

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ทุนส่งเสริมนักวิจัย

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปี พ.ศ. 2548

ผลของแรงเชิงกลที่มีต่อสมบัติโพลาไรเซชันของวัสดุ

Effect of Mechanical Force on Polarization Properties of Material



โดย

รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ

อาจารย์สุรชาติ กมลดีลก

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RC4

QC

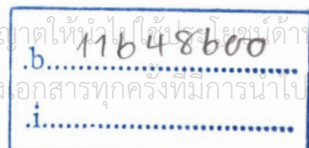
4A1

เลขหมู่ 05479

64427

เลขทะเบียน

วัน,เดือน,ปี 11 ก.ย. 2549



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
เมื่อกำหนดให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของแรงกดภายนอกที่มีต่อสถานะโพลาไรเซชันของแสงที่ทะลุผ่านออกมาจากเพลนโพลาไรซ์สโคปที่มีชุดกำเนิดแรงกระทำต่อแท่งอะคริลิก โดยใช้โหลดเซลล์เป็นอุปกรณ์วัดแรงกดจากภายนอก สถานะโพลาไรเซชันของแสงที่ผ่านออกมาจากแบบจำลอง มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นและเริ่มมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มแรงกดจากภายนอกถึงจุดหนึ่งทิศทางของแรงกดในบางแกนมีผลต่อสถานะโพลาไรเซชันของแสง

Abstract

This research is focused on effects of external mechanical forces on polarization state of light propagated through the plane polariscope model. The plane polariscope model was set up using Acrylic material. The loaded force was measured using commercial load cell. the linear-polarized state of light passing the model changes almost linearly with increasing in external force and then maintains at constant value with further applied forces. The direction of applied forces was also studied. The direction of applied force in specific direction shows significant influences on the model.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 โพลาริเซชัน (Polarization)	3
2.2 ชนิดของโพลาริเซชัน	6
2.2.1 แสงโพลาริเซชันเชิงเส้น	6
2.2.2 แสงโพลาริเซชันวงกลม	8
2.2.3 แสงโพลาริเซชันวงรี	12
2.3 Photoelasticity	15
2.4 Load cell	19
2.4.1 Wheatstone Bridge	19
2.4.2 Instrumentation Amplifier	20
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	22
3.1 ทำการติดตั้ง Plane Polariscopes	22
3.2 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการ โพลาริเซชันของวัสดุ	23
3.3 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการ โพลาริเซชันของวัสดุ	24
เมื่อทิศทางของแรงเปลี่ยนแปลง และการวางตัวของแบบจำลอง	24
3.4 ศึกษาการสอบเทียบแรงกระทำต่อแบบจำลอง	27
3.5 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อทิศทางโพลาริเซชันของวัสดุ	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง	31
4.1 การศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการ โพลาริเซชันของแบบจำลอง	31
4.2 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการ โพลาริเซชันของวัสดุ	32
เมื่อทิศทางของแรงเปลี่ยนแปลง และการวางตัวของแบบจำลอง	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ศึกษาการสอบเทียบแรงกระทำต่อแบบจำลอง	44
4.4 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อสภาวะโพลาริเซชันของวัสดุ	49
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	51
5.1 สรุปผลการทดลอง	51
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	51
เอกสารอ้างอิง	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในการวิจัยนี้จะศึกษาการโพลาไรซ์ของแสง และความเข้มของแสงที่เปลี่ยนไปเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับวัสดุ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

- 1.4.1 ศึกษาคุณสมบัติทาง Photoelastic ของวัสดุ
- 1.4.2 ทำการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการกดวัสดุ
- 1.4.3 ทำการทดลองวัดค่าความเข้มของแสง เมื่อฉายแสงผ่านวัสดุที่มีแรงกดจากภายนอก

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติการโพลาไรเซชันของวัสดุ เมื่อถูกแรงจากภายนอกมากระทำ
- 1.5.2 ได้รับความรู้เพิ่มเติมในส่วนของการศึกษาทฤษฎีและหลักการของปรากฏการณ์ Photoelastic
- 1.5.3 สามารถพัฒนาต่อไปให้เป็น Optical force sensor ได้

$$\vec{E}(z,t) = E_{OY} \sin[(2\pi z/\lambda) - 2\pi vt + \phi_0] \quad (2.1)$$

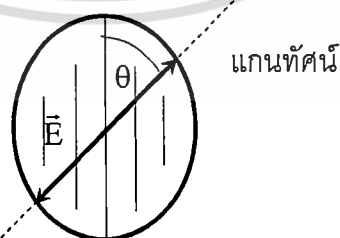
เมื่อแสงเคลื่อนที่ในทิศทางตามแกน +Z และเป็นโพลาไรซ์เชิงเส้นมีทิศทางของสนามไฟฟ้าตามแกน Y เมื่อ v เป็นความเร็วของคลื่นแสง λ เป็นความยาวคลื่น E_{OY} เป็นแอมพลิจูดสูงสุดและ ϕ_0 เป็นค่าคงที่ของเฟส โดยมีความถี่เชิงมุมที่ได้คือ $\omega = 2\pi v$ และมีเลขคลื่น (Wave Number) $k = 2\pi/\lambda$ แล้วสมการที่ (2.1) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\vec{E}(z,t) = E_{OY} \sin[kz - \omega t + \phi_0] \quad (2.2)$$

ในสนามแม่เหล็กของแสงจะสั้น เหมือนกับสนามไฟฟ้าแต่เวกเตอร์สนามแม่เหล็กจะทำมุมตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าในทิศทางตาม X ซึ่งสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น

$$\vec{H}(z,t) = H_{OX} \sin[kz - \omega t + \phi_0] \quad (2.3)$$

แสงโดยทั่วไปเป็นแสงไม่โพลาไรซ์ นั่นคือสนามไฟฟ้ามีการสั่นในหลายๆ ระนาบในเวลาเดียวกัน ถ้าแสงไม่โพลาไรซ์เคลื่อนผ่านแผ่นโพลาไรซ์ (Polaroid) โดยมีทิศทางของสนามไฟฟ้าขนานกับแกนโพลาไรซ์ และมีลักษณะพิเศษคือยอมให้โพลาไรซ์ในทิศทางที่ขนานกับแกนโพลาไรซ์ผ่านและจะดูดกลืนโพลาไรซ์ที่ตั้งฉากกับแกน ถ้ามีแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นตกกระทบบนทำมุม θ กับแกนของโพลาไรซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นตกกระทบบนทำมุม θ กับแกนของโพลาไรซ์

2.2 ชนิดของแสงโพลาไรซ์

2.2.1 แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น

ในที่นี้จะพิจารณาว่าแสงเป็นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากโพลาไรเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับเฉพาะคลื่นตามขวางเท่านั้น ดังนั้นจากการที่คลื่นที่เคลื่อนที่ไปตามแกน Z จะสามารถแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นที่มีทิศทางการตามแกน X ได้ดังนี้

$$\vec{E}_x = E_{Ox} \sin[kz - \omega t + \phi_0] \hat{i} \quad (2.6)$$

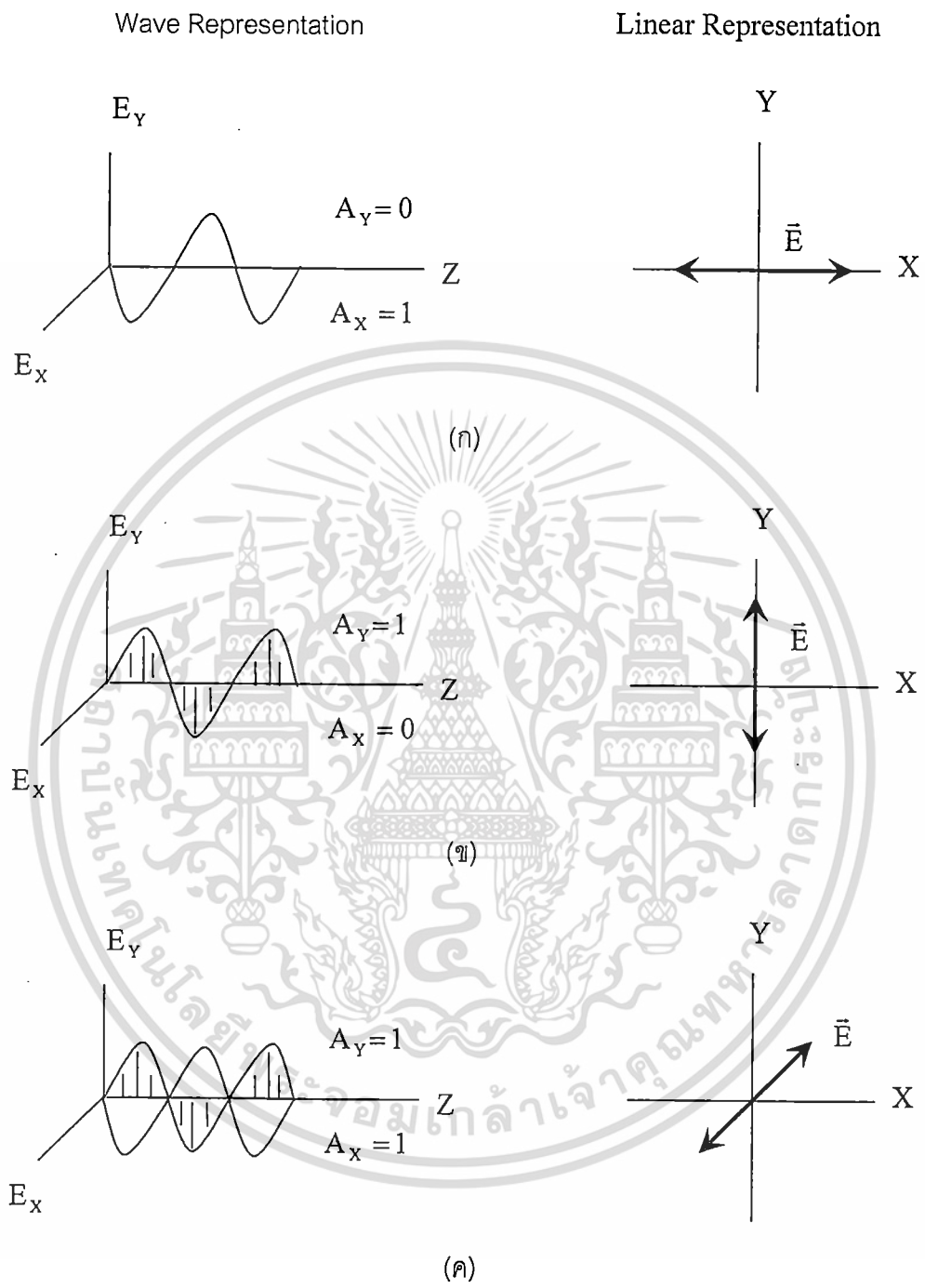
เมื่อ E_{Ox} เป็นแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า และ \hat{i} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแกน X และในทำนองเดียวกันแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นที่มีทิศทางการตามแกน Y สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_y = E_{Oy} \sin[kz - \omega t + \phi_0] \hat{j} \quad (2.7)$$

เมื่อ \hat{j} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแกน Y สนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นสามารถกระทำในการเคลื่อนที่และสามารถแสดงในรูปของผลรวมของเวกเตอร์ \vec{E}_x และ \vec{E}_y ได้เป็น

$$\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y = [E_{Ox} \hat{i} + E_{Oy} \hat{j}] \sin[kz - \omega t + \phi_0] \quad (2.8)$$

แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นมีแกนโพลาไรซ์ทำมุมใดๆ กับทิศทางในระนาบ XY สามารถแสดงได้โดยส่วนประกอบทั้งสองตามแกน X และ Y ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งความสัมพันธ์ของขนาดส่วนประกอบทั้งสองจะเป็นตัวกำหนดการทำมุมกับแกนโพลาไรเซชัน



รูปที่ 2.3 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นซึ่งมีมุมที่เปลี่ยนไป (ก) ตามแกน X (ข) ตามแกน Y (ค) ทำมุม 45° กับแกน X ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามในส่วนประกอบของทั้งสองแกนจะต้องมีค่าความถี่เชิงมุม ω เหมือนกันและมีค่าของเฟส ϕ , เหมือนกันหรือต่างกันเท่ากับ π และต่อไปจะพิจารณาผลของการต่างกันของเฟสจากส่วนประกอบทั้งสองในกรณีอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 แสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลม

ในกรณีที่แอมพลิจูดของคลื่นในส่วนประกอบของแกนซึ่งตั้งฉากกันนั้นเท่ากัน กล่าวคือ $E_{0x}=E_{0y}=E_0$ และมีความต่างเฟส $\Delta\phi = \pm\pi/2$ จะได้ว่า

$$\vec{E}_x(z,t) = \hat{i}E_0 \cos(kz - \omega t) \quad (2.9)$$

และ

$$\vec{E}_y(z,t) = \hat{j}E_0 \sin(kz - \omega t) \quad (2.10)$$

ซึ่งมีสมการคลื่นรวมเป็นดังนี้

$$\vec{E} = E_0 [\hat{i} \cos(kz - \omega t) + \hat{j} \sin(kz - \omega t)] \quad (2.11)$$

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดของ \vec{E} คือ $(\vec{E} \cdot \vec{E})^{1/2} = E_0$ เป็นค่าคงที่ แต่ทิศของ \vec{E} เปลี่ยนไปตามเวลาโดยไม่อยู่ในระนาบหนึ่งดังเช่นกรณีของแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งใดๆ Z_0 บนแกน เมื่อ $t=0$ \vec{E} จะอยู่บนแกนที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นแกนอ้างอิง (Reference) ดังนั้น

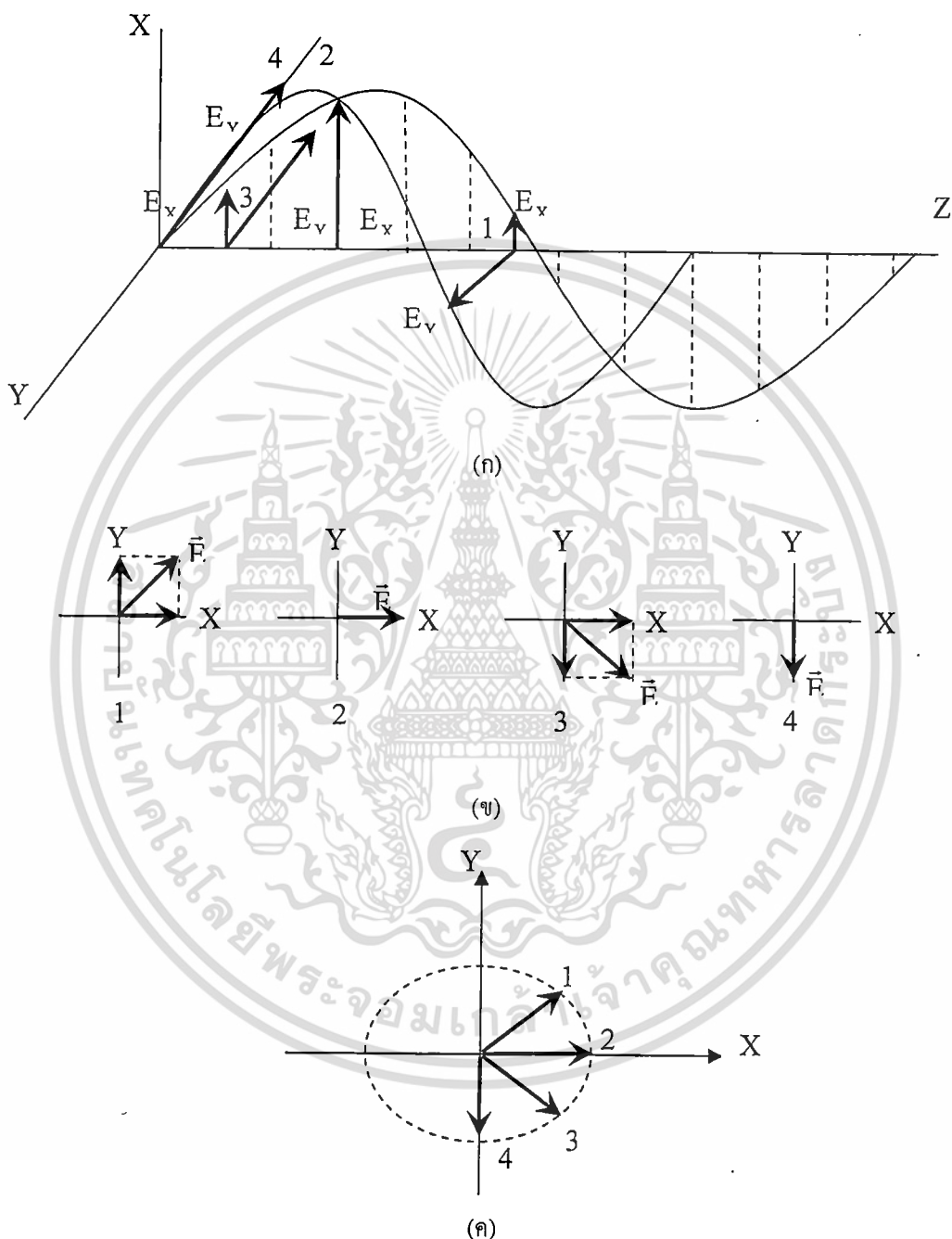
$$\vec{E}_x = \hat{i}E_0 \cos(kz_0) \quad (2.12)$$

และ

$$\vec{E}_y = \hat{j}E_0 \sin(kz_0) \quad (2.13)$$

ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่ง $t = kz_0/\omega$ จะได้ว่า $\vec{E}_x = \hat{i}E_0 \cdot \vec{E}_y = 0$ และ \vec{E} อยู่ในแกน X คลื่นรวม \vec{E} จึงหมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยความถี่เชิงมุม ω โดยมีทิศสวนทางกับทิศการเคลื่อนที่ของแสงตรงไปยังตำแหน่งที่ตั้งของแหล่งกำเนิดแสงหรืออาจจะกล่าวได้ว่า \vec{E}_y นำ \vec{E}_x อยู่ $\pi/2$ เรเดียน ซึ่งหมายความว่า \vec{E}_y จะมีค่าสูงสุดก่อนที่ \vec{E}_x จะมีค่าสูงสุดล่วงหน้าไปก่อนถึง 1 ใน 4 ของแต่ละรอบ จึงเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าหมุนเป็นวงกลมตามเข็มนาฬิกา และเวกเตอร์ \vec{E} จะหมุนไปครบรอบ โดยแสงจะพุ่งไปข้างหน้าเท่ากับความยาวหนึ่งช่วงคลื่น ซึ่งจะเรียกแสงที่มีลักษณะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมโนวิสาห์กับการเชิงงานเพื่อการศึกษานี้ เมื่อนูญาติเห็นไปเซบระเยชันดานการคำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

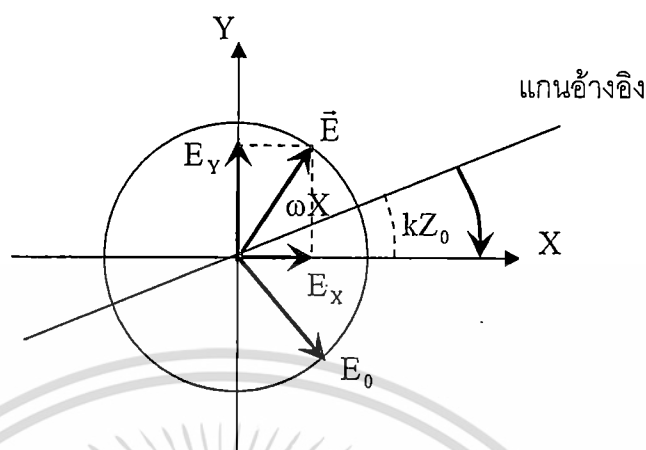
สถานะโพลาไรเซชันแบบนี้ว่าแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวา (Right Circularly Polarization: RCP) โดยมีเฟส $\phi = +\pi/2$



รูปที่ 2.4 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมหมุนตามขวาและแนวการหมุนจากตำแหน่งที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ

- (ก) ส่วนประกอบของแสงเชิงเส้นที่ตั้งฉากกันมีแอมพลิจูดเท่ากันและเฟสต่างกัน 90°
 (ข) ผลรวมเวกเตอร์ของส่วนประกอบทั้งสองใน (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ (ค) แสดงสนามไฟฟ้าในรูปของแผนภาพวงกลมซึ่งมองไปหาแหล่งกำเนิดแสงโดยชนด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงการหมุนของเวกเตอร์ไฟฟ้าในกรณีของแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวาและกรณี
ที่ตรงกันข้าม $\phi = -\pi/2$ จะได้ว่า

$$\vec{E} = E_0 [\hat{i} \cos(kz - \omega t) - \hat{j} \sin(kz - \omega t)] \quad (2.14)$$

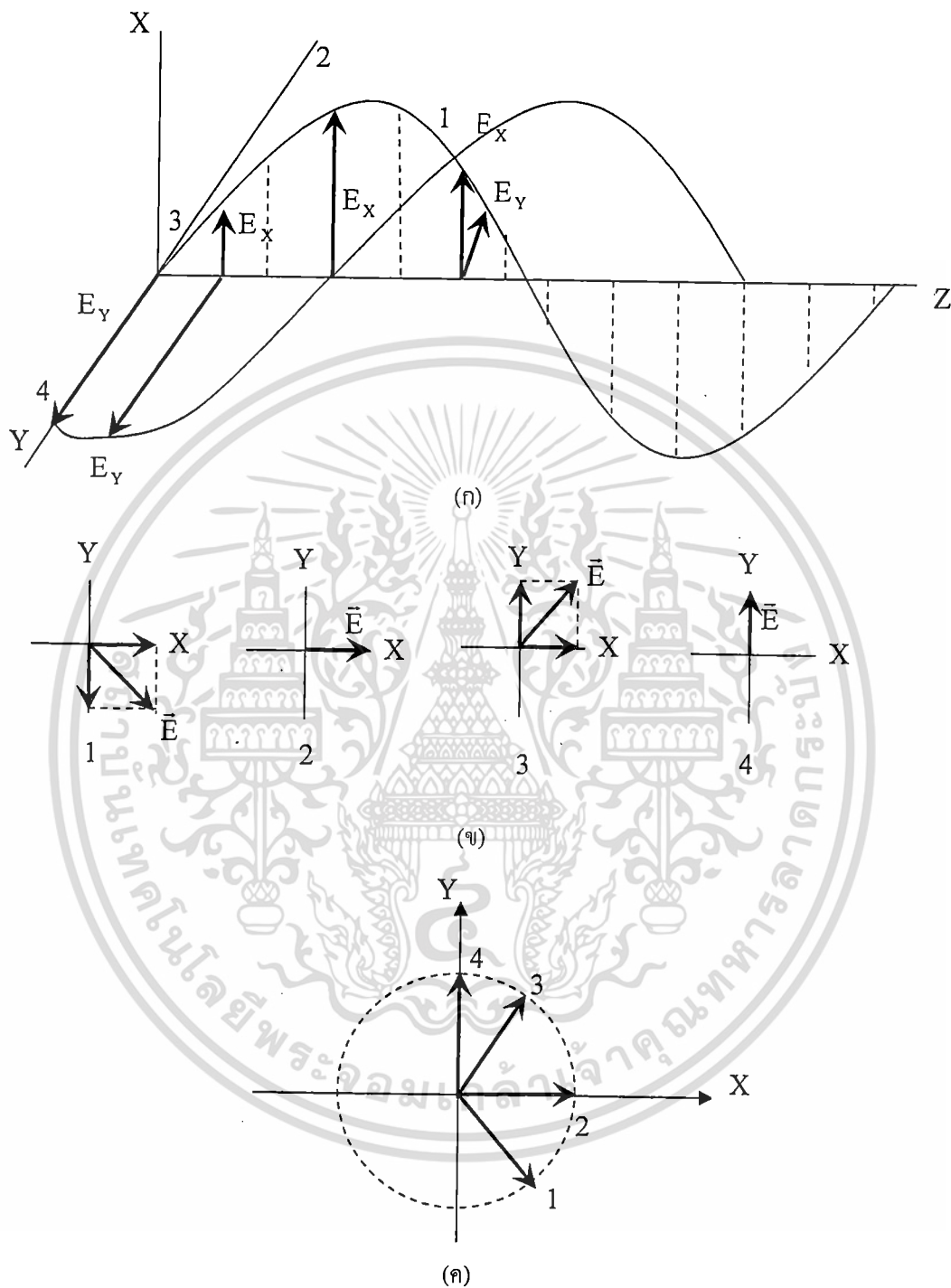
จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดไม่ได้ต่างไปกรณีข้างต้น แต่ \vec{E} จะหมุนทวนเข็มนาฬิกาจึงเรียกว่าเป็น แสง
โพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามซ้าย (Left Circularly Polarization: LCP) ซึ่ง \vec{E}_y จะตามหลัง \vec{E}_x ไปเป็น
1 ใน 4 ของแต่ละรอบ ทำให้หมุนทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 2.6

พิจารณาโดยทั่วๆ ไป จะพบว่าสถานะโพลาไรซ์ชนิดวงกลมทั้งสองแบบนี้จะเป็นไปได้
เมื่อเฟส ϕ มีค่าต่างๆ กันตามลำดับดังต่อไปนี้

เมื่อ $\phi = +\pi/2 + 2m\pi$ โดยที่ $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ คือชนิดวงกลมตามขวา

เมื่อ $\phi = -\pi/2 + 2m\pi$ โดยที่ $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ คือชนิดวงกลมตามซ้าย

ถ้านำแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมทั้งสองแบบนี้ซึ่งมีแอมพลิจูดเท่ากันมารวมกันก็จะ
กลายเป็นโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นไป



รูปที่ 2.6 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมหมุนตามซ้ายและแนวการหมุนจากตำแหน่งที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ

- (ก) ส่วนประกอบของแสงเชิงเส้นที่ตั้งฉากกันมีแอมพลิจูดเท่ากันและเฟสต่างกัน 90°
- (ข) ผลรวมเวกเตอร์ของส่วนประกอบทั้งสองใน (ก)

(ค) แสดงสนามไฟฟ้าในรูปของแผนภาพวงกลมซึ่งมองในทิศเข้าไปหาแหล่งกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 แสงโพลาไรซ์ชนิดวงรี

จากการพิจารณาที่ผ่านมารวมกันในส่วนประกอบของแสงโพลาไรซ์ที่มีส่วนประกอบของเฟสเหมือนกันหรือต่างกัน π นั้น แสงโพลาไรซ์จะเป็นชนิดเชิงเส้น ในกรณีที่เฟสต่างกัน $\pi/2$ หรือ $-\pi/2$ และมีแอมพลิจูดเท่ากันจะเป็นส่วนประกอบของแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลม แต่ถ้าส่วนประกอบในการรวมกันนั้นทำให้ไม่เท่ากันจะเป็นกรณีของแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรี

พิจารณาเมื่อ $E_{Ox} \neq E_{Oy}$ และ $\phi = +\pi/2$ จะได้ว่า

$$\vec{E}_x = E_{Ox} \cos(kz - \omega t) \hat{i} \quad (2.15)$$

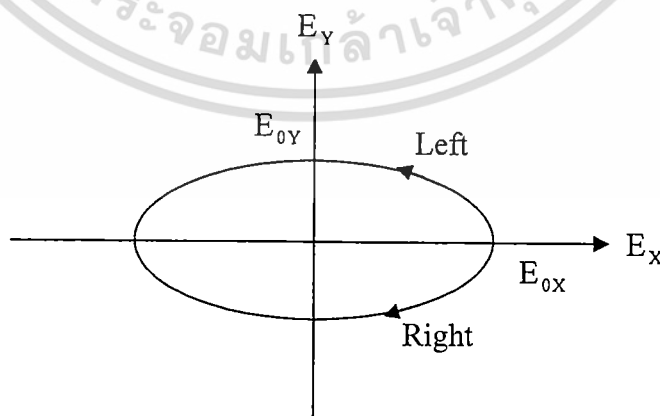
และ

$$\vec{E}_y = E_{Oy} \cos(kz - \omega t + \phi) \hat{j} \quad (2.16)$$

หรือเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{E_x^2}{E_{Ox}^2} + \frac{E_y^2}{E_{Oy}^2} = \cos^2(kz - \omega t) + \cos^2(kz - \omega t + \phi) = 1 \quad (2.17)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าความถี่ของสนามนี้ คือสมการวงรีที่มีแกนหลักเป็น $2E_{Ox}$ และ $2E_{Oy}$ ตามแนวแกน X กับแนวแกน Y ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 โดยเมื่อ $\phi = +\pi/2$ สนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่เป็นตามขวา แต่ถ้า $\phi = -\pi/2$ สนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่เป็นวงรีตามซ้าย



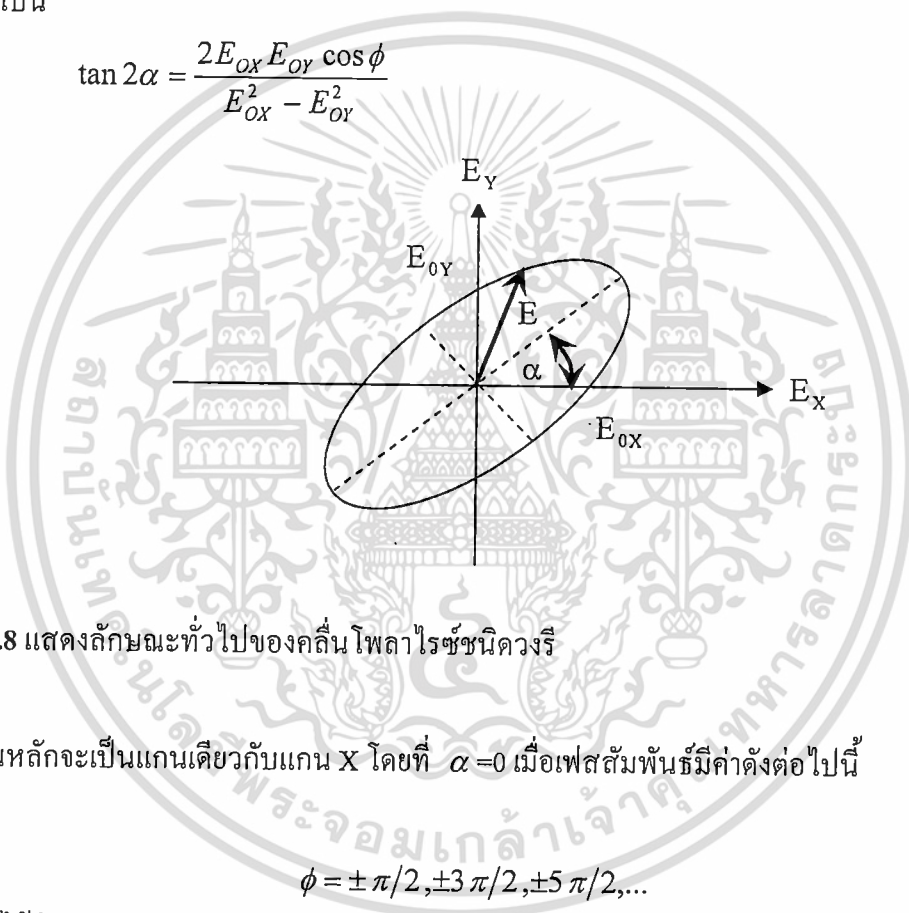
รูปที่ 2.7 แสดงการกำหนดทิศทางของการหมุนสำหรับโพลาไรซ์ชนิดวงรี

ในกรณีทั่วไปสมการของวงรีจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left(\frac{E_x}{E_{Ox}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{Oy}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{Ox}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{Oy}}\right)\cos\phi = \sin^2\phi \quad (2.18)$$

โดยที่แกนหลัก (Major Axis) จะทำมุม α กับแกน X ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\tan 2\alpha = \frac{2E_{Ox}E_{Oy}\cos\phi}{E_{Ox}^2 - E_{Oy}^2} \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะทั่วไปของคลื่นโพลาไรซ์ชนิดวงรี

ซึ่งแกนหลักจะเป็นแกนเดียวกับแกน X โดยที่ $\alpha=0$ เมื่อเฟสสัมพันธ์มีค่าดังต่อไปนี้

$$\phi = \pm\pi/2, \pm3\pi/2, \pm5\pi/2, \dots$$

และจะได้ว่า

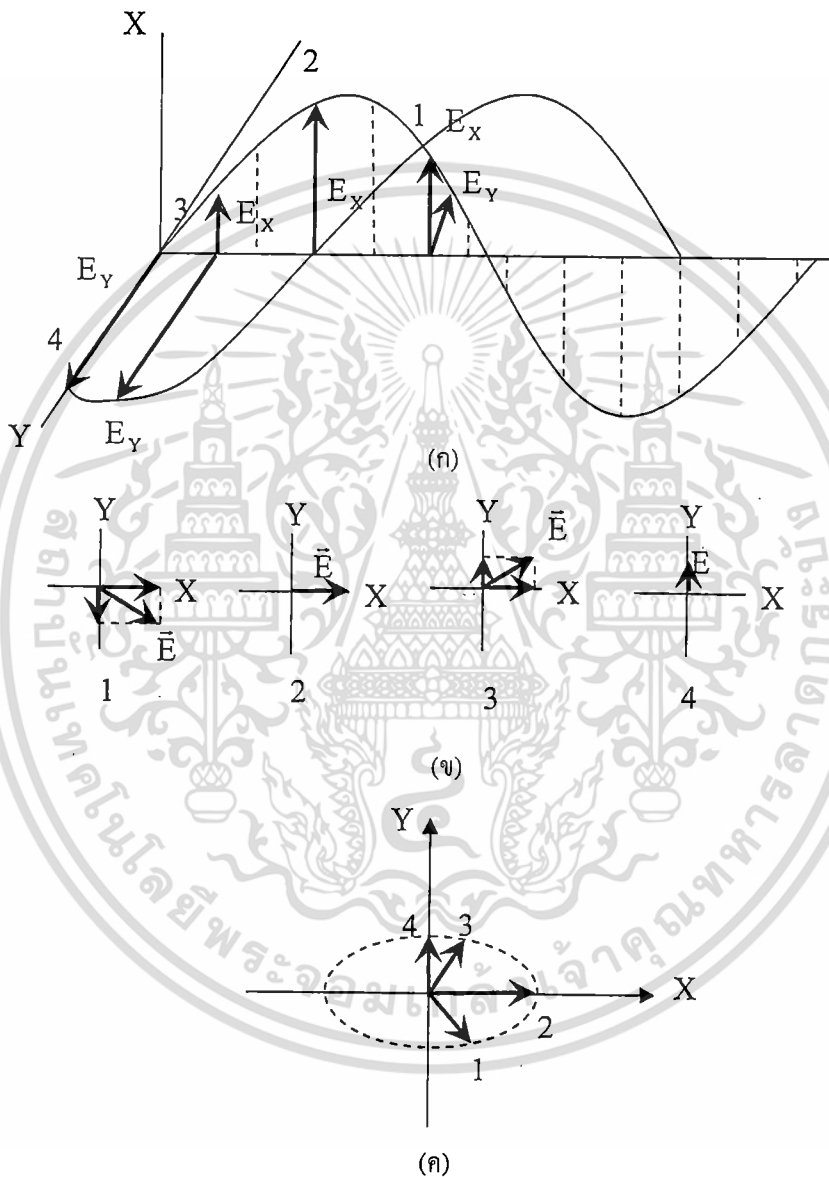
$$\frac{E_x^2}{E_{Ox}^2} + \frac{E_y^2}{E_{Oy}^2} = 1 \quad (2.20)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าตรงกับที่ได้ทำการพิจารณาแล้วในความสัมพันธ์ ตามสมการ (2.17) และในกรณีที่ $E_{Ox} = E_{Oy}$ จะได้ว่า $E_x^2 + E_y^2 = A_x^2$ เป็นความสัมพันธ์ในรูปแบบของโพลาไรซ์ชนิดวงกลมนั่นเอง และถ้าเฟสสัมพันธ์ มีค่าเป็นจำนวนเท่าของ จะได้ว่าสมการ (2.18) จะกลายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_Y = \pm \frac{E_{OY}}{E_{OX}} E_X \quad (2.21)$$

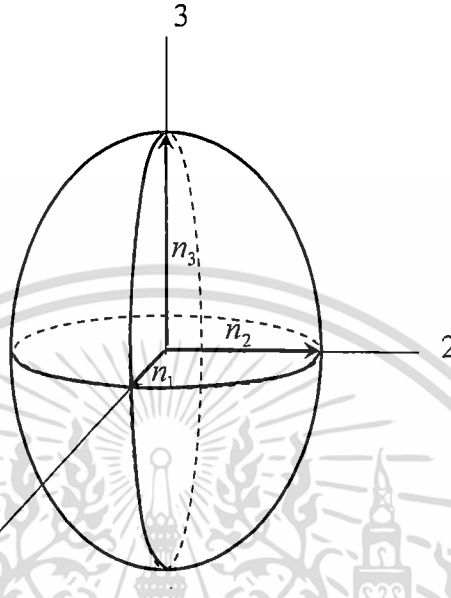
ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของโพลาไรเซชันเส้นที่มีความชันเป็น $\pm E_{OY}/E_{OX}$ และในรูปที่ 2.9 นี้จะเป็นการแสดงลักษณะของคลื่นแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีตามซ้าย



- รูปที่ 2.9 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีตามซ้ายและแนวการหมุนจากตำแหน่งที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ
- (ก) ส่วนประกอบของแสงเชิงเส้นที่ตั้งฉากกันมีแอมพลิจูดต่างกันและเฟสต่างกัน 90°
- (ข) ผลรวมเวกเตอร์ของส่วนประกอบทั้งสองใน (ก) แสดงสนามไฟฟ้าในรูปของแผนภาพวงกลมซึ่งมองในทิศเข้าไปหาแหล่งกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 Photoelasticity



รูปที่ 2.10 The index ellipsoid

สารบางชนิดเมื่ออยู่ภายใต้แรงกดหรือเมื่ออยู่ภายใต้ความเค้น (stress) ค่าดัชนีหักเหภายในจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในบริเวณนั้น โดยค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงนั้นเป็นแบบวงรี คือ $n_1 = n_2 \neq n_3$ ดังรูป 2.10 และค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงนั้นแปรผันตามความเค้น ตามสมการ

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= c_1 \sigma_1 + c_2 (\sigma_2 + \sigma_3) \\ n_2 - n_0 &= c_1 \sigma_2 + c_2 (\sigma_3 + \sigma_1) \\ n_3 - n_0 &= c_1 \sigma_3 + c_2 (\sigma_1 + \sigma_2) \end{aligned} \quad (2.22)$$

เมื่อ σ	คือ	ความเค้นในแนวแกน (N/m^2)
n_0	คือ	ค่าดัชนีหักเหขณะยังไม่มีความเค้น
n_1, n_2, n_3	คือ	ค่าดัชนีที่เกิดขึ้นขณะมีความเค้น
c_1, c_2	คือ	stress-optic coefficients (m^2/N)

และเมื่อแสงเดินทางผ่านออกมาจากวัตถุที่ตกอยู่ในสภาพเช่นนี้ จะมีความต่างเฟสเกิดขึ้น ซึ่งความต่างเฟสที่เกิดขึ้นนั้นแสดงดังสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ๓ มินเวทวิทย์ ๒๐๑๖ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

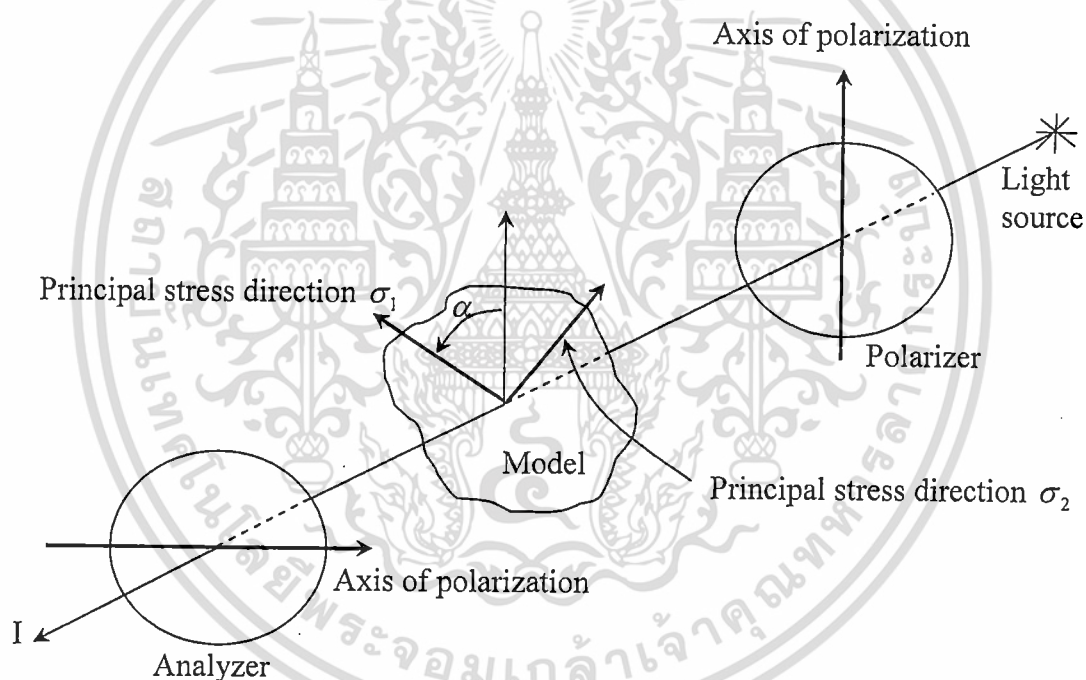
$$\Delta_{23} = \frac{2\pi dc}{\lambda} (\sigma_2 - \sigma_3) \quad (2.23)$$

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

เมื่อ d คือ ความหนาของวัตถุ

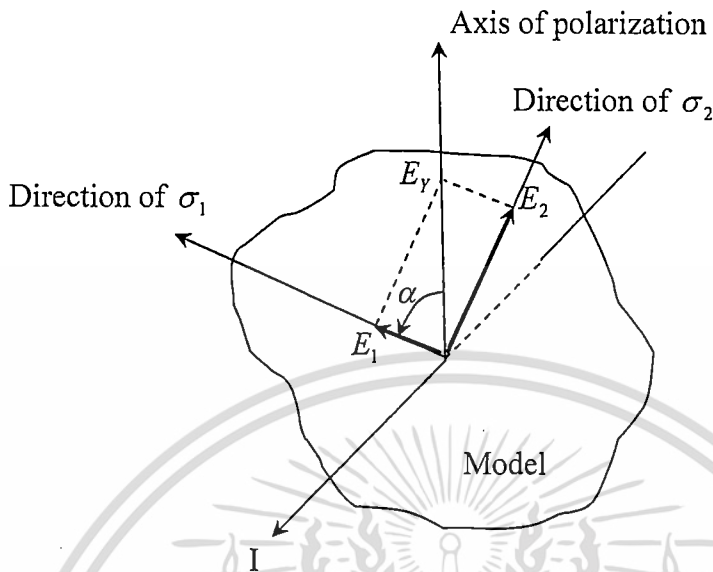
$$c = (c_2 - c_1)$$

เมื่อนำแบบจำลองที่มีความเค้นมาวางระหว่างแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มีแกนตั้งฉากกันดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงแบบจำลองที่มีความเค้น วางอยู่ระหว่างแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มีแกนโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน

จากรูปทิศทางการแกว่งของความเค้น (principal stress) ที่จุดพิจารณาในแบบจำลอง จะทำมุม α กับแกนของแสงโพลาไรซ์ที่ออกมาจาก polarizer และเมื่อแสงเดินทางเข้าสู่แบบจำลองทำให้มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า 2 แนว แสดงดังรูป 2.11



รูปที่ 2.12 แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าในแนวแกนความเค้น

สนามไฟฟ้ามีค่าดังสมการ

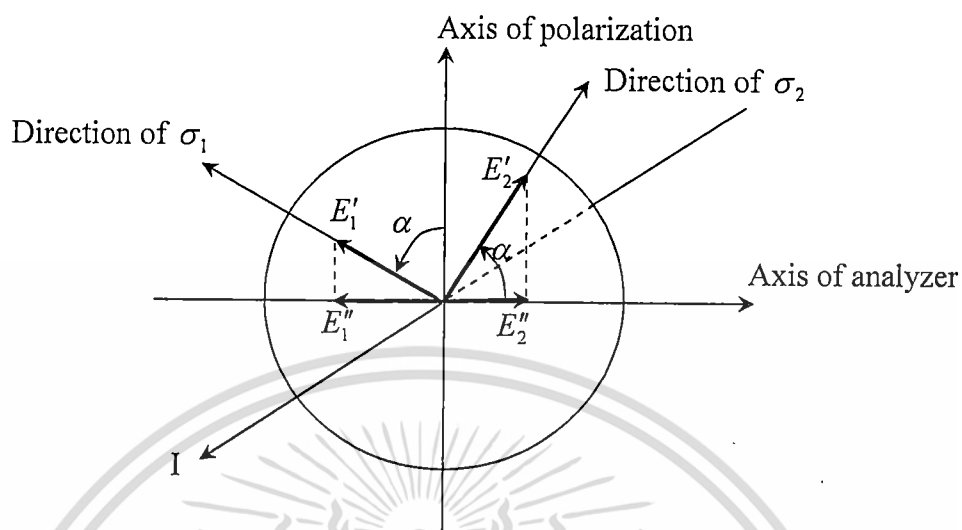
$$\begin{aligned} E_1 &= a \cos \alpha \cos \omega t \\ E_2 &= a \sin \alpha \cos \omega t \end{aligned} \quad (2.24)$$

เมื่อแสงเดินทางผ่านแบบจำลองที่มีความเค้นทำให้เฟสในแต่ละแกนความเค้นเปลี่ยนไป และมีสนามไฟฟ้าในแต่ละแกนแสดงดังสมการ

$$\begin{aligned} E'_1 &= a \cos \alpha \cos(\omega t - \Delta_1) \\ E'_2 &= a \sin \alpha \cos(\omega t - \Delta_2) \end{aligned} \quad (2.25)$$

โดยที่ $\Delta_1 = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_1 - 1)$

$$\Delta_2 = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_2 - 1)$$



รูปที่ 2.13 องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่ผ่านออกมาจากแผ่น analyzer

เมื่อผ่านแผ่น analyzer ออกมาจะพบว่า E_1' และ E_2' จะแยกองค์ประกอบออกมาอีกเป็นแนวขวางแสดงดังรูป 2.13 ค่าของสนามไฟฟ้าที่ออกจากแผ่น analyzer นั้นจะมีค่า

$$E = a \sin 2\alpha \sin \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{\Delta_2 + \Delta_1}{2} \right) \quad (2.26)$$

จากสมการเทอมของ $\frac{\Delta_2 + \Delta_1}{2}$ นั้นจะแสดงถึงค่าเฉลี่ยความต่างเฟส ซึ่งไม่มีผลต่อค่าความเข้มของแสง จาก Malus's law ค่าความเข้มของแสงแสดงดังสมการ

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\Delta}{2} \quad (2.27)$$

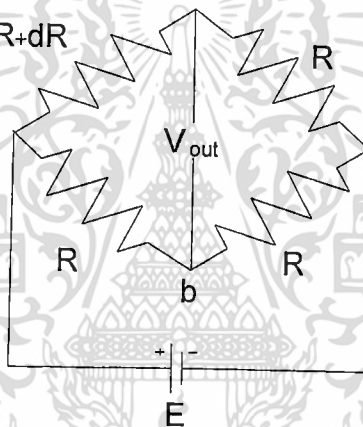
$$\text{โดยที่ } \Delta = \Delta_2 - \Delta_1 = \frac{2\pi d}{\lambda} (n_2 - n_1) = \frac{2\pi d c}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 Load cell

2.4.1 Wheatstone Bridge

วงจรบริดจ์ที่ใช้งานกันมากคือวงจรวีร์สโตนบริดจ์แบบกระแสตรงดังที่แสดงในรูปด้านล่าง ในวงจรจะมีแหล่งจ่ายแรงเคลื่อนกระแสตรงคร่อมตัวต้านทานในวงจรเพื่อให้กระแสไหลผ่านตัวต้านทาน เราจึงสามารถจะตรวจจับความสมดุล (null detector) ได้โดยการตรวจจับแรงเคลื่อน (voltage detector) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าที่จุด a และ b นั่นเองในระบบสมัยใหม่ตัวตรวจจับจะมีค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตที่สูงมาก



รูปที่ 2.14 วงจร Wheatstone Bridge

ความต่างศักย์ไฟฟ้า ΔV ระหว่าง a และ b จะมีค่าเป็น

$$\Delta V = V_a - V_b \tag{2.29}$$

เมื่อ V_a = ศักย์ไฟฟ้าที่จุด a เมื่อเทียบกับ c

V_b = ศักย์ไฟฟ้าที่จุด b เมื่อเทียบกับ c

ค่าของ V_a และ V_b สามารถหาได้โดยหลักการแบ่งแรงดันไฟฟ้า

$$V_a = \frac{ER}{(R + R)} \tag{2.30}$$

ในลักษณะเดียวกันนี้ V_b ก็จะถูกแบ่งแรงเคลื่อนออกเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_b = \frac{ER}{(R + R + dR)} \quad (2.31)$$

เมื่อ E เป็นแหล่งจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ในขณะนั้น หากรวมสมการจะได้ความต่างศักย์ระหว่างจุด a และ b มีค่าเป็น

$$\Delta V = \left[\frac{ER}{(R + R)} \right] - \left[\frac{ER}{(R + R + dR)} \right] \quad (2.32)$$

$$\Delta V = \frac{EdR}{4R + 2dR}$$

ถ้า $4R \gg 2dR$ จะได้

$$\Delta V = \frac{EdR}{4R} \quad (2.33)$$

2.4.2 Instrumentation Amplifier

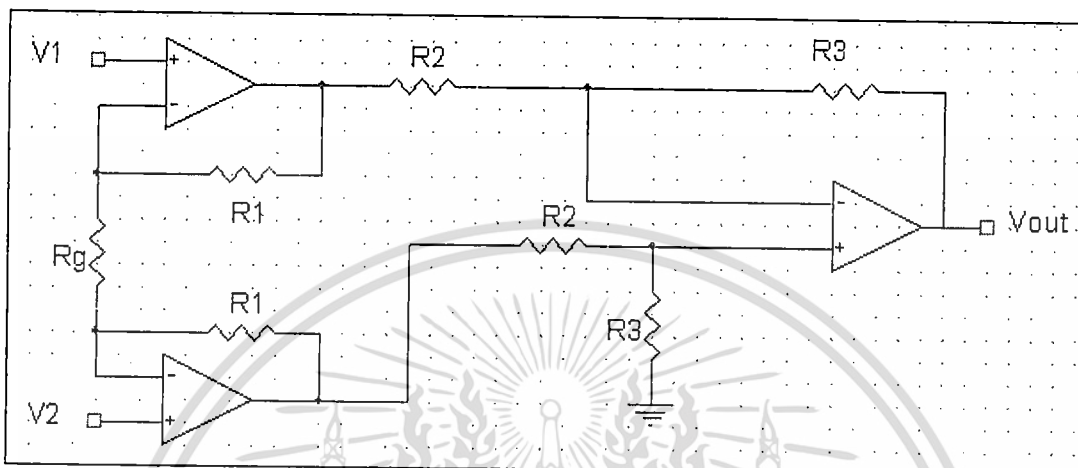
วงจรดังกล่าวตัดแปลงมาจากวงจรด้านบน โดยแก้ปัญหาอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตของที่มีค่าต่ำมากจึงต้องวงจรตามแรงเคลื่อนเข้าที่อินพุตทั้งสองเพื่อจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตมีค่าสูงขึ้นผลดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่าตัวขยายในงานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม (Instrumentation Amplifier), (IA) แต่เมื่อต้องวงจรดังกล่าวไว้ ก็ยังคงยากต่อการเปลี่ยนอัตราขยายซึ่งต้องปรับตัวต้านทานถึงสองตัว จึงพัฒนามาใช้วงจรด้านล่าง ซึ่งเป็นวงจรขยายทางเครื่องมือวัดที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย อาจเรียกววงจรแบบดังกล่าวว่า วงจรขยายแบบออปแอมป์ 3 ตัว (three op-amps)

ข้อสังเกตจากวงจรขยายแบบออปแอมป์สามตัวคือ

1. สามารถปรับอัตราขยายได้โดยเปลี่ยนตัวต้านทานเพียงตัวเดียว คือ R_2
2. CMR ของวงจรมีค่ายังคงแปรตามตัวต้านทาน R_2 ที่ต้องรักษาให้เท่ากันพอดี แต่ก็จะไม่แปรตามตัวต้านทาน R_1 ทั้งสองตัว
3. มีอิมพีแดนซ์ทางอินพุตที่สูงมาก ส่วนอิมพีแดนซ์ทางด้านเอาต์พุตต่ำมาก
4. IA มีสองสเตจ สเตจแรกมีอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตสูง สเตจที่สองคือตัวขยายความแตกต่าง (differential amp) ซึ่งเป็นส่วนของเอาต์พุต
5. ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการขยายแบบนี้จะมีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{out} = \left[1 + \left(\frac{2R_1}{R_g} \right) \right] \left(\frac{R_3}{R_2} \right) (V_2 - V_1) \quad (2.34)$$



รูปที่ 2.15 วงจร Instrument Amplifier

ไอซีบางตัวที่ผลิตขึ้นจะกำหนดอัตราขยายคงที่ แต่ผู้ใช้ก็สามารถเลือกค่า R_g จากภายนอก มาต่อเพื่อเลือกอัตราขยายได้ จึงมั่นใจว่าจะได้ CMR ที่สูงๆ ตัวอย่างของไอซีแบบนี้ได้แก่เบอร์ AD524 เป็นต้น

วงจรออปแอมป์ดังกล่าวมักใช้แพร่หลายในการวัดตัวแปรในกระบวนการ ดังอย่างเช่นใช้ขยายสัญญาณที่ออกจากสเตรนเกจซึ่งต่อกับวงจรบริดจ์อีกทีหนึ่ง

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

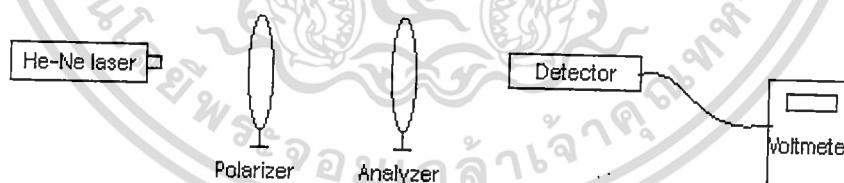
3.1 ทำการติดตั้ง Plane Polariscopes

ส่วนประกอบการศึกษา

1. แหล่งกำเนิดแสง (Laser source) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยในระบบการทดลองใช้เลเซอร์แบบฮีเลียม-นีออน ที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร
2. โพลาริเซอร์ (Polarizer) เพื่อใช้เปลี่ยนสถานะโพลาไรเซชันของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง
3. อะนาลิเซอร์ (Analyzer) เพื่อใช้เปลี่ยนสถานะโพลาไรเซชันของแสงเมื่อผ่านโพลาริเซอร์
4. ตัวตรวจจับ (Detector) ทำหน้าที่รับแสงที่ออกมาจากอะนาลิเซอร์และวัดค่าความเข้มแสงที่รับ จากนั้นแสดงค่าออกมาเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า
5. โวลต์มิเตอร์ (Voltmeter) ต่อเข้ากับตัวตรวจจับเพื่อแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตัวตรวจจับรับแสงได้

วิธีการทดลอง

1. ทำการจัดอุปกรณ์ดังรูป

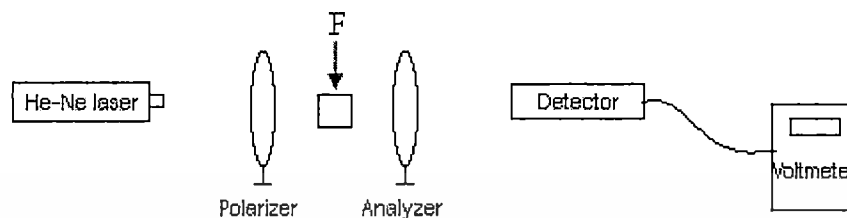


รูปที่ 3.1 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลอง Plane Polariscopes

2. ปรับแกน Polarizer ให้อยู่ที่มุม 0 องศา
3. ปรับมุมของ Analyzer ให้ได้ค่าความเข้มแสง (อยู่ในรูปของความต่างศักย์) มีค่าต่ำสุด
4. ที่ค่าความเข้มแสงต่ำสุดได้ Polarizer และค่า Analyzer ที่มีแกน Polarizer ตั้งฉากกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการโพลาไรซ์ของวัสดุ



รูปที่ 3.2 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลองเมื่อมีแรงกดมากระทำกับแบบจำลอง

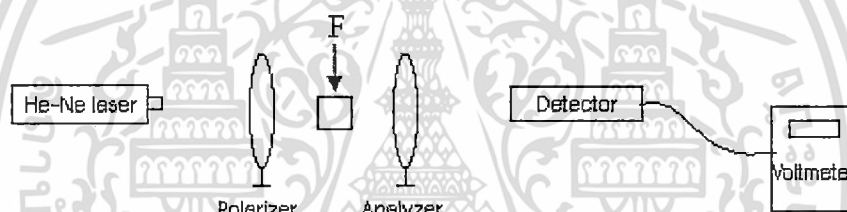
ส่วนประกอบการศึกษา

1. แหล่งกำเนิดแสง (Laser source) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยในระบบการทดลองใช้เลเซอร์แบบฮีเลียม-นีออน ที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร
2. โพลาไรเซอร์ (Polarizer) เพื่อใช้เปลี่ยนสถานะโพลาไรเซชันของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง
3. อะนาไลเซอร์ (Analyzer) เพื่อใช้เปลี่ยนสถานะโพลาไรเซชันของแสงเมื่อผ่านแบบจำลอง
4. ตัวตรวจจับ (Detector) ทำหน้าที่รับแสงที่ออกมาจากอะนาไลเซอร์และวัดค่าความเข้มแสงที่รับ จากนั้นแสดงค่าออกมาเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า
5. โวลต์มิเตอร์ (Voltmeter) ต่อเข้ากับตัวตรวจจับเพื่อแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตัวตรวจจับรับแสงได้
6. แท่งอะคริลิก (Acrylic) เป็นวัสดุที่ไวต่อแรงกดและมีสมบัติของการหักเหสองแนวเมื่อมีแรงมากระทำ
7. ชุดกำเนิดแรง ในการทดลองนี้ต้องออกแรงกดให้แท่งอะคริลิก เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง
8. โหลดเซลล์ (Load cell) ทำหน้าที่วัดแรงกดจากชุดกำเนิดแรง เมื่อออกแรงกดแท่งอะคริลิก

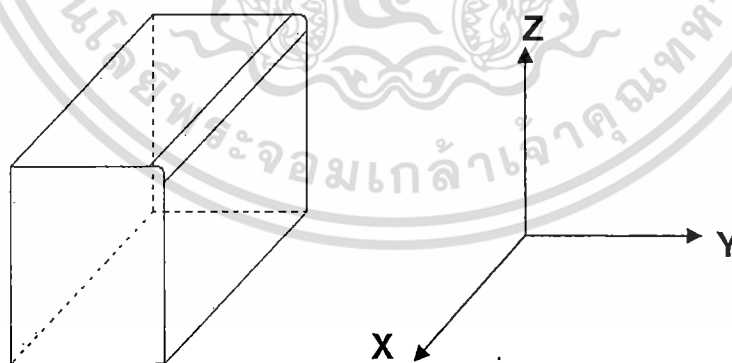
วิธีการทดลอง

1. ทำการจัด Plane Polariscopes
2. วางชุดกำเนิดแรงที่มีแท่งอะคริลิกอยู่ข้างในระหว่าง Polariscopes
3. ทำการฉายแสงเลเซอร์ให้ตกกระทบลงบนตัว Photodetector โดยให้แสงเลเซอร์เดินทางผ่าน Plane polariscopes และแท่งอะคริลิก โดยที่ยังไม่มีแรงกด สังเกตค่าความเข้มแสงและบันทึกผล

3.3 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการโพลาไรซ์ของวัสดุ เมื่อทิศทางของแรงเปลี่ยนแปลง และการวางตัวของแบบจำลอง



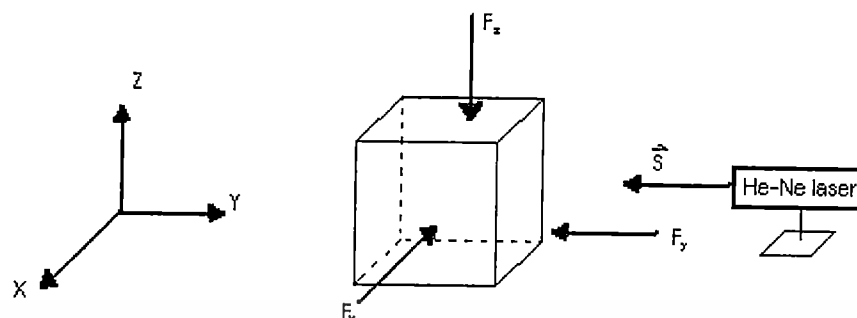
รูปที่ 3.3 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลองเมื่อมีแรงกดมากระทำกับแบบจำลอง



รูปที่ 3.4 แบบจำลอง

จากรูป พบว่ามีการวางตัวของแบบจำลองสามารถวางตัวได้หลายแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงทิศของแนวแรงที่กระทำกับแบบจำลองจากทิศต่างๆ

จากรูป จะพบว่ามีแนวแรงทั้งหมดที่กระทำกับแบบจำลอง 3 แนว คือ

F_z คือ แนวแรงที่กระทำกับแบบจำลองจากด้านบน

F_x คือ แนวแรงที่กระทำกับแบบจำลองจากด้านข้าง

F_y คือ แนวแรงที่กระทำกับแบบจำลองจากด้านหน้า

ส่วนประกอบการศึกษา

1. แหล่งกำเนิดแสง (Laser source) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยในระบบการทดลองใช้เลเซอร์แบบฮีเลียม-นีออน ที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร
2. โพลาริเซอร์ (Polarizer) เพื่อใช้เปลี่ยนสถานะโพลาไรเซชันของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง
3. อะนาลิเซอร์ (Analyzer) เพื่อใช้เปลี่ยนสถานะโพลาไรเซชันของแสงเมื่อผ่านแบบจำลอง
4. ตัวตรวจจับ (Detector) ทำหน้าที่รับแสงที่ออกมาจากอะนาลิเซอร์และวัดค่าความเข้มแสงที่รับ จากนั้นแสดงค่าออกมาเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า
5. โวลต์มิเตอร์ (Voltmeter) ต่อเข้ากับตัวตรวจจับเพื่อแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตัวตรวจจับรับแสงได้
6. แท่งอะคริลิก (Acrylic) เป็นวัสดุที่ไวต่อแรงกดและมีสมบัติของการหักเหสองแนวเมื่อมีแรงมากระทำ
7. ชุดกำเนิดแรง ในการทดลองนี้ต้องออกแรงกดให้แท่งอะคริลิก เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง
8. โหลดเซลล์ (Load cell) ทำหน้าที่วัดแรงกดจากชุดกำเนิดแรง เมื่อออกแรงกดแท่งอะคริลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

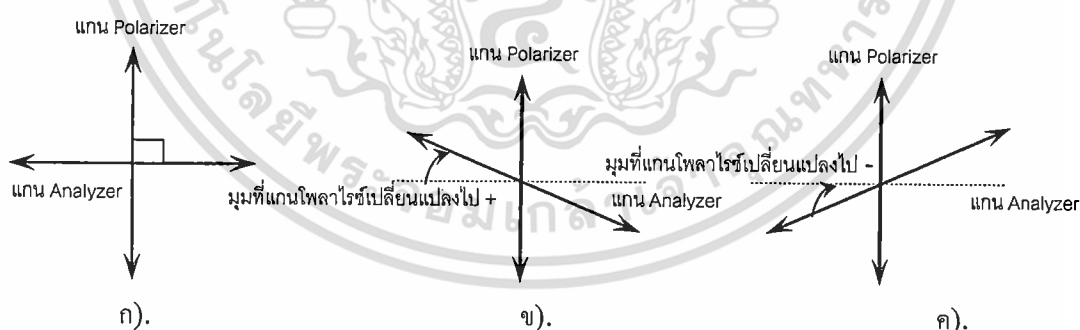
วิธีการทดลอง

1. ทำการจัด Plane Polariscopes
2. วางชุดกำเนิดแสงที่มีแท่งอะคริลิกอยู่ข้างในระหว่าง Polariscopes
3. ทำการฉายแสงเลเซอร์ให้ตกกระทบลงบนตัว Photodetector โดยให้แสงเลเซอร์เดินทางผ่าน Plane polariscopes และแท่งอะคริลิก โดยที่ยังไม่มีแรงกด สังเกตค่าความเข้มแสงและบันทึกผล
4. จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Y ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน X ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน
5. วัดค่าความเข้มแสงเริ่มต้นและบันทึกผล เพิ่มแรงกดเป็น 20 นิวตัน สังเกตค่าความเข้มแสงและบันทึกผล ทำการเพิ่มแรงกดครั้งละ 20 นิวตัน จนถึง 200 นิวตัน สังเกตค่าความเข้มแสงและบันทึกผลทุกครั้ง que เพิ่มแรงกระทำต่อแบบจำลอง
6. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1 ถึงข้อ 2 แต่การวางตัวของแบบจำลองดังนี้
 - 6.1 จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Z ของแบบจำลองออกแรงกดแนวแกน X ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน
 - 6.2 จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน X ของแบบจำลองออกแรงกดแนวแกน Y ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน
 - 6.3 จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Z ของแบบจำลองออกแรงกดแนวแกน Y ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน
 - 6.4 จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน X ของแบบจำลองออกแรงกดแนวแกน Z ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน
 - 6.5 จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Y ของแบบจำลองออกแรงกดแนวแกน Z ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน
7. สรุปผลการทดลอง

3.4 ศึกษาการสอบเทียบแรงกระทำต่อแบบจำลอง

1. เลือกผลการทดลองที่มีกราฟเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นอย่างเหมาะสม จากการทดลองที่ 3.3 แล้วจัดการวางตัวแบบจำลองตามผลการทดลอง
2. ทำการจัด Plane Polariscopes
3. วางชุดกำเนิดแรงที่มีแท่งอะคริลิกอยู่ข้างในระหว่าง Polariscopes
4. ทำการฉายแสงเลเซอร์ให้ตกกระทบลงบนตัว Photodetector โดยให้แสงเลเซอร์เดินทางผ่าน Plane polariscopes และแท่งอะคริลิก โดยที่ยังไม่มีแรงกด สังเกตค่าความเข้มแสงและบันทึกผล
5. วัดค่าความเข้มแสงเริ่มและบันทึกผล ในช่วงน้ำหนักที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแบบเชิงเส้นจากกราฟที่เลือกมาในการทดลองที่ 3.3 โดยทำการเพิ่มแรงครั้งละ 2 นิวตัน และ 5 นิวตัน
6. สรุปผลการทดลอง

3.5 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อทิศทางโพลาไรเซชันของวัสดุ



รูปที่ 3.6 แสดงมุมของแกนโพลาไรเซอร์ที่กระทำกับแกนของอนาไลเซอร์

- (ก) แสดงมุม 0 องศา
- (ข) เมื่อบิดแกนอนาไลเซอร์ตามเข็มนาฬิกาจะได้มุมที่แกนโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงเป็นบวก
- (ค) เมื่อบิดแกนอนาไลเซอร์ทวนเข็มนาฬิกาจะได้มุมที่แกนโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงเป็นลบ

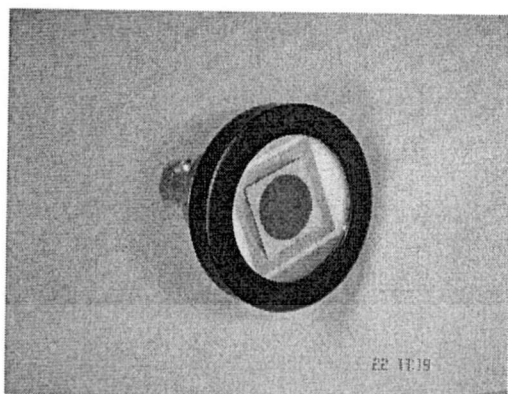
ส่วนประกอบการศึกษา

1. แหล่งกำเนิดแสง (Laser source) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยในระบบการทดลองใช้เลเซอร์แบบฮีเลียม-นีออน ที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร
2. โพลาริเซอร์ (Polarizer) เพื่อใช้เปลี่ยนสถานะโพลาไรเซชันของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง
3. อะนาไลเซอร์ (Analyzer) เพื่อใช้เปลี่ยนสถานะโพลาไรเซชันของแสงเมื่อผ่านแบบจำลอง
4. ตัวตรวจจับ (Detector) ทำหน้าที่รับแสงที่ออกมาจากอะนาไลเซอร์และวัดค่าความเข้มแสงที่รับ จากนั้นแสดงค่าออกมาเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า
5. โวลต์มิเตอร์ (Voltmeter) ต่อเข้ากับตัวตรวจจับเพื่อแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตัวตรวจจับรับแสงได้
6. แท่งอะคริลิก (Acrylic) เป็นวัตถุที่ไวต่อแรงกดและมีสมบัติของการหักเหสองแนวเมื่อมีแรงมากระทำ
7. ชุดกำเนิดแรง ในการทดลองนี้ต้องออกแรงกดให้แท่งอะคริลิก เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง
8. โหลดเซลล์ (Load cell) ทำหน้าที่วัดแรงกดจากชุดกำเนิดแรง เมื่อออกแรงกดแท่งอะคริลิก

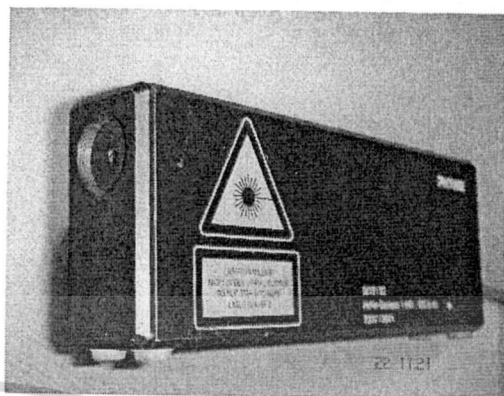
วิธีการทดลอง

จากการทดลองในหัวข้อ 3.2 และ 3.3 เป็นการวัดให้แกนของโพลาไรซ์เซอร์ตั้งฉากกับแกนของอนาไลเซอร์ (มุมของแกนโพลาไรซ์ที่เปลี่ยนแปลง) ดังนั้นในหัวข้อนี้เราจะทำการทดลองเหมือนกับหัวข้อ 3.2 และ 3.3 คือ

1. ทำการทดลองเหมือนหัวข้อ 3.2 บิดมุมของแกนอนาไลเซอร์ที่ให้ความเข้มแสงน้อยที่สุด มุมที่ให้ความเข้มแสงน้อยที่สุดคือมุมของแกนโพลาไรซ์ที่เปลี่ยนแปลง และบันทึกผล
2. สรุปผลการทดลอง



รูปที่ 3.7 Photodetector แบบ silicon



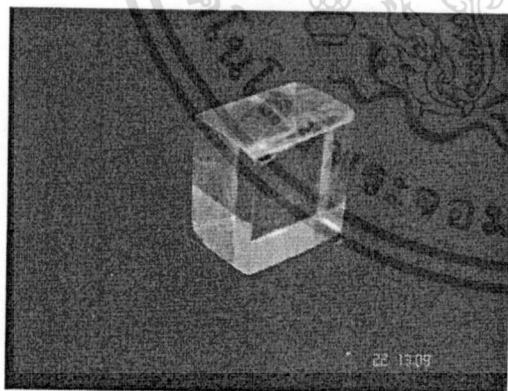
รูปที่ 3.8 He-Ne laser



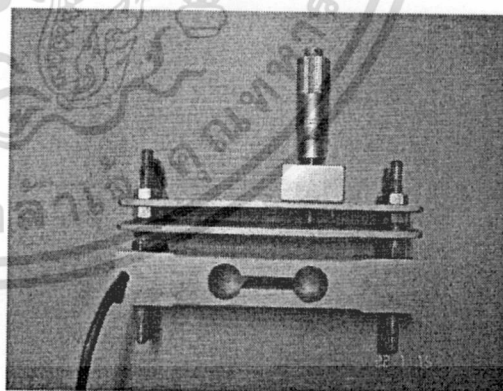
รูปที่ 3.9 แผ่น analyzer



รูปที่ 3.10 แผ่น polarizer

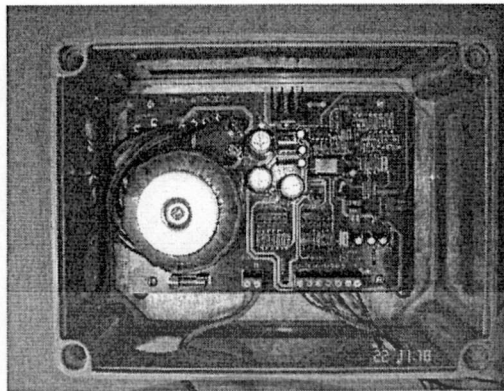


รูปที่ 3.11 แท่งอะคริลิก

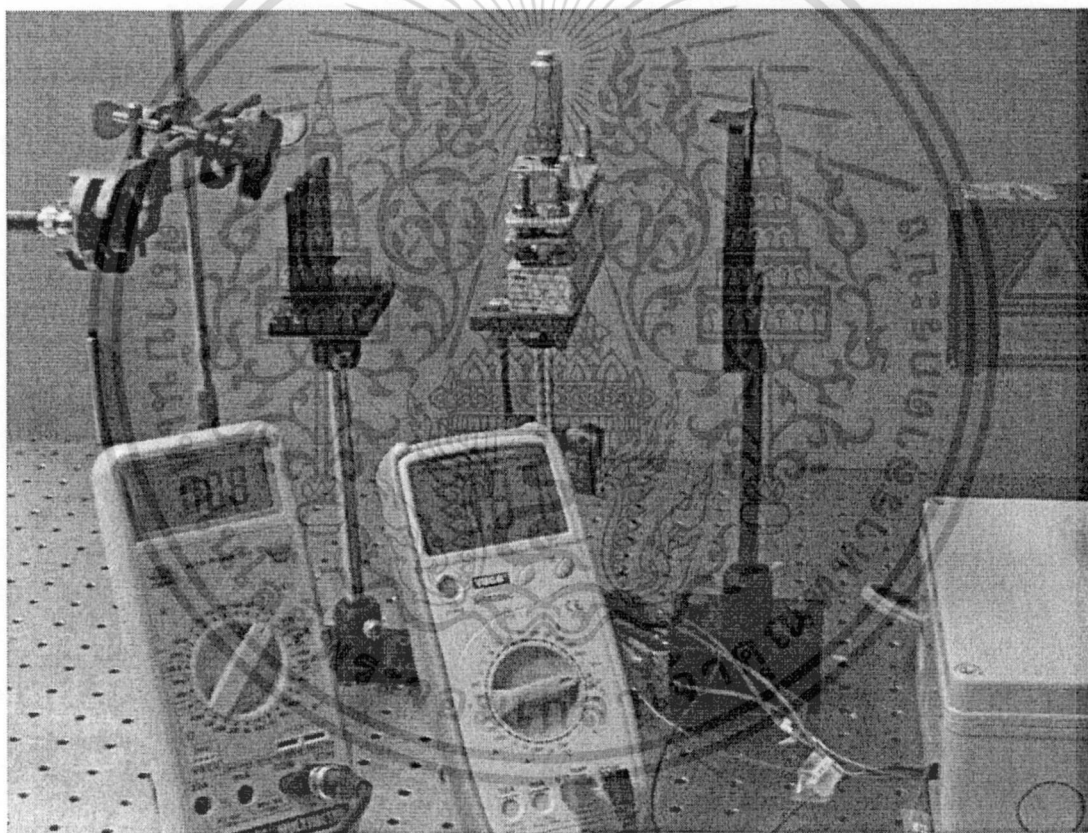


รูปที่ 3.12 ชุดกำเนิดแรงและ load cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 load cell transmitter



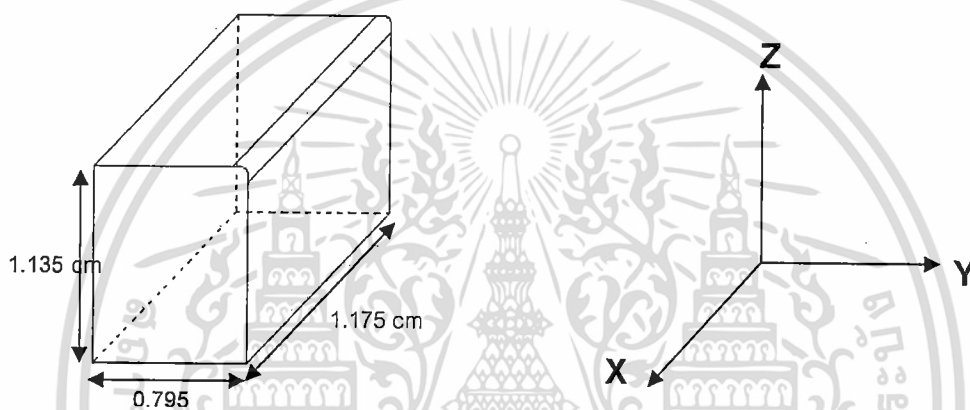
รูปที่ 3.14 แสดงการศึกษาผลของแรงกดต่อสภาวะโพลาไรเซชันของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

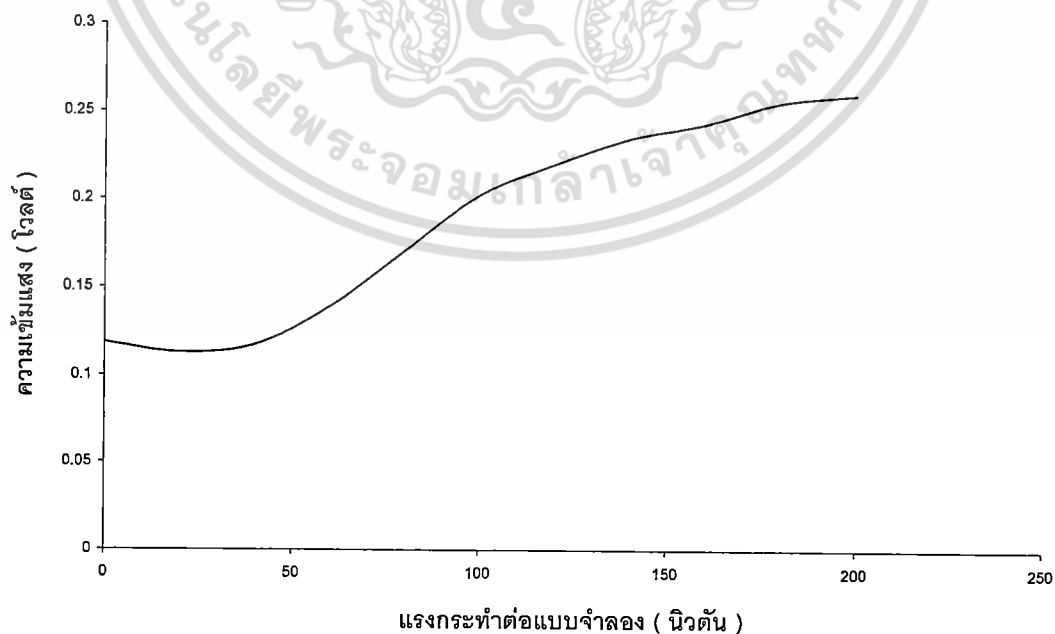
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดลองการศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการโพลาไรซ์ของแบบจำลอง



รูปที่ 4.1 แท่งอะคริลิก

*หมายเหตุ ความเข้มแสงวัดในรูปของความต่างศักย์จาก Photodetector



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเผยแพร่โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ระเบียบด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

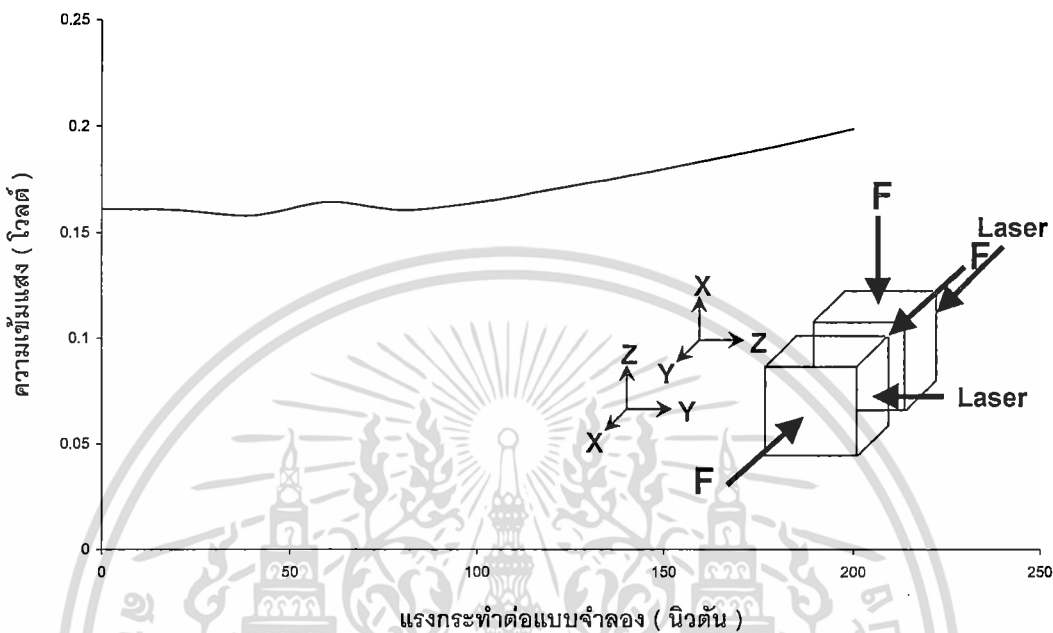
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น

4.2 ผลการทดลองการศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการโพลาไรซ์ของวัสดุเมื่อทิศทางของแรงเปลี่ยนแปลง และการวางตัวของแบบจำลอง

ตารางที่ 4.2.1 ผลการทดลองที่จัดการการวางตัวของแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Y ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน X ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

น้ำหนัก (N)	ความเข้มแสง(V)			ค่าเฉลี่ย (V)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0	0.146	0.164	0.173	0.161
20	0.155	0.159	0.168	0.161
40	0.136	0.164	0.174	0.158
60	0.144	0.170	0.179	0.164
80	0.136	0.162	0.184	0.161
100	0.142	0.168	0.182	0.164
120	0.153	0.173	0.185	0.170
140	0.161	0.180	0.188	0.176
160	0.172	0.186	0.192	0.183
180	0.183	0.193	0.196	0.191
200	0.194	0.200	0.202	0.199

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



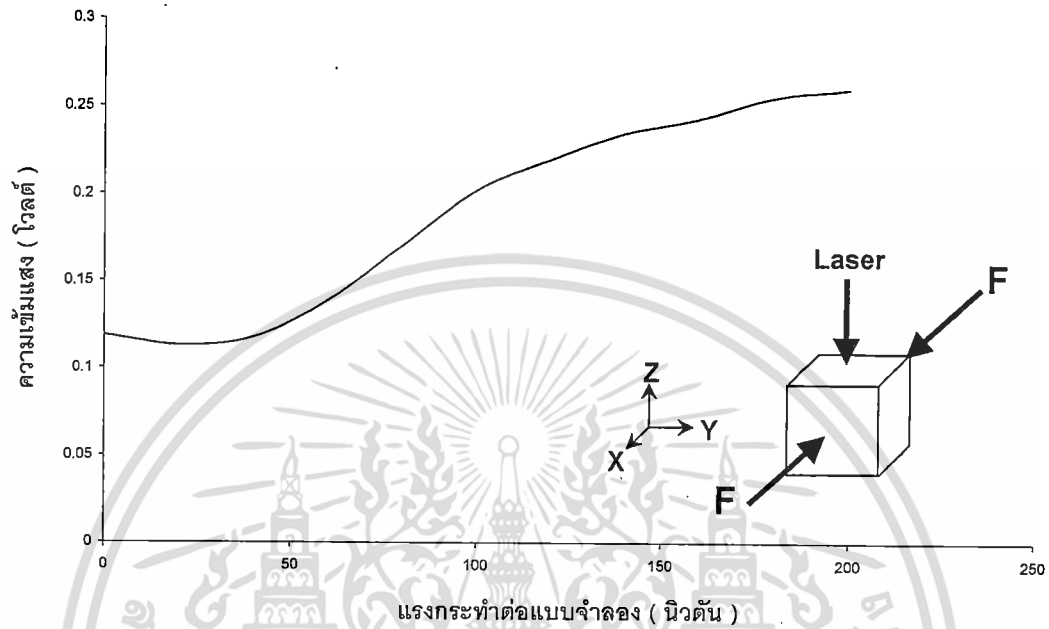
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Y ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน X ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง มีค่าลดลงในช่วง 20 นิวตัน ถึง 40 นิวตัน และเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น

ตารางที่ 4.2.2 ผลการทดลองที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Z ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน X ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

น้ำหนัก (N)	ความเข้มแสง(V)			ค่าเฉลี่ย (V)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0	0.205	0.091	0.060	0.119
20	0.205	0.081	0.053	0.113
40	0.214	0.078	0.060	0.117
60	0.222	0.109	0.086	0.139
80	0.226	0.156	0.129	0.170
100	0.237	0.190	0.179	0.202
120	0.243	0.210	0.206	0.220
140	0.253	0.226	0.225	0.235
160	0.253	0.233	0.243	0.243
180	0.264	0.245	0.257	0.255
200	0.265	0.254	0.261	0.260

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



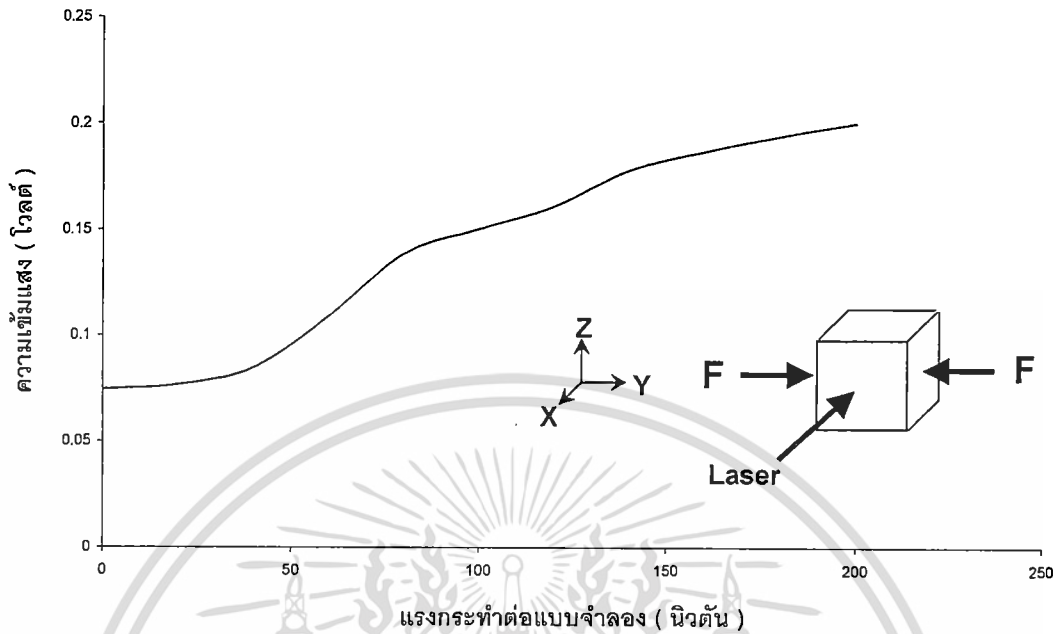
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Z ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน X ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงน้ำหนัก 20 นิวตัน ถึง 100 นิวตัน และเริ่มคงที่

ตารางที่ 4.2.3 ผลการทดลองที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน X ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Y ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

น้ำหนัก (N)	ความเข้มแสง(V)			ค่าเฉลี่ย (V)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0	0.059	0.080	0.084	0.074
20	0.056	0.086	0.088	0.077
40	0.056	0.090	0.108	0.085
60	0.078	0.103	0.147	0.109
80	0.112	0.138	0.166	0.139
100	0.127	0.145	0.179	0.150
120	0.144	0.152	0.187	0.161
140	0.163	0.180	0.191	0.178
160	0.174	0.190	0.197	0.187
180	0.187	0.194	0.202	0.194
200	0.195	0.198	0.208	0.200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



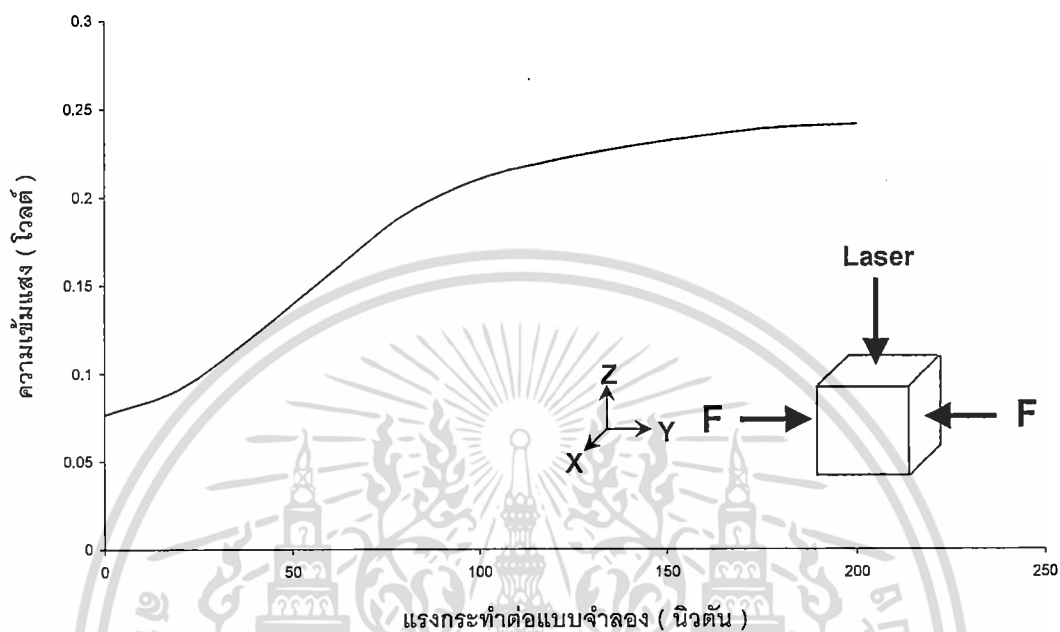
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน X ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Y ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเร็วแบบเชิงเส้น ในช่วงน้ำหนัก 20 นิวตัน ถึง 100 นิวตัน และเริ่มคงที่

ตารางที่ 4.2.4 ผลการทดลองที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Z ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Y ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

น้ำหนัก (N)	ความเข้มแสง(V)			ค่าเฉลี่ย (V)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0	0.074	0.080	0.076	0.077
20	0.090	0.090	0.094	0.091
40	0.120	0.114	0.132	0.122
60	0.156	0.147	0.167	0.257
80	0.187	0.192	0.191	0.190
100	0.208	0.211	0.211	0.210
120	0.217	0.222	0.223	0.221
140	0.222	0.226	0.237	0.228
160	0.225	0.237	0.242	0.235
180	0.228	0.245	0.245	0.239
200	0.230	0.248	0.245	0.241

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



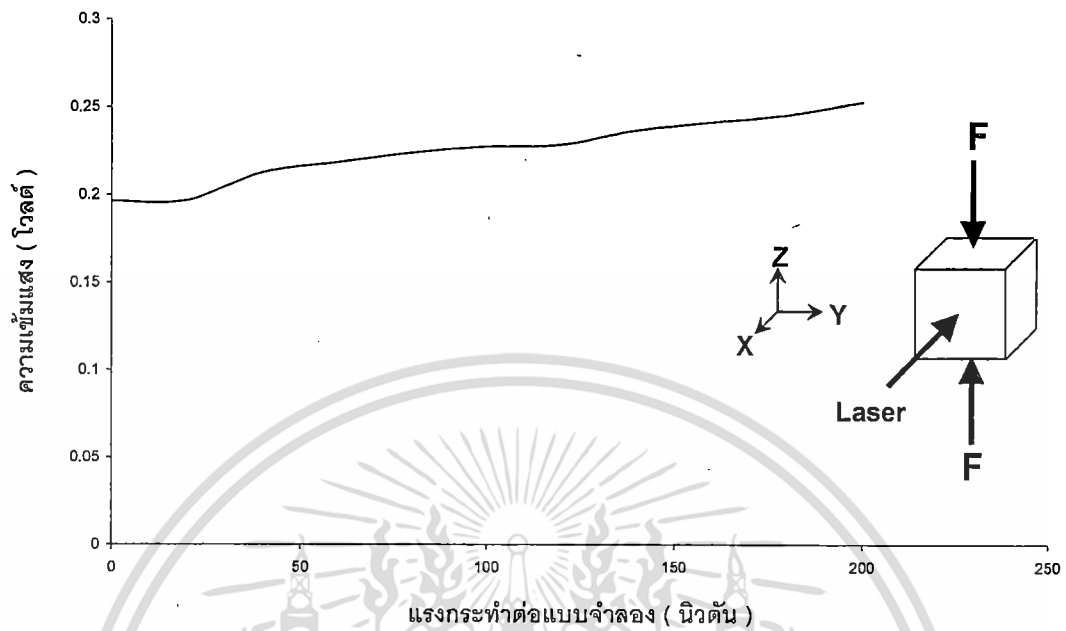
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงที่จัดการการวางตัวแบบจำลอง โดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Z ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Y ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง ช่วงแรกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแบบเชิงเส้น ในช่วงน้ำหนัก 20 นิวตัน ถึง 100 นิวตัน และเริ่มคงที่

ตารางที่ 4.2.5 ผลการทดลองที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน X ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Z ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

น้ำหนัก (N)	ความเข้มแสง(V)			ค่าเฉลี่ย (V)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0	0.185	0.214	0.190	0.196
20	0.196	0.220	0.174	0.197
40	0.210	0.221	0.206	0.212
60	0.217	0.226	0.212	0.218
80	0.223	0.228	0.220	0.224
100	0.229	0.230	0.222	0.227
120	0.233	0.234	0.217	0.228
140	0.238	0.239	0.231	0.236
160	0.243	0.243	0.236	0.241
180	0.246	0.247	0.241	0.245
200	0.255	0.251	0.250	0.252

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



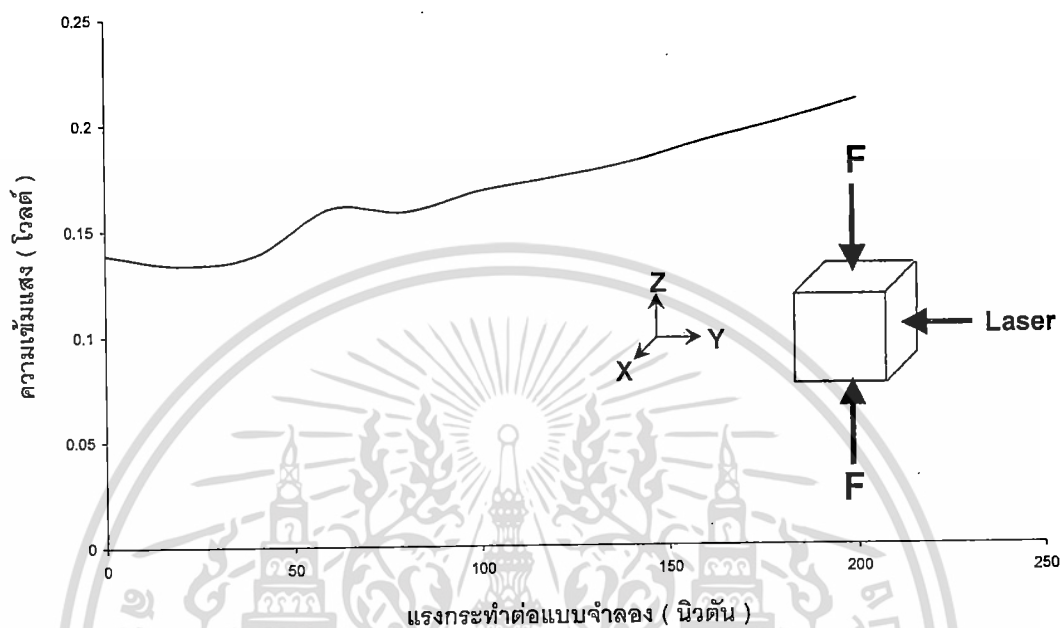
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน X ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Z ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง มีการเปลี่ยนแปลงที่ละน้อยแบบเชิงเส้น ในช่วงน้ำหนัก 20 นิวตัน ถึง 200 นิวตัน

ตารางที่ 4.2.6 ผลการทดลองที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Y ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Z ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

น้ำหนัก (N)	ความเข้มแสง(V)			ค่าเฉลี่ย (V)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0	0.148	0.143	0.125	0.139
20	0.136	0.136	0.129	0.134
40	0.131	0.134	0.150	0.138
60	0.141	0.174	0.165	0.160
80	0.144	0.159	0.172	0.158
100	0.145	0.174	0.185	0.168
120	0.154	0.178	0.190	0.174
140	0.167	0.187	0.189	0.181
160	0.185	0.189	0.199	0.191
180	0.198	0.202	0.200	0.200
200	0.208	0.215	0.207	0.210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Y ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Z ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

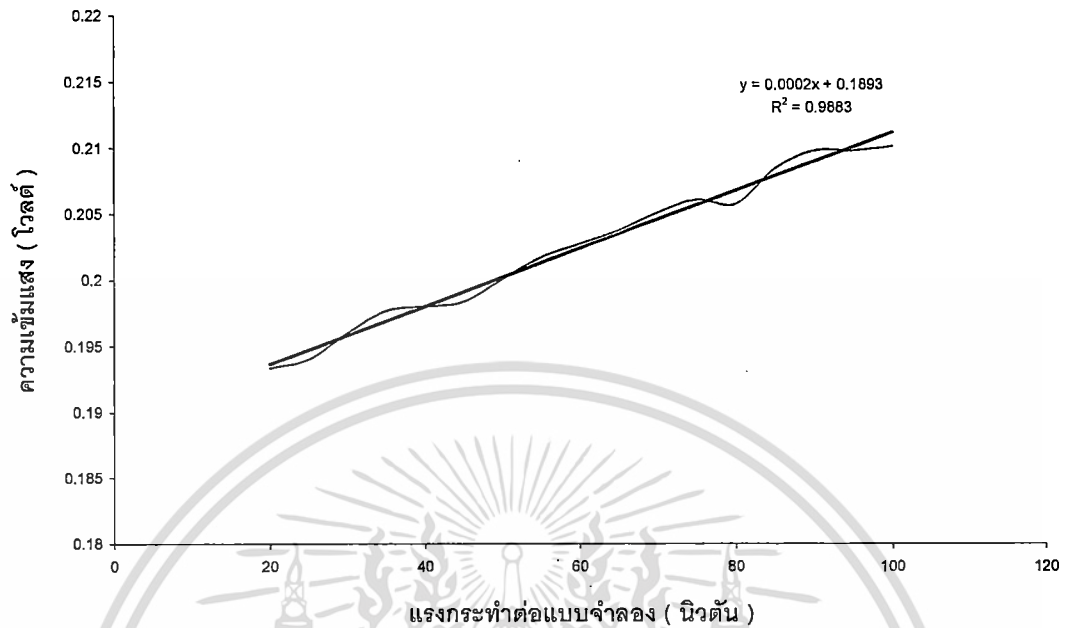
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น ในช่วงน้ำหนัก 20 นิวตัน ถึง 200 นิวตัน

4.3 ผลการทดลองการศึกษาค่าการสอบเทียบแรงกระทำต่อแบบจำลอง

ตารางที่ 4.3.1 ผลการสอบเทียบแรงกระทำต่อแบบจำลอง โดยเพิ่มแรงครั้งละ 5 นิวตัน

แรงกระทำ	ความเข้มแสง			เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
20	0.19	0.194	0.196	0.193
25	0.191	0.194	0.197	0.194
30	0.195	0.195	0.198	0.196
35	0.198	0.195	0.2	0.198
40	0.196	0.196	0.202	0.198
45	0.196	0.196	0.203	0.198
50	0.197	0.197	0.206	0.200
55	0.198	0.199	0.208	0.202
60	0.198	0.2	0.21	0.203
65	0.198	0.202	0.211	0.204
70	0.199	0.204	0.212	0.205
75	0.199	0.205	0.214	0.206
80	0.197	0.206	0.214	0.206
85	0.2	0.207	0.218	0.208
90	0.2	0.209	0.22	0.210
95	0.199	0.209	0.221	0.210
100	0.2	0.21	0.22	0.210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงโดยเพิ่มแรงกระทำต่อแบบจำลองครั้งละ 5 นิวตัน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง โดยเพิ่มแรงกระทำต่อแบบจำลองครั้งละ 5 นิวตัน กราฟมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นในช่วงน้ำหนัก 20 นิวตัน ถึง 200 นิวตัน

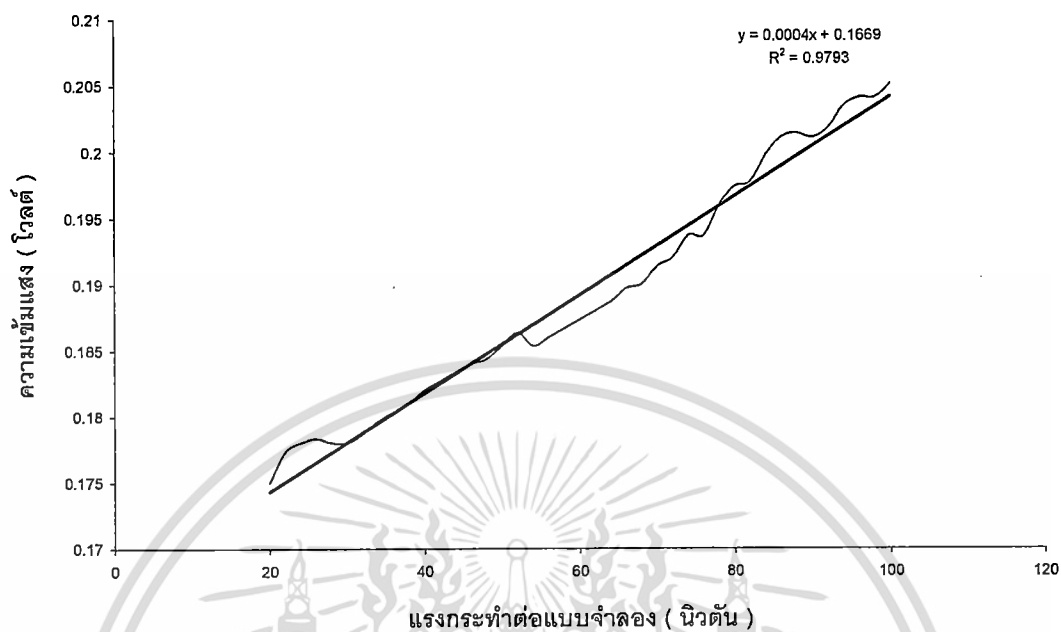
ตารางที่ 4.3.2 ผลการสอบเทียบแรงกระทำต่อแบบจำลอง โดยเพิ่มแรงครั้งละ 2 นิวตัน

แรงกระทำ	ความเข้มแสง			เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
22	0.187	0.172	0.173	0.177
24	0.188	0.172	0.174	0.178
26	0.188	0.173	0.174	0.178
28	0.188	0.173	0.173	0.178
30	0.188	0.173	0.173	0.178
32	0.189	0.174	0.173	0.179
34	0.190	0.175	0.174	0.180
36	0.191	0.175	0.175	0.180
38	0.192	0.176	0.175	0.181
40	0.194	0.176	0.176	0.182
42	0.194	0.177	0.177	0.183
44	0.195	0.178	0.177	0.183
46	0.196	0.178	0.178	0.184
48	0.196	0.178	0.179	0.184
50	0.197	0.179	0.180	0.185
52	0.198	0.180	0.181	0.186
54	0.198	0.176	0.182	0.185
56	0.198	0.177	0.183	0.186
58	0.198	0.178	0.184	0.187
60	0.199	0.178	0.185	0.187
62	0.200	0.178	0.186	0.188
64	0.200	0.179	0.187	0.189
66	0.201	0.180	0.188	0.190
68	0.201	0.180	0.189	0.190
70	0.202	0.181	0.191	0.191

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

72	0.203	0.181	0.192	0.192
74	0.204	0.184	0.193	0.194
76	0.204	0.183	0.194	0.194
78	0.205	0.187	0.196	0.196
80	0.206	0.189	0.197	0.197
82	0.206	0.189	0.198	0.198
84	0.209	0.191	0.199	0.200
86	0.210	0.193	0.200	0.201
88	0.210	0.193	0.201	0.201
90	0.211	0.190	0.202	0.201
92	0.211	0.191	0.203	0.202
94	0.212	0.194	0.204	0.203
96	0.213	0.194	0.205	0.204
98	0.214	0.193	0.205	0.204
100	0.214	0.195	0.206	0.205

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงโดยเพิ่มแรงกระทำต่อแบบจำลองครั้งละ 2 นิวตัน

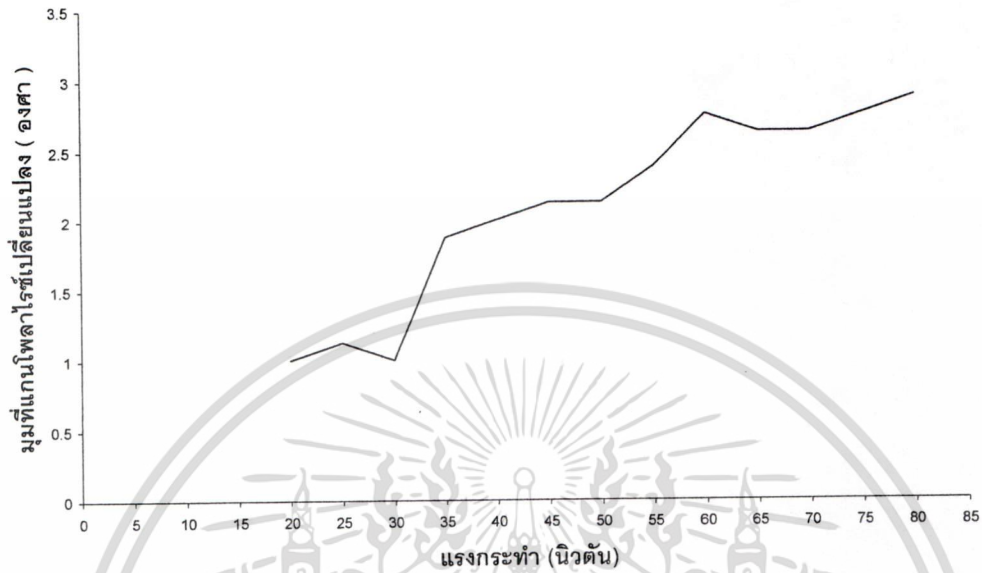
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง โดยเพิ่มแรงกระทำต่อแบบจำลองครั้งละ 2 นิวตัน กราฟมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นในช่วงน้ำหนัก 20 นิวตัน ถึง 200 นิวตัน

4.4 ผลการทดลองการศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อสภาวะโพลาไรเซชันของวัสดุ

ตารางที่ 4.4.1 ผลการทดลองผลของแรงกดที่มีผลต่อสภาวะโพลาไรเซชันของวัสดุ

แรงกระทำ (N)	ค่าเฉลี่ย ความเข้มแสงน้อยที่สุด (V)	ค่าเฉลี่ย มุมของแกนโพลาไรซ์ ที่เปลี่ยนแปลง (องศา)	ค่าเฉลี่ย ความเข้มแสงที่มุม 90 (V)
0	0.167	0	0.167
20	0.164	1.0	0.168
25	0.165	1.1	0.171
30	0.165	1	0.173
35	0.166	1.9	0.176
40	0.166	2.0	0.179
45	0.167	2.1	0.182
50	0.168	2.1	0.183
55	0.168	2.4	0.185
60	0.169	2.8	0.186
65	0.170	2.6	0.187
70	0.172	2.6	0.188
75	0.173	2.8	0.190
80	0.176	2.9	0.191

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการทดลองผลของแรงกดที่มีผลต่อสถานะ โพลีเอทิลีนของวัสดุ

จากกราฟ เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นมุมของแกนโพลีเอทิลีนมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นและมีค่าสูงสุดเฉลี่ย 2.9 องศา

บทที่ 5

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเมื่อทำการออกแรงกระทำต่อแบบจำลอง โดยชุดกำเนิดแรงที่สร้างขึ้นพบว่า ค่าความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นและเนื่องจากแท่งอะคริลิกที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดของด้านทั้งสามไม่เท่ากัน ทำให้การตอบสนองต่อแรงกระทำในแต่ละแนวแกนมีค่าไม่เท่ากัน จากการศึกษพบว่าแรงกระทำต่อแบบจำลองในแนวแกนที่มีความยาวสั้นที่สุดจะมีการตอบสนองต่อแรงกคดีที่สุด เนื่องจากความเค้นในแนวแกนมีค่ามากที่สุด

เมื่อออกแรงกดในแนวแกนที่ตอบสนองดีที่สุดจากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นไม่เป็นแบบเชิงเส้นแต่จะมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นในบางช่วงของแรงกระทำและเมื่อนำช่วงของแรงกระทำที่ให้ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นมาศึกษาหาความละเอียดของแรงกระทำที่มีผลต่อแบบจำลองพบว่า แรงกระทำ 5 นิวตัน มีความละเอียดที่สุดในช่วงแรงกระทำ 20 นิวตัน ถึง 100 นิวตัน

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

1. ในการออกแบบระบบวัดแรงโดยใช้เทคนิคทางแสงควรใช้เลเซอร์ที่มีความเสถียรสูง
2. ควรใช้ผลึกที่มีความไวต่อแรงกดมาก
3. ควรใช้ผลึกที่มีรูปทรงเป็นลูกบาศก์
4. ในการค้นคว้าโครงการต่อไปควรพัฒนาให้สามารถแสดงผลออกมาทางคอมพิวเตอร์ได้

เอกสารอ้างอิง

รศ.สุวรรณ คูสำราญ.2537. **ทัศนศาสตร์กายภาพ**.กรุงเทพฯ:สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง

Hecht, Eugene. 1990. **Optics**. Canada: Addison-Wesley Publishing Company,INC

D. Clarke and J.F. Grainger. 1971. **Polarized Light and Optical Measurement**. Pergamon
Press Ltd.: University of Manchester Institute of Science and Technology



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้