

## บทที่ 5 เครื่องมือ

### 5.1 แหล่งกำเนิดแสง

การแผ่รังสีความร้อนด้วยสเปกตรัมที่ต่อเนื่อง มักถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการวัดแบบ NIR ไม่มีแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้เพียงช่วง NIR อย่างเดียว แต่หากยังใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงของการวัดแบบอินฟราเรด หรือช่วงที่มองเห็นได้และช่วงอัลตราไวโอเลต [10]

#### 5.1.1 Thermal radiation

ค่า radiant divergence spectrum ( $W(\lambda)$ ) ของแหล่งกำเนิดแสงแบบวัตถุดำในอุดมคติ สามารถแสดงได้ตามสมการ

$$W(\lambda) = c_1 \lambda^{-5} / \{\exp(c_2 / \lambda T) - 1\} \quad (5.1)$$

โดยที่  $T$  คืออุณหภูมิ (K) ของวัตถุดำ  $\lambda$  คือความยาวคลื่น (นาโนเมตร)  $c_1 = 1.91 \times 10^{-12} \text{ W-cm}^2$  และ  $c_2 = 1.438 \text{ cm-K}$

##### 5.1.1.1 หลอดทั้งสแตนฮาโลเจน

หลอดไส้ทั้งสแตนบรจฮาโลเจนถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วงมองเห็นได้และอัลตราไวโอเลต และถูกใช้โดยทั่วไปเป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วง NIR หลอดไส้ทั้งสแตนทั่วไปที่ไม่ได้บรรจุฮาโลเจน (350-2500 นาโนเมตร) มีราคาถูก ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วงนี้ได้ คราฟโคที่วัสดุยังโปร่งใสในช่วง NIR อยู่ อย่างไรก็ตาม หลอดที่มีการบรรจุฮาโลเจนมีอายุการใช้งานที่นานกว่า อุณหภูมิและความเสถียรที่มากกว่า แหล่งจ่ายพลังงานที่ใช้ควรมีความเสถียร โดยทั่วไปจะใช้แหล่งจ่ายไฟ DC มากกว่า AC

นอกจากนี้ หลอดฮาโลเจนและแหล่งกำเนิดแสงอื่นๆยังสามารถใช้กับการวัดแบบ NIR ได้ อีกด้วย Duplex Lamp (Deuterium lamp และ Tungsten combination lamp) มีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.2 ถึง 2.5 ไมโครเมตร และหลอดซินอนมีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.2 ถึง 2.0 ไมโครเมตร อย่างไรก็ตาม หลอดซินอนมีสเปกตรัมไม่เรียบในช่วง NIR

### 5.1.1.2 โกลบาร์และฮีตเตอร์ลวดนิโครม

โกลบาร์ (หรือ Siliconite: คอบสนองความยาวคลื่นช่วง 1.1 ถึง 100 ไมโครเมตร) โดยทั่วไป นำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วงอินฟราเรด ซึ่งทำมาจากซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ผสมกับวัสดุอื่น และนำมาทำเป็นแท่งแล้วทำการจินเตอร์ที่อุณหภูมิสูง เมื่อถูกใช้ในการวัดแบบอินฟราเรด กระแสไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 5 A ถึง 10 A (50 ถึง 100 วัตต์) ทำให้มีอุณหภูมิถึง 1400 K ส่วนลวดนิโครมฮีตเตอร์ซึ่งรู้จักกันดีว่าเป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วงอินฟราเรดก็สามารถใช้ในช่วง NIR ได้ โดยมีโครงสร้างง่ายๆเป็นแท่งเซรามิกพร้อมด้วยลวดนิโครม ถูกเคลือบด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์หรือฟิล์มออกไซด์และมีอายุการใช้งานนาน ที่อุณหภูมิ 1000 K สามารถใช้งานในช่วงอินฟราเรด

### 5.1.2 เลเซอร์สารกึ่งตัวนำและไดโอดเปล่งแสง

ไดโอดเปล่งแสงที่ทำมาจากแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) มีจุดยอดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 940 นาโนเมตร และถูกใช้ในการวัดปริมาณไขมันและน้ำมัน ไดโอดเปล่งแสงที่ทำมาจากแกเลียมออกไซด์นิยมนำมาใช้ครอบคลุมในช่วง 650 ถึง 900 นาโนเมตร และที่ทำมาจากอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ครอบคลุมช่วง 1.0 ถึง 1.6 ไมโครเมตร โดยสามารถนำมาใช้วัดค่าความชื้นจากการดูดกลืนโอเวอร์โทนของ OH ที่ 1.45 ไมโครเมตร

การใช้เลเซอร์นั้นมีความสำคัญในการวัดการหายใจของสัตว์ การส่งผ่านแสง NIR ผ่านหัวแมวหรือมนุษย์ถูกวัดหลังเกิดการดูดกลืนในช่วง NIR ในอนาคตคาดว่า จะมีการนำมาใช้ในการวัดร่างกายโดยรวมเข้ากับเลเซอร์สารกึ่งตัวนำในช่วง 700 ถึง 1200 นาโนเมตร (ช่วงการดูดกลืนของฮีโมโกลบิน ไบโอโกลบิน และไซโตโครมออกซิเดส)

## 5.2 ตัวอย่างเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้องในช่วง NIR [9]

สเปกโตรมิเตอร์ช่วง NIR เป็นอุปกรณ์ที่สามารถรวมเข้ากับอุปกรณ์แสงที่ใช้ในช่วง UV-Visible ได้ โดยที่อุปกรณ์ของเครื่องมือที่ใช้ในช่วง NIR จะมีราคาถูกกว่า เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ที่ใช้ในช่วง MIR เมื่อต้องการวัดแสงตัวอย่างที่มีระยะทางไกล วัสดุที่ใช้ในการส่งและรับแสงควรมี -OH ต่ำ เนื่องจากเกิดการดูดกลืนแสงในช่วง NIR ตัวตรวจจับแสงที่มีการใช้มากในการวัดแสงในช่วง NIR มักทำมาจากวัสดุ ซิลิคอน PbS และ InGaAs โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันสามารถทำให้ตัวตรวจจับแสงมีค่าดีเทคทีวิตี (Detectivity,  $D^*$ ) สูงและสามารถตอบสนองได้เร็ว ตารางที่ 5.1 แสดงประเภทของเครื่องมือ NIR สมัยใหม่ตามการแยกช่วงความยาวคลื่น เครื่องหลายชนิดมีที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ แม้ว่ามีเพียงไม่กี่ชนิดที่ใช้ในสาขาการวิจัย

## ตารางที่ 5.1 การจำแนกเครื่องมือ NIR โดยมีพื้นฐานอยู่บนเทคโนโลยีการเลือกช่วงความยาวคลื่น

1. Filter Instruments
  - Fabri-Perot (Interference)
  - Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF)
2. แหล่งจ่ายแสง LED ที่มีช่วงความยาวคลื่นเฉพาะ
3. Dispersive
  - เกรตติง – Plane หรือ Concave
  - Single Beam
  - Dual Beam
  - Multiplexed (Hadamard)
4. Interferometric (Fourier Transform)

### 5.2.1 Filter-based instrument

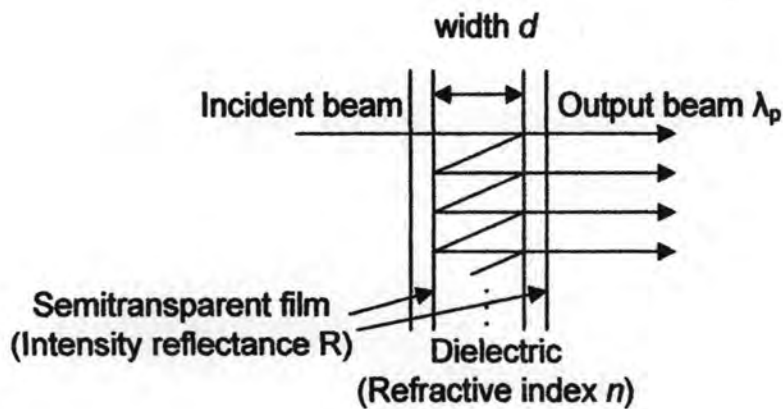
อุปกรณ์ใช้ฟิลเตอร์เป็นตัวเลือกความคลื่นที่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์ เป็นการใช้ในงานประยุกต์เฉพาะด้าน ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ในการตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันเบนซิน (Zeltex Inc.) โดยการใช้ interference filter 14 ตัว และ LED อีก 14 ตัวเป็นแหล่งจ่ายแสงในช่วง NIR แม้ว่าเครื่องมือวัดที่มีพื้นฐานในการใช้ฟิลเตอร์นั้นมีการใช้ในเชิงการค้า แต่ก็ไม่มีการอธิบายในบทความยกเว้นในยุคแรกๆเท่านั้น

เครื่องมือวัดที่มีการใช้ฟิลเตอร์สองและสามตัวนั้น จะใช้ในการจำแนกโพลีเมอร์ที่มีวัตถุประสงค์ในการนำกลับมาใช้ใหม่ และใช้ในการพิจารณาปริมาณ โปรตีนและไนโตรเจน ส่วน Variable interference filter นั้นอาศัยผลการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก โดยการใช้ตัวจับเพียโซอิเล็กทริก

เครื่องมือวัด NIR ที่ง่ายและถูกที่สุดโดยทั่วไปจะใช้ interference filter ระหว่างหกถึงยี่สิบตัว ฟิลเตอร์เหล่านี้ถูกใช้ในงานประยุกต์ที่มีการใช้บ่อยๆ เช่น โปรตีน ความชื้น และน้ำมันในตัวอย่างทางการเกษตร โดยตัวอุปกรณ์ถูกออกแบบมาใช้ในงานที่จำกัด

#### 5.2.1.1 Interference Filter

เมื่อแสงขนานตกกระทบบนฟิล์มไดอิเล็กทริก ซึ่งมีชั้นกึ่งโปร่งแสงขนานกันอยู่ทั้งสองด้าน แสงจะเดินทางเป็นจำนวนเท่าของรอบในชั้นฟิล์ม โดยบางส่วนสะท้อนกลับและส่งผ่านที่สองด้านของชั้นฟิล์มตามรูป ความเข้มของแสงที่ถูกส่งผ่านฟิล์มนี้ที่ความยาวคลื่น  $\lambda_p$  มีค่าสูงสุดเมื่อทางเดินแสง ( $2nd$ ) ภายในชั้นฟิล์มมีค่าเดียวกับความยาวคลื่น ( $\lambda_p$ ) ของแสงที่ถูกคูณด้วยค่าตัวเลขจำนวนเต็ม  $m$  [10]



รูปที่ 5.1 หลักการทำงานของ interference filter

$$m\lambda_p = 2nd \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (5.2)$$

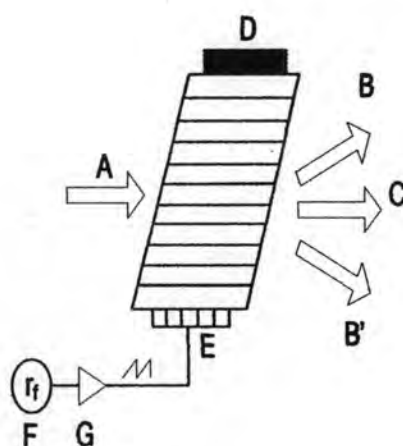
โดยที่  $d$  และ  $n$  คือค่าความหนาและค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มตามลำดับ ความเข้มสูงสุดของแสงเป็นผลมาจากเฟสของแสงมีค่าเท่ากันหลังจากที่สะท้อนสองด้านของชั้นฟิล์ม ค่าเลข  $m$  นั้นเรียกว่าอันดับ ในกรณีการเลือกใช้ interference filter ในช่วง NIR ส่วนใหญ่จะเลือก  $m=1$  หรือ 2 สำหรับค่าความยาว  $d$

### 5.2.2 LED-based instruments

แนวโน้มในการที่จะลดราคาและขนาดของเครื่องมือ ทำให้มีการนำเอาข้อได้เปรียบของ LED มาใช้งาน โดยสามารถผลิตแสงในช่วง NIR ด้วยความกว้างความยาวคลื่น 30-50 นาโนเมตร ซึ่งมีจุดกึ่งกลางที่ความยาวคลื่นใดๆ เครื่องมือวัดสามารถใช้กลุ่มของ LED เป็นแหล่งจ่ายแสง ในช่วงความยาวคลื่นแคบๆ หรือใช้เป็นแหล่งจ่ายแสงโพลิโครมาติกแล้วใช้โมโนโครเมเตอร์ในการกระจายแสงออกใช้ในช่วงที่ต้องการ LED ทั่วไปที่ใช้ใน NIR ช่วง 700-1100 นาโนเมตรสามารถหาซื้อได้ในราคาที่ต่ำ แม้ว่า LED ที่มีช่วงความยาวคลื่นที่สูงกว่านี้ยังคงมีราคาสูง เครื่องวัดแบบที่ใช้ LED และฟิลเตอร์นั้นสอดคล้องกับแนวโน้มในการที่จะลดต้นทุนของอุปกรณ์การใช้งานประยุกต์เฉพาะและสามารถพกพาได้

### 5.2.3 AOTF-based instruments

เครื่องมือวัดที่มีพื้นฐานในการใช้ AOTF (Acousto-optic tunable filter) สเป็กโตรมิเตอร์สมัยใหม่ที่ใช้เทคโนโลยีนี้ทำให้ไม่ต้องใช้ส่วนที่ต้องเคลื่อนไหว สามารถทำการวัดได้รวดเร็วตลอดทั้งช่วง NIR ความเร็วในการสแกนนั้นสามารถเร็วได้ถึง 2000 ความยาวคลื่นที่ต้องการวัดต่อหนึ่งวินาที โดยทั่วไปความเร็วในการสแกนจะถูกจำกัดโดยความเร็วในการตอบสนองของตัวตรวจจับแสง



รูปที่ 5.2 โมโนโครเมเตอร์ที่ใช้ตัวแยกแสงแบบ Acousto-Optic Tunable A คือแสงตกกระทบ โพลีโครเมติก B และ B' คือแสงสีเดียว (Monochromatic) C คือส่วนของโพลีโครเมติก D คือ ตัวคูคกลืนเสียง E คือตัวแปลงสัญญาณชนิดเพียโซอิเล็กทริก F คือตัวกำเนิดสัญญาณความถี่ และ G เป็นตัวขยายสัญญาณ ความถี่  $f_r$  คือความถี่วิทยุ

AOTF ทำงานในแบบ non-collinear (คลื่นเสียงและแสงที่ตกกระทบเกือบจะอยู่ในทิศ ที่ตั้งฉากกัน) ดังแสดงในรูปที่ 5.2 เป็นอุปกรณ์ที่ทำมาจากผลึก  $\text{TeO}_2$  ซึ่งมีคุณลักษณะเป็น birefringent วัสดุชนิดอื่นสามารถนำมาใช้ได้ แต่  $\text{TeO}_2$  เหมาะกับแสงในช่วง NIR และ บริษัทผู้ผลิตเครื่องมือมักนิยมใช้กัน วัสดุเพียโซอิเล็กทริก ( $\text{LiNiO}_4$ ) ถูกนำมาติดเข้ากับด้านหนึ่งของผลึก ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณความถี่วิทยุจากภายนอก ( $f_r$ ) เพื่อสร้างคลื่นทางกลให้เคลื่อนที่ ในผลึก คลื่นเสียงสร้างการผันแปรแบบมีคาบของค่าดัชนีหักเหของผลึกด้วยค่าความถี่วิทยุ  $f_r$  ในช่วง 50 ถึง 120 MHz ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับคลื่นเสียงเป็นเหตุให้ผลึกหักเหแสงเพียงช่วงความยาวคลื่นแคบๆเท่านั้น ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นเดี่ยวเบน ( $\lambda$ ) และความถี่ของคลื่นเสียง ( $f_a$ ) เป็น

$$\lambda = \frac{\Delta n v_a}{f_a} \quad (5.3)$$

โดยที่  $\Delta n$  คือค่าความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหของผลึก  $\text{TiO}_2$   $v_a$  คือความเร็วของคลื่นเสียง และ  $\alpha$  คือค่าพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับการออกแบบ AOTF โดย birefringence ของผลึก  $\text{TeO}_2$  ทำให้แสง โมโนโครมาติกสองลำแยกออกจากกันด้วยมุม  $7^\circ$  ลำแสงทั้งสองลำหรือเพียงลำเดียวสามารถใช้ในการวัด NIR ได้ ซึ่งสามารถพบได้ในเครื่องมือวัดแบบ dual beam และ single beam

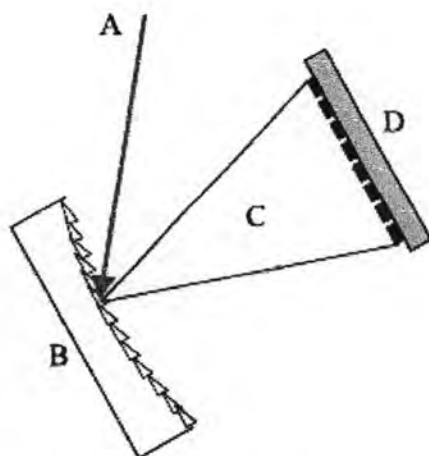
จากหลักการของสเปกโตรมิเตอร์แบบ AOTF ทำให้มีข้อที่ดีกว่าในการที่จะนำมาใช้ในภาคสนามหรือบนพื้นของโรงงานในการตรวจสอบแบบ in-line ความยาวคลื่นมีความแม่นยำ  $\pm 0.05$  นาโนเมตร และมีค่าความละเอียด (Resolution) ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 5 ถึง 15 นาโนเมตรสำหรับค่าความยาวคลื่น 1000 ถึง 2500 นาโนเมตร

### 5.2.3 Dispersive optic-based instruments

อุปกรณ์แบบกระจายแสงซึ่งใช้เกรตติงแบบเลี้ยวเบนถูกใช้ในช่วงแรกๆ ของการวัดแบบ NIR และถูกรวมเข้าไว้ด้วยกันในการพัฒนาการวัดแบบ NIR เทคโนโลยีนี้มีการใช้งานผ่านช่วงยุค 1990 และยังคงมีการใช้งานอยู่ มีผู้ผลิตหลายรายได้ผลิตเครื่องมือชนิดนี้ที่มีสมรรถนะที่เหมาะสมสำหรับงานประยุกต์หลายด้าน สเปกโตรมิเตอร์ช่วง NIR เซิงพาณิชย์ตัวแรกที่สร้างโดยชาวบราซิลผลิตโดยบริษัท Femto Ltda. ถูกขายในปี 1999 และใช้พื้นฐานของโมโนโครเมเตอร์แบบใช้เกรตติงแบบเลี้ยวเบน มีโครงสร้างแบบ Czerny-Turner สมรรถนะของมันเพียงพอในการวัดแบบส่งผ่าน ถูกใช้ในการควบคุมการผลิตน้ำตาลและแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของอุตสาหกรรมของชาวบราซิล

เครื่องมือวัดที่อาศัย โมโนโครเมเตอร์แบบเกรตติงนั้นมีข้อได้เปรียบคือ ต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องมือแบบสแกนชนิดอื่นที่ใช้เทคโนโลยีทันสมัย ข้อเสียเปรียบหลักของเครื่องมือวัดแบบดิสเพอร์ซีฟคือ สแกนช้าและความยาวคลื่นขาดความแม่นยำ เครื่องมือจะเกิดการสึกหรอเมื่อมีการใช้เวลานาน เนื่องจากส่วนกลไกที่ใช้ในการขับเคลื่อน

สิ่งนี้ทำให้เกิดแง่ลบในการสร้างแบบจำลองหลายตัวแปร และการใช้โครงสร้างที่มีส่วนเคลื่อนที่ได้ นั้น เป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้ในภาคสนามและสิ่งแวดล้อมที่เลวร้าย



รูปที่ 5.3 ระบบแสงแบบดิสเพอร์ซีฟซึ่งมีพื้นฐานบนเกรตติงแบบเว้าและตัวรับสัญญาณแบบอาร์เรย์ในสเปกโตรมิเตอร์สมัยใหม่แบบไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ โดยที่ A คือแสงโพลาไรซ์ B คือเกรตติงแบบเว้า C คือแสงที่กระจายออก และ D คือตัวรับสัญญาณแบบแผง

ในทางกลับกัน ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตตัวตรวจจับแสง ทำให้เครื่องมือวัดประเภทนี้สามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้น เพราะสามารถสร้างตัวรับสัญญาณ PbS และ InGaAs

แบบแผงเชิงเส้น ซึ่งมีจำนวนมากถึง 256 ตัว โดยวางไว้ที่จุดโฟกัสของเกรตติงแบบระนาบ (Plane grating) หรือแบบเว้า (Concave grating) แผงของตัวรับสัญญาณสามารถสแกนสเปกตรัมทั้งหมดในเวลาไม่กี่มิลิวินาที จากรูปที่ 5.3 สามารถสังเกตได้ว่า ไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ ยกตัวอย่างเช่น เครื่องมือวัดสามารถวางบนรถบรรทุกเพื่อเฝ้าสังเกตปริมาณ โปรตีน ไขมัน และความชื้นในเวลาจริงของพืชผลที่เก็บเกี่ยวได้

### 5.2.3.1 เกรตติงแบบเลี้ยวเบน

เกรตติงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

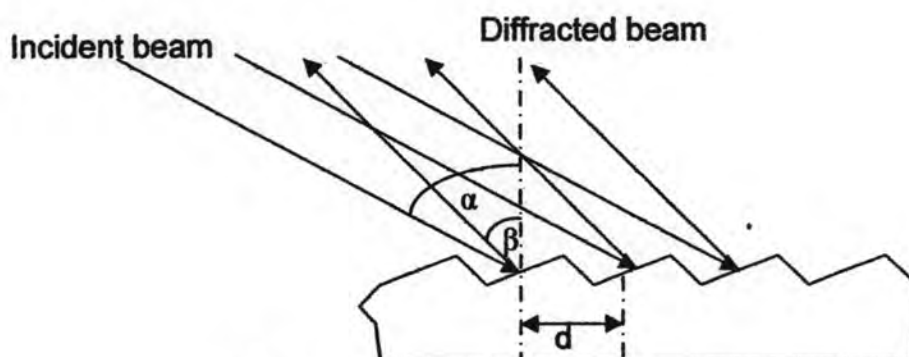
- 1) เกรตติงแบบส่งผ่าน (Transmission grating) แสงโพลิโครมาติกจะถูกกระจายออกเมื่อผ่านเกรตติงชนิดนี้
- 2) เกรตติงแบบสะท้อน (Reflective grating) แสงโพลิโครมาติกจะถูกกระจายออกเมื่อสะท้อนที่ผิวหน้าของเกรตติงชนิดนี้

#### 5.2.3.1.1 Echelle Grating

ผิวหน้าถูกทำเป็นร่องตามรูปที่ 5.4 และจะเกิดการสะท้อนที่ผิวหน้านี้ โดยในแต่ละผิวหน้าจะทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบจุด ทำให้เกิดการแทรกสอดของแสง จะเกิดการเลี้ยวเบนเฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่น  $\lambda_p$  ที่มุมเฉพาะเท่านั้น โดยเป็นไปตามสมการ

$$d(\sin(\alpha) + \sin(\beta)) = m\lambda_p \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.4)$$

โดยที่  $d$  คือความกว้างของผิวหน้าร่องแต่ละร่อง  $\alpha$  และ  $\beta$  คือมุมที่สอดคล้องกับมุมตกกระทบและสะท้อนจากผิวหน้าของร่องเกรตติง



รูปที่ 5.4 การทำงานของเกรตติงแบบสะท้อน

### 5.2.3.1.2 Holographic Grating

เกรตติงชนิดนี้สร้าง โดยการทำให้ photoresist โดยใช้ลำแสงเลเซอร์แทรกสอดกัน

### 5.2.3.1.3 Concave Grating

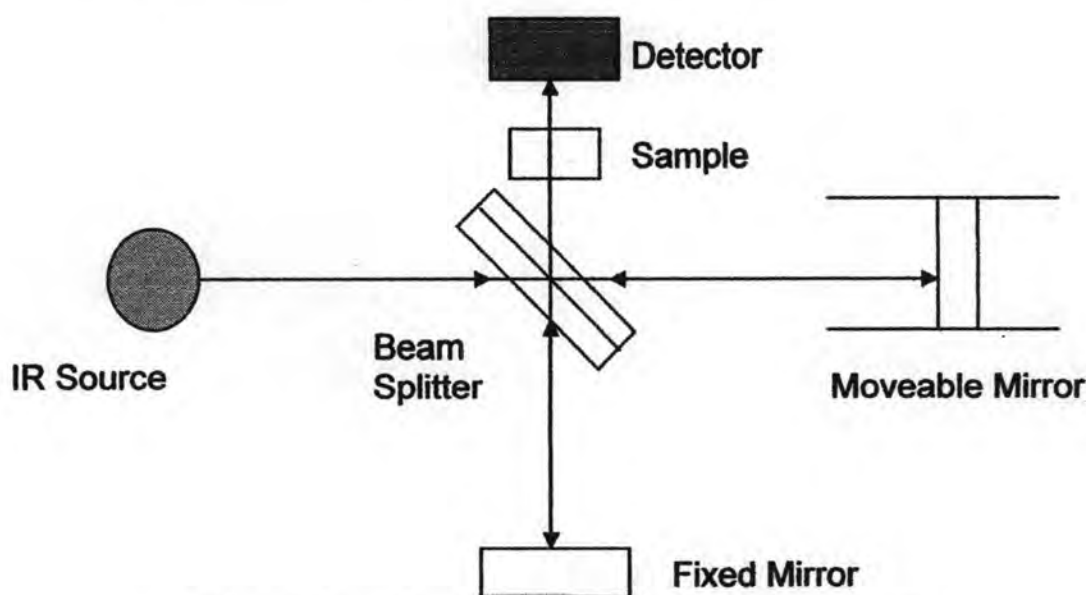
เกรตติงแบบเว้าคล้ายกับเกรตติงชนิดอื่นแต่ช่วยลบลูปกรรณที่ใช้ในการโฟกัสแสง เพราะมีผิวหน้าโค้งเว้า

## 5.2.4 Fourier transform-based instruments

ตามที่แสดงในรูปที่ 5.5 Fourier-transform spectroscopy ใช้หลักการแทรกสอดกันของลำแสงสองลำ (Michelson interferometer) แหล่งกำเนิดแสงจะถูกทำให้ขนานโดยเลนส์ (หรือกระจกเว้า) และถูก beam splitter แบ่งออกเป็นแสงสองลำ ลำแสงสองลำนี้จะมีระยะทางไปกลับไม่เท่ากัน จากนั้นจะกลับมาพบกันอีกที่ beam splitter และเกิดการแทรกสอดกันและตกกระทบบนตัวตัวอย่างเกิดการดูดกลืนขึ้น จากนั้นผ่านส่วนโฟกัสแสงแล้วตกกระทบบนตัวตรวจจับแสง เมื่อกระจกบานใดบานหนึ่งถูกเลื่อนไปตามแกนแสง ระยะทางเดินแสงจะเปลี่ยนไป โดยความเข้มแสงที่เกิดการแทรกสอดจะมากขึ้น เมื่อความแตกต่างของระยะ  $d$  เป็นไปตามสมการ

$$d = m\lambda + \lambda/2, \quad m = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (5.5)$$

ซึ่งเหมือนกับสมการของ interference filter และเกรตติงแบบเลี้ยวเบน แต่สเปกตรัมที่ได้ไม่เหมือนกัน โดยเป็นลักษณะของคลื่นไซน์ที่เกี่ยวข้องกับระยะ  $d$  ความเข้มของแสงที่วัดได้ที่ตัวตรวจจับแสง ถูกเรียกว่า interferogram



รูปที่ 5.5 หลักการทำงานของ Fourier-transform spectrometer

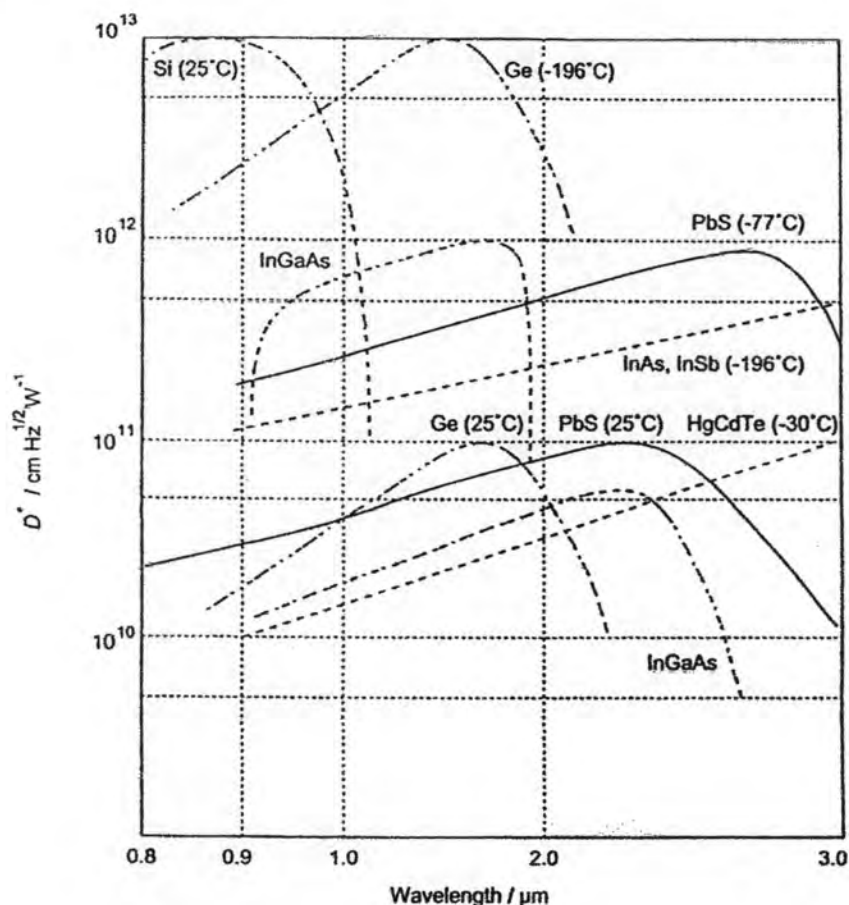


### 5.3 ตัวตรวจจับแสงช่วง Near-infrared [10]

ตัวตรวจจับแสงช่วง NIR สามารถแยกเป็นประเภทต่างๆได้เป็น

#### 5.3.1 Photoconductor

ตะกั่วซัลไฟด์ (PbS) ถูกใช้ในช่วงกว้างของ NIR ด้วยค่าความไวสูง อุปกรณ์นี้เป็นสารกึ่งตัวนำที่ค่าความต้านทานจะลดลงเมื่อมีแสงตกกระทบ โดยครอบคลุมช่วง 1 ถึง 2.5 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิห้อง และขึ้นไปถึง 3.5 ไมโครเมตรเมื่อถูกทำให้เย็นลงไปถึง  $-77^{\circ}\text{C}$  ส่วนตะกั่วเทลไนด์ไม่ค่อยไวมาก แม้ว่าจะครอบคลุมช่วง 1.5 ถึง 4.5 ไมโครเมตรที่อุณหภูมิห้อง และขึ้นไปถึง 5.8 ไมโครเมตรเมื่อลดอุณหภูมิลง ปรอทแคดเมียมเทลลูไรด์ (HgCdTe โดยทั่วไปเรียกว่า MCT) ครอบคลุมช่วง 2 ถึง 5 ไมโครเมตร



Photoconductive type  
PbS PbSe HgCdTe  
Photovoltaic type  
Ge InAs InSb InGaAs HgCdTe

รูปที่ 5.6 ค่าดีเทคทีวิตีของตัวตรวจจับแสงชนิด Photoconductive และ Photovoltaic

ค่า  $D^*$  (Detectivity) เป็นไปตามสมการ

$$D^* = \{(S/N)/P_D\}(\Delta f/A)^{1/2} \quad (5.6)$$

หรือ

$$D^* = (1/NEP)(\Delta f/A)^{1/2} \quad (5.7)$$

โดยที่  $\Delta f$  คือแถบความถี่ที่จะทำการวัด  $A$  คือพื้นที่ของตัวตรวจจับแสง  $P_D$  คือค่ากำลังของแสงที่ตกกระทบ  $S$  คือกำลังของสัญญาณที่ทำการวัด  $N$  คือกำลังของสัญญาณรบกวน

ตัวตรวจจับแสงที่ดีควรมีค่า  $D^*$  สูง เมื่อตัวตรวจจับแสงชนิดโฟโตนิกที่ฟูกใช้สัญญาณที่ถูกวัดจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยอุณหภูมิแวดล้อม วิธีการวัดแบบ lock-in ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหานี้ ด้วยการมอดูเลตแสงที่ตกกระทบลงบนตัวอย่างด้วยสัญญาณความถี่หนึ่ง และมีเพียงองค์ประกอบที่ค่าความถี่นั้นสามารถวัดออกมาได้ ขณะที่สเปกโตรมิเตอร์ชนิด Fourier-transform นั้นได้ทำการมอดูเลตแสงเป็น interferogram แล้ว

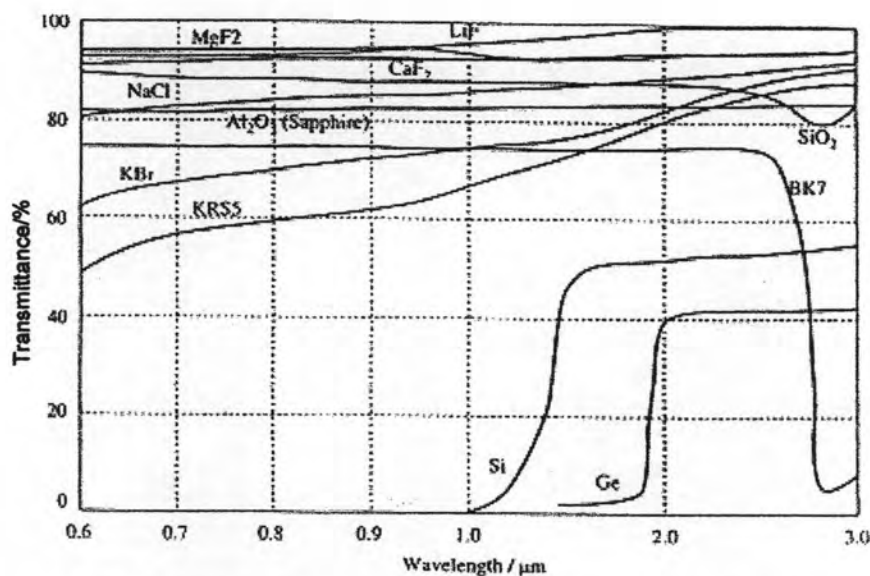
### 5.3.2 Photovoltaic Effect

โฟโตนิกไดโอดชนิดเจอร์มานีเนียม (Ge) ครอบคลุมในช่วง 0.8 ถึง 1.9 ไมโครเมตร อินเดียมแอนติโมนด์ (InSb) จะครอบคลุมในช่วง 1 ถึง 5 ไมโครเมตร อินเดียมอาร์เซไนด์ (InAs) ครอบคลุมช่วง 1 ถึง 3.1 ไมโครเมตร ส่วนซิลิคอนนั้นจะใช้ในช่วงที่ต่ำกว่า 1 ไมโครเมตรลงมา

### 5.3.3 Multi-Channel Detectors

อุปกรณ์ซึ่งมีตัวรับแสงในช่วงอินฟราเรดวางเรียงในหนึ่งหรือสองมิติ ถูกเรียกว่า near-infrared multichannel detector เช่น ตัวตรวจจับแสงที่ถูกใช้ในกล้องอินฟราเรดรักษาความปลอดภัย ตัวตรวจจับแสงแบบนี้สามารถรับภาพของแสง NIR รวมไปถึงสเปกตรัมของ NIR โดยปราศจากการใช้กลไกใดๆ Near-infrared multichannel detectors ทำมาจากตัวรับแสง 256 ตัวของ PbS หรือ MCT โดย Near-infrared multichannel detectors ซึ่งใช้อุปกรณ์พวกโฟโตนิกที่ฟูกจะถูกทำมาจากวัสดุ Ge และ InSb แม้ว่าเป็นการยากในการที่จะผลิตให้มีความหนาแน่นสูง ในเชิงพาณิชย์ก็สามารถผลิตได้ 512x512 ตัว

## 5.4 วัสดุทางแสงที่ใช้สำหรับช่วง Near-infrared



รูปที่ 5.7 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงในช่วง NIR ของวัสดุต่างๆ

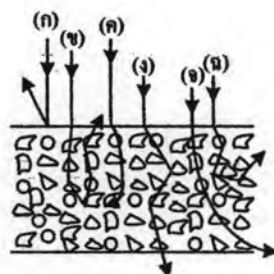
กระจกและผลึกที่ถูกใช้ในช่วงแสงที่มองเห็น ได้สามารถนำมาทำเป็นช่องแสงและเลนส์ ในช่วง NIR ได้ด้วย อย่างไรก็ตาม มีหลายชนิดที่ดูดกลืน โอเวอร์ โทนของ OH ที่ 1.4 ไมโครเมตร

รูปที่ 5.7 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของแสง NIR ในวัสดุทางแสงหลากหลายชนิด  $\text{CaF}_2$  และ  $\text{MgF}_2$  เป็นที่รู้จักกันว่าเป็นวัสดุโปร่งแสงในช่วง NIR จึงถูกนำมาทำเป็นเลนส์ หน้าต่าง แสง และแผ่นฐานรองสำหรับทำตัวกรองแสง ส่วนวัสดุที่ใช้ในการทำใยแก้วนำแสงนั้นต้องโปร่งแสงในช่วง NIR และในระหว่างการผลิตต้องทำให้มีปริมาณ OH คำน้อยที่สุด เพื่อลดการดูดกลืนที่เกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นประมาณ 1.4 และ 1.9 ไมโครเมตร

ส่วนวัสดุพวก birefringent นั้น แคลไซต์สามารถใช้ในช่วง NIR ช่วงสั้นไปจนถึงช่วง ไมโครเมตร โดยที่รูไทล์ (Rutile,  $\text{TiO}_2$ ) เกิด birefringence สูงมากกว่าตลอดทั้งช่วง NIR แม้ว่า  $\text{MgF}_2$  จะดีกว่า  $\text{TiO}_2$  แต่ก็สามารถนำมาใช้ได้

## 5.5 การวัดแสง NIR ในวัสดุการเกษตร

ในการวัดแสงแบบ NIR นั้น เมื่อแสงตกลงบนตัวอย่างจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นหลายอย่างตามรูปที่ 5.8 คือ [11]



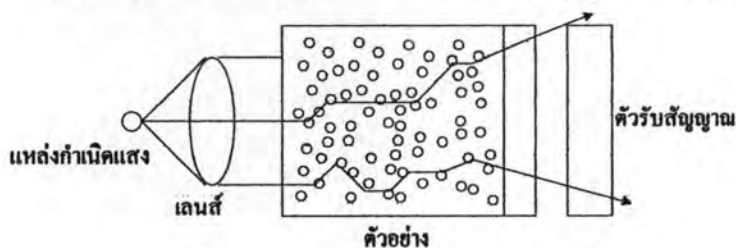
รูปที่ 5.8 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแสงกับวัสดุ

- (ก) การสะท้อนเสมือนกระจก (Specular reflectance)
- (ข) การสะท้อนแบบกระจายแสง (Diffused reflectance)
- (ค) การดูดกลืน
- (ง) การส่งผ่าน
- (จ) การหักเห
- (ฉ) การกระเจิง

ในการวัดแสง NIR ในวัสดุการเกษตร การวัดแบบสะท้อนชนิดกระจายแสงเป็นวิธีที่นิยมที่สุด การดูดกลืนแสงช่วง NIR ในผลิตภัณฑ์การเกษตร จะแสดงถึงข้อมูลของโมเลกุลที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ แต่ถ้าไม่มีการดูดกลืนเกิดขึ้นก็เกิดเพียงการสะท้อนแสงเสมือนกระจกเท่านั้น โดยไม่มีปฏิกิริยากับเนื้อวัสดุ วิธีการวัดแสง NIR กับผลิตภัณฑ์การเกษตรสามารถแยกได้หลายลักษณะ [3]

### 5.5.1 การส่งผ่านแบบกระจายแสง (Diffused Transmission)

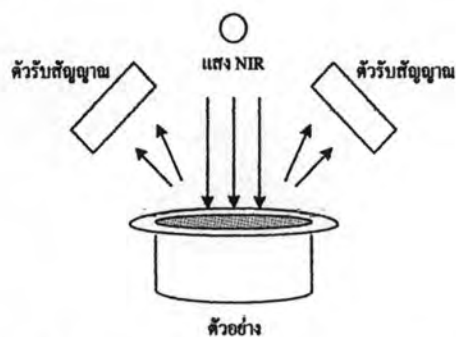
เมื่อแสงตกกระทบลงบนตัวอย่าง การกระเจิงที่เกิดขึ้นในเนื้อของวัสดุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะทางเดินแสง (Path length) โดยที่ไม่สามารถกำหนดได้แน่นอนดังแสดงในรูปที่ 5.9 การวัดแบบนี้ส่วนใหญ่จะทำในช่วงความยาวคลื่น 800-1100 นาโนเมตร ซึ่งทำให้ข้อมูลที่เกิดการดูดกลืนต่ำสามารถนำไปแปลผลข้อมูลได้ ส่วนใหญ่จะใช้กับการวัดเมล็ดธัญพืช ตัวอย่างที่เป็นของเหลว



รูปที่ 5.9 การส่งผ่านแบบกระจายแสง

### 5.5.2 การสะท้อนแบบกระจายแสง (Diffused Reflection)

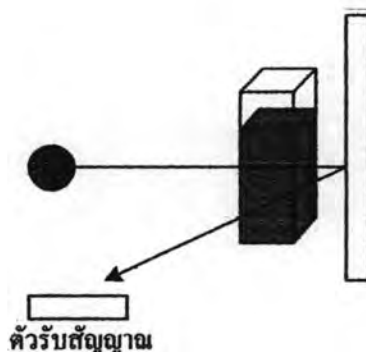
สำหรับผิวหนังเรียบเช่น แก้ว แสงส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาจากผิวหนังโดยการสะท้อนอย่างเป็นระเบียบ (Regular reflection) หรือการสะท้อนแบบเสมือนกระจก (Specular reflection) ในการวัดในช่วง 1100–2500 นาโนเมตร การกระเจิงแสงที่เกิดขึ้นทำให้ระยะทางเดินแสงเกิดขึ้นมาก จนกระทั่งสามารถละเลยการส่งผ่านตัวอย่างส่วนใหญ่ที่มีความหนา 1 เซนติเมตรได้ การสะท้อนแบบนี้เรียกว่าการสะท้อนแบบกระจายแสง (Diffused reflectance) เพราะว่าแสงส่วนใหญ่ถูกสะท้อนกลับ โดยมีบางส่วนของแสงที่สะท้อนกลับมานั้นเกิดปฏิกิริยากับเนื้อวัสดุด้วยรูปที่ 5.10 แสดงการสะท้อนแบบกระจายแสงซึ่งไม่สามารถกำหนดรูปแบบได้แน่นอน ถ้าพื้นผิวสะท้อนแสงแบบกระจายแสงโดยปราศจากการทะลุลงไปในตัวอย่าง จะเหมือนการสะท้อนแบบเสมือนกระจกคือไม่มีการดูดกลืนเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าบางส่วนของแสงทะลุผิวหนังลงไป เมื่อมันกระทบกับแต่ละอนุภาคก็จะสามารถเกิดการสะท้อน ดูดกลืน หรือส่งผ่าน



รูปที่ 5.10 การสะท้อนแบบกระจายแสง

### 5.5.3 Transflectance

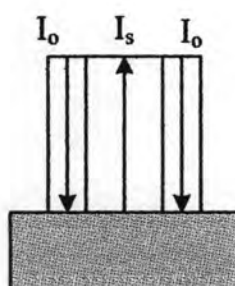
แสงจะถูกส่งผ่านตัวอย่างแล้วสะท้อนกลับไปที่ตัวรับสัญญาณ โดยตัวสะท้อนเช่น เซรามิก ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ซึ่งเป็นการรวมกันระหว่างการวัดแบบสะท้อนและการวัดแบบส่งผ่าน นำมาประยุกต์ใช้กับการวัดของเหลว



รูปที่ 5.11 การวัดแบบ Transflectance

### 5.5.4 Interactance

วิธีนี้เป็นการวัดอีกแบบหนึ่งที่รวมกันระหว่างการวัดแบบส่งผ่านและแบบสะท้อน โดยตัวฉายแสงกับตัวรับจะอยู่แยกกันตามแนวขวาง โดยปกติจะใช้หัววัดเส้นใยนำแสงซึ่งเป็นกลุ่มมัดของเส้นใยนำแสง ส่วนหนึ่งนำแสงไปยังตัวอย่างและอีกส่วนนำแสงที่สะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 5.12 แสงจากแหล่งกำเนิด  $I_0$  จะถูกส่งผ่านมาจากเส้นใยนำแสง หลังจากนั้น แสงที่ตกลงบนเนื้อวัสดุจะเกิดการกระเจิง และบางส่วนจะทะลุลงไปเนื้อวัสดุและสะท้อนกลับมา และถูกส่งกลับไปยังตัวรับผ่านสายเส้นใยนำแสงที่อยู่ในแนวขวางเดียวกัน วิธีการวัดแบบนี้มีประโยชน์อย่างยิ่งกับการวัดตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่เช่น ผลไม้ เป็นต้น



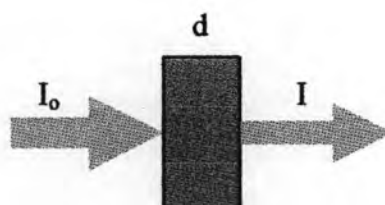
ตัวอย่าง

รูปที่ 5.12 การวัดแบบ Interactance

### 5.6 Beer-Lambert Law

กฎของ Beer-Lambert กล่าวไว้ว่า ความเข้มข้นแปรตามการดูดกลืนสำหรับตัวอย่างที่ไม่มีการกระเจิงกับองค์ประกอบดูดกลืนหนึ่ง [11] โดยสามารถแสดงว่า ความเข้มข้นสามารถคำนวณได้จากการดูดกลืนตามสมการที่ 5.8 ซึ่ง  $a$  = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนขององค์ประกอบ  $c$  = ค่าความเข้มข้นขององค์ประกอบ  $d$  = ความหนาของเนื้อวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 5.13

$$I = I_0 10^{-acd} \quad (5.8)$$



รูปที่ 5.13 แสงที่ถูกดูดกลืนผ่านเนื้อวัสดุ

$$\log(I/I_0) = -acd \quad (5.9)$$

$$c = (1/ad)(-\log(I/I_0)) \quad (5.10)$$

สมการที่ 5.8 - 5.10 สามารถเขียนอย่างง่ายได้เป็นสมการที่ 5.11

$$\text{โดยที่} \quad c = KA \quad (5.11)$$

$$\text{โดยที่} \quad K = 1/ad \quad (5.12)$$

$$I/I_0 = T \quad (5.13)$$

$$A = -\log(T) \quad (5.14)$$

โดยที่  $I$  คือ ความเข้มของแสงจากแหล่งกำเนิด

$T$  คือ ค่าการดูดกลืนของแสงที่ถูกส่งผ่าน

$A$  คือ ค่าการดูดกลืนของแสง

การวิเคราะห์ข้างต้นนี้ใช้สำหรับกรณีอุณหภูมิต่ำที่ไม่มีการกระเจิงเกิดขึ้น แต่ตัวอย่างทางการเกษตรที่วิเคราะห์ด้วย NIR จะเกิดการกระเจิงของแสง สำหรับวัสดุที่ไม่มีการดูดกลืนแสงโดยมีการกระเจิงสามารถประมาณได้ตามสมการที่ 5.15

$$R/T = Sd \quad (5.15)$$

โดยที่  $R$  คือ ความเข้มของแสงสะท้อน

$T$  คือ ความเข้มของแสงส่งผ่าน

$S$  คือ สัมประสิทธิ์ของการกระเจิง

$d$  คือ ความหนาของตัวอย่าง

วิธีการวัดของ NIR นั้นจะเกิดการดูดกลืนและการกระเจิงขึ้น โดยที่กฎของ Beer-Lambert นั้นใช้ได้เพียงวัสดุเนื้อเดียวโปร่งแสง ดังนั้น ความเข้มข้น ( $C$ ) ขององค์ประกอบและ diffused reflectance ( $R$ ) เป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Kubelka และ Munk [9] ดังสมการที่ 5.16

$$f(C) = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (5.16)$$

$$R = \frac{I_R}{I_{R0}} \quad (5.17)$$

โดยที่  $I_R$  เป็นความเข้มของแสงสะท้อนจากตัวอย่าง และ  $I_{R0}$  เป็นความเข้มของแสงสะท้อนจากตัวอย่างที่ไม่มีการดูดกลืนตลอดช่วงแสงที่ทำการวัด ในการวัด  $I_R$  และ  $I_{R0}$  ต้องใช้ integrating sphere ในการรวบรวมแสงที่เกิดจากการกระเจิง ในความเป็นจริงแล้ว สมการของ Kubelka-Munk ไม่ค่อยใช้กันในทางปฏิบัติ โดยที่กฎของ Beer-Lambert สรุปว่า ความเข้มข้นเป็นเชิงเส้นกับ  $\log(1/\text{ค่าการดูดกลืน})$  และสมมติว่าสามารถใช้ได้กับการวัดแบบ NIR ซึ่งสังเกตได้ว่าไม่มีทฤษฎีแน่นอนสำหรับการวัดแบบกระจายแสง จึงสามารถประมาณความสัมพันธ์ได้เป็นตามสมการที่ 5.18 [9, 12]

$$c \approx -K \log(R/R_0) \quad (5.18)$$

โดยที่  $R$  คือความเข้มของแสงสะท้อนจากตัวอย่าง  
 $R_0$  คือความเข้มของแสงจากตัวอย่างอ้างอิง  
 $K$  คือค่าคงตัว  
 $c$  คือความเข้มข้นขององค์ประกอบ

ความเข้มของแสงสะท้อนเป็นผลรวมของการสะท้อนอย่างเป็นระเบียบกับการสะท้อนจากการดูดกลืน (body reflection) ซึ่งมีเพียงการสะท้อนจากการดูดกลืนเท่านั้นที่มีข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบของวัสดุ ดังนั้น สัญญาณที่วัดได้สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 5.19

$$\text{Measured Absorbance} = -\log\left(\frac{I_{body} + I_{regular}}{I_{incident}}\right) \quad (5.19)$$

โดยที่  $I_{incident}$  คือความเข้มของแสงที่ตกกระทบจากแหล่งกำเนิด  
 $I_{body}$  คือความเข้มของแสงส่วนที่เกิดการดูดกลืน  
 $I_{regular}$  คือความเข้มของแสงส่วนที่สะท้อนเสมือนกระจก

โดยปกติ การวัดแสง NIR จะวัดเทียบกับสารชนิดหนึ่ง โดยวัสดุอ้างอิงที่ใช้จะมีคุณสมบัติในการกระจายแสงในช่วงความยาวคลื่นที่เราต้องการวัด เช่น เซรามิก หรือเทฟลอน โดยการวัดสเปกตรัมของวัสดุอ้างอิงก่อนเป็น  $I_R$  หลังจากนั้น วัดตัวอย่างได้ค่า  $I_S$  แล้วเราสามารถวัดค่าการดูดกลืนได้ตามสมการที่ 5.20

$$A = \log(I_S/I_R) \quad (5.20)$$