

การพัฒนาเทคนิคเชิงแสงสำหรับการตรวจวัดความไม่ตรงศูนย์ของเลนส์

สายตา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

**DEVELOPMENT FOR MEASUREMENT OF
CENTERING ERROR OF
OPHTHALMIC LENS**



Saharat Kaeoaram

A Thesis Submitted In Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in

Electronics and Photonics Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การพัฒนาเทคนิคเชิงแสงสำหรับการตรวจวัดความไม่ตรงศูนย์ของเลนส์สายตา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.ชนเสฏฐ์ ทศศิกรพัฒน์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.บุญส่ง สุตะพันธ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.พนมศักดิ์ มีมนต์)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สหรัฐ แก้วอร่าม : การพัฒนาเทคนิคเชิงแสงสำหรับการตรวจวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของ
เลนส์สายตา (DEVELOPMENT FOR MEASUREMENT OF CENTERING ERROR
OF OPHTHALMIC LENSES) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญส่ง สุตะพันธ์,
55 หน้า

การผลิตเลนส์สายตาตรวจพบว่า เลนส์บางรุ่นที่ผลิตมีค่า Prism diopter ที่สูงกว่าค่าที่
ยอมรับได้ เลนส์รุ่นที่เป็นปัญหาที่มีค่า Prism diopter สูงเป็นเลนส์ที่ผลิตจากแผ่นแก้ว (Glass molds)
2 แผ่นที่ประกอบ โดยใช้เทปพลาสติกพันรอบขอบ ซึ่งบริษัทฯ คาดว่าน่าจะเกิดจากแผ่นแก้วแม่แบบ
อาจมีการเลื่อนตำแหน่งไปจากที่กำหนดไว้ ทำให้เลนส์ที่ผลิตได้มีค่าปริซึมสูง จึงใช้เทคนิคเชิงแสง
ที่นิยมอย่างแพร่หลายสำหรับวัดเลนส์ นำมาใช้ในการวัดค่าความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์ ความไม่
ตรงศูนย์กลางของเลนส์เกิดจากจุดยอดของผิวโค้งแต่ละผิวไม่ตรงกันหรือไม่ตรงกับแกนอ้างอิง หรือผิว
โค้งมีมุมเอียงกับแกนอ้างอิง โดยวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของแต่ละผิวเลนส์ ซึ่งได้สร้างชุดทดลองตาม
ทฤษฎีของการวัดแบบสะท้อนกลับของแสง ทดลองใช้กับเลนส์ตัวอย่างเป็นเลนส์ที่ผลิตจากบริษัทฯ
จำแนกตามค่า Optical power ของเลนส์ตั้งแต่ 2.00 – 5.50 เมื่อค่าปริซึมมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 0.3
Diopters ค่าความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์ในแต่ละ Optical power มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จากผล
การทดลองเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อค่าปริซึมสูงขึ้น ค่าความไม่ตรงศูนย์กลางจะเพิ่มขึ้น ในงานนี้ใช้
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำลองการวัดความไม่ตรงศูนย์กลางและการวัดค่าปริซึม เพื่อตรวจสอบผลการ
ทดลอง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการจำลองด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตามเลนส์
ตัวอย่างที่มีค่าปริซึมสูงในแต่ละ Optical power ที่ได้รับจากบริษัทยังมีจำนวนน้อยเกินไป ซึ่งใน
อนาคตจะเพิ่มตัวอย่างในการทดลอง เพื่อให้ผลการทดลองจะน่าเชื่อถือกว่านี้ เครื่องมือต้นแบบที่
สร้างขึ้นสำหรับการวัดความไม่ตรงศูนย์กลางในโครงการวิจัยนี้จะมีประโยชน์ในการศึกษาและวิเคราะห์
สาเหตุค่าปริซึมที่สูงในเลนส์บางรุ่นได้

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา ธนวิ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา บุญส่ง สุตะพันธ์

SAHARAT KAEOARAM : DEVELOPMENT FOR MEASUREMENT OF
CENTERRING ERROR OF OPHTHALMIC LENSES. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. BOONSONG SUTAPUN, Ph.D., 55 PP.

CENTERING ERROR/OPHTHALMIC LENSES

Plastic lenses are manufacturing using a casting method in which a mixture of monomers and special additives is injected into the glass molds and subsequently put in the oven to harden the material. One of the problems for lens manufacturing for certain lens models, the prism diopter is out of the preset tolerance even if all other parameters are within the specified tolerance. The setup is based on an autocollimator using a reflection mode. Prismatic power of an ophthalmic lens is defined as a deviation of a ray of light through a specified point on a lens. The prism diopter measured by a lensmeter and the centering error of casted lenses measured by the setup appear related, at least for high-value prism diopters. However, for accurate conclusion more data for each lens power covering the whole range of prism diopters are required.

School of Electronic Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญส่ง สุตะพันธ์ อาจารย์ประจำสาขา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ โอกาสทางการศึกษา ซึ่งให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจ และแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่อ อุตสาหกรรม (พวอ.) ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย สำหรับซื้อวัสดุอุปกรณ์เพื่อทำงานวิจัยจนเสร็จสิ้น และ ได้สนับสนุนทุนใช้จ่ายส่วนตัวในช่วงเวลาการทำวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยออปติคอลลจิสติกส์ จำกัด สำหรับการอนุเคราะห์พื้นที่ส่วนหนึ่งให้ทำ วิจัยชั่วคราว และอุปกรณ์ที่ใช้ทำวิจัยเท่าที่จะสามารถจัดเตรียมให้ได้อย่างเต็มที่

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษา ระดับ บัณฑิตศึกษา เพื่อเสริมสร้างความแข็งแกร่งทางวิชาการ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ดำเนินงานเรื่อง ทุนการศึกษา และห้องสำหรับทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณรัฐศาสตร์ อัมฤทธิ และคุณอาโมทย์ สมบูรณ์แก้ว สำหรับความรู้และ คำแนะนำพื้นฐานทางด้านทักษะการใช้งานซอฟต์แวร์ที่ใช้ในงานวิจัย และการจัดอุปกรณ์ทางแสง เบื้องต้น

ขอขอบคุณ คุณสร้อยญา อินทโชติ เลขาสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้ช่วยเหลือ ประสานงานเอกสารต่างๆ เป็นอย่างดี รวมทั้งเพื่อนๆ พี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกคน ที่ได้ให้กำลังใจมา โดยตลอด

สำหรับ แก้วอร่าม

สารบัญ

หน้า

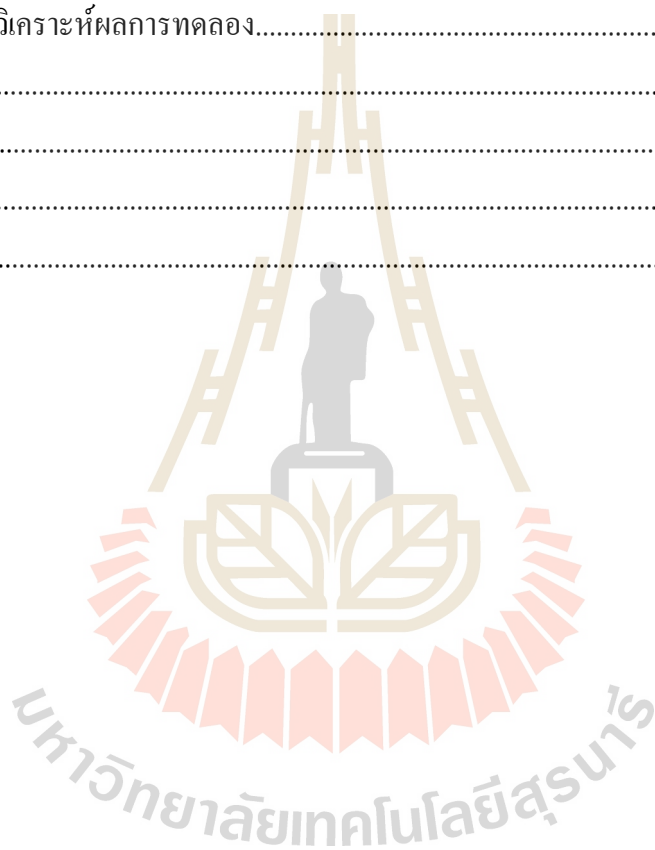
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช

บทที่

1 บทนำ	1
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความไม่ตรงศูนย์ (Centering errors).....	4
2.2 แม่แบบที่ใช้ในการผลิตเลนส์พลาสติก.....	7
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.4 เทคนิคการสะท้อนกลับของแสง (Autocollimator).....	10
2.5 การเกิดภาวะปริซึมของเลนส์แว่นตา (Prism diopter).....	13
2.6 Ray tracing เบื้องต้น.....	14
3 การจำลองการวัดความไม่ตรงศูนย์และค่าปริซึมของเลนส์แว่นตา.....	17
3.1 การจำลองการวัดความไม่ตรงศูนย์ของเลนส์แว่นตาด้วยซอฟต์แวร์ ZEMAX.....	17
3.2 การจำลองการวัดค่า Prism diopter ของเลนส์แว่นตาด้วยซอฟต์แวร์ ZEMAX.....	23
4 การทดลองและผลการทดลอง.....	28
4.1 ชุดทดลองสำหรับวัดความไม่ตรงศูนย์ของเลนส์แว่นตา.....	28
4.2 การประมวลผลภาพ.....	29
4.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	35
4.4 ผลการทดลองจาก ZEMAX.....	37
4.4.1 ผลการทดลองวัดความไม่ตรงศูนย์ของเลนส์.....	37

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.4.2 ผลการวัดค่า Prism diopter ของเลนส์.....	38
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความไม่ตรงศูนย์กลางกับค่า Prism diopter	40
4.6 ผลการทดลองจากชุดทดลองสำหรับวัดความไม่ตรงศูนย์กลาง.....	41
4.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	46
5 สรุป.....	47
รายการอ้างอิง.....	49
ภาคผนวก.....	50
ประวัติผู้เขียน.....	54



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแสง.....18
3.2	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ Beam Splitter.....19
3.3	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ Aperture Stop.....19
3.4	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเลนส์ L_120
3.5	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเลนส์ L_220
3.6	ค่าพารามิเตอร์ผิวแรกของเลนส์วัตถุตัวอย่าง.....21
3.7	ค่าพารามิเตอร์ผิวแรกของเซนเซอร์รับภาพ.....21
3.8	ตำแหน่งจุดโฟกัสที่เซนเซอร์เมื่อวัตถุตัวอย่างอยู่ในแนวแกนแสง (ไม่เอียง).....22
3.9	การจำลองวัตถุตัวอย่าง.....26
3.10	การกำหนดค่ามุมเอียงของผิวแรก.....27
4.1	ค่าพารามิเตอร์ผิวแรกของเลนส์ตัวอย่างที่ใช้ทดลอง.....35
4.2	ผลการทดลองจากชุดทดลองจริงสำหรับวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์ที่มี $PWR = 4.00$42
4.3	ค่าความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์ที่มี $PWR = 4.00$ ที่ชดเชยผิวแรกแล้ว.....43

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	(ก) แผนผังการจัดอุปกรณ์เชิงแสงสำหรับวัดค่าความไม่ตรงศูนย์ (Centering Error) ของแผ่นแก้วแม่แบบสำหรับใช้ผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก และ (ข) เมื่อหมุนเลนส์ตัวอย่างครบ 1 รอบ จุดโฟกัสบนกล้องรับภาพจะเคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยรัศมีของวงกลมจะแปรผันตามความไม่ตรงศูนย์ของแต่ละผิวโค้ง.....5
2.2	ความไม่ตรงศูนย์เมื่อผิวที่สองมีผิวเอียงเป็นมุม σ 6
2.3	(ก) แผ่นแก้วแม่แบบสำหรับใช้ผลิตเลนส์แว่นตา และ (ข) วิธีการผลิตเลนส์..... 7
2.4	การวัด Centering errors โดยใช้ PSM [6]..... 8
2.5	(ก) การจัดอุปกรณ์ และ (ข) การประมวลผลภาพสำหรับหาคำแหน่งกายภาพของเลนส์ [5]..... 9
2.6	(ก) การจัดอุปกรณ์ และ (ข) การวัด Centering errors โดยเทคนิคโพลาไรเซชัน I_c คือ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของ Polarization patterns (สีเขียว) D_c คือ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของเลนส์ (สีแดง) [7]..... 10
2.7	แผนผังการจัดอุปกรณ์การจัดแสงแบบสะท้อนกลับ (Autocollimator)..... 11
2.8	(ก) ตำแหน่งจุดโฟกัสแสงเมื่อผิวของวัตถุเอียงทำมุม α กับแกน y และ (ข) ตำแหน่งจุด โฟกัสแสงเมื่อผิวของวัตถุเอียงทำมุม $-\alpha$ กับแกน y..... 12
2.9	การหักเหของแสงเมื่อผ่านปริซึม [10]..... 13
2.10	การเกิดภาวะปริซึมของเลนส์..... 14
2.11	การหักเหของแสงผ่านผิวเลนส์..... 14
2.12	แสงตกกระทบที่ผิวโค้งมีความเอียง..... 15
3.1	การจัดอุปกรณ์สำหรับการจำลองด้วย ZEMAX เพื่อวัดค่าความไม่ตรงศูนย์ของเลนส์แว่นตา (5) โดยที่ (1) คือแหล่งกำเนิดแสง (2) คือ Beam Splitter (3) เลนส์นูน $f = 100$ mm (4) เลนส์นูน $f = 200$ mm และ (8) คือกล้องรับภาพ..... 17

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.2	<p>เรย์แสงสะท้อนกลับจากการปรับมุมเอียงของวัตถุตัวอย่าง (ก) กรณีผิวแรก เอียง -3° ในแกน X (ข) กรณีผิวแรกเอียง 3° ในแกน X.....</p>	22
3.3	<p>วงกลมที่กล้องรับภาพลือตจากข้อมูล 4 จุด ข้อมูลดังกล่าวได้จากการเอียง ผิวแรกของเลนส์ตัวอย่าง 3° ทั้งนี้ขนาดของรัศมีวงกลมจะสัมพันธ์กับความ ไม่ตรงศูนย์ของผิวแรกของเลนส์ตัวอย่าง.....</p>	23
3.4	<p>(ก) กรณีผิวแรกเอียงทำให้จุดกึ่งกลางของผิวแรก (S1) กับผิวสอง (S2) ไม่ตรงกัน (ข) กรณีผิวสองเอียงทำให้แกนแสงทั้งสองผิวไม่ตรงกัน (ค) กรณีเอียงทั้งสองผิว (ง) กรณีเลนส์ทั้งสองผิวไม่เอียงแต่เลื่อนห่าง จากแกนแสง.....</p>	24
3.5	<p>การจัดอุปกรณ์สำหรับจำลองวัดค่า Prism diopter.....</p>	25
4.1	<p>การจัดอุปกรณ์ทดลองสำหรับวัดค่าความไม่ตรงศูนย์ (ก) แผนภาพการ จัดอุปกรณ์ (ข) อุปกรณ์ทดลองจริง.....</p>	28
4.2	<p>ภาพเรติเคิลจากกล้อง CMOS.....</p>	29
4.3	<p>หน้าต่าง Vision Acquisition สำหรับเลือกกล้องที่ใช้แสดงภาพบน LabVIEW.....</p>	30
4.4	<p>หน้าต่าง Vision Assistant สำหรับคำนวณหาตำแหน่งกึ่งกลางของเรติเคิล.....</p>	31
4.5	<p>การสร้างภาพต้นแบบของ Pattern matching.....</p>	32
4.6	<p>หน้าต่างของซอฟต์แวร์ Thorlabs, APT User.....</p>	32
4.7	<p>หน้าต่างการประมวลผลภาพ.....</p>	33
4.8	<p>เลนส์ตัวอย่างที่ใช้ทดลอง.....</p>	34
4.9	<p>ผลการจำลองวัดความไม่ตรงศูนย์ของเลนส์ที่ค่า PWR = 4.00 กรณีปรับ เฉพาะผิวแรกเอียงจากน้อยไปมาก (วงกลม) และกรณีปรับเฉพาะผิวสอง เอียงจากน้อยไปมาก (สี่เหลี่ยม).....</p>	38
4.10	<p>ผลการจำลองวัด Prism diopter เลนส์ที่ค่า PWR = 4.00 กรณีปรับเฉพาะ ผิวแรกเอียงจาก น้อยไปมาก (วงกลม) กรณีปรับเฉพาะผิวสองเอียง จากน้อยไปมาก (สี่เหลี่ยม) กรณีเอียงทั้ง สองผิว (สามเหลี่ยม) และ กรณีทั้งผิวเลื่อนออกจากแกนแสง (จุดสั้น).....</p>	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไม่ตรงศูนย์และค่า Prism diopter ที่ได้จากการจำลองด้วย ZEMAX ของเลนส์เลนส์ที่ค่า PWR = 4.00 กรณีปรับเฉพาะผิวแรกเอียงจากน้อยไปมาก (วงกลม) กรณีปรับเฉพาะผิวสองเอียงจากน้อยไปมาก (สี่เหลี่ยม) กรณีเอียงทั้งสองผิว (สามเหลี่ยม) และกรณีทั้งผิวเลื่อนออกจากแกนแสง (จิดสั้น)	40
4.12 ผลการทดลองวัดความไม่ตรงศูนย์แสดงความสัมพันธ์กับค่า Prism diopter ของเลนส์รุ่นต่างๆ (ก) เลนส์ PWR = 2.50 (ข) เลนส์ PWR = 4.00 (ค) เลนส์ PWR = 5.50	44
4.13 ผลการทดลองวัดความไม่ตรงศูนย์แสดงความสัมพันธ์กับค่า Prism diopter ของเลนส์ที่มีค่า ปริซึมสูงเกินมาตรฐาน (ก) เลนส์ดังกล่าวมี PWR = 2.25 (ข) เลนส์ดังกล่าวมี PWR = 3.75	45
ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไม่ตรงศูนย์และค่า Prism diopter ที่ได้จากการจำลองด้วย ZEMAX ของเลนส์ที่ค่า PWR = 2.25 กรณีปรับเฉพาะผิวแรกเอียงจากน้อยไปมาก (วงกลม) กรณีปรับเฉพาะผิวสองเอียงจากน้อยไปมาก (สี่เหลี่ยม) กรณีเอียงทั้งสองผิว (สามเหลี่ยม) และกรณีทั้งผิวเลื่อนออกจากแกนแสง (จิดสั้น)	51
ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไม่ตรงศูนย์และค่า Prism diopter ที่ได้จากการจำลองด้วย ZEMAX ของเลนส์ที่ค่า PWR = 2.50 กรณีปรับเฉพาะผิวแรกเอียงจากน้อยไปมาก (วงกลม) กรณีปรับเฉพาะผิวสองเอียงจากน้อยไปมาก (สี่เหลี่ยม) กรณีเอียงทั้งสองผิว (สามเหลี่ยม) และกรณีทั้งผิวเลื่อนออกจากแกนแสง (จิดสั้น)	52
ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไม่ตรงศูนย์และค่า Prism diopter ที่ได้จากการจำลองด้วย ZEMAX ของเลนส์ที่ค่า PWR = 3.75 กรณีปรับเฉพาะผิวแรกเอียงจากน้อยไปมาก (วงกลม) กรณีปรับเฉพาะผิวสองเอียงจากน้อยไปมาก (สี่เหลี่ยม) กรณีเอียงทั้งสองผิว (สามเหลี่ยม) และกรณีทั้งผิวเลื่อนออกจากแกนแสง (จิดสั้น)	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไม่ตรงศูนย์และค่า Prism diopter ที่ได้จากการจำลองด้วย ZEMAX ของเลนส์ที่ค่า PWR = 5.50 กรณีปรับเฉพาะผิวแรกเอียงจากน้อยไปมาก (วงกลม) กรณีปรับเฉพาะผิวสองเอียงจากน้อยไปมาก (สี่เหลี่ยม) กรณีเอียงทั้งสองผิว (สามเหลี่ยม) และกรณีทั้งผิวเลื่อนออกจากแกนแสง (จุดสั้น)..... 54



บทที่ 1

บทนำ

บริษัท ไทยออปติคอลล ก่อรูป จำกัด (มหาชน) และบริษัทย่อย ดำเนินธุรกิจเป็นผู้ผลิตและจำหน่ายเลนส์สายตา จำหน่ายสินค้าให้กับผู้ค้าส่งทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งคุณภาพที่เป็นที่ยอมรับของการผลิตเลนส์สายตา จำเป็นต้องมีการควบคุมการผลิตโดยละเอียดทุกขั้นตอน ปัญหาหนึ่งที่บริษัทฯ ตรวจพบคือ เลนส์บางรุ่นที่ผลิตมีค่า Prism diopter ที่วัดด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติของเลนส์ (Lensmeter) มีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ เปอร์เซ็นต์ของเสียสูงถึง 5-7% จากเลนส์ที่ผลิตประมาณ 30,000 ชิ้น/วัน

เลนส์ที่บริษัทฯ ผลิตมีหลายรุ่น ที่เป็นปัญหาเป็นเลนส์ที่ผลิตจากแผ่นแก้ว (Glass molds) 2 แผ่นที่ประกอบเข้าด้วยกัน โดยใช้เทปพลาสติกพันรอบขอบและเป็นรุ่นที่มี Optical power ต่ำ ซึ่งบริษัทฯ คาดว่าน่าจะเกิดจากแผ่นแก้วแม่แบบอาจมีการเลื่อนตำแหน่งไปจากที่กำหนดไว้ในขณะที่ฉีดโมโนเมอร์เข้าไปในแม่แบบ อาจเกิดจากแรงดันขณะฉีด โมโนเมอร์ หรือแรงกดจากการยึดจับของพนักงาน นอกจากนี้อาจเกิดจากการหดตัวของ โมโนเมอร์หลังจากให้ความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากเทคนิคการประกอบแม่แบบด้วยเทปพลาสติกดังกล่าวไม่มั่นคงแข็งแรง อย่างไรก็ตาม บริษัทฯ ไม่สามารถใช้เครื่องมือที่มีอยู่หรือหาวิธีการวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของแม่แบบหลังจากประกอบแล้วได้ จึงทำให้ไม่สามารถพิสูจน์สาเหตุที่แน่ชัดได้

เทคนิคการวัดแบบไม่สัมผัสนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะการตรวจสอบคุณภาพของเลนส์ เพื่อป้องกันความเสียหายจากรีจอร์ยบริเวณผิว เทคนิคนี้นำมาใช้ในการวัดค่าความไม่ตรงศูนย์กลาง (Centering errors) ของเลนส์ นอกจากนี้ยังสามารถวัดความไม่ตรงศูนย์กลางด้านอื่นๆ ได้อีกด้วย อย่างเช่น การตรวจวัดความคลาดเคลื่อนสัญญาณของระบบหัวอ่านแผ่นซีดีเมื่อแผ่นซีดีเอียง [1] การตรวจสอบจุดกึ่งกลางของ Electrowetting Liquid Lens [2] การตรวจสอบจุดกึ่งกลางของแกนหมุนของเครื่องจักรกล [3, 4] และการวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์ [5] เป็นต้น ส่วนใหญ่เป็นการวัดแบบไม่สัมผัส โดยใช้แสงในการวัด ความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์เกิดจากจุดยอดของผิวโค้งแต่ละผิวไม่ตรงกัน หรือไม่ตรงกับแกนอ้างอิง (Decentration) หรือผิวโค้งมีมุมเอียงกับแกนอ้างอิง (Tilt angle) ซึ่งการวัดความไม่ตรงศูนย์กลางมีการจัดแสง 2 แบบ คือ การวัดการสะท้อนกลับของแสง (Reflection mode) และการวัดการแบบทะลุผ่าน (Transmission mode) การวัดการสะท้อนกลับของแสง และการวัดแบบการทะลุผ่านเป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับการวัด Centering errors ซึ่งการวัดการ

สะท้อนกลับของแสงเป็นการวัด centering errors ของแต่ละผิวเลนส์ ส่วนการวัดแบบการทะลุผ่านเป็นการวัด Centering errors แบบรวมทุกผิวเลนส์ ที่ผ่านมามีผู้ผลิตและจำหน่ายเครื่องมือวัด Centering errors โดยใช้เทคนิคดังกล่าว

บริษัท Trioptics (www.trioptics.com) ได้ผู้ผลิตและจำหน่ายเครื่องมือวัด Centering errors เพื่อใช้สำหรับประกอบชุดเลนส์ ที่ประกอบด้วยเลนส์หลายชิ้นได้ เครื่องมือนี้ใช้วิธีการวัดการวัดการสะท้อนกลับของแสง และการวัดแบบการทะลุผ่าน มีทฤษฎีและการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม เครื่องมือวัดดังกล่าวมีราคาสูงหากนำมาใช้กับการวัด Centering errors ของแผ่นแก้วแม่แบบ 2 ชิ้น

ในเบื้องต้นถ้าบริษัทฯ สามารถวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของแผ่นแก้วแม่แบบที่สามารถประกอบเสร็จแล้วได้ จะทำให้สามารถตรวจสอบได้ว่า ปัญหาดังกล่าวเชื่อมโยงกับค่า Prism diopter ของเลนส์ที่สูงเกินไปหรือไม่ บริษัทฯ น่าจะมีวิธีแก้ปัญหาได้เหมาะสมและลดเปอร์เซ็นต์เสียลงได้มาก แล้วทำให้ลดต้นทุนการผลิต

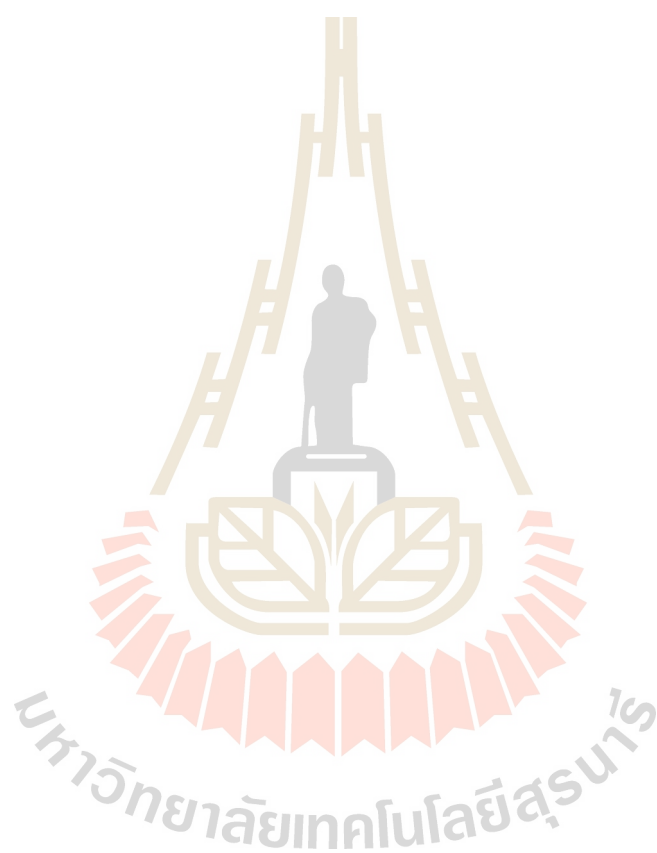
ค่า Prism diopter จะสัมพันธ์กับรูปร่างของเลนส์ ที่เกิดจากจุดยอดผิวโค้งของทั้งสองผิวไม่ตรงกัน เมื่อจุดยอดของทั้งสองผิวห่างกับแกนอ้างอิงมาก ส่งผลให้ค่า Prism diopter สูงขึ้น จึงมีความเป็นไปได้สูงที่ปัญหาที่พบน่าจะเกิดจากเลนส์ที่ผลิตจากแผ่นแก้วแม่แบบมีความไม่ตรงศูนย์กลางสูง เทคนิคการวัดที่เสนอในโครงการวิจัยนี้ เป็นการประยุกต์จากเทคนิคการวัดที่ใช้ในการประกอบเลนส์หลายชิ้นเข้าด้วยกัน สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเลนส์กล้องถ่ายรูป โดยใช้วิธีการวัดการสะท้อนกลับของแสง เพื่อต้องการวัดค่า Centering errors แต่ละผิวของแผ่นแก้วแม่แบบ และมีวิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน แม่แบบสำหรับผลิตเลนส์สายตาของบริษัทฯ ใช้เพียงแผ่นแก้ว 2 ชิ้น เทคนิคดังกล่าวจึงน่าจะนำมาปรับใช้งานได้ ทั้งนี้จำเป็นต้องออกแบบให้เหมาะสมกับช่วงรัศมีความโค้งและลักษณะการใช้งานของบริษัทฯ

จุดประสงค์ของโครงการนี้คือ ต้องการพัฒนาเทคนิคเชิงแสงสำหรับตรวจสอบความไม่ตรงศูนย์กลางของแผ่นแก้วแม่แบบ (Centering Error) สำหรับใช้ผลิตเลนส์สายตา และใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้น ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความไม่ตรงศูนย์กลาง (Centering Error) และค่า Prism diopter ของเลนส์สายตา

การศึกษาความไม่ตรงศูนย์กลางของแผ่นแก้วแม่แบบ ยังไม่สามารถศึกษาหรือทดลองวัดความไม่ตรงศูนย์กลางได้โดยตรงโดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้น เนื่องจากพบว่าผิวด้านนอกของแม่แบบดังกล่าวเป็นผิวแบบขุ่นมัว แสงทะลุผ่านได้น้อย ในการศึกษาจึงใช้การวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์ที่หล่อจากแม่แบบแทน จากนั้นศึกษาว่าความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์สัมพันธ์อย่างไรกับค่าปริซึมของเลนส์ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะสามารถระบุสาเหตุของค่าปริซึมที่สูงในเลนส์บางรุ่นได้ ใน

อนาคตสามารถใช้เครื่องมือนี้ศึกษาความไม่ตรงศูนย์กลางของแผ่นแก้วแม่แบบได้โดยตรง ทั้งนี้จะต้องปรับปรุงเครื่องมือให้มีความเข้มแสงสูงกว่าที่ใช้ในเครื่องมือปัจจุบัน

ต้นแบบเครื่องมือวัดความไม่ตรงศูนย์กลางที่สร้างขึ้นในโครงการวิจัยนี้จะมีประโยชน์ในการศึกษาและวิเคราะห์สาเหตุค่าปริซึมที่สูงในเลนส์บางรุ่นได้



บทที่ 2

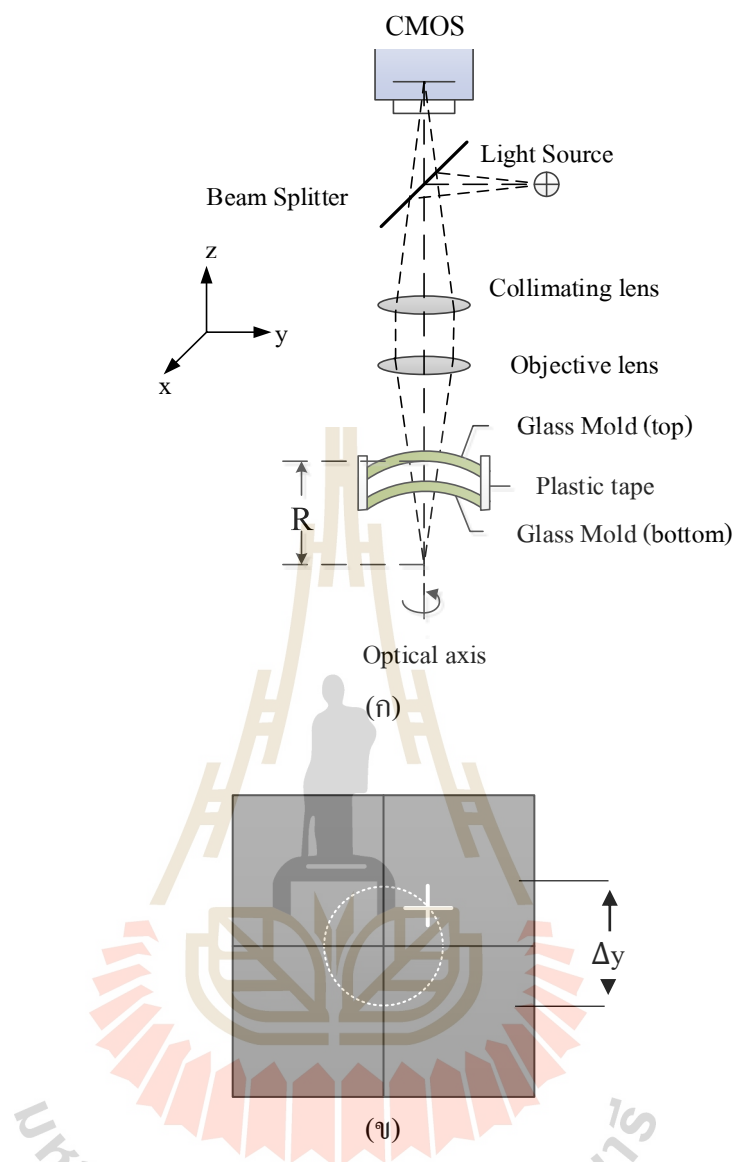
ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความไม่ตรงศูนย์ (Centering errors)

ในการวัดค่าความไม่ตรงศูนย์ ใช้วัตถุตัวอย่างที่เป็นแผ่นแก้วแม่แบบสำหรับหล่อเลนส์ โดยการจัดอุปกรณ์ใช้เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) จัดแสงให้ตั้งฉากกับผิวเลนส์ แตกต่างจากกรณีที่วัตถุตัวอย่างเป็นผิวเรียบ แผ่นแก้วแม่แบบมี 2 ชั้นและมีพลาสติกใสพันรอบขอบ การจัดอุปกรณ์ตามรูปที่ 2.1 หากแผ่นแก้วเลื่อนหรือเอียงออกจากระบบแกนแสง จะทำให้เกิดความไม่ตรงศูนย์ ดังนั้นการวัดค่าความไม่ตรงศูนย์เริ่มจากวัดที่ผิวโค้งแรกที่ใกล้กับเลนส์ใกล้วัตถุก่อน จากนั้นเลื่อนไปวัดที่ผิวโค้งถัดไป ตามลำดับ

จากรูปที่ 2.1 แสงจากแหล่งกำเนิด ลำแสงถูกแบ่งออกเป็น 2 ลำ เมื่อผ่านอุปกรณ์แยกลำแสง ส่วนหนึ่งของแสงที่สะท้อนที่อุปกรณ์แยกแสงจะลงมาที่ทิศทาง $-z$ แล้วผ่านเลนส์สำหรับจัดลำแสงขนาน (Collimating lens) ซึ่งมีความยาวโฟกัส f_c และผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ความยาวโฟกัส f_o โดยการจัดตำแหน่งของวัตถุตัวอย่าง ซึ่งวัตถุตัวอย่างดังกล่าวเป็นแผ่นแก้วแม่แบบ วางไว้บน XYZ linear stage และ Rotation stage เพื่อสามารถปรับเลื่อนวัตถุตัวอย่างได้ทั้งแกน x, y และ z อีกทั้งหมดรอบแกนแสง เพื่อคู่ข้อมูลจากกล้องรับภาพ

การวัดค่าความไม่ตรงศูนย์จะเริ่มจากปรับตำแหน่งของของวัตถุตัวอย่าง ให้ลำแสงตกกระทบบโฟกัสที่จุดกึ่งกลางของผิวโค้ง (Center of curvature) ที่ต้องการวัด แสงบางส่วนที่บริเวณผิวโค้งจะสะท้อนกลับในทิศทางเดิม เนื่องจากลำแสงตกกระทบบจะตั้งฉากกับผิวโค้งที่จุดสัมผัสผิวผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ เลนส์จัดแสงขนาน อุปกรณ์แยกแสง ตามลำดับ แสงที่ทะลุผ่านอุปกรณ์แยกแสงจุดโฟกัสจะตกที่กล้องรับภาพ ภาพที่ได้จากกล้องจะเป็นรูปจุดแสงที่ชัดเจน



รูปที่ 2.1 (ก) แผนผังการจัดอุปกรณ์เชิงแสงสำหรับวัดค่าความไม่ตรงศูนย์ (Centering Error) ของแผ่นแก้วแม่แบบสำหรับใช้ผลิตเลนส์เว้าตาพลาสติก และ (ข) เมื่อหมุนเลนส์ตัวอย่างครบ 1 รอบ จุดโฟกัสบนกล้องรับภาพจะเคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยรัศมีของวงกลมจะแปรผันตามความไม่ตรงศูนย์ของแต่ละผิวโค้ง

กรณีที่หมุนวัตถุตัวอย่างรอบแกนหมุน หรือ แกนแสงของระบบวัด หากจุดโฟกัสแสงอยู่แนวเดียวกันกับกึ่งกลางของผิวโค้งของวัตถุตัวอย่าง เมื่อหมุนวัตถุตัวอย่าง 360° โดยหมุนรอบแกนหมุนของวัตถุตัวอย่าง ภาพของจุดแสงจะอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ซึ่งภาพจะหมุนตามการหมุนของวัตถุตัวอย่างเช่นกัน หากจุดโฟกัสแสงไม่อยู่แนวเดียวกันกับกึ่งกลางของผิวโค้งของวัตถุตัวอย่าง เมื่อ

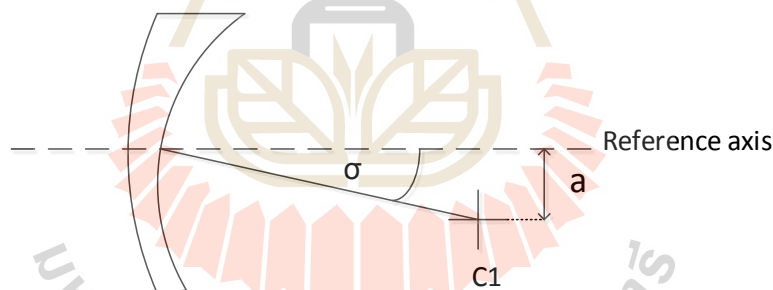
หมุนวัตถุตัวอย่างรอบแกนหมุนจะพบว่าภาพของเรติเคิลเป็นวงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง Δy ซึ่งสัมพันธ์กับความไม่ตรงศูนย์ตามสมการ

$$a = \Delta y \frac{f_0}{4f_c} \quad (1)$$

และ

$$\sigma = \frac{a}{R} \quad (2)$$

โดยที่ a คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางความโค้งถึงแกนหมุน หรือค่าความไม่ตรงศูนย์ σ คือ มุมระหว่างแกนหมุนกับเส้นตั้งฉากกับผิวโค้ง ณ ตำแหน่งจุดตัด R คือ รัศมีความโค้งของผิวที่กำลังวัด f_c คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์สำหรับจัดแสงขนาน f_0 คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุ พารามิเตอร์ a และ σ แสดงในรูปที่ 2.2

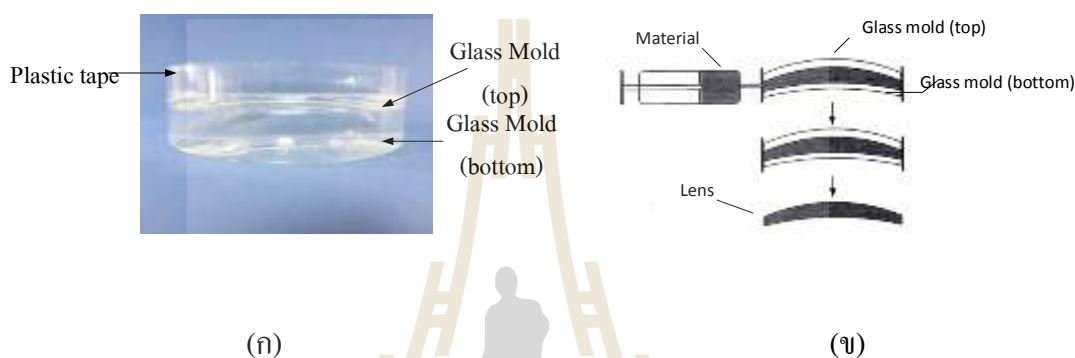


รูปที่ 2.2 ความไม่ตรงศูนย์เมื่อผิวที่สองมีผิวเอียงเป็นมุม σ

จากรูปที่ 2.2 เมื่อผิวที่สองเอียงทำให้รัศมีความโค้งทำมุม σ กับแกนอ้างอิง ส่งผลให้จุดกึ่งกลางความโค้งของผิว (C1) อยู่ห่างจากแกนอ้างอิงเท่ากับระยะ a ซึ่งจากรูปที่ 2.2 ระยะ a คือค่าความไม่ตรงศูนย์ของผิวที่สอง โดยคำนวณได้จากสมการ (1) หากวัดค่าความไม่ตรงศูนย์ได้สามารถคำนวณหามุม σ ได้จากสมการ (2)

2.2 แม่แบบที่ใช้ในการผลิตเลนส์พลาสติก

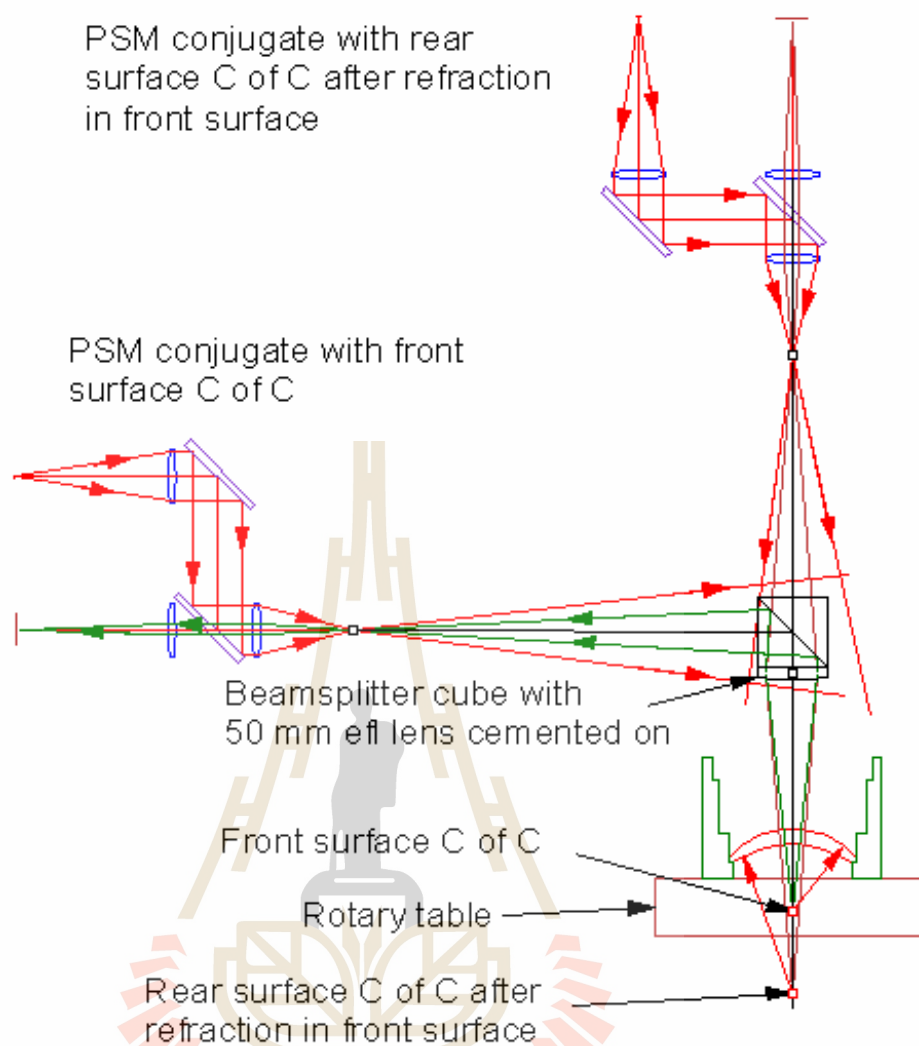
แผ่นแก้วแม่แบบมีลักษณะดังรูปที่ 2.3 ประกอบเข้าด้วยกัน โดยใช้เทปพลาสติกพันรอบ ซึ่งวิธีการผลิตเลนส์ต้องเปิดเทปพลาสติกออกเล็กน้อยให้เกิดช่องว่าง แล้วฉีดของเหลวซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำเลนส์ลงในช่องว่างระหว่างแผ่นแก้วทั้งสองจนเต็มแม่แบบพอดี แล้วจึงปิดเทปพลาสติกเพื่อนำไปเข้ากระบวนการที่ทำให้ของเหลวที่ฉีดเข้าแม่แบบแข็งตัว แล้วจึงถอดแม่แบบออก จะได้เลนส์หนึ่งเลนส์



รูปที่ 2.3 (ก) แผ่นแก้วแม่แบบสำหรับใช้ผลิตเลนส์แว่นตา และ (ข) วิธีการผลิตเลนส์

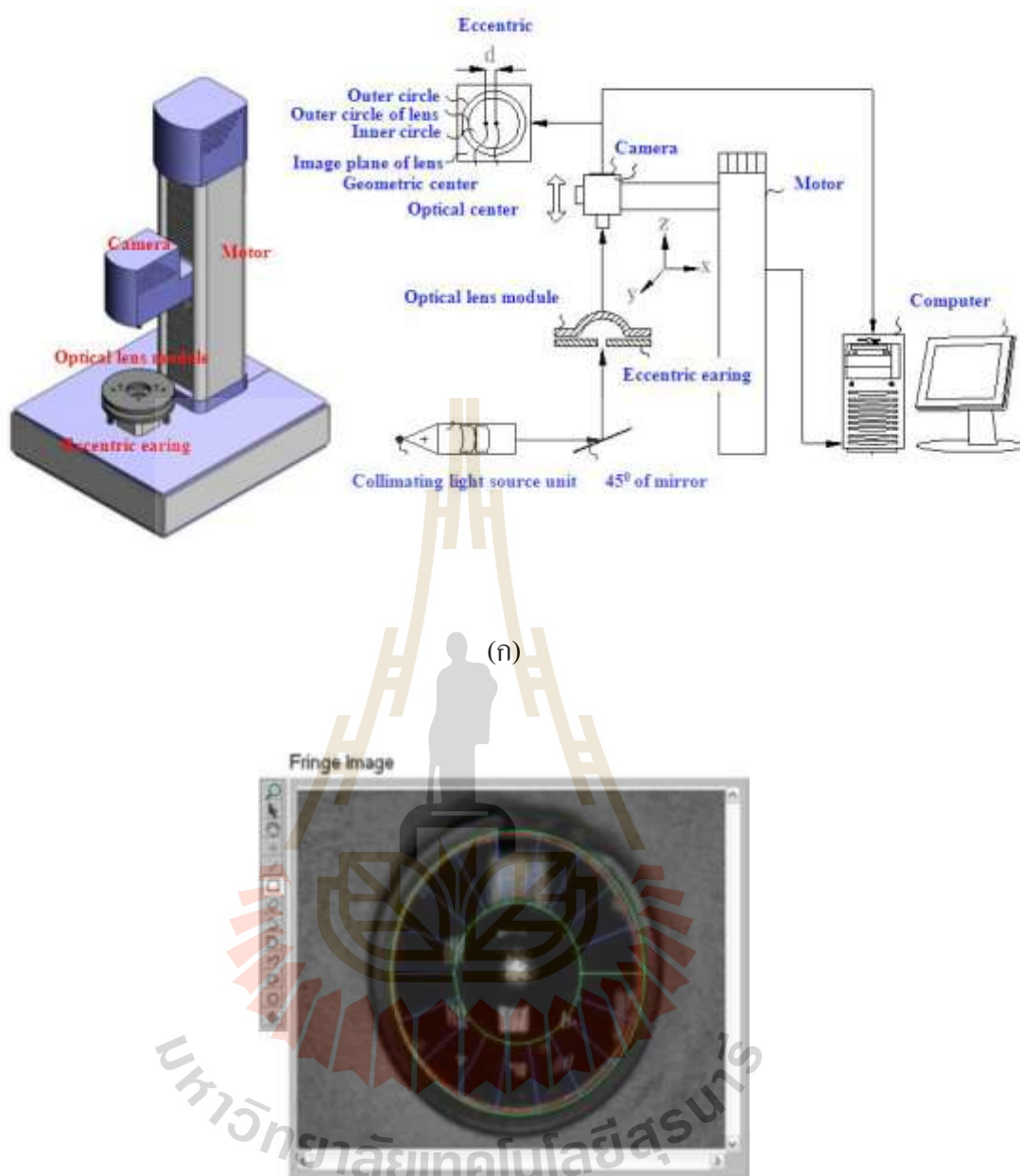
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่ผ่านมา มีผู้เสนอเทคนิคการวัด Centering errors โดยใช้ Point Source Microscope (PSM) [6] ซึ่ง PSM เป็นเครื่องมือวัด Centering errors แบบการสะท้อนกลับของแสง ที่ใช้สำหรับการประกอบชุดเลนส์ วิธีการวัดจะใช้ PSM 2 ชุด เพื่อวัดผิวเลนส์สองผิวพร้อมกัน ดังรูปที่ 2.4 เครื่องมือนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์จัดแสงหลายชิ้น ซึ่งอาจใช้เวลานานในการจัดอุปกรณ์ และเกิดความผิดพลาด



รูปที่ 2.4 การวัด Centering errors โดยใช้ PSM [6]

เทคนิคการประมวลผลภาพ หรือ Image processing สามารถนำมาใช้กับการวัด Centering errors ได้ โดยนำภาพเลนส์จากกล้องมาคำนวณหาตำแหน่งจุดกึ่งกลางกายภาพ (Geometrical center) ของเลนส์ [5] ดังรูปที่ 2.5 เพื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งแกนกลางของแสง (Optical center) จากนั้นคำนวณระยะห่างระหว่างสองตำแหน่งหากทั้งสองตำแหน่งไม่ตรงกันจะเกิด Centering errors

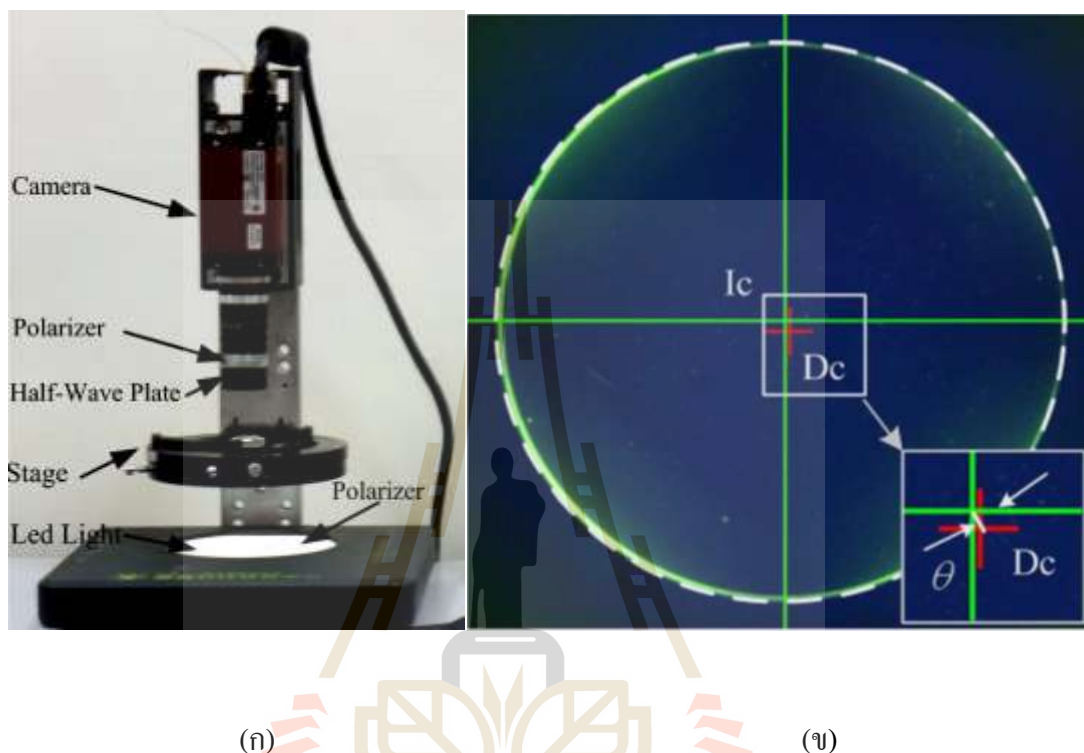


(ข)

รูปที่ 2.5 (ก) การจัดอุปกรณ์ และ (ข) การประมวลผลภาพสำหรับหาตำแหน่งกายภาพของเลนส์ [5]

นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่นที่สามารถวัด Centering errors ได้ โดยใช้วิธีการดูโพลาไรเซชันของแสงที่แสดงผ่านกล้อง [7-9] ซึ่งต้องคำนวณหาตำแหน่งจุดกึ่งกลางของรูปแบบการโพลาไรเซชัน (Polarization patterns) ของแสงที่ผ่านเลนส์ และมีคำนวณเพื่อประมวลผลภาพที่ทำให้ทราบ

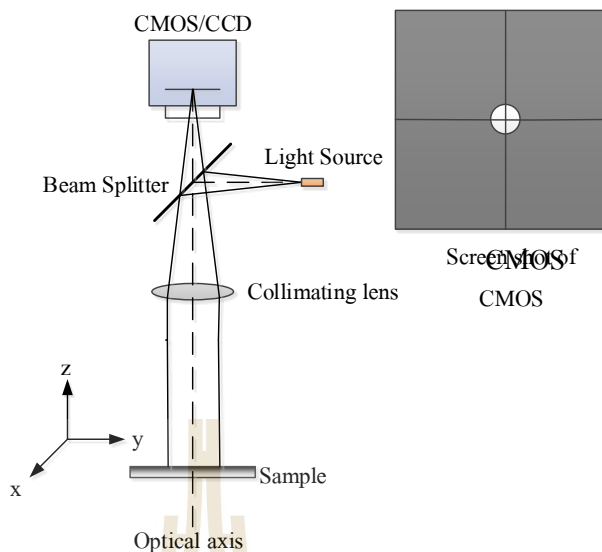
ตำแหน่งของจุดกึ่งกลางเลนส์ จากนั้นเปรียบเทียบตำแหน่งจุดกึ่งกลางของ Polarization patterns และจุดกึ่งกลางเลนส์ ดังรูปที่ 2.6 หากทั้งสองตำแหน่งไม่ตรงกันจะเกิด Centering errors วิธีดังกล่าว ต้องพิจารณาพารามิเตอร์หลายค่าที่จำเป็นในการวัดค่าความไม่ตรงศูนย์ และมีขั้นตอนที่ซับซ้อน



รูปที่ 2.6 (ก) การจัดอุปกรณ์ และ (ข) การวัด Centering errors โดยเทคนิคโพลาไรเซชัน I_c คือ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของ Polarization patterns (สีเขียว) D_c คือ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของ เลนส์ (สีแดง) [7]

2.4 เทคนิคการวัดการสะท้อนกลับของแสง (Autocollimator)

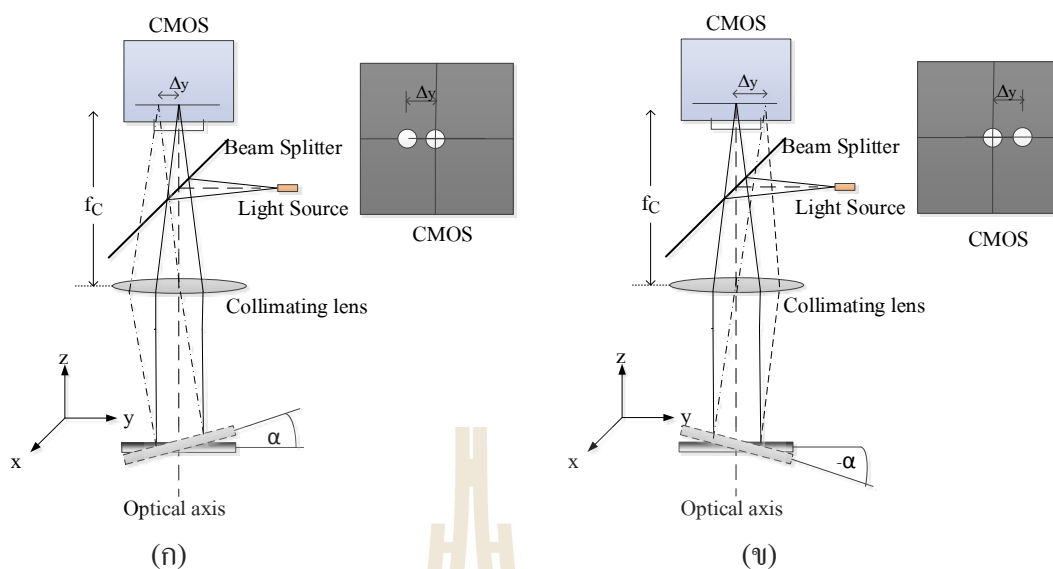
การจัดอุปกรณ์เชิงแสงที่สำหรับการวัดค่าความไม่ตรงศูนย์ งานวิจัยนี้คาดว่าจะใช้เทคนิค ลำแสงแบบสะท้อนกลับ (Autocollimator) ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดแบบไม่สัมผัสกับวัตถุ เพื่อไม่ให้เกิดรบกวนบริเวณผิวเลนส์ ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ การจัดอุปกรณ์ทดลองสำหรับเทคนิคนี้ แสดงในรูปที่ 5 การศึกษานี้จะเริ่มจากใช้วัตถุตัวอย่างเป็นวัตถุผิวเรียบ หากลำแสงกระทบตั้งฉาก กับผิวของวัตถุตัวอย่างทำให้แสงสะท้อนกลับไปยังกล้องรับภาพ



รูปที่ 2.7 แผนผังการจัดอุปกรณ์การวัดแสงแบบสะท้อนกลับ (Autocollimator)

จากรูปที่ 2.7 แสงจากแหล่งกำเนิดผ่านอุปกรณ์แยกลำแสง (Beam Splitter) แสงจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ลำ แสงที่สะท้อนอุปกรณ์แยกลำแสงมาในทิศทาง $-z$ ผ่านเลนส์สำหรับจัดแสงขนาน (Collimating lens) ซึ่งมีความยาวโฟกัส f_c หากผิวของวัตถุตัวอย่างตั้งฉากกับลำแสงตกกระทบ ถ้าวัตถุตัวอย่างเป็นวัตถุโปร่งแสง แสงส่วนใหญ่จะทะลุผ่านวัตถุตัวอย่าง โดยมีแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับทิศทางเดิม แสงสะท้อนนี้จะทะลุผ่านเลนส์จัดแสงขนาน อุปกรณ์แยกแสง และกล้องตามลำดับ ก่อนการทดลองจะต้องทำการสอบเทียบตำแหน่งอ้างอิง การสอบเทียบจะใช้วัตถุตัวอย่างผิวเรียบ เช่น แผ่นแก้วเปล่าหรือแผ่นแก้วเคลือบโลหะ เป็นต้น จัดวางวัตถุตัวอย่างให้ไกลจากจากชุดทดลองพอสมควร และจัดให้ผิววัตถุตัวอย่างตั้งฉากกับลำแสง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้จากลำแสงสะท้อนกลับทิศทางเดิม การสังเกตดังกล่าวจะทำได้ง่าย ถ้าใช้ช่องรับแสงขนาดเล็กวางไว้หน้าเลนส์

กรณีที่วัตถุตัวอย่างมีผิวตั้งฉากกับลำแสงตกกระทบ และเมื่อวางกล้องรับภาพไว้ที่ระยะโฟกัสของเลนส์ ภาพที่ได้เป็นจุด ปกติจะจัดอุปกรณ์เพื่อให้จุดของลำแสงดังกล่าวอยู่กึ่งกลางภาพพอดี ตำแหน่งของจุดดังกล่าวจะเรียกว่า “จุดอ้างอิง” ถ้าผิวของวัตถุเอียง หรือผิวของวัตถุไม่ตั้งฉากกับลำแสงตกกระทบ แสงที่สะท้อนกลับไปที่กล้อง จะถูกโฟกัสที่ตำแหน่งอื่น ซึ่งไม่ตรงกับกรณีที่ผิวของวัตถุตั้งฉากกับแสงขนาน หรือไม่ตรงกับจุดอ้างอิง ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 (ก) ตำแหน่งจุดโฟกัสแสงเมื่อผิวของวัตถุเอียงทำมุม α กับแกน y และ (ข) ตำแหน่งจุดโฟกัสแสงเมื่อผิวของวัตถุเอียงทำมุม $-\alpha$ กับแกน y

เมื่อผิวของวัตถุเอียงทำมุม α หรือ $-\alpha$ กับแกน y (พิจารณาที่วัตถุไม่เอียงในแนวอื่น) แสงบางส่วนของแสงขนานที่ตกกระทบกับผิวของวัตถุจะสะท้อนกลับ ซึ่งแสงที่สะท้อนจะตั้งฉากกับผิวของวัตถุ ผ่านเลนส์สำหรับจัดแสงขนาน และอุปกรณ์แยกแสง (Beam Splitter) ตามลำดับ ลำแสงจะโฟกัสที่กล้อง ณ ตำแหน่งอื่นที่ไม่ใช่จุดอ้างอิง กำหนดระยะดังกล่าวเท่ากับ Δy เมื่อเทียบกับจุดโฟกัสแสงกรณีผิวของวัตถุไม่เอียง ($\alpha = 0$) หรือจุดกึ่งกลางภาพ ดังรูปที่ 2.4 ภาพที่ได้จากกล้องวงกลมจะเลื่อนไปเป็นระยะ Δy เช่นกัน ซึ่งระยะ Δy สัมพันธ์กับความเอียงของวัตถุตัวอย่างดังสมการ (3)

$$\alpha = \frac{\Delta y}{2f_c} \quad (3)$$

เมื่อ α คือ มุมเอียงระหว่างผิวของวัตถุกับแกน y หน่วย degree Δy คือ ระยะที่ภาพวงกลมเลื่อนไปจากจุดกึ่งกลางภาพ f_c คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์สำหรับจัดแสงขนาน

2.5 การเกิดภาวะปริซึมของเลนส์แว่นตา (Prism diopter)

เลนส์แว่นตาทุกชิ้นที่ผลิต ทางบริษัทฯ จะนำไปวัดค่าปริซึมจากเครื่องมือวัดที่ใช้งานในปัจจุบัน ซึ่งค่าปริซึมดังกล่าวเป็นค่าที่บ่งบอกคุณภาพของเลนส์ชิ้นนั้น และจะถูกตัดทิ้งเมื่อค่าปริซึมของเลนส์สูงเกินกว่ามาตรฐาน

ปริซึมเป็นอุปกรณ์เชิงแสงที่ทำให้แสงหักเหจากเดิม จากรูปที่ 2.9 เมื่อแสงผ่านปริซึมที่ระยะ X_M เกิดระยะห่างระหว่างแสงกับแกนอ้างอิง (เส้นประ) เท่ากับ Y_{CM} ซึ่งวิธีการวัดค่าปริซึมของเครื่องมือที่ทางบริษัทฯ ใช้งาน สามารถคำนวณค่า Prism diopter ได้จากสมการ

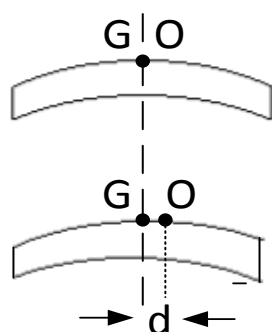
$$\Delta = \frac{Y_{CM}}{X_M} \quad (\text{หน่วย Diopter}) \quad (4)$$

โดยที่ Δ คือค่า Prism diopter ของเลนส์แว่นตา Y_{CM} คือ ระยะห่างระหว่างแสงกับแกนอ้างอิง หน่วย cm และ X_M คือ ระยะของแสงที่ผ่านปริซึม หน่วย m



รูปที่ 2.9 การหักเหของแสงเมื่อผ่านปริซึม [10]

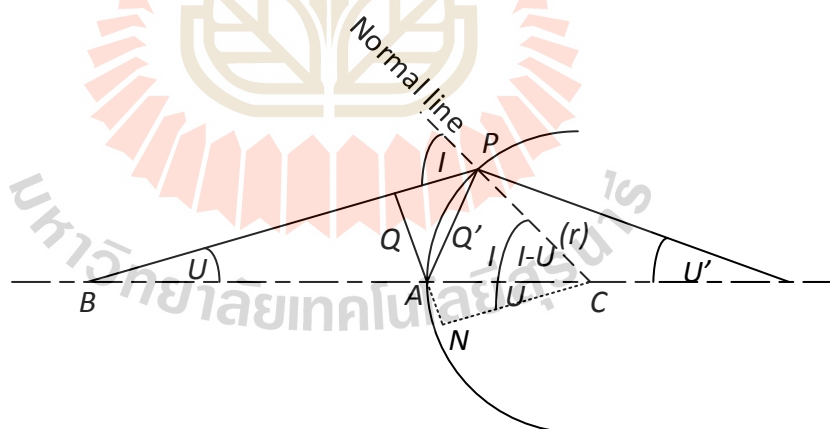
สาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะปริซึมของเลนส์เกิดจากตำแหน่งกึ่งกลางเลนส์ของทั้งสองผิวไม่ตรงกัน โดยทั่วไปเลนส์นั้นมีความโค้งของผิว ซึ่งจุดสูงสุดของความโค้งนั้นควรอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางและตำแหน่งกึ่งกลางต้องตรงกันทั้งสองผิว เมื่อตำแหน่งกึ่งกลางของทั้งสองผิวไม่ตรงกัน กรณีจุดยอดทั้งสองผิวมีความต่างของระยะห่างกันมาก ส่งผลให้รูปร่างเลนส์เปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 2.10 ไม่ผ่านการตรวจคุณภาพทันที แต่การผลิตเลนส์ไม่สามารถใช้สายตาจำแนกรูปร่างของเลนส์ได้ว่าลักษณะทางกายภาพของเลนส์เปลี่ยนไปหรือไม่ ต้องใช้เครื่องมือตรวจวัดค่า Prism diopter หากค่าปริซึมเกินมาตรฐานต้องทิ้งเลนส์นั้นทันที



รูปที่ 2.10 การเกิดภาวะปริซึมของเลนส์

2.6 Ray tracing เบื้องต้น

กรณีผิวทรงกลมไม่มีมุมเอียง เมื่อพิจารณาแสงที่ตกกระทบกับผิวทรงกลม แสงที่ทะลุผ่านจะหักเหไปจากเดิม เนื่องจากความโค้งของผิวเลนส์ และวัสดุของเลนส์มีค่าดัชนีหักเห แสงดังกล่าวจะเป็นแสงตกกระทบของผิวถัดไป ซึ่งสามารถอธิบายค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกิดจากแสงที่ผ่านผิวทรงกลม



รูปที่ 2.11 การหักเหของแสงผ่านผิวเลนส์

จากรูปที่ 2.11 เมื่อพิจารณาผิวโค้งเป็นผิวทรงกลมผิวเดียว เส้นตรง BP ที่ใช้เป็นเส้นของแสง เรียกว่า “เรย์ (ray)” ทำมุม U กับแกนแสง (Optical axis) เมื่อลากเส้นตั้งฉากกับผิวโค้งให้ตัดกับแสงตกกระทบ (PC) จะเกิดมุมตกกระทบคือมุม I เส้นตรง PC และ AC คือรัศมีความโค้งของเลนส์

(r) และ CN คือเส้นตรงที่ขนานกับแสงตกกระทบ โดยกำหนดให้ Q คือระยะห่างของ ray กับ Optical axis สามารถคำนวณได้จาก

$$Q = r \sin(I) - r \sin(U) \quad (5)$$

ดังนั้น การหักเหของแสงทำให้ระยะห่างของเรย์กับแกนแสง (Q') เป็นไปตามสมการ (6)

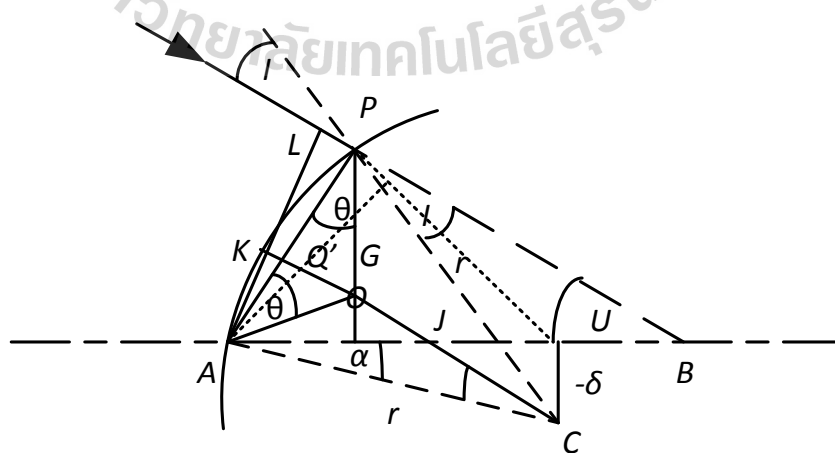
$$Q' = r[\sin(I') - \sin(U')] \quad (6)$$

กรณีผิวทรงกลมมีมุมเอียง เมื่อพิจารณาผิวโค้งเอียงหนึ่งแกน และทำมุม α กับ Optical axis ซึ่งทำให้จุดกึ่งกลางความโค้งไม่อยู่แนวเดียวกับ Optical axis มีระยะห่างเท่ากับ $-\delta$ จากรูปที่ 2.12 กำหนดให้ P คือจุดที่แสงตกกระทบ มีมุมตกกระทบเท่ากับ I PC คือรัศมีความโค้ง r ซึ่งลากเส้นตั้งฉากกับผิวโค้ง HC คือเส้นขนานกับแสงตกกระทบ มุม PCA เท่ากับ $U - \alpha + I$ เส้น AL คือเส้นตั้งฉากกับเรย์สามารถคำนวณระยะ Q ได้จาก

$$Q = LH + HA = r \sin(I) + r \sin(-U - \alpha) \quad (7)$$

หรือ

$$\sin(I) = \frac{Q}{r} - \sin(-U - \alpha) \quad (8)$$



รูปที่ 2.12 แสงตกกระทบที่ผิวโค้งมีความเอียง

กำหนดให้เส้น KC คือเส้นแบ่งครึ่งมุม PCA ทำให้มุม OCA เท่ากับ $\frac{1}{2}(I-\alpha-U)$ ให้ PO และ OA มีระยะเท่ากับ G และกำหนดให้มุม APO, OJA และ PAO เท่ากับ θ สามารถเขียนได้ว่า

$$\theta = ACJ + JAC = \frac{1}{2}(I - \alpha - U) + \alpha = \frac{1}{2}(I + \alpha - U) \quad (9)$$

และมุม AON คือสองเท่าของมุม APO เท่ากับ $(I+\alpha-U)$ เมื่อ

$$Y = PN = G[1 + \cos(I + \alpha + U)] \quad (10)$$

ดังนั้น

$$Z = AN = G\sin(I + \alpha + U) \quad (11)$$

$$Q = G\cos(U) + G\cos(I + \alpha) \quad (12)$$

สมการ ray tracing สามารถเขียนได้ว่า

$$\sin(I) = \frac{Q}{r} - \sin(U - \alpha) \quad (13)$$

$$\sin(I') = \frac{n}{n'}\sin(I) \quad (14)$$

$$U' = U + I' - I \quad (15)$$

ดังนั้น

$$Q' = r[\sin(I') - \sin(U' - \alpha)] \quad (16)$$

จากสมการที่ (16) จะพบว่ารังสีหักเห Q' จะขึ้นกับมุมตกกระทบ U ของรังสีตกกระทบ Q รังสีมีความโค้งของผิว r และดัชนีหักเหของวัสดุ ในกรณีการคำนวณความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์หรือแผ่นแก้วแม่แบบ การคำนวณความไม่ตรงศูนย์กลางของแต่ละผิวโค้ง จะต้องพิจารณาผลการหักเหของแสงเนื่องจากผิวโค้งก่อนหน้าด้วย

บทที่ 3

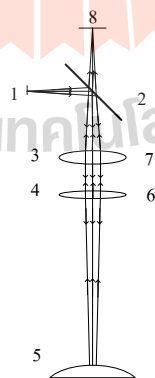
การจำลองการวัดความไม่ตรงศูนย์และค่าปริซึมของเลนส์เว้าตา

3.1 การจำลองการวัดความไม่ตรงศูนย์ของเลนส์เว้าตาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การวัดความไม่ตรงศูนย์ต้องจัดอุปกรณ์ให้อยู่ในแนวเดียวกัน ซึ่งต้องใช้ความแม่นยำ เพื่อให้การทดลองเป็นไปอย่างถูกต้อง จึงจำเป็นต้องจำลองการวัดค่าความไม่ตรงศูนย์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ออกแบบการจัดอุปกรณ์ตามรูปไดอะแกรมการวัดความไม่ตรงศูนย์ ซึ่งสามารถจำลองการวัดค่าดังกล่าวได้ดังรูปที่ 3.1

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้จำลองการวัดความไม่ตรงศูนย์ สามารถจำลองแสงตกกระทบบนหรือแสงที่ทะลุผ่านแต่ละเลนส์ได้ โดยการจำลองเป็นการเรียงลำดับจากแหล่งกำเนิดแสง การวางเลนส์แต่ละชิ้นเรียงต่อกัน จนกระทั่งถึงที่สุดที่ตำแหน่งตกกระทบบนที่เซนเซอร์รับภาพ แต่ละขั้นตอนของการออกแบบด้วยโปรแกรมนี้ต้องมีการตั้งค่าต่างๆ เพื่อให้แสงมีการตกกระทบบนและสะท้อนเป็นไปตามทฤษฎี การออกแบบเรียงตามหมายเลข 1 ถึง 8 จากรูปที่ 3.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเลนส์แต่ละเลนส์ต้องใส่ค่าที่หน้าต่าง ข้อมูลเลนส์

หมายเลข 1 จากรูปที่ 3.1 คือ แหล่งกำเนิดแสง ซึ่งอยู่ในแถวแรกของหน้าข้อมูลเลนส์ ซึ่งกำหนดค่าพารามิเตอร์ตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การจัดอุปกรณ์สำหรับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อวัดค่าความไม่ตรงศูนย์ของเลนส์เว้าตา (5) โดยที่ (1) คือแหล่งกำเนิดแสง (2) คือ Beam Splitter (3) เลนส์นูน $f = 100 \text{ mm}$ (4) เลนส์นูน $f = 200 \text{ mm}$ และ (8) คือกล้องรับภาพ

หมายเลข 1 จากรูปที่ 3.1 คือ แหล่งกำเนิดแสง ซึ่งอยู่ในแถวแรกของหน้าข้อมูลเลนส์ ซึ่งกำหนดค่าพารามิเตอร์ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแสง

ข้อมูลเลนส์						
ลำดับที่ : ชนิด	ข้อความ	รัศมี	ระยะห่าง	วัสดุ	เส้นผ่านศูนย์กลาง	
1	มาตรฐาน	-	อนันต์	50.0000	-	0.0000

จากตารางที่ 3.1 ลำดับที่ : ชนิด คือ ชื่อผิวและชนิดของผิว ข้อความ คือการใส่ข้อความใดๆ อาจระบุหรือไม่ก็ได้ รัศมี คือรัศมีความโค้งของผิว ระยะห่าง คือระยะห่างจากผิวถัดไป วัสดุ คือวัสดุของเลนส์ เส้นผ่านศูนย์กลาง คือขนาดความกว้างของผิว

ซอฟต์แวร์กำหนดให้ผิวแรกเป็นวัตถุ ผิวนี้ใช้เป็นการสร้างเรย์แสง ชนิดของผิวกำหนดเป็นผิวมาตรฐาน รัศมีความโค้งของวัตถุไม่จำเป็นต้องมีความโค้ง จึงระบุตามค่าที่ซอฟต์แวร์กำหนดคืออนันต์ ระยะห่างจากผิวถัดไป 50 mm ไม่มีขนาดและชนิดของวัสดุ แหล่งกำเนิดแสงต้องการกำหนดเรย์แสงและความยาวคลื่นแสง โดยการตั้งค่าไปที่แถบเมนู ระบบ แล้วคลิก ทั่วไป จะปรากฏหน้าต่างที่ชื่อ ทั่วไป จากนั้นเลือก ขนาดของรูรับแสง และใส่ขนาดเท่ากับ 10 เพื่อให้ความกว้างของเรย์มีขนาดที่เหมาะสม แล้วกด ตกลง เสร็จสิ้นการตั้งค่าเรย์แสง ต่อมากำหนดความคลื่น ไปที่แถบเมนู ระบบ แล้วคลิก ความยาวคลื่น จะปรากฏหน้าต่างที่ชื่อ ข้อมูลความยาวคลื่น ในหน้านี้สามารถเลือกได้ว่าต้องการใช้ที่ความยาวคลื่น ให้เลือก 1 ความยาวคลื่น ซึ่งในเบื้องต้นการจำลองวัดความไม่ตรงศูนย์ใช้ขนาดความยาวคลื่น 587.56 nm โดยใส่ค่าความยาวคลื่นเป็น 0.58756 μm แล้วกด ตกลง เพื่อจบการตั้งค่า

หมายเลข 2 จากรูปที่ 3.1 คือ อุปกรณ์แยกลำแสง (Beam Splitter) ซึ่งอยู่ถัดจากแหล่งกำเนิดตำแหน่งผิวที่ 1 ถึง 3 ของหน้า ข้อมูลเลนส์ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ Beam Splitter

ข้อมูลเลนส์						
ลำดับที่ : ชนิด	ข้อความ	รัศมี	ระยะห่าง	วัสดุ	เส้นผ่านศูนย์กลาง	เอียงแกน X
2	เอียง					-45.0000
3	มาตรฐาน	BS	อนันต์	50.0000	กระจก	60.0000
4	เอียง					-45.0000

ตารางที่ 3.2 ผิวนที่ 2 ชนิด เอียง เป็นการระบุนความเอียงและ/หรือการเอียงของผิวนที่ 3 ในแนวต่างๆ ซึ่งกำหนดให้ผิวนที่ 2 เอียง -45° ในแกน X เท่านั้น ผิวนที่ 3 ชนิด มาตรฐาน เป็นผิวมาตรฐาน ไม่มีรัศมีความโค้ง กำหนดเป็น อนันต์ ระยะห่างจากผิวนถัดไป (ไม่นับรวม เอียง) ชนิดวัสดุคือ กระจกขนาด 60 mm ผิวนที่ 4 ชนิด เอียง เป็นการระบุนความเอียงและ/หรือการเอียงในแนวต่างๆ ของอุปกรณ์ถัดไป ซึ่งกำหนดให้ผิวนถัดไปเอียงตามผิวนที่ 3 (-45° ในแกน X)

Aperture Stop ไม่ได้ใช้ในการออกแบบของงานจริง แต่ในซอฟต์แวร์บังคับให้กำหนดค่า Aperture Stop เพื่อจำกัดความกว้างของเรย์แสง ซึ่งกำหนดค่าต่างๆ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ Aperture Stop

ข้อมูลเลนส์					
ลำดับที่ : ชนิด	ข้อความ	รัศมี	ระยะห่าง	วัสดุ	เส้นผ่านศูนย์กลาง
ขนาด เรย์	มาตรฐาน	อนันต์	0.0000	-	10.0000

จากตารางที่ 3.3 Aperture stop มีชื่อผิวน ขนาดเรย์ อยู่ที่ลำดับผิวนที่ 5 ของโปรแกรม ชนิดของผิวนเป็น มาตรฐาน ขนาดของเรย์แสง กว้าง 10 mm

หมายเลข 3 จากรูปที่ 3.1 คือ เลนส์สำหรับจัดลำแสงขนาน โดยเรียกว่าเลนส์ L_1 และอยู่ในลำดับผิวนที่ 6 และ 7 ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเลนส์ L_1

ข้อมูลเลนส์						
ลำดับที่ : ชนิด	ข้อความ	รัศมี	ระยะห่าง	วัสดุ	เส้นผ่านศูนย์กลาง	
6	มาตรฐาน	L1	-101.3800	9.4700	BK7	50.8000
7	มาตรฐาน		101.3800	-20.0000		50.8000

จากตารางที่ 3.4 เลนส์ L_1 เลือกเลนส์ความยาวโฟกัส 100 mm จากไลบรารีของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เลนส์นูนชนิด Biconvex รัศมีความโค้งของผิวแรก -101.38 mm รัศมีความโค้งของผิวสอง 101.38 mm ความหนา 9.47 mm ทำจากวัสดุชนิด BK7 ขนาด 50.8 mm ให้เลนส์ L_1 อยู่ห่างจากเลนส์ถัดไป 20 mm การเลือกเลนส์จากไลบรารีของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยไปที่ เครื่องมือ ของแถบเมนู แล้วเลือก ไลบรารี จะปรากฏหน้าต่างที่สามารถเลือกเลนส์แบบต่างๆ ที่ต้องการได้

หมายเลข 4 จากรูปที่ 3.1 คือ เลนส์สำหรับโฟกัสแสง โดยเรียกว่าเลนส์ L_2 และอยู่ในลำดับผิวที่ 7 และ 8 ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเลนส์ L_2

ข้อมูลเลนส์						
ลำดับที่ : ชนิด	ข้อความ	รัศมี	ระยะห่าง	วัสดุ	เส้นผ่านศูนย์กลาง	
8	มาตรฐาน	L2	-204.980000	-6.1600	BK7	50.8000
9	มาตรฐาน		-204.980000	-128.0923	v	50.8000

จากตารางที่ 3.5 เลนส์ L_2 เลือกเลนส์ความยาวโฟกัส 200 mm จากไลบรารีของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เลนส์นูนชนิด Biconvex รัศมีความโค้งของผิวแรก -204.98 mm รัศมีความโค้งของผิวสอง 204.98 mm ความหนา 6.16 mm ทำจากวัสดุชนิด BK7 ขนาด 50.8 mm ให้เลนส์ L_2 ห่าง จากผิวถัดไป 128.092382 mm ซึ่งเกิดจากการปรับปรุงระยะห่างให้เหมาะสม (V) ในซอฟต์แวร์

การใช้ซอฟต์แวร์คำนวณระยะห่างแบบอัตโนมัติ เพื่อให้การจัดวางอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งให้ระยะห่างของวัตถุตัวอย่างอยู่ในระยะที่ทำให้เรย์แสงสะท้อนกลับทิศทางเดิม จากตารางที่ 3.5 ต้องเปลี่ยนการกำหนดค่าให้เครื่องมือปรับปรุงระยะห่างแบบอัตโนมัติ

หมายเลข 5 จากรูปที่ 3.1 คือ วัตถุตัวอย่าง ซึ่งอยู่ถัดจากเลนส์ L_2 ตำแหน่งผิวที่ 9 10 และ 11 ดังตารางที่ 3.6 เบื้องต้นจำลองวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของผิวแรก

ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ผิวแรกของเลนส์วัตถุตัวอย่าง

ข้อมูลเลนส์						
ลำดับที่ : ชนิด	ข้อความ	รัศมี	ระยะห่าง	วัสดุ	เส้นผ่านศูนย์กลาง	เอียงแกน X
10	เอียง					0.0000
11	มาตรฐาน	Sample	อนันต์	-71.3000	กระจก	60.0000
12	เอียง			128.0923	P	0.0000

จากตารางที่ 3.6 วัตถุตัวอย่างต้องสามารถปรับมุมเอียงได้ จึงต้องมีมุมเอียง ซึ่งใส่ข้อมูลของผิวแรกเท่านั้น (ผิวสองไม่มีผลต่อการวัด) ผิวแรกมีรัศมีความโค้ง 71.3 mm ผิวกระจก เพื่อให้เรย์สะท้อน ตัวอย่างมีขนาด 65 mm ระยะห่าง จากผิวถัดไป 128.092382 mm ซึ่งให้เรย์แสงสะท้อนกลับทางเดิม

เรย์สะท้อนกลับไม่ได้เกิดจากการจัดวางระยะห่างของวัตถุตัวอย่างแล้วสร้างเรย์สะท้อนกลับแบบอต์ โนมัต แต่เกิดจากการจัดวางเลนส์ชิ้นถัดไปเพื่อส่งต่อเรย์จากผิวหนึ่งไปยังอีกผิวหนึ่ง ดังนั้นต้องสร้างเลนส์ L_1 และ L_2 ซ้ำ แล้ววางทับตำแหน่งเดิม ซึ่งหมายเลข 6 และ 7 คือเลนส์ L_2 และ L_1 ตามลำดับการทะลุผ่านของแสง

หมายเลข 8 จากภาพที่ 3.1 คือ ตำแหน่งของภาพ หากเปรียบเทียบกับเป็นชุดทดลองจริง ตำแหน่งนี้คือเซนเซอร์ของกล้อง ซึ่งเป็นลำดับสุดท้ายของการออกแบบ

ตารางที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ของเซนเซอร์รับภาพ

ข้อมูลเลนส์					
ลำดับที่ : ชนิด	ข้อความ	รัศมี	ระยะห่าง	วัสดุ	เส้นผ่านศูนย์กลาง
ภาพ	มาตรฐาน		อนันต์	-	20.0000

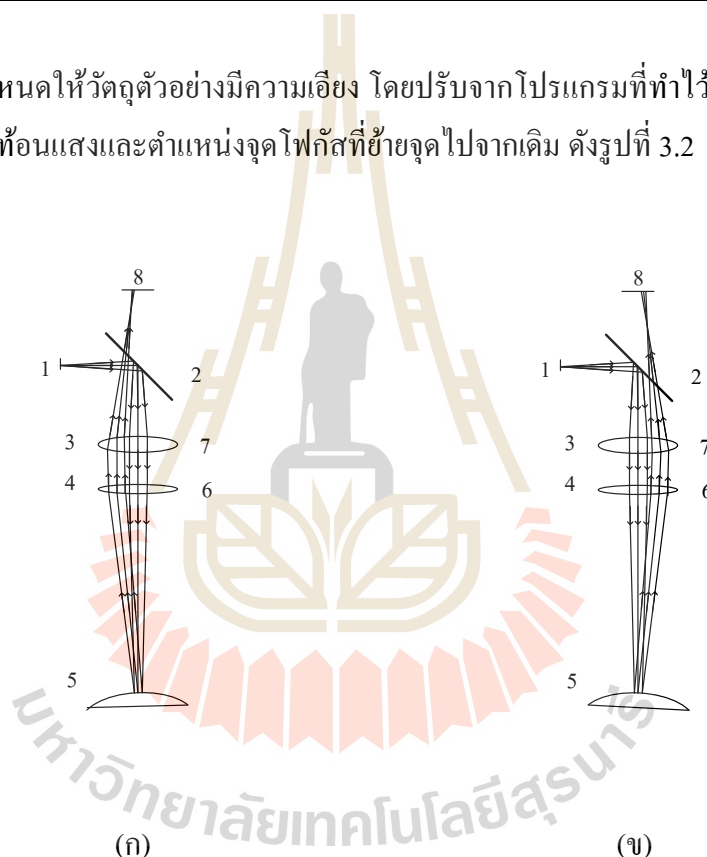
จากตารางที่ 3.7 ชื่อผิว ภาพ ชนิด มาตรฐาน เป็นการแสดงตำแหน่งของภาพ กำหนดขนาด 20 mm และไม่ใส่ความหนาเนื่องจากเป็นผิวสุดท้ายของโปรแกรม การอ่านค่าตำแหน่งจุดโฟกัสบนเซนเซอร์รับภาพ สามารถดูได้จาก แถบเมนู วิเคราะห์ แล้วไปที่ การคำนวณ เลือก ตำแหน่งของเรย์

แสง ให้ดูตำแหน่งพิกัดของผิวสุดท้าย ผิวที่ 16 เมื่อวัตถุตัวอย่างอยู่ในแนวแกนแสง ตำแหน่งจุดโฟกัสคือ $(50, -2.22 \times 10^{-14})$ mm ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ตำแหน่งจุดโฟกัสที่เซนเซอร์เมื่อวัตถุตัวอย่างอยู่ในแนวแกนแสง (ไม่เอียง)

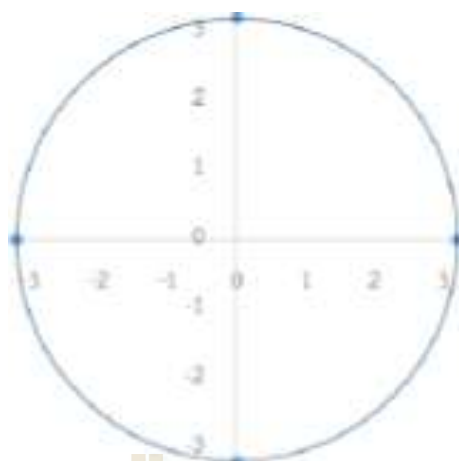
ตำแหน่งของเรย์แสง			
ลำดับที่	x-coord	y-coord	z-coord
16	0.0000E+00	5.0000E+01	-2.2204E-14

เมื่อกำหนดให้วัตถุตัวอย่างมีความเอียง โดยปรับจากโปรแกรมที่ทำไว้ก่อนหน้า เพื่อแสดงลักษณะการสะท้อนแสงและตำแหน่งจุดโฟกัสที่ย้ายจุดไปจากเดิม ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เรย์แสงสะท้อนกลับจากการปรับมุมเอียงของวัตถุตัวอย่าง (ก) กรณีผิวแรกเอียง -3° ในแกน X (ข) กรณีผิวแรกเอียง 3° ในแกน X

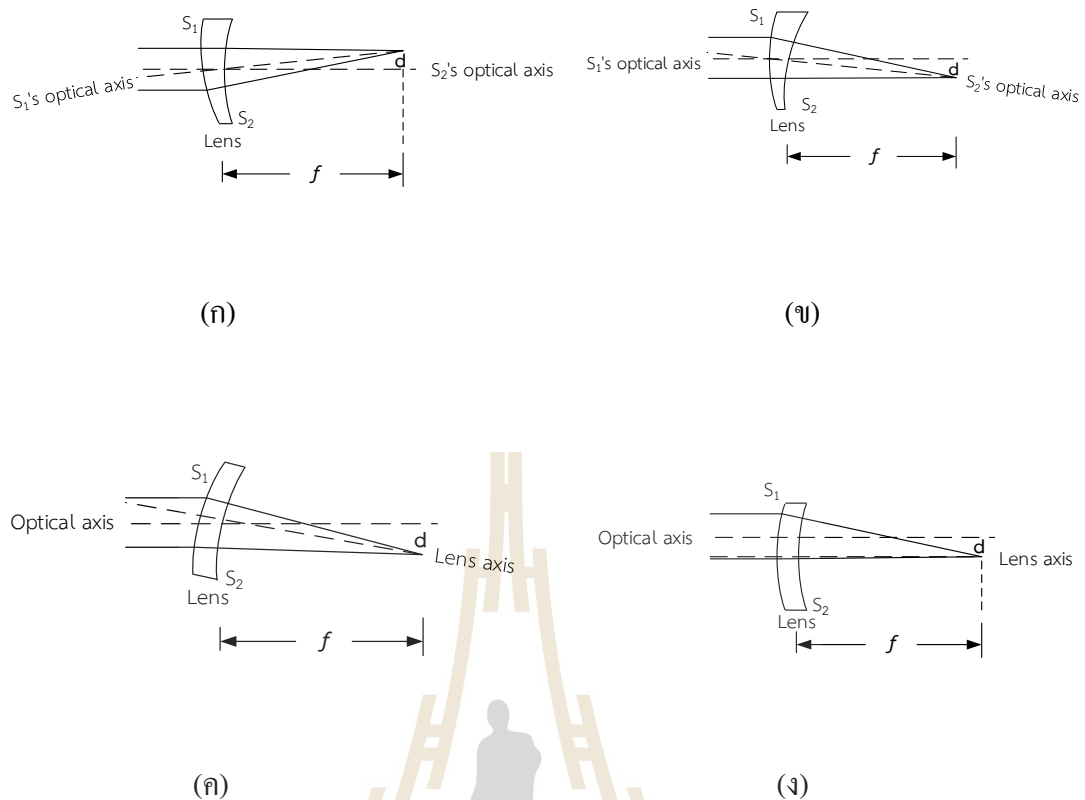
จากรูปที่ 3.2 (ก) ตำแหน่งจุดโฟกัสคือ $(50, -3.2085)$ mm จากรูปที่ 3.2 (ข) ตำแหน่งจุดโฟกัสคือ $(50, 3.2085)$ mm เนื่องจากซอฟต์แวร์ไม่สามารถหมุนวัตถุตัวอย่างได้ จึงต้องปรับมุมเอียงในแกน X และ Y แทนการหมุน ซึ่งหากพล็อตตำแหน่งต่างๆ ของการปรับมุมเอียง 4 ค่า ตามแนวแกน X และ Y ซึ่งเป็นดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงกลมที่กล้องรับภาพลือตจากข้อมูล 4 จุด ข้อมูลดังกล่าวได้จากการเอียงผิวแรกของเลนส์ตัวอย่าง 3° ทั้งนี้ขนาดของรัศมีวงกลมจะสัมพันธ์กับความไม่ตรงศูนย์กลางของผิวแรกของเลนส์ตัวอย่าง

3.2 การจำลองการวัดค่า Prism diopter ของเลนส์แว่นตาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองวัดค่า Prism diopter เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของค่าความไม่ตรงศูนย์กลางกับค่า Prism diopter โดยจำลองวิธีการวัดจากหลักการของเครื่องมือวัดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งการเกิดภาวะปริซึมของเลนส์เกิดจากจุดกึ่งกลางเลนส์ระหว่างผิวหนึ่งกับผิวสองไม่ตรงกัน แบ่งการเกิดปริซึมได้ 4 กรณี ดังรูปที่ 3.4



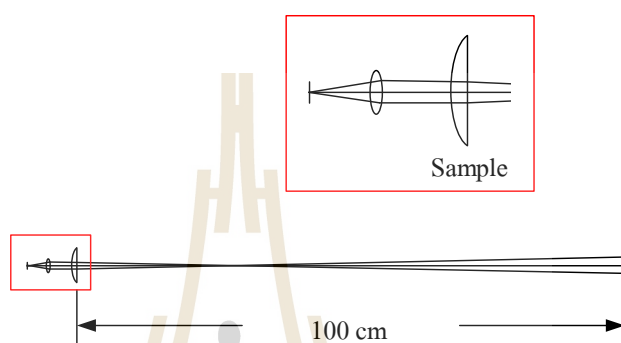
รูปที่ 3.4 (ก) กรณีผิวแรกเอียงทำให้จุดกึ่งกลางของผิวแรก (S_1) กับผิวสอง (S_2) ไม่ตรงกัน (ข) กรณีผิวสองเอียงทำให้แกนแสงทั้งสองผิวไม่ตรงกัน (ค) กรณีเอียงทั้งสองผิว (ง) กรณีเลนส์ทั้งสองผิวไม่เอียงแต่เลื่อนห่างจากแกนแสง

จากรูปที่ 3.4 (ก) เมื่อผิวแรกเอียงเพียงผิวเดียวทำให้จุดกึ่งกลางของผิวแรก (S_1) กับผิวสอง (S_2) ไม่ตรงกัน ส่งผลแกนแสงของทั้งสองผิวไม่เป็นแนวเดียวกัน แสงเลื่อนไปโฟกัสที่ระยะ d รูปที่ 3.4 (ข) กรณีเอียงเฉพาะผิวสองทำให้แกนแสงทั้งสองผิวไม่ตรงกัน ทำให้แสงที่ผ่านเลนส์โฟกัสที่ระยะ d จากรูปที่ 3.4 (ค) กรณีเอียงทั้งสองผิว ซึ่งอาจเกิดได้ทั้งในกรณีที่ทั้งสองผิวเอียงเท่ากันหรือไม่เท่ากัน (จุดกึ่งกลางผิวแรกกับผิวสองอาจไม่ตรงกัน) ก็ได้ ทำให้แนวแกนของเลนส์ไม่ตรงกับระนาบแสง จากรูปที่ 3.4 (ง) กรณีเลนส์ทั้งสองผิวไม่เอียงแต่เลื่อนห่างจากแกนแสง ทำให้แนวแกนของเลนส์ไม่ตรงกับระนาบแสง

หากจุดกึ่งกลางของผิวเลนส์ทุกผิวอยู่บนแนวแกนแสง แสงที่ผ่านเลนส์มีระยะโฟกัสอยู่บนแกนแสงทำให้ไม่เกิดปริซึม Prism diopters เกิดจากการเอียง หรือเลื่อนของผิวเลนส์ ผิวใดผิวหนึ่งหรือทั้งสองผิว ทำให้แนวแกนของผิวเลนส์ไม่ตรงกับแนวระนาบแสง เมื่อแสงผ่านเลนส์จุดโฟกัสไม่อยู่บนแนวแกนแสงเช่นกัน ซึ่งระยะห่างของจุดโฟกัสกับแกนแสง กำหนดให้เป็นระยะ d ค่า Prism diopters สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 17

$$\Delta = \frac{d}{f} \quad (17)$$

การจำลองวัดปริซึมของเลนส์ โดยให้เรย์แสงขนานทะลุผ่านเลนส์วัตถุตัวอย่าง เพื่อแสดงการหักเหของแสงหลังจากผ่านเลนส์ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การจัดอุปกรณ์สำหรับจำลองวัดค่า Prism diopter

เมื่อปริซึมเกิดจากลักษณะทางกายภาพของเลนส์ ทั้งกรณีผิวเลนส์เอียงหรือเอียง เป็นดั่ง ซึ่ง โปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถจำลองการเอียงหรือเอียงของผิวเลนส์ได้ โดยใช้การวัดความไม่ตรงศูนย์ เปรียบเทียบกับค่า Prism diopter ของเลนส์ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ ซึ่งมีการจำลองวัตถุ ตัวอย่าง ตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 การจำลองวัตถุตัวอย่าง

ข้อมูลเลนส์						
ลำดับที่ : ชนิด		รัศมี	ระยะห่าง	วัสดุ	เส้นผ่านศูนย์กลาง	เอียงแกน X
1	มาตรฐาน	อนันต์	100.000000		0.000000	0.000000
2	เอียง	อนันต์	0.000000		0.000000	0.060000
3	มาตรฐาน	71.300000	5.300000	1.50,56. 8	65.000000	0.000000
4	มาตรฐาน	153.400000	0.000000		65.000000	0.000000
5	เอียง	อนันต์	0.000000		0.000000	-0.060000
6	มาตรฐาน	อนันต์	1000.000000		0.000000	0.000000
ภาพ	มาตรฐาน	อนันต์	0.000000		65.000000	0.000000

กำหนดให้ผิวแรกห่างจากแหล่งกำเนิด 100 mm ผิวที่ 2 คือผิวแรก ของเลนส์ รัศมี 71.3 mm ขนาด 65 mm กำหนดเป็นผิวเอียง เพื่อให้สามารถรับมุมเอียงของผิวได้ ผิวแรกห่างจากผิวสอง 5.3 mm การตั้งค่าดัชนีหักเห โดยดับเบิ้ลคลิกช่อง วัสดุ ของผิวที่ 3 เลือก Model type ทำให้สามารถใส่ค่าดัชนีหักเห ตามต้องการได้ ซึ่งวัสดุ CR-39 ใช้ค่าดัชนีหักเห 1.498 ค่า Abbe 56.8 Surf. 4 คือผิวสองของเลนส์ รัศมี 153.4 mm ขนาด 65 mm กำหนดเป็นผิวเอียง ห่างจาก Image 1,000 mm

การจำลองวัดค่าปริซึม ซอฟแวร์สามารถวัดระยะ d ในสมการที่ 3.1 ซึ่งต้องคำนวณต่อจากการทราบค่า d หากไม่ทราบความยาวโฟกัสของวัตถุตัวอย่าง สามารถคำนวณโดยวัดการหักเหของแสง (d) ที่ระยะห่างจากเลนส์ 100 cm ตามสมการที่ 3.2

$$\Delta = \frac{d_{cm}}{100 \text{ cm}} \quad (18)$$

การจำลองการเกิดปริซึมเพื่อวัดค่า Prism diopter สามารถทำได้โดยปรับให้ผิวแรกมีมุมเอียง ซึ่งทดลองให้เอียง 1 mrad. ซึ่งเท่ากับ 0.06° ใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 การกำหนดค่ามุมเอียงของผิวแรก

ข้อมูลเลนส์						
ลำดับที่ : ชนิด		รัศมี	ระยะห่าง	วัสดุ	เส้นผ่านศูนย์กลาง	เอียงแกน X
1	มาตรฐาน	อนันต์	100.00000 0		0.000000	0.000000
2	Coordbrk	อนันต์	0.000000		0.000000	0.060000
3	มาตรฐาน	71.300000	5.300000	1.50,56.8	65.000000	0.000000
4	มาตรฐาน	153.40000 0	0.000000		65.000000	0.000000

เมื่อกำหนดให้ผิวแรกเอียง แต่จุดกึ่งกลางผิวสองยังอยู่ในแนวแกนแสง ซึ่งทำให้จุดกึ่งกลางของผิวแรกกับผิวสองไม่ตรงกัน ทำให้เกิดภาวะปริซึมที่เลนส์ จากระยะ 100 cm ห่างจากเลนส์ ตำแหน่งของแสงที่เซนเซอร์รับภาพทราบได้จากหน้า Ray Trace ระยะ d เท่ากับ 0.53 mm หรือ 0.053 cm แล้วนำค่า d ที่ได้จากโปรแกรม คำนวณตามสมการที่ 18 จะได้ค่า Prism diopter (Δ) เท่ากับ 0.053Δ

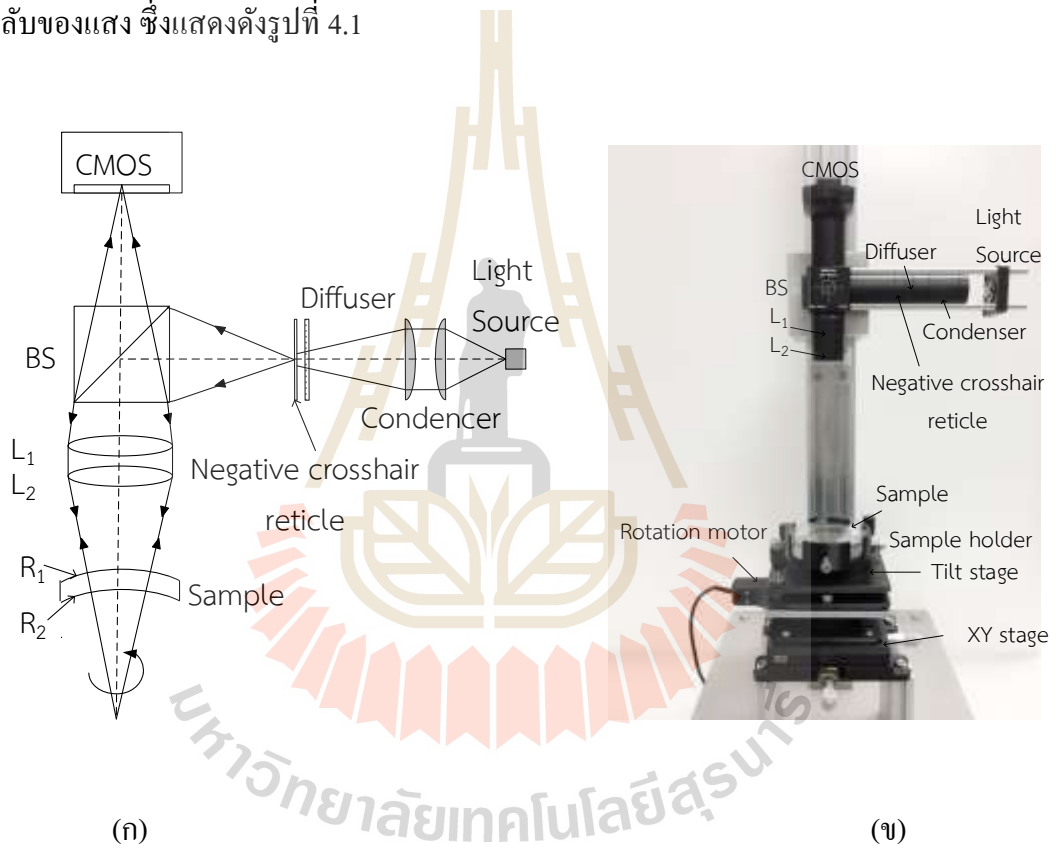


บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 จุดทดลองสำหรับวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์เว้าตา

การวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของทุกผิวของเลนส์หรือแม่แบบต้องใช้เทคนิคการวัดการสะท้อนกลับของแสง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การจัดอุปกรณ์ทดลองสำหรับวัดค่าความไม่ตรงศูนย์กลาง (ก) แผนภาพการจัดอุปกรณ์ (ข) อุปกรณ์ทดลองจริง

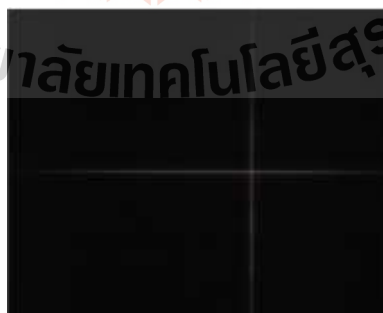
จากรูปที่ 4.1 (ก) ใช้แหล่งกำเนิดแสงด้วยไดโอดเปล่งแสงสีแดงที่มีความเข้มสูง (Dominant Opto Technology) ความยาวคลื่น 625 nm แสงจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านเลนส์นูน 2 ชั้น ความยาวโฟกัส 16 mm เพื่อโฟกัสแสงไปยังเรติเคิล (Thorlabs, R1DS3N) โดยผ่าน Diffuser (Thorlabs, DG10-600-A) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้แสงสม่ำเสมอบริเวณเรติเคิล เพื่อให้แสงที่ผ่านเรติเคิลมีความเข้ม

เท่ากันทั่วบริเวณอุปกรณ์แยกแสง (Thorlabs, CM1-BS013) ใช้สำหรับความยาวคลื่น 400 – 700 nm เพื่อแยกแสงจากแหล่งกำเนิดแสงกับแสงสะท้อนจากผิววัตถุตัวอย่าง เลนส์ L_1 สำหรับจัดแสงขนาน ความยาวโฟกัสเท่ากับ 100 mm (Thorlabs, LA1509-ML) เลนส์ใกล้วัตถุ L_2 ต่อจากเลนส์จัดแสงขนาน สำหรับจัดให้ลำแสงตั้งฉากกับผิวของวัตถุตัวอย่าง มีความยาวโฟกัส 200 mm (Thorlabs, LA1708-ML) กล้องรับภาพ CMOS (Thorlabs, DCC1545M) สำหรับแสดงภาพเรติเคิลที่สะท้อนจากผิวของวัตถุตัวอย่าง

วัตถุตัวอย่างวางอยู่บน (Sample holder) ออกแบบโดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติ ทำขึ้นเพื่อยึดจับตัวอย่างไม่ให้สั่นหรือเคลื่อนที่หากมอเตอร์หมุน จากรูปที่ 4.1 (ก) เมื่อลำแสงขนานผ่านเลนส์ขนาน L_2 แสงโฟกัสที่ระยะ f_0 ซึ่งเป็นความยาวโฟกัสของเลนส์ L_2 ถ้าจุดโฟกัสแสงอยู่แนวเดียวกับจุดกึ่งกลางผิวโค้ง แสงที่ตกกระทบผิวโค้งจะสะท้อนกลับในทิศทางเดิม และโฟกัสที่กล้องรับภาพ กำหนดจุดโฟกัสของกรณีนี้เป็นจุดอ้างอิง จากนั้นหมุนวัตถุตัวอย่างรอบแกนหมุน (Reference axis) 360° แล้วบันทึกตำแหน่งจุดโฟกัสทุกตำแหน่งตลอดการหมุน โดยใช้ Motorized Rotation Stage ในการหมุนวัตถุตัวอย่าง (Thorlabs, PRM1Z8) ควบคุมการหมุนด้วยซอฟต์แวร์ (Thorlabs, APT User) ด้านล่างสุดของชุดคือ XY-Stage (Thorlabs, XYT1) ใช้สำหรับเลื่อนตัวอย่างในแนวระนาบ เพื่อปรับให้กึ่งกลางเลนส์อยู่ในแนวแกนอ้างอิง

4.2 การประมวลผลภาพ

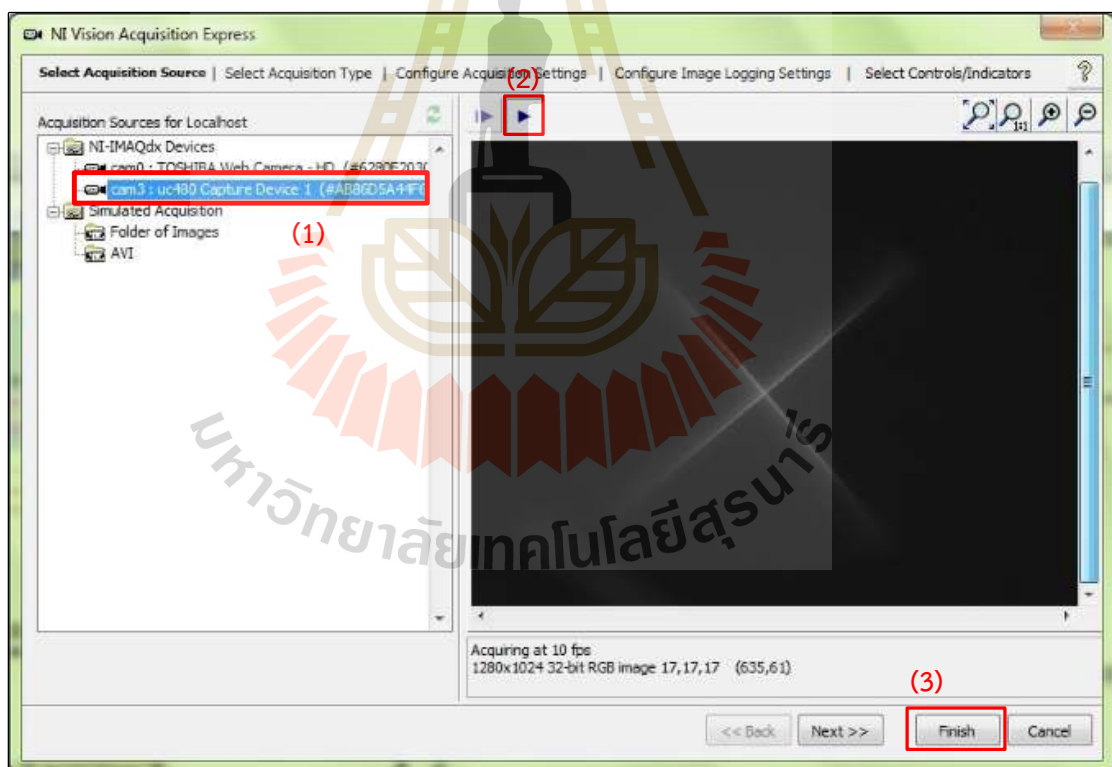
เมื่อจัดชุดทดลองตามรูปที่ 4.1 เมื่อเปิดแหล่งกำเนิดแสง รูปของแสงที่ผ่านเรติเคิลมีลักษณะดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพเรติเคิลจากกล้อง CMOS

จากนั้นเชื่อมต่อกล้องกับคอมพิวเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาจาก LabVIEW ถ้าจัดให้ลำแสงตกกระทบบนวัตถุแล้วโฟกัสของวัตถุตัวอย่าง แสงที่สะท้อนกลับจะโฟกัสที่ CMOS และแสดงภาพเส้นตรงแนวตั้งและแนวนอนสีขาว (เกิดจากความเข้มของแหล่งกำเนิดแสง) ที่มีจุดตัดกันของเส้นตรงทั้งสอง ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเกิดจากการสะท้อนกลับของแสง เมื่อแสงตกกระทบบนวัตถุตัวอย่าง สามารถนำไปประมวลผลต่อไป

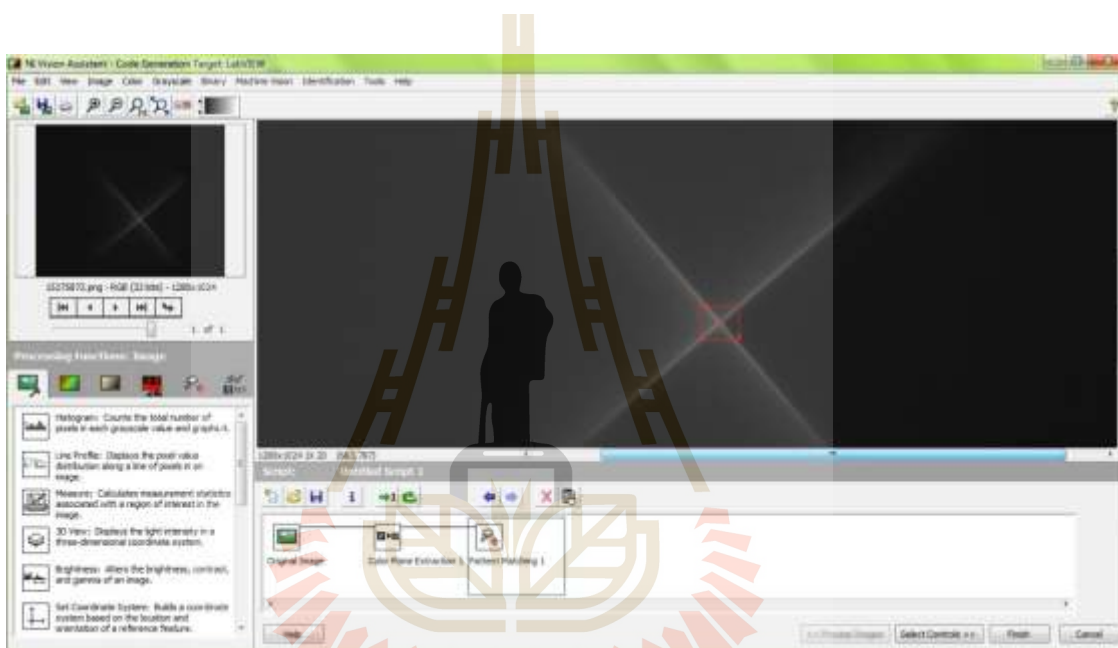
เมื่อสามารถแสดงภาพเรติเคิลได้ ต้องหมุนตัวอย่างรอบแกนหมุน 360° เพื่อตรวจสอบว่าตำแหน่งของภาพเรติเคิลอยู่ที่ตำแหน่งเดิมหรือไม่ขณะหมุนตัวอย่าง ซึ่งการหมุนตัวอย่าง ภาพเรติเคิลจะหมุนตามไปด้วย ซึ่งเรติเคิลจะหมุนเป็นวงกลม โดยให้ซอฟต์แวร์คำนวณหาจุดกึ่งกลางของเรติเคิล ขั้นตอนนี้สามารถทำได้โดยเลือก “Vision Acquisition” วางไว้ที่หน้า Block diagram เมื่อดับเบิลคลิกที่บล็อก Vision Acquisition จะแสดงหน้าต่างที่สามารถเลือกอุปกรณ์ที่ต้องการใช้แสดงภาพ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 หน้าต่าง Vision Acquisition สำหรับเลือกกล้องที่ใช้แสดงภาพบน LabVIEW

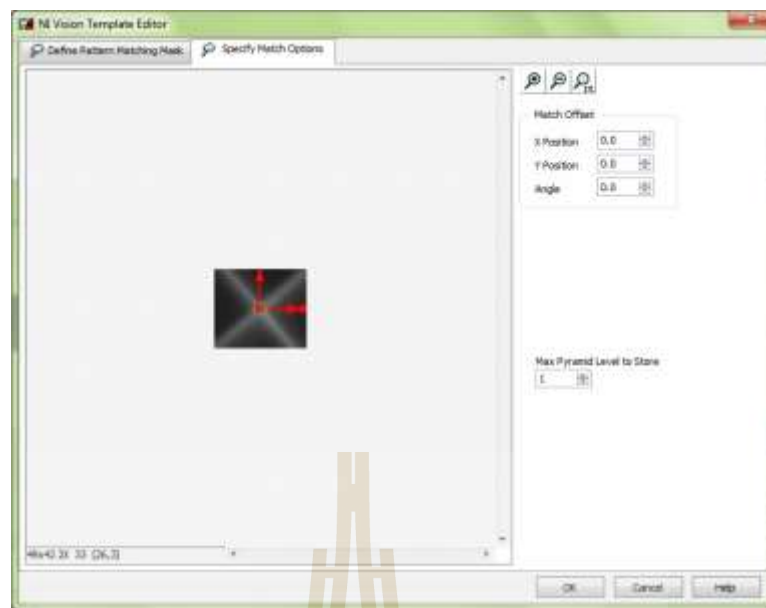
รูปที่ 4.3 เลือกกล้องที่ต้องการใช้ (1) และสามารถกดปุ่ม “Grab” เพื่อให้แสดงภาพของกล้องได้ (2) หากเลือกอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว ให้กดปุ่ม “Finish” (3) ซอฟต์แวร์จะบันทึกอุปกรณ์ที่ผู้ใช้เลือกไปแสดงที่หน้า Front panel

การคำนวณจุดกึ่งกลางภาพหรือจุดตัดของเรดิเคิล จะต้องกำหนดบริเวณที่สนใจในการคำนวณจุดกึ่งกลางก่อน ซึ่งใช้วิธีการสร้างภาพต้นแบบ แล้วให้ซอฟต์แวร์หาบริเวณที่มีภาพตรงกับภาพต้นแบบที่ไว้ วิธีนี้เรียกว่า “Pattern matching” ดังรูปที่ 4.4 เมื่อพบตำแหน่งที่มีภาพตรงกับต้นแบบให้คำนวณหาตำแหน่งจุดกึ่งกลาง



รูปที่ 4.4 หน้าต่าง Vision Assistant สำหรับคำนวณหาตำแหน่งกึ่งกลางของเรดิเคิล

ในหน้าต่างของ Vision Assistant สามารถเลือกบล็อกไดอะแกรมเกี่ยวกับการปรับปรุงภาพหรือการควบคุมบนภาพได้ รูปที่ 4.4 ได้เลือกบล็อกไดอะแกรม “Color plane extraction” ถัดจาก Original image เพื่อกำหนดให้ภาพดั้งเดิมเป็นภาพ 8 บิต จึงจะสามารถใช้กับบล็อกไดอะแกรม “Pattern matching” ได้ ซึ่งในส่วนของ Pattern matching สามารถสร้างภาพต้นแบบ โดยเลือกบริเวณที่สนใจ จากหน้าจอที่แสดงรูปจาก Original image ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การสร้างภาพต้นแบบของ Pattern matching

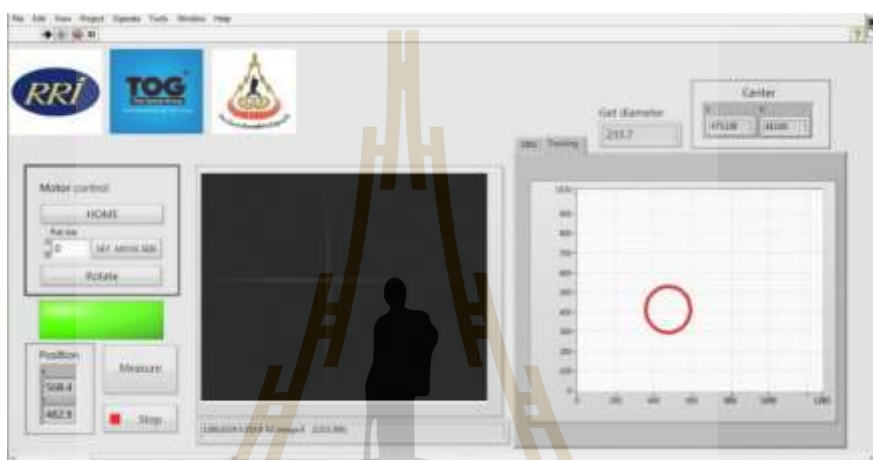
ถัดจากขั้นตอน Pattern matching เป็นการแสดงจุดตัดบนภาพ เพื่อให้ผู้ใช้เข้าใจได้ว่าซอฟต์แวร์คำนวณหาตำแหน่งจุดกึ่งกลางเรติเคิล โดยใช้บล็อกโคอะแกรม “Overlay”

เมื่อซอฟต์แวร์สามารถคำนวณจุดกึ่งกลางของเรติเคิลได้ ต้องหมุนตัวอย่างรอบแกนหมุน 360° ขณะหมุนตัวอย่าง ภาพเรติเคิลจะหมุนตามไปด้วย ซึ่งเรติเคิลจะหมุนเป็นวงกลม หมุนตัวอย่างด้วยมอเตอร์หมุนมุมควบคุมด้วยซอฟต์แวร์ Thorlabs, APT User ดังรูปที่ 4.6 เลือก “Setting” เพื่อกำหนดองศาของการหมุนก่อนจากนั้นสั่งให้ LabVIEW บันทึกข้อมูลของจุดกึ่งกลางเรติเคิลทุกครั้งทีภาพเลื่อนไปที่ตำแหน่งอื่น จนกระทั่งหมุนตัวอย่างครบ 360°



รูปที่ 4.6 หน้าต่างของซอฟต์แวร์ Thorlabs, APT User

เมื่อหมุนตัวอย่าง 360 องศา เรติเคิลจะหมุนเป็นวงกลมซึ่งกำหนดให้แสดงบนกราฟด้านขวา ดังรูปที่ 7 ซึ่งขนาดของวงกลมมีผลต่อค่าความไม่ตรงศูนย์ จึงต้องคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม กำหนดให้เป็น Δy คือผลต่างของตำแหน่งสูงสุดกับตำแหน่งต่ำสุด โดยให้ซอฟต์แวร์คำนวณอัตโนมัติ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่คำนวณได้เป็นหน่วยของพิกเซล ขนาดพิกเซลของกล้อง CMOS ที่ใช้ทดลองมีขนาด $5.2 \times 5.2 \mu\text{m}$ ถ้าวางกลมในรูปที่ 4.7 มีขนาด 233.7 พิกเซล ดังนั้นขนาดของวงกลมเท่ากับ 1.22 mm

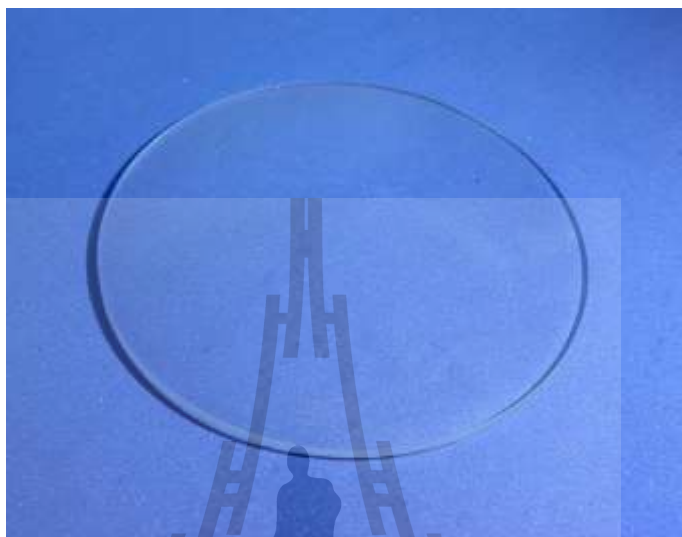


รูปที่ 4.7 หน้าต่างการประมวลผลภาพ

เนื่องจากค่าความไม่ตรงศูนย์เกิดจากจุดกึ่งกลางความโค้งของเลนส์ไม่ตรงกับแนวแกนแสง แต่เลนส์บางรุ่นที่ไม่ผ่านการตรวจสอบ สาเหตุหนึ่งเกิดจากค่า Prism diopter สูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ โดยเลนส์ที่มี Optical power อยู่ในช่วง 0.00 ถึง 2.00 ต้องมีค่า Prism diopter ไม่เกิน $0.25 + 0.1 \times S_{max}$ ถ้าเลนส์ที่มี Optical power อยู่ในช่วง 2.00 ถึง 10.00 ต้องมีค่า Prism diopter ไม่เกิน $0.37 + 0.1 \times S_{max}$ ซึ่ง S_{max} คือ Optical power ของเลนส์ [11] ถ้าเลนส์มี Optical power เท่ากับ 4.00 ค่า Prism diopter ต้องไม่เกิน 0.77 จึงต้องการทราบว่าค่า Prism diopter สัมพันธ์กับค่าความไม่ตรงศูนย์หรือไม่ ซึ่งได้วัดเลนส์รุ่นต่างๆ ของบริษัทฯ

ตัวอย่างที่ใช้ทดลองเป็นเลนส์ที่มีผิวทรงกลมทั้งสองผิว ดังรูปที่ 4.8 ผลิตจากวัสดุ Columbia Resin 39 (CR-39) มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.498 ที่ความยาวคลื่น 589.29 nm ซึ่งตัวอย่างที่ทดลองมีทั้งหมด 3 รุ่น แบ่งตามค่า Optical power ของเลนส์ ประกอบด้วย Optical power 2.50 4.00 และ 5.50 ตามลำดับ ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยออปติคอลลจิป จำกัด (มหาชน) เพื่อให้ตัวอย่างเป็นข้อมูลในการวัด จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่าง ได้แก่ รัศมีความโค้ง (Automation

& Robotics, Focovision SR-2) ความหนาตรงกลางเลนส์ (MITUTOYO, MIT3255930A) Optical power (NIDEK, LM-600P) และ Prism diopter (NIDEK, LM-600P) โดยค่าดังกล่าวสามารถวัดได้ โดยเครื่องมือที่บริษัทฯ ใช้งานในปัจจุบัน



รูปที่ 4.8 เลนส์ตัวอย่างที่ใช้ทดลอง

การวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของงานนี้เป็นการวัดวัดที่ละผิวของเลนส์ กำหนดให้ผิวด้านบนคือผิวแรก (R_1) และผิวด้านล่างคือผิวสอง (R_2) โดยเริ่มวัดที่ผิวแรกก่อน กำหนดให้ส่วนของชุดเลนส์ L_1 และ L_2 เป็นหัววัด ปรับให้อยู่สูงจากตัวอย่างพอประมาณแล้วเลื่อนหัววัดลงในแนวตั้ง ถ้ารัศมี ความโค้งของผิวแรกต่ำกว่ารัศมีความโค้งของผิวสอง เมื่อเลื่อนหัววัดกระทั่งเห็นภาพเรติเคิลครั้งแรกที่กล้อง CMOS แสดงว่าเป็นตำแหน่งการสะท้อนจากผิวแรก จากนั้นปรับให้ผิวแรกเป็นค่าเริ่มต้นการวัด ซึ่งปรับด้วย เอียง t stage แล้วหมุนตัวอย่างหนึ่งรอบ แล้วปรับใหม่จนกระทั่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็กที่สุด แล้วบันทึกขนาดวงกลมที่วัดได้จากผิวแรกกำหนดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคือ Δy_1 มีหน่วยเป็นพิกเซล ต่อมาเลื่อนหัววัดลงในแนวตั้งจนกระทั่งพบเรติเคิลอีกครั้ง ซึ่งเป็นการสะท้อนจากผิวสอง หมุนตัวอย่างหนึ่งรอบแล้วบันทึกผล กำหนดให้วงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคือ Δy_2 มีหน่วยเป็นพิกเซล แต่ละตัวอย่างมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

4.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุตัวอย่างเป็นเลนส์ที่ผลิตจากบริษัท ไทยออปติคอลกรุ๊ป จำกัด และได้รับความอนุเคราะห์เลนส์บางรุ่นสำหรับใช้ทำการทดลองวัดความไม่ตรงศูนย์ โดยเลนส์ที่ได้รับจากบริษัทฯ เป็นเลนส์ที่ค่าพารามิเตอร์ค่าใดค่าหนึ่งไม่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน เช่น ค่าเพาเวอร์ของเลนส์ ค่าปริซึม เป็นต้น ซึ่งเป็นการคัดแยกของบริษัทฯ จากการรวบรวมเลนส์ส่วนหนึ่งที่ไม่ผ่านการตรวจสอบที่นำมาใช้เป็นวัตถุตัวอย่าง จำแนกได้เป็น 4 รุ่น คือ รุ่นที่ 1 เลนส์เพาเวอร์ 5.50 จำนวน 19 ชิ้น รุ่นที่ 2 เลนส์เพาเวอร์ 4.00 จำนวน 10 ชิ้น รุ่นที่ 3 เลนส์เพาเวอร์ 2.50 จำนวน 10 ชิ้น และ รุ่นที่ 4 เลนส์ที่มีค่าปริซึมสูงจำนวน 12 ชิ้น รวมทั้งสิ้น 51 ชิ้น วัตถุตัวอย่างมีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.1 โดยค่าเหล่านี้วัดจากเครื่องมือวัดที่ใช้ในบริษัทฯ

เลนส์วัดรัศมีความโค้งด้วยเครื่องมือวัดชื่อ Focovision CX0 ผลิตโดย Automation & Robotics วัดความหนาตรงกลางเลนส์ (CT) ด้วย Thickness gage ค่า Optical power ของเลนส์สามารถคำนวณได้จาก $S = (n-1)/R_1 + (n-1)/R_2$ เมื่อ S คือ Optical power ของเลนส์ Δ คือค่า Prism diopter ที่วัดด้วยเครื่อง Autolensmeter ผลิตโดย NIDEK

จากตารางที่ 4.1 R_1 คือ รัศมีความโค้งของผิวที่หนึ่ง R_2 คือรัศมีความโค้งของผิวที่สอง PWR คือค่าเพาเวอร์ของเลนส์ n คือดัชนีหักเห CT คือความหนาตรงกลางเลนส์ และ Δ คือค่าปริซึมของเลนส์แต่ละชิ้น

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของเลนส์ตัวอย่างที่ใช้ทดลอง

ครั้งที่	ตัวอย่างที่	R_1 (mm)	R_2 (mm)	PWR	n	CT (mm)	Δ
1	1	64.17	197.1	5.50	1.498	6.96	0.20
	2	64.29	199.6	5.50	1.498	6.96	0.17
	3	64.2	196.5	5.50	1.498	6.96	0.17
	4	67.39	197.7	5.50	1.498	6.96	0.48
	5	67.25	191.8	5.50	1.498	6.96	0.08
	6	67.51	191.2	5.50	1.498	6.96	0.04
	7	67.55	193.8	5.50	1.498	6.96	0.33
	8	74.59	158.2	5.50	1.498	6.72	0.21

ครั้งที่	ตัวอย่างที่	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	PWR	n	CT (mm)	Δ
1	9	74.57	157	5.50	1,498	6.72	0.04
	10	73.76	194.6	5.50	1,498	6.72	0.55
	11	64.80	197.2	5.50	1,498	7.02	0.22
	12	64.74	198.5	5.50	1,498	7.02	0.11
	13	64.84	197.5	5.50	1,498	7.02	0.32
	14	64.77	196.5	5.50	1,498	7.02	0.17
	15	64.61	196.8	5.50	1,498	7.02	0.24
	16	64.68	197.3	5.50	1,498	7.02	0.34
	17	65.23	197.9	5.50	1,498	7.02	0.39
	18	65.77	198.3	5.50	1,498	7.02	0.23
	19	65.25	197.2	5.50	1,498	7.02	0.36
	2	1	71.30	153.4	4.00	1,498	5.3
2		71.38	152.3	4.00	1,498	5.3	0.26
3		71.18	152.9	4.00	1,498	5.3	0.23
4		71.21	154.1	4.00	1,498	5.3	0.06
5		71.28	154	4.00	1,498	5.3	0.20
6		71.13	155	4.00	1,498	5.3	0.05
7		71.15	153.2	4.00	1,498	5.3	0.08
8		71.21	153.9	4.00	1,498	5.3	0.13
9		71.32	152.8	4.00	1,498	5.3	0.17
10		71.26	153.4	4.00	1,498	5.3	0.23
3	1	94.69	156.7	2.50	1,498	1.82	0.08
	2	93.42	156.5	2.50	1,498	1.82	0.31
	3	93.67	155.8	2.50	1,498	1.82	0.16
	4	94.12	156.2	2.50	1,498	1.82	0.19

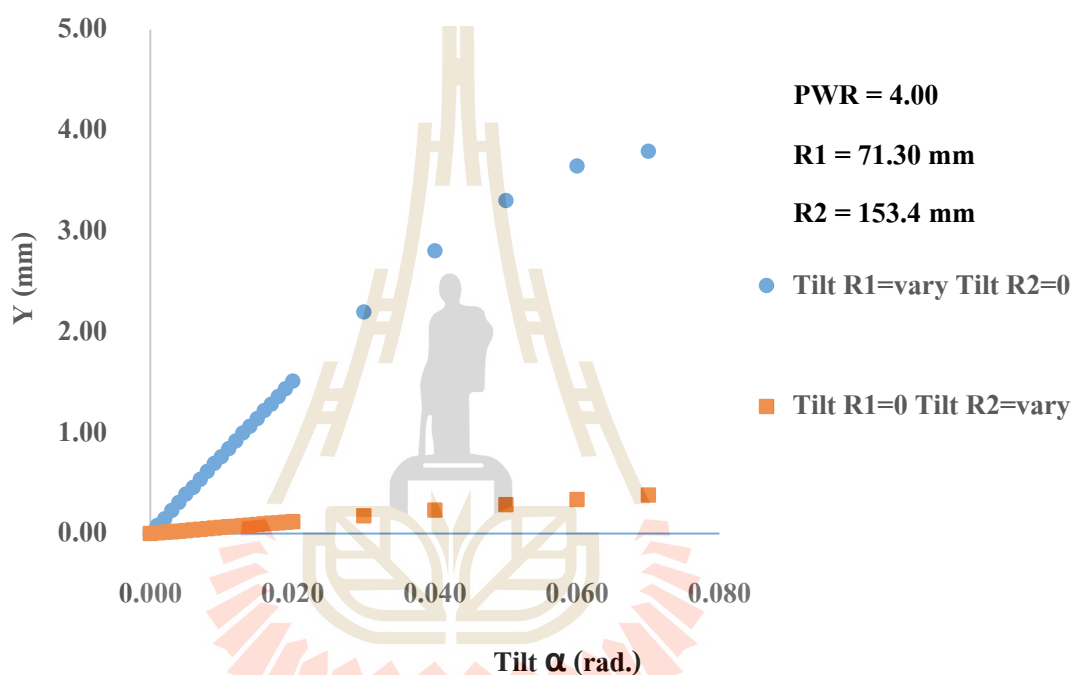
ครั้งที่	ตัวอย่างที่	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	PWR	n	CT (mm)	Δ
3	5	94.34	156.7	2.50	1.498	1.82	0.41
	6	95.09	155.3	2.50	1.498	1.82	0.21
	7	94.44	155.6	2.50	1.498	1.82	0.26
	8	93.97	156.2	2.50	1.498	1.82	0.14
	9	95.11	156.7	2.50	1.498	1.82	0.24
	10	94.72	156.4	2.50	1.498	1.82	0.11
	4	1	217.6	79.62	3.75	1.498	1.77
2		219.4	78.23	3.75	1.498	1.77	0.62
3		222.5	79.62	3.75	1.498	1.77	0.54
4		93.87	157.6	2.00	1.498	1.96	0.43
5		95.17	155.5	2.00	1.498	1.96	0.45
6		110.3	119.9	0.50	1.498	2.32	0.26
7		107.5	122.3	0.50	1.498	2.32	0.29
8		95.55	149.1	1.75	1.498	1.97	0.48
9		95.36	159.3	2.25	1.498	3.54	0.71
10		95.02	161.1	2.25	1.498	3.54	0.45
11		94.87	157.9	2.25	1.498	3.59	0.79
12		94.55	158	2.25	1.498	3.59	0.41

4.4 ผลการทดลองจาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.4.1 ผลการทดลองวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์

จากการจำลองวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์ ทำให้ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวอย่างของผลการจำลองด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไม่ตรงศูนย์กลางกับค่า Prism diopter โดยใช้ตัวอย่างเป็นเลนส์ที่รัศมีความโค้งของผิวแรกเท่ากับ 71.30 mm รัศมีความโค้งของผิวที่สองเท่ากับ 153.4 mm ความหนา 5.30 mm ค่าดัชนีหัก

เท 1.498 (เลนส์รุ่นที่ 2 ตัวอย่างที่ 1 จากตารางที่ 4.1) โดยวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของผิวแรกก่อน ปรับมุมเอียงของผิวแรกเริ่มจาก 0.01 rad. อ่านค่าตำแหน่งจุดโฟกัสแสงที่สะท้อนกลับในซอฟต์แวร์ แล้วบันทึกผล ต่อมาเพิ่มมุมเอียงครั้งละ 0.01 rad. แล้วบันทึกผลของตำแหน่งจุดโฟกัสการสะท้อนของแสง จนกระทั่งมุมเอียงเท่ากับ 0.20 rad. จากนั้นปรับมุมเอียงเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.10 rad. แล้วบันทึกผลเพื่อย่นระยะเวลาในการคำนวณ จนกระทั่งมุมเอียงเท่ากับ 0.70 rad. เนื่องจากถ้าปรับมุมเอียงมากกว่านี้ แสงสะท้อนกลับจะหลุดขอบเลนส์



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์ที่ค่า PWR = 4.00 กรณีปรับเฉพาะผิวแรกเอียงจากน้อยไปมาก (วงกลม) และกรณีปรับเฉพาะผิวสองเอียงจากน้อยไปมาก (สี่เหลี่ยม)

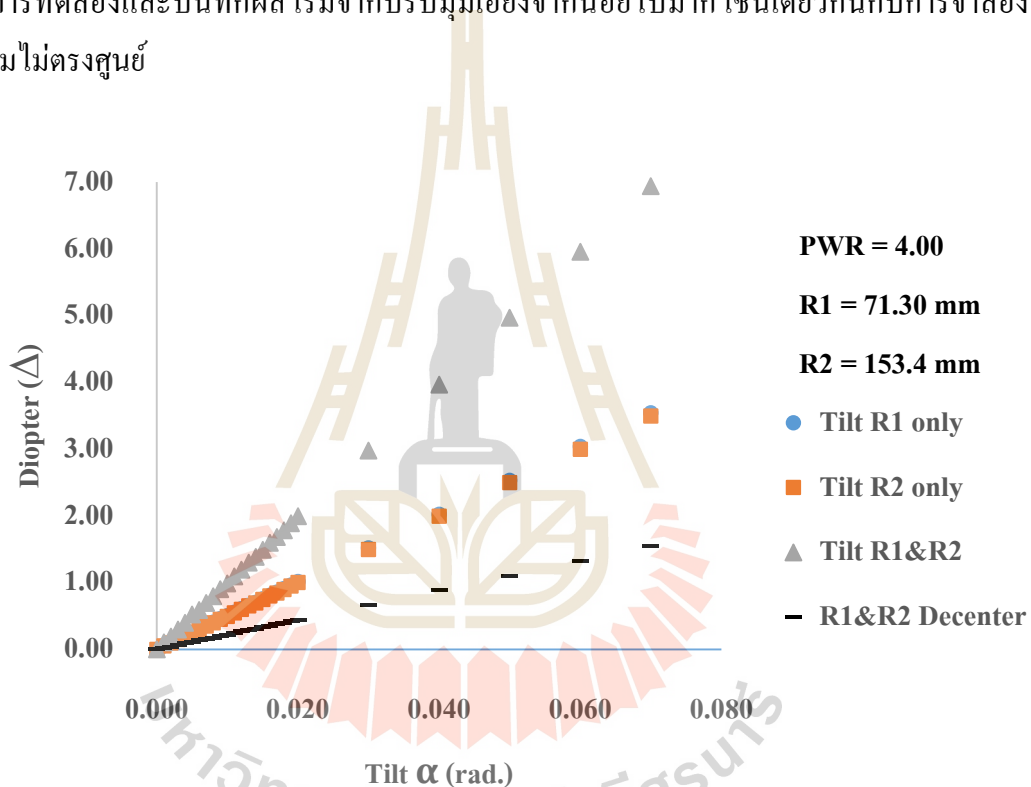
จากรูปที่ 4.9 แกนนอนเป็นมุมเอียงที่ปรับในซอฟต์แวร์ เพื่อจำลองว่ามุมเอียงค่าหนึ่งจะทำให้จุดโฟกัสของแสงสะท้อนอยู่ที่ตำแหน่งใด แกนตั้ง (Y) คือตำแหน่งของแสงสะท้อนกลับที่เป็นผลมาจากผิวเลนส์มีความเอียง ซึ่งได้จำลองการวัดทั้งสองผิว แต่ผลกระทบจากแสงที่ผ่านผิวแรกมาตกกระทบที่ผิวสอง ทำให้ค่าความไม่ตรงศูนย์กลางของผิวสองคลาดเคลื่อน ดังนั้น จำเป็นต้องแก้ผลกระทบของแสงจากผิวแรกมายังผิวสอง

ค่า Y ที่อ่านได้จากซอฟต์แวร์ ถ้าเปรียบเทียบกับ Δy ซึ่งเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่เกิดจากการหมุนตัวอย่าง 360° เพื่อลากจุดโฟกัสแสงให้เคลื่อนที่ครบรอบเป็นวงกลมที่ตำแหน่งภาพ

จากสมการที่ 2 จะได้ว่า Δy เท่ากับสองเท่าของ Y ดังนั้นค่าความไม่ตรงศูนย์ต้องนำผลการทดลองคำนวณตามสมการ $\sigma = (\Delta y f_0)/(4Rf_c)$

4.4.2 ผลการวัดค่า Prism diopter ของเลนส์

การวัดค่าปริซึมของเลนส์ใช้วิธีการจำลองตามหลักการวัดของเครื่องมือที่ใช้ในบริษัทฯ เป็นการวัดโดยให้แสงขนานทะลุผ่านเลนส์ หากมีการหักเหของแสงหลังจากผ่านเลนส์แล้ว แสดงว่ามีการเกิดปริซึมที่เลนส์นั้น ซึ่งจำลองการเกิดปริซึมโดยปรับให้เลนส์ผิวแรกเอียงค่าหนึ่ง หลังจากทีแสงผ่านเลนส์ไปแล้วระยะ 100 cm อ่านค่าจุดตกกระทบของแสงที่ตำแหน่งภาพ โดยวิธีการทดลองและบันทึกผล เริ่มจากปรับมุมเอียงจากน้อยไปมาก เช่นเดียวกันกับการจำลองวัดความไม่ตรงศูนย์

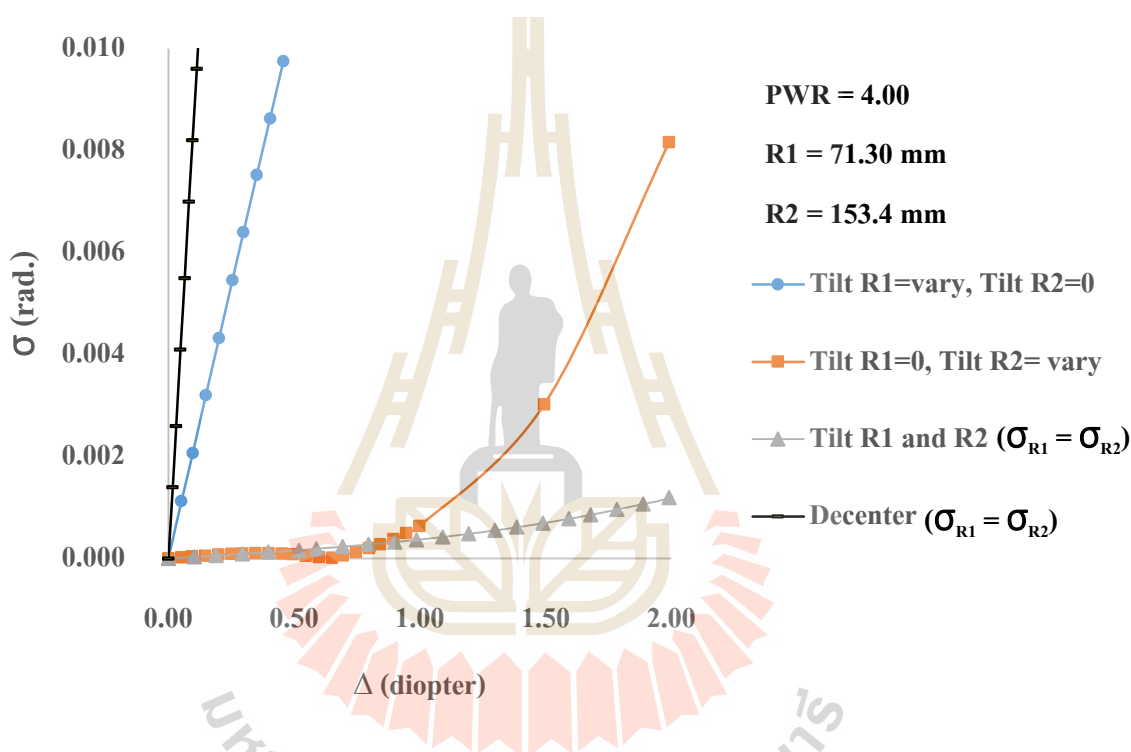


รูปที่ 4.10 ผลการจำลองวัด Prism diopter เลนส์ที่ค่า PWR = 4.00 กรณีปรับเฉพาะผิวแรกเอียงจากน้อยไปมาก (วงกลม) กรณีปรับเฉพาะผิวสองเอียงจากน้อยไปมาก (สี่เหลี่ยม) กรณีเอียงทั้งสองผิว (สามเหลี่ยม) และกรณีทั้งผิวเลื่อนออกจากแกนแสง (ขีดสั้น)

จากรูปที่ 4.10 การวัดค่า Prism diopter เป็นเกิดปริซึมทั้ง 4 กรณี คือ กรณีปรับเฉพาะผิวแรกเอียง กรณีปรับเฉพาะผิวสองเอียง กรณีเอียงทั้งสองผิว และกรณีทั้งผิวเลื่อนออกจากแกนแสง ซึ่งปรับมุมเอียงจากน้อยไปมาก ทั้ง 4 กรณีมีค่า Prism diopter ที่สัมพันธ์กับมุมเอียงของผิวเลนส์

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความไม่ตรงศูนย์กับค่า Prism diopter

การจำลองวัดค่าความไม่ตรงศูนย์และการจำลองวัดค่าปริซึมของเลนส์ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสอง เนื่องจากการจำลองด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ค่าความไม่ตรงศูนย์และพบว่าค่า Prism diopter มีขึ้นอยู่กับมุมเอียงที่เพิ่มมากขึ้น แต่ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองไม่เป็นเชิงเส้น ยกเว้นเมื่อมุมเอียงมีค่าต่ำๆ โดยรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองนี้ แบ่งออกเป็น 4 กรณีที่ทำให้เลนส์เกิดปริซึมและความไม่ตรงศูนย์



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไม่ตรงศูนย์และค่า Prism diopter ที่ได้จากการจำลองด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ของเลนส์ที่ค่า PWR = 4.00 กรณีปรับเฉพาะผิวแรกเอียงจากน้อยไปมาก (วงกลม) กรณีปรับเฉพาะผิวสองเอียงจากน้อยไปมาก (สี่เหลี่ยม) กรณีเอียงทั้งสองผิว (สามเหลี่ยม) และกรณีทั้งผิวเลื่อนออกจากแกนแสง (จิดสั้น)

จากรูปที่ 4.11 แกนนอนคือค่าความไม่ตรงศูนย์ แกนตั้งคือค่า Prism diopter ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ได้จากการจำลองการวัดด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นการวัดความไม่ตรงศูนย์ทั้ง 4 กรณี ได้แก่ ความไม่ตรงศูนย์เมื่อผิวแรกเอียง ความไม่ตรงศูนย์เมื่อผิวสองเอียง ความไม่ตรงศูนย์เมื่อเอียงทั้งสองผิว และความไม่ตรงศูนย์เมื่อทั้งสองผิวเลื่อนออกจากแนวแกนแสง ผลการทดลองนี้ นำมาพล็อตแสดงความสัมพันธ์กับค่า Prism diopter ที่ได้จากการจำลองเช่นเดียวกัน จากข้อมูลใน

รูปที่ 4.4 ในช่วงแรกเมื่อความไม่ตรงศูนย์มีค่าต่ำๆ ค่าปริซึมของทั้งสี่กรณีมีค่าไม่ต่างกันมากนัก เมื่อความไม่ตรงศูนย์มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ค่าปริซึมเพิ่มขึ้น กรณีที่ตัวอย่างเอียงทั้งสองผิวทำให้เกิดค่า Prism diopter สูงที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองในแต่ละกรณีขึ้นอยู่กับค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ที่ใช้ทดลอง

ผลการจำลองชี้ให้เห็นว่าค่าปริซึมของแต่ละรุ่นจะขึ้นกับความไม่ตรงศูนย์ของเลนส์ ซึ่งน่าจะเกิดจากความไม่ตรงศูนย์ของแผ่นแก้วแม่แบบที่ใช้ในการหล่อเลนส์

4.6 ผลการทดลองจากชุดทดลองสำหรับวัดความไม่ตรงศูนย์

การจัดอุปกรณ์ทดลองสำหรับวัดความไม่ตรงศูนย์ ต้องให้อุปกรณ์ทุกชิ้นอยู่ในแนวเดียวกันจุด ในการทดลองต้องวางตัวอย่างให้จุดกึ่งกลางของผิวแรกตรงกับแนวแกนแสง ทดสอบโดยหมุนตัวอย่างเพื่อปรับให้จุดโฟกัสแสงที่ภาพอยู่กึ่งกลาง ไม่เลื่อนตามการหมุนวัตถุตัวอย่าง ซึ่งการปรับไม่มีความแม่นยำมากพอที่ทำให้จุดโฟกัสแสงอยู่กึ่งกลางภาพพอดี ดังนั้นค่าเริ่มต้นของการวัดความไม่ตรงศูนย์ต้องจัดระยะการวัดที่ผิวแรก แล้วหมุนตัวอย่างจนกระทั่งจุดโฟกัสที่หมุนไปเป็นวงกลม มีขนาดเล็กที่สุด เพื่อให้ค่าความไม่ตรงศูนย์ของผิวแรกมีค่าต่ำที่สุด แล้วเลื่อนระยะไปที่การวัดผิวสอง ซึ่งต้องหักล้างผลกระทบของผิวแรกที่อยู่กึ่งกลางไม่อยู่ตามแนวแกนแสง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองจากชุดทดลองจริงสำหรับวัดความไม่ตรงศูนย์สำหรับเลนส์ที่มี PWR = 4.00

Δ	Δy_1		Δy_2	
	pixels	mm	pixels	mm
0.05	10.12	0.053	178.8	0.930
0.06	12.51	0.065	223.6	1.163
0.08	10.24	0.053	217.4	1.130
0.13	11.09	0.058	266.0	1.383
0.17	12.15	0.063	246.0	1.279
0.20	10.86	0.056	184.7	0.960
0.23	11.44	0.059	241.2	1.254
0.23	12.47	0.065	262.3	1.364
0.26	10.35	0.054	229.2	1.192
0.32	12.14	0.063	241.2	1.254

จากตารางที่ 4.2 ผลการทดลองวัดความไม่ตรงศูนย์ของเลนส์ที่มี PWR = 4.00 มีค่าปริซึม Δ ที่วัดจากบริษัท Δy_1 คือผลการวัดเลนส์ผิวแรก Δy_2 คือผลการวัดเลนส์ผิวที่สอง ที่ยังไม่แก้ผลกระทบของผิวแรก ซึ่งต้องผลการทดลองคำนวณหาค่าความไม่ตรงศูนย์ แล้วแก้ผลกระทบของแสงที่ผ่านผิวแรกมายังผิวสอง โดยใช้โปรแกรม โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังที่อธิบายในบทที่ 3 ดังตารางที่ 4.3

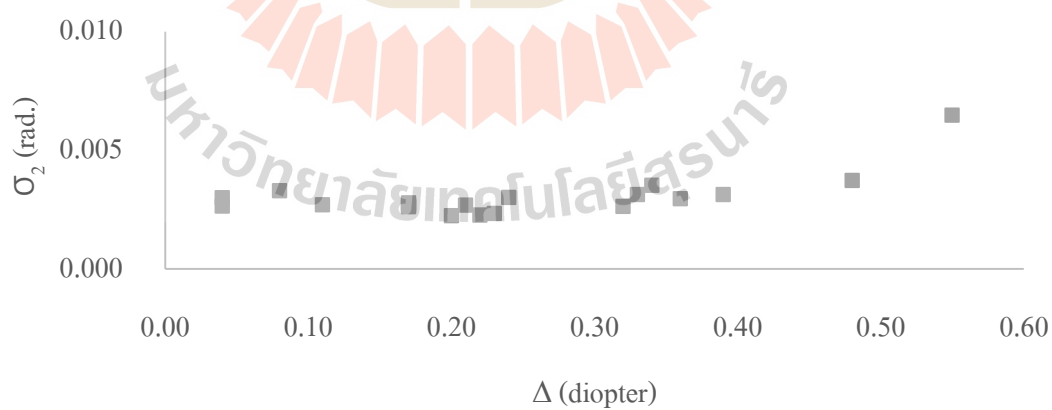
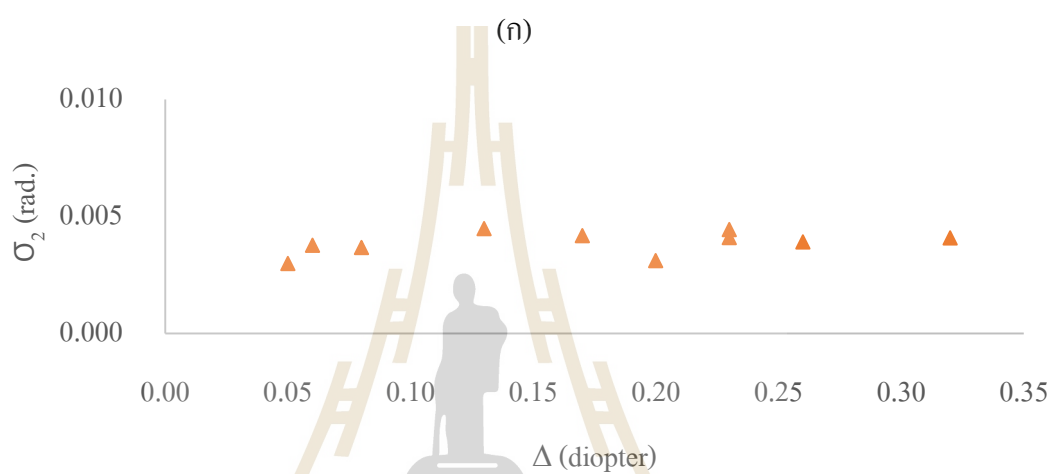
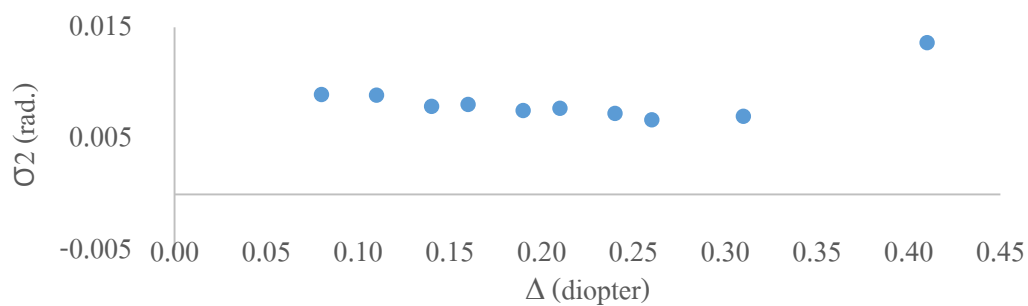
จากตารางที่ 4.3 σ_1 คือความไม่ตรงศูนย์ของเลนส์ผิวแรก คำนวณจาก $\sigma = (\Delta y f_0)/(4Rf_0)$ เพื่อปรับมุมเอียงของผิวแรกตามค่า σ_1 แล้วความไม่ตรงศูนย์ของผิวสองขณะที่ผิวสองไม่เอียง ซึ่งทำให้ได้ค่าผลกระทบจากการผิวแรกมายังผิวสองเป็น $\Delta y'_1$ จากนั้นจะได้การวัดที่ผิวสองที่หักล้างกับผลกระทบของผิวแรก $\Delta y'_2 = \Delta y_2 - \Delta y'_1$ แล้วนำไปคำนวณหาค่าความไม่ตรงศูนย์ σ_2

ตารางที่ 4.3 ค่าความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์ที่มี PWR = 4.00 ที่ชดเชยผลจากผิวแรกแล้ว

Δ	σ_1 (rad.)	$\Delta y'_1$ (R_1 ที่ส่งผลต่อ R_2) mm	$\Delta y'_2$ (mm)	σ_2 (rad.)
0.05	0.0022	0.00011	0.930	0.0194
0.06	0.0019	0.00015	1.163	0.0217
0.08	0.0022	0.00011	1.130	0.0214
0.13	0.0021	0.00013	1.383	0.0239
0.17	0.0020	0.00014	1.279	0.0229
0.20	0.0021	0.00012	0.960	0.0197
0.23	0.0020	0.00013	1.254	0.0226
0.23	0.0020	0.00015	1.364	0.0237
0.26	0.0021	0.00011	1.192	0.0220
0.32	0.0020	0.00014	1.254	0.0226

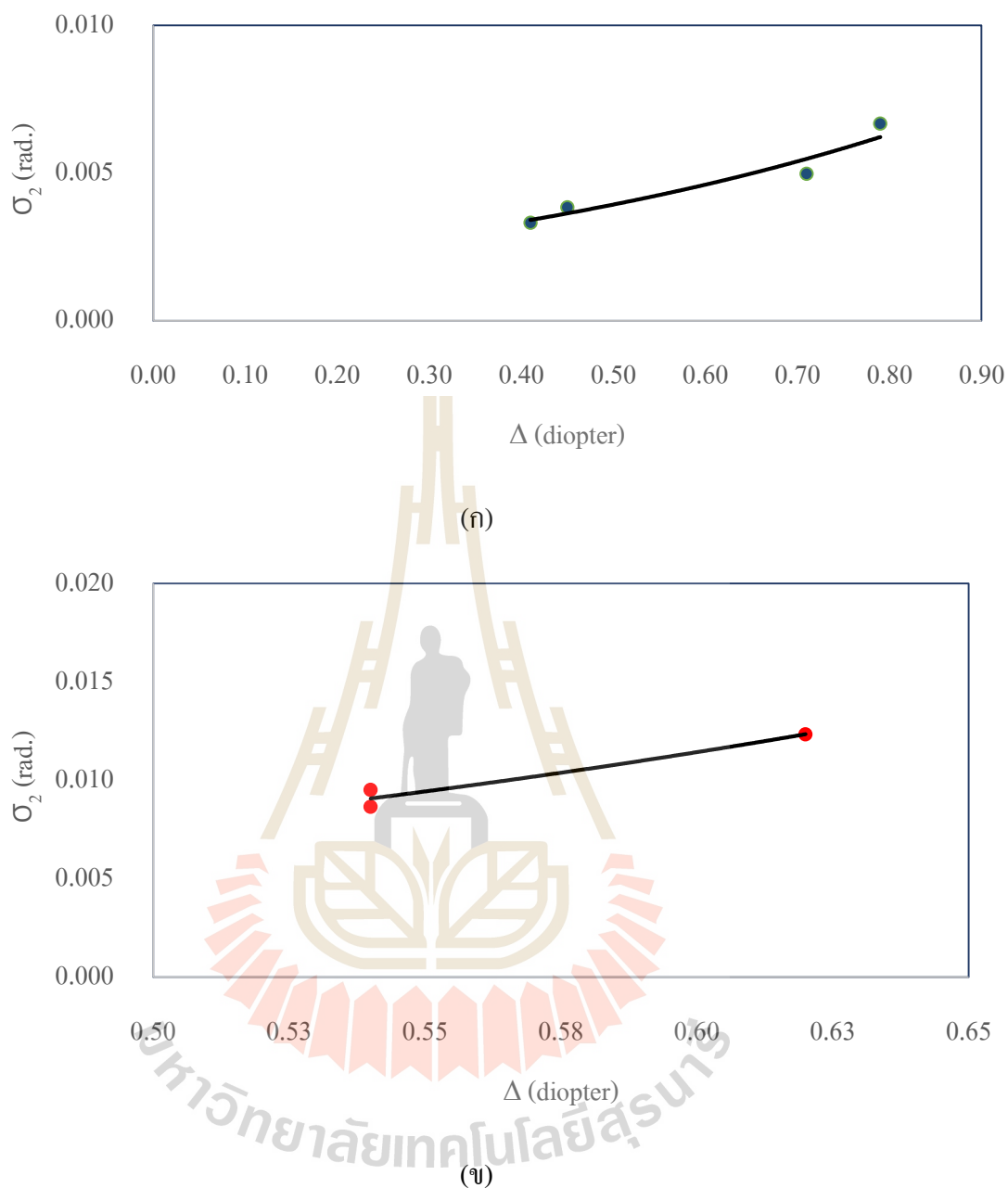
แสดงว่าจากข้อมูลในตารางที่ 4.3 ค่า $\Delta y'_1$ มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ Δy_2 (ตารางที่ 4.2) เนื่องจากการทดลองของการวัดความไม่ตรงศูนย์กลางที่ผิวแรก ใช้วิธีปรับผิวแรกจนกระทั่งมีค่า Δy_1 ต่ำที่สุด แล้วจึงวัด Δy_2 ที่ผิวสอง จากการคำนวณทำให้ค่า Δy_1 ไม่มีผลกระทบต่อ การวัดความไม่ตรงศูนย์กลางที่ผิวสอง ดังนั้นการวัดครั้งถัดไปจึงไม่จำเป็นต้องแก้ผลกระทบจากผิวแรก

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้จากชุดทดลองจริง พล็อตข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไม่ตรงศูนย์กลางกับค่า Prism diopter ของเลนส์แต่ละรุ่น ซึ่งแยกรุ่นตามค่า PWR ของเลนส์



(ค)

รูปที่ 4.12 ผลการทดลองวัดความไม่ตรงศูนย์แสดงความสัมพันธ์กับค่า Prism diopter ของเลนส์รุ่นต่างๆ (ก) เลนส์ PWR = 2.50 (ข) เลนส์ PWR = 4.00 (ค) เลนส์ PWR = 5.50



รูปที่ 4.13 ผลการทดลองวัดความไม่ตรงศูนย์แสดงความสัมพันธ์กับค่า Prism diopter ของเลนส์ที่มีค่าปริซึมสูงเกินมาตรฐาน (ก) เลนส์ดังกล่าวมี PWR = 2.25 (ข) เลนส์ดังกล่าวมี PWR = 3.75

4.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์เว้าตาที่มี Optical power 2.00 - 5.50 พบว่าเมื่อค่าปริซึมมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 0.3 Diopters ซึ่งเป็นช่วงที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ค่าความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์ที่วัดได้มีค่าไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อค่าปริซึมมีค่าสูงขึ้น ค่าความไม่ตรงศูนย์กลางจะเพิ่มขึ้นชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงว่าค่าปริซึมของเลนส์ที่สูงเกิดจากค่าความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์ ซึ่งสาเหตุหลักน่าจะเกิดจากความไม่ตรงศูนย์กลางของแผ่นแก้วแม่แบบที่ใช้ในการหล่อเลนส์ อย่างไรก็ตามเลนส์ตัวอย่างที่มีค่าปริซึมสูงในแต่ละ Optical power ที่ได้รับจากบริษัทยังมีจำนวนน้อยเกินไป ผลการทดลองจะนำเชื่อถือกว่านี้ถ้ามีจำนวนเลนส์ทดลองมากขึ้น

เนื่องจากความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์จะขึ้นกับรัศมีความโค้งของผิวแรก (R_1) และผิวที่สอง (R_2) เลนส์ที่มีความโค้งมากหรือมีรัศมีต่ำจะเกิดความไม่ตรงศูนย์กลางและปริซึมสูง แม้ผิวทั้งสองจะเกิดความไม่ตรงศูนย์กลางเพียงเล็กน้อย ช่วงเลนส์ที่มีความโค้งน้อย ค่าความไม่ตรงศูนย์กลางจะไม่มากนัก แม้ว่าผิวทั้งสองจะไม่อยู่ในแกนเดียวกัน

เครื่องมือที่สร้างขึ้นมีค่า Offset อยู่ในช่วง 0.005-0.010 radians ซึ่งน่าจะเกิดจากชุดเลนส์ที่ใช้ยังมีอัตราขยายต่ำ การแก้ไขทำได้โดยเพิ่มความยาวโฟกัสของเลนส์ Objective (f_o) และลดความยาวโฟกัสของเลนส์ Collimator (f_c) เมื่ออัตราขยายสูงขึ้น จะทำให้เกิดภาพวงกลมที่กล้องรับภาพมีขนาดใหญ่กว่าเดิม การคำนวณหารัศมีของวงกลมจะมีความแม่นยำและมีความไว (Sensitivity) สูงขึ้น

บทที่ 5

สรุป

การผลิตเลนส์สายตาตรวจพบว่า เลนส์บางรุ่นที่ผลิตมีค่า Prism diopter ที่วัดด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติของเลนส์ (Lensmeter) มีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งเป็นของเสียที่ไม่สามารถจำหน่ายได้ เลนส์รุ่นที่เป็นปัญหาที่มีค่า Prism diopter สูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ เป็นเลนส์ที่ผลิตจากแผ่นแก้ว (Glass molds) 2 แผ่นที่ประกอบโดยใช้เทปพลาสติกพันรอบขอบ ซึ่งบริษัทฯ คาดว่าน่าจะเกิดจากแผ่นแก้วแม่แบบอาจมีการเลื่อนตำแหน่งไปจากที่กำหนดไว้ ทำให้เลนส์ที่ผลิตได้มีค่าปริซึมสูง

เทคนิคเชิงแสงที่นิยมอย่างแพร่หลายวัดเลนส์ ซึ่งทำให้ไม่เกิดริ้วรอยบนเลนส์ เทคนิคนี้ นำมาใช้ในการวัดค่าความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์ ความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์เกิดจากจุดยอดของผิวโค้งแต่ละผิวไม่ตรงกันหรือไม่ตรงกับแกนอ้างอิง หรือผิวโค้งมีมุมเอียงกับแกนอ้างอิง โดยวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของแต่ละผิวเลนส์ ซึ่งได้สร้างชุดทดลองตามทฤษฎีของการวัดแบบสะท้อนกลับของแสง ใช้แหล่งกำเนิดแสงด้วยไดโอดเปล่งแสงสีแดงที่มีความเข้มสูง ความยาวคลื่น 625 nm ให้แสงทะลุผ่านชุดเลนส์สำหรับจัดลำแสงให้ตั้งฉากกับผิวของเลนส์ตัวอย่าง โดยใช้วัตถุตัวอย่างเป็นเลนส์ที่ผลิตจากบริษัทฯ จำแนกตามค่า Optical power ของเลนส์ตั้งแต่ 2.00 – 5.50 ซึ่งได้พัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานให้มอเตอร์หมุนเลนส์ตัวอย่าง 360° เพื่อให้จุดโฟกัสแสงที่กล้องรับภาพเคลื่อนที่เป็นวงกลม เนื่องจากความไม่ตรงศูนย์กลางขึ้นกับรัศมีของวงกลม

เมื่อค่าปริซึมมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 0.3 Diopters ค่าความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์ในแต่ละ Optical power มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จากผลการทดลองเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อค่าปริซึมสูงขึ้น ค่าความไม่ตรงศูนย์กลางจะเพิ่มขึ้น คาดว่าเลนส์ที่ค่าปริซึมสูงผลิตจากแผ่นแก้วแม่แบบที่มีความไม่ตรงศูนย์กลาง

เนื่องจากพบว่าเครื่องมือที่สร้างขึ้นมีค่า Offset อยู่ในช่วง 0.005 – 0.010 radians คาดว่าอาจมีผลกระทบต่อ การวัดความไม่ตรงศูนย์กลาง จึงใช้โปรแกรม โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำลองการวัดเพื่อแก้ผลกระทบจากช่วง Offset ของเครื่องมือ และตรวจสอบว่าการวัดความไม่ตรงศูนย์กลางน่าจะวัดค่าได้อย่างถูกต้อง โดยจำลองการจัดอุปกรณ์การวัดความไม่ตรงศูนย์กลางและการวัดค่าปริซึม อีกทั้งการจำลองเลนส์ตัวอย่าง ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์จริงขอตัวอย่าง การจำลองจะปรับมุมเอียงของผิวเลนส์แต่ละผิวจากน้อยไปมาก เพื่อให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ คำนวณระยะห่างของจุดโฟกัสแสงกับตำแหน่งกึ่งกลางภาพ (Δy) พบว่าเมื่อปรับมุมเอียงที่ผิวเลนส์ตัวอย่างมากขึ้น ค่า Δy จะสูงขึ้น ทำให้ค่าความไม่ตรงศูนย์กลางสูงขึ้น การจำลองวัดค่าปริซึมให้ผลที่สอดคล้องกับการวัดความไม่ตรงศูนย์กลาง เมื่อ

ปรับมุมเอียงจากน้อยไปมาก ค่า Prism diopter มีค่าสูงขึ้น ซึ่งค่าความไม่ตรงศูนย์กับค่าปริซึมมีความสัมพันธ์กันแบบไม่เป็นเชิงเส้น ยกเว้นเมื่อมุมเอียงมีค่าต่ำๆ

อย่างไรก็ตามเลนส์ตัวอย่างที่มีค่าปริซึมสูงในแต่ละ Optical power ที่ได้รับจากบริษัทยังมีจำนวนน้อยเกินไป ซึ่งในอนาคตจะเพิ่มตัวอย่างในการทดลอง เพื่อให้ผลการทดลองจะน่าเชื่อถือกว่านี้

เครื่องมือต้นแบบที่สร้างขึ้นสำหรับการวัดความไม่ตรงศูนย์ในโครงการวิจัยนี้จะมีประโยชน์ในการศึกษาและวิเคราะห์สาเหตุค่าปริซึมที่สูงในเลนส์บางรุ่นได้

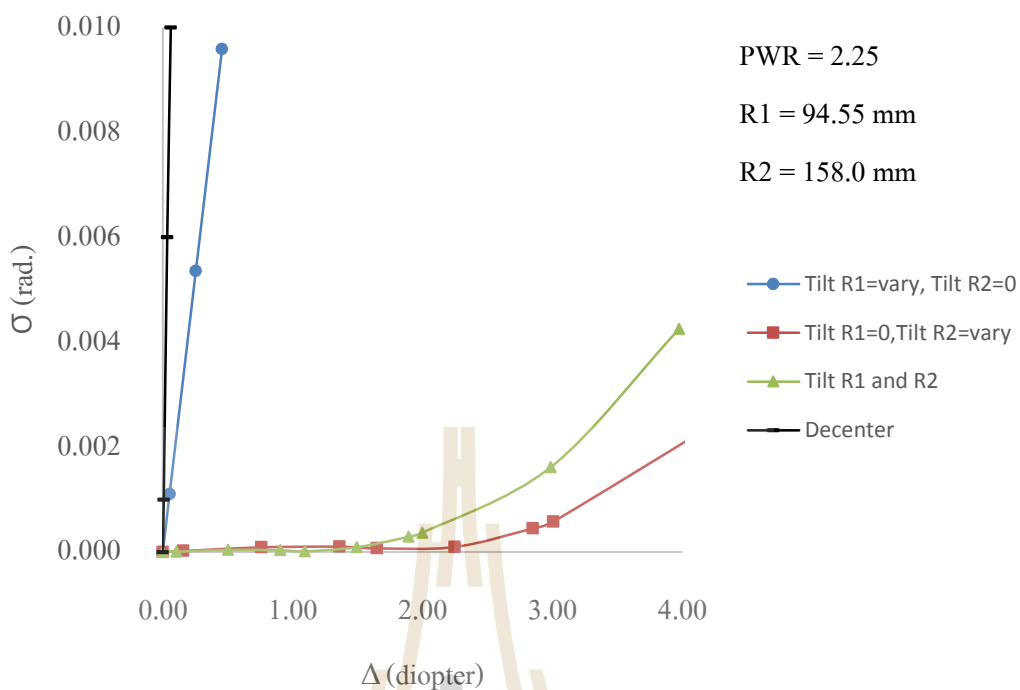


รายการอ้างอิง

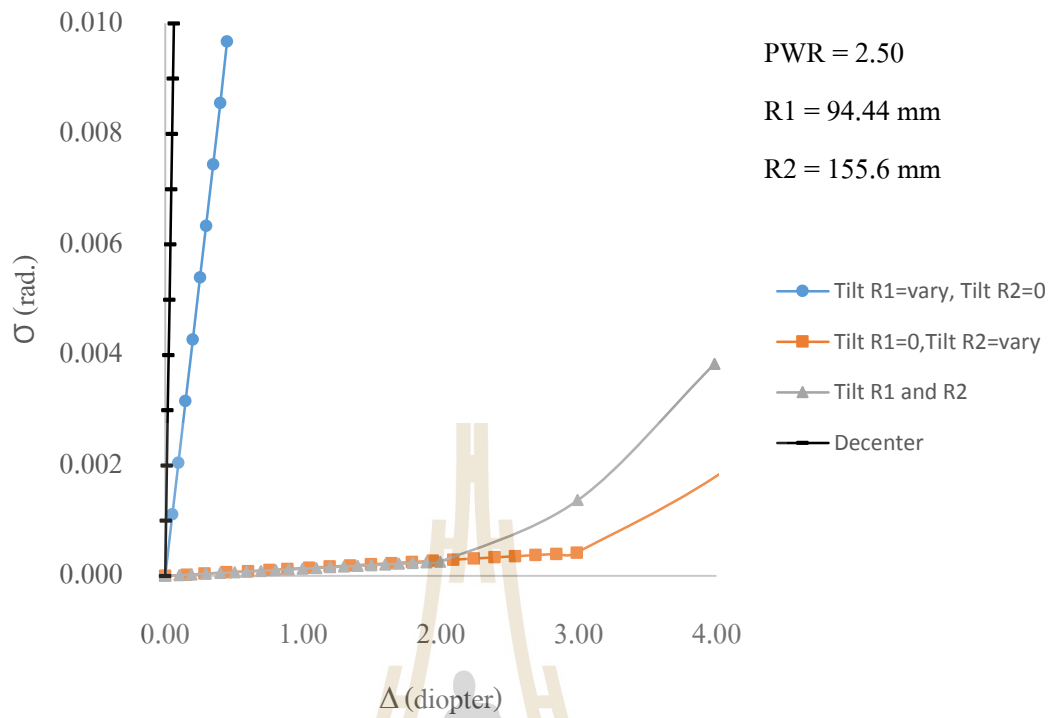
- [1] Bartlett, C.L., D. Kay, and M. Mansuripur, *Computer simulations of effects of disk tilt and lens tilt on push-pull tracking error signal in an optical disk drive*. Applied Optics, 1997. 36(32): p. 8467-8473.
- [2] Park, Y., et al., *Self-Centering Effect of a Thickness-Gradient Dielectric of an Electrowetting Liquid Lens*. Photonics Technology Letters, IEEE, 2013. 25(6): p. 623-625.
- [3] Acosta, D., J.A. Albajez, and J. Velázquez, *The use of a Laser Tracker and a Self-centering Probe for Rotary Axis Verification*. Procedia Engineering, 2015. 132: p. 748-755.
- [4] Trapet, E., et al., *Self-centering probes with parallel kinematics to verify machine-tools*. Precision Engineering, 2006. 30(2): p. 165-179.
- [5] Yung-Hsiang, C., et al. *An image based optical lens eccentric error inspection system*. in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International*. 2012.
- [6] Sasian, J.M., R.E. Parks, and M.C. Ruda, *Lens centering using the Point Source Microscope*. 2007. 6676: p. 667603-667603-10.
- [7] Chang, C.-Y., et al., *Rapid inspection method for measuring interior tilt and decenter in singlet lens*. Applied Optics, 2013. 52(4): p. B70-B81.
- [8] Kuo-Cheng, H., C. Chun-Li, and W. Wen-Hong. *A polarization image method for lens decentration measurement*. in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2010 IEEE*. 2010.
- [9] Kuo-Cheng, H., C. Chun-Li, and W. Wen-Hong, *Novel Image Polarization Method for Measurement of Lens Decentration*. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2011. 60(5): p. 1845-1853.
- [10] D. Meister and J.E. Sheedy, *Introduction to Ophthalmic Optics* 3rd ed. Carl Zeiss Vision, San Diego, 2000



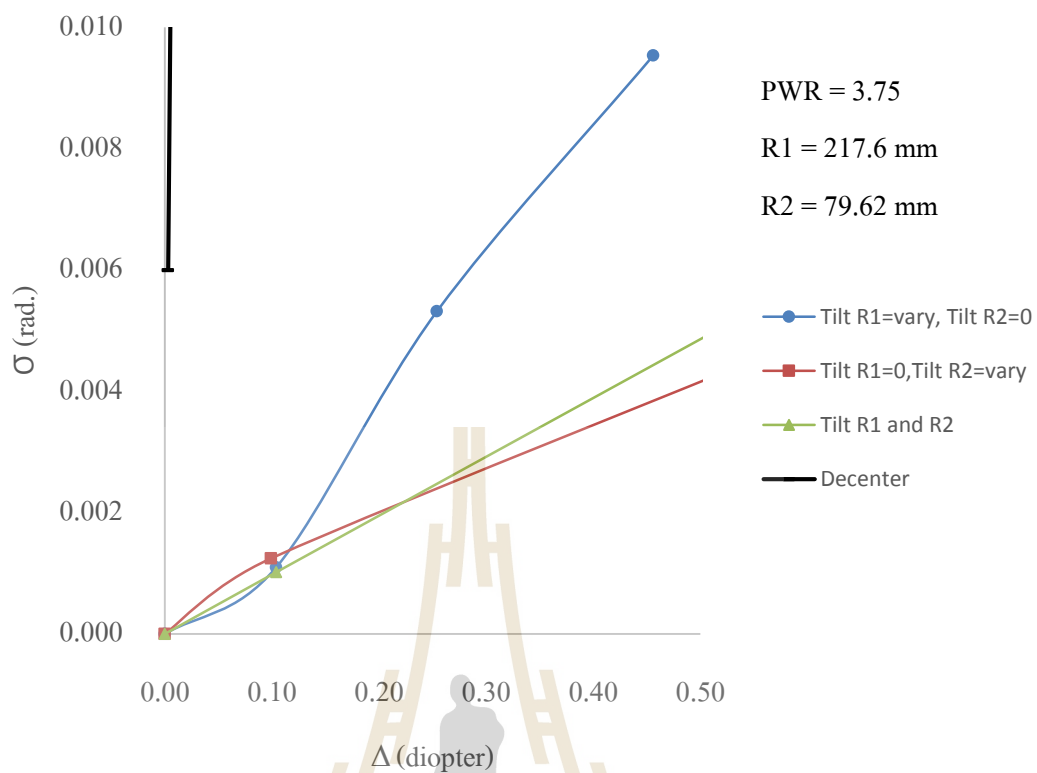
ภาคผนวก ก



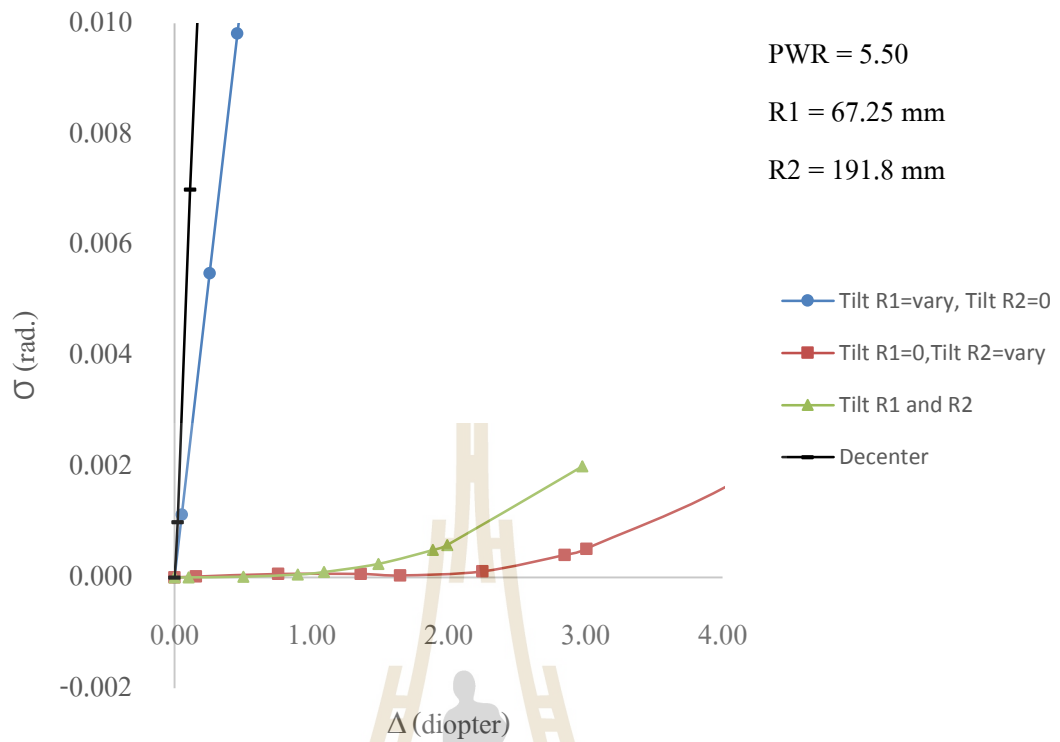
ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไม่ตรงศูนย์และค่า Prism diopter ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ของเลนส์ที่ค่า $PWR = 2.25$ กรณีปรับเฉพาะผิวแรกเพียงจากน้อยไปมาก (วงกลม) กรณีปรับเฉพาะผิวสองเพียงจากน้อยไปมาก (สี่เหลี่ยม) กรณีเอียงทั้งสองผิว (สามเหลี่ยม) และกรณีทั้งผิวเลื่อนออกจากแกนแสง (ขีดสั้น)



ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไม่ตรงศูนย์และค่า Prism diopter ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ของเลนส์ที่ค่า $PWR = 2.50$ กรณีปรับเฉพาะผิวแรกเอียงจากน้อยไปมาก (วงกลม) กรณีปรับเฉพาะผิวสองเอียงจากน้อยไปมาก (สี่เหลี่ยม) กรณีเอียงทั้งสองผิว (สามเหลี่ยม) และกรณีทั้งผิวเลื่อนออกจากแกนแสง (จุดสั้น)



ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไม่ตรงศูนย์และค่า Prism diopter ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ของเลนส์ที่ค่า $PWR = 3.75$ กรณีปรับเฉพาะผิวแรกเอียงจากน้อยไปมาก (วงกลม) กรณีปรับเฉพาะผิวสองเอียงจากน้อยไปมาก (สี่เหลี่ยม) กรณีเอียงทั้งสองผิว (สามเหลี่ยม) และกรณีทั้งผิวเลื่อนออกจากแกนแสง (จุดสั้น)



ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไม่ตรงศูนย์และค่า Prism diopter ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ของเลนส์ที่ค่า $PWR = 5.50$ กรณีปรับเฉพาะผิวแรกเอียงจากน้อยไปมาก (วงกลม) กรณีปรับเฉพาะผิวสองเอียงจากน้อยไปมาก (สี่เหลี่ยม) กรณีเอียงทั้งสองผิว (สามเหลี่ยม) และกรณีทั้งผิวเลื่อนออกจากแกนแสง (ขีดสั้น)

ประวัติผู้เขียน

นายสหรัฐ แก้วอร่าม เกิดเมื่อวันที่ 19 กันยายน พ.ศ. 2534 ณ จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเทพศิรินทร์ พุแค อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2556 เพื่อพัฒนาความรู้และความสามารถของตนเอง หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา (มหาบัณฑิต) สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ในปีการศึกษา 2557 ซึ่งได้รับทุนการศึกษาโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) จากกองทุนสนับสนุนงานวิจัย และทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุนOROG) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ในรายวิชาปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ วิชาปฏิบัติการไมโครโปรเซสเซอร์และการประยุกต์ และวิชาปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ขั้นสูง ทำให้ฝึกการอธิบายเป็นขั้นตอนให้กับผู้เรียนได้เข้าใจเนื้อหาในรายวิชาดังกล่าว ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับการเขียนวิทยานิพนธ์ได้เป็นอย่างดี สามารถนำความรู้จากการเรียนในรายวิชาต่างๆ ระดับปริญญาโท ประยุกต์ใช้กับงานวิจัยทางด้านการตรวจวัดความไม่ตรงศูนย์กลางของเลนส์สายตา และมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 1 เรื่อง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี