

A study of effects of mechanical force on polarization state
of materials



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of

Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาผลของแรงกดต่อสภาวะโพลาริเซชันของวัสดุ


นักศึกษา นายโชคชัย คหัญฐา
 นายคนุพล วงษ์วิบูลย์สิน
 นางสาวธิดารัตน์ ถนอมวุฒิ

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. วิษณุ เพชรภา

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ	
กรรมการ อ.สุรชาติ กมลดีลก	
กรรมการ รศ.สุพรรณ คูสำราญ	
กรรมการที่ปรึกษา ผศ.วิษณุ เพชรภา	

วิชาญ

(รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาผลของแรงกดต่อสถานะโพลาริเซชันของวัสดุ
นักศึกษา	นายโชคชัย ศันฐิฐา
	นายธนุพล วงษ์วิบูลย์สิน
	นางสาวธิดารัตน์ ถนอมวุฒิ
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2547
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. วิษณุ เพชรภา

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษฉบับนี้ศึกษาผลของแรงกดภายนอกที่มีต่อสถานะโพลาริเซชันของแสงที่ทะลุผ่านออกมาจากเพลาโพลาริซโคปที่มีชุดกำเนิดแรงกระทำต่อแท่งอะซิลิลิค โดยใช้หลอดเซลล์เป็นอุปกรณ์วัดแรงกดจากภายนอก สถานะโพลาริเซชันของแสงที่ผ่านออกมาจากแบบจำลอง มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นและเริ่มมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มแรงกดจากภายนอกถึงจุดหนึ่งทิศทางของแรงกดในบางแกนมีผลต่อสถานะโพลาริเซชันของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project title	A study of effects of machanical force on polarization state of material
Name	Mr. Chokchai Kahattha Mr. Danupon Vongviboonsin Miss Thidarat Thanomwut
Department	Applied Physics Faculty of Science
Program	Applied physics-Science and Industry Instrumentation
Academic	2004
Special Project Advisor	Assistant Professor Wisanu Pecharapa

Abstract

This special project 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.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้อาจจะสำเร็จลุล่วงมิได้ หากขาดบุคคลต่อไปนี้จึงขอกล่าวขอบพระคุณไว้
โอกาสนี้

บุพการี ผู้ให้กำเนิด คอยอุปการะเลี้ยงดู ให้กำลังอยู่ตลอดเสมอมา
ผศ. วิษณุ เพชรภา ผู้หยิบยื่นโอกาสให้และคอยชี้แนะ ช่วยเหลือในด้านต่างๆ
คณะกรรมการทุกท่าน ที่คอยติเตียน ทำให้เกิดผลงานที่ดี
เพื่อนๆ รุ่น 20 ที่คอยเป็นกำลังใจ และเป็นห่วงเสมอมา



โชคชัย คหัทฐา
คุณพล วงษ์วิบูลย์สิน
ธิดารัตน์ ถนอมวุฒิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงสร้างพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 โพลลาไรเซชัน (Polarization)	3
2.2 ชนิดของโพลลาไรเซชัน	6
2.2.1 แสงโพลลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น	6
2.2.2 แสงโพลลาไรซ์ชนิดวงกลม	8
2.2.3 แสงโพลลาไรซ์ชนิดวงรี	12
2.4 Photoelasticity	15
2.5 Load cell	19
2.5.1 Wheatstone Bridge	19
2.5.2 Instrumentation Amplifier	20
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	22
3.1 ทำการติดตั้ง Plane Polariscope	22
3.2 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการโพลลาไรซ์ของวัสดุ	23
3.3 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการโพลลาไรซ์ของวัสดุ	23
เมื่อทิศทางของแรงเปลี่ยนแปลง และการวางตัวของแบบจำลอง	24
3.4 ศึกษาการสอบเทียบแรงกระทำต่อแบบจำลอง	26
3.5 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อทิศทางโพลลาไรเซชันของวัสดุ	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง	30
4.1 การศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการโพลลาไรซ์ของแบบจำลอง	30
4.2 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการโพลลาไรซ์ของวัสดุ	30
เมื่อทิศทางของแรงเปลี่ยนแปลง และการวางตัวของแบบจำลอง	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ศึกษาการสอบเทียบแรงกระทำต่อแบบจำลอง	43
4.4 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อสภาวะโพลาไรเซชันของวัสดุ	48
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	50
5.1 สรุปผลการทดลอง	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.2.1 ผลการทดลองที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ ผ่านแนวแกน Y ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน X ของแบบจำลอง และออกแรงกดจากด้านบน	31
ตารางที่ 4.2.2 ผลการทดลองที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ ผ่านแนวแกน Z ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน X ของแบบจำลอง และออกแรงกดจากด้านบน	33
ตารางที่ 4.2.3 ผลการทดลองที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ ผ่านแนวแกน X ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Y ของแบบจำลอง และออกแรงกดจากด้านบน	35
ตารางที่ 4.2.4 ผลการทดลองที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ ผ่านแนวแกน Z ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Y ของแบบจำลอง และออกแรงกดจากด้านบน	37
ตารางที่ 4.2.5 ผลการทดลองที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ ผ่านแนวแกน X ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Z ของแบบจำลอง และออกแรงกดจากด้านบน	39
ตารางที่ 4.2.6 ผลการทดลองที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ ผ่านแนวแกน Y ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Z ของแบบจำลอง และออกแรงกดจากด้านบน	41
ตารางที่ 4.3.1 ผลการสอบเทียบแรงกระทำต่อแบบจำลองโดยเพิ่มแรงครั้งละ 5 นิวตัน	43
ตารางที่ 4.3.2 ผลการสอบเทียบแรงกระทำต่อแบบจำลองโดยเพิ่มแรงครั้งละ 2 นิวตัน	46
ตารางที่ 4.4.1 ผลการทดลองผลของแรงกดที่มีผลต่อสภาวะโพลาไรเซชันของวัสดุ	48

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการสั้นของแสงธรรมชาติ ซึ่งมีสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (\vec{H})	3
รูปที่ 2.2 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นตกกระทบทำมุม θ กับแกนของโพลาไรซ์	4
รูปที่ 2.3 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นซึ่งมีมุมที่เปลี่ยนไป (α) ตามแกน X (α) ตามแกน Y (β) ทำมุม 45° กับแกน X	7
รูปที่ 2.4 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมหมุนตามขวาและแนวการหมุนจาก ตำแหน่งที่ 1 ถึง 4	9
รูปที่ 2.5 แสดงการหมุนของเวกเตอร์ไฟฟ้าในกรณีของแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวา และกรณีที่ตรงกันข้าม $\phi = -\pi/2$	10
รูปที่ 2.6 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมหมุนตามซ้ายและแนวการหมุนจาก ตำแหน่งที่ 1 ถึง 4	11
รูปที่ 2.7 แสดงการกำหนดทิศทางของการหมุนสำหรับโพลาไรซ์ชนิดวงรี	12
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะทั่วไปของคลื่นโพลาไรซ์ชนิดวงรี	13
รูปที่ 2.9 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรีตามซ้ายและแนวการหมุนจากตำแหน่งที่ 1 ถึง 4	14
รูปที่ 2.10 The index ellipsoid	15
รูปที่ 2.11 แสดงแบบจำลองที่มีความเค้น วางอยู่ระหว่างแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มีแกน โพลาไรซ์ตั้งฉากกัน	16
รูปที่ 2.12 แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าในแนวแกนความเค้น	17
รูปที่ 2.13 องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่ผ่านออกมาจากแผ่น analyzer	18
รูปที่ 2.14 วงจร Wheatstone Bridge	19
รูปที่ 2.15 วงจร Instrument Amplifier	21
รูปที่ 3.1 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลอง Plane Polariscopes	22
รูปที่ 3.2 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลองเมื่อมีแรงกดมากระทำกับแบบจำลอง	23
รูปที่ 3.3 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลองเมื่อมีแรงกดมากระทำกับแบบจำลอง	24
รูปที่ 3.4 แบบจำลอง	24
รูปที่ 3.5 แสดงทิศของแนวแรงที่กระทำกับแบบจำลองจากทิศต่างๆ	25
รูปที่ 3.6 แสดงมุมของแกนโพลาไรเซอร์ที่กระทำกับแกนของอนาไลเซอร์	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 Photodetector แบบ silicon	28
รูปที่ 3.8 He-Ne laser	28
รูปที่ 3.9 แผ่น analyzer	28
รูปที่ 3.10 แผ่น polarizer	28
รูปที่ 3.11 แท่งอะคริลิค	28
รูปที่ 3.12 ชุดกำเนิดแรงและ load cell	28
รูปที่ 3.13 load cell transmitter	29
ที่ 3.14 แสดงการศึกษามลของแรงกดต่อสภาวะโพลาไรเซชันของวัสดุ	29
รูปที่ 4.1 แท่งอะคริลิค	30
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง	30
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง ที่จัดการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Y ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน X ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน	32
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง ที่จัดการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Z ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน X ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน	34
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง ที่จัดการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน X ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Y ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน	36
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง ที่จัดการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Z ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Y ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน	38
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง ที่จัดการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน X ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Z ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง ที่จัดการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Y ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Z ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบนกดด้านบน	42
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง โดยเพิ่มแรงกระทำต่อแบบจำลองครั้งละ 5 นิวตัน	44
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง โดยเพิ่มแรงกระทำต่อแบบจำลองครั้งละ 2 นิวตัน	47
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการทดลองผลของแรงกดที่มีผลต่อสภาวะโพลาริเซชันของวัสดุ	49



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันวิทยาการทางด้านแสงได้พัฒนาอย่างรวดเร็ว ทำให้มีผู้สนใจศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของแสงทั้งสมบัติที่เป็นคลื่นและอนุภาค ทั้งนี้เทคโนโลยีทางด้านแสงยังมีความสำคัญ เนื่องจากแสงมีความเร็วสูง และสามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำ จึงได้มีการนำแสงมาพัฒนาในระบบตรวจรู้ (sensor) ที่มีความไวสูง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทิศการสั่นของสนามไฟฟ้าแสดงถึงสภาวะโพลาไรเซชันของแสง ปัจจัยที่มีผลต่อสภาพโพลาไรเซชันของวัสดุ เช่น อุณหภูมิ สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และแรงจากภายนอก โดยสภาวะโพลาไรซ์ที่เกิดจากแรงกดภายนอก เรียกว่าปรากฏการณ์ Photoelastic

เราสามารถใช้ชิ้นส่วนของควอตซ์ แคลไซต์ และแผ่นบาง ๆ ของไมกา แสดงการเกิดสีจากโพลาไรเซชันได้ สารบางชนิดจะแสดงปรากฏการณ์เช่นนี้เมื่อถูกแรงกดหรือเมื่ออยู่ภายใต้ความเค้น (stress) สารพวกนี้ได้แก่ พลาสติก หรือแก้ว ในวัสดุพวกนี้ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีภายใต้การกดได้ ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหในบริเวณดังกล่าว ซึ่งสารพวกนี้จะเป็นพวก isotropic ไม่ใช่สารหักเหสองแนว การทำให้สาร isotropic แสดงสมบัติการหักเหสองแนว ภายใต้ความเค้นนี้ เรียกว่า photoelasticity และพบว่าสารพวกนี้จะมีแกนทัศนิกเกิดขึ้นในแนวของแรงกดนั่นเอง การแสดงสมบัติการหักเหสองแนวนี้จะแปรตามค่าความเครียด (strain) ดังนั้นจึงมักนิยมสร้างต้นแบบของชิ้นส่วนของเครื่องกล แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการทาง photoelasticity ถ้าเราทำการศึกษาผลของความเครียดต่อชิ้นงานที่อยู่ระหว่างโพลาไรเซอร์ 2 อัน ที่มีแกนการยอมให้ผ่านตั้งฉากกัน จะพบว่าตำแหน่งที่ความเครียดมีค่าสูงสุดจะเป็นจุดสว่าง จากปรากฏการณ์นี้เราจึงนำมาทำเป็นระบบ sensor ที่ใช้วัดแรงได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษามูลของแรงกดที่มีผลต่อการโพลาไรซ์ของวัสดุ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาแรงในทิศทางต่างๆ ที่มีผลต่อการโพลาไรซ์ของวัสดุ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและสภาวะโพลาไรซ์ของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในการวิจัยนี้เราจะศึกษาการโพลาไรซ์ของแสง และความเข้มของแสงที่เปลี่ยนไปเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับวัสดุ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและหลักการของการเกิดปรากฏการณ์ Photoelasticity เนื่องจากแรงกด
- 1.4.2 ศึกษาคุณสมบัติทาง Photoelastic ของวัสดุ
- 1.4.3 ทำการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการกดวัสดุ
- 1.4.4 ทำการทดลองวัดค่าความเข้มของแสง เมื่อฉายแสงผ่านวัสดุที่มีแรงกดจากภายนอก

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

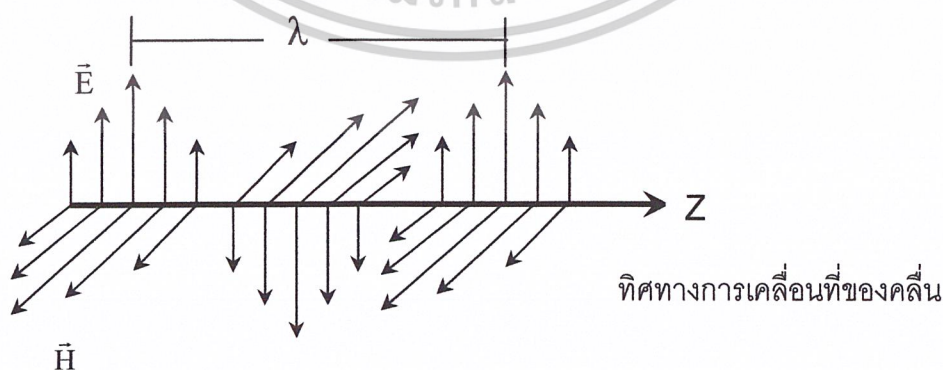
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 โพลาริเซชัน (Polarization)

แสงที่เป็นคลื่นระนาบ และมีทิศของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงหรือสั่นแนวคงที่แนวหนึ่ง เรียกว่าเป็นแสงโพลาริซ์เชิงเส้น หรือเรียกว่ามีสมบัติโพลาริซ์เชิงเส้น (Linearly polarized light) สำหรับสนามแม่เหล็กซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงหรือสั่นในแนวที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกับสนามไฟฟ้า กล่าวคือมีการสั่นในแนวคงที่แนวหนึ่งซึ่งเป็นแนวที่ตั้งฉากกับแนวของสนามไฟฟ้าและจะได้ทิศทางของ $\vec{E} \times \vec{B}$ เป็นทิศเดียวกับแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น อย่างไรก็ตาม แสงโดยทั่วไปมักไม่มีสมบัติดังกล่าว เช่น แสงที่ได้จากการเผาไส้หลอดให้ร้อน ทิศของสนามไฟฟ้าจะไม่อยู่ในแนวคงที่แนวใดแนวหนึ่ง และไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับตำแหน่งอย่างเป็นระเบียบใดๆ แสงเช่นนี้เป็นแสงที่ไม่โพลาริซ์ (Unpolarized light) ในบางกรณีแสงอาจมีการผสมกันระหว่างแสงโพลาริซ์และแสงไม่โพลาริซ์ กรณีนี้เรียกว่าเป็นแสงโพลาริซ์บางส่วน (Partially polarized light) ในกรณีของแสงโพลาริซ์นั้นนอกจากจะเป็นแสงโพลาริซ์เชิงเส้นแล้ว อาจเป็นแสงโพลาริซ์เชิงวงกลม หรือเชิงวงรี (Circularly or Elliptically polarized light)

ปรากฏการณ์การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนนั้นเกิดขึ้นได้กับคลื่นทุกชนิดทั้งคลื่นตามขวางเช่นแสง และคลื่นตามยาวเช่นคลื่นเสียง แต่ในกรณีของโพลาริเซชันจะเกิดเฉพาะในคลื่นตามขวางเท่านั้น ไม่เกิดในคลื่นตามยาว และเป็นที่ทราบกันดีว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีทิศการสั่นของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (\vec{H}) และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น



รูปที่ 2.1 แสดงการสั่นของแสงธรรมชาติ ซึ่งมีสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (\vec{H})

พิจารณาแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 2.1 สามารถเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

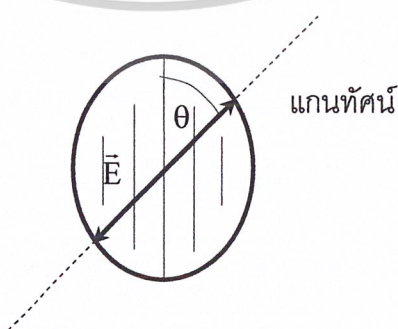
เมื่อแสงเคลื่อนที่ในทิศทางตามแกน $-Z$ และเป็นโพลาไรซ์เชิงเส้นมีทิศทางของสนามไฟฟ้าตามแกน Y เมื่อ ν เป็นความถี่ของคลื่นแสง λ เป็นความยาวคลื่น E_{OY} เป็นแอมพลิจูดสูงสุดและ ϕ_0 เป็นค่าคงที่ของเฟส โดยมีความถี่เชิงมุมที่ได้คือ $\omega = 2\pi\nu$ และมีเลขคลื่น (Wave Number) $k = 2\pi/\lambda$ แล้วสมการที่ (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าส่วนที่ขนานกับแกนของแผ่นโพลาไรซ์คือ $E \cdot \cos \theta$ จะสามารถผ่านแผ่นโพลาไรซ์ออกมาได้ และเนื่องจากความเข้มของแสงเป็นปริมาณโดยตรงกับแอมพลิจูดยกกำลังสอง จะได้ความเข้มของแสงโพลาไรซ์ที่ผ่านออกมาจากแผ่นโพลาไรซ์ตั้งสมการที่ (2.4) หรือสามารถเรียกว่า กฎของมาลุส (Malus' law) ได้ดังนี้

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (2.4)$$

เมื่อ I_0 เป็นความเข้มแสงที่ตกกระทบมากที่สุดที่เข้ามาถึงแผ่นโพลาไรซ์

แผ่นโพลาไรซ์ใช้ทำเป็นโพลาไรเซอร์ (Polarizer) หรือตัวทำแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นโดยทำแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ให้เป็นแสงโพลาไรซ์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้โพลาไรเซอร์อีกแผ่นหนึ่งวางซ้อนกันและทำหน้าที่เป็นตัววิเคราะห์ (Analyzer) เพื่อทำหน้าที่ในการจัดมุมของการโพลาไรซ์ของแสงที่ผ่าน โดยถ้าวางแกนของโพลาไรเซอร์ทั้งสองแผ่นตั้งฉากกัน (90 องศา) จะไม่มีแสงส่องผ่านออกมา แต่ถ้าหมุนตัววิเคราะห์ทำมุม θ กับตัวทำแสงโพลาไรซ์ โดยให้ความเข้มของแสงโพลาไรซ์ที่ออกจากตัวทำแสงโพลาไรซ์ไปยังตัววิเคราะห์เป็น I_0 ความเข้มแสงที่ได้ก็ออกมาจากตัววิเคราะห์จะเป็นไปตามกฎของมาลุสและถ้าหมุนตัววิเคราะห์ไปเป็นมุมต่างๆ แล้วหาค่าความเข้มสูงสุด (I_{\max}) และความเข้มต่ำสุด (I_{\min}) แล้วสามารถพิจารณาในเทอมของอัตราส่วนระหว่างความเข้มแสงสูงสุดและความเข้มแสงต่ำสุดที่ส่องผ่านออกมาหรือเป็นการวัดคุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์ ER (Extinction Ratio)

$$ER = 10 \log(I_{\max}/I_{\min}) \quad (2.5)$$

ถ้าความแตกต่างระหว่าง I_{\max} และ I_{\min} มีค่าทำให้ค่า ER มาก นั่นคือคุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์ที่ได้จะดี

จากหลักการพื้นฐานของคลื่นแสงธรรมชาตินี้ จะพิจารณาเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการโพลาไรซ์ของแสง ซึ่งในการจำแนกชนิดของโพลาไรเซชันนั้นจะพิจารณาความสัมพันธ์ทางเฟส (ϕ_0) ของทิศทาง X และ Y และเปรียบเทียบขนาดระหว่าง E_x และ E_y ซึ่งสามารถจำแนกชนิดของแสงโพลาไรซ์ชนิดนี้ได้ดังนี้คือ แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น (Linearly Polarized light) แสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลม (Circularly Polarized Light) และแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลม (Circularly Polarized Light) และแสงโพลาไรซ์ชนิดวงรี (Elliptically Polarized Light) โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ชนิดของแสงโพลาไรซ์

2.2.1 แสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้น

ในที่นี้จะพิจารณาว่าแสงเป็นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากโพลาไรเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับเฉพาะคลื่นตามขวางเท่านั้น ดังนั้นจากการที่คลื่นที่เคลื่อนที่ไปตามแกน Z จะสามารถแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นที่มีทิศทางการตามแกน X ได้ดังนี้

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

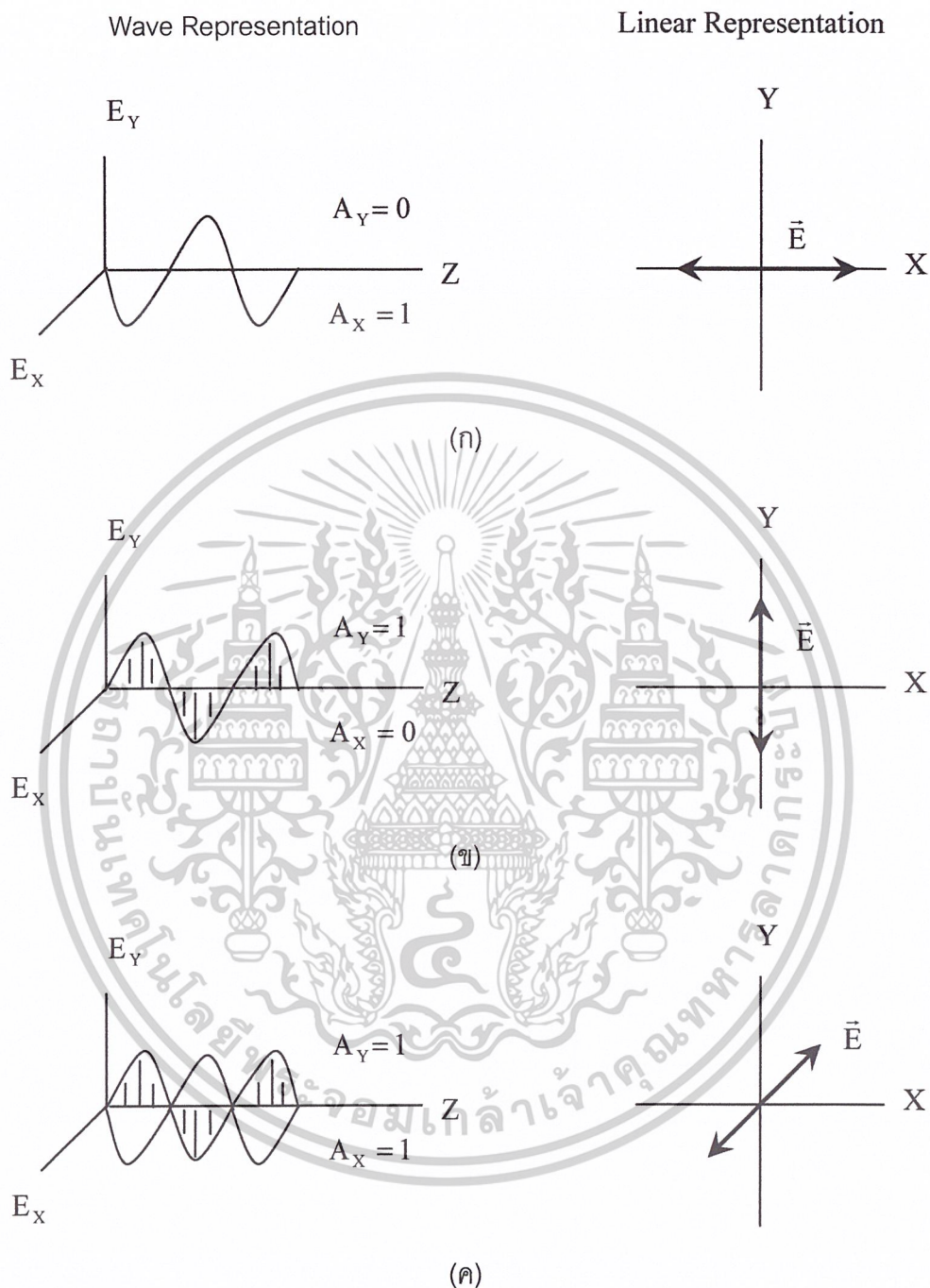
เมื่อ E_{OX} เป็นแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า และ \hat{i} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแกน X และในทำนองเดียวกันแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นที่มีทิศทางการตามแกน Y สามารถเขียนได้ดังนี้

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

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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 แสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลม

ในกรณีที่แอมพลิจูดของคลื่นในส่วนประกอบของแกนที่ตั้งฉากกันนั้นเท่ากัน

กล่าวคือ

$E_{ox}=E_{oy}=E_o$ และมีความต่างเฟส $\Delta\phi = \pm\pi/2$ จะได้ว่า

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

และ

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

ซึ่งมีสมการคลื่นรวมเป็นดังนี้

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

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

$$\vec{E}_x = \hat{i}E_o \cos(kz_o) \quad (2.12)$$

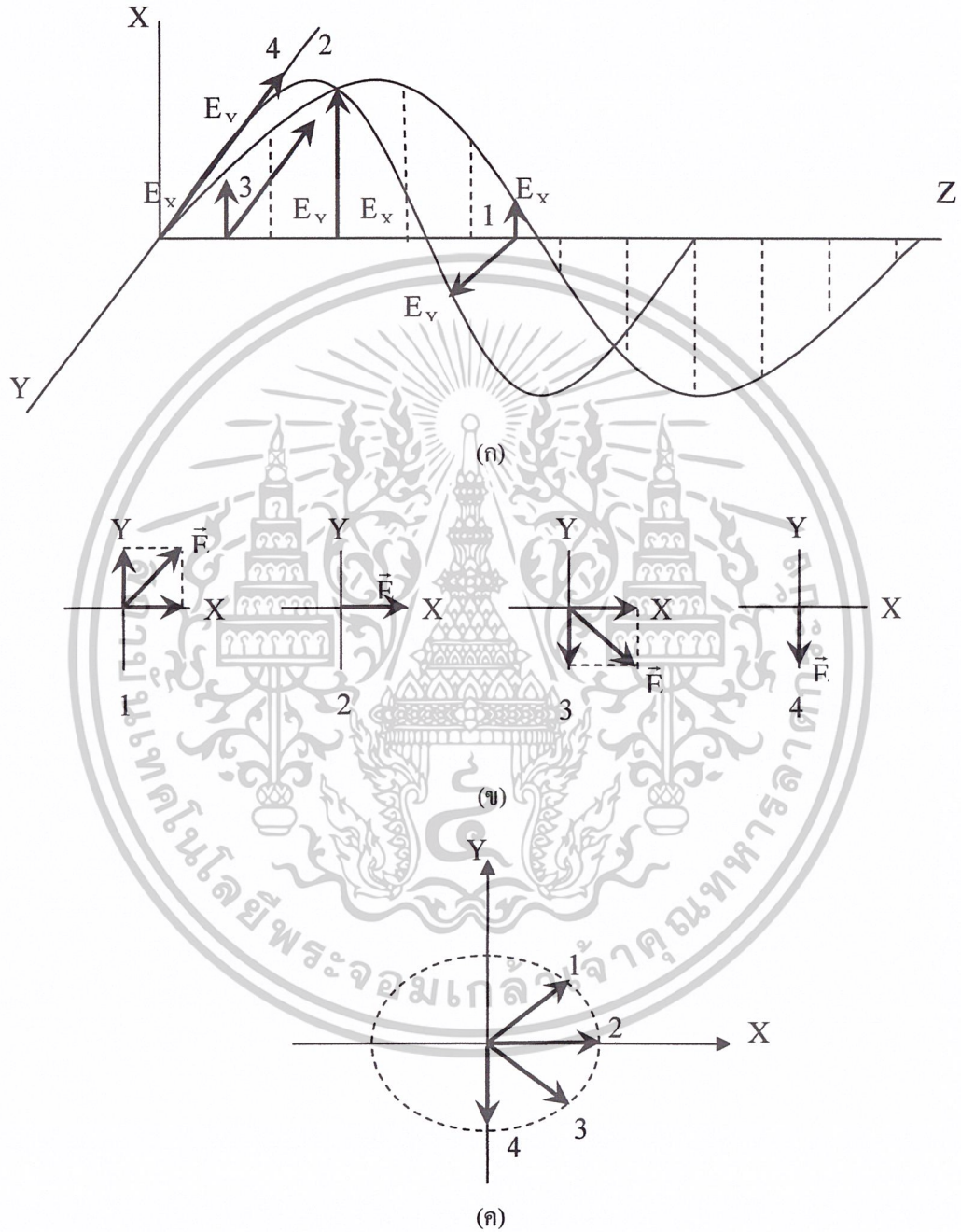
และ

$$\vec{E}_y = \hat{j}E_o \sin(kz_o) \quad (2.13)$$

ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่ง $t = kz_o/\omega$ จะได้ว่า $\vec{E}_x = \hat{i}\vec{E}_o \cdot \vec{E}_y = 0$ 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 โดยแสงจะพุ่งไปข้างหน้าเท่ากับความเร็วหนึ่งช่วงคลื่น ซึ่งจะเรียกแสงที่มีลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

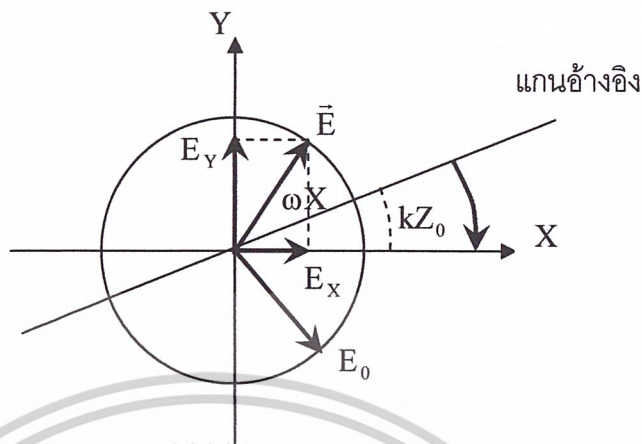
สถานะโพลาไรเซชันแบบนี้ว่าแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวา (Right Circularly Polarization: RCP) โดยมีเฟส $\phi = +\pi/2$



รูปที่ 2.4 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมหมุนตามขวาและแนวการหมุนจากตำแหน่งที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลที่มีอยู่. ขอสงวนสิทธิ์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงการหมุนของเวกเตอร์ไฟฟ้าในกรณีของแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามขวาและกรณีตรงกันข้าม $\phi = -\pi/2$ จะได้ว่า

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

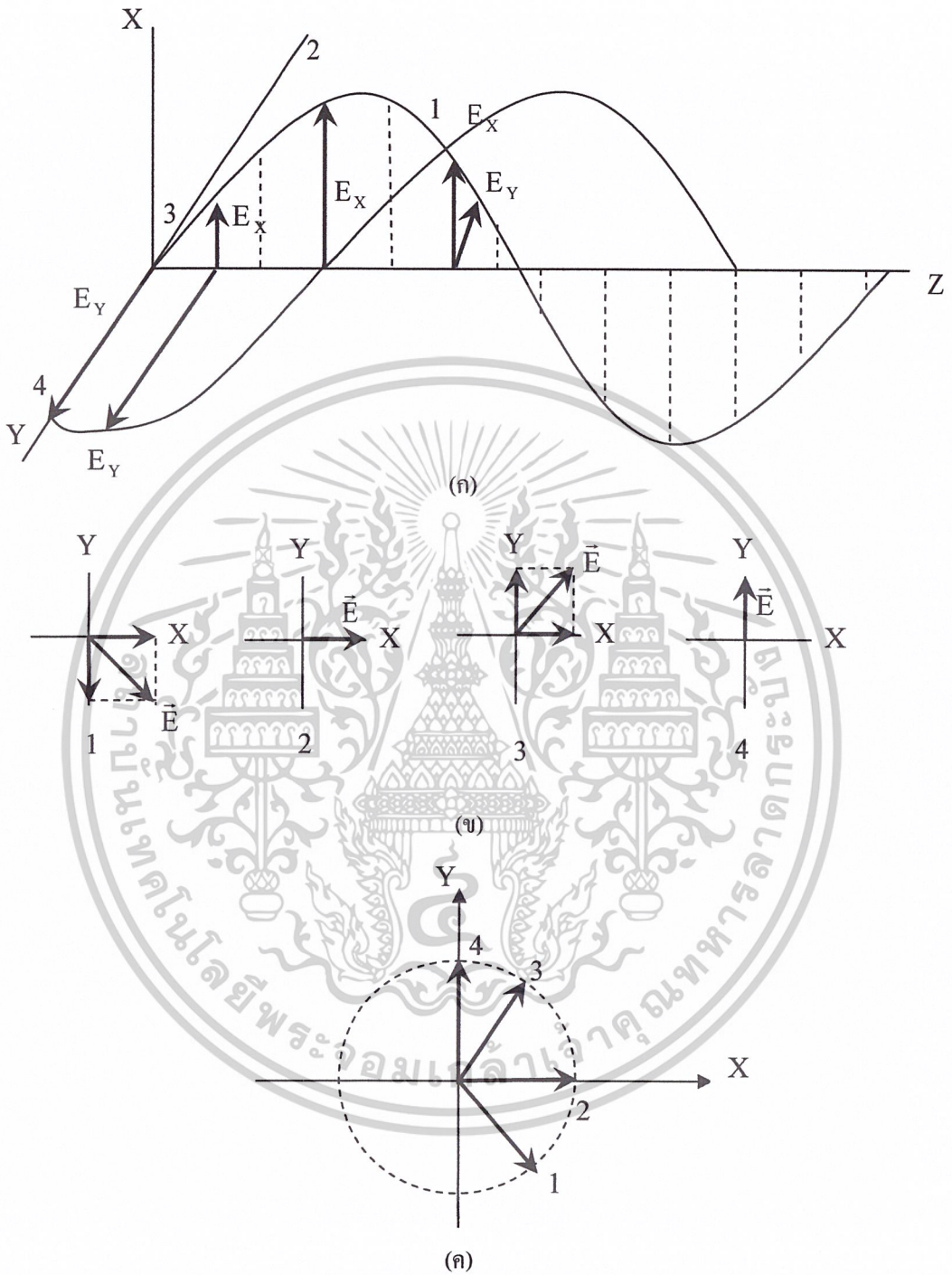
จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดไม่ได้ต่างไปกรณีข้างต้น แต่ \vec{E} จะหมุนทวนเข็มนาฬิกาจึงเรียกว่าเป็น แสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมตามซ้าย (Left Circularly Polarization: LCP) ซึ่ง \vec{E}_y จะตามหลัง \vec{E}_x ไปเป็น 1 ใน 4 ของแต่ละรอบ ทำให้หมุนทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 2.6

พิจารณาโดยทั่วๆ ไป จะพบว่าภาวะโพลาไรซ์ชนิดวงกลมทั้งสองแบบนี้จะเป็นไปได้เมื่อเฟส 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

ถ้านำแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมทั้งสองแบบนี้ซึ่งมีแอมพลิจูดเท่ากันมารวมกัน ก็จะถูกกลายเป็นโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นไป



รูปที่ 2.6 แสดงแสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมหมุนตามซ้ายและแนวการหมุนจากตำแหน่งที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ

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

(ค) แสดงสนามไฟฟ้าในรูปของแผนภาพวงกลมซึ่งมองในทิศเข้าไปหาแหล่งกำเนิดแสง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ของการนำเอกสารนี้ไปใช้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

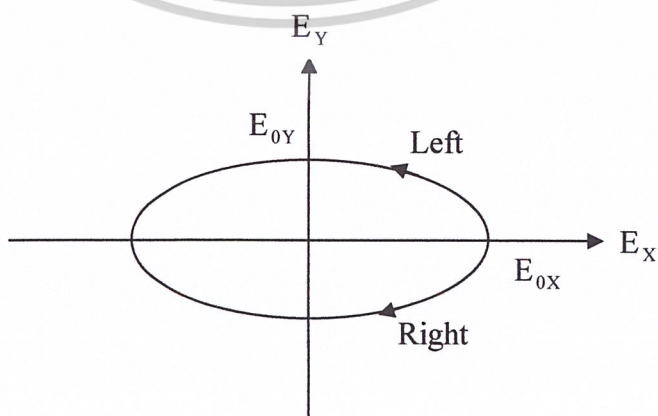
และ

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

หรือเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{E_X^2}{E_{OX}^2} + \frac{E_Y^2}{E_{OY}^2} = \cos^2(kz - \omega t) + \cos^2(kz - \omega t + \phi) = 1 \quad (2.17)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์นี้ 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

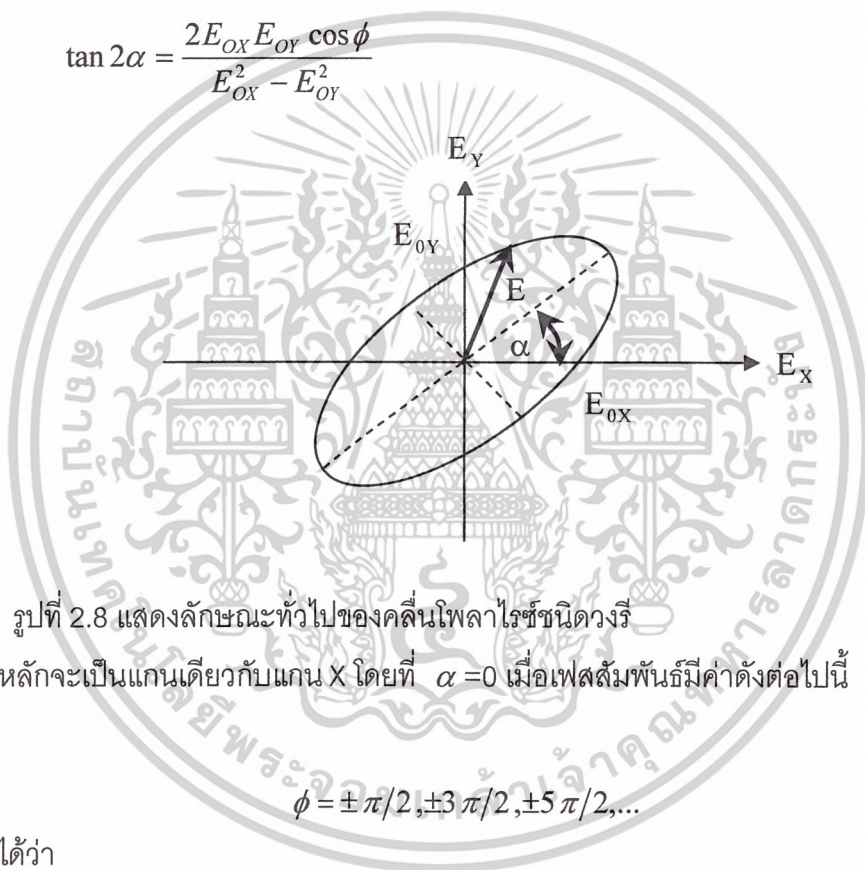
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

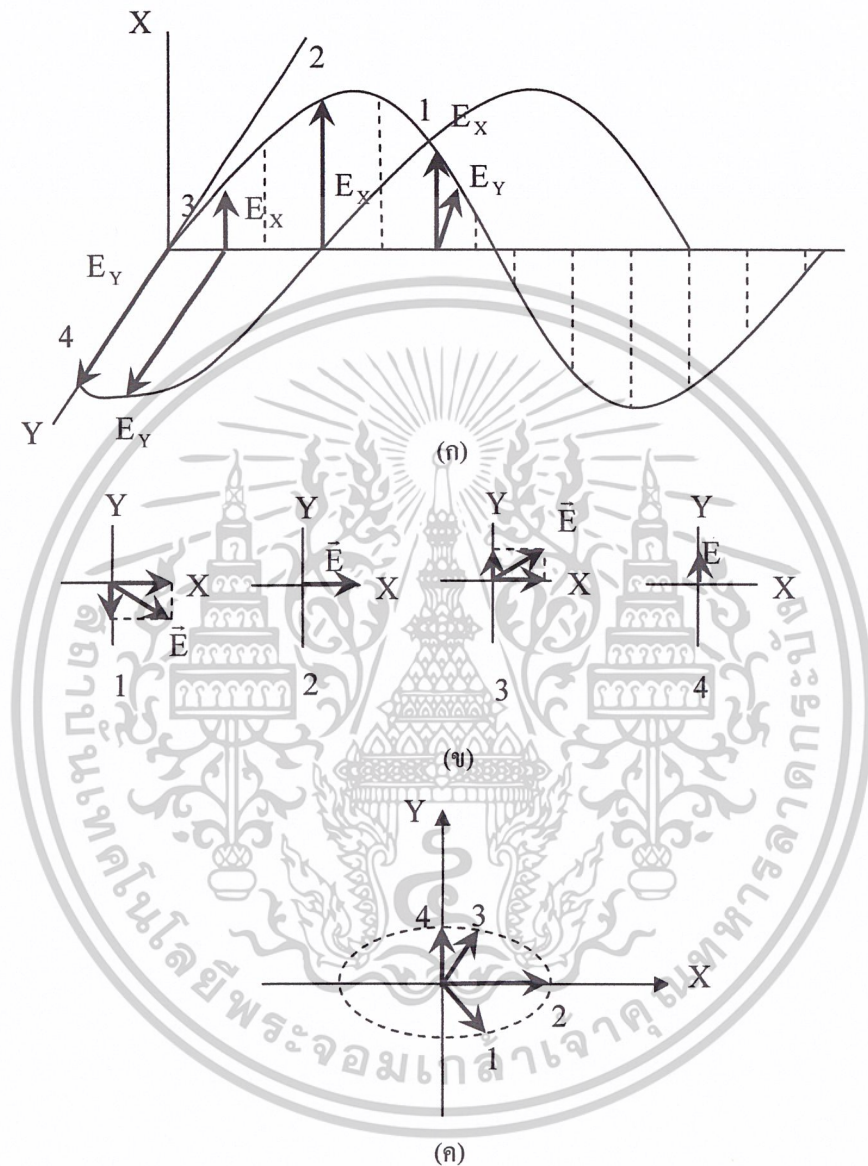
$$\frac{E_X^2}{E_{OX}^2} + \frac{E_Y^2}{E_{OY}^2} = 1 \quad (2.20)$$

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของโพลาริเซชันเส้นที่มีความชันเป็น $\pm E_{OY}/E_{OX}$ และในรูปที่ 2.9 นี้ จะเป็นการแสดงลักษณะของคลื่นแสงโพลาริเซชันชนิดวงรีตามซ้าย

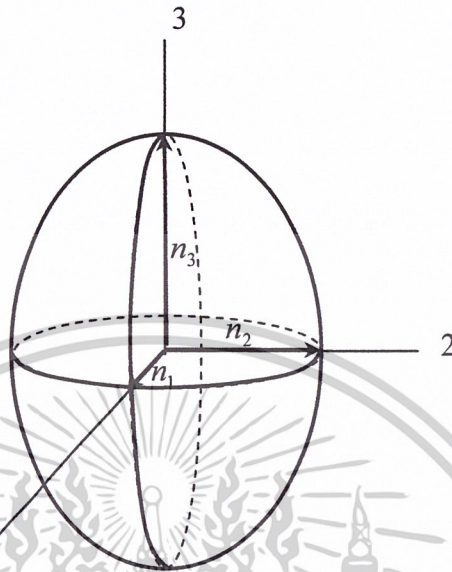


รูปที่ 2.9 แสดงแสงโพลาริเซชันชนิดวงรีตามซ้ายและแนวการหมุนจากตำแหน่งที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ

- (ก) ส่วนประกอบของแสงเชิงเส้นที่ตั้งฉากกันมีแอมพลิจูดต่างกันและเฟสต่างกัน 90°
 (ข) ผลรวมเวกเตอร์ของส่วนประกอบทั้งสองใน (ก) แสดงสนามไฟฟ้าในรูปของแผนภาพวงกลมซึ่งมองในทิศเข้าไปหาแหล่งกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 Photoelasticity



รูปที่ 2.10 The index ellipsoid

สารบางชนิดเมื่ออยู่ภายใต้แรงกดหรือเมื่ออยู่ภายใต้ความเค้น (stress) ค่าดรรชนีหักเหภายในจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในบริเวณนั้น โดยค่าดรรชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงนั้นเป็นแบบวงรี คือ $n_1 = n_2 \neq n_3$ ดังรูป 2.10 และค่าดรรชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงนั้นแปรผันตามความเค้น 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	ค่าดรรชนีหักเหขณะยังไม่มีความเค้น
n_1, n_2, n_3	คือ	ค่าดรรชนีที่เกิดขึ้นขณะมีความเค้น
c_1, c_2	คือ	stress-optic coefficients (m^2/N)

และเมื่อแสงเดินทางผ่านออกมาจากวัตถุที่ตกอยู่ในสภาพเช่นนี้ จะมีความต่างเฟสเกิดขึ้น ซึ่งความต่างเฟสที่เกิดขึ้นนั้นแสดงดังสมการ

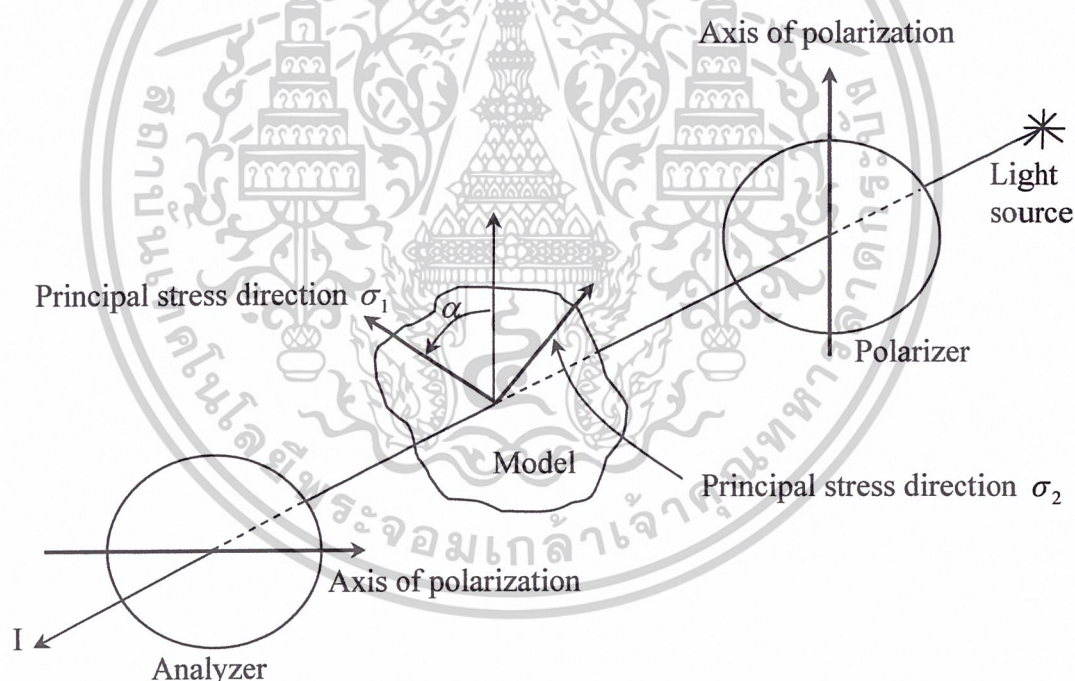
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\Delta_{12} &= \frac{2\pi dc}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \\ \Delta_{23} &= \frac{2\pi dc}{\lambda} (\sigma_2 - \sigma_3) \\ \Delta_{31} &= \frac{2\pi dc}{\lambda} (\sigma_3 - \sigma_1)\end{aligned}\tag{2.23}$$

เมื่อ d คือ ความหนาของวัตถุ

$$c = (c_2 - c_1)$$

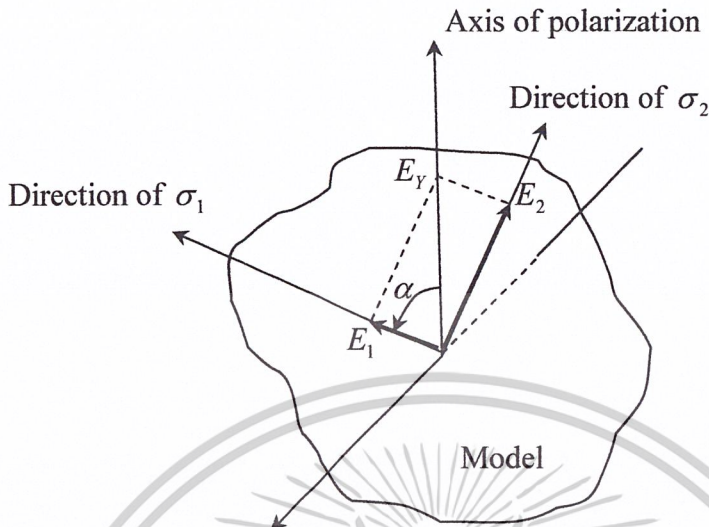
เมื่อนำแบบจำลองที่มีความเค้นมาวางระหว่างแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มีแกนตั้งฉากกันดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงแบบจำลองที่มีความเค้น วางอยู่ระหว่างแผ่นโพลาไรเซอร์ที่มีแกนโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าในแนวแกนความเค้น

สนามไฟฟ้ามีค่าดังสมการ

$$E_1 = a \cos \alpha \cos \omega t \tag{2.24}$$

$$E_2 = a \sin \alpha \cos \omega t$$

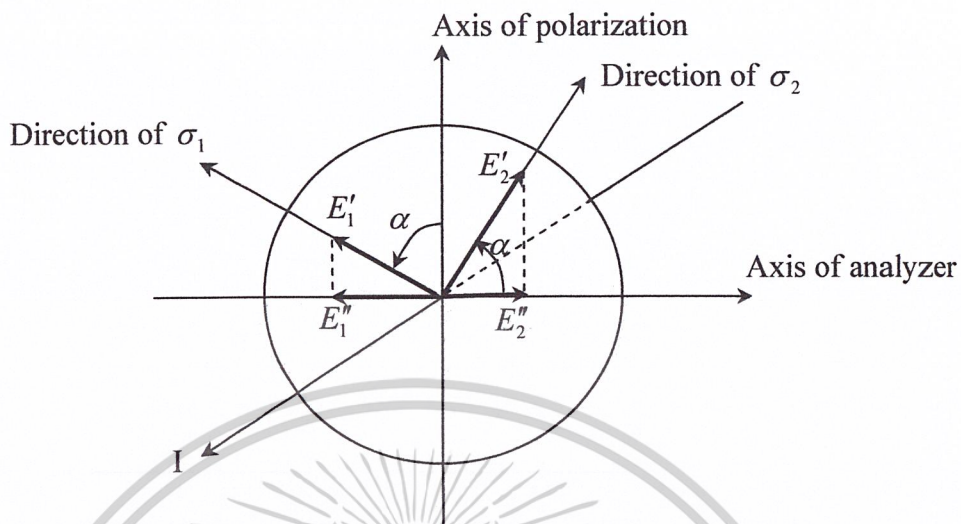
เมื่อแสงเดินทางผ่านแบบจำลองที่มีความเค้นทำให้เฟสในแต่ละแกนความเค้นเปลี่ยนไป และมีสนามไฟฟ้าในแต่ละแกนแสดงดังสมการ

$$E'_1 = a \cos \alpha \cos(\omega t - \Delta_1) \tag{2.25}$$

$$E'_2 = a \sin \alpha \cos(\omega t - \Delta_2)$$

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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 Load cell

2.4.1 Wheatstone Bridge

วงจรบริดจ์ที่ใช้งานกันมากคือวงจรวีธสโตนบริดจ์แบบกระแสตรงดังที่แสดงในรูปด้านล่าง ในวงจรจะมีแหล่งจ่ายแรงเคลื่อนกระแสตรงคร่อมตัวต้านทานในวงจรเพื่อให้กระแสไหลผ่านตัวต้านทาน เราจึงสามารถจะตรวจจับความสมดุล (null detector) ได้โดยการตรวจจับแรงเคลื่อน (voltage detector) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าที่จุด a และ b นั้นเองในระบบสมัยใหม่ตัวตรวจจับจะมีค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตที่สูงมาก



รูปที่ 2.14 วงจร Wheatstone Bridge

ความต่างศักย์ไฟฟ้า ΔV ระหว่าง a และ b จะมีค่าเป็น

$$\Delta V = V_a - V_b \quad (2.29)$$

เมื่อ $V_a =$ ศักย์ไฟฟ้าที่จุด a เมื่อเทียบกับ c

$V_b =$ ศักย์ไฟฟ้าที่จุด b เมื่อเทียบกับ c

ค่าของ V_a และ V_b สามารถหาได้โดยหลักการแบ่งแรงดันไฟฟ้า

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

ในลักษณะเดียวกันนี้ V_b ก็จะถูกแบ่งแรงเคลื่อนออกเป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ E เป็นแหล่งจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ในขณะนี้ 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

วงจรดังกล่าวดัดแปลงมาจากวงจรด้านบน โดยแก้ปัญหามีอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตของที่มีค่าต่ำมาก ๆ จึงต่อวงจรตามแรงเคลื่อนเข้าที่อินพุตทั้งสองเพื่อจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตมีค่าสูงขึ้นผลดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่าตัวขยายในงานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม (Instrumentation Amplifier), (IA)

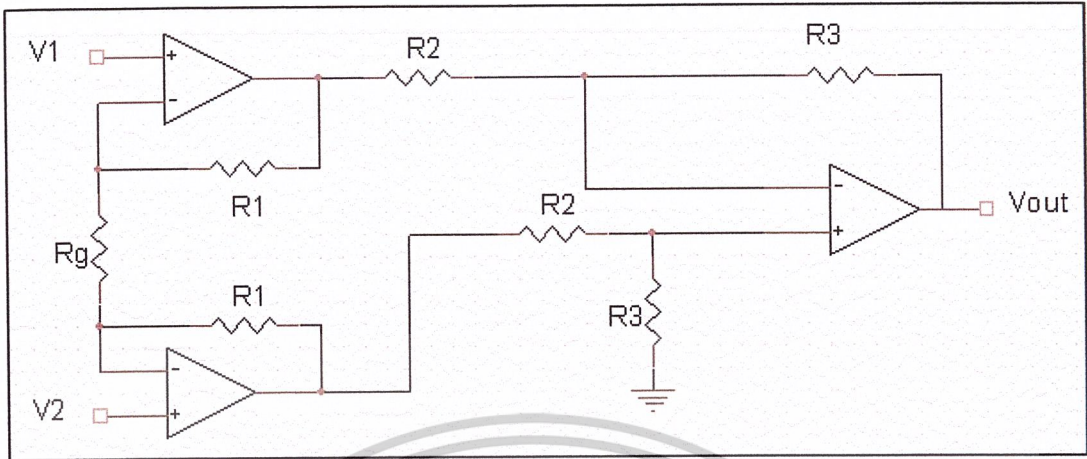
แต่เมื่อต่อวงจรดังกล่าวไว้ ก็ยังคงยากต่อการเปลี่ยนอัตราขยายซึ่งต้องปรับตัวต้านทานถึงสองตัว จึงพัฒนามาใช้วงจรด้านล่าง ซึ่งเป็นวงจรรขยายทางเครื่องมือวัดที่ใช้กันกันอย่างแพร่หลาย อาจเรียกววงจรแบบดังกล่าวว่า วงจรรขยายแบบออปแอมป์ 3 ตัว (three op-amps)

ข้อสังเกตจากวงจรรขยายแบบออปแอมป์สามตัวคือ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 วงจร Instrument Amplifier

ไอซีบางตัวที่ผลิตขึ้นจะกำหนดอัตราขยายคงที่ แต่ผู้ใช้ก็สามารถเลือกค่า R_g จากภายนอก มาต่อเพื่อเลือกอัตราขยายได้ จึงมั่นใจว่าจะได้ CMR ที่สูงๆ ตัวอย่างของไอซีแบบนี้ได้แก่เบอร์ AD524 เป็นต้น

วงจรออปแอมป์ดังกล่าวมักใช้แพร่หลายในการวัดตัวแปรในกระบวนการ ดังอย่างเช่นใช้ขยายสัญญาณที่ออกจากสเตรนเกจซึ่งต่อกับวงจรวัดอีกทีหนึ่ง

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 ทำการติดตั้ง Plane Polariscopes

อุปกรณ์การทดลอง

1. He-Ne Laser	1	เครื่อง
2. แผ่น Polarizer	1	แผ่น
3. แผ่น Analyzer	1	แผ่น
4. Photodetector	1	ตัว
5. Voltmeter	1	เครื่อง

วิธีการทดลอง

1. ทำการจัดอุปกรณ์ดังรูป

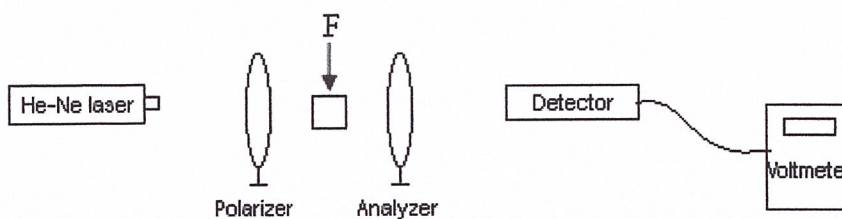


รูปที่ 3.1 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลอง Plane Polariscopes

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการโพลาไรซ์ของวัสดุ



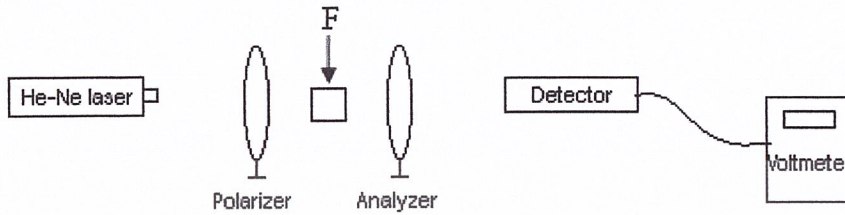
รูปที่ 3.2 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลองเมื่อมีแรงกดมากระทำกับแบบจำลอง
อุปกรณ์การทดลอง

- | | | |
|-------------------|---|---------|
| 1. He-Ne Laser | 1 | เครื่อง |
| 2. แผ่น Polarizer | 1 | แผ่น |
| 3. แผ่น Analyzer | 1 | แผ่น |
| 4. Photodetector | 1 | ตัว |
| 5. Voltmeter | 1 | เครื่อง |
| 6. แท่งอะคริลิก | 1 | แท่ง |
| 7. ชุดกำเนิดแรง | 1 | เครื่อง |
| 8. Load Cell | 1 | ตัว |

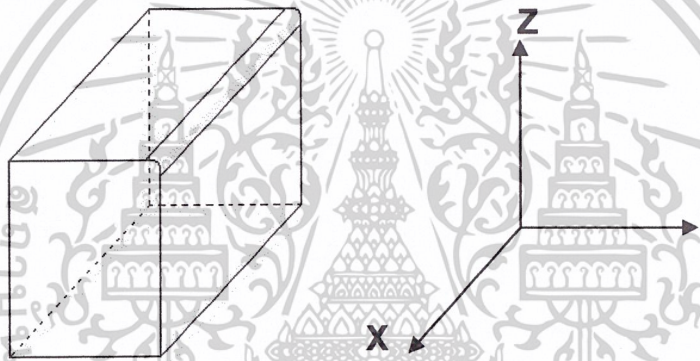
วิธีการทดลอง

1. ทำการจัด Plane Polariscope
2. วางชุดกำเนิดแรงที่มีแท่งอะคริลิกอยู่ข้างในระหว่าง Polariscope
3. ทำการฉายแสงเลเซอร์ให้ตกกระทบบนตัว Photodetector โดยให้แสงเลเซอร์เดินทางผ่าน Plane polariscope และแท่งอะคริลิก โดยที่ยังไม่มีแรงกด สังเกตค่าความเข้มแสงและบันทึกผล

3.3 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการโพลาไรซ์ของวัสดุ เมื่อทิศทางของแรงเปลี่ยนแปลง และการวางตัวของแบบจำลอง

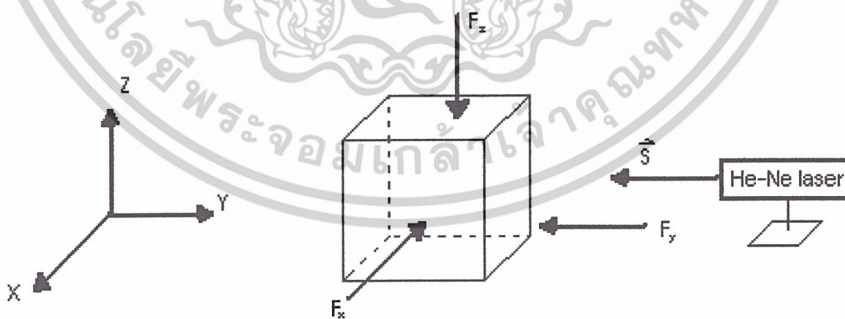


รูปที่ 3.3 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลองเมื่อมีแรงกดมากกระทำกับแบบจำลอง



รูปที่ 3.4 แบบจำลอง

จากรูป จะพบว่ามีการวางตัวของแบบจำลองสามารถวางตัวได้หลายแบบ



รูปที่ 3.5 แสดงทิศของแนวแรงที่กระทำกับแบบจำลองจากทิศต่างๆ

จากรูป จะพบว่ามีแนวแรงทั้งหมดที่กระทำกับแบบจำลอง 3 แนว คือ

F_z คือ แนวแรงที่กระทำกับแบบจำลองจากด้านบน

F_x คือ แนวแรงที่กระทำกับแบบจำลองจากด้านข้าง

F_y คือ แนวแรงที่กระทำกับแบบจำลองจากด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์การทดลอง

1. He-Ne Laser	1	เครื่อง
2. แผ่น Polarizer	1	แผ่น
3. แผ่น Analyzer	1	แผ่น
4. Photodetector	1	ตัว
5. Voltmeter	1	เครื่อง
6. แท่งอะคริลิก	1	แท่ง
7. ชุดกำเนิดแรง	1	เครื่อง
8. Load Cell	1	ตัว

วิธีการทดลอง

1. ทำการปรับ Plane Polariscopes
2. วางชุดกำเนิดแรงที่มีแท่งอะคริลิกอยู่ข้างในระหว่าง Polariscopes
3. ทำการฉายแสงเลเซอร์ให้ตกกระทบบนตัว 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 เพิ่มแรงกดกระทำต่อแบบจำลอง
6. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1 ถึงข้อ 2 แต่การวางตัวของแบบจำลองดังนี้
 - 6.1 จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Z ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน X ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน
 - 6.2 จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน X ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Y ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน
 - 6.3 จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Z ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Y ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน X ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Z ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

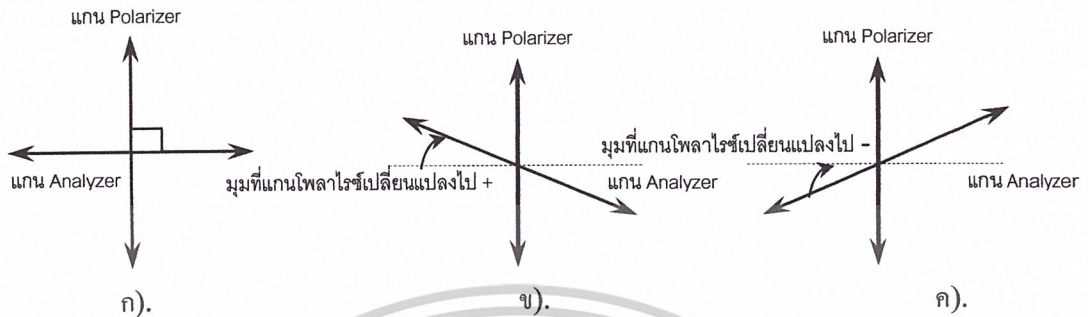
6.5 จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Y ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Z ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

7. สรุปผลการทดลอง

3.4 ศึกษาการสอบเทียบแรงกระทำต่อแบบจำลอง

1. เลือกผลการทดลองที่มีกราฟเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นอย่างเหมาะสม จากการทดลองที่ 3.3 แล้วจัดการวางตัวแบบจำลองตามผลการทดลอง
2. ทำการจัด Plane Polariscopes
3. วางชุดกำเนิดแรงที่มีแท่งอะคริลิกอยู่ข้างในระหว่าง Polariscopes
4. ทำการฉายแสงเลเซอร์ให้ตกกระทบบนตัว 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 แสดงมุมของแกนโพลาไรเซชันที่กระทำกับแกนของอนาไลเซอร์

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

อุปกรณ์การทดลอง

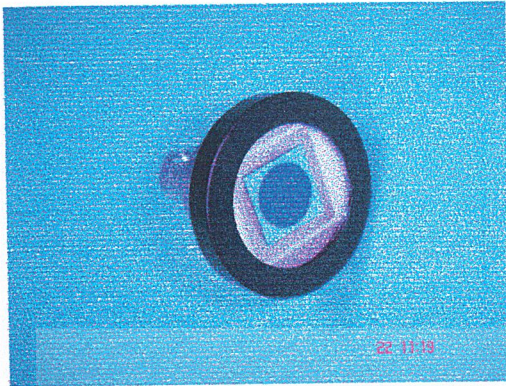
1. He-Ne Laser	1	เครื่อง
2. แผ่น Polarizer	1	แผ่น
3. แผ่น Analyzer	1	แผ่น
4. Photodetector	1	ตัว
5. Voltmeter	1	เครื่อง
6. แท่งอะคริลิก	1	แท่ง
7. ชุดกำเนิดแรง	1	เครื่อง
8. Load Cell	1	ตัว

วิธีการทดลอง

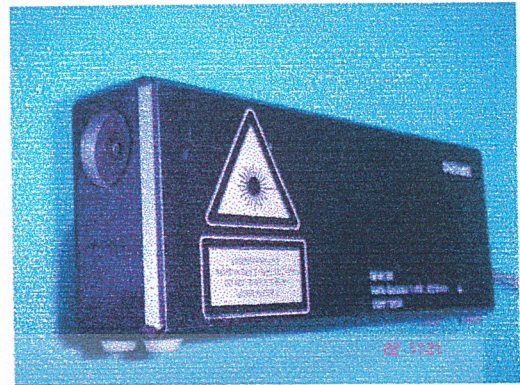
จากการทดลองในหัวข้อ 3.2 และ 3.3 เป็นการจัดให้แกนของโพลาไรซ์เซชันตั้งฉากกับแกนของอนาไลเซอร์ (มุมของแกนโพลาไรซ์ที่เปลี่ยนแปลง) ดังนั้นในหัวข้อนี้เราจะทำการทดลองเหมือนกับหัวข้อ 3.2 และ 3.3 คือ

1. ทำการทดลองเหมือนหัวข้อ 3.2 บิดมุมของแกนอนาไลเซอร์ที่ให้ความเข้มแสงน้อยที่สุด มุมที่ให้ความเข้มแสงน้อยที่สุดคือมุมมุมของแกนโพลาไรซ์ที่เปลี่ยนแปลง และบันทึกผล
2. สรุปผลการทดลอง

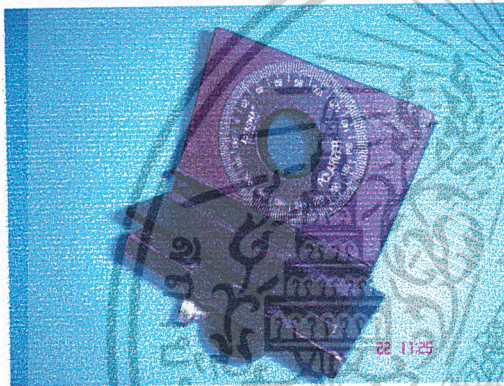
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 Photodetector แบบ silicon



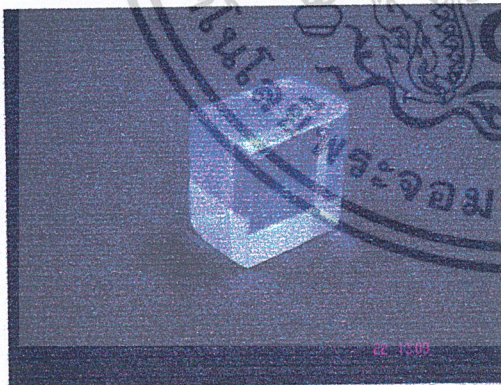
รูปที่ 3.8 He-Ne laser



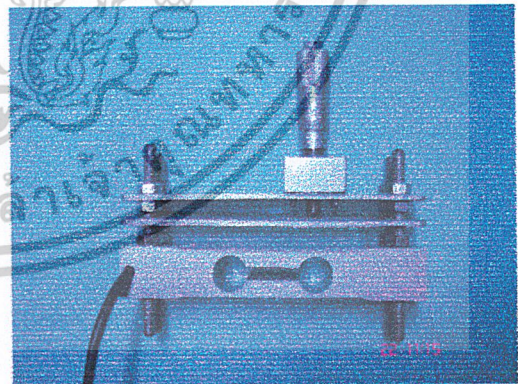
รูปที่ 3.9 แผ่น analyzer



รูปที่ 3.10 แผ่น polarizer

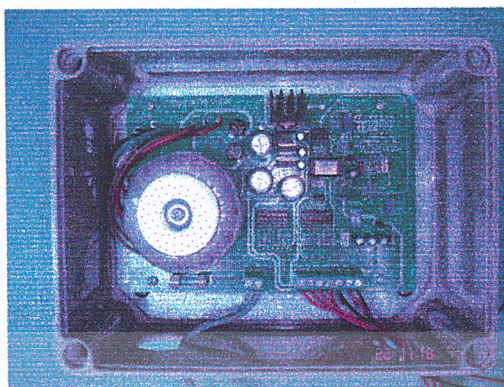


รูปที่ 3.11 แท่งอะคริลิก

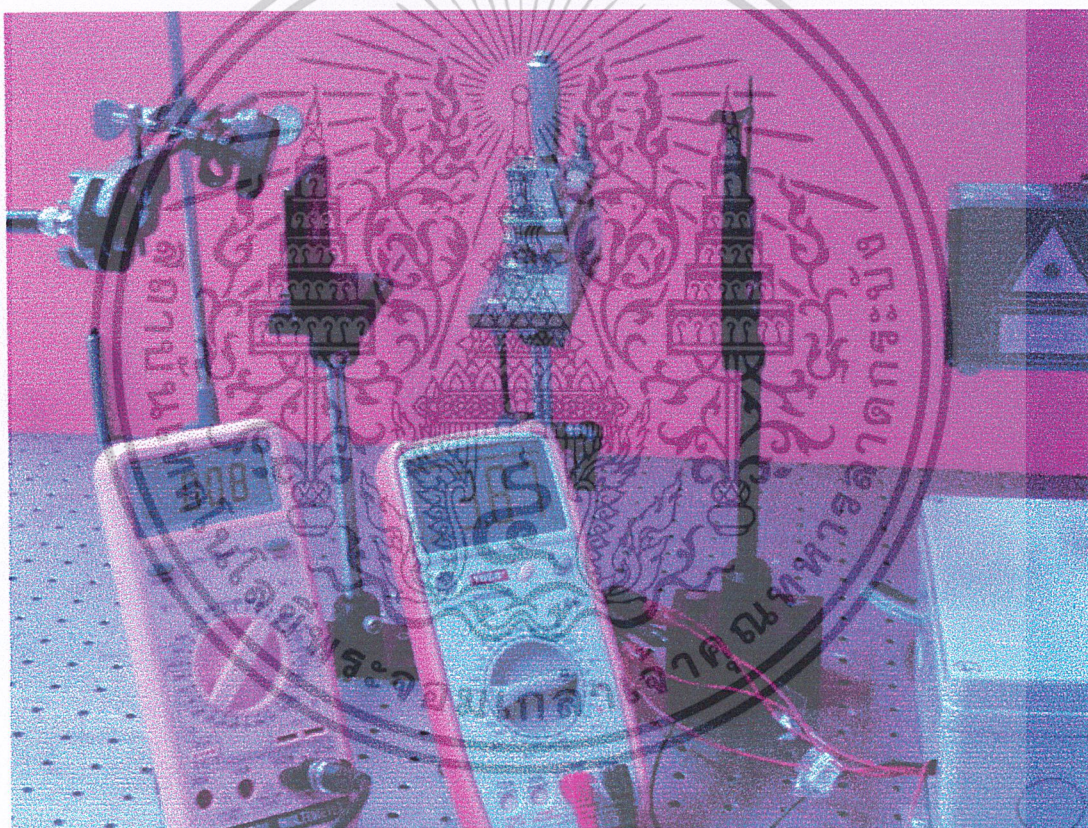


รูปที่ 3.12 ชุดกำเนิดแรงและ load cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 load cell transmitter



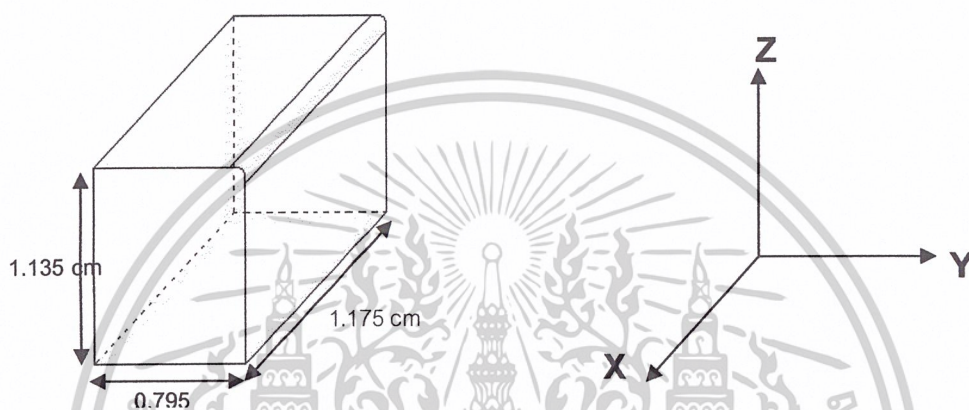
รูปที่ 3.14 แสดงการศึกษาผลของแรงกดต่อสมภาวะโพลาร์ไรเซชันของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

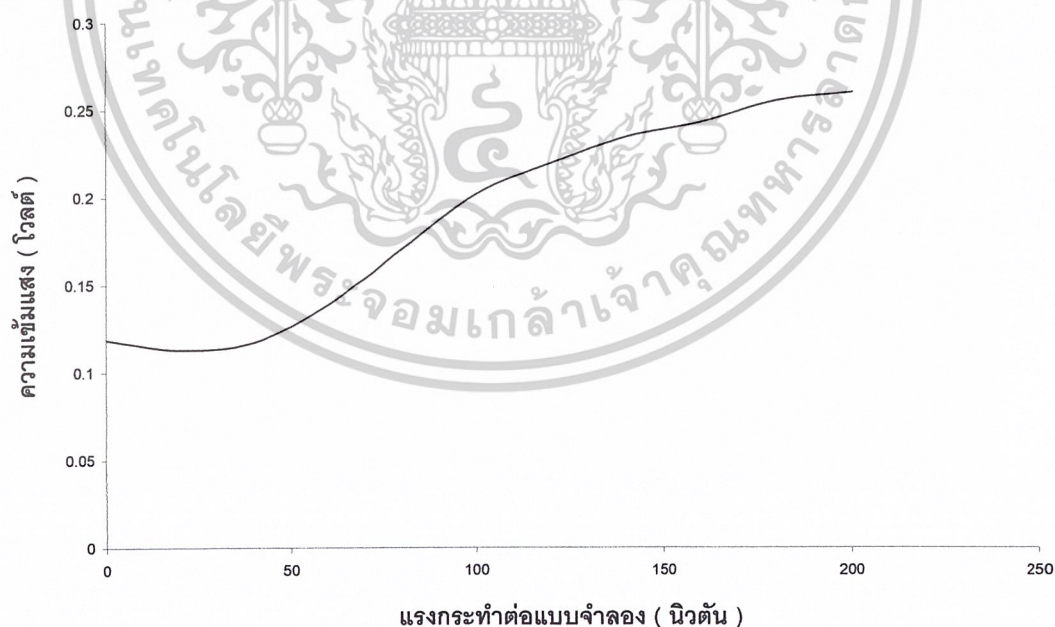
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการโพลาไรซ์ของแบบจำลอง



รูปที่ 4.1 แท่งอะคริลิค

*หมายเหตุ ความเข้มแสงวัดในรูปของความต่างศักย์จาก Photodetector



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง มีการ

เปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น

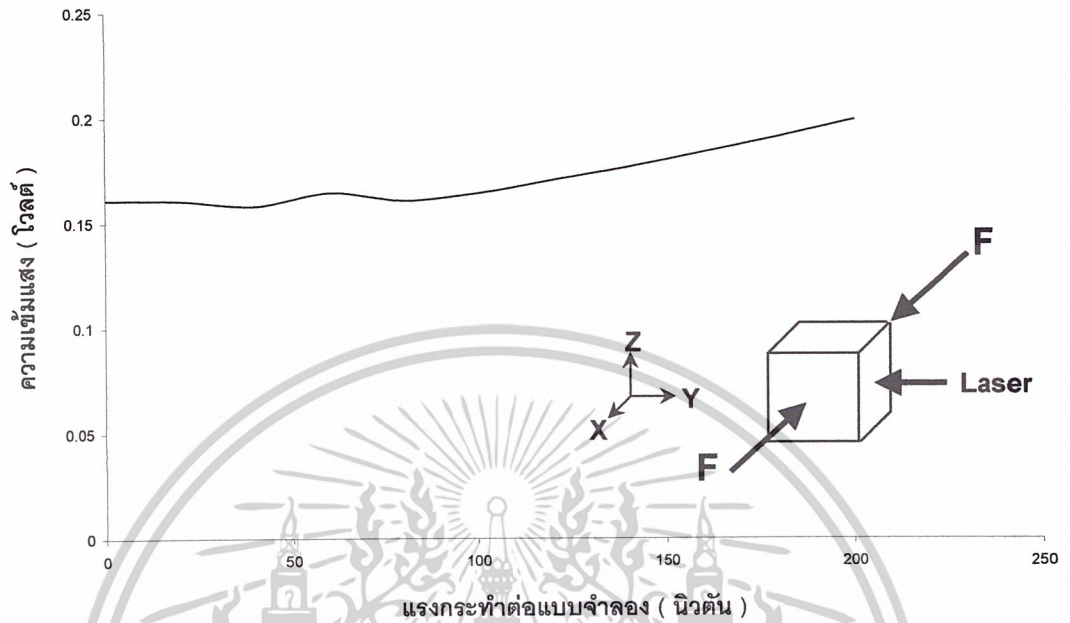
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อการโพลาริซ์ของวัสดุเมื่อทิศทางของแรงเปลี่ยนแปลง และการวางตัวของแบบจำลอง

ตารางที่ 4.2.1 ผลการทดลองที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



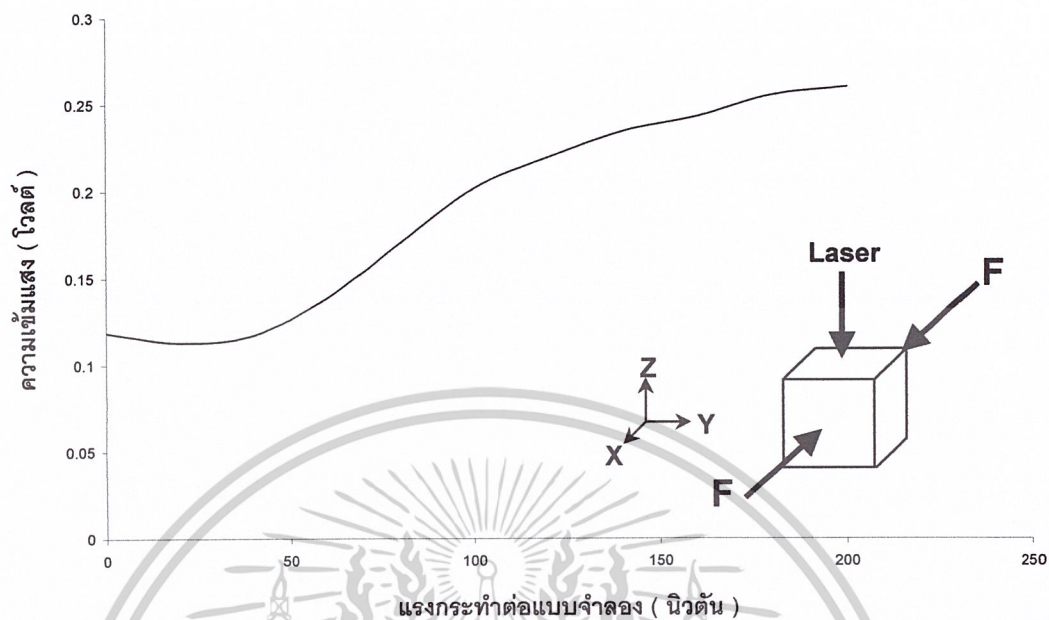
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Y ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน X ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



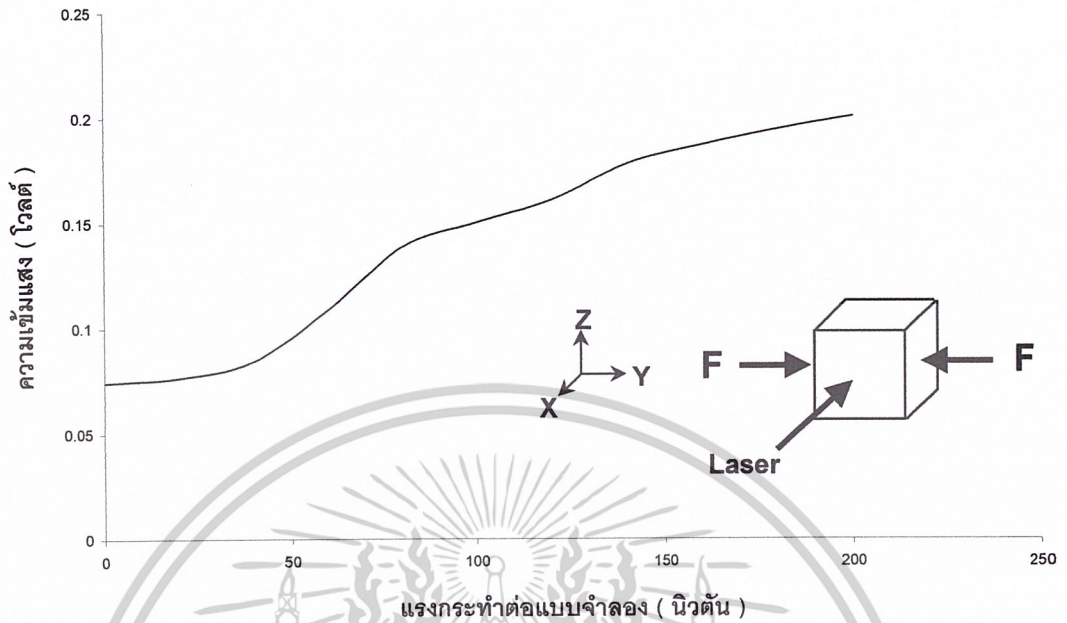
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Z ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน X ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



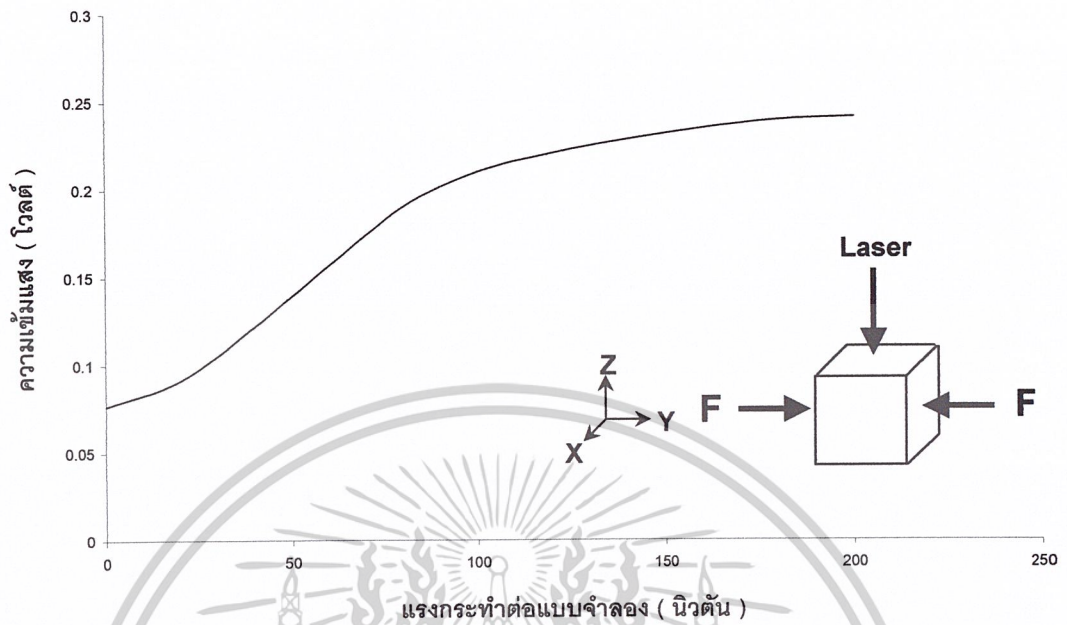
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน X ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Y ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Z ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Y ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

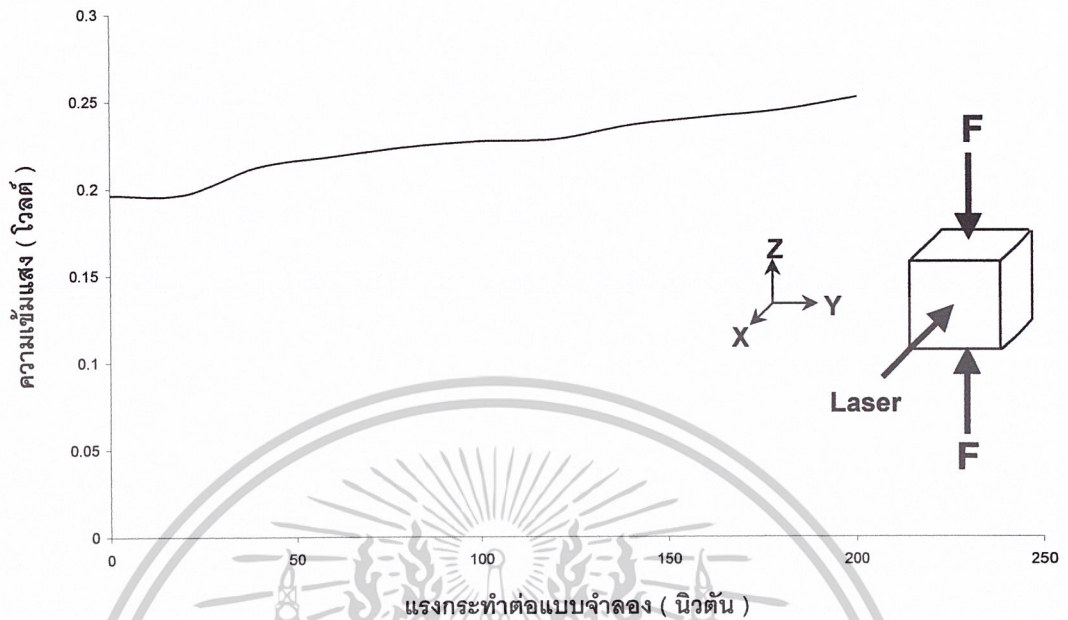
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง ช่วงแรกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วแบบเชิงเส้น ในช่วงน้ำหนัก 20 นิวตัน ถึง 100 นิวตัน และเริ่มคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



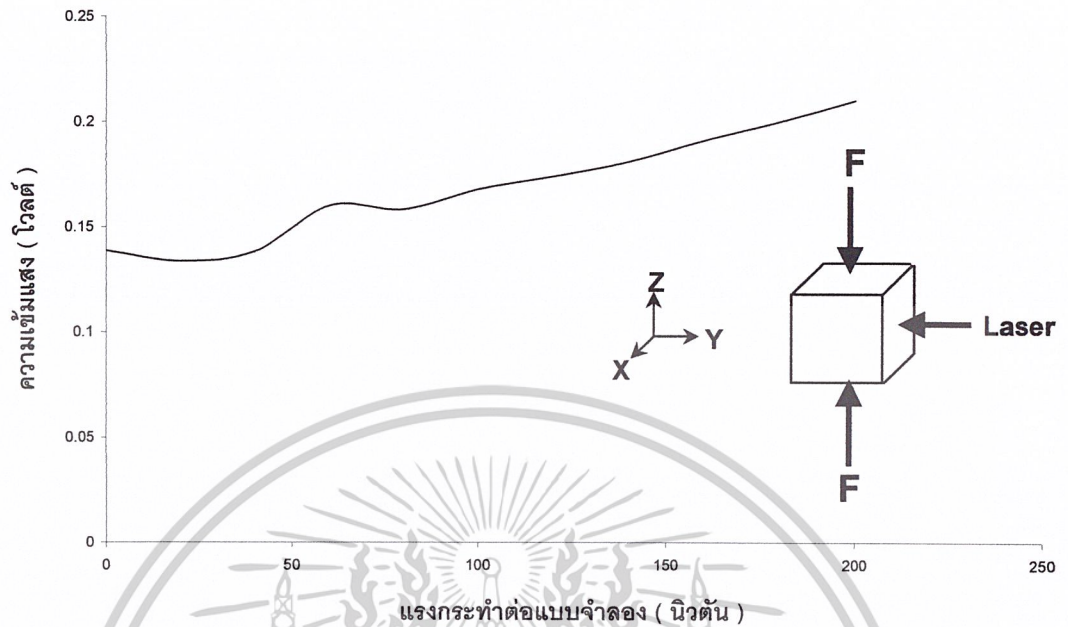
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน X ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Z ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงที่จัดการการวางตัวแบบจำลองโดยฉายเลเซอร์ผ่านแนวแกน Y ของแบบจำลอง ออกแรงกดแนวแกน Z ของแบบจำลองและออกแรงกดจากด้านบน

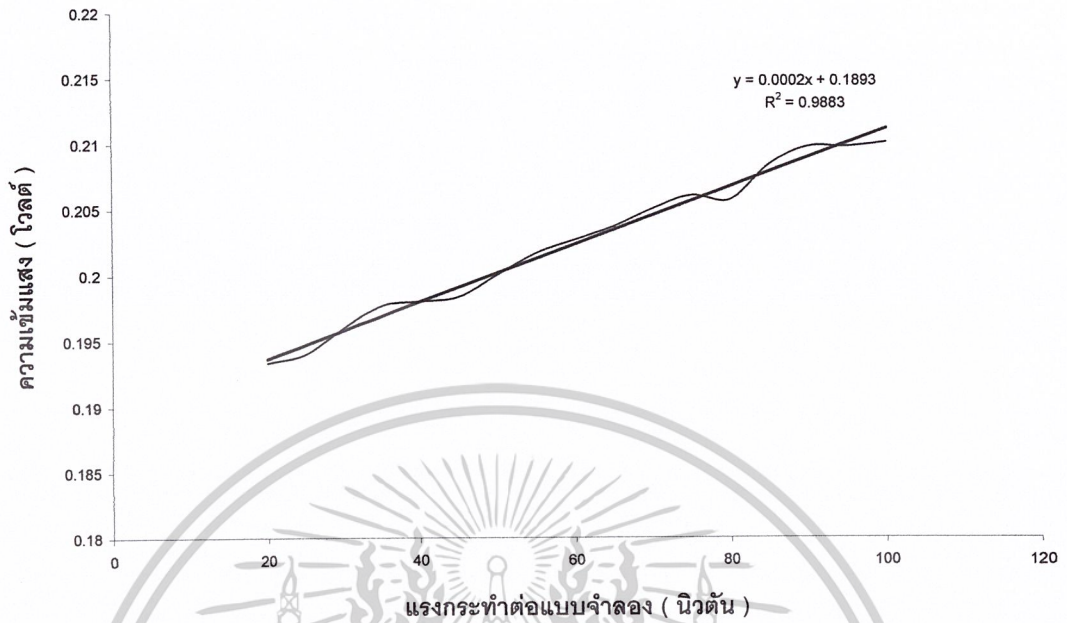
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น ในช่วงน้ำหนัก 20 นิวตัน ถึง 200 นิวตัน

4.3 ศึกษาการสอบเทียบแรงกระทำต่อแบบจำลอง

ตารางที่ 4.3.1 ผลการสอบเทียบแรงกระทำต่อแบบจำลองโดยเพิ่มแรงครั้งละ 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเพิ่มแสงโดยเพิ่มแรงกระทำต่อแบบจำลองครั้งละ 5 นิวตัน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเพิ่มแสง โดยเพิ่มแรงกระทำต่อแบบจำลองครั้งละ 5 นิวตัน กราฟมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นในช่วงน้ำหนัก 20 นิวตัน ถึง 200 นิวตัน

ตารางที่ 4.3.2 ผลการสอบเทียบแรงกระทำต่อแบบจำลองโดยเพิ่มแรงครั้งละ 2 นิวตัน

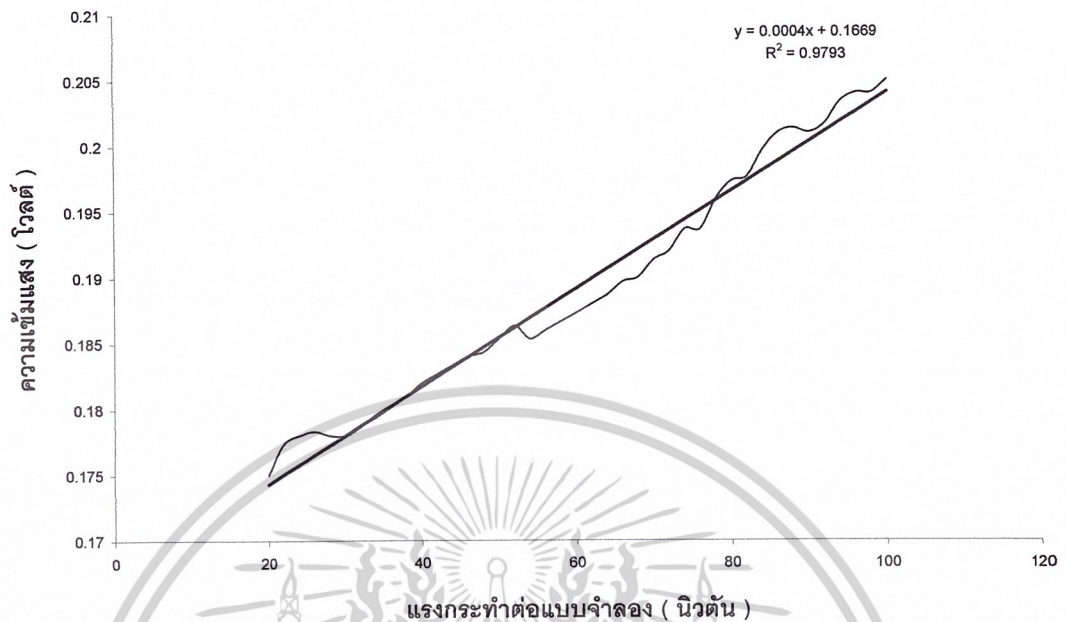
แรงกระทำ	ความเข้มแสง			เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
22	0.187	0.172	0.173	0.177
24	0.188	0.172	0.174	0.178
26	0.188	0.173	0.174	0.178
28	0.188	0.173	0.173	0.178
30	0.188	0.173	0.173	0.178
32	0.189	0.174	0.173	0.179
34	0.190	0.175	0.174	0.180
36	0.191	0.175	0.175	0.180
38	0.192	0.176	0.175	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง โดยเพิ่มแรงกระทำต่อแบบจำลองครั้งละ 2 นวัตน์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสง โดยเพิ่มแรงกระทำต่อแบบจำลองครั้งละ 2 นวัตน์ กราฟมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นในช่วงน้ำหนัก 20 นวัตน์ ถึง 200 นวัตน์

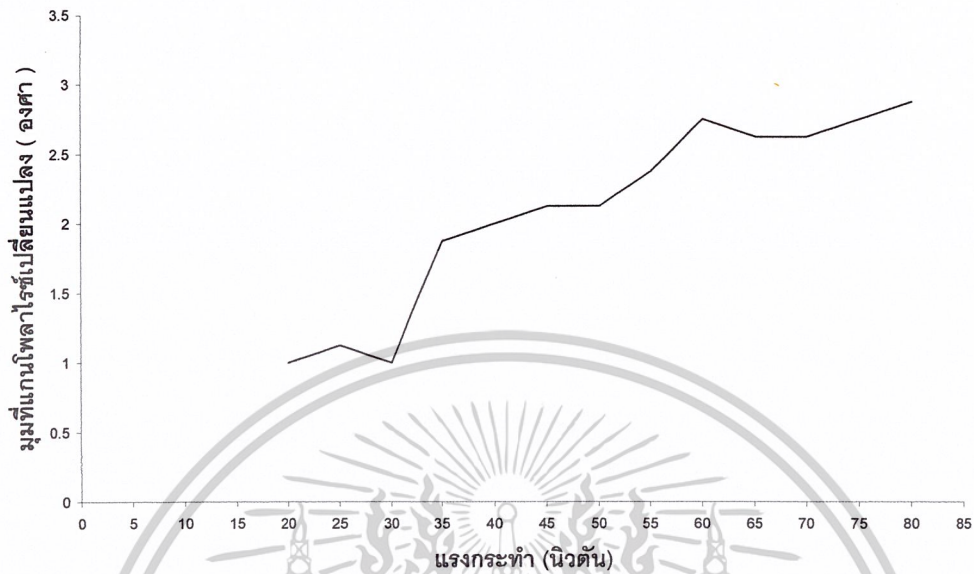
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ศึกษาผลของแรงกดที่มีผลต่อสภาวะโพลาไรเซชันของวัสดุ

ตารางที่ 4.4.1 ผลการทดลองผลของแรงกดที่มีผลต่อสภาวะโพลาไรเซชันของวัสดุ

แรงกระทำ (N)	ค่าเฉลี่ย ความเข้มแสงน้อยที่สุด (V)	ค่าเฉลี่ย มุมของแกนโพลาไรซ์ที่ เปลี่ยนแปลง (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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการทดลองผลของแรงกดที่มีผลต่อสภาวะโพลาร์ไรเซชันของวัสดุ

จากกราฟ เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นมุมของแกนโพลาร์มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นและมีค่าสูงสุดเฉลี่ย 2.9 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเมื่อทำการออกแรงกระทำต่อแบบจำลอง โดยชุดกำเนิดแรงที่สร้างขึ้นพบว่า ค่าความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นและเนื่องจากแท่งอะคริลิกที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดของด้านทั้งสามไม่เท่ากัน ทำให้การตอบสนองต่อแรงกระทำในแต่ละแนวแกนมีค่าไม่เท่ากัน จากการศึกษาพบว่าแรงกระทำต่อแบบจำลองในแนวแกนที่มีความยาวสั้นที่สุดจะมีการตอบสนองต่อแรงกคดีที่สุด เนื่องจากความเค้นในแนวแกนมีค่ามากที่สุด

เมื่อออกแรงกดในแนวแกนที่ตอบสนองดีที่สุดจากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นไม่เป็นแบบเชิงเส้นแต่จะมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นในบางช่วงของแรงกระทำและเมื่อนำช่วงของแรงกระทำที่ให้ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นมาศึกษาหาความละเอียดของแรงกระทำที่มีผลต่อแบบจำลองพบว่า แรงกระทำ 5 นิวตัน มีความละเอียดที่สุดในช่วงแรงกระทำ 20 นิวตัน ถึง 100 นิวตัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

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

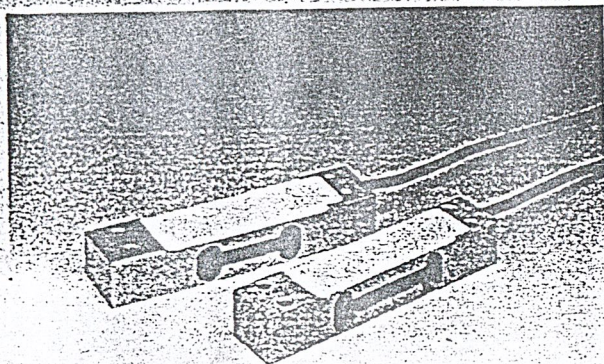
D. Clarke and J.F. Grainger. 1971. **Polarized Light and Optical Measurement**. Pergamon
Press Ltd.: University of Manchester Institute of Science and Technology



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

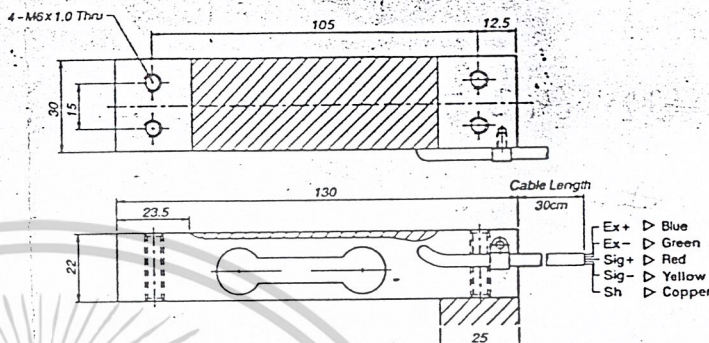


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DIMENSIONS

unit:mm



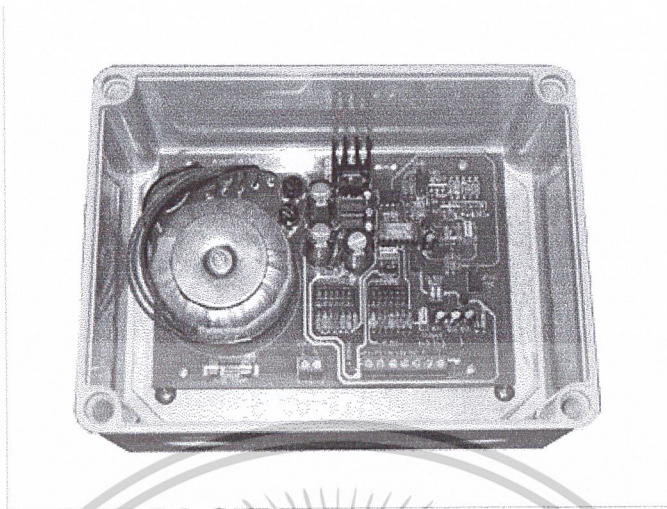
FEATURES

- Low Cost
- Off Center Compensated
- Material : Aluminum
- Mounting : Socket-head cap screw M6 x 1.0
- Cable : Braided Shield 4-wire round cable with PVC-Jacket

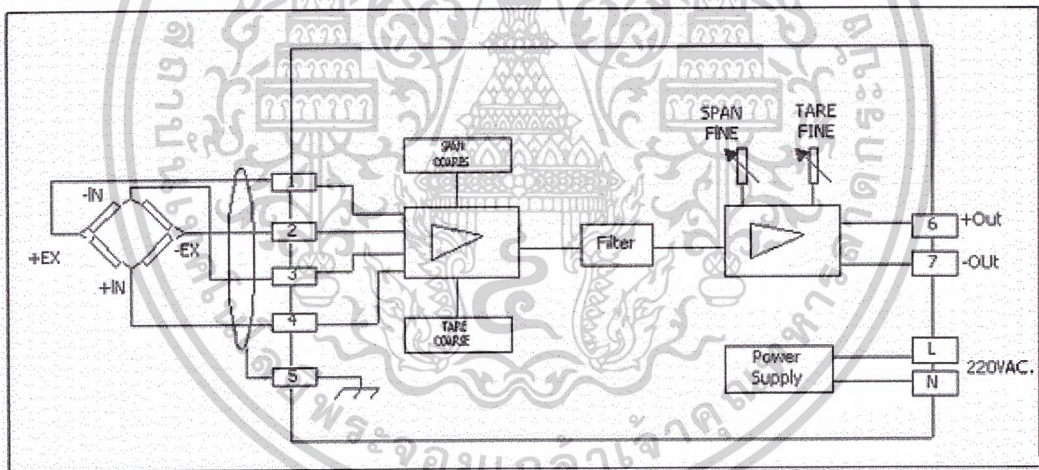
SPECIFICATIONS

Capacity	Kg	5, 8, 20, 35, 50
Sensitivity	mV/V	2.0 ± 0.1
NON-Linearity	%F.S	0.02
Repeatability	%F.S	0.01
Hysteresis	%F.S	0.02
Creep (30min)	%F.S	0.02
Recommended Voltage	V	10
Maximum Voltage	V	15
Zero Balance	%F.S	1
Input Resistance	Ω (ohms)	406 ± 10
Output Resistance	Ω (ohms)	350 ± 3
Insulation Resistance (DC 50V)	Ω (ohms)	5000M
Compensated Temperature Range	°C	-10 ~ +50
Operating Temperature Range	°C	-30 ~ +80
Zero Temperature Coefficient	%F.S/10°C	0.02
Sensitivity Temperature Coefficient	%F.S/10°C	0.02
Safe Overload	%F.S	150
Limit Overload	%F.S	200

Specifications are subject to change for improvement without prior notice.



WT 95 Weight Transmitter is designed for industrial applications, where a simple electronic weighing systems is required and where analog signals are needed to control the level of contents in tanks and hoppers. WT 95 is equally suited for use in hinged systems with only a single strain gauge load cell, as well as for systems with a number of load cells or weighing points. The voltage/current output signal can be used with analog or digital indicators, chart recorders, PLC and computers.



Specifications

Input : Load cell or Strain Gauge with sensitivity 0.4 - 3 mv/v

Exciting voltage : 12 VDC

Output : 4-20 mA, 0-10V, 1-5V.

Linearity : < 0.1% of span

Span coarse : adjustable 0.4 to 3 mv/v by means of 6 DIP switches

Span fine : adjustable + 5% by means of multiturn potentiometer

Tare coarse : Selectable positive or negative, 0-500 % by means of 6 DIP switches

Tare fine : adjustable + 5% by means of multiturn potentiometer

Filter : Selectable rise time 0.6 sec., 1.2 sec., 2sec.

Power supply : 110 VAC., 220 VAC

Ambient temperature : 0 - 50 C

Mounting : Wall mount

Protection : IP 65

Dimension : W 200 x H150 x D 80mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้