

### บทที่ 3

## ทฤษฎีของแสงและโฟโตอีลาสติกซิตี

ในบทนี้นำเสนอทฤษฎีของแสง รวมถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ในการวัดความเค้นด้วยแสง หรือ โพลาริสโคป ที่เป็นอุปกรณ์พื้นฐานของเทคนิคโฟโตอีลาสติกซิตีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

### 3.1 ธรรมชาติของแสง (The nature of light)

มีการศึกษาเรื่องราวที่เกี่ยวกับแสง ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และมีผู้ตั้งสมมติฐานและทฤษฎีที่ใช้อธิบายเรื่องแสงไว้ต่าง ๆ ยกตัวอย่างได้ดังนี้

ปี ค.ศ.1660 นิวตัน ตั้งทฤษฎีอนุภาค โดยกล่าวว่าแสงเป็นอนุภาคที่ถูกส่งออกจากต้นกำเนิดแสง อนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงสามารถทะลุผ่านวัตถุโปร่งใส และสะท้อนจากวัตถุทึบแสงได้เมื่อแสงสะท้อนเข้าสู่ตาทำให้เกิดความรู้สึกในการมองเห็น

ปี ค.ศ.1680 ฮอยแกนส์ ตั้งทฤษฎีเกี่ยวกับแสงว่า แสงเป็นคลื่น โดยสามารถอธิบายการสะท้อน และการหักเหของแสงได้ แต่ไม่สามารถแสดงว่าแสงมีการเลี้ยวเบนได้ทฤษฎีคลื่นแสงจึงยังไม่เป็นที่ยอมรับ

ปี ค.ศ.1801 โทมัส ยัง ได้ทำ การทดลองเกี่ยวกับการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง โดยสามารถวัดความยาวของคลื่นแสงได้ ทำให้ทฤษฎีที่ว่าแสงเป็นอนุภาคหมดไป

ปี ค.ศ.1873 แมกซ์เวลล์ ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกจะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา และพบว่าอัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับอัตราเร็วของแสงจึงเป็นการสนับสนุนว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

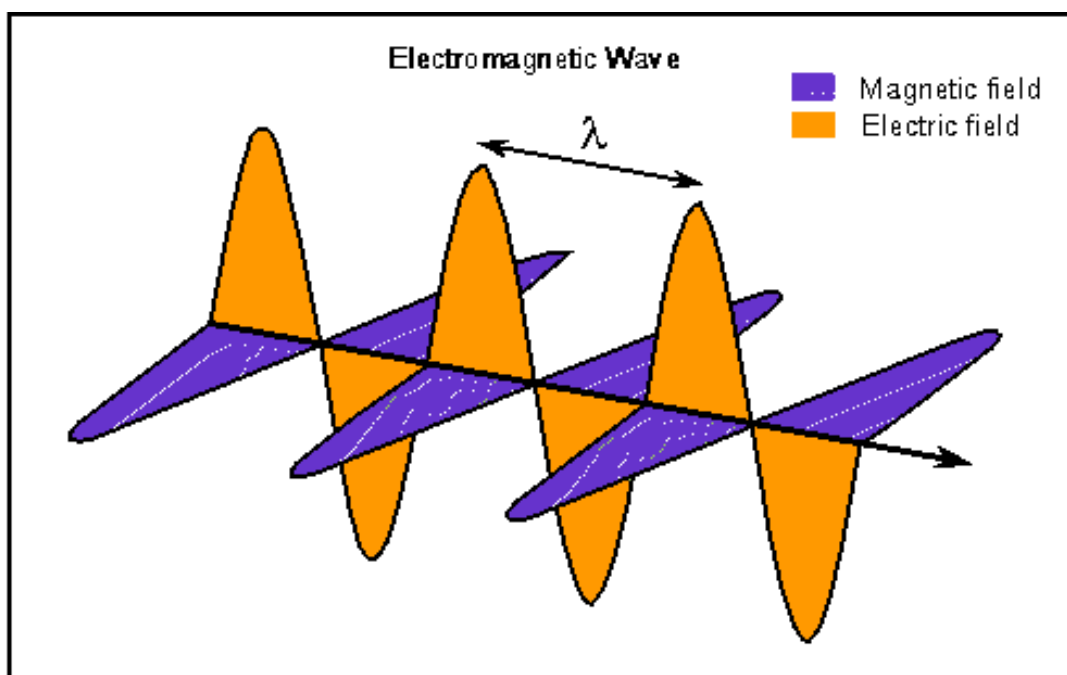
ปี ค.ศ.1954 ไอน์สไตน์ ได้เสนอว่า แสงเป็นอนุภาค ซึ่งอนุภาคของแสงก็คือ กลุ่มก้อนของพลังงานที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) และขนาดของโฟตอนขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของแสง ซึ่งแตกต่างจากทฤษฎีของนิวตัน

ปัจจุบัน เราเชื่อว่าทั้งทฤษฎีแสงเป็นคลื่นและทฤษฎีแสงเป็นโฟตอน สามารถนำไปอธิบายปรากฏการณ์ของแสงได้ในสถานการณ์ที่ต่าง ๆ กัน แสดงให้เห็นว่า แสงประพฤติตัวเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค เรียกว่า สมบัติคู่ของแสง หรือทวิภาพของแสง แต่จะแสดงภาพความเป็นคลื่นหรืออนุภาคเพียงอย่างหนึ่งอย่างใดภายใต้สภาวะการณ์หนึ่งเท่านั้น เช่น ควบคุมให้แสงค่อย ๆ ผ่านช่องเล็กๆแบบเดี่ยว แสงจะแสดงภาพเป็นอนุภาค เมื่อแสงเป็นคลื่นเนื่องจากแสงสามารถแสดง

สมบัติที่สำคัญของคลื่น คือ การแทรกสอดและการเลี้ยวเบน รวมไปถึงสมบัติที่แสดงว่าแสงเป็นคลื่นตามขวาง คือ โพลาริเซชันซึ่งเป็นจุดกำเนิดของอุปกรณ์วัดทางแสงที่ใช้เป็นอุปกรณ์หลักในเทคนิคโฟโตอีลาสติกรีตี

### 3.2 ทฤษฎีคลื่นแสง (Wave theory of light)

จากการที่แมกซ์เวลล์นำเสนอไว้สรุปได้ว่าแสง หมายถึง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน เคลื่อนที่ไปพร้อมกัน โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นตั้งฉากกับทิศทางของสนามทั้งสอง [19]



ภาพที่ 3.1

แสดงลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

<http://www.goiit.com/posts/show/133878.htm>

ลักษณะความเป็นคลื่นของแสงระบุได้ด้วยสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งใน 3 อย่าง กล่าวคือ

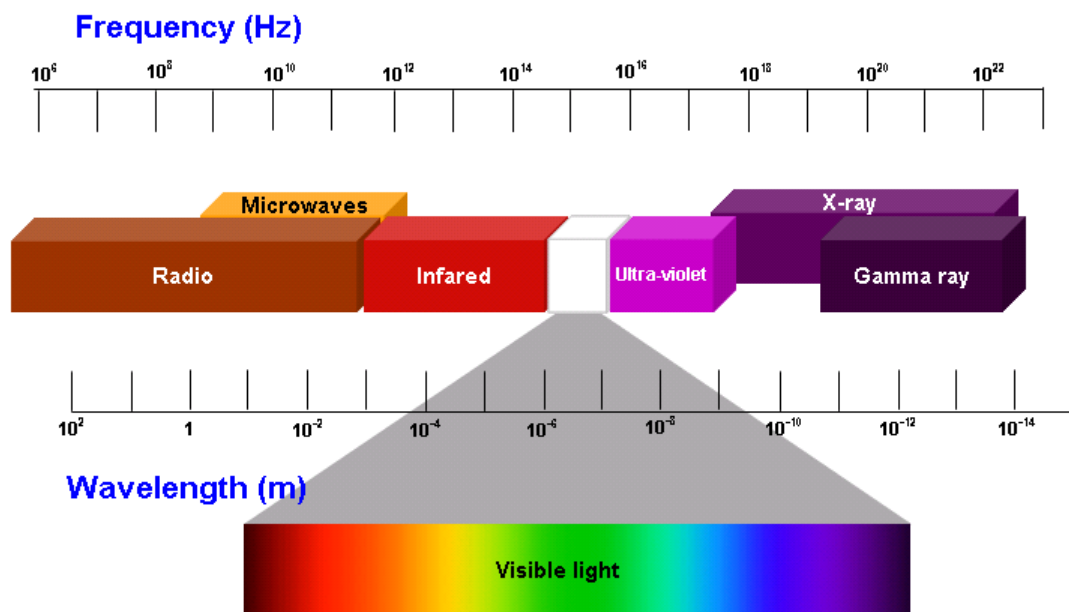
ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ): ระยะระหว่างยอดคลื่น (crest) ที่อยู่ติดกัน วัดในหน่วยความยาว เช่น เมตร เซนติเมตร เป็นต้น

ความถี่คลื่น (f): จำนวนการสั่นไหวของคลื่น หรือ จำนวนลูกคลื่นต่อวินาที วัดในหน่วย  $\text{cm}^{-1}$  (Hz)

ความเร็วคลื่น (c): มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นและความถี่คลื่นดังสมการที่ (3.1)

$$\lambda f = c \quad (3.1)$$

กรณีของคลื่นแสง ความเร็วแสง  $c = 3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าคงที่ ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น จะมีความถี่คลื่นสูง คลื่นที่มีความยาวคลื่นยาวจะมีความถี่ต่ำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นคลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ อินฟราเรด อัลตราไวโอเล็ต รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา ฯลฯ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากันหมด คือ ความเร็วแสง แม้ว่าคลื่นแต่ละชนิดดังกล่าวจะมีพลังงานไม่เท่ากัน



ภาพที่ 3.2

สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

แสงโดยทั่วไปที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้อยู่ในช่วง 400 ถึง 700 นาโนเมตร โดยที่ความยาวคลื่นต่างกันจะทำให้เกิดเฉดสีที่แตกต่างกันตามตารางที่ 3.1 ซึ่งเรียกว่า แสงสีขาว (White light) โดยแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวเรียกว่า แสงสีเดียว (Monochromatic light)

ตารางที่ 3.1

แสดงสเปกตรัมของแสงที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า

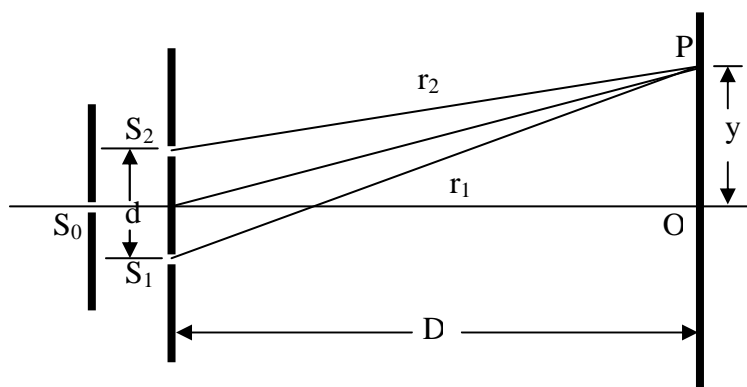
ช่วงความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	สี
400-450	ม่วง
450-480	ฟ้า
480-510	ฟ้าแกมเขียว
510-550	เขียว
550-570	เหลืองแกมเขียว
570-590	เหลือง
590-630	ส้ม
630-700	แดง

ที่มา : หนังสือ Experimental stress analysis ของ James W.Dally

สมบัติความเป็นคลื่นของแสงได้รับการยืนยันจากการทดลองเกี่ยวกับการสะท้อน การหักเห การเลี้ยวเบน และการแทรกสอดว่ามีอยู่จริงและสามารถคำนวณผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้อง เช่น การทดลองให้แสงผ่านช่องเล็กลายแบบคู่ของทอมัส ยัง ในปี ค.ศ.1801 พบว่ามีการแทรกสอดของคลื่นแสงจากเส้นสว่างและมีดลดับกันอย่างชัดเจนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดแรกที่ถูกค้นพบ คือ คลื่นวิทยุ พบโดย ไฮน์ริช เฮิร์ตซ์ ในห้องทดลองที่เบอร์ลินในปี 1888

การทดลองปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงโดยให้แสงสีเดียวผ่านช่องแคบเดี่ยว (Slit) แล้วเลี้ยวเบนตกลงบนช่องแคบคู่ (Double Slit) ช่องแคบ S1 และ S2 ทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นอาพันธ์ เมื่อคลื่นแสงเคลื่อนที่ผ่าน เดินทางไปพบกันจะทำให้เกิดการแทรกสอดกันทั้งในลักษณะเสริมและหักล้างกันโดยปรากฏภาพการแทรกสอดบนฉากเป็นแถบสว่างและแถบ

มีด ดังนั้นถ้าให้แสงสีเดียวความยาวคลื่น  $\lambda$  เคลื่อนที่ผ่านช่องแคบเดี่ยว แล้วเลี้ยวเบนตกลงบนช่องแคบ  $S_1$  และ  $S_2$  ซึ่งห่างกัน  $d$  คลื่นที่ออกจาก  $S_1$  และ  $S_2$  มาพบกันบนฉากที่จุด  $P$  ซึ่งห่างจาก  $S_1$  และ  $S_2$  เป็นระยะ  $r_1$  และ  $r_2$  ตามลำดับ ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3

ค.ศ.1801 โทมัส คัมพบการแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่

### 3.3 คุณสมบัติต่างๆ ของคลื่นแสง

แสง เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง และมีการเคลื่อนที่แนวเส้นตรงในตัวกลางชนิดหนึ่ง ๆ จะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางแต่ละชนิดด้วยความเร็วไม่เท่ากัน ตัวกลางใดมีความหนาแน่นมากแสงจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางนั้น ด้วยความเร็วต่ำ อัตราเร็วของแสงจะมีค่ามากที่สุดในสุญญากาศ คือ  $3 \times 10^8$  m/s (หมายความว่าในเวลา 1 วินาทีแสงเดินทางได้เป็นระยะทาง  $3 \times 10^8$  เมตร) เมื่อมีลำแสงตกกระทบผิววัตถุจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ขึ้น 2 อย่าง คือ

1. การสะท้อนของแสง
2. การหักเหของแสง

### 3.3.1 การสะท้อนแสง (Reflection) และ การหักเหของแสง (Refraction)

แสงที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งซึ่งมีเนื้อเดียวกัน ความเร็วของแสงจะคงที่ แต่ถ้าแสงที่เคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งความเร็วของแสงจะเปลี่ยนไปที่ผิวรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง

จากความสัมพันธ์ของความเร็ว ความถี่ และความยาวคลื่น ที่ว่า ความเร็วมีค่าเท่ากับ ความถี่คูณกับความยาวคลื่นตามสมการที่ 3.1 ฉะนั้นในขณะที่แสงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วหนึ่งเข้ามาในตัวกลางแรก ความถี่หรือความยาวช่วงคลื่นนั้นจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง แต่ถ้าความเร็วของแสงลดลงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในตัวกลางอีกชนิดหนึ่ง ความยาวช่วงคลื่นของแสงนั้นจะลดลง การเปลี่ยนแปลงของความเร็วนี้ขึ้นอยู่กับดัชนีการหักเห  $n$  ของตัวกลางที่เคลื่อนที่ผ่าน โดยดัชนีหักเหของแสงที่เคลื่อนที่ในอากาศอิสระมีค่า  $n = 1.0003$  ในตัวกลางที่เป็นของเหลวอยู่ในช่วง 1.3 ถึง 1.5 (สำหรับน้ำ  $n = 1.33$ ) และในตัวกลางที่เป็นของแข็งอยู่ในช่วง 1.4 ถึง 1.8 (สำหรับแก้ว  $n = 1.5$ )

ในตัวกลางเอกพันธ์ แสงจะมีความเร็วเท่ากันทุกจุด ทุกทิศทาง ความเร็วของคลื่นทุกชนิดขึ้นกับตัวกลางที่เคลื่อนที่ผ่าน การที่ความเร็วของคลื่นขึ้นกับสมบัติของตัวกลาง ทำให้เกิดปรากฏการณ์สะท้อนและหักเหซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคลื่นผ่านตัวกลางที่เปลี่ยนไป และความเร็วของคลื่นก็จะเปลี่ยนไปด้วย คลื่นสะท้อนซึ่งเป็นคลื่นใหม่จะสะท้อนกลับในตัวกลางเดิม ส่วนคลื่นหักเหจะผ่านตัวกลางที่อยู่ติดกัน พลังงานของคลื่นที่ตกกระทบแบ่งไประหว่างคลื่นสะท้อน และคลื่นหักเห คลื่นสะท้อนจะมีพลังงานมากกว่าเช่นในคลื่นสะท้อนที่ผิวกระจก ในกรณีอื่นคลื่นหักเหอาจมีพลังงานมากกว่า

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางโปร่งแสงที่มีค่าดัชนีการหักเหต่างกัน จะทำให้เกิดการสะท้อนและการหักเหขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.4 โดยคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนจะทำมุมกับแนวแกนปกติ เรียกว่า รัศนาตกกระทบ ซึ่ง  $A$  คือมุมที่คลื่นตกกระทบ  $B$  คือมุมของคลื่นสะท้อน และ  $\gamma$  คือมุมของคลื่นหักเห

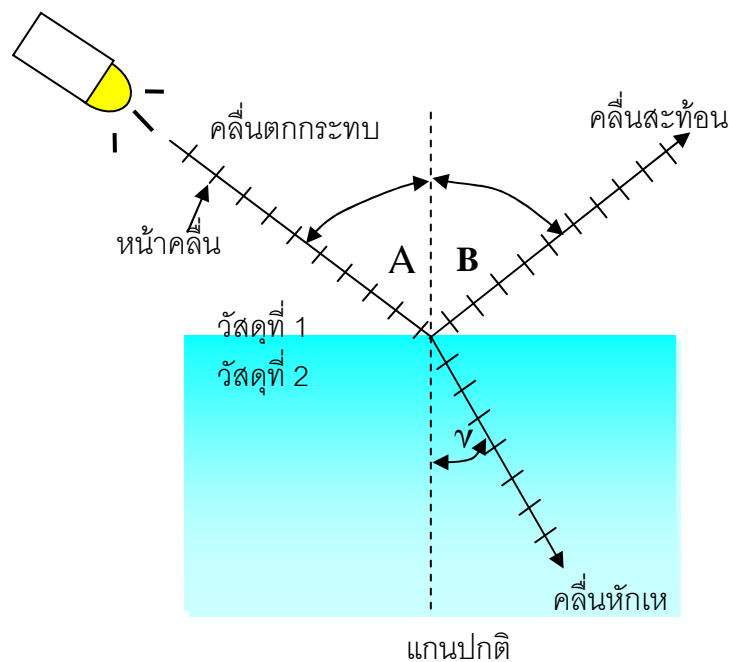
สำหรับ การสะท้อนของแสง

$$A = B \quad (3.2)$$

สำหรับ การหักเหของแสง

$$\frac{\sin A}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $n_1$  คือ ดัชนีการหักเหของวัสดุที่ 1  
 $n_2$  คือ ดัชนีการหักเหของวัสดุที่ 2  
 $n_{21}$  คือ ดัชนีการหักเหของวัสดุที่ 2 ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่ 1



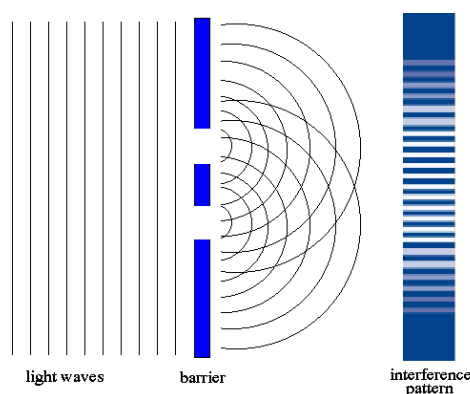
ภาพที่ 3.4

แสดงการสะท้อนและการหักเหของคลื่นแสงผ่านตัวกลาง 2 ชนิด

### 3.3.2 การแทรกสอด (Interference) และ การเลี้ยวเบน (Diffraction)

คลื่นแสงสองคลื่นเคลื่อนที่ไปพร้อม ๆ กันรวมกันแล้วสว่างมากขึ้นเป็นที่เข้าใจและสังเกตเห็นกันในปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ แต่ยังมีกรรวมของคลื่นแสงสองคลื่นนี้ในอีกลักษณะหนึ่งซึ่งดูเหมือนไม่น่าจะเกิดขึ้นได้ คือ รวมกันแล้วมืดสนิท คลื่นสองคลื่นที่รวมกันแล้วก่อให้เกิดการมืดสนิทได้ก็ต่อเมื่อ คลื่นสองคลื่นนั้นเหมือนกันทุกประการเคลื่อนที่ไปด้วยกันด้วยเฟสตรงข้ามกัน แต่ถ้าคลื่นทั้งสองมีเฟสไม่ตรงข้ามกันทีเดียวหรือไม่เหมือนกันทีเดียว บางส่วนของคลื่นจะถูกหักล้างไป บางส่วนก็จะเสริมซึ่งกันและกัน จึงไม่มีมืดสนิทหรือสว่างมากที่สุด

การรวมของคลื่นตั้งแต่สองคลื่นขึ้นไปเคลื่อนที่ไปพร้อม ๆ กันและไปทิศทางเดียวกัน ซึ่งมีผลทำให้เกิดการหักล้างหรือการเสริมกันของคลื่น เรียกว่า การแทรกสอด (Interference)

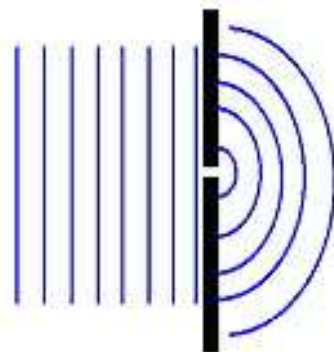


ภาพที่ 3.5

แสดงการแทรกสอดของแสง

[http://misclab.umeoce.maine.edu/boss/classes/SMS\\_491\\_2003/Week\\_9.htm](http://misclab.umeoce.maine.edu/boss/classes/SMS_491_2003/Week_9.htm)

แสงเดินทางด้วยหน้าคลื่นที่เป็นระนาบมากกระทบผ่านช่องแคบ แสงที่ผ่านออกมาจะมีลักษณะหน้าคลื่นเป็นวงกลม ลักษณะแบบนี้เรียกว่าการเลี้ยวเบนของแสงดังแสดงในภาพที่ 3.6



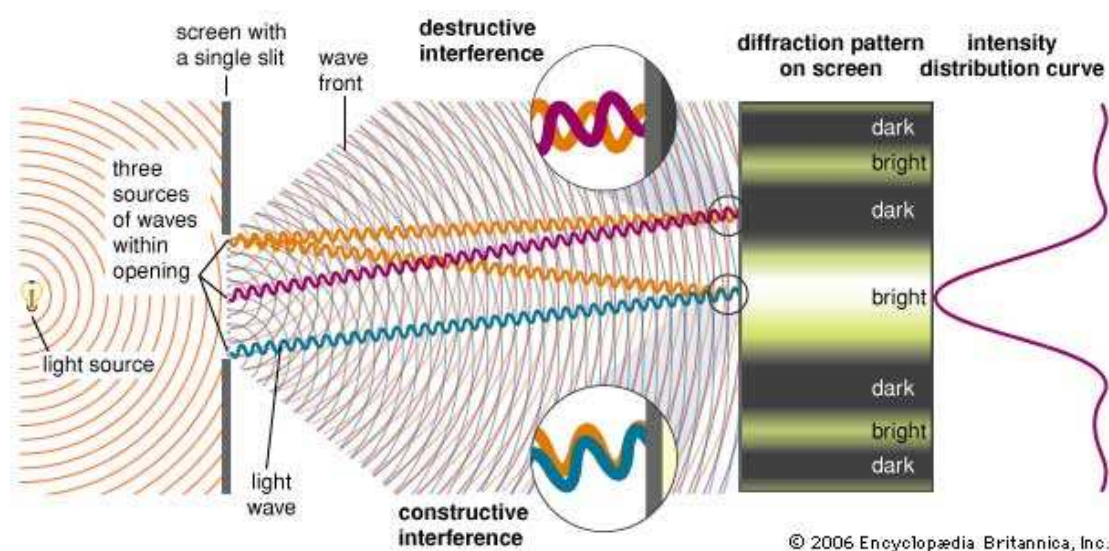
ภาพที่ 3.6

แสดงลักษณะการเลี้ยวเบนผ่านช่องแคบเดียว

<http://irrigation.rid.go.th/rid17/Myweb/machanical/commu/vorapot1.html>



ส่วนมากการเลี้ยวเบนของแสงจะเกิดพร้อมกับการแทรกสอดของแสง ทำให้เกิดแถบมืดและแถบสว่างบนฉากรับภาพ ซึ่งจะมีความเข้มแสงมากที่สุดที่จุดกึ่งกลางฉากรับแสง โดยขณะที่คลื่นแสงสองคลื่นกระทบฉากมีเฟสที่เหมือนกัน จะเกิดเป็นแถบสว่าง หากเฟสแตกต่างกัน จะเห็นเป็นแถบมืด โดยที่หากเฟสแตกต่างกันเล็กน้อยจะเห็นเป็นลักษณะเทาๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของคลื่นแสงที่กระทบฉากเป็นหลัก ดังแสดงในภาพที่ 3.7 การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนนั้นยังใช้วัดความยาวคลื่นได้ไม่แม่นยำนัก แถบสว่างที่ได้ไม่คมชัดและแคบพอที่จะบอกตำแหน่งของแถบได้แน่นอน ถ้าต้องการให้แถบคมชัดและแคบเพียงพอจะต้องใช้อุปกรณ์ เกรตติงเลี้ยวเบนช่วย



ภาพที่ 3.7

การเกิดปรากฏการณ์การแทรกสอดและเลี้ยวเบนทำให้เกิดแถบมืดและสว่างที่ฉากรับแสง

<http://www.britannica.com/EBchecked/topic-art/290177/91987/Single-slit-diffraction->

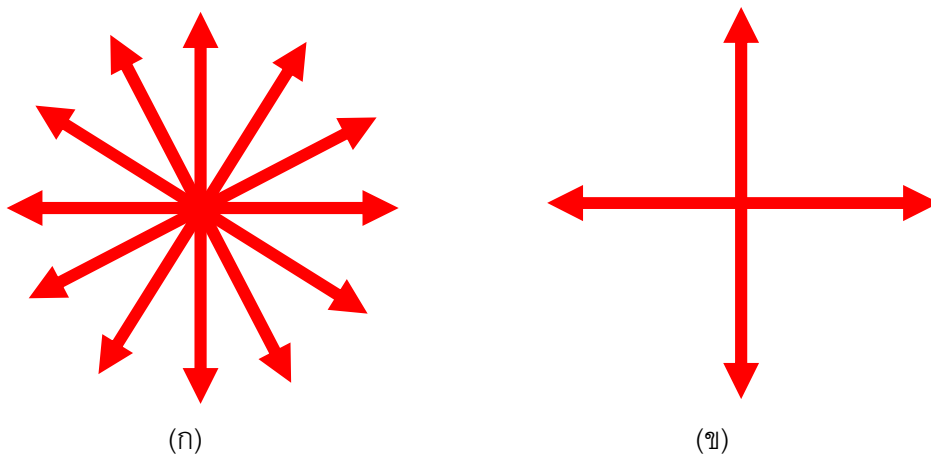
[When-monochromatic-light-passing-through-a-single](http://www.britannica.com/EBchecked/topic-art/290177/91987/Single-slit-diffraction-When-monochromatic-light-passing-through-a-single)

### 3.4 โพลาไรเซชันของแสง (Polarization of light)

จากปรากฏการณ์การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนทำให้สรุปได้ว่า แสงเป็นคลื่น แต่ยังไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นคลื่นตามขวางหรือคลื่นตามยาว ปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน จะพิสูจน์

ได้ว่าแสงเป็นคลื่นตามขวางหรือคลื่นตามยาว เนื่องจากคลื่นตามยาวจะไม่เกิดปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน

แสงที่กระจายออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงธรรมดา ๆ ไม่เป็น โพลาไรเซชัน เพราะว่าจะอมและโมเลกุลของแหล่งกำเนิดแสงสั่นอย่างอิสระไปทุกทิศทางไม่ขึ้นแก่กัน คลื่นแสงที่ไม่เป็นโพลาไรเซชัน จึงประกอบด้วยคลื่นที่กระจายออกไปทุกทิศทางไม่มีความเกี่ยวข้องกับแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น ตามนุษย์ไม่สามารถบอกความแตกต่างระหว่างแสงโพลาไรซ์กับแสงไม่โพลาไรซ์ ต้องใช้อุปกรณ์อย่างอื่นช่วย ภาพที่ 3.8 ที่แสดงความแตกต่างของแสงที่ไม่เป็นโพลาไรเซชันกับแสงที่เป็นโพลาไรเซชัน



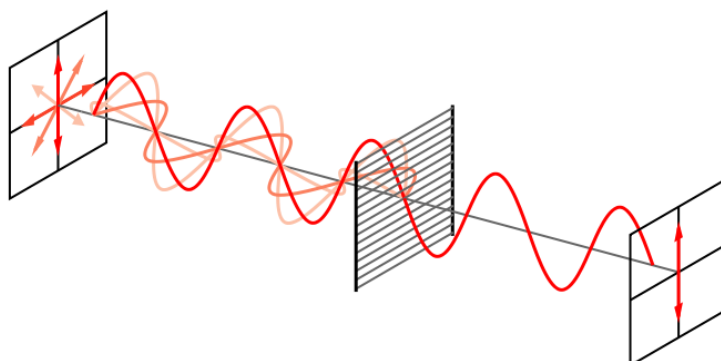
(ก) แสดงเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าของแสงที่ไม่เป็นโพลาไรซ์

(ข) แสดงเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าของแสงที่เป็นโพลาไรซ์

ภาพที่ 3.8

แสดงการเปรียบเทียบเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าของแสง

แสงไฟจากดวงไฟทั่ว ๆ ไปนี้ สามารถทำให้เป็น โพลาไรเซชันโดยทำให้แสงซึ่งมีการสั่นถูกจำกัดลงให้เหลือเพียงแนวเดียวซึ่งตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น การปล่อยให้แสงไฟนี้ผ่านวัตถุบางอย่าง เช่น ผลึก แคลไซต์ ผลึก Tourmaline หรือแผ่นโพลาไรซ์ (Polaroid) ดังภาพที่ 3.9

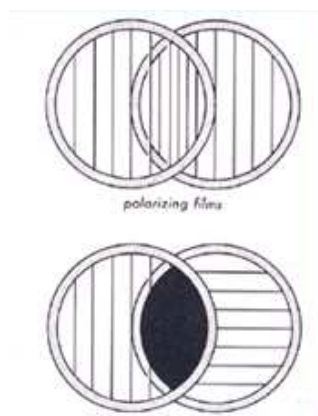


ภาพที่ 3.9

การทำโพลาไรซ์เซชันของคลื่นแสง แสงสีขาวจากหลอดไฟธรรมดา

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wire-grid-polarizer.svg>

ผลึกไดโครอิก(dichroic) คือผลึกที่มีสมบัติในการดูดกลืนแสงที่มีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าในทิศทางหนึ่งมากกว่าอีกทิศทางหนึ่ง ได้แก่ ทัวร์มาลีน (tourmaline) เมื่อให้แสงไม่โพลาไรซ์ ผ่านผลึกทัวร์มาลีน แสงที่มีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าในทิศทางหนึ่งจะถูกดูดกลืนมากกว่าแสงที่มีส่วนประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าอยู่ในทิศทางที่ตั้งฉากกัน ดังนั้น ถ้าผลึกมีความหนาพอ แสงที่ผ่านออกไปจะมีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าอยู่ในทิศเดียว คือ เป็นแสงโพลาไรซ์ ถ้าวางผลึกทัวร์มาลีน อีกอันหนึ่งให้ขนานกับอันแรก แสงจะผ่านไปได้ แต่ถ้าวางผลึกทัวร์มาลีนอีกอันหนึ่งให้แกนตั้งฉากกับอันแรก แสงจะไม่ผ่านดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10

แสดงลักษณะการเกิดภาพจากการวางแผ่นทัวร์มาลีนในทิศทางต่างๆ

### 3.4.1 ประโยชน์ของแสงโพลาไรซ์

#### 1. วิเคราะห์ความเค้นในวัสดุโดยวิธีทางโพโตอีลาสติกซิตี

วัสดุโปร่งใสบางชนิดเช่น แก้ว พลาสติก ถ้าถูกแรงอัดหรือแรงดึงจะทำให้แสงผ่านไปได้มากบ้างน้อยบ้างแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้มองเห็นเป็นริ้ว จากริ้วเหล่านี้ทำให้ทราบได้ว่าส่วนใดของวัตถุได้รับแรงกระทำมาก ส่วนใดของวัตถุได้รับแรงกระทำน้อย แก้วที่จะนำไปใช้ทำเป็นทัศนอุปกรณ์ จึงต้องตรวจดูระหว่างตัวทำแสงโพลาไรซ์กับตัววิเคราะห์เสียก่อน

#### 2. วัดความเข้มข้นของสารละลาย

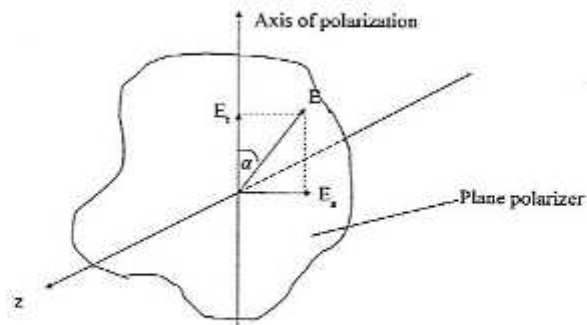
เครื่องมือชนิดหนึ่งสร้างขึ้นเพื่อวัดการบิดไปของระนาบของแสงโพลาไรซ์เนื่องจากสารละลายเรียกว่าโพลาไรมิเตอร์ (Polarimeter) เครื่องมือประกอบด้วยแสงสีเดียว ตัวทำแสงโพลาไรซ์ หลอดแก้วใส่สารละลาย และตัววิเคราะห์ซึ่งหมุนได้รอบแกนที่แสงผ่าน ในการปฏิบัติขณะที่ยังมีได้ใส่สารละลายต้องหมุนตัววิเคราะห์ให้แสงผ่านได้มากที่สุด อ่านมุมที่ตัววิเคราะห์ไว้ จากนั้นใส่สารละลายลงไป แล้วปรับตัววิเคราะห์ใหม่ให้แสงผ่านได้มากที่สุดเหมือนเดิม อ่านมุมที่ตัววิเคราะห์อีกครั้งหนึ่ง ผลต่างของมุมทั้งสองครั้งก็จะเป็นมุมที่ระนาบของแสงโพลาไรซ์ถูกบิดไป มุมนี้เป็นปริมาณโดยตรงกับเข้มข้นของสารละลาย

### 3.5 เครื่องมือวัดทางแสง โพลาไรสโคป (Polariscope)

โพลาไรสโคปเป็นเครื่องมือวัดทางแสง เพื่อหาลักษณะการกระจายความเค้นบนวัตถุโปร่งใส ซึ่งที่ใช้อยู่ส่วนใหญ่มี 2 ชนิด คือ โพลาไรสโคปแบบระนาบ ซึ่งจะมีแผ่นโพลาไรเซอร์แบบระนาบช่วยให้เกิดคลื่นแสง และโพลาไรสโคปแบบวงกลม รายละเอียดต่างๆจะได้อธิบายต่อไป

#### 3.5.1 แผ่นโพลาไรเซอร์แบบระนาบหรือเชิงเส้น (Plane or Linear Polarizer)

เป็นแผ่นที่ยอมให้แสงผ่านได้แนวเดียว คือ แนวที่ขนานกับแกนโพลาไรเซชัน (Axis of polarization) ในภาพที่ 3.11 คลื่นแสง  $E$  ที่มากระทบแผ่นโพลาไรเซอร์และทำมุมกับแกนโพลาไรเซชัน สามารถแบ่งคลื่นแสงออกเป็นสองส่วนที่ตั้งฉากกัน คือ  $E_x$  และ  $E_y$  โดย  $E_x$  จะขนานกับแนวแกนโพลาไรเซชัน และสามารถผ่านโพลาไรเซชันได้ ส่วน  $E_y$  จะตั้งฉากกับแกนโพลาไรเซชันซึ่งจะถูกดูดซับและไม่สามารถผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ไปได้



ภาพที่ 3.11

คุณสมบัติของแผ่นโพลาไรเซอร์แบบระนาบ

ถ้าให้แผ่นโพลาไรเซอร์อยู่ที่ตำแหน่ง  $z_0$  จะได้สมการการเคลื่อนที่ออกมาดังนี้

$$E = a \cos \frac{2\pi}{\lambda} (z_0 - ct) \quad (3.4)$$

เฟสเริ่มต้นของคลื่นและตำแหน่งของแผ่นโพลาไรเซอร์ไม่มีผลต่อการคำนวณต่อไป จึงละทิ้ง ทำให้ได้

$$E = a \cos(2\pi ft) = a \cos \omega t \quad (3.5)$$

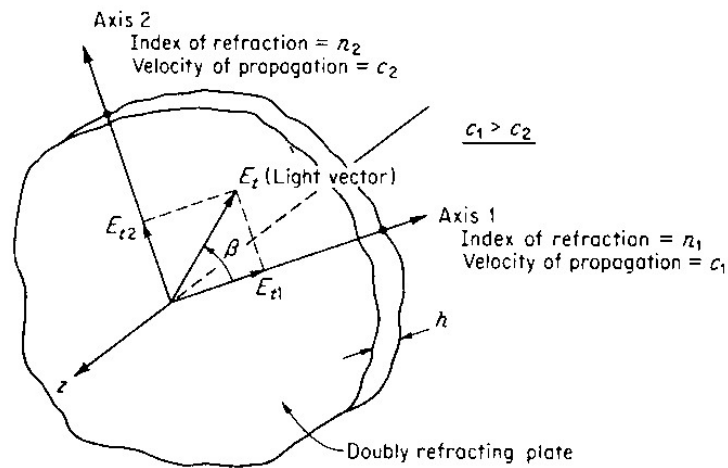
และสามารถหาเวกเตอร์ของคลื่นแสงตามแนวขนานและตั้งฉากกับแนวแกนโพลาไรซ์เช่นกัน ดังนี้

$$E_t = a \cos \omega t \cos \alpha \quad (3.6)$$

$$E_a = a \cos \omega t \sin \alpha \quad (3.7)$$

### 3.5.2 แผ่นคลื่น (Wave plate)

แผ่นคลื่นสามารถแยกเวกเตอร์คลื่นแสงออกเป็น 2 ส่วนที่ตั้งฉากกัน และให้เวกเตอร์องค์ประกอบผ่านไปด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ซึ่งคุณสมบัตินี้ถูกเรียกว่า การหักเหสองแนว (Birefringence หรือ doubly refracting) ดังแสดงในภาพที่ 3.12 แผ่นหักเหสองแนวจะมีแกนหลักอยู่ 2 แกน คือ แกน 1 จะยอมให้แสงผ่านตามแนวแกนด้วยความเร็ว  $c_1$  ส่วนแกน 2 จะยอมให้แสงผ่านด้วยความเร็ว  $c_2$  ถ้าหาก  $c_1$  มีค่ามากกว่า  $c_2$  จะเรียกแกน 1 ว่าแกนเร็ว (fast axis) ส่วนแกน 2 จะเรียกว่า แกนช้า (slow axis)



ภาพที่ 3.12

แสดงแสงโพลาไรซ์ผ่านแผ่นการหักเหสองแกน

หากแผ่นหักเหสองแนวได้รับคลื่นแสงที่ส่งผ่านมาจากแผ่นโพลาไรเซอร์แบบระนาบ และทำมุมกับแกน 1 เท่ากัน จะหาเวกเตอร์ของคลื่นแสงที่ผ่านแผ่นหักเหสองแนวได้ดังนี้

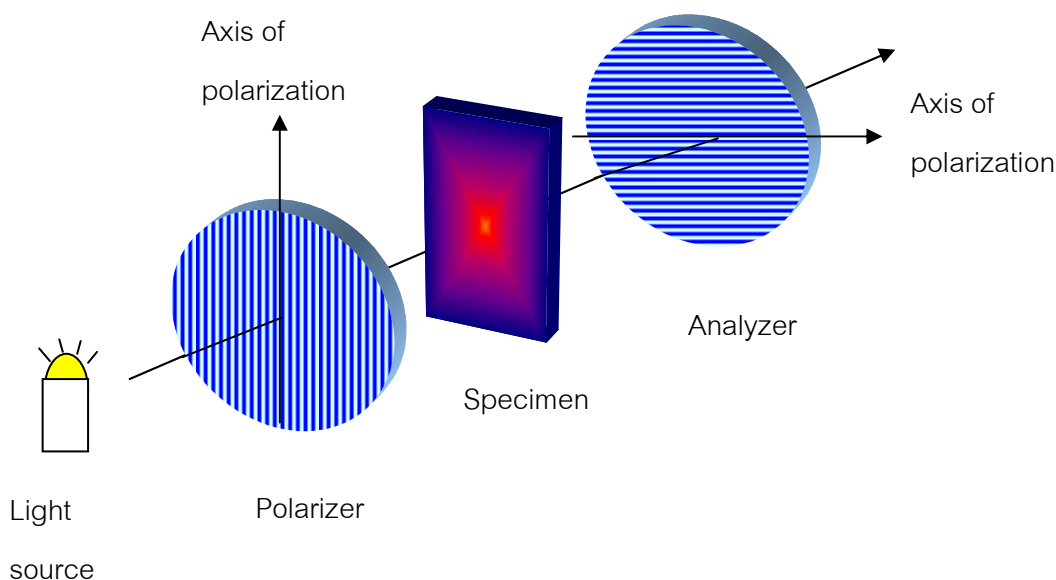
$$E_{t1} = E_t \cos \beta = a \cos \alpha \cos \omega t \cos \beta = k \cos \omega t \cos \beta \quad (3.8)$$

$$E_{t2} = E_t \sin \beta = a \cos \alpha \cos \omega t \sin \beta = k \cos \omega t \sin \beta \quad (3.9)$$

เมื่อ  $k = a \cos \alpha$  และเวกเตอร์ของแสงเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ในเวลาที่แตกต่างกันด้วย

### 3.5.3 โพลาริสโคปแบบระนาบ (Plane Polariscope)

เป็นอุปกรณ์วัดทางแสงอย่างง่ายที่ใช้ในเทคนิคโฟโตอีลาสติกซีดี ประกอบด้วย แผ่นโพลาไรเซชันแบบระนาบ 2 แผ่น และแหล่งกำเนิดแสง โดยแผ่นโพลาไรเซชันแบบระนาบที่อยู่ใกล้แหล่งกำเนิดแสงเรียกว่า โพลาริเซอร์ (Polarizer) ในขณะที่แผ่นโพลาไรเซชันแบบระนาบที่เหลือเรียกว่า อนาไลเซอร์ (Analyzer) ดังภาพที่ 3.13 โดยเมื่อหมุนแกนอนาไลเซอร์ให้ตั้งฉากกับแกนของโพลาริเซอร์จะทำให้ไม่มีแสงลอดผ่านออกมาได้ ภาพที่เกิดขึ้นจะแสดงแถบมืดให้เห็น ซึ่งสามารถนำแผ่นโฟโตอีลาสติก ที่ต้องการวัดทางแสงวางระหว่างแผ่นโพลาไรเซชันทั้งสอง จะปรากฏแถบสีขึ้นซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณได้



ภาพที่ 3.13

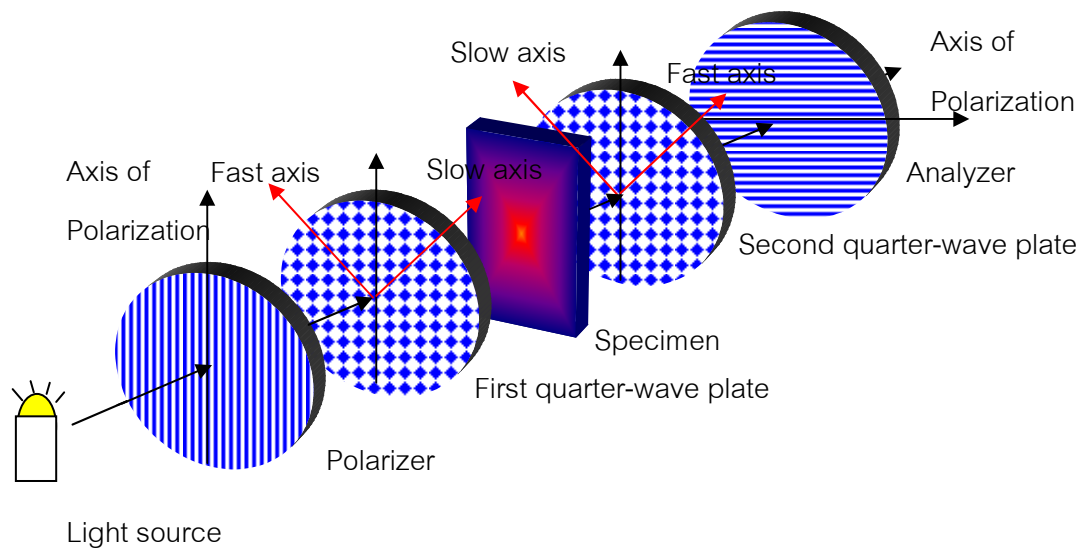
โพลาริสโคปแบบระนาบ

### 3.5.4 โพลาริสโคปแบบวงกลม (Circular Polariscope)

เป็นอุปกรณ์วัดทางแสงที่ใช้แสงโพลาไรซ์แบบวงกลม ประกอบด้วย แผ่นโพลาไรเซชัน 4 แผ่น และแหล่งกำเนิดแสง ดังแสดงในภาพที่ 3.14

แผ่นโพลาไรเซชันแบบระนาบที่อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดแสงคือ โพลาริเซอร์ ที่เป็นตัวแปลงคลื่นแสงธรรมชาติเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิดตามาคือแผ่นคลื่นหรือแผ่นนควอเตอร์เวฟ

(Quarter-wave plate) ที่ตั้งค่ามุม  $\beta = \frac{\pi}{4}$  กับแนวแกนของโพลาไรเซชัน แผ่นคลื่นนี้เองที่เป็นตัวแปลงให้แสงโพลาไรซ์ในแบบระนาบเป็นแสงโพลาไรซ์แบบวงกลม ส่วนแผ่นคลื่นอื่นถัดมาให้ตัวค่าแกนเร็ว (Fast axis) ให้ขนานกับ แกนช้า (Slow axis) ของแผ่นคลื่นอันแรก (First quarter-wave plate) ซึ่งแผ่นคลื่นอันที่สอง (Second quarter-wave plate) นี้จะทำหน้าที่กลับกับแผ่นคลื่นอันแรกคือแปลงแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมกับเป็นแสงโพลาไรซ์แบบระนาบเหมือนเดิม และแผ่นสุดท้ายคือแผ่น อนาไลเซอร์ ซึ่งการเกิดแถบมืดหรือสว่างมีความสัมพันธ์กับการจัดเรียงตัวของแผ่นโพลาไรเซชัน ทั้ง 4 แผ่น ตามตารางที่ 3.2 ที่แสดงรูปแบบความสัมพันธ์ของโพลาไรสโคปแบบวงกลม



ภาพที่ 3.14

แสดงการจัดเรียงตัวในรูปแบบ A ของโพลาไรสโคปแบบวงกลม



## ตารางที่ 3.2

## ผลลัพธ์ 4 รูปแบบการเรียงตัวของอุปกรณ์โพลาไรส์โคแบบวงกลม

รูปแบบ	Quarter-wave plates	Polarizer and analyzer	Field
A	ตั้งฉากกัน	ตั้งฉากกัน	มืด
B	ตั้งฉากกัน	ขนานกัน	สว่าง
C	ขนานกัน	ตั้งฉากกัน	สว่าง
D	ขนานกัน	ขนานกัน	มืด

ที่มา : หนังสือ Experimental stress analysis ของ James W.Dally

### 3.6 ทฤษฎีโฟโตอีลาสติกซิตี

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในโพลาไรส์โคบนั้น เมื่อนำชิ้นทดสอบโฟโตอีลาสติกมาวางไว้ และถูกแรงกระทำจากภายนอก ชิ้นงานโฟโตอีลาสติกทำมาจากวัสดุโปร่งใส และมีค่าดัชนีการหักเหค่าหนึ่ง ( $n$ ) เมื่อนำชิ้นงานมาวางไว้ในโพลาไรส์โคบ โดยยังไม่มีแรงใดมากระทำ คลื่นแสงที่ผ่านทุกพื้นที่ของชิ้นงานโฟโตอีลาสติกจะเกิดการหักเหเท่ากันหมด จะไม่เกิดแถบแสงขึ้นเป็นขอบและถ้ามีการให้แรงภายนอกมากระทำกับชิ้นงานโฟโตอีลาสติก จะทำให้ชิ้นงานเกิดความเค้นขึ้นและมีความเค้นไม่เท่ากันตลอดชิ้นงาน เมื่อคลื่นแสงผ่านชิ้นงานจะเกิดการหักเหของแสงไม่เท่ากัน เนื่องจากผลของความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่ง ทำให้เกิดแถบแสงขึ้นเป็นขอบตลอดทั้งชิ้นงาน และเมื่อปล่อยแรงภายนอกที่มากระทำออกไป จะทำให้แถบแสงทั้งหมดหายไปด้วยเช่นกัน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การหักเหสองแนวชั่วคราว (temporary double refraction) และทฤษฎีโฟโตอีลาสติกซิตีนี้ จะอธิบายถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้

#### 3.6.1 กฎของความเค้นและแสง (Stress-optic law)

Maxwell ได้กล่าวว่าสำหรับวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นนั้นการเปลี่ยนแปลงดัชนีการหักเหจะสัมพันธ์เชิงเส้นกับแรงที่มากระทำรวมไปถึงความเค้นหรือความเครียด ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$n_1 - n_0 = c_1\sigma_1 + c_2(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (3.10)$$

$$n_2 - n_0 = c_1\sigma_2 + c_2(\sigma_3 + \sigma_1) \quad (3.11)$$

$$n_3 - n_0 = c_1\sigma_3 + c_2(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.12)$$

โดย  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  คือ ความเค้นหลักที่เกิดขึ้นของตำแหน่งที่พิจารณา  
 $n_0$  คือ ดัชนีการหักเหของวัสดุขณะที่ไม่เกิดความเค้น  
 $n_1, n_2, n_3$  คือ ดัชนีหักเหในทิศทางที่เกิดความเค้นหลัก  
 $c_1, c_2,$  คือ สัมประสิทธิ์ความเค้นของแสง

จากสมการ (3.10) – (3.12) คือความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างความเค้นและแสง หรือเรียกว่ากฎของความเค้นและแสง (stress - optic law) ซึ่งสามารถหาความเค้นที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใด ๆ ได้ หากสามารถวัดค่าดัชนีหักเหและทิศทางหลักของแนวแกนแสงได้อย่างถูกต้อง ซึ่งแยกพิจารณาเป็นปัญหาความเค้นระนาบใน 2 มิติ จะลดรูปของสมการ ได้ดังนี้

$$n_1 - n_0 = c_1\sigma_1 + c_2\sigma_2 \quad (3.13)$$

$$n_2 - n_0 = c_1\sigma_2 + c_2\sigma_1 \quad (3.14)$$

การวัดค่าทางการทดลองสามารถทำได้สะดวกยิ่งขึ้นหากทำการวัดค่าการหน่วงซ้ำสัมพันธ์  $n_2 - n_1$  แทน

### 3.6.2 กฎของความเค้นและแสงในรูปแบบของการหน่วงซ้ำสัมพันธ์

สมการ (3.10) - (3.12) สามารถจัดรูปใหม่ให้ติดเทอม  $n_0$  ได้ดังนี้

$$n_2 - n_1 = (c_2 - c_1)(\sigma_1 - \sigma_2) = c(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (3.15)$$

$$n_3 - n_1 = (c_2 - c_1)(\sigma_2 - \sigma_3) = c(\sigma_2 - \sigma_3) \quad (3.16)$$

$$n_1 - n_3 = (c_2 - c_1)(\sigma_3 - \sigma_1) = c(\sigma_3 - \sigma_1) \quad (3.17)$$

โดย  $c = (c_2 - c_1)$  คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของความเค้นและแสง (Relative stress-optic coefficients) มีหน่วยเป็นเวกเตอร์ (Brewsters, 1 Brewsters =  $10^{-13}$  cm<sup>2</sup>/dyn =  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/N =  $6.895 \times 10^{-9}$  in<sup>2</sup>/lb)

ชิ้นงานโฟโตอีลาสติกที่เกิดความเค้น จะมีพฤติกรรมเป็นแผ่นคลื่นชั่วคราว ทำให้สามารถนำสมการ (3.15) - (3.17) มาช่วยอธิบายความสัมพันธ์ของการเลี้ยวเบนเฟสเชิงมุมสัมพัทธ์  $\Delta$  กับการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการหักเหของวัสดุเนื่องจากความเค้น

$$\Delta_{12} = \frac{2\pi hc}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (3.18)$$

$$\Delta_{23} = \frac{2\pi hc}{\lambda} (\sigma_2 - \sigma_3) \quad (3.19)$$

$$\Delta_{31} = \frac{2\pi hc}{\lambda} (\sigma_3 - \sigma_1) \quad (3.20)$$

โดย  $\Delta_{12}$  คือ ขนาดของการเลี้ยวเบนเฟสเชิงมุมสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นบนระนาบ 12 ซึ่งแนวลำแสงจะพุ่งไปตามทิศทาง  $\sigma_3$  และตั้งฉากกับระนาบ 12 ส่วน  $\Delta_{23}$  และ  $\Delta_{31}$  จะอธิบายได้ในสมการลักษณะเดียวกัน

จากสมการ (3.18) - (3.20) จะเห็นได้ว่าการเลี้ยวเบนเฟสเชิงมุมสัมพัทธ์ หรือการหน่วงช้าสัมพัทธ์  $\Delta$  จะมีสัดส่วนเชิงเส้นกับผลต่างของความเค้นหลักของสองแนวแกน ความหนาของชิ้นงาน และแปรผกผันกับความยาวคลื่นแสง

สำหรับสัมประสิทธิ์ความเค้นและแสงแบบสัมพัทธ์  $c$  เป็นค่าคงที่ของวัสดุ และไม่ขึ้นกับความยาวของคลื่นแสงเฉพาะในช่วงอีลาสติก ถ้าชิ้นงานเกิดความเค้นในช่วงพลาสติก จะทำให้ค่า  $c$  ไม่คงที่ และจะขึ้นกับความยาวของคลื่นแสง พฤติกรรมนี้เรียกว่า ความพุ่งโฟโตอีลาสติก (Photoelastic dispersion) หรือการพุ่งของการหักเหคู่ (dispersion of birefringence)

ในปัญหา 3 มิติ สมการ (3.18) - (3.20) จะถูกประยุกต์ใช้กับความเค้นหลักอันดับสอง ( $\sigma'_1, \sigma'_2$ ) เช่นเดียวกัน

$$\Delta' = \frac{2\pi hc}{\lambda} (\sigma'_1 - \sigma'_2) \quad (3.21)$$

สำหรับปัญหาความเค้นระนาบใน 2 มิติ  $\sigma_3 = 0$  สมการ (3.21) จะลดรูปเป็น

$$\Delta = \frac{2\pi hc}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (3.22)$$

หรือเขียนได้อยู่ในรูปแบบ

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nf_\sigma}{h} \quad (3.23)$$

$$N = \frac{\Delta}{2\pi} = \frac{\sigma}{\lambda} \quad (3.24)$$

ซึ่งก็คือความสัมพันธ์ในเทอมของความหน่วงครบหนึ่งวัฏจักร

$$f_\sigma = \frac{\lambda}{c} \quad (3.25)$$

โดย N คือจำนวนรอบของการหน่วงซ้ำและนับด้วยอันดับของแถบแสง (fringe order) ส่วน  $f_\sigma$  คือค่าแถบแสงของวัสดุ (material fringe value) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและความหนาของชิ้นงาน

จากสมการที่ (3.23) สามารถหาความแตกต่างของความเค้นหลักและค่าความเค้นเฉือนสูงสุดได้ในกรณีการทดสอบใน 2 มิติ สามารถรู้ค่าจำนวนรอบของการหน่วงซ้ำและนับด้วยอันดับของแถบแสง และค่า Material stress fringe value ซึ่งทราบค่าได้จากคุณสมบัติของวัสดุที่ผู้ผลิตให้หรือหาได้จากการสอบเทียบ

ถ้าในการทดสอบขึ้นทดสอบโพโตอีลาสติกซีดี เป็นการทดสอบการยืดหยุ่นเชิงเส้น ความแตกต่างของความเครียดหลัก  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$  สามารถหาได้โดยการวัดการเกิดของความหน่วงสัมพันธ์ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังนี้

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2) \quad (3.26)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1) \quad (3.27)$$

แทนค่าลงในสมการ (3.23) จะได้

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E}{1+\nu}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (3.28)$$

$$\frac{Nf_\sigma}{h} = \frac{E}{1+\nu}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (3.29)$$

$$\frac{Nf_\varepsilon}{h} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (3.30)$$

$$f_\varepsilon = \frac{1+\nu}{E} f_\sigma \quad (3.31)$$

เมื่อ  $f_\varepsilon$  คือ Material strain fringe value

อย่างไรก็ตาม วัสดุโฟโตอีลาสติกซีดีที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเหนียวยืดหยุ่น (Viscoelastic) ไม่สามารถใช้สมการที่ (3.31) ได้ ส่วนการนำทฤษฎีโฟโตอีลาสติกซีดีไปใช้ในการหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น จะกล่าวในบทต่อ ๆ ไป