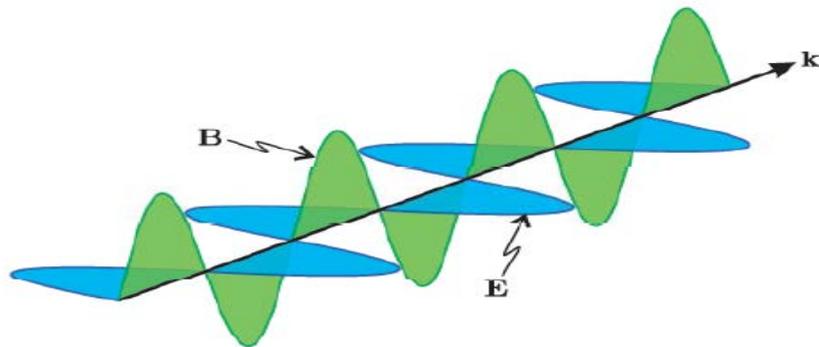


## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1.1 ธรรมชาติของแสง [5]

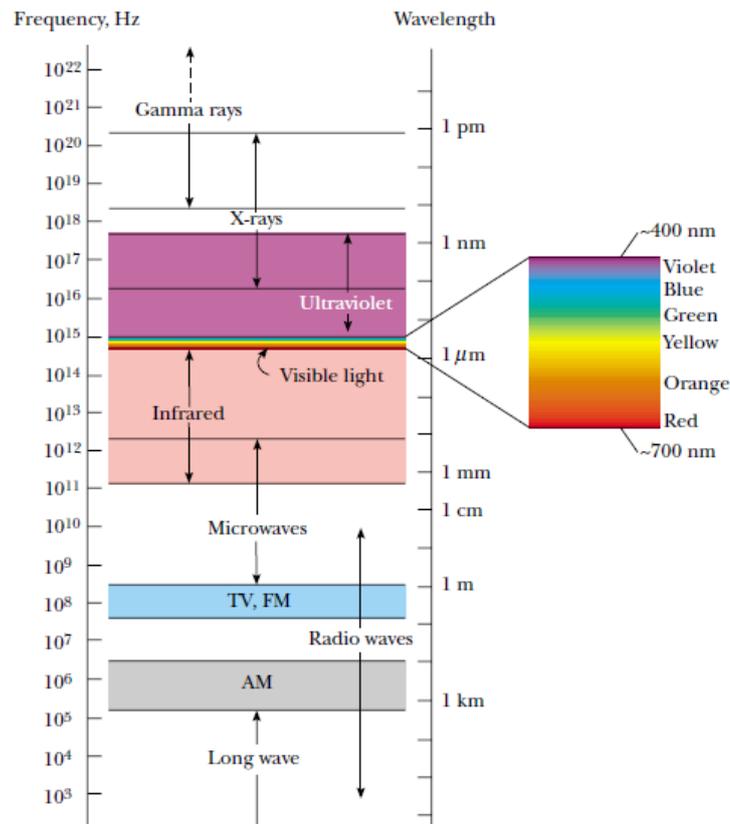
แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็น สนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) และสนามแม่เหล็ก ( $\vec{B}$ ) ซึ่งมีทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตั้งฉากกัน และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของแสง ดังตัวอย่างรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีสนามไฟฟ้า ( $\vec{E}$ ) และสนามแม่เหล็ก ( $\vec{B}$ ) ตั้งฉากซึ่งกันและกันและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของแสง [5]

#### 2.1.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) [5]

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีหลายชนิดขึ้นกับความยาวคลื่นหรือความถี่ของคลื่น โดยหน่วยของความยาวคลื่นแสงคือ นาโนเมตร (Nanometer) และเรียกความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสงว่า สเปกตรัม (Spectrum) ของแสง ซึ่งสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีความยาวคลื่นและความถี่ค่อนข้างกว้างตั้งแต่คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรด แสง รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา เรียงตามลำดับ แสดงดังตัวอย่างรูปที่ 2.2



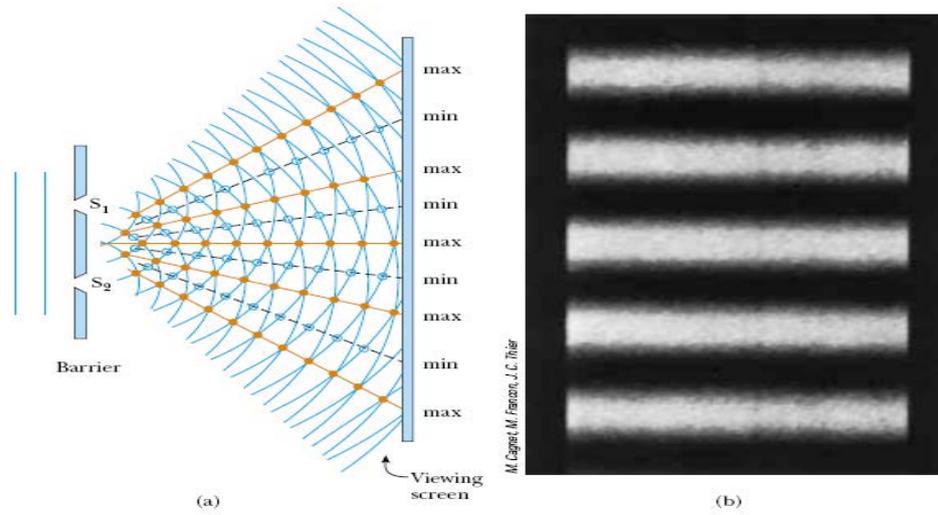
รูปที่ 2.2 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นและความถี่แตกต่างกัน [5]

### 2.1.3 การแทรกสอดของแสง (Interference of Light) [6], [7]

การแทรกสอดของแสงเป็นคุณสมบัติหนึ่งของแสงเกิดขึ้นเมื่อคลื่นแสงตั้งแต่สองขบวนหรือมากกว่าเคลื่อนที่ผ่านจุดเดียวกันเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (Constructive Interference) และการแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive Interference)

#### 2.1.3.1 การทดลองสลิตคู่ของยัง (Young's Double-slit Experiment)

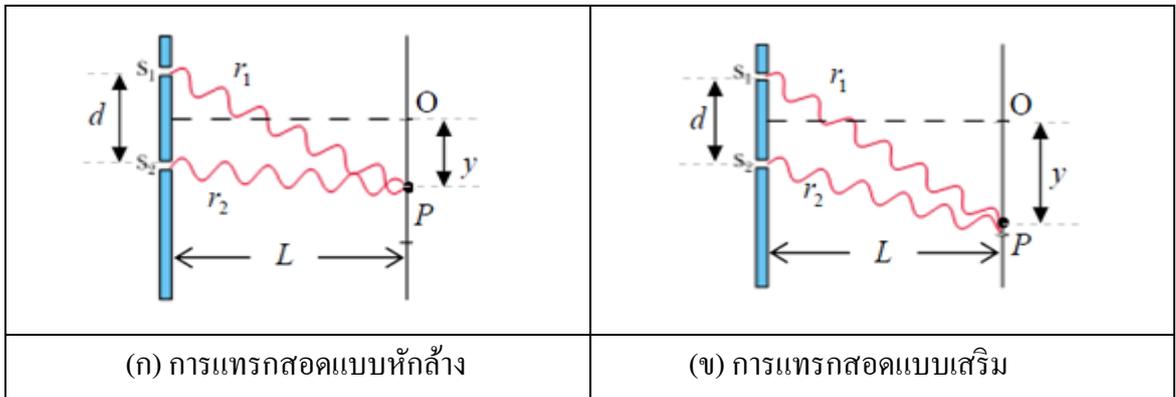
ในปี ค.ศ.1801 โทมัส ยัง (Thomas Young) ได้ทำการทดลองแสดงการแทรกสอดของแสงเพื่อพิสูจน์ว่าแสงเป็นคลื่น โดยใช้คลื่นแสงระนาบผ่านสลิตคู่ ที่ประกอบด้วยช่องสลิตเดี่ยว 2 ช่องที่อยู่ใกล้กัน โดยสลิตคู่  $S_1$  และ  $S_2$  ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ (Coherent Source) เมื่อแสงผ่านสลิตคู่ตกระทบที่ฉาก ทำให้เกิดแถบมืด (Dark Fringe) และแถบสว่าง (Bright Fringe) สลับกัน แสงจาก  $S_1$  และ  $S_2$  ไปตกระทบฉากจะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมเกิดขึ้นที่แถบสว่าง และคลื่นแสงแทรกสอดแบบหักล้างที่ตำแหน่งใดๆบนฉากจะปรากฏเป็นแถบมืด แสดงดังตัวอย่างรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการทดลองสลิตคู่ของยัง [6]

2.1.3.2 การกระจายความเข้มแสงของรูปแบบการแทรกสอดจากสลิตคู่

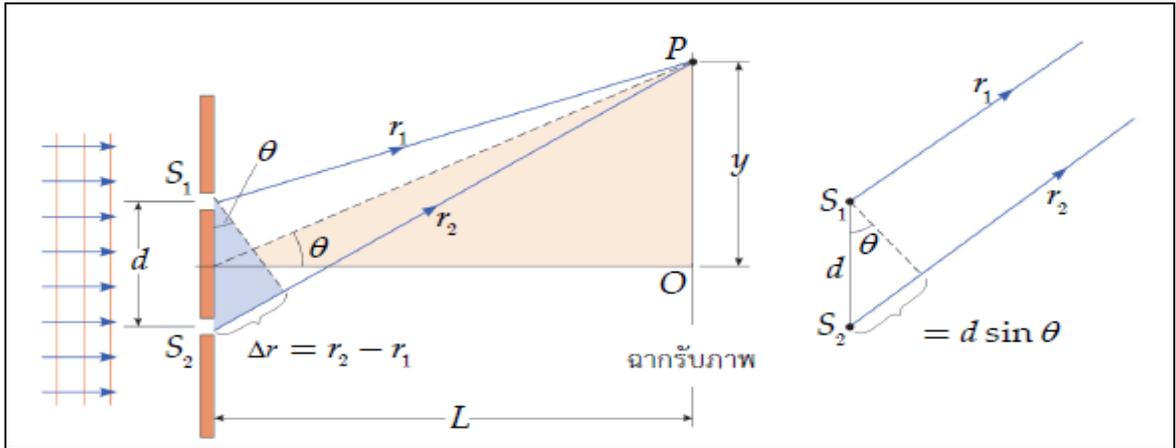
การศึกษารายละเอียดของความเข้มแสงของแถบสว่างที่เกิดจากการแทรกสอดจากสลิตคู่ โดยกำหนดให้ต้นกำเนิดแสงสองแหล่ง  $S_1$  และ  $S_2$  เป็นต้นกำเนิดแสงอาพันธ์ที่มีความถี่เชิงมุม  $(\omega)$  เท่ากัน และมีค่าความต่างเฟส (Phase Difference) เป็น  $\phi$  โดยขนาดของสนามไฟฟ้า  $E$  ทั้งหมดที่จุดบนฉาก ในตัวอย่างรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นผลมาจากการซ้อนทับของคลื่น



รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบการแทรกสอดของคลื่นผ่านสลิตคู่  $S_1$  และ  $S_2$  [6]

ถ้าให้คลื่นทั้งสองมีแอมพลิจูด (Amplitude)  $E_0$  ขนาดของสนามไฟฟ้าจากคลื่นทั้งสองบนฉากที่จุด  $P$  เป็นดังสมการที่ 2.1

$$E_1 = E_0 \sin \omega t \quad \text{และ} \quad E_2 = E_0 \sin(\omega t + \phi) \tag{2.1}$$



รูปที่ 2.5 ระยะต่างๆ ในการทดลองของยัง [7]

ความต่างเฟส  $\phi$  ของคลื่นที่ผ่านสลิตทั้งสองที่จุด P จะขึ้นอยู่กับความต่างระยะทาง (Path Difference) นั้น ดังตัวอย่างรูปที่ 2.5 และเขียนสมการได้ดังสมการที่ 2.2

$$\Delta r = r_2 - r_1 = d \sin \theta \quad (2.2)$$

ซึ่งค่าความต่างระยะทาง ( $\Delta r$ ) นี้จะเป็นปริมาณที่ทำให้เราทราบว่าคลื่นมีเฟสตรงกันหรือไม่ เมื่อคลื่นตกกระทบบที่จุด P ถ้า  $\Delta r = 0$  หรือเท่ากับจำนวนเต็มของความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) คลื่นแสงทั้งสองจะมีเฟสตรงกัน จึงเกิดการแทรกสอดแบบเสริม ดังตัวอย่างรูปที่ 2.4 (ข) ดังนั้น เงื่อนไขของการเกิด แถบสว่างที่จุด P สามารถเขียนสมการได้ดังสมการ 2.3

$$\Delta r = d \sin \theta = n\lambda \quad (2.3)$$

จำนวน  $n$  คือ เลขอันดับของการแทรกสอด (Order Number) เมื่อ ( $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) แถบสว่างที่กึ่งกลางจะเกิดเมื่อ  $\theta = 0$  หรือ ( $n = 0$ ) เรียกว่า ค่ามากที่สุดอันดับศูนย์ (Zeroth-order Maximum) ค่ามากที่สุดอันดับที่หนึ่งทั้งสองด้านจะเกิดขึ้นเมื่อ  $n = \pm 1$  และอันดับอื่นๆจะเกิดขึ้นตามค่าของ  $n$  และค่าความต่างระยะทางเป็นจำนวนเลขคี่ของครึ่งความยาวคลื่น  $\frac{\lambda}{2}$  คลื่นทั้งสองจะถึงจุด P โดยมีเฟสต่างกัน 180 องศา ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน ดังตัวอย่างรูปที่ 2.4 (ก) จึงมองเห็นเป็นแถบมืดที่จุด P สามารถเขียนสมการได้ดังสมการ 2.4

$$\Delta r = d \sin \theta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (2.4)$$

ความต่างเฟสที่จุด P จากตัวอย่างรูปที่ 2.4 (ก) ค่าความต่างระยะทางเท่ากับ  $\frac{\lambda}{2}$  จะมีค่าตรงกับค่าความต่างเฟส  $\pi$  และจากตัวอย่างรูปที่ 2.4 (ข) จะขึ้นอยู่กับค่าความต่างระยะทางที่เท่ากันซึ่งจะมีค่าตรงกับค่าความต่างเฟส  $2\pi$  ดังนั้นจึงได้อัตราส่วนระหว่างความต่างระยะทางและความต่างเฟสเป็น

$$\frac{\Delta r}{\phi} = \frac{\lambda}{2\pi}$$

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 2.1 ถ้าคลื่นขบวนที่ 1 มีขนาดของสนามไฟฟ้า  $E_1$  รวมกับคลื่นขบวนที่ 2 มีขนาดของสนามไฟฟ้า  $E_2$  จะทำให้ได้ขนาดของสนามไฟฟ้ารวมที่จุด P เป็นดังสมการที่ 2.6

$$E = E_1 + E_2 = E_0 [\sin \omega t + \sin(\omega t + \phi)] \quad (2.6)$$

$$\text{จาก } \sin A + \sin B = 2 \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \cos\left(\frac{A-B}{2}\right)$$

กำหนดให้  $A = (\omega t + \phi)$  และ  $B = \omega t$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (2.6) ใหม่ได้เป็น

$$E = 2E_0 \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.7)$$

พิจารณาสมการที่ 2.7 ถ้าค่า  $\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$  ขนาดของสนามไฟฟ้าที่จุด P จะเท่ากับ  $2E_0$  ซึ่งตรงกับค่าสูงสุดของการแทรกสอดแบบเสริมของคลื่น (Maximum Constructive Interference) และถ้าค่า  $\phi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$  ขนาดของสนามไฟฟ้าที่จุด P จะเท่ากับศูนย์ซึ่งตรงกับค่าหักล้างกันหมดของการแทรกสอดกันแบบหักล้าง (Total Destructive Interference) ของคลื่น การหาความเข้มแสง (Light Intensity) ที่จุด P โดยใช้ทฤษฎีคลื่นที่มีความเข้มเป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้ายกกำลังสองคือ

$$I \propto E^2 = 4E_0^2 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin^2\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.8)$$

เนื่องจากเครื่องมือวัดความเข้มแสงมักจะออกแบบไว้สำหรับวัดค่าความเข้มแสงเฉลี่ยและเวลาค่าเฉลี่ย

กับเวลาของ  $\sin^2\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right)$  จะมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{2}$  ดังนั้นจึงเขียนสมการที่ 2.8 ใหม่ได้ว่า

$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.9)$$

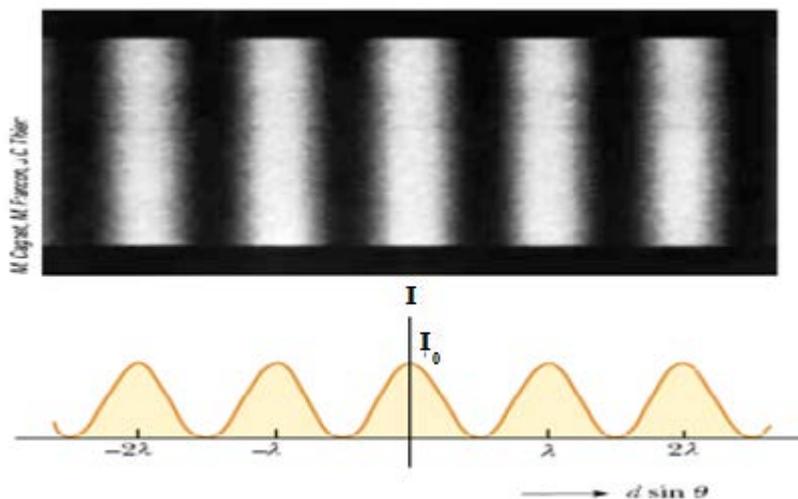
เมื่อ  $I_0$  คือ ค่าความเข้มสูงสุดบนฉากมีค่าเท่ากับ  $2E_0^2$  แทนค่า  $\phi$  ในสมการที่ 2.5 ลงในสมการที่ 2.9 จะได้

$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}\right) \quad (2.10)$$

เนื่องจาก  $\sin \theta \approx \theta = \frac{y}{L}$  สมการที่ 2.10 จึงกลายเป็น

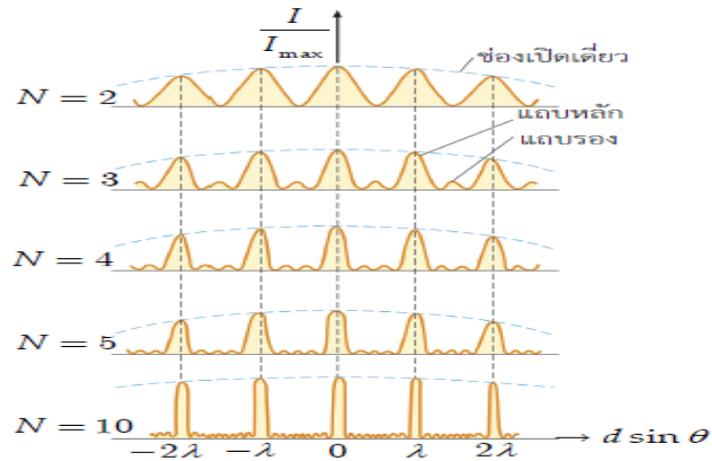
$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda L} y\right) \quad (2.11)$$

ดังนั้นการแทรกสอดแบบเสริมกันจะมีค่าความเข้มแสงมากที่สุดก็ต่อเมื่อ  $\left(\frac{\pi d}{\lambda L} y\right)$  เป็นเลขจำนวนเต็มของ  $\pi$  ซึ่งหมายถึง  $y = \frac{\lambda L n}{d}$  เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความเข้มแสงกับระยะ  $d \sin \theta$  แสดงดังตัวอย่างรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงค่าความเข้มแสงกับระยะ  $d \sin \theta$  สำหรับรูปแบบการแทรกสอดจากสลิตคู่เมื่อนაკอยู่ไกลจากสลิตทั้งคู่ ( $L \gg d$ ) [6]

รูปแบบของการแทรกสอดจะประกอบด้วย แถบสว่างที่สว่างเท่าๆกันห่างกันเป็นระยะเท่าๆกัน ซึ่งในกรณีนี้เป็นกรณีที่ว่า  $L \gg d$  มากๆ ดังตัวอย่างรูปที่ 2.6 และ 2.7

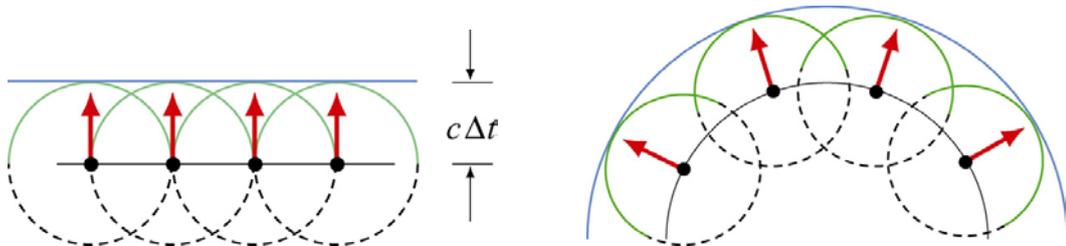


รูปที่ 2.7 การกระจายความเข้มแสงจากช่องเปิดหลายช่อง [7]

สำหรับรูปที่ 2.7 แสดงการกระจายความเข้มแสงกรณีสลิตเป็นช่องเปิดตั้งแต่ 2 ช่องขึ้นไป รูปแบบความสว่างที่เท่าๆกันยังคงเช่นเดิม แต่เมื่อจำนวนช่องเปิดมากขึ้น แถบสว่างที่กว้างจะลดขนาดกลายเป็นจุดสว่าง ซึ่งเป็นหลักการของรูปแบบการแทรกสอดของแสงในเกรตติง (Grating)

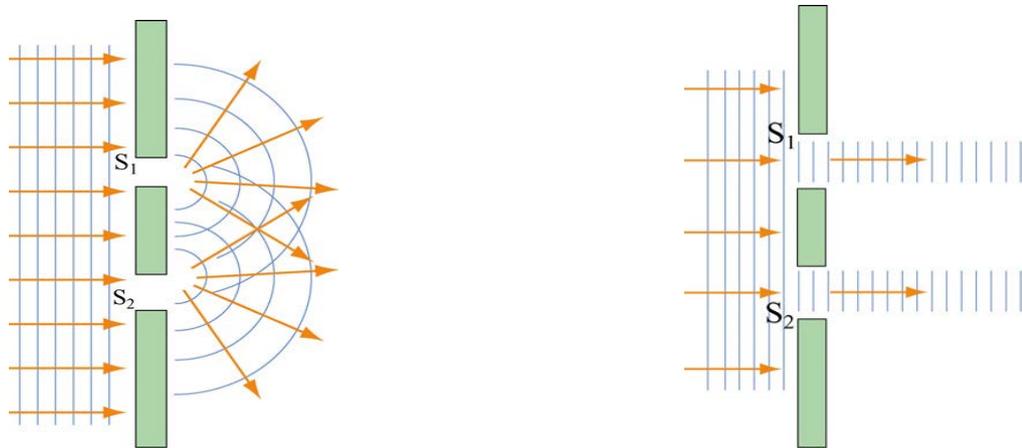
#### 2.1.4 การเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction of Light) [8], [9]

การเลี้ยวเบนจะปรากฏให้เห็นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาพบสิ่งกีดขวาง ที่มีลักษณะเป็นขอบหรือช่องที่มีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่น ทำให้คลื่นเคลื่อนที่เลี้ยวผ่านสิ่งกีดขวางไปได้ ซึ่งอธิบายได้โดยใช้หลักของฮอยเกนส์ (Huygens's principle) ซึ่งกล่าวไว้ว่า " ทุกๆจุดบนหน้าคลื่นอาจถือได้ว่าเป็นจุดกำเนิดคลื่นใหม่ที่ทำให้คลื่นความยาวคลื่นเดิมและเฟสเดียวกัน " เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปพบขอบของสิ่งกีดขวางจะเลี้ยวเบนผ่านขอบไปได้โดยทิศของคลื่นจะเคลื่อนที่โค้ง แสดงดังตัวอย่างรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงพฤติกรรมของคลื่นตามหลักของฮอยเกนส์ [8]

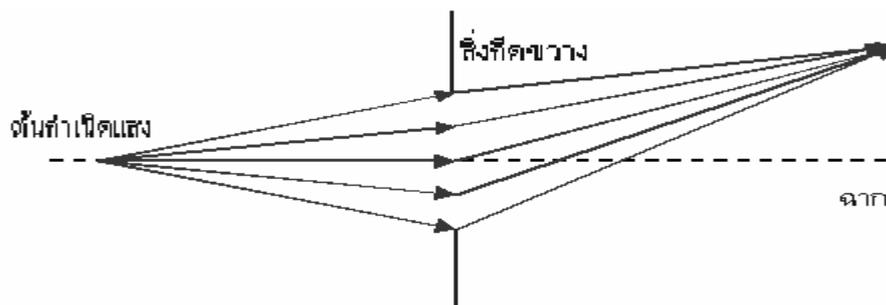
สำหรับสิ่งกีดขวางที่เป็นช่องเปิดเล็กๆ หรือสลิตที่จะปล่อยให้คลื่นผ่านไป การเลี้ยวเบนจะเกิดขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อขนาดของสลิตมีค่าเข้าใกล้ความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านสลิตนั้น ดังตัวอย่างรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของคลื่นผ่านช่องสลิต [8]

#### 2.1.4.1 การเลี้ยวเบนแบบเฟรสเนล (Fresnel Diffraction)

เป็นการเลี้ยวเบนที่ต้นกำเนิดแสง ฉากรับภาพ หรือทั้งสองอย่างอยู่ห่างจากสิ่งกีดขวางไม่มาก ทำให้แสงที่ตกกระทบ สิ่งกีดขวางและเลี้ยวเบนจากสิ่งกีดขวางไม่ใช่ลำแสงขนาน เกิดลำแสงบานออก แหล่งกำเนิดประเภทนี้เป็นจุด (Point source) ซึ่งภาพจะเกิดขึ้นที่ระยะใกล้ช่องเปิด (Near field pattern) ลักษณะของภาพการเลี้ยวเบนจะแคบ ดังตัวอย่างรูปที่ 2.10

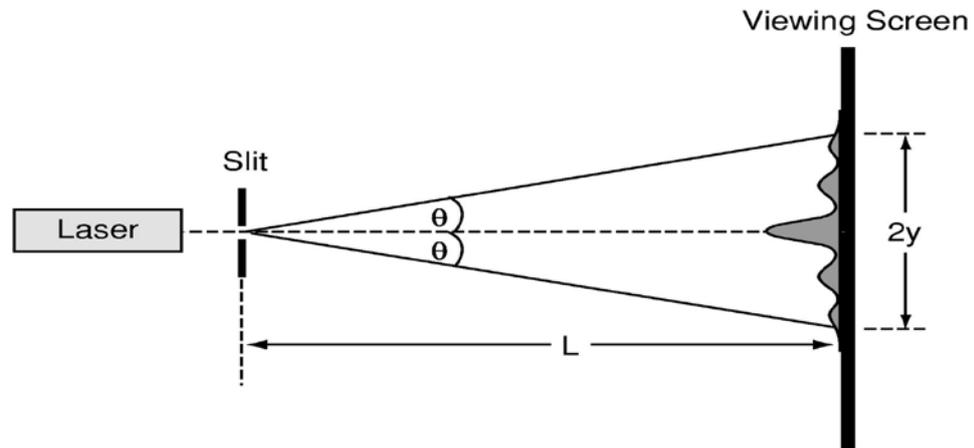


รูปที่ 2.10 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนแบบเฟรสเนล

#### 2.1.4.2 การเลี้ยวเบนแบบเฟรอน์โฮเฟอร์ (Fraunhofer Diffraction)

การเลี้ยวเบนแบบ เฟรอน์ โฮเฟอร์ จะเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ฉากอยู่ห่างจากสลิต มากพอที่จะพิจารณาว่า แสงจากต้นกำเนิดที่เคลื่อนที่มายังสลิต เป็นลำขนานได้ และหน้าคลื่นเป็นคลื่นระนาบ ซึ่ง

จะเกิดภาพที่ระยะไกล (Far field pattern) ส่งผลให้ลักษณะของภาพการเลี้ยวเบนจะขยายกว้าง ในทางปฏิบัติถ้าใช้ต้นกำเนิดแสงโดยทั่วไปซึ่งให้สเปกตรัมแบบเส้น ดังตัวอย่างรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการเลี้ยวเบนแบบเฟรอน์โฮเฟอร์ของลำแสงขนานผ่านสลิตเดี่ยว [3]

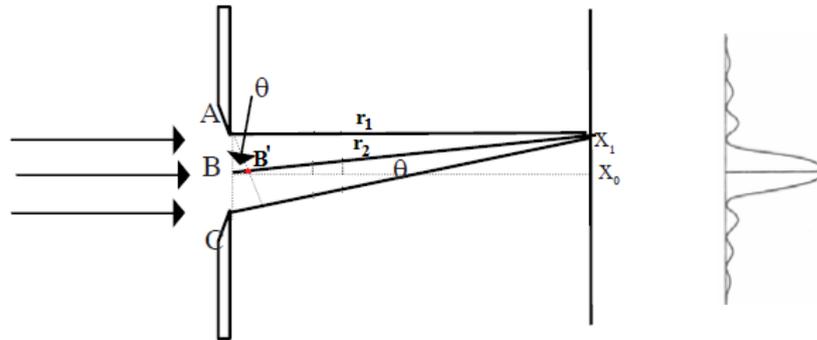
ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการเลี้ยวเบนที่เกิดจากสิ่งกีดขวางที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตหรือเกิดจากสลิตเล็กๆรังสีตกกระทบเป็น ลำแสงขนาน ที่เรียกว่า การเลี้ยวเบนแบบ เฟรอน์โฮเฟอร์ ถ้าสิ่งกีดขวางเป็นสลิตเดี่ยวที่มีความยาวมากๆจนไม่ต้องคำนึงถึงผลที่เกิดขึ้นที่ปลายทั้งสองข้าง เมื่อแสงขนานตกกระทบสลิต ทุกๆจุดบนหน้าคลื่นจะเป็นแหล่งกำเนิดแสงทุติยภูมิ (secondary source) อีกครั้งหนึ่งได้เมื่อนำเลนส์นูนบางมากมาวางข้างหลังสลิต เนื่องจากความบางของเลนส์นูนจึงไม่ส่งผลต่อเฟสของคลื่นแสงแต่อย่างใด ดังตัวอย่างรูปที่ 2.12 ถ้าเราเริ่มต้นพิจารณาที่จุดกึ่งกลางของฉาก คือ  $x_0$  รังสีทุกเส้นที่ต่อออกไปจากช่องแคบไปยัง  $x_0$  จะมีเส้นทางเดินของแสงเท่ากัน มีเฟสเหมือนกันที่ตรงช่องแคบและที่ตรงจุด  $x_0$  ที่จุดกึ่งกลางของแบบการเลี้ยวเบน  $x_0$  จะมีความสว่างมากที่สุด

พิจารณาที่จุด  $x_1$  เป็นตำแหน่งมืด โดยแบ่งช่องแคบออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆกัน AB และ BC ที่ส่วนบนของช่องแคบจะมีรังสี  $r_1$  ที่จุดแบ่งครึ่งจะมีรังสี  $r_2$  กำหนดให้ระยะ  $BB'$  มีค่าเป็นครึ่งเท่าของความยาวคลื่นทำได้โดยเลือกมุม  $\theta$  นั่นคือ  $r_1$  และ  $r_2$  จะมีเฟสต่างกัน  $\pi$  เมื่อพิจารณารังสีทุกๆเส้นจากช่องแคบส่วนบน (AB) กับรังสีทุกๆเส้นของช่องแคบส่วนล่าง (AC) ที่สมนัยกัน (ที่มีค่าต่างก็ห่างกันเป็นระยะ  $\frac{a}{2}$ ) จะมีเฟสต่างกัน  $\pi$  ด้วยเสมอ จุด  $x_1$  จึงเป็นค่าต่ำสุด ความเข้มของแสงมีค่าเป็นศูนย์ สมการที่สอดคล้องกับกรณีนี้คือ

$$\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$$

$$a \sin \theta = \lambda \tag{2.12}$$

สมการที่ 2.12 นี้จะได้ผลจากการเลี้ยวเบนเป็นแถบมืด



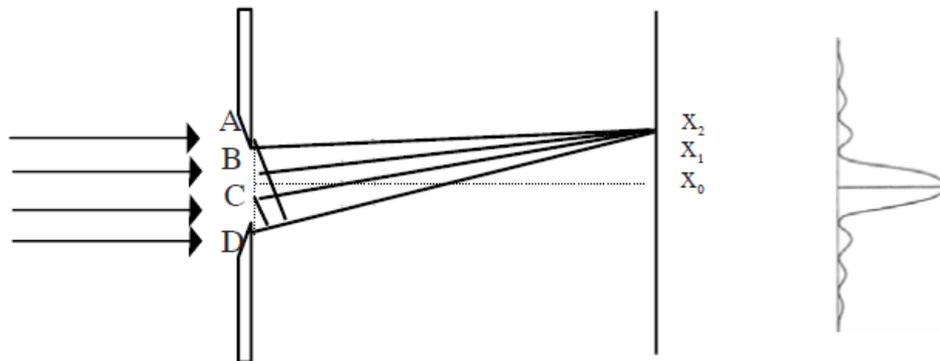
รูปที่ 2.12 แสดงการแบ่งช่องแคบออกเป็น 2 ส่วน [9]

ถ้าแบ่งช่องแคบหรือสลิตออกเป็น 3 ช่องเท่าๆกัน ดังตัวอย่างรูปที่ 2.13 ที่จุด  $x_2$  แสงจาก A และ B จะพบกัน แสงจาก AB (ช่องที่ 1) และแสงจาก BC (ช่องที่ 2) จะมี path different =  $\frac{\lambda}{2}$  จะหักล้างกันหมดไป เหลือแต่ส่วน CD (ช่องที่ 3) ที่จุด  $x_2$  จึงมีแสงสว่าง สมการที่สอดคล้องเงื่อนไขนี้คือ

$$\frac{a}{3} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$$

$$a \sin \theta = \frac{3\lambda}{2} \tag{2.13}$$

โดยสมการที่ 2.13 จะเป็นแถบสว่าง

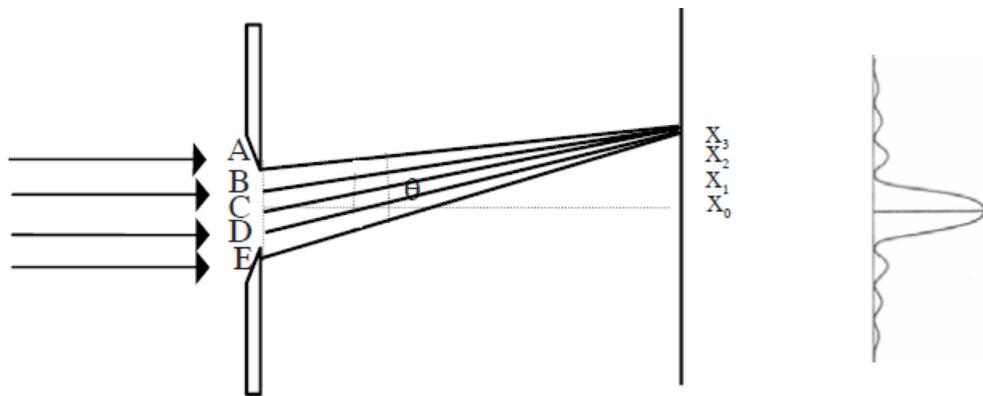


รูปที่ 2.13 แสดงการแบ่งช่องแคบออกเป็น 3 ส่วน [9]

ถ้าเราแบ่งช่องว่างออกเป็น 4 ช่องเท่าๆกัน ดังตัวอย่างรูปที่ 2.14 มีรังสีเดี่ยวเบนจากตอนบนของแต่ละส่วนจัดมุม  $\theta$  ให้พอดีที่ทำให้  $BB' = \frac{\lambda}{2}$  รังสี  $r_1$  จะหักล้างกับ  $r_2$  ที่จุด  $x_3$  จะเห็นว่า  $r_3$  และ  $r_4$  จะมีเฟสต่างกัน  $\pi$  หรือมี path different =  $\frac{\lambda}{2}$  ด้วย นั่นคือที่จุด  $x_3$  จะไม่มีแสงสว่าง จะได้ค่าต่ำสุดตำแหน่งที่ 2 นั่นคือ

$$\frac{a}{4} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$$

$$a \sin \theta = 2\lambda \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.14 แสดงการแบ่งช่องแคบออกเป็น 4 ส่วน [9]

ดังนั้นในกรณีเช่นเดียวกัน ถ้าหากเราแบ่งช่องแคบออกเป็น 6 ส่วนหรือ 8 ส่วน จะได้ค่าต่ำสุดที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ค่าต่ำสุด (minima) ของการเลี้ยวเบนจึงหาได้จากสมการทั่วไป ตามสมการที่ 2.15

$$a \sin \theta = m\lambda \quad (2.15)$$

- เมื่อ  $a$  คือ ความกว้างของช่องสลิต  
 $m$  คือ อันดับริ้วมืดของการเลี้ยวเบน มีค่าเป็น  $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$   
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นจากแหล่งกำเนิดแสง

หรือถ้าหากเราพิจารณาดังตัวอย่างรูปที่ 2.11 ถ้า  $\theta$  เป็นมุมเล็กๆ เราจะประมาณได้ว่า

$$\tan \theta \approx \sin \theta \approx \theta \quad \text{ดังนั้น} \quad \tan \theta \approx \frac{y}{L}$$

เมื่อ  $y$  คือ ระยะจากแถบสว่างตรงกลางถึงแถบมืดลำดับที่  $m$  ใดๆ และจากสมการที่ 2.15 ดังนั้น  
 $a \sin \theta = m\lambda$  จึงได้ว่า

$$a \frac{y}{L} = m\lambda \quad (2.16)$$

- เมื่อ  $a$  คือ ความกว้างของช่องสลิต  
 $y$  คือ ระยะห่างจากแถบมืดตำแหน่งใดๆถึงสว่างกลาง  
 $L$  คือ ระยะห่างจากสลิตไปถึงฉาก  
 $m$  คือ อันดับแถบมืดของการเลี้ยวเบน มีค่าเป็น  $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$   
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นจากแหล่งกำเนิดแสง

จะเห็นว่าสมการที่ 2.15 และสมการที่ 2.16 จะสอดคล้องกัน และในการคำนวณการเลี้ยวเบนของแสง  
 นี้เราจะไม่ใช่ค่า  $m = 0$  เพราะค่านี้จะให้ค่าความเข้มสูงสุดบนฉากตรงกลางของหลอดฉายการเลี้ยวเบน

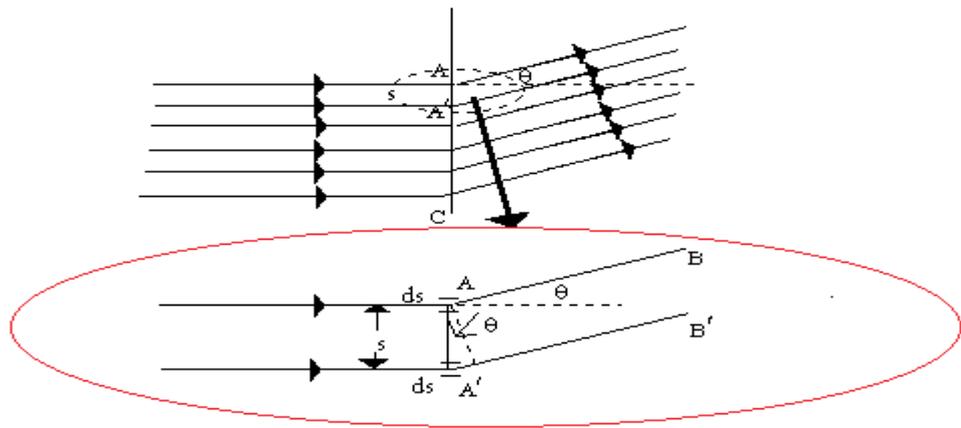
### 2.1.4.3 ความเข้มแสงในรูปแบบการเลี้ยวเบนจากสลิตเดี่ยว

ความเข้มแสงในรูปแบบการเลี้ยวเบนที่บริเวณต่างๆมีค่าแตกต่างกันไป ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของแสงที่ตกบนฉากโดยเกิดจากสลิตเดี่ยว

ในการหาความเข้มแสง ( $I$ ) ที่บริเวณต่างๆในรูปแบบการเลี้ยวเบน สามารถใช้วิธีการคำนวณทาง  
 คณิตศาสตร์เข้ามาช่วยเพื่อหาความเข้มและเงื่อนไขการเกิดแถบมืดแถบสว่างของการเลี้ยวเบน โดย  
 แบ่งช่องแคบสลิตออกเป็นส่วนเล็กๆความกว้างเท่ากับ  $s$  มีรังสีของแสงผ่านช่องแคบนี้ โดยมีความ  
 ห่างของรังสีเท่ากับ  $s$  เช่นกัน ดังตัวอย่างรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงการแบ่งช่องสลิตออกเป็นส่วนเล็กๆ [9]

พิจารณาตรงบริเวณที่รังสีผ่าน เช่น จุด A หรือ A' จะเป็นช่องเล็กๆขนาด  $ds$  แอมพลิจูด (A) ของคลื่นจะแปรผันตรงกับ  $ds$  ถ้าหาก  $ds$  กว้างมากแอมพลิจูดของแสงจะมาก และถ้าหาก  $ds$  น้อย แอมพลิจูดของคลื่นจะน้อยด้วย ดังนั้นคลื่นระนาบที่เวลาใดๆและมีเฟสเท่ากับ  $\phi$  เขียนได้เป็นดังสมการ 2.17

$$y = A \sin(\omega t - \phi) \quad (2.17)$$

ถ้าคลื่นที่ผ่านช่องสลิตในช่วง  $ds$  เล็กๆ เขียนได้ใหม่ เป็นตามสมการ 2.18

$$dy = (Ads) \sin(\omega t - \phi) \quad (2.18)$$

แอมพลิจูดของคลื่นคือ  $Ads$  และแอมพลิจูดของคลื่นนี้จะแปรผันตรงกับ  $ds$  รังสี AB' จะล่าหลังกว่ารังสี AB ผลต่างของทางเดินแสง =  $s(\sin \theta)$  ความสัมพันธ์ของมุมเฟสและผลต่างของทางเดินแสงจากคลื่น 2 ขบวน จากความต่างเฟสเท่ากับ  $\frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - r_2)$  ดังนั้นจะได้  $\phi = \frac{2\pi s(\sin \theta)}{\lambda}$  เมื่อแทนค่า  $\phi$  ลงในสมการ 2.18 จะได้

$$dy = (Ads) \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}s(\sin \theta)\right) \quad (2.19)$$

การเลี้ยวเบนของแสงทั้งหมดที่ผ่านช่องสลิต AC ที่มีมุม  $\theta$  นี้ หาได้โดยการอินทิเกรตตั้งแต่  $s = 0$  ถึง  $s = a$  จะได้

$$y = \int (Ads) \sin\left(\omega t - \frac{s(\sin \theta)}{\lambda}\right) ds$$

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{A\lambda}{2\pi \sin \theta} \cos 2\pi \left( \omega t - \frac{s(\sin \theta)}{\lambda} \right) \Big|_0^a \\
 &= \frac{A\lambda}{2\pi \sin \theta} \left[ \cos 2\pi \left( \omega t - \frac{a \sin \theta}{\lambda} \right) \right] - [\cos 2\pi(\omega t)] \quad (2.20)
 \end{aligned}$$

จากความสัมพันธ์ทางเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ

$$\cos A - \cos B = 2 \sin \left( \frac{A+B}{2} \right) \sin \left( \frac{A-B}{2} \right) \quad (2.21)$$

นำเอกลักษณ์ตรีโกณมิติในสมการ 2.21 ไปแทนลงสมการ 2.20 จะได้

$$y = \frac{A\lambda}{\pi \sin \theta} \sin \left( \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \right) \sin 2\pi \left( \omega t - \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \right) \quad (2.22)$$

จากความเข้มของคลื่นแปรผันตรงกับกำลังสองของแอมพลิจูด ( $I \propto A^2$ ) แอมพลิจูดของคลื่นในสมการที่ 2.22 คือ  $\frac{A\lambda}{\pi \sin \theta} \sin \left( \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \right)$  ความเข้มของคลื่นคือ

$$I = I_0 \left[ \frac{\sin^2 \left( \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \right)}{\left( \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \right)^2} \right] \quad (2.23)$$

ถ้าเรากำหนดให้

$$\beta = \left( \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \right) \text{ สามารถเขียนสมการที่ 2.23 ใหม่ได้เป็น}$$

$$I = I_0 \left( \frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \right) \quad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.24 ลวดลายการเลี้ยวเบนจะเป็นแถบมืดเมื่อ  $\sin \beta = 0$  นั่นคือ  $\beta = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$  ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ของแถบมืดได้คือ

$$a \sin \theta = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$$

หรือ

$$a \sin \theta = m\lambda \quad (2.25)$$

เมื่อ  $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 2.15

### 2.1.4.3 ความเข้มแสงในรูปแบบการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนจากสลิตคู่

สำหรับสลิตคู่สามารถคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างช่องสลิต ( $d$ ) ได้ดังสมการ 2.26 และ 2.27

$$d \sin \theta = n\lambda \quad (2.26)$$

$$d \frac{y}{L} = n\lambda \quad (2.27)$$

เมื่อ  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างช่องสลิต

$n$  คือ อันดับแถบสว่างของการแทรกสอด ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ )

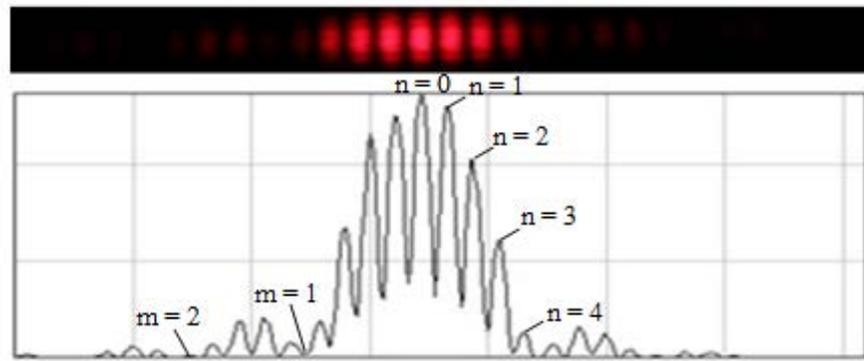
รูปแบบการแทรกสอดของแสงสลิตคู่จะมีการกระจายความเข้มแสงที่ขึ้นกับระยะทางที่ต่างกันของคลื่นแสงเป็น

$$I = I_0 \cos^2 \left( \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \right) \quad (2.28)$$

เมื่อรวมผลของการเลี้ยวเบนเนื่องจากสลิตคู่ จะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนพร้อมกับรูปแบบการแทรกสอดด้วย การกระจายความเข้มแสงที่ขึ้นกับระยะทางที่ต่างกันของคลื่นแสงเป็น

$$I = I_0 \cos^2 \left( \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \right) \left( \frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \right) \quad (2.29)$$

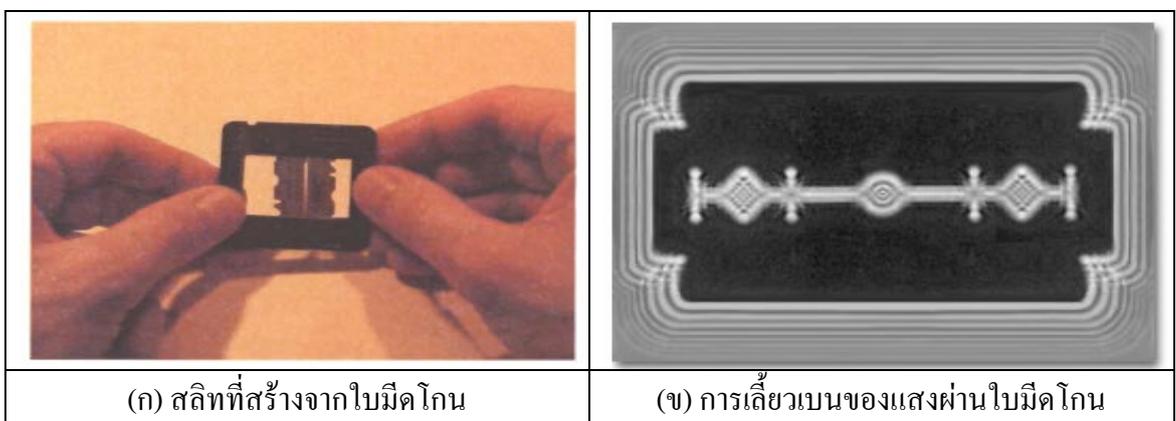
ผลที่ได้จะเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนที่มีแถบสว่างสลับกับแถบมืดและมีแถบสว่างกลางขนาดใหญ่ ภายในแถบสว่างของรูปแบบการเลี้ยวเบนจะมีแถบสว่างกับแถบมืดที่เกิดจากการแทรกสอดจากสลิตคู่ป็นอยู่ แถบสว่างจากการเลี้ยวเบนเหมือนเป็นช่องที่บรรจุ แถบของการแทรกสอดอยู่ภายใน ดังตัวอย่างรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การกระจายความเข้มแสงจากการเลี้ยวเบนผ่านสลิตคู่

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

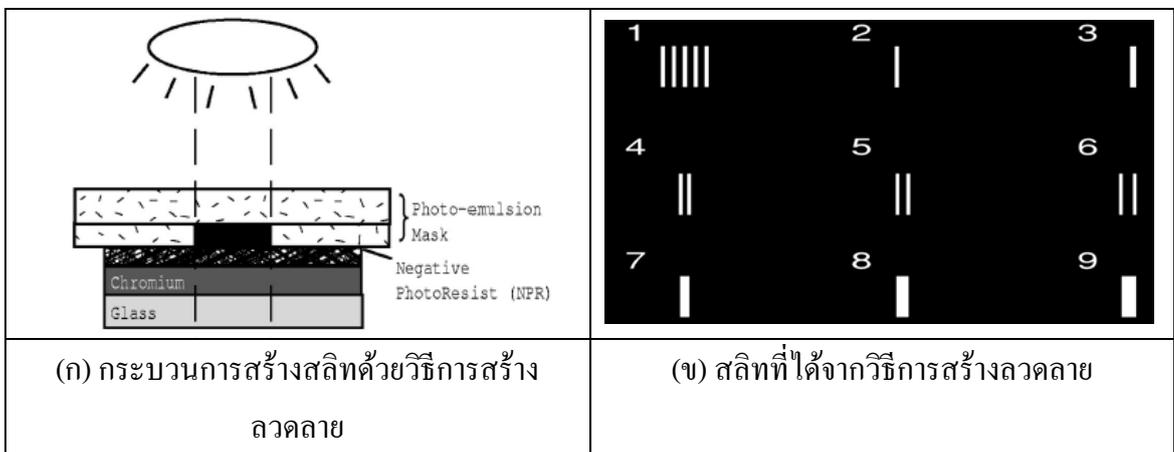
Physical Science Study Committee [10] ศึกษาการเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องสลิตที่ทำจากไบมิด โคน โดยนำไบมิด โคน 2 ไบมาประกบกันแล้วให้เหลือช่องว่างระหว่างไบมิ ด โคนให้แคบพอที่แสงจะลอดผ่าน ดังตัวอย่างรูปที่ 2.18 (ก) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสง โดยให้ เลเซอร์ฮีเลียม- นีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตรเป็นแหล่งกำเนิดแสงส่องผ่านช่องระหว่าง ไบมิด โคนแล้วนำมาจับเกิดภาพการเลี้ยวเบนของแสงดังตัวอย่างรูปที่ 2.18 (ข) จากการทดลองใน ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ทั่วไปของนักเรียนระดับมัธยมศึกษาไม่ได้กำหนดค่าความกว้างของ ระยะสลิตที่ทำจากไบมิด โคนอย่างชัดเจน เนื่องจากทำการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนและการแทรก สอดของแสงผ่านขอบไบมิด โคนและแถบมืดแถบสว่างที่ปรากฏบนฉากเพื่ อที่จะอธิบายว่าแสงเป็น คลื่นและอนุภาค ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับศึกษารูปแบบ ปรากฏการณ์การ เลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสงในห้องปฏิบัติการสำหรับนักเรียนมัธยมศึกษา



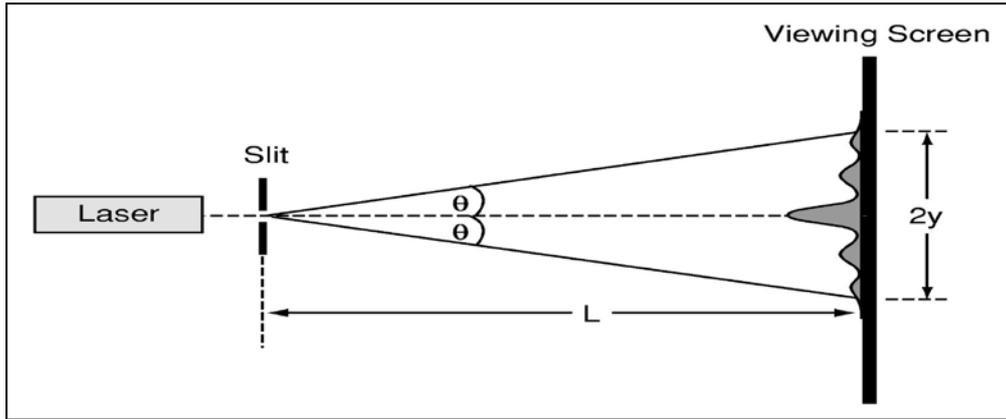
รูปที่ 2.18 การสร้างสลิตจากไบมิด โคนและรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงผ่านขอบไบมิด โคน [10]

Izarra และคณะ [11] ทดลองและอธิบายการเลี้ยวเบนของแสงโดยการ ใช้เซ็นเซอร์รับภาพ ซีซีดี (CCD) เชิงเส้นในการ ทดลอง ใช้เลเซอร์ฮีเลียมนีออน (He-Ne laser) ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร เป็นต้นกำเนิดแสงส่องผ่านเลนส์สองชิ้นโดยชิ้นที่ 1 มีความยาวโฟกัส 5 มิลลิเมตร (focal: 5 mm) และเลนส์ชิ้นที่ 2 ความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร (focal: 50 mm) และใช้ซีซีดีโฟโตไดโอดอาร์เรย์ (CCD Photodiode Arrays) เป็นฉากรับภาพ ซึ่งรูปแบบการทดลองนี้ เป็นสามารถอธิบายการเลี้ยวเบนแบบเฟราน์โฮเฟอร์

Slogoff และคณะ [3] ได้ทำการสร้างสลิตจากกระบวนการ สร้างลวดลาย ดังตัวอย่างรูปที่ 2.19 (ก) และ (ข) เพื่อศึกษารูปแบบปรากฏการณ์เลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสงในห้องปฏิบัติการระดับมหาวิทยาลัย ซึ่งใช้สารเคลือบผิวเป็นโครเมียมลงบนสารตั้งต้นที่เป็นแก้ว กำหนดระยะห่างของช่องสลิตขนาด 4 ไมโครเมตร ซึ่งวิธีการสร้างสลิตด้วยวิธีนี้ทำให้ได้สลิตที่มีความหลากหลายและสามารถกำหนดค่าความกว้างและความคมชัดของช่องสลิตได้อย่างแม่นยำ พร้อมทั้ง ทดลองปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสงเพื่อที่จะยืนยันว่าแสงเป็นคลื่น ในการทดลองจะให้เลเซอร์ฮีเลียม- นีออนเป็นแหล่งกำเนิดแสง ส่องผ่านช่อง สลิตเดี่ยวและสลิตคู่ เกิดการเลี้ยวเบนเกิดแถบมืดแถบสว่างบนฉาก ดังตัวอย่างรูปที่ 2.20 ทำให้นักศึกษาเข้าใจพฤติกรรมของแสงมากขึ้นเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับนักศึกษาระดับมหาวิทยาลัย

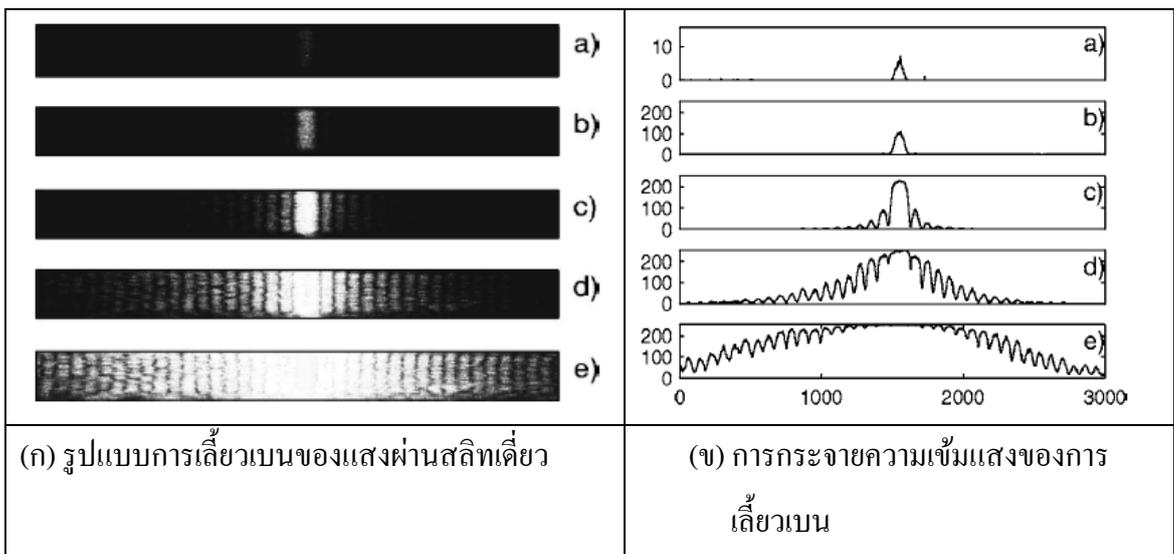


รูปที่ 2.19 กระบวนการสร้างสลิตและสลิตที่ได้จากการสร้างด้วยวิธีการสร้างลวดลาย [12]



รูปที่ 2.20 การจัดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองปรากฏการณ์เลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสง [3]

Ramil และ คณะ [12] ทำการปรับปรุงและวิเคราะห์ปรากฏการณ์ การเลี้ยวเบนของแสง จากการใช้ภาพถ่ายดิจิทัล ด้วยความเร็วชัตเตอร์กล้องที่แตกต่างกัน ดังตัวอย่างรูปที่ 2.21 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตรเป็นต้นกำเนิดแสง เพื่อศึกษาการเลี้ยวเบนจากสลิตเดี่ยว สลิตคู่ และช่องวงกลม ซึ่งได้ออกแบบการทดลองโดยอิงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนผ่านเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร สลิตและตัวกรอง แล้วตกลงบนซีซีดีของกล้องดิจิทัล Nikon D100 สามารถนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของขนาดของช่อง โดยการปรับช่วงเวลาของการบันทึกความเข้มจาก 30 วินาทีลดลงมาถึง 1/4000 วินาที ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพจากการรวมกันของพิกเซล และทำการวัดค่าความเข้มแสงโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พบว่าวิธีดังกล่าว เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีความเหมาะสมกับห้องปฏิบัติการสำหรับนักเรียน



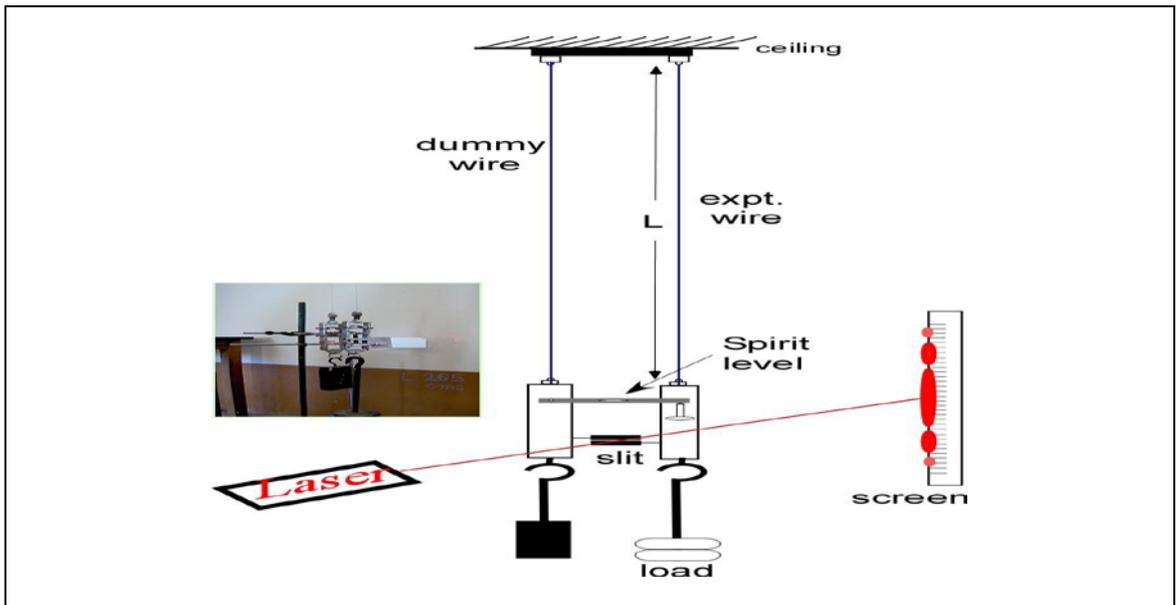
รูปที่ 2.21 การกระจายความเข้มแสงและแถบมืดสว่างของการเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว [12]

Lee และคณะ [13] ทำการสร้างสลิตสำหรับการทดลองของยังโดยใช้แผ่นฟิล์มกราฟิก ซึ่งได้ทำการวัดภาพสลิตขนาดเล็กในระดับไมครอนด้วยซอฟต์แวร์กราฟิกในคอมพิวเตอร์ แล้วทำการพิมพ์ภาพสลิตลงบนแผ่นฟิล์มกราฟิกด้วยเครื่องสร้างภาพจากคอมพิวเตอร์ขนาด 200 เส้นต่อนิ้ว ได้ออกแบบการทดลองโดยอิงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่เป็นต้นกำเนิดแสงผ่านสลิตแล้วตกลงบนฉากที่ห่างจากสลิตเป็นระยะ 1 เมตรเพื่อศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสง สามารถนำมาคำนวณหาค่าความกว้างของช่องสลิต โดยใช้กล้องจุลทรรศน์เชิงแสงถ่ายภาพดิจิทัลในรูปแบบวิดีโอ ทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนของสลิต ที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับสลิต ที่ขายทั่วไป พบว่าสลิตที่สร้างขึ้นจากแผ่นฟิล์มกราฟิกมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5% ที่ความกว้างของช่องสลิต 165 ไมโครเมตรเมื่อเทียบกับสลิตทั่วไปที่ขายในตลาด ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีความเหมาะสมกับห้องปฏิบัติการสำหรับนักเรียน ดังตารางตัวอย่างที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบค่าความกว้างสลิตเดี่ยวที่สร้างจากซอฟต์แวร์และการคำนวณ [12]

Desired slit width b ( $\mu$ m )	Calculate slit width b ( $\mu$ m )	Error
30	$15.2 \pm 0.2$	-49.3
40	$26.7 \pm 1.2$	-33.3
50	$37.9 \pm 2.4$	-24.2
60	$46.6 \pm 1.0$	-17.1
70	$58.0 \pm 2.5$	-15.4
80	$67.7 \pm 1.8$	-13.0
90	$78.3 \pm 2.3$	-11.8
100	$88.2 \pm 1.3$	-9.3
120	$108.8 \pm 2.1$	-7.9
130	$119.7 \pm 3.8$	-7.1
140	$130.0 \pm 2.6$	-7.3
150	$148.8 \pm 1.4$	-7.0
165	$159.1 \pm 1.7$	-3.6





รูปที่ 2.23 การจัดตั้งอุปกรณ์การเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยวเพื่อทำการวัดค่ายังมอดูลัส [14]