็ดถั่วเขียว		0.88	1.67	1.80	800-2,500
	แป้งฟลาวถั่วเขียว		0.89	1.54	1.84	800-2,500
	เมล็ดถั่วเหลือง	ค่าความหนืดสูงสุด	0.85	1.93	2.64	800-2,500
	แป้งฟลาวถั่วเหลือง		0.90	2.95	3.90	800-2,500
	แป้งฟลาวกับเมล็ดถั่วเขียว		0.92	3.50	4.44	800-2,500
	แป้งสตาร์ชกับเมล็ดถั่วเขียว		0.92	17.65	23.42	800-2,500
	แป้งฟลาวถั่วเขียว		0.91	4.02	5.04	800-2,500
	แป้งสตาร์ชถั่วเขียว		0.95	20.83	22.67	800-2,500
	เมล็ดถั่วเหลือง	ค่าความหนืดต่ำสุด	0.91	2.62	3.69	800-2,500
	แป้งฟลาวถั่วเหลือง		0.91	2.41	2.95	800-2,500
	แป้งฟลาวกับเมล็ดถั่วเขียว		0.86	2.90	3.52	800-2,500
	แป้งสตาร์ชกับเมล็ดถั่วเขียว		0.91	4.96	7.96	800-2,500

ตารางที่ 5.1 การใช้เทคนิค Near Infrared Spectroscopy ในพืชไร่ (ต่อ)

ชื่อผลงาน	พืช/ผลิตภัณฑ์	ค่าที่ตรวจสอบ	สมการ			ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
			R	SEC	SEP	
	แป้งฟลาวถั่วเขียว		0.96	1.41	1.74	800-2,500
	แป้งสตาร์ชถั่วเขียว		0.88	7.38	9.65	800-2,500
	เมล็ดถั่วเหลือง	ค่า set back	0.93	2.25	3.18	800-2,500
	แป้งฟลาวถั่วเหลือง		0.90	2.62	3.11	800-2,500
	แป้งฟลาวกับเมล็ดถั่วเขียว		0.96	2.20	2.20	800-2,500
	แป้งสตาร์ชกับเมล็ดถั่วเขียว		0.95	10.85	11.92	800-2,500
	แป้งฟลาวถั่วเขียว		0.95	2.09	2.68	800-2,500
	แป้งสตาร์ชถั่วเขียว		0.92	14.05	17.88	800-2,500
	เมล็ดพืชไร่	ซูโครส	0.96	0.17	0.21	800-2,500
	แป้งฟลาวพืชไร่		0.90	0.24	0.26	800-2,500
	เมล็ดพืชไร่	กลูโคส	0.96	0.14	0.16	800-2,500
	แป้งฟลาวพืชไร่		0.94	0.15	0.16	800-2,500
	เมล็ดพืชไร่	ฟรุคโตส	0.86	0.28	0.31	800-2,500
	แป้งฟลาวพืชไร่		0.96	0.17	0.19	800-2,500
	เมล็ดพืชไร่	น้ำตาลทั้งหมด	0.98	0.28	0.34	800-2,500
	แป้งฟลาวพืชไร่		0.98	0.28	0.31	800-2,500
	เมล็ดข้าวโพด	ลูทีน	0.91	0.28	0.33	800-2,500
	แป้งฟลาวข้าวโพด		0.90	0.35	0.39	800-2,500

ตารางที่ 5.1 การใช้เทคนิค Near Infrared Spectroscopy ในพืชไร่ (ต่อ)

ชื่อผลงาน	พืช/ผลิตภัณฑ์	ค่าที่ตรวจสอบ	สมการ			ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
			R	SEC	SEP	
	เมล็ดข้าวโพด	ซีแซนทีน	0.90	0.06	0.07	800-2,500
	แป้งฟลาวข้าวโพด		0.92	0.06	0.07	800-2,500
	เมล็ดข้าวโพด	เบต้า คริพโตแซนทีน	0.93	0.01	0.01	800-2,500
	แป้งฟลาวข้าวโพด		0.91	0.01	0.01	800-2,500
	เมล็ดข้าวโพด	และเบต้า แคโรทีน	0.90	0.23	0.32	800-2,500
	แป้งฟลาวข้าวโพด		0.90	0.36	0.53	800-2,500
การประเมินปริมาณสารพิษแอฟลาทอกซินในพริกป่นโดยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy	พริกป่น	สารพิษแอฟลาทอกซิน บี 1	0.87	1.68	2.40	400-2,500
การประเมินปริมาณความหนืดในมันสำปะหลังด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy	มันสำปะหลัง	ความหนืดสูงสุด	0.95	30.68	34.08	800-2,500
		ค่า break down	0.91	2.95	14.06	800-2,500
		ค่า set back	0.92	38.45	40.98	800-2,500
การประเมินปริมาณอมิโลสในมันสำปะหลังด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy	มันสำปะหลัง	อมิโลส	0.94	0.89	0.94	800-2,500

ตารางที่ 5.1 การใช้เทคนิค Near Infrared Spectroscopy ในพืชไร่ (ต่อ)

ชื่อผลงาน	พืช/ผลิตภัณฑ์	ค่าที่ตรวจสอบ	สมการ			ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
			R	SEC	SEP	
การวิเคราะห์ปริมาณสารสำคัญในใบชาเขียว โดยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy	ชาเขียว	กรดแกลลิค	0.888	1.417	1.518	800-2,500
		แกลโลคาเทซิน	0.918	0.918	1.630	800-2,500
		อิพิแกลโลคาเทซิน	0.938	0.938	8.099	800-2,500
		คาเทซิน	0.939	0.939	1.570	800-2,500
		คาเฟอีน	0.938	0.938	2.907	800-2,500
		อิพิคาเทซิน	0.952	0.952	2.477	800-2,500
		อิพิแกลโลคาเทซิน 3-แกลเลต	0.954	0.954	8.224	800-2,500
		แกลโลคาเทซินแกลเลต	0.863	0.863	1.375	800-2,500
		อิพิคาเทซิน 3-แกลเลต	0.976	0.976	3.997	800-2,500
		คาเทซินแกลแลต	0.866	0.866	1.490	800-2,500
การประเมินคุณภาพพืชตระกูลถั่วโดยใช้เทคนิคการไม่ทำลายตัวอย่างด้วย Near Infrared Spectroscopy	ถั่ว	ไขมัน	0.95	12.09	4.41	1000-2500
		เถ้า	0.96	0.84	0.28	1000-2500
		ความชื้น	0.94	2.66	1.03	1000-2500
		อมิโลส	0.96	1.73	2.61	1000-2500
		โปรตีน	0.98	1.36	1.64	1000-2500

ตารางที่ 5.1 การใช้เทคนิค Near Infrared Spectroscopy ในพืชไร่ (ต่อ)

ชื่อผลงาน	พืช/ผลิตภัณฑ์	ค่าที่ตรวจสอบ	สมการ			ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
			R	SEC	SEP	
การประเมิน ความชื้น ปริมาณโปรตีน ความหนืด อมิโลส น้ำตาล คุณภาพน้ำมัน ปริมาณสาร แอฟลาทอกซิน ในเมล็ดและแป้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy	เมล็ดข้าวโพด	ความชื้น	2.06	2.06	2.13	400-2,500
		โปรตีน	0.87	0.26	0.34	400-2,500
		อมิโลส	0.93	0.70	0.98	400-2,500
		ความหนืดสูงสุด	0.83	27.04	35.02	800-2,500
		กลูโคส	0.85	0.04	0.05	400-2,500
		ซูโครส	0.84	0.03	0.04	400-2,500
		ความเป็นกรด	0.92	17.42	22.82	800-2,500
		เพอร์ออกไซด์	0.92	3.37	4.32	400-2,500
		แอฟลาทอกซิน	0.87	37.33	41.34	400-2,500
	แป้งฟลาวข้าวโพด	ความชื้น	0.97	0.97	0.97	400-2,500
		โปรตีน	0.28	0.28	0.28	800-2,500
		อมิโลส	0.34	0.34	0.34	800-2,500
		ความหนืดสูงสุด	0.94	0.94	0.94	400-2,500
		กลูโคส	0.30	0.30	0.30	800-2,500

ตารางที่ 5.1 การใช้เทคนิค Near Infrared Spectroscopy ในพืชไร่ (ต่อ)

ชื่อผลงาน	พืช/ผลิตภัณฑ์	ค่าที่ตรวจสอบ	สมการ			ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
			R	SEC	SEP	
		ซูโครส	0.91	0.91	0.91	400-2,500
		ความเป็นกรด	0.02	0.02	0.02	400-2,500
		เพอร์ออกไซด์	0.03	0.03	0.03	1,000-2,500
		แอฟลาทอกซิน	0.93	0.93	0.93	400-2,500
การประเมินความชื้นและปริมาณแป้งในมันสำปะหลังด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy	มันสำปะหลัง	ความชื้น	0.87	1.35	1.58	800-2,000
		แป้ง	0.87	1.95	2.33	400-2,500
การประเมินปริมาณโปรตีนในแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี	แป้งมันสำปะหลัง	ปริมาณโปรตีน	0.98	0.13	0.15	800-2,500
การประเมินเปอร์เซ็นต์ความงอกของเมล็ดข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy	ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	เปอร์เซ็นต์ความงอก	0.96	2.63	3.80	400-2,500

ตารางที่ 5.2 การใช้เทคนิค Near Infrared Spectroscopy ในพืชสวน

ชื่อผลงาน	พืช/ผลิตภัณฑ์	ค่าที่ตรวจสอบ	สมการ			ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
			R	SEC	SEP	
การตรวจสอบการปนเปื้อนของแมลงวันผลไม้ (*Bactrocera* spp.) ในชมพู่ทับทิมจันทร์ โดยใช้เทคนิค NIR Spectroscopy	ชมพู่ทับทิมจันทร์	แมลงวันผลไม้	0.57	32.84	33.73	700-1,100
การพัฒนาการใช้ Near Infrared Spectroscopy (NIR) ในการตรวจสอบคุณภาพผลิตผลระหว่างการเก็บรักษา	มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เบอร์ 4	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้	0.95	0.81	0.75	700-1,100
		ปริมาณกรด	0.98	1.42	1.43	700-1,100
	มะม่วงพันธุ์มหาชนก	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้	0.95	1.01	0.98	700-1,100
		ปริมาณกรด	0.99	1.38	1.35	700-1,100
		น้ำหนักแห้ง	0.90	0.89	1.06	700-1,100
	มะม่วงพันธุ์โชคอนันต์	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้	0.98	1.0		700-1,100
		ปริมาณกรด	0.92	1.21		700-1,100
		เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง	0.92	0.99		700-1,100
	ฝรั่งพันธุ์กิมจู	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้	0.57	0.54	0.49	700-1,100
		ปริมาณกรด	0.56	1.09	1.12	700-1,100
		น้ำหนักแห้ง	0.55	0.57	0.53	700-1,100
	ฝรั่งพันธุ์แป้นสีทอง	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้	0.73	0.83	0.75	700-1,100
		น้ำหนักแห้ง	0.75	0.78	0.78	700-1,100

ตารางที่ 5.2 การใช้เทคนิค Near Infrared Spectroscopy ในพืชสวน (ต่อ)

ชื่อผลงาน	พืช/ผลิตภัณฑ์	ค่าที่ตรวจสอบ	สมการ			ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
			R	SEC	SEP	
การตรวจสอบคุณภาพมะม่วงด้วยระบบ Near Infrared Spectroscopy	มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เบอร์ 4	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้	0.96	1.02	1.02	700-1,100
		ปริมาณกรด	0.98	1.41	1.71	700-1,100
		น้ำหนักแห้ง	0.91	0.94	0.90	700-1,100
		ความแน่นเนื้อ	0.93	0.43	0.52	700-1,100
	มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้	0.97	1.12	1.08	700-1,100
		ปริมาณกรด	0.95	1.96	1.78	700-1,100
		น้ำหนักแห้ง	0.91	1.04	0.96	700-1,100
		ความแน่นเนื้อ	0.86	0.55	0.52	700-1,100
การตรวจสอบคุณภาพสับปะรดด้วยระบบ Near Infrared Spectroscopy	สับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย	ปริมาณความหวาน	0.89	0.97	1.54	700-1,100
		ปริมาณกรด	0.85	0.08	0.12	700-1,100
		ปริมาณวิตามินซี	0.75	1.72	1.95	700-1,100
	สับปะรดพันธุ์ตราดสีทอง	ปริมาณความหวาน	0.87	0.67	0.66	700-1,100
		ปริมาณกรด	0.88	0.12	0.16	700-1,100
		ปริมาณวิตามินซี	0.87	2.61	4.42	700-1,100
การตรวจสอบคุณภาพเงาะด้วยระบบ Near Infrared Spectroscopy	เงาะ	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้	0.85	0.93	0.90	700-1,100
		ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้	0.64	0.04	0.03	700-1,100

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2563. เครื่องสเปคโตรมิเตอร์แบบพกพา (FQA - NIR GUN)

กฤตกร ทรัพย์เจริญ. 2553. การประเมินคุณภาพของมะเขือเทศเกษตรอินทรีย์ด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการอาหาร) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. 183 หน้า.

กรรณพต แก้วสอน มาโนช รัตนคุณ ธิดารัตน์ รักษากิจ และธนิน พันธ์พิจิตร. 2561. การวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และวิตามินซีผลฝรั่งหนองข้างคอก (กลมสาลี่) ด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกป. *ว. วิทย. กษ.* 49: 4 (พิเศษ): 187-190.

กรรณพต แก้วสอน ศุภสิทธิ์ ประเสริฐลาภ และวรินธร พูลศรี. 2561. ความเป็นไปได้ของการตรวจสอบเชื้อราในขิงด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. *ว. วิทย. กษ.* 49: 4 (พิเศษ): 183-186.

กรรณิการ์ เพ็งคุ้ม และณัฐวัฒน์ แย้มยิ้ม. 2560. การตรวจสอบการปนเปื้อนของแมลงวันผลไม้ (*Bactrocera* spp.) ในชมพู่ทับทิมจันทร์ โดยใช้เทคนิค NIR Spectroscopy. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2560. กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

กรุณรัตน์ สกุลนามรัตน์ ปิยะมาศ จานนอก สุภลักษณ์ คุณเลิศ สุวนันท์ มิฆเนตร ดารารัตน์ วงษ์มุข ศิริลักษณ์ สุดเวียง และกิตติพันธุ์ คำศร. 2559. สมการทำนายความหวานของลูกพลับด้วยเทคนิค NIR Spectroscopy. หน้า A-250–A-256. ใน: *การประชุมวิชาการระดับชาติ “ราชมงคลสุรินทร์วิชาการ ครั้งที่ 8”*. 22-23 ธันวาคม 2559. ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์.

กัมพล วงษ์ซีวะสกุล วิบูลย์ ช่างเรือ ณัฏวัฒณ์ หมื่นมาณี และปาริชาติ เทียนจุมพล. 2560. ความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการตรวจสอบความฟ่ามของส้มสายน้ำผึ้ง. *ว. วิทย. กษ.* 48: 3 (พิเศษ): 295-298.

กุลริศา เกตุนาค ปาริชาติ เทียนจุมพล และ วิบูลย ชางเรือ. 2556. ความแมนยำในการตรวจวัดปริมาณความชื้นในกาแฟเมล็ดพันธุอะราบิกาดวย NIRS. ว. วิทย. กษ. 44: 3 (พิเศษ): 462-465.

จารุรัตน์ พุ่มประเสริฐ และจารุวรรณ บางแวก. 2560. การประเมินปริมาณสารพิษแอฟลาทอกซินในพริกป่นโดยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2560. กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

ณัชชา ชัยพันธ์วิริยาพร ดนัย บุณยเกียรติ พิเชษฐ์ น้อยมณี และปาริชาติ เทียนจุมพล. 2555. การตรวจสอบอาการไส้สีน้ำตาลในผลสับปะรดด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. *ว. วิทย. กษ.* 43: 3 (พิเศษ): 477-480.

ณัฏฐวัฒณ หมื่นมาณี ศุภลักษณ ชิตวรกุล สุรัสวดี กิจบุญชู และ ปาริชาติ เทียนจุมพล. 2562. การตรวจสอบคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของเมล็ดกาแฟโดยใชเนียรอินฟราเรดสเปกโทรสโกป. ว. วิทย. กษ. 50: 3 (พิเศษ): 207-210.

ดลพร ชนานิรมิตผล รณฤทธิ์ ฤทธิรณ และเกรียงศักดิ์ ไทยพงษ์. 2554. ระบบการวิเคราะห์ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ (สารประกอบฟีนอล) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของผลฝรั่งอย่างแม่นยำด้วยเทคนิค NIRs. *ว. วิทย. กษ.* 42: 1 (พิเศษ): 307-310.

ดนัย บุณยเกียรติ ปาริชาติ เทียนจุมพล ศิลา กิตติวัชนะ ณัฐวัฒณ์ หมื่นมาณี และพลกฤษณ์ มณีวระ. 2563. การใช้ NIR สเปกโทรสโกปีในการประเมินคุณภาพผลิตผลเกษตร. ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว (Postharvest Technology Innovation Center) คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 159 หน้า

ธวัชชัย เพชรแก้ว รุ่งนภา ไกลถิ่น ปาริชาติ เทียนจุมพล เกวลิน คุณาศักดากุล สงวนศักดิ์ ธนาพนพูนพงษ์ และ สุชาดา เวียนศิลป์. 2554. การตรวจสอบความแตกต่างของปริมาณเมล็ดข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ถูกเชื้อ Aspergillus flavus เข้าทำลายด้วยเทคนิค VIS/NIR spectroscopy. *ว. วิทย. กษ.* 42:1 (พิเศษ): 357-360.

ธีระวัฒน์ เรือนคำ รณฤทธิ์ ฤทธิรณ และกนกวรรณ เสรีภาพ. 2561. การประเมินปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และความแน่นเนื้อแบบไม่ทำลายในผลแคนตาลูปโดยใช้สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. *ว. วิทย. กษ.* 49: 4 (พิเศษ): 179-182.

ธีรวัต เหล่าลาภะ ธานินทร์ บุญบำรุง สุจินต์ อภัยโส ขวัญตรี แสงประชาธนารักษ์ และเจษฎา โพธิ์สม. 2561. การวัดคุณภาพของมะยงชิดแบบไม่ทำลายด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดแบบพกพา. หน้า 426-431. ใน: *การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติครั้งที่ 19 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 11.* วันที่ 26-27 เมษายน 2561. ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติจุฬาภรณ์ และวรวนา คณะสัตวแพทย์ศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์.

นฤทธิ์ วาดเขียน สุขวิศาล ดวง วีรภัทร เป็นสุข สหวัช วงษ์คะสุ่ม สุภกิจ คิดชนะ และญาณ ยูฮาน. 2559. ประสิทธิภาพNear Infrared Spectroscopy ในการทานายความหวานของแอปเปิ้ล. หน้า A-291-A-296. ใน: *การประชุมวิชาการระดับชาติ "ราชมงคลสุรินทร์วิชาการ ครั้งที่ 8"*. 22-23 ธันวาคม 2559. ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์. จังหวัดสุรินทร์.

นฤเทพ เวชภิบาล และจารุวรรณ บางแวก. 2558. การวิเคราะห์ปริมาณสารสำคัญในใบชาเขียว โดยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2558. กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

บุบผา คงสมัย พจนา สีมันตร พรศิริ เลี้ยงสกุล และ วัลยา เชียงของ. 2556. การใชเนียรอินฟราเรดสเปคโตรสโคปทำนายปริมาณของน้ำตาลในเมล็ดขาวโพดขาวเหนียว. ว. วิทย. กษ. 44: 3 (พิเศษ): 414-417.

เบญจมาศ รัตนชินกร ศิรกานต์ ศรีธัญรัตน์ ปรางค์ทอง กวานห้อง และคมจันทร์ สรงจันทร์. 2558. การพัฒนาการใช้ Near Infrared Spectroscopy (NIR) ในการตรวจสอบคุณภาพผลิตผลระหว่างการเก็บรักษา. รายงานโครงการวิจัยการจัดการคุณภาพผลิตผลสดหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อการส่งออก. กรมวิชาการเกษตร.

เบญจมาศ รัตนชินกร ศิรกานต์ ศรีธัญรัตน์ ปรางค์ทอง กวานห้อง และคมจันทร์ สรงจันทร์. 2553. การตรวจสอบคุณภาพมะม่วงด้วยระบบ Near Infrared Spectroscopy. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2553. สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

ปรางค์ทอง กวานห้อง เบญจมาศ รัตนชินกร ศิรกานต์ ศรีธัญรัตน์ และคมจันทร์ สรงจันทร์. 2553. การตรวจสอบคุณภาพสับปะรดด้วยระบบ Near Infrared Spectroscopy. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2553. สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

ปฏิมา บุตรชา และ อาทิติยา สุขสะเกษ. 2561. การใชเทคนิคเนียรอินฟราเรดสเปกโตรสโกปทำนายองคประกอบทางเคมีของหญ้ากินีสีมวงและหญ้ากินีมอมบาซา. 13 หน้า.

ปาริชาติ เทียนจุมพล พิเชษฐ์ น้อยมณี วรรณวรางค์ พัฒนะโพธิ์ สงวนศักดิ์ ธนาพรพูนพงษ์ และ วรินทร มณีวรรณ. 2554. การตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผักบางชนิดด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์. ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่. 45 หน้า.

ปาริชาติ เทียนจุมพล รณฤทธิ์ ฤทธิรณ สงวนศักดิ์ ธนาพรพูนพงษ์ และ สุชาดา เวียรศิลป์. 2549. การหาปริมาณความชื้นอย่างแม่นยำสูงในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. วารสารเกษตร 22(3): 213-222

ปิยาภรณ์ เชื่อมชัยตระกูล ศุมาพร เกษมสำราญ และสุมิตร เชื่อมชัยตระกูล. 2559. การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้อินฟราเรดย่านใกล้ตรวจสอบปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในผลลำไยสด. *ว. วิทย. กษ.* 47: 3 (พิเศษ). 107-110.

พจนา สีมันตร บุบผา คงสมัย พรศิริ เลี้ยงสกุล และ ชรินรัตน กาฬภักดี. 2556. การใชเนียรอินฟราเรดรีเฟลคแตนสเปคโตรสโคปทำนายองคประกอบของโปรตีนในขาวโพดขาวเหนียว. ว. วิทย. กษ. 44: 3 (พิเศษ): 410-413.

พรธเรศ ดวงสุวรรณ เอลียาห์ เลิศกุศล นิโลบล โกมลสิงห์ ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ และบุศรากรณ์ มหาโยธี. 2558. การพัฒนาวิธีการตรวจสอบสารคลอไพริฟอสตกค้างในพริกแบบรวดเร็วด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. *ว. วิทย. กษ.* 46: 3 (พิเศษ): 351-354.

พัทรียา โกคะกุล. 2553. การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี NIR (Near Infrared) กับงานควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์สุขภาพ. *วารสารอาหารและยา*. 1: 14-18.

พิมพ์ใจ สีหะนาม พลกฤษณ์ มณีวระ คาซูฮิโร นากาโน และดนัย บุณยเกียรติ. 2559. การประเมินปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในผลเสาวรสด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. *วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์.* 3: 1 (ฉบับพิเศษ). M07/94-101.

พีรณัฐ ทวีชลพิสิฐ วรรณพร พงษ์อภัย รณฤทธิ์ ฤทธิรณ เฉลิมชัย วงษ์อารี ธิติมา วงษ์ชีรี และ กานดา เลิศลดาลักษณ์. 2556. การตรวจสอบปริมาณสารวานิลลินในฝักวานิลลาบ่มอย่างไม่ทา ลายด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. ว. วิทย์. กษ. 44(2) (พิเศษ): 281-284

พีรพงษ์ แสงวนางค์กูล กฤษณี เอี่ยมจัด รณฤทธิ์ ฤทธิรณ และเกรียงศักดิ์ ไทยพงษ์. 2554. การประเมินปริมาณวิตามินซีในผลมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลายแบบไม่ทำลายตัวอย่างด้วยเทคนิค NIRs. *ว. วิทย. กษ.* 42: 1 (พิเศษ): 75-78.

พีรพงษ์ แสงวนางค์กูล บุญญรัตน์ กมขุนทด ยุพิน อ่อนศิริ ศุทธหทัย โภชนากรณ์ และรณฤทธิ์ ฤทธิรณ. 2557. การประเมินปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของผลชมพู่พันธุ์ทับทิมจันท์ (*Syzygium samarangense* Merr. & L.M.Perry) แบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคสเปคโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. *ว. วิทย. กษ.* 45: 3 (พิเศษ): 333-336.

พีรพงษ์ แสงวนางค์กูล รณฤทธิ์ ฤทธิรณ ธีรนุต ร่มโพธิ์ภักดิ์ สมนึก ทองบ่อ ยุพิน อ่อนศิริ น้ำฝน สามสาลี และชัชญา เกตุเตียน. 2554. การตรวจสอบคุณภาพและความบริบูรณ์ของผลมะพร้าวอ่อนแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิค NIRs เพื่ออุตสาหกรรมการส่งออก. รายงานฉบับสมบูรณ์. ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา กรุงเทพฯ. 25 หน้า.

ภัควิไล ยอดทอง และ จารุวรรณ บางแวก. 2558. การประเมินคุณภาพพืชตระกูลถั่วโดยใช้เทคนิคการไม่ทำลายตัวอย่างด้วย. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2558. กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

ยุรนันท์ บรรทัดจันทน์ รณฤทธิ์ ฤทธิรณ เวรุกา มานะวิจิตวนิช สุรีพร ณรงค์วงศ์วัฒนา และศุทธหทัย โภชนากรณ์. 2557. การคัดแยกความผิดปกติของเมล็ดข้าวโพดโดยใช้เทคนิค Near Infrared (NIR) Spectroscopy. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 45 (3/1 พิเศษ): 293-296.

รติพร เอกตาแสง. 2561. การตรวจสอบปริมาณความชื้น และอะฟลาทอกซินบี 1 ใน เมล็ดข้าวโพด พริกไทย และถั่วลิสงด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร. 166 หน้า

รติพร เอกตาแสง จริยา เกวียนวงศ์ ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ และบุศรากรณ์ มหาโยธี. 2559. การตรวจสอบแคปไซซินในพริกแบบรวดเร็วด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. *ว. วิทย. กษ.* 47: 3 (พิเศษ): 273-276.

รณฤทธิ์ ฤทธิรณ ดุสิต ธนเพทาย สุรี พรณรงค์วงศ์วัฒนา พันธิภา สีดาว เพ็ญพิไล เพ็ญธิสาร และวิไลภรณ์ โหง้วสกุล. 2555. การสร้างเครื่อง Diode Array NIR Spectrometer สำหรับวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันและความชื้นในผลปาล์ม. *ว. วิทย. กษ.* 43: 3 (พิเศษ): 127-130.

รณฤทธิ์ ฤทธิรณ ธนากานต์ สะเคียน ปานตา อรรถกรวงศ์ สุรีพร ณรงค์วงศ์วัฒนา และดนัย บุณยเกียรต์. 2556. การคัดแยกอาการ “ไส้สีน้ำตาล” ของสับปะรดโดยใช้เทคนิค Transmittance Near Infrared. *ว. วิทย. กษ.* 44: 3 (พิเศษ): 402-405.

รณฤทธิ์ ฤทธิรณ บุญวัฒนา พุ่มมาลี ปานเทพ ศรศิลป์ ศศิธร ลิบลับ และอุณารุจ บุญประกอบ. 2554. ระบบคัดแยกความหวานผลไม้อย่างอัตโนมัติบนสายพานลำเลียง. *ว. วิทย. กษ.* 42: 1 (พิเศษ): 559-562.

รณฤทธิ์ ฤทธิรณ ปนัดดา ไกรลาศโอฬาร และมัลฐิตา อึ้งพานิช. 2551. การประเมินคุณภาพของผลฝรั่งแบบไม่ทำลายเพื่อการค้าในเชิงพาณิชย์. *ว. วิทย. กษ.* 39: 3 (พิเศษ): 70-73.

รณฤทธิ์ ฤทธิรณ ลลิตา ออมสิน บุณยนุช ทองสงโสม ศุทธหทัย โภชนากรณ์ และสุรีพร ณรงค์วงศ์วัฒนา. 2557. การตรวจสอบหนอนภายในฝักกระเจี๊ยบเขียวสดเพื่อการส่งออกด้วยเทคนิค NIR. *ว. วิทย. กษ.* 45: 3 (พิเศษ): 309-312.

รณฤทธิ์ ฤทธิรณ สโรชา ทองด่านอุดม ลลิต์ภัทร รัตอาภา และสุรีพร ณรงค์วงศ์วัฒนา. 2554. การวิเคราะห์คุณภาพมะละกอแขกดำเพื่อการบริโภคด้วย Near Infrared Spectroscopy. *ว. วิทย. กษ.* 42: 3 (พิเศษ): 141-144.

รณฤทธิ์ ฤทธิรณ สุรีพร ณรงค์วงศ์วัฒนา เขมณัฏฐ์ พุกพูล วีระพงศ์ ชูนุ้ย และอุณารุจ บุญประกอบ. 2553. การตรวจสอบความผิดปกติไส้ฉ่ำน้ำอย่างไม่ทำลายในผลสาลี่. *ว. วิทย. กษ.* 41: 1 (พิเศษ): 381-384.

รณฤทธิ์ ฤทธิรณ สุรีพร ณรงค์วงศ์วัฒนา ปวีณา เอี่ยมเอม มณีรัตน์วงศ์จันทร์ และภรวรรณ นิจจรัลกุล. 2554. การประเมินปริมาณน้ำมันของผลปาล์มน้ำมันด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด (NIR). *ว. วิทย. กษ.* 42: 1 (พิเศษ): 71-74.

ระจิตร สุวพานิช และนภณัฏฐ์ สะสมทรัพย์. 2557. การตรวจสอบปริมาณไนเตรทในใบผักคะน้าที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มสเปกโทรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด (FT-NIR). *ว. วิทย. กษ.* 45: 3 (พิเศษ): 305-308.

ระจิตร สุวพานิช และปาริชาติ เทียนจุมพล. 2554. การตรวจสอบอาการสะท้านหนาวในผลมะม่วงด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. *ว. วิทย. กษ.* 42: 1 (พิเศษ): 59-62.

รุงนภา ไกลถิ่น ธวัชชัย เพชรแกว ปาริชาติ เทียนจุมพล เกวลิน คุณาศักดากุล สงวนศักดิ์ ธนาพรพูนพงษ และสุชาดา เวียรศิลป. 2554. การตรวจหาเมล็ดขาวสารที่ถูกเชื้อ Aspergillus flavus เขาทำลายดวยเทคนิคเนียรอินฟราเรดสเปกโทรสโกป. ว. วิทย. กษ. 42: 1 (พิเศษ): 361-364.

วรินทร มณีวรรณ ศุภศักดิ์ ลิมปติ และ ปาริชาติ เทียนจุมพล. 2551. การประยุกตใชเทคนิคเนียรอินฟราเรดสเปกโทรสโกปเพื่อหาความชื้นในเมล็ดพันธุถั่วเหลือง. ว. วิทย. กษ. 39: 3 (พิเศษ): 363-366.

วารุณี ธนะแพสย์. 2555. เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. จตุจักร กรุงเทพมหานคร.

วารุณี ธนะแพสย์ ศุมาพร เกษมสำราญ ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ อนุพันธุ์ เทอดวงศ์วรกุล ปิติพร ฤทธิเรืองเดช ธงชัย สุวรรณสิชณน์ และรณฤทธิ์ ฤทธิรณ. 2555. เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม (Near-Infrared technology and applications in industries). สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์กรุงเทพฯ. 270 หน้า

วารุณี ธนะแพสย์ ศุมาพร เกษมสำราญ สิรินภา สราญวงศ์ และสุมิโอะ คาวาโน. 2551. การตรวจหาไข่และหนอนของแมลงวันผลไม้ในมะม่วงส่งออกโดยใช้เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี. *ว. วิทย. กษ.* 39: 3 (พิเศษ): 54-57.

วารุณี ธนะแพสย์ สนธิสุข ธีระชัยชยุติ อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล ศุมาพร เกษมสำราญ และอาทิตย์ จันทร์หิรัญ. 2553. การคัดแยกเนื้อแก้วและยางไหลในมังคุดแบบไม่ทำลายโดยวิธีการวัดการดูดกลืนแสงในย่านใกล้อินฟราเรด. *ว. วิทย. กษ.* 41: 1 (พิเศษ): 369-372.

ศศิวิมล มากมูล ศุภศักดิ์ ลิมปติ และ ปาริชาติ เทียนจุมพล. 2553. การใชเทคนิคเนียรอินฟราเรดสเปกโทรสโกปตรวจสอบการปนของขาวสารพันธุขาวดอกมะลิ 105 ดวยขาวพันธุชัยนาท 1. ว. วิทย. กษ. 41: 1 (พิเศษ): 377-380.

ศิรกานต์ ศรีธัญรัตน์ เบญจมาศ รัตนชินกร คมจันทร์ สรงจันทร์ และปรางค์ทอง กวานห้อง. 2553 การตรวจสอบคุณภาพเงาะด้วยระบบ Near Infrared Spectroscopy. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2553. สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

ศิราพร ริพล สงวนศักดิ์ ธนาพรพูนพงษ ปาริชาติ เทียนจุมพล และสุชาดา เวียรศิลปะ. 2550. การหาปริมาณโปรตีนในขาวสารดวยเนียรอินฟราเรดสเปกโทรสโกป. ว. วิทย. กษ. 38: 5 (พิเศษ): 160-163.

ศิวดล รัตนโอภา. 2557. การเปรียบเทียบการประเมินไลโคพีนและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของแตงโมตัดแต่งที่อายุการเก็บเกี่ยวต่าง ๆ โดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์แบบต่าง ๆ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 183 หน้า.

ศุมาพร เกษมสำราญ. 2545. ขั้นตอนการสร้างสมการประเมินค่าทางเคมีและการทดสอบสมการในทางเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด. (หน้า 131-151). *ใน:* เอกสารประกอบการอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ศุมาพร เกษมสำราญ. 2552. หลักพื้นฐานของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี. หน้า 9-27. ใน:เอกสารประกอบการอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การตรวจสอบสินค้าเกษตรโดยไม่ทำลายด้วยวิธี Near Infrared Spectroscopy (NIR Workshop). ระหว่างวันที่ 18-22 พฤษภาคม 2552. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพมหานคร.

ศุมาพร เกษมสำราญ และกุลปิติพร ฤทธิเรืองเดช. 2555. ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์ NIR. ในเทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม (Near-Infrared technology and applications in industries). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. กรุงเทพฯ. (4)1-20 หน้า

ศุมาพร เกษมสำราญ วารุณี ธนะแพสย์ และอนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. 2552. การตรวจสอบคุณภาพภายในของส้มเขียวหวานโดยไม่ทำลายด้วยแสงเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี. *ว. วิทย. กษ.* 40: 1 (พิเศษ): 233-236.

สนธิสุข ธีระชัยชยุติ. 2558. การคัดแยกพันธุ์มะนาวและคุณภาพของผลมะนาวโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพการดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรดความละเอียดสูง. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 66 หน้า.

สนธิสุข ธีระชัยชยุติ และ ภานุวัฒน์ ทรัพย์ปรุง. 2559. การทำนายคุณภาพของข้าวโพดหวานแบบไม่ทำลายโดยเทคนิควิเคราะห์ภาพการดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรดความละเอียดสูง :รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สนธิสุข ธีระชัยชยุติ วารุณี ธนะแพสย์ อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล และศุมาพร เกษมสำราญ. 2551. การหาปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ในผลมังคุดแบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคแสงย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น. *ว. วิทย. กษ.* 39: 3 (พิเศษ): 156-159.

สุทธิพร พิริยายน กิติพงษ์ ศิริสุทธานันธ์ สุพจน์ จุลหนองใหญ่ สุนีย์ คณาพิพัฒน์ ภาวิณี เที้ยวพันธ์ นงเยาว์ เกตุบุตร. มปป. การทดสอบหาปริมาณโปรตีนในวัตถุดิบข้าวโพด ถั่วเหลือง และปลาป่น ด้วยวิธี NIRS. 6 หน้า

สาวิตรี ชัยอารีกิจวัฒน์. 2556. การประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้และเทคนิคถ่ายภาพสเปกตรัมสำหรับคัดแยกผลมะม่วงที่เกิดโรคแอนแทรคโนส. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีอาหาร) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร. 90 หน้า.

สิรินาฏ น้อยพิทกษ์ อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล และศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์. 2553. การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเพื่อคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วแบบไม่ทำลายโดยสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย้านใกล้. *ว. วิทย. กษ.* 41: 1 (พิเศษ): 393-396.

สุพรพรรณ ศรีมาศ พีรพงษ์ แสงวนางค์กูล รณฤทธิ์ ฤทธิรณ และเกรียงศักดิ์ ไทยพงษ์. 2554. การประเมินปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของผลมะละกอพนธุ์ปลักไม้ลายแบบไม่ทำลาย ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. *ว. วิทย. กษ.* 42: 1 (พิเศษ): 67-70.

อรวรรณ จิตต์ธรรม และจารุวรรณ บางแวก. 2561ก. การประเมิน ความชื้น ปริมาณโปรตีน ความหนืด อมิโลส น้ำตาล คุณภาพน้ำมัน ปริมาณสารแอฟลาทอกซิน ในเมล็ดและแป้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2561. กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

อรวรรณ จิตต์ธรรม และจารุวรรณ บางแวก. 2561ข. การประเมินความชื้นและปริมาณแป้งในมันสำปะหลังด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2561. กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

อรวรรณ จิตต์ธรรม และจารุวรรณ บางแวก. 2561ค. การประเมินปริมาณโปรตีนในแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2561. กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

อรวรรณ จิตต์ธรรม และจารุวรรณ บางแวก. 2561ง. การประเมินเปอร์เซ็นต์ความงอกของเมล็ดข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2561. กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

อนิรุธ มหาทวย ศุภณัฐ ลัภกิตโร วนัส ภูยาธร และ อาทิตย์ จันทะรังศรี. 2559. การศึกษาความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวัดความหวานในอ้อยลำโดยใช้เทคนิค NIRs. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อนุวัฒน์ รัตนชัย และจารุวรรณ บางแวก. 2560ก. การประเมินปริมาณความหนืดในมันสำปะหลังด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2560. กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

อนุวัฒน์ รัตนชัย และจารุวรรณ บางแวก. 2560ข. การประเมินปริมาณอมิโลสในมันสำปะหลังด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2560. กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

อนุวัฒน์ รัตนชัย จารุรัตน์ พุ่มประเสริฐ และจารุวรรณ บางแวก. 2558. การประเมินสารสำคัญในผลิตผลเกษตร โดยใช้เทคนิคการไม่ทำลายตัวอย่างด้วย Near Infrared Spectroscopy. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2558. กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

อนุวัฒน์ รัตนชัย นฤเทพ เวชภิบาล และจารุวรรณ บางแวก. 2558. การประเมินคุณภาพแป้งในพืชไร่ชนิดต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคการไม่ทำลายตัวอย่างด้วย Near Infrared Spectroscopy. รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2558. กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร.

อริยนันท์ ตลับนาค และอนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. 2560. การประเมินความแก่ทุเรียนแบบทำลายน้อยที่สุดด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. *วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.* 23: 9-16.

อาทิตย์ จันทร์หิรัญ วารุณี ธนะแพสย์ ศุมาพร เกษมสำราญ และจิราพร อนุสรณ์วงศ์ชัย. 2553. การตรวจสอบค่าความหวานผลลองกองด้วยเครื่องวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านใกล้อินฟราเรด. *ว. วิทย. กษ.* 41: 3/1 (พิเศษ): 29-32.

อาทิตย์ จันทร์หิรัญ วารุณี ธนะแพสย์ ศุมาพร เกษมสำราญ และจิราพร อนุสรณ์วงศ์ชัย. 2554. การตรวจสอบของแข็งที่ละลายน้ำได้ในผลลำไยด้วยเครื่องวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านใกล้อินฟราเรด. *ว. วิทย. กษ.* 42: 1 (พิเศษ): 59-62.

เอลียาห์ เลิศกุศล พรธเรศ ดวงสุวรรณ นิโลบล โกมลสิงห์ ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ และบุศรากรณ์ มหาโยธี. 2558. การพัฒนาวิธีการตรวจสอบสารคลอไพริฟอสตกค้างในถั่วฝักยาวแบบรวดเร็วด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. *ว. วิทย. กษ.* 46: 3 (พิเศษ): 347-350.

อัมรา ทองกลิ่น และพีระศักดิ์ ฉายประสาท. 2561. การตรวจสอบคุณภาพทุเรียนหมอนทองแบบไม่ทำลายผลิตผล โดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในเขตจังหวัดอุตรดิตถ์. *ว. วิทย. กษ.* 49: 1 (พิเศษ): 561-566.

Arthit Phuphaphud, Khwantri Saengprachatanarug, Jetsada Posom, Seree Wongpichet, Kanvisit Maraphum, and Eizo Taira. 2019. Effects of Waxy Types of a Sugarcane Stalk Surface on the Spectral Characteristics of Visible-Shortwave Near Infrared measurement. ENGINEERING JOURNAL 23 (1): 13-24.

Babankumar S. B., Ritula T. and Ronald H. 2015. Analysis of Peanut Seed Oil by NIR. American Journal of Analytical Chemistry. 06(12):917-922

Belalcazar J., Dominique D., Meike S. A., Mónica P., Jorge L., Luis L., Nelson M., Angélica M. J., Lizbeth P., Luis A. B. López-Lavalle, Fabrice D., Elise F. T., and Hernán C. 2016. High-Throughput Phenotyping and Improvements in Breeding Cassava for Increased Carotenoids in the Roots. Crop Science. 56: september–october. 10 p.

Berding N., Brotherton G.A., Le Brocq D.G., Skinner J.C. 1991. Near infrared reflectance spectroscopy for analysis of sugarcane from clonal evaluation trials. II. Expressed juice. Crop science. 31(4): 1024-1028.

Bokobza, I. 2002. Origin of near-infrared absorption bands. Pages 11-41. In: Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Application. Edited by Seisler, H. W., Y. Ozaki, S. Kawata, and H. M. Heise. WILEY-VCH Verlag GmbH, D-6946669 Weinheim (Germany).

Cozzolino D., Kenton P. and Michael L. 2015. An Overview on the Use of Infrared Sensors for in Field, Proximal and at Harvest Monitoring of Cereal Crops. Agriculture. 5: 713-722

Dandan Y., Laijun S., Borui Z., Wenyi T., Dan Z. and Wenkai C.. 2016. Extraction of characteristic spectral bands of wet gluten in wheat based on NIR. 2nd International Conference on Cloud Computing and Internet of Things (CCIOT).

Gotor, A.A, Berger, M., Farkas, E., Labalette, F., Centis, S., Calmon, A. 2007. QUANTIFICATION OF SUNFLOWER MINOR COMPONENTS BY NEAR INFRARED SPECTROMETRY (NIR). HELIA, 30(47): 183-190.

Hruschka, W.R. 1987. Data analysis: Wavelength selection methods. In Near-Infrared Technology in the Agriculture and Food Industries, edited by P. Williams and K. Norris. American Association of Ceral Chemists, Inc.

Kawano, S. 2002. Sampling and sample presentation. Pages 115-124. In: Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Application. Edited by Seisler, H. W., Y. Ozaki, S. Kawata, and H. M. Heise. WILEY-VCH Verlag GmbH, D-6946669 Weinheim (Germany).

Kawano, S., Abe, H. 1995. Development of a calibration equation with temperature compensation for determining the Brix value in intact peaches, J. Near Infrared Spectrosc. 3, 211-218.

Kjeldahl, J. 1883. Neue Methodezur Bestimmung des Stickstoffs in organischenKörpern (New method for the determination of nitrogen in organic substances). Zeitschriftfüranalytische Chemie, 22 (1): 366-383.

Lim J. G., Gi Y. K., Chang Y. M., Kyoung M. O., Geon S. K., Hyeon C. Y, Hyeon H. H., Young T. K., Seong M. K. and Moon S. K. 2017. Rapid and Nondestructive Discrimination of *Fusarium Asiaticum* and *Fusarium Graminearum* in Hulled Barley (*Hordeum vulgare* L.) Using Near-Infrared Spectroscopy. *Journal of Biosystems Engineering* 42(4): 301-313.

Luo X, Wu FX, Xie HG, Zhu YS, Zhang JF, Xie HA. 2016. Research on Resistant Starch Content of Rice Grain Based on NIR Spectroscopy Model. Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi. 36(3): 697-701.

Manley, M. 2014. Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials, *Chem. Soc. Rev.,* 2014, 43, 8200—8214, DOI: 10.1039/c4cs00062e

Noypitak, S., A. Terdwongworakul, K. Krisanapook and S. Kasemsumran. 2015. Evaluation of astringency and tannin content in 'Xichu' persimmons using near infrared spectroscopy. *Int J. Food Prop*. 18: 5. 1014-1028.

Osborne, B.G. 2006. Near-infrared Spectroscopy in Food Analysis, Encyclopedia of Analytical Chemistry Online in 2006 by John Wiley & Sons, Ltd. DOI: 10.1002/9780470027318.a1018

Osborne, B. G., T. Fearn and P.H. Hindle. 1993. "Practical NIR Spectroscopy with Applications in food and beverage analysis" 227 p. 2nd Edition. Longman Scientific and Technical, Singapore. Workman, Jr. J.J. 2004. An Introduction to Near Infrared Spectroscopy. (*www.FTIR and NIR.htm*)

Pérez-Vicha B., L. Velascob, and J.M. Fernández-Martíneza. 1998. Determination of Seed Oil Content and Fatty Acid Composition in Sunflower Through the Analysis of Intact Seeds, Husked Seeds, Meal and Oil by Near-Infrared Reflectance Spectroscopy. JAOCS, 75(5): 547-555.

Kuswurjanto R. and Triantarti. 2019. Study on application of near infrared (nir) spectroscopy for sugar cane juice analysis to replace conventional analysis methods. The 3rd International Symposium on Agricultural and Biosystem Engineering.

Tao F, Yao H, Hruska Z, Liu Y, Rajasekaran K, Bhatnagar D. 2019. Use of Visible–Near-Infrared (Vis-NIR) Spectroscopy to Detect Aflatoxin B_1 on Peanut Kernels. Applied Spectroscopy. 73(4): 415-423.

Ugochukwu N. I., Fabrice D., Dominique D., Hernan C., Chiedozie N. E. and Jean-Luc J. 2017. Rapid analyses of dry matter content and carotenoids in fresh cassava roots using a portable visible and near infrared spectrometer (Vis/NIRS). https://doi.org/10.1371/journal.pone.

Watanawan, C., T. Wasusri, V. Srilaong, C. Wongs-Aree and S. Kanlayanarat. 2014. Near infrared spectroscopic evaluation of fruit maturity and quality of export Thai mango (*Mangifera indica* L. var. Namdokmai). *Int. Food Res. J*. 21: 3. 1109-1114.

Williams, P.C. and K. Norris. 2001. Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries. American Association of Cereal Chemists. 296 p.

Wu J.G., C.H. Shi. 2004. Prediction of grain weight, brown rice weight and amylose content in single rice grains using near-infrared reflectance spectroscopy. Field Crops Research 87: 13–21

Zhenying Z., Shangbing C., Xueyou W., Changrui X. and Jian Y. 2018. Determination of soybean routine quality parameters using near- infrared spectroscopy. Food Sci Nutr. rfc6:1109–1118

ภาคผนวก

ตางรางผนวกที่ 1 คำศัพท์ที่เกี่ยวข้อง

ตัวย่อ	ชื่อเต็ม	คำอธิบาย
R^2	Coefficient of Determination	คือค่าการดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ และค่าจากการวิเคราะห์
R	Correlation Coefficient	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ในย่าน NIR และค่าการวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการ
SEC	Standard Error of Calibration	ค่าคลาดเคลื่อนในการคำนวณในการสร้างสมการค่าการดูดกลืนแสงและค่าการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ
SEP	Standard Error of Prediction	ค่าคลาดเคลื่อนในการนำสมการไปใช้ในการประเมิน ถ้าค่า SEP สูงกว่าค่า standard deviation (SD) ของค่าการวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการ แสดงว่าสมการไม่มีประสิทธิภาพในการนำไปใช้ประเมินตัวอย่างอื่น ๆ
F	Factor	ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของสมการ เป็นปัจจัยจากภายใน คือ ข้อมูลที่ใช้ในการทำสมการ
Sd	Standard Deviation	เป็นค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่าง ข้อมูลแต่ละตัวกับค่าเฉลี่ยรวมของข้อมูล
PLSR	Partial Least Squares Regression	สมการถดถอยเชิงเส้น
	validation set	ตัวอย่างกลุ่มที่ใชทดสอบความถูกต่องของสมการ
	calibration set	กลุมตัวอย่างที่ใชสำหรับสรางสมการ
	bias	ค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายได้จากสมการกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริง

ตารางผนวกที่ 2 ลักษณะทางเคมีของการดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ในย่าน NIRS

Wavelength (nm)	Bond vibration	Structure	Wavelength (nm)	Bond vibration	Structure
713	C-H str. fourth overtone	benzene	1500	N-H str. first overtone	NH
738	C-H str. fourth overtone	ROH	1510	N-H str. first overtone	protein
740	C-H str. fourth overtone	CH_3	1520	O-H str. first overtone	$CONH_2$
746	C-H str. fourth overtone	CH_2	1520	N-H str. first overtone(intramol,H-	ROH
747	O-H str. third overtone	ArOH	1528	O-H str. first overtone(intramol,H-b	starch
760	O-H str. third overtone	H_2O	1530	N-H str. first overtone	RNH_2
762	C-H str. fourth overtone	CH_2	1533	C-H str. first overtone	C=H
779	N-H str. third overtone	RNH_2	1540	O-H str. first overtone(intramol,H-b	starch
790	N-H str. third overtone	$ArNH_2$	1570	N-H str. first overtone	-CONH-
806	N-H str. third overtone	RNH_2	1580	O-H str. first overtone(intramol,H-b	starch, gluco
808	2xN-H str.+2xN-H def.+2xC-N str	RNHR′	1620	C-H str. first overtone	$=CH_2$
815	N-H str. third overtone	RNHR′	1645	C-H str. first overtone	R-CH-CH \ / O
832	2xN-H str.+2xN-H def.+2xC-N str	RNHR′			
840	3xC-H str. +2xC-C str.	benzene			
874	C-H str. third overtone	benzene	1660	C-H str. first overtone	*cis*-RCH=CHR′
880	C-H str. third overtone	$CHCl_3$	1685	C-H str. first overtone	aromatic
900	C-H str. third overtone	CH_3	1695	C-H str. first overtone	CH_3
910	C-H str. third overtone	protein	1705	C-H str. first overtone	CH_3
913	C-H str. third overtone	CH_2	1725	C-H str. first overtone	CH_2
928	C-H str. third overtone	oil	1740	S-H str. first overtone	-SH
938	C-H str. third overtone	CH_2	1765	C-H str. first overtone	CH_2
970	O-H str. second overtone	ROH,H_2O	1780	C-H str. first overtone	cellulose
990	O-H str. second overtone	starch	1820	O-H str.+2xC-O str.	cellulose
1000	O-H str. second overtone	ArOH	1900	O-H str.+2xC-O str.	starch
1015	2xC-H str.+3xC-H def.	CH_3	1900	C=O str. second overtone	$-CO_2H$
1020	2xN-H str.+2 amide I	protein	1908	O-H str. first overtone	POH
1020	N-H str. second overtone	$ArNH_2$	1920	C=O str. second overtone	CONH
1030	N-H str. second overtone	RNH_2	1940	O-H str.+O-H def.	H_2O
1037	2xC-H str.+2xC-H def.+$(CH_2)_n$	oil	1950	C=O str. second overtone	- CO_2R
1053	2xC-H str.+2xC-H def.+$(CH_2)_n$	CH_2	1960	N-H asym.str.+amide II	$CONH_2$
1060	N-H str. second overtone	RNH_2	1980	N-H asym.str.+amide II	protein
1080	2xC-H str.+2 xC-C str.	benzene	2000	2xO-H def.+C-O def.	starch
1097	2xC-H str.+2 xC-C str.	cyclopropane	2000	N-H sym.str.+amide II	$CONH_2$, CON
1143	C-H str. second overtone	aromatic	2030	C=O str. second overtone	$CONH_2$
1152	C-H str. second overtone	CH_3	2050	N-H sym.str.+amide II	protein
1170	C-H str. second overtone	HC=CH	2050	N-H asym.str.+amide III	$CONH_2$
1195	C-H str. second overtone	CH_3	2080	O-H str.+O-H def.	ROH, sucrose
1215	C-H str. second overtone	CH_2	2100	2xO-H def.+2xC-O str.	starch

ตารางผนวกที่ 2 ลักษณะทางเคมีของการดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ในย่าน NIRS (ต่อ)

Wavelength (nm)	Bond vibration	Structure	Wavelength (nm)	Bond vibration	Structure
1225	C-H str. second overtone	CH	2110	N-H sym.str.+amide III	$CONH_2$, CO
1360	2xC-H str.+C-H def.	CH_3	2132	N-H str.+C=O str.	amino acid
1395	2xC-H str.+C-H def.	CH_2	2140	=C-H str.+C=C str.	HC=CH
1410	O-H str. first overtone	ROH	2150	2 x amidel+amideIII	$CONH_2$
1415	2xC-H str.+C-H def.	CH_2	2160	2 x amidel+amideIII	CONHR
1417	2xC-H str.+C-H def.	aromatic	2180	2 x amidel+amideIII	protein
1420	O-H str. first overtone	ArOH	2190	CH_2 asym.str.+C=str.	HC=CH
1430	N-H str. first overtone	$CONH_2$	2200	C-H str.+C=O str.	-CHO
1440	O-H str. first overtone	sucrose, starch	2242	N-H str.+NH_3^+ def.	amino acid
1440	2xC-H str.+C-H def.	CH	2252	O-H str.+ O-H def.	starch
1446	2xC-H str.+C-H def.	aromatic	2276	O-H str.+ C-C str.	starch
1450	O-H str. first overtone	starch, H_2O	2280	C-H str.+ C-H def.	CH_3
1460	N-H str. first overtone	$CONH_2$	2294	N-H str.+C=O str.	amino acid
1471	N-H str. first overtone	CONHR	2310	C-H str.+ C-H def.	CH_2
1480	O-H str. first overtone(intramol,H-bo	glucose	2323	C-H str.+ C-H def.	CH_2
1483	N-H str. first overtone	$CONH_2$	2336	C-H str.+ C-H def.	cellulose
1490	N-H str. first overtone	CONHR	2347	CH_2 sym. str.+=CH_2 def.	HC=CH CH_2
1490	N-H str. first overtone(intramol,H-bo	$CONH_2$	2352	C-H def. second overtone	cellulose
1490	O-H str. first overtone(intramol,H-bo	cellulose	2380	O-H def. second overtone	ROH
1492	N-H str. first overtone	$ArNH_2$	2461	C-H str.+ C-C str.	Starch

Source : Osborne (1986)