

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทูเรียนพันธุ์หมอนทอง

เป็นทุเรียนพันธุ์ที่นิยมปลูกกันมาก เพราะตลาดต้องการและการขายได้ราคาดี เป็นพันธุ์ที่อยู่ในตระกูลหลวง ลำต้นมีลักษณะลุ่มๆตอๆไม่ค่อยกลม กิ่งตั้งฉากกับลำต้นแต่เนื่องจากกิ่งอ่อนจึงทำให้ลู่ลง ขนาดของโคนกิ่งไม่ใหญ่จึงไม่แข็งแรง ขณะเดียวกันกิ่งมีแขนงยาวจึงทำให้กิ่งทอดลง แต่กิ่งที่แตกออกมาใหม่ๆ ปลายกิ่งจะชูขึ้นตามปกติ ลักษณะทรงพุ่มโปร่ง กิ่งแขนงห่าง ช่วงใบแต่ละใบก็ห่างกันด้วย ลักษณะใบยาว ปลายใบเรียวเด่นชัดกว่าพันธุ์อื่นๆ ผลมีขนาดใหญ่ยาวประมาณ 30 เซนติเมตร เนื้อหนา สีเนื้อเหลืองอ่อน รสหวานมัน ร่องพุ่มมองเห็นไม่ชัด พบว่าพูใหญ่เพียงอันเดียวเรียกว่าพูเอก เมล็ดค่อนข้างเล็ก เนื้อไม่แฉะ เก็บไว้ได้นานไม่เลาะไม่เน่าเสีย แต่ผลผลิตต่อต้นไม่มากนัก (พิจิตร 2537)

2.1.1 ดัชนีการเก็บเกี่ยว

เพื่อให้การเก็บเกี่ยวผลทุเรียนสัมฤทธิ์ผลตามวัตถุประสงค์ ดัชนีการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องทราบ ดังนั้นอายุของผลทุเรียนและลักษณะที่เหมาะสมที่จะเก็บเกี่ยวผลทุเรียนโดยมีจุดมุ่งหมายที่จะเก็บเกี่ยวในอายุที่เหมาะสมและมีความแก่ตามที่ตลาดต้องการทั้งภายในประเทศและต่างประเทศลำดับได้ดังนี้ (ทิฆัมพร 2530, ทรงพล 2531, นิรนาม และ รัชฎา, จริงแท้ 2531)

- 1) การนับอายุ โดยเริ่มต้นนับตั้งแต่ดอกแรก หรือดอกทั้งต้นบานเป็นส่วนใหญ่จนกลีบดอกร่วงหมดหรือเรียกตามคนสวน คือ หางแย้ จนกระทั่งผลแก่และเริ่มเก็บเกี่ยวได้ ดังนั้นดัชนีการเก็บเกี่ยวโดยอาศัยการนับอายุจึงมีการแนะนำเป็นช่วงซึ่งมีค่าแตกต่างกันอยู่ระหว่าง 10-20 วัน (ทรงพล 2531, นิรนาม) ซึ่งทุเรียนหมอนทอง จังหวัด จันทบุรี อยู่ในช่วง 115-130 วันหลังดอกบาน การนับอายุนี้มีความผันแปรด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ แหล่งปลูก อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน ความแตกต่างของแต่ละช่อดอกและแต่ละผลในต้นเดียวกัน
- 2) สีผล (หนาม) ผลอ่อนหนามมีสีเขียวหรือน้ำตาลอ่อน เมื่อผลแก่ปลายหนามมีสีน้ำตาลเข้มตัดกับสีโคนหนามและร่องหนามซึ่งเป็นสีอ่อนกว่า ทั้งนี้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ถ้าผลทุเรียนได้แสงแดดไม่เท่ากัน โดยเฉพาะผลที่ได้รับแสงแดดมากย่อมมีลักษณะผิวกร้าน ฯลฯ
- 3) ร่องหนาม ผลแก่นอกจากปลายหนามจะสีเข้มแล้ว ร่องหนามก็ขยายออกเล็กน้อย ทำให้ร่องหนามห่าง นอกจากนี้สีของร่องหนามก็จะเข้มมากขึ้นตามอายุด้วย
- 4) ก้านผล เมื่อผลแก่ ก้านผลทุเรียนขยายใหญ่ (ดูอ้วนขึ้น) ซึ่งแข็งแรง ในหมอนทองจะเห็นได้ชัดเจน สีของหัวในส่วนที่กับก้านผลจะคล้ำกว่าส่วนที่ติดกับกิ่ง

- 5) ปากปลิง (รอยตรงปลายกิ่งที่ต่อกับปลายก้านผล) ผลทุเรียนแก่ ปากปลิงขยายโตขึ้น ทุเรียนพันธุ์หมอนทองเห็นเด่นชัดในผลที่สมบูรณ์
- 6) ความยืดหยุ่นของปลายหนาม ทุเรียนแก่ ปลายหนามมีความยืดหยุ่น มีแรงตีกลับคล้ายสปริงเมื่อบีบปลายหนามเข้าหากัน ส่วนทุเรียนที่อ่อนปลายหนามจะแข็งไม่มีความยืดหยุ่น
- 7) ร่องพู รอยต่อระหว่างพูจะดูห่างมากขึ้นและมองเห็นเป็นเส้นตรงมาก
- 8) การเคาะผล ผลทุเรียนแก่จะให้เสียงโพก เสียงโปร่งมากกว่าผลอ่อน ทั้งนี้ในช่วงเช้าหรือมีความชื้นมากการเคาะผลก็ทำให้ข้อสรุปที่คลาดเคลื่อนได้
- 9) การดูน้ำที่ก้านผล ทุเรียนแก่จะมีน้ำใส ส่วนทุเรียนอ่อนน้ำจะข้นเหนียวมียางติดมือเมื่อสัมผัส

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง (สุดารัตน์ 2536)

องค์ประกอบหลักของทุเรียนคือ น้ำ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้รวมกันมีมากถึง 84.7% ของน้ำหนักทุเรียน และองค์ประกอบที่เหลือคือ วิตามิน และเกลือแร่ แต่จะมีปริมาณที่น้อยมาก

- 1) น้ำ น้ำเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดของทุเรียน ซึ่งในทุเรียนหมอนทองมีน้ำเป็นองค์ประกอบถึง 49.3 %
- 2) คาร์โบไฮเดรต ทุเรียนประกอบไปด้วยคาร์โบไฮเดรตถึง 30 % ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแป้ง (ประมาณ 12%) (สุดารัตน์ 2536) ได้รายงานไว้ว่า พันธุ์ทุเรียนที่แตกต่างกันจะมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่แตกต่างกัน เช่น ทุเรียนพันธุ์ชะนี มีคาร์โบไฮเดรต 22.3% ในขณะที่ทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีคาร์โบไฮเดรตมากถึง 29.6%
- 3) ไขมัน เป็นสารอาหารที่มีรองมาจากคาร์โบไฮเดรต ซึ่งในทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีปริมาณไขมันเพียง 3.3 % ซึ่งน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนพันธุ์อื่น เช่น พันธุ์กระดุม พันธุ์ชะนีพันธุ์ก้านยาว
- 4) โปรตีน โปรตีนเป็นส่วนประกอบที่มีปริมาณเล็กน้อยในทุเรียนและทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีโปรตีนเพียง 2.1% ซึ่งน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนพันธุ์อื่น ๆ

2.1.3 องค์ประกอบอื่น ๆ เช่นเกลือแร่ และวิตามิน

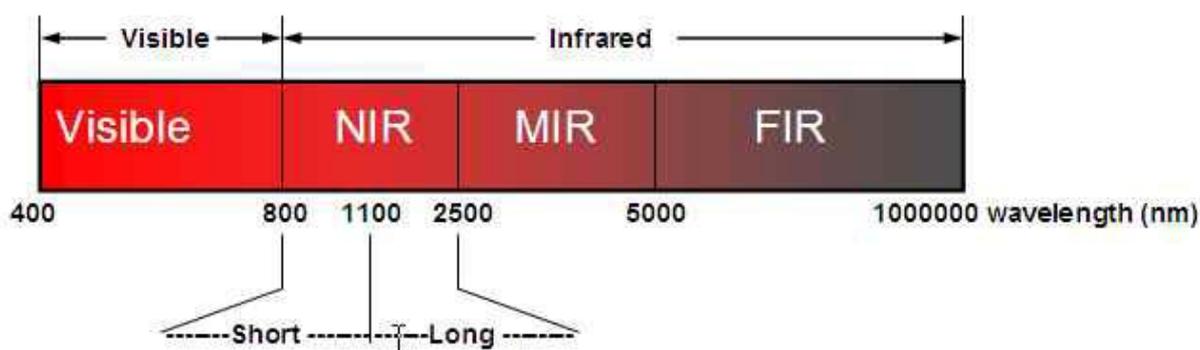
เนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีสีเหลืองเนื่องมาจากสารเบต้า-คาโรทีน เป็นองค์ประกอบ เนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีสีเหลืองอ่อน เนื่องมาจากมีเบตา-คาโรทีนน้อยที่สุดคือ 46 มิลลิกรัมต่อเนื้อทุเรียน 100 กรัม องค์ประกอบของทุเรียนพันธุ์หมอนทองแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง (สุดาร์ตน์ 2536)

ส่วนประกอบของธาตุอาหาร/น้ำหนักผลไม้ 100 g (Nutrient Composition per 100 g. Edible Portion)	หน่วยวัด	ทุเรียนพันธุ์หมอนทอง
พลังงาน (energy)	กิโลแคลอรี	156
ความชื้น (moisture)	กรัม	62.5
โปรตีน (protein)	กรัม	2.1
ไขมัน (fat)	กรัม	3.3
คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate)	กรัม	29.6
เส้นใยอาหารหยาบ (crude fibre)	กรัม	1.4
กากอาหาร (ash)	กรัม	0.9
แคลเซียม (calcium)	มิลลิกรัม	29
ฟอสฟอรัส (phosphorus)	มิลลิกรัม	34
เหล็ก (iron)	มิลลิกรัม	1.1
เบตา-คาโรทีน (B-carotene)	มิลลิกรัม	46
(Total A (RE))	มิลลิกรัม	8
ไทามิน (thiamin)	มิลลิกรัม	0.16
ไรโบฟลาวิน (riboflavin)	มิลลิกรัม	0.23
ไนอะซิน (niacin)	มิลลิกรัม	2.5
วิตามิน ซี (vitamin C)	มิลลิกรัม	35

2.2 คลื่นเนียร์อินฟราเรด (Near Infrared Radiation)

คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรด (near infrared; NIR) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ระหว่างช่วงคลื่นแสงย่านวิสิเบิล (visible) และช่วงคลื่นแสงอินฟราเรดย่านกลาง (middle infrared; MIR) ดังในภาพที่ 2.1



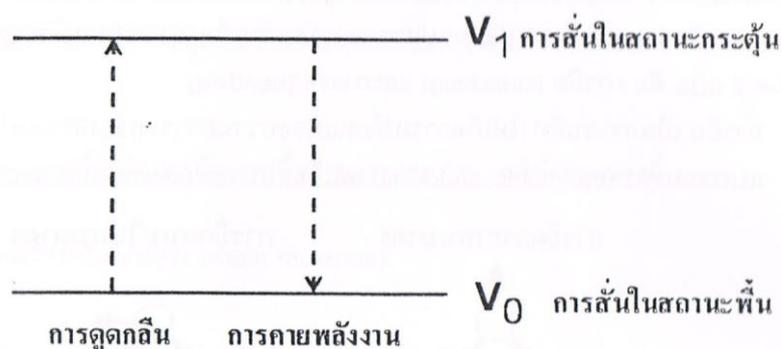
ภาพที่ 2.1 ช่วงสเปกตรัมของคลื่นแสงอินฟราเรด Osborne, Feam, Hindle (1993)

คลื่นแสง NIR มีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 800-2500 นาโนเมตร สามารถแบ่งช่วงความยาวคลื่นออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงคลื่นสั้นที่มีความยาวคลื่น 800-1100 นาโนเมตร และช่วงคลื่นยาวที่มีความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร Osborne, Feam, Hindle (1993) พลังงานของคลื่นแสง NIR จะอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับการสั่น (vibration) ของพันธะภายในโมเลกุล หากการสั่นของพันธะใดเกิดที่ความถี่ที่ตรงกับความถี่ของคลื่นแสง NIR ก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนขึ้น ซึ่งการดูดกลืนแสง NIR ใช้มากในการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพของสารประกอบอินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ

การสั่นของพันธะในลักษณะต่างๆ จะมีการดูดกลืนพลังงานที่เป็นเฉพาะของมัน เนื่องจากโมเลกุลหนึ่งๆ มีพันธะได้หลายแบบ ซึ่งแต่ละพันธะก็มีรูปแบบการสั่นได้อีกหลายรูปแบบ ทำให้โมเลกุลหนึ่งๆ จะแสดงการดูดกลืนแสง NIR ได้หลายช่วงคลื่นพร้อมกัน ลักษณะการดูดกลืนแสงจะเกิดเป็นแถบ (band) หรือ พีค (peak) แสดงถึงพลังงานคลื่นแสง NIR ที่ถูกดูดกลืน ซึ่งสามารถวัดได้ใน 2 รูปแบบ คือรูปแบบความเข้มแสงที่ส่องผ่าน (transmittance) และรูปแบบความเข้มแสงสะท้อนออกมา (reflectance) แล้วนำค่าความเข้มแสงที่ได้ในแต่ละความยาวคลื่น มาเขียนกราฟโดยให้แกนนอนเป็นค่าความยาวคลื่น แกนตั้งเป็นค่าการดูดกลืนแสง จะได้กราฟการดูดกลืนแสงของตัวอย่างนั้นๆ กราฟที่ได้เรียกว่า เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม (NIR spectrum) โมเลกุลของสารแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างกัน เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจึงได้สเปกตรัมที่มีลักษณะต่างกัน Osborne, Feam, Hindle (1993)

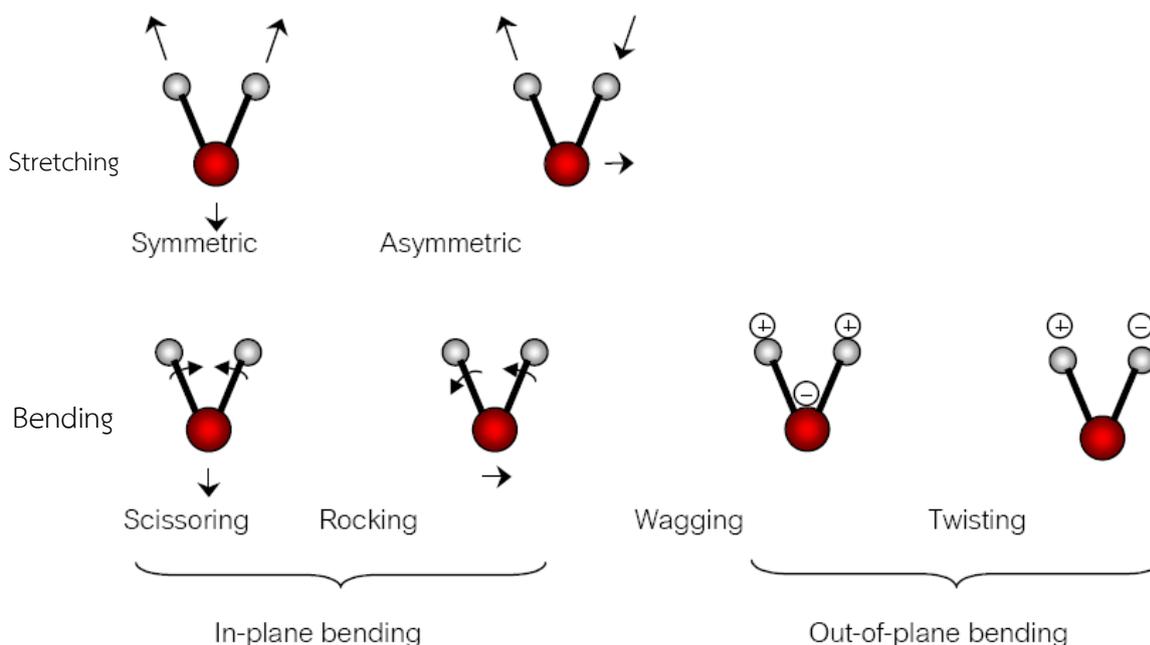
จากทฤษฎีของกลศาสตร์ควอนตัม อธิบายว่าโมเลกุลของสารประกอบขึ้นด้วยอะตอมที่เชื่อมต่อกันด้วยการสร้างพันธะเคมี (chemical bonding) พันธะในโมเลกุลจะเกิดการสั่น (vibration) อยู่ตลอดเวลา เรียกการสั่นชนิดนี้ว่า การสั่นในสถานะพื้น (vibration ground state) ด้วยความถี่ซึ่งมีค่าเฉพาะ (quantized frequency) ถ้าโมเลกุลเกิดอันตรกิริยากับรังสี NIR จะดูดกลืนรังสีที่มีความถี่ตรงความถี่ค่าเฉพาะ จนทำให้เกิดการสั่นในสถานะกระตุ้น (vibration excited state) ระดับโอเวอร์โทน โมเลกุลไม่สามารถอยู่ในสถานะ

กระตุ้นได้จึงต้องคายพลังงานออกมาในรูปความร้อนเพื่อให้กลับคืนสู่การสั่นในสถานะพื้นตามเดิม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าแทรนซิชัน (transition) ดังภาพที่ 2.2. (รศ.ดร.วิชัย และคณะ 2555)



ภาพที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานการสั่น (วิชัย และคณะ 2555)

การสั่นของโมเลกุลในกลุ่มฟังก์ชันต่างๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะหลักๆ ลักษณะที่หนึ่ง คือ การยืดหด (stretching) ของพันธะเป็นการสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวระหว่างอะตอมที่สร้างพันธะกันซึ่งมีสองรูปแบบย่อยคือ แบบสมมาตร (symmetric) และแบบอสมมาตร (asymmetric) และลักษณะที่สองคือ การงอ (bending) หรือการผิดรูป (deformation) เป็นการสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมพันธะ ที่มีรูปแบบปลีกย่อยอีกได้แก่ scissoring, rocking, wagging และ twisting ซึ่งทั้งหมดนี้อาจเกิดการเคลื่อนที่ที่อยู่ในระนาบเดียวกัน (in-plane) หรือต่างระนาบกัน (out-of-plane) ก็ได้ ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงพันธะของโมเลกุลในรูปแบบต่างๆ (วิชัย และคณะ 2555)

ในสารประกอบอินทรีย์จะมีหมู่ฟังก์ชันในกลุ่ม X-H เป็นโมเลกุลหลัก และสามารถเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับคลื่นแสง NIR ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นและเปลี่ยนระดับพลังงานการสั่นจากสถานะพื้น (ground vibration) แล้วเปลี่ยนไปยังสถานะกระตุ้น (excited vibration) แบบข้ามขั้น จึงเกิดลักษณะของแถบคลื่นแสง NIR แบบโอเวอร์โทน (overtone band) และคอมบิเนชัน (combination band) ในช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร จะพบโอเวอร์โทนระดับที่หนึ่งและคอมบิเนชันโมเลกุลของสารที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วง NIR ได้ดี คือ โมเลกุลของสารที่มี H เป็นองค์ประกอบอยู่ในพันธะ ซึ่งพันธะ O-H จะพบในโครงสร้างของโมเลกุลน้ำ สำหรับพันธะ O-H และ C-H จะพบในโครงสร้างของโมเลกุลแป้ง และน้ำตาล ส่วนพันธะ N-H จะพบในโครงสร้างของโมเลกุลโปรตีน และพันธะ C-H จะพบในโครงสร้างของโมเลกุลไขมัน Osborne, Feam, Hindle (1993)

2.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy)

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ดีที่สุดสำหรับการตรวจสอบคุณภาพสินค้าเกษตรและอาหาร เทคนิคนี้จะแสดงถึงการดูดซับคลื่นในแถบเนียร์อินฟราเรดที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และน้ำ Williams, Norris (2001) มีงานวิจัยหลายฉบับที่รายงานเกี่ยวกับการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งเป็นเทคนิคที่รวดเร็วและเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติและโครงสร้างของอาหารในการวิจัยขั้นพื้นฐานและเพื่อตรวจสอบกระบวนการแบบออนไลน์ Ozaki *et al.* (2006) Nicolai *et al.* (2007)

ตารางที่ 2.2 ตำแหน่งความยาวคลื่นแสงย่าน NIR ที่ถูกดูดกลืนอย่างเด่นชัดด้วยองค์ประกอบต่างๆ ในผลผลิตทางการเกษตร

ตารางที่ 2.2 ตำแหน่งพีคในแถบสเปกตรัม NIR ที่เด่นชัดขององค์ประกอบต่างๆ ในผลผลิตทางการเกษตร

องค์ประกอบ	ตำแหน่งความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
น้ำ (ความชื้น)	1940
คาร์โบไฮเดรต	2100
โปรตีน	2180
ไขมัน	2310

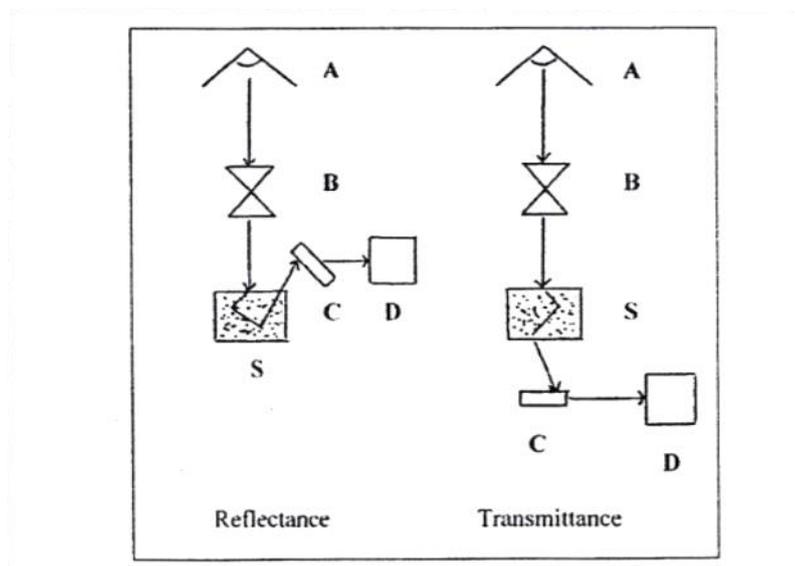
ที่มา: Shenk *et al.* (2001)

2.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Instrumentation for Near Infrared Spectroscopy)

การทำงานของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี อาศัยการดูดซับพลังงานแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของตัวอย่างแต่ละชนิดซึ่งไม่เท่ากัน ดังนั้นเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจึงจำเป็นต้องมีความสามารถในการแยกลำแสงออกเป็นทีละความยาวคลื่นได้ เพื่อที่จะใช้แสงที่ความยาวคลื่นนั้นส่องไปยังตัวอย่างแล้ววัดความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมาเปรียบเทียบกับความเข้มของแสงที่ส่องเข้าไป (reflectance) หรือวัดความเข้มแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มของแสงที่ส่องเข้าไป (Transmittance) ทำแบบนี้ทีละความยาวคลื่น แล้วจึงนำความเข้มแสงนั้นมาเขียนกราฟการดูดกลืนแสงของตัวอย่างนั้นๆ และนำข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ต่อไป Williams (2007)

2.3.2 แบบของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Type of NIRS Instrument)

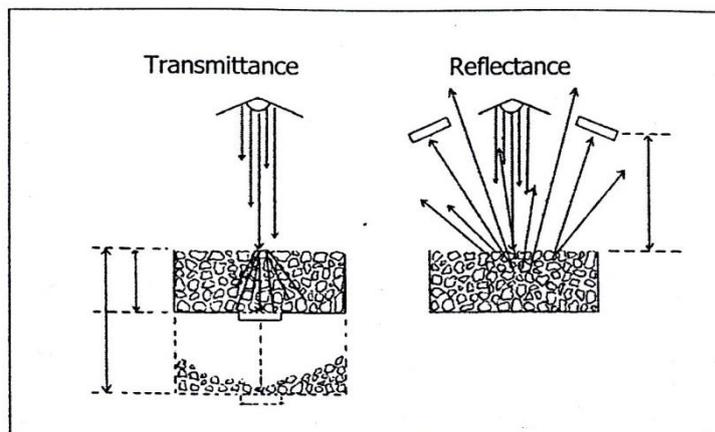
Williams (2007) อธิบายว่าเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี สามารถใช้ได้ทั้งแบบ reflectance และ transmittance เครื่องมือแบบ reflectance มักจะเรียกว่าเป็นเครื่อง NIR ส่วนเครื่องมือแบบ Transmittance จะอยู่ในส่วนของเครื่อง NIT เครื่องมือแบบ reflectance จะมีแหล่งกำเนิดแสงและ detector อยู่ภายในและอยู่ด้านเดียวกับตัวอย่าง สำหรับเครื่องมือแบบ transmittance แสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงจะผ่านหรือแพร่ (diffuse) แล้ว detector จะเป็นตัวรับแสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่าง ภาพที่ 2.4 แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างเครื่องมือแบบ reflectance และแบบ transmittance



ภาพที่ 2.4 การออกแบบเครื่องมือแบบพื้นฐาน A = light source; B = wavelength selection system; C = detector; D = computer; S = sample Williams (2007)

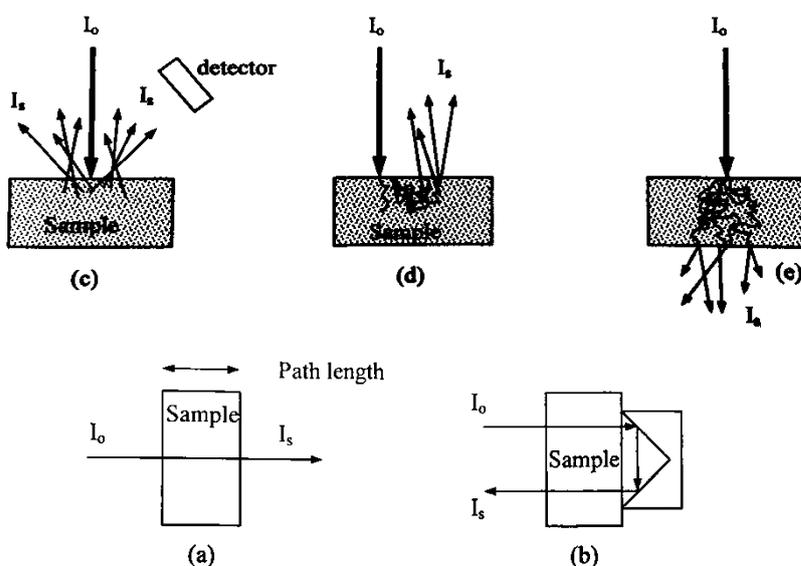
ภาพที่ 2.5 แสดงความแตกต่างของ path length ระหว่างเครื่องมือแบบ reflectance และแบบ transmittance ซึ่ง path length คือระยะทางระหว่างผิวหน้าของตัวอย่างกับ detector และเป็นค่าคงที่ที่สำคัญสำหรับเครื่องมือแบบ reflectance ส่วนเครื่องมือแบบ transmittance นั้น path length จะขึ้นอยู่กับ

ชนิดของวัสดุและการตั้งค่าที่เหมาะสมระหว่างการพัฒนาแบบจำลอง ค่าลิเบรชัน (calibration model) Williams (2007)



ภาพที่ 2.5 ความแตกต่างของ path length ระหว่างเครื่องมือแบบ transmittance และแบบ reflectance Williams (2007)

สำหรับการวัดด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเริ่มได้รับการยอมรับว่าเป็นเทคนิคที่มีความเฉพาะตัวเมื่อ Karl Norris ได้เสนอว่าการวัดสเปกตรัม NIR สามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลของปริมาณแสงที่สะท้อนแบบแพร่ (diffuse reflectance) จากตัวอย่างของแข็งแทนที่จะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากแสงที่ส่องผ่านซึ่งสัญญาณจะอ่อน ซึ่งปัจจุบันวิธีการวัดสะท้อนแบบแพร่มักมีการใช้มากที่สุด ภาพที่ 2.6 แสดงแบบวิธีการวัดด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี



ภาพที่ 2.6 แบบวิธีการวัดด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี a. การส่องผ่าน (transmittance) b. การส่องผ่านสะท้อน (transflectance) c. การสะท้อนแบบแพร่ (diffuse reflectance) d. อินเทอร์แอคแตนซ์ (interactance) e. การส่องผ่านตัวอย่างที่มีการกระเจิงแสง (transmittance through

scattering medium) (I_o = incident light, I_s = light comes from the sample) Pasquini (2003)

2.3.3 พื้นฐานของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

รังสีอินฟราเรดย่านใกล้ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1800 โดย Sir Frederick William Herschel โดยศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความร้อน (heating effect) ในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ของแถบสเปกตรัมที่เกิดจากการแยกแสงด้วยแท่งปริซึม พบว่าผลกระทบของความร้อนเกิดขึ้นสูงสุดในแถบแสงที่อยู่ถัดไปจากแสงสีแดง (red end) แต่ไม่สามารถมองเห็นสเปกตรัม (spectrum) ได้ เรียกช่วงรังสีที่เขาค้นพบว่า รังสีอินฟราเรด (infrared radiation) (ภาพร 2555) ซึ่งความหมายครอบคลุมช่วงความยาวคลื่น 780 – 2500 nm Nicolai *et al.* (2007) เป็นการเกิดอันตรกิริยายานโอเวอร์โทน (overtone) หรือคอมบิเนชัน (combination)

2.3.3.1 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของตัวอย่าง

เมื่อรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ผ่านเข้าไปยังตัวอย่าง รังสีจะเกิดอันตรกิริยา (interaction) ด้วยความถี่ที่มีค่าเฉพาะ (specific frequency) ของพันธะในโมเลกุล รังสีบางส่วนจะเกิดการสะท้อน (reflection) บางส่วนจะเกิดการดูดซับ (absorption) เอาไว้ และบางส่วนจะผ่านออกมา (transmission) Nicolai *et al.* (2007) ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) ความเข้มแสงของหนึ่งความยาวคลื่นที่ส่องผ่านไปตัวอย่าง (I) แล้ววัดความเข้มแสงที่ตกกระทบตัวอย่าง (I_o) ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์กับความหนาของตัวอย่าง (b) และความเข้มข้นของสาร (c) Osborne, Fearn, Hindle, (1993)

$$\log(I_o/I) = abc \quad (2.1)$$

เมื่อ $\log(I_o/I)$ คือ ค่าดูดกลืนแสง (A)

a คือ ค่าโมลาร์แอบซอร์ปทิวิตี (molar absorptivity) ในหน่วย $\text{dm}^3\text{cm}^{-1}\text{g}^{-1}$

b คือ ความหนาของตัวอย่างในหน่วย cm

c คือ ความเข้มข้นของสารในหน่วย หน่วย g^{-1}dm^3 หรือ mol L^{-1} หรือ molar

2.3.3.2 องค์ประกอบของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

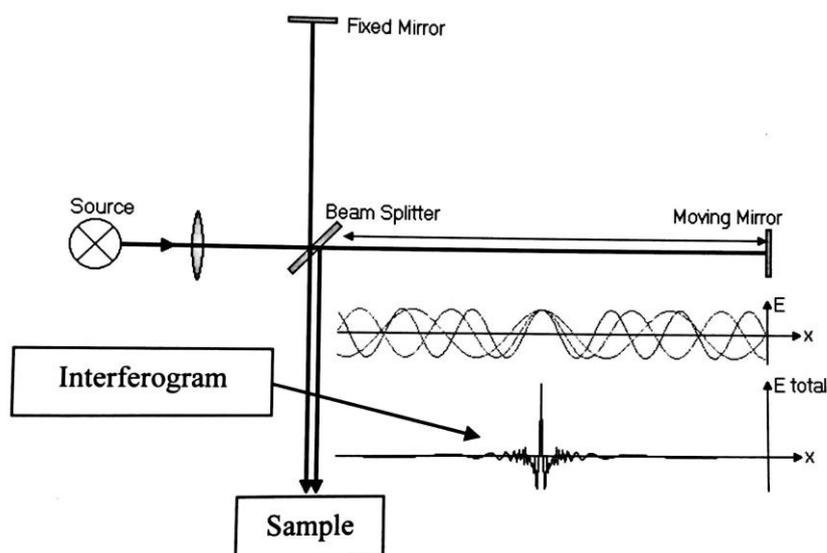
เครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง (light source) อุปกรณ์แยกลำแสงเป็นแต่ละความยาวคลื่นหรือโมนโครเมเตอร์ (monochromater) ช่องใส่ตัวอย่าง (sample cell) ตัวตรวจวัด (Detector) และ คอมพิวเตอร์

1. แหล่งกำเนิดแสง (light source) แหล่งกำเนิดแสงที่ให้ช่วงคลื่นเนียร์อินฟราเรด ส่วนใหญ่จะใช้หลอดทังสเตนฮาโลเจน (Tungsten halogen) เพราะราคาถูก อายุการใช้งานนาน ให้แสงคงที่สม่ำเสมอ (ปานมนัส 2556) มีช่วงคลื่น Near Ultraviolet จนถึงอินฟราเรด จะให้ความยาวคลื่นครอบคลุมตั้งแต่ 300-2500 nm Wikipedia. “Halogen lamp.” (2015) นอกจากนี้ยังใช้ Light Emitting Diodes (LED) เป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยค่าความยาวคลื่นที่ได้จะขึ้นกับสารที่ใช้ทำตัว LED อย่างไรก็ตาม LED ไม่สามารถให้ความยาวคลื่นในช่วง 1,700-2,500 nm ได้ ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมนำไปใช้งาน แต่ก็เหมาะสำหรับเครื่องมือแบบพกพาเพราะต้องการกำลังไฟฟ้าน้อย มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและพลังงานของผลลัพท์ที่ได้ก็ไม่เพิ่มสูงขึ้นแม้จะมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของแหล่งกำเนิดแสง (นิพนธ์ 2545)

2. อุปกรณ์แยกลำแสงเป็นแต่ละความยาวคลื่นหรือโมนโครเมเตอร์ (monochromater) เป็นส่วนที่ใช้แยกความยาวคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงซึ่งเป็นแสงที่มีหลายๆความยาวคลื่น (polychromatic wavelength) ให้เป็นแถบแสงในช่วงแคบๆ หรือเป็นความยาวคลื่นเดี่ยว (monochromatic wavelength) ปัจจุบันโมนโครเมเตอร์จะใช้แบบเกรตติง (grating) สะท้อนแสงซึ่งมีลักษณะเป็นร่องเล็กๆ ขนานกันจำนวนมาก แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะตกกระทบลงบนผิวหน้าของร่อง แล้วสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เฉพาะความยาวคลื่นที่เราเลือกเท่านั้นจึงจะผ่านช่องแสงออก (exit slit) ไปสู่สารตัวอย่าง (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้อ มหาวิทยาลัยมหิดล สีและแสง การวัดการดูดกลืน)

3. อินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (interferometer) เป็นอุปกรณ์เลือกความยาวคลื่นแสงโดยมีหลักการคือ แสงแต่ละความยาวคลื่นจะถูกแยกเป็นสองลำแสงตั้งฉากกันด้วยอุปกรณ์แยกลำแสง (beam splitter) ลำแสงหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับด้วยกระจกที่อยู่กับที่ (fixed mirror) มาพบกับแสงอีกลำหนึ่งที่ถูกสะท้อนด้วยกระจกที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมา (moving mirror) ลำแสงทั้งสองจะมีทางเดินแสงทั้งที่เท่ากันและแตกต่างกันเป็นลำดับตามจังหวะการเคลื่อนที่ของกระจกที่เคลื่อนกลับไปกลับมาถ้าลำแสงทั้งสองสะท้อนและเดินทางมาพบกันโดยมีทางเดินแสงที่ทำให้เฟสเท่ากันจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (constructive interference) ทำให้ความเข้มแสงสูงที่สุด แต่ถ้าทางเดินแสงทั้งสองพบกันในจังหวะที่มีเฟสไม่เท่ากันแสงจะเกิดการแทรกสอดแบบทำลาย (destructive interference) ความเข้มแสงที่รวมกันจะน้อยกว่าลำแสงเดี่ยวเป็นลำดับ ดังนั้นการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาด้วยความเร็วคงที่ของกระจกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่วัดได้เป็นแบบคลื่นไซน์ที่มีความถี่ค่าหนึ่งโดยความถี่ของคลื่นไซน์จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงเนื่องจากระยะเวลาที่เกิดแทรกสอดแบบทำลายและแบบเสริมจะแตกต่างกันตามความยาวคลื่นเมื่อนำระยะเคลื่อนที่ของกระจกมาพลอตในแกนแนวนอนและความเข้มแสงแต่ละความยาวคลื่นมาพลอตในแนวตั้งจะได้กราฟเหมือนกับคลื่นไซน์ (sine wave) และเมื่อนำค่าความเข้มแสงดังกล่าวของทุกความ

ยาวคลื่นมาพลอตรวมกันจะได้อินเทอร์เฟอโรแกรม (interferogram) ดังแสดงในภาพที่ 3.4 เมื่อนำไปผ่านกระบวนการฟูรีเยอร์ทรานส์ฟอร์มจะได้สเปกตรัม (อนุพันธ์ 2558)



ภาพที่ 2.7 ไดอะแกรมการทำงานของฟูรีเยอร์ทรานส์ฟอร์มสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (อนุพันธ์ 2558)

4. ช่องใส่ตัวอย่าง (sample cell) จะต้องได้รับการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบของการวิเคราะห์และปริมาณของอนุภาคที่ใช้วิเคราะห์ เซลล์ (cell) สำหรับใส่ตัวอย่างจะต้องทำจากวัสดุที่ยอมให้แสงในช่วงเนียร์อินฟราเรดสามารถทะลุผ่านได้ เช่น คิวทซ์หรือแก้ว และมีระยะทางเดินของแสงที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่าง (นิพนธ์ 2545)

5. ตัวตรวจวัด (detector) การเลือกตัวตรวจวัดนั้นขึ้นอยู่กับช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการตรวจวัด เช่น ซิลิคอน (Si) เหมาะกับแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้และเนียร์อินฟราเรด ตั้งแต่ช่วง 400-1,100 nm ส่วน PbS (Lead sulphide) หรือ InGaAs (Indium Gallium Arsenide) ใช้ที่ช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 nm และ PbS ควบคู่กับ Silicon photodiodes จะใช้ในช่วงเนียร์อินฟราเรด (400-2600 nm) (ปานมนัส 2556)

2.3.3.3 การทำงานของเครื่อง เมื่อวางวัตถุที่บรรจุอยู่ในภาชนะที่มีส่วนของคิวทซ์หรือแก้ว แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะผ่านโมโนโครเมเตอร์ทำให้มีความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาแล้วส่องผ่านไปยังวัตถุ เมื่อแสงตกกระทบวัตถุ แสงจะมีการเคลื่อนผ่านวัตถุ และสามารถตรวจวัดแสงที่สะท้อนกลับออกมาได้ แต่ภาพจะแสดงค่าออกมาได้ทั้งค่าการดูดซับ (absorbance) หรือค่าการสะท้อนกลับ (reflectance) ซึ่งสเปกตรัมที่ได้จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับ (ค่าที่ได้จากการแปลงค่าแสงที่สะท้อนกลับ ($\log 1/R$)) และความยาวคลื่น

2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม (Factors affecting NIR spectra)

1. ขนาดอนุภาคของตัวอย่าง (particle size) ตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน จะทำให้ได้เส้นสเปกตรัมที่แตกต่างกันด้วย โดยตัวอย่างขนาดเล็กสามารถสะท้อนแสงได้ดีกว่าตัวอย่างขนาดใหญ่ ฉะนั้นค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมตัวอย่างที่มีขนาดเล็กจึงมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ Osborne *et al.* (1993)

2. ความชื้น (moisture) ตัวอย่างที่มีความชื้นสูงจะมีค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมสูงกว่าตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำ จากการศึกษานี้ของ Osborne *et al.* (1993) พบว่าสเปกตรัมของข้าวสาลีก่อนอบและหลังอบแห้ง จะเห็นพีคของน้ำหายไปและค่าการดูดกลืนแสงลดลงทั้งสเปกตรัม เนื่องจากตัวอย่างแห้งสะท้อนแสงได้มากกว่าตัวอย่างเปียก

3. อุณหภูมิของตัวอย่าง (sample temperature) ตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างเดียวกัน แต่อุณหภูมิในตัวอย่างแตกต่างกันก็อาจทำให้ได้เส้นสเปกตรัมที่ต่างกัน เมื่อวัดผลพีคที่อุณหภูมิ 3 ระดับ พบสเปกตรัมมีความแตกต่างในช่วงการดูดกลืนแสงของน้ำที่พีค 970 นาโนเมตร เนื่องจากอุณหภูมิของตัวอย่างจะมีผลโดยตรงต่อโมเลกุลของน้ำ ซึ่งความแตกต่างของสเปกตรัมนี้จะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน แต่สามารถส่งผลกระทบต่อความแม่นยำสมการได้มาก Kawano, Abe (1995)

4. การบรรจุ (packing) ตัวอย่างในเซลล์บรรจุที่มีการอัดตัวแน่นมาก ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างตัวอย่างน้อย มีการสะท้อนกลับของแสงมาก ค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมจะมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่มีการอัดตัวกันน้อย Williams, Norris (2001)

2.4 PLS Modelling

2.4.1 การแปลงหรือการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัม (spectrum pretreatment)

การแปลงข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ NIR เพื่อลดอิทธิพลของปัจจัยดั่งที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สเปกตรัมมีความแตกต่างกัน ส่งผลต่อสมการที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำในการทำนายลดลง ดังนั้นการแปลงข้อมูลสเปกตรัมโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ถือเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้ขั้นตอนการสร้างสมการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ในการแปลงข้อมูลสเปกตรัมได้แก่ (ปานมนัส และคณะ 2556)

1) วิธีอนุพันธ์ (derivative) เป็นการหาความชันของเส้นสเปกตรัม เพื่อแก้ปัญหาพีคที่มีฐานกว้าง (broad peak) เนื่องจากการซ้อนทับกันของพีค (overlapping) และอิทธิพลจากการยกตัวของเส้นสเปกตรัม (base line shift) ที่เกิดจากการกระเจิงแสง (scattering light) เมื่อแสงตกกระทบที่ตัวอย่างทำให้แสงเปลี่ยนทิศทาง ซึ่งมีผลต่อการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากขนาดของตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ การอัดตัว และการกระจายตัวของตัวอย่างภายในเซลล์บรรจุที่แตกต่างกัน รวมทั้งความชื้นภายในตัวอย่างที่แตกต่างกันด้วย Williams, Norris (2001) โดยการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 1 (first

derivative) สามารถลดปัญหาการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแกน Y ทำให้เส้นสเปกตรัมเลื่อนมาชิดกัน แต่พีกของสเปกตรัมยังมีฐานกว้าง จึงไม่สามารถแยกพีกออกจากกันอย่างชัดเจนได้ อีกทั้งวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 ให้ความหมายเป็นค่าความชันของสเปกตรัมแต่ละความยาวคลื่นซึ่งทำให้แปลความหมายได้ยาก แต่การแปลงข้อมูลด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 (second derivative) สามารถลดผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแกน Y ที่ชัดเจนกว่าวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 และแยกพีกสเปกตรัมที่มีการซ้อนทับกันออกจากกันได้อย่างชัดเจน ทำให้ทราบตำแหน่งความยาวคลื่น แต่สเปกตรัมมีลักษณะหัวกลับลงมาด้านล่าง Osborne, Feam, Hindle (1993) ดังนั้น การคำนวณการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 จึงเป็นที่นิยมมากกว่าวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 โดยการเพิ่มอันดับของอนุพันธ์สูงขึ้น ก็จะได้สเปกตรัมที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นข้อมูลที่ดีในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ แต่การทำอนุพันธ์ที่สูงเกินไปทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณรบกวนกับสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ลดลง เนื่องจากแถบสัญญาณรบกวนมักมีรูปร่างแคบชัน ดังนั้นเมื่อแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์สเปกตรัมที่ได้ของสัญญาณรบกวน จึงมีแอมพลิจูด (amplitude) เด่นชัดมากยิ่งขึ้นจนสามารถรบกวนการวิเคราะห์ได้

2) multiplicative scatter correction (MSC) เป็นการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสเปกตรัม เพื่อลดอิทธิพลของการกระเจิงของแสงที่เกิดจากสาเหตุที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการลดค่าผิดพลาด การใช้ NIRS แบบวัดการสะท้อนกลับของแสง เพื่อหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดพืชโดยแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี MSC พบว่ามีค่าผิดพลาดของสมการต่ำกว่าสมการของสเปกตรัมดั้งเดิม (original spectrum) (ปานมนัส และคณะ 2556)

3) smoothing เป็นวิธีการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมเพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก ทำให้เส้นสเปกตรัมราบเรียบต่อเนื่องขึ้น มี 2 วิธีนิยมใช้คือ

3.1 running mean smooth or N-point smooth) เป็นการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ มีข้อดีคือเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด โดยมีการแทนค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความยาวคลื่นด้วยค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีจุดศูนย์กลางของช่วงความยาวคลื่นตรงกับจุดที่ถูกแทนที่ ต่อจากนั้นเลื่อนช่วงไปหนึ่งความยาวคลื่น แล้วคำนวณซ้ำจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ซึ่งสามารถลดปัญหาของสัญญาณรบกวนต่อค่าการดูดกลืนแสง โดยจะได้สเปกตรัมที่มีลักษณะเหมือนสเปกตรัมดั้งเดิม แต่จะเรียบสม่ำเสมอมากกว่า

3.2 Savitzky-Golay smooth เป็นวิธีที่นิยมใช้มาก ใช้ในกรณีที่ข้อมูลมีสัญญาณรบกวนมาก ต้องการทำให้สัญญาณเรียบและยังคงรูปร่างของสเปกตรัมเหมือนเดิม และรูปร่างของสเปกตรัมมียอดแหลมเป็นจำนวนมาก วิธีการนี้เริ่มจากการกำหนดช่วงความยาวคลื่น ($n=2m+1$) เหมือนวิธี Running mean smooth จากนั้นนำข้อมูลสเปกตรัม

ในช่วงที่กำหนดมาหาสมการพหุนามด้วยวิธี least square เพื่อให้ได้สมการที่ต่อเนื่อง และเป็นตัวแทนของข้อมูลในช่วงดังกล่าว เมื่อได้สมการแล้วนำมาคำนวณค่าสเปกตรัมที่จุดศูนย์กลางช่วง แล้วนำค่าที่คำนวณได้ไปแทนค่าสเปกตรัมเดิมที่จุดหรือความยาวคลื่น นั้น ค่าที่คำนวณได้จะใกล้เคียงกับค่าจริงมากขึ้น เนื่องจากสัญญาณรบกวนได้ถูกกำจัดออกไปแล้ว จากนั้นทำซ้ำโดยเลื่อนไปที่ช่วงความยาวคลื่นถัดไปจนตลอดทุกช่วงความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมข้อมูล (ปานมนัส และคณะ 2556)

4) standard normal variate (SNV) and detrending เป็นวิธีการกำจัดอิทธิพลของการกระเจิงแสงอีกวิธีหนึ่ง สำหรับการวัดด้วยวิธีการสะท้อนแบบแพร่ (diffuse reflectance) ซึ่งโดยทั่วไปจะทำให้เกิดสเปกตรัมที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของอนุภาคในตัวอย่าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการกระเจิงแสงที่สูงและเป็นสาเหตุให้เกิดความแปรปรวนส่วนใหญ่ในข้อมูลที่วัดได้ การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (standard normal Variate; SNV) โดยวิธีนี้มักจะใช้คู่กับการปรับแนวโน้มของเส้นสเปกตรัม (detrending) โดยการใช้การปรับแก้ด้วย SNV ก่อนแล้วจึงตามด้วย detrending หรือการลดความโน้มเอียงเส้นสเปกตรัม โดยผลจากการปรับแก้ด้วยวิธีนี้จะคล้ายคลึงกับการปรับแก้ด้วยวิธี MSC แต่จะแตกต่างกันตรงวิธี SNV ไม่จำเป็นต้องใช้สเปกตรัมอ้างอิงเหมือนวิธี MSC ที่ต้องใช้สเปกตรัมเฉลี่ยเป็นค่าอ้างอิง (วิชัย และคณะ 2555)

5) normalization เป็นวิธีการปรับแก้กลุ่มของสเปกตรัมเพื่อให้ได้สเปกตรัมมีจุดสำคัญที่เด่นชัด และเป็นการกำจัดความแปรปรวนอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งจะช่วยให้สามารถศึกษาทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้ดีขึ้น หรือเป็นการลดความซับซ้อนของข้อมูล ช่วยให้นำข้อมูลสเปกตรัมไปทำสมการทำนาย (calibration equation) ได้ง่ายขึ้น (ปานมนัส และคณะ 2556)

วิธีการแปลงข้อมูลสเปกตรัมที่ดีที่สุดก็คือ วิธีที่ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้สมการทำนายที่มีความสามารถในการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้ใกล้เคียงที่สุด อย่างไรก็ตามไม่มีกฎตายตัวแน่นอนสำหรับการตัดสินใจเลือกวิธีที่จะใช้ในการแปลงข้อมูล วิธีที่ดีที่สุดคือ การลองผิดลองถูกในการทดลองใช้แต่ละวิธีจนกว่าจะได้สมการทำนายที่แม่นยำสุด โดยต้องเข้าใจความหมายและคำนึงถึงข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีให้ชัดเจน (ปานมนัส และคณะ 2556)

2.4.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis)

การวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยทั่วไป ต้องมีการสร้างสมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (calibration equation developed) ในการสร้างสมการจำเป็นต้องมีกลุ่มตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการ ถดถอยเชิงเส้นระหว่างข้อมูลวิเคราะห์ทางเคมีกับข้อมูลสเปกตรัม กลุ่มตัวอย่างที่ดีจะต้องมีจำนวนตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์อย่างพอเพียงทั้งตัวอย่างในปัจจุบันและตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ในอนาคต โดยเฉพาะปริมาณองค์ประกอบทางเคมี จะต้องมีการครอบคลุมปริมาณทั้งต่ำสุดและสูงสุดของตัวอย่าง โดยมีการสุ่มตัวอย่าง (sampling) ที่ถูกต้อง เพียงพอและเป็นตัวแทนที่ดีของประชากร การสุ่มตัวอย่าง

ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการที่จะได้สมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ดี ทำให้ค่าผิดพลาดที่ได้จากการทดลองลดลง นอกจากนี้ควรพิจารณาวิธีวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งควรเป็นวิธีที่เป็นมาตรฐานและมีความแม่นยำเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องเนื่องจากส่งผลต่อสมการที่สร้างขึ้นต่อไป Kawano, Abe (1995) โดยความแม่นยำของ NIRS ขึ้นกับความแม่นยำของวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ สำหรับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์จะต้องทำการเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับตัวอย่างที่จะนำไปวัดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ NIR ในอนาคต (วิชัย และคณะ 2555)

1. ขั้นตอนการสร้างสมการ (calibration equation) แบ่งได้ 2 วิธีหลักคือ

1.1 wavelength selected method เป็นวิธีการที่ต้องเลือกข้อมูลแต่ละความยาวคลื่นหนึ่งๆ ที่มีความสัมพันธ์กับค่าวิเคราะห์ทางเคมีโดยการพิจารณาจากข้อมูลทางสถิติ ดังนี้

1.1.1 single linear regression (SLR) เป็นการสร้างสมการที่ประกอบด้วยตัวแปรสองชนิดที่มีความสัมพันธ์กัน คือ ตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) SLR เป็นการเลือกพิจารณาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างที่ความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียว (single wavelength) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย NIRS เป็นไปไม่ได้ที่จะใช้ความยาวคลื่นใดความยาวคลื่นหนึ่งในการหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้ เนื่องจากตัวอย่างประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิดด้วยกัน ดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งมีผลต่อสเปกตรัมและส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำของสมการ ดังนั้นจึงต้องใช้ข้อมูลจากหลายความยาวคลื่น (multiple wavelengths) เพื่อทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของผลผลิต

สมการ SLR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Y = b_0 + b_1x \quad (2.2)$$

เมื่อ $Y =$ ค่าองค์ประกอบทางเคมี

$X =$ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นตำแหน่งเดียว

$b_0 =$ ค่าคงที่ ณ จุดตัดแกน Y เมื่อ X มีค่าเท่ากับศูนย์

$b_1 =$ ค่าคงที่การถดถอย

1.1.2 multiple linear regression (MLR) เป็นการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่นำตัวแปรอิสระ (X) มากกว่าหนึ่งตัว มาใช้ในการประเมินค่าตัวแปรตาม (Y) ในการพิจารณาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างจากหลายความยาวคลื่นด้วยการใช้เทคนิค MLR ในการสร้างสมการ โดยใช้ตัวแปรอิสระที่ได้จากการเลือกความยาวคลื่นมากกว่าหนึ่งความยาวคลื่นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม การสร้างสมการด้วยวิธี MLR มีข้อเสียคือ ในการคัดเลือกตัวแปรอิสระหรือความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดมาสร้างสมการอาจได้ข้อมูลที่ไม่ครอบคลุมมากพอ ทำให้ค่าที่ทำนายได้จากวิธีนี้ มีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่แท้จริง Osborne, Fearn, Hindle (1993)

สมการ MLR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 \dots + b_nX_n \quad (2.3)$$

เมื่อ $X_1, X_2, \dots, X_n =$ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น n ตำแหน่ง

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ความยาวคลื่น n ตำแหน่ง

full spectrum method เป็นการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม จากความยาวคลื่นทั้งหมดในสเปกตรัม (full spectrum) มาสร้างสมการ โดยทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) และสร้างตัวแปรกลุ่มใหม่ขึ้นมา วิธีทางสถิติที่นิยมใช้ได้แก่ principle component regression (PCR) เป็นการวิเคราะห์ผล โดยทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) ด้วยการแบ่งกลุ่มตัวแปรอิสระเดิมที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรใหม่หรือองค์ประกอบที่เรียกว่าแฟกเตอร์ (factor score; F) หรือ principal component (PC) แล้วจึงนำค่าแฟกเตอร์ไปสร้างสมการเชิงถดถอย ก่อนการนำมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม (Y) ที่ได้จากวิธีวิเคราะห์มาตรฐาน เพื่อสร้างสมการทำนายค่าตัวแปรตาม (Y)

สมการ PCR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Y = b_0 + b_1PC_1 + b_2PC_2 \dots + b_nPC_n \quad (2.4)$$

เมื่อ PC_1, PC_2, \dots, PC_n = ค่าตัวแปรใหม่ที่ตำแหน่ง n ตัวแปร

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่วงน้ำหนักที่ตำแหน่ง n ตัวแปร

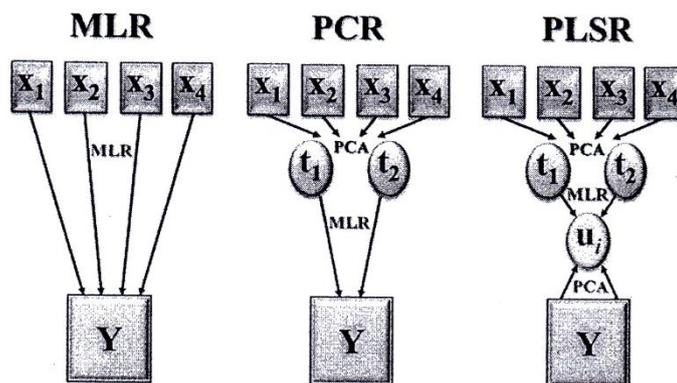
1.1.3 partial least square regression (PLSR) เป็นเทคนิคในการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) เช่นเดียวกับวิธี PCR แต่จะแตกต่างกันในช่วงจัดกลุ่มการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) โดยการสร้างแฟกเตอร์นั้นจะมีการนำข้อมูลตัวแปรตาม (Y) เข้ามารวมในการสร้างแฟกเตอร์ด้วย ซึ่งในการหาค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นมีน้ำหนัก (loading weight; W) แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ได้จากวิธีทางเคมีที่นำมาหาความสัมพันธ์กัน ทำให้สมการที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้

สมการ PLSR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Y = b_0 + b_1F_1 + b_2F_2 \dots + b_nF_n \quad (2.5)$$

เมื่อ F_1, F_2, \dots, F_n = ค่าตัวแปรใหม่ที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูล Y ที่ตำแหน่ง n ตัวแปร

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่วงน้ำหนักที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูล Y ที่ตำแหน่ง n ตัวแปร

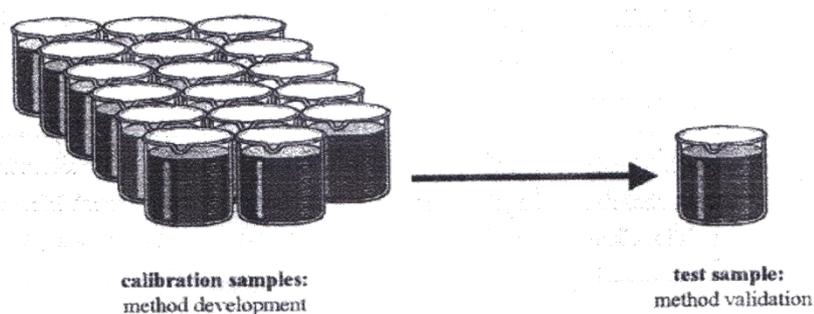


ภาพที่ 2.8 การทำแบบจำลองแคลิเบรชันด้วยวิธี MLR, PCR และ PLS Cho (2556)

Cho (2556) ได้อธิบายภาพที่ 2.8 ซึ่งแสดงการทำแบบจำลองแคลิเบรชันด้วยวิธี MLR, PCR และ PLS โดยเมื่อนำตัวอย่างมาสแกนได้สเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด ซึ่งจะได้ข้อมูลเชิงแสง เช่น ค่าการดูดซับคลื่นที่ความยาวคลื่นใดๆ ได้แก่ $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ หลังจากนั้นนำค่า X_n เหล่านั้น มาทำ PCA เพื่อลดจำนวนตัวแปรเดิมลงโดยการสร้างตัวแปรใหม่ คือ t_1 และ t_2 หลังจากนั้นจะนำ ตัวแปรใหม่ที่ได้มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง MLR กับตัวแปร U_i ซึ่งได้จากการทำ PCA ของตัวแปร Y (ค่าทางเคมี)

หลังจากที่ได้สร้างแบบจำลองที่ใช้ทำนายเรียบร้อยแล้ว จะต้องทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองนั้นก่อนนำไปใช้จริง ซึ่งวิธีการทดสอบที่นิยมมีด้วยกัน 2 วิธี คือ

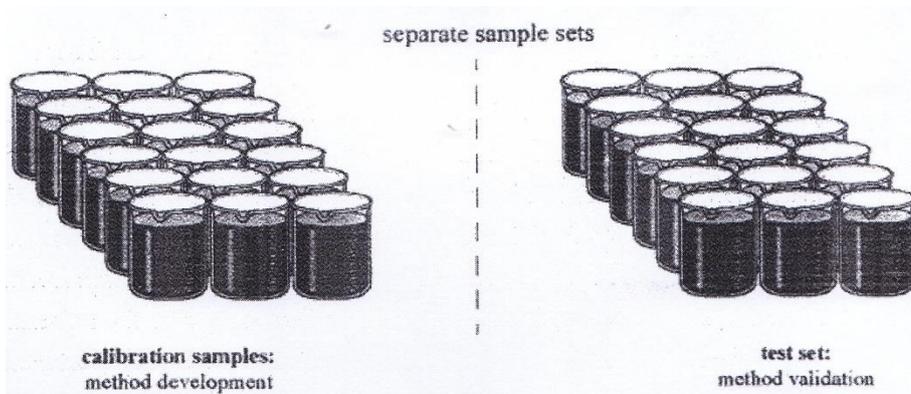
1) การพิสูจน์ภายใน (Internal validation) หรือการพิสูจน์แบบไขว้ (full cross validation) (ปานมนัส และคณะ 2556) การพิสูจน์ภายในนั้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบแบบจำลองก็คือตัวอย่างชุดมาตรฐานทั้งหมดที่ใช้สร้างแบบจำลองนั่นเอง โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ ตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐาน จากนั้นใช้ตัวอย่างมาตรฐานที่เหลือทำการสร้างแบบจำลอง นำแบบจำลองที่ได้ประเมินค่าทางเคมีของตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ที่ตัดออกไป (ภาพที่ 2.9) หลังจากนั้นใส่ตัวอย่างมาตรฐานที่ 1 กลับคืน ขั้นตอนต่อไปตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 2 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐาน ทำขั้นตอนข้างต้นซ้ำจนกระทั่งครบทุกตัวอย่าง จากนั้นหาค่า root mean square error of cross validation (RMSECV)



ภาพที่ 2.9 ชุดตัวอย่างในการ full cross validation Cozen (2006)

full cross validation

2) การทดสอบผลการประเมิน (prediction testing) วิธีนี้เป็นการพิสูจน์ภายนอก (external validation) โดยการนำตัวอย่างชุดใหม่มาทำการวิเคราะห์ในสภาวะการทดลองเช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐาน เรียกชุดตัวอย่างที่นำมาทดสอบแบบจำลองนี้ว่า ชุดทดสอบ (testing set) ดังภาพที่ 2.10 วิธีการเตรียมตัวอย่างทำเช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐานทุกขั้นตอน แต่ที่ต้องระวังก็คือปริมาณค่าทางเคมีที่จะหาในตัวอย่างชุดทดสอบต้องอยู่ในช่วงชุดมาตรฐาน หลังจากได้สเปกตรัมของชุดทดสอบแล้ว ให้นำข้อมูลที่ได้ออกไปหาค่าทางเคมีจากแบบจำลอง พิจารณาจากค่าทางสถิติที่ได้เพื่อประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งค่าทางสถิติที่ควรพิจารณา ได้แก่ ค่าความคลาดเคลื่อน (bias) และค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการทำนาย (Root mean square error of prediction; RMSEP)



ภาพที่ 2.10 ชุดตัวอย่างในการ Prediction testing Cozen (2006)

2.4.3 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างแบบจำลอง

1. สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (coefficient of correlation, R) Williams (2007)
 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R) แสดงระดับซึ่งข้อมูล 2 ชุด (ข้อมูลตัวเลข X และ Y ในที่นี้ข้อมูล X คือข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิง ข้อมูล Y คือข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีเนียร์อินฟราเรด-สเปกโทรสโกปี) สอดคล้องซึ่งกันและกัน ความสอดคล้องที่สมบูรณ์จะไม่มี ความแตกต่างกันเลยระหว่าง 2 ชุด

ข้อมูล ผลของค่า R จะเท่ากับ 1.00 ในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ และ X และ Y อาจจะมี ความสัมพันธ์เป็นเชิงบวกหรือลบก็ได้ โดยคำนวณได้จากสมการ

$$R = \frac{\Sigma(X*Y)-[(\Sigma X*\Sigma Y)/N]}{(\{\Sigma X^2-[(\Sigma X)^2/N]\}*\{\Sigma Y^2-[\Sigma Y^2/N]\})^{1/2}} \quad (2.6)$$

เมื่อ X คือ ค่าที่ได้จากการทดสอบทางเคมี
 Y คือ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIR
 N คือ จำนวนตัวอย่าง

2. สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) Williams (2007) แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดยความแปรปรวนในข้อมูล Y ค่าของ R^2 จะเป็นบวกเสมอ เช่น ถ้า $R = 0.97$ แล้ว $R^2 = 0.941$ หมายความว่า 94.1 เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนในข้อมูล X และ 5.9 เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนในข้อมูล X เกิดขึ้นจากตัวแปรอื่น เช่น การเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดลองอ้างอิงและอื่นๆ ค่า R^2 เป็นบวกเสมอโดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของ R ในทางปฏิบัติ R^2 ให้ข้อมูลและใช้กันมากกว่า R การแปลความหมายของค่า R และ R^2 (ปานมนัส และคณะ 2556) แสดงดังตารางที่ 2.3 และคำนวณได้จากสมการ

$$R^2 = \left[1 - \frac{SSE}{\Sigma(x-\bar{x})} \right] \quad (2.5)$$

เมื่อ $SSE = \Sigma(x - Y)^2$ (2.7)
 \bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบทางเคมี

ตารางที่ 2.3 การแปลความหมายของค่า R และ R^2 (ปานมนัส และคณะ 2556)

R	R^2	การแปลความหมาย
Up to +/-0.5	Up to 0.25	ไม่สามารถใช้ในNIR calibration
+/-0.51-0.70	0.26-0.49	เป็นความสัมพันธ์ที่แย่ ควรหาเหตุผล
+/-0.71-0.80	0.50-0.64	ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกอย่างหยาบๆ
+/-0.81-0.90	0.66-0.81	ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกและการประมาณค่าอย่างหยาบๆ
+/-0.91-0.95	0.83-0.90	ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย
+/-0.96-0.98	0.92-0.96	ใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
+/-0.99+	0.98+	ดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้

3. ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการทำนาย (root meansquared error of prediction; RMSEP) Williams (2007) RMSEP เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพของแบบจำลอง การคำนวณค่า RMSEP ได้รวมค่า Bias ไว้ด้วย ถ้าไม่มีค่า bias ค่า SEP และ RMSEP จะมีค่าเท่ากัน มีการใช้ RMSEP มากกว่า SEP แต่การรายงานผลโดยใช้ SEP กับ Bias แสดงถึงความแม่นยำของการทำนายได้ดี เนื่องจาก RMSEP เกี่ยวข้องกับ Bias แต่ไม่ได้แสดงขนาดและเครื่องหมายโดยคำนวณได้จากสมการ

$$\text{RMSEP} = \sqrt{\frac{\Sigma(X-Y)^2}{N-1}} \quad (2.8)$$

4. ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการประมาณ (Root mean square error of estimation; RMSEE) Cozen (2006) เป็นค่าที่ใช้วิเคราะห์ข้อผิดพลาดของชุดคาลิเบรชัน (Calibration) ไม่เหมาะในการใช้กับชุดทำนาย (Validation) สูตรการคำนวณ คือ

$$\text{RMSEE} = \sqrt{\frac{\text{SSE}}{N-R-1}} \quad (2.9)$$

เมื่อ R คือ จำนวนแพคเตอร์

5. อัตราส่วนระหว่างค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ratio of standard error of prediction to the standard deviation; RPD) ค่า RPD คือ อัตราส่วนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าทางเคมีกับค่าความผิดพลาดมาตรฐานการทำนายในชุดทดสอบ (SEP_{bias}) Cozen (2006) และค่า SEP_{bias} ควรต่ำกว่า SD มากๆ ซึ่งอัตราส่วนควรเท่ากับ 5 หรือมากกว่า บางกรณีตัวอย่างมีความสม่ำเสมอมาก ค่า SD จึงไม่สูง จึงทำให้ค่า RPD อาจจะไม่สูงตามไปด้วย ดังนั้น RPD เท่ากับ 2.5-3.0 ก็อาจแสดงถึงการวิเคราะห์ที่แม่นยำ ถ้า SD มีค่าเพียง 0.4-0.5 Williams (2007) การอธิบายผลของค่า RPD แสดงดังตารางที่ 2.4

$$\text{RPD} = \frac{\text{SD}}{\text{SEP}_{\text{bias}}} \quad (2.10)$$

$$\text{ซึ่ง } \text{SD} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \Sigma(X - \bar{X})^2} \quad (2.11)$$

$$\text{และ } \text{SEP}_{\text{bias}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \Sigma(X - Y - \text{bias})^2} \quad (2.12)$$

ตารางที่ 2.4 การอธิบายผลของค่า RPD และ RER Williams (2007)

RPD	RER	ความหมาย	การประยุกต์ใช้
0.0-2.3	ถึง 6	ไม่ดีเลย	ไม่แนะนำ
2.4-3.0	7-12	ไม่ดี	คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) แบบหยาบๆ
3.1-4.9	13-20	พอใช้	คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) ได้
5.0-6.4	21-30	ดี	ควบคุมคุณภาพได้
6.5-8.0	31-40	ดีมาก	ควบคุมกระบวนการได้
8.1+	41+	ดีเยี่ยม	ได้ทุกการประยุกต์ใช้

6. ความผิดพลาด (bias) (อิงชัย และปิติพร 2555)

bias คือ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดด้วยวิธีอ้างอิงและค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์ อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เป็นการวัดความแม่นยำโดยรวมของแบบจำลอง

$$\text{bias} = \frac{\Sigma(X-Y)}{N} \quad (2.13)$$

2.5 คุณสมบัติการรับประทานทุเรียน

2.5.1 เนื้อสัมผัส (texture)

เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์แต่ละอย่างแตกต่างกันไป และภายหลังการเก็บเกี่ยวการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสก็แตกต่างกันด้วย บางอย่างเปลี่ยนจากกรอบเป็นเหนียว บางอย่างเปลี่ยนจากแน่นแข็งเป็นนิ่มและบางอย่างจากเนื้อแห้งเป็นแฉะ ลักษณะที่ดีขึ้นอยู่กับผู้บริโภค การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสทำได้หลายวิธี เช่น 1. การวัดการเสียรูปทรง หรือ deformation test ซึ่งเป็นวิธีเลียนแบบการตรวจสอบความอ่อนนุ่มของผลไม้ของคนทั่วไป ซึ่งใช้มือบีบดูว่าผลไม้แข็งหรืออ่อนนุ่ม 2. เป็นการวัดลักษณะความแข็งหรืออ่อนนุ่มของเนื้อผลิตภัณฑ์โดยตรงเช่นเดียวกับการกัดและเคี้ยวบดด้วยปากและฟัน วิธีนี้มักใช้เครื่องมือที่มีลักษณะต่างๆ กดลงบนผลิตภัณฑ์จนทะลุเข้าไปในเนื้อแล้วอ่านค่าแรงที่ใช้จนทะลุ (จริงแท้ 2542)

เนื้อสัมผัส หมายถึง การตอบสนองของวัสดุต่อเนื้อสัมผัส แสดงถึงการต้านทานแรงต่อวัสดุ เนื้อสัมผัสเป็นสมบัติเชิงกลที่เกิดจากการตอบสนองของผลผลิตทางการเกษตรและอาหารต่อแรงที่กระทำ เช่น แรงที่เกิดจากการซ้อนทับกันของผักผลไม้หรือ แรงกระทำจากการบดเคี้ยวอาหารและอื่นๆ ตัวอย่างเนื้อสัมผัสของผลผลิตทางการเกษตรได้แก่ ความแน่นเนื้อ (firmness) ความแข็ง (hardness) ความยืดหยุ่น (elasticity) แรงที่จุดคราก (bio-yield force) และเนื้อสัมผัสของอาหารได้แก่ ความแน่นเนื้อ (firmness) ความนุ่ม (tenderness) ความเหนียว (toughness) ความเกาะตัวเอง (cohesiveness) และ ความยึดติด (adhesiveness) (ปานมนัส 2555)

2.5.2 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ผลไม้หลายชนิดสะสมอาหารในรูปของน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่ เช่น องุ่นและลำไย ยิ่งมีอายุมากขึ้นยิ่งมีการสะสมน้ำตาลมากขึ้น น้ำตาลในผลจึงเป็นดัชนีความบริบูรณ์และดัชนีการเก็บเกี่ยวที่ดี แต่ในผลไม้ประเภท climacteric ซึ่งจะสะสมอาหารในรูปของแป้งแล้วจึงเปลี่ยนเป็นน้ำตาล ภายหลังการวัดปริมาณน้ำตาลประเภทนี้จึงอาจสายเกินไปสำหรับการเก็บเกี่ยวแต่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพ การวัดปริมาณน้ำตาลอาจทำได้ง่าย เช่น ในแปลงใช้ hand refractometer วัดหาปริมาณ soluble solids จากน้ำคั้น ซึ่งหมายถึงปริมาณสารประกอบต่างๆที่ละลายน้ำได้ หรือปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ รวมทั้งกรดอินทรีย์ต่างๆ แต่ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาล ดังนั้นผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว มีกรดสะสมอยู่มากการวัด soluble solids อาจให้ค่าที่ไม่ถูกต้องนัก (จริงแท้ 2542)

2.5.3 สี (color) การเปลี่ยนแปลงของผลไม้เป็นดัชนีความบริบูรณ์ตามธรรมชาติที่เห็นได้ชัดเจนที่สุด และใช้เป็นดัชนีการเก็บเกี่ยวอย่างแพร่หลาย แต่การเปลี่ยนสีของผลไม้จะขึ้นเมื่อผลไม้เข้าสู่กระบวนการสุก สีจึงเป็นดัชนีที่เหมาะสมกับผลไม้ ผลไม้หลายอย่างไม่สามารถเก็บเกี่ยวก่อนการเปลี่ยนสีได้เช่น มังคุด เงาะ และ สตรอเบอรี่ ในผลไม้บางชนิดการเปลี่ยนสีในระยะที่เหมาะสมกับการเก็บเกี่ยวอาจไม่ชัดเจน อาจทำให้การเก็บเกี่ยวผิดพลาดได้ง่าย ส่วนเนื้อของผลไม้แม้ว่าจะไม่มีคลอโรฟิลล์ แต่มักมีการสร้างสีขึ้นในระยะเก็บเกี่ยว เช่นเดียวกัน เห็นได้ชัดในมะม่วง และทุเรียนผลไม้บางอย่างเนื้อผลมีการเปลี่ยนแปลงสีก่อนที่สีผิวจะเปลี่ยนแปลงดังนั้นการเปลี่ยนสีของเนื้อเป็นดัชนีความบริบูรณ์ได้เช่นเดียวกัน (จริงแท้ 2542)

การวัดค่าสีในระบบ CIELAB โดยใช้เครื่องวัดสี hunter lab colorimeter รายงานผลเป็น L ซึ่งเป็นค่าแสดงความสว่าง (ถ้าค่า L มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าวัตถุที่มีสีทึบแต่ถ้าค่า L เข้าใกล้ 100 แสดงว่าวัตถุมีสีขาวสว่างมาก) ค่า a แสดงสีแดงและสีเขียว (ถ้า a เป็นบวกวัตถุจะมีสีออกสีแดง แต่ถ้า a เป็นลบ วัตถุจะมีสีออกสีเขียว) ค่า b แสดงสีเหลืองและสีน้ำเงิน (ถ้าค่า b เป็นบวกวัตถุจะมีสีออกสีเหลืองแต่ถ้าค่า b เป็นลบวัตถุจะมีสีออกสีน้ำเงิน)

2.5.4 มวลแห้ง (dry matter) ลักษณะภายในของทุเรียนพันธุ์หมอนทองได้แก่เนื้อสีขาวปนเหลืองอ่อน ผิวเมล็ดสีครีมเป็นน้ำตาล และมีน้ำหนักเนื้อแห้งขั้นต่ำร้อยละ 32 มวลแห้ง เป็นดัชนีมาตรฐานชี้วัดความสุกแก่ของทุเรียนเพื่อใช้ประโยชน์ทางการค้า การอบแห้ง (drying) คือ การเอาน้ำออกจากวัสดุที่ต้องการทำให้ปริมาณน้ำในวัสดุนั้นลดลง (ความชื้นลดลง) คำนวณหา %MC และ %DM ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14

$$MC (\%) = \frac{(w_1 - w_2) \times 100}{w_1} \quad (2.14)$$

$$DM (\%) = 100 - (MC) \quad (2.15)$$