

ชุดสาธิตการแก้ความคลาดของเลนส์ในกล้องโทรทรรศน์
DEMONSTRATION KIT FOR REDUCED LENS
ABERRATION IN OPTICAL TELESCOPE



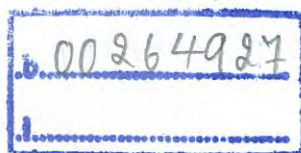
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

ชุดสาธิตการแก้ความคลาดของเลนส์ในกล้องโทรทรรศน์
DEMONSTRATION KIT FOR REDUCED LENS
ABERRATION IN OPTICAL TELESCOPE



ภัทรเกียรติ ขำขจร

TB00065



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2559 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEMONSTRATION KIT FOR REDUCED LENS
ABERRATION IN OPTICAL TELESCOPE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **ACADEMIC YEAR 2016** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ชุดสาธิตการแก้ความคลาดของเลนส์ในกล้องโทรทรรศน์
 Demonstration Kit for Reduced Lens Aberration
 In Optical Telescope

ชื่อนักศึกษา นายภัทรเกียรติ ขำขจร รหัสนักศึกษา 56051187

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สุรชาติ กมลดีลก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
 ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ประธาน บุณศิริ ประธานกรรมการ	
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข กรรมการ	
อาจารย์ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง กรรมการ	
อาจารย์สุรชาติ กมลดีลก กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งว สสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ชุดสาธิตการแก้ความคลาดของเลนส์ในกล้องโทรทรรศน์
ชื่อนักศึกษา	นายภัทรเกียรติ ขำขจร รหัสนักศึกษา 56051187
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.สุรชาติ กมลติก

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการออกแบบระบบเลนส์เพื่อแก้ความคลาดของเลนส์ในกล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสง โดยใช้โปรแกรม วินเลนส์ทรีดี ในการออกแบบระบบเลนส์ของโปรแกรมนี้จะจำลองทางเดินของแสงภายในระบบเลนส์ซึ่งการจำลองทางเดินแสงนี้สามารถบอกระยะภาพ กำลังขยาย รวมทั้งความคลาดที่เกิดขึ้นในระบบเลนส์ที่ออกแบบได้ จากนั้นนำระบบเลนส์ที่ออกแบบได้มาสร้างเป็นชุดสาธิตการแก้ความคลาดของเลนส์ในกล้องโทรทรรศน์ โดยชุดสาธิตระบบเลนส์นี้จะประกอบด้วยระบบเลนส์ที่ยังไม่ได้มีการแก้ความคลาดสี่และระบบเลนส์ที่ทำการแก้ความคลาดสี่ด้วยเลนส์ออร์ค หลังจกนั้นนำระบบเลนส์ทั้งสองมาติดไว้รางเลื่อนเพื่อทำการเลื่อนหาจุดโฟกัสร่วมของระบบเลนส์ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ได้ภาพที่ขยายจากระบบเลนส์ที่ชัดเจนที่สุด จากนั้นนำระบบเลนส์ทั้งสองมาใช้ส่องวัตถุเดียวกันในหลายๆระยะ แล้วนำภาพถ่ายที่ถ่ายจากระบบเลนส์ทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลที่เปรียบเทียบได้พบว่าภาพจากระบบเลนส์ที่ไม่แก้ความคลาดสี่ทุกระยะจะมีลักษณะการหลอมนของสีในภาพอย่างชัดเจนทำให้ภาพที่ถ่ายได้มีสีที่ผิดเพี้ยนไป ซึ่งแตกต่างจากระบบเลนส์ที่แก้ความคลาดสี่แล้วซึ่งมีความคลาดของสีน้อยมาก ทำให้สีของภาพแทบจะไม่มีผิดเพี้ยน ดังที่แสดงในเนื้อหารายงาน จากทั้งหมดทำให้ชุดสาธิตความคลาดนี้สามารถใช้ขยายวัตถุที่มีระยะไกลมากๆ เปรียบเทียบเพื่ออธิบายลักษณะของความคลาดสี่และจำลองการแก้ไขผลกระทบบของความคลาดสี่ในระบบเลนส์ในกล้องโทรทรรศน์ได้

คำสำคัญ : กล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสง ความคลาดสี่ ระบบเลนส์ วินเลนส์ทรีดี

Title	The Demonstration Kit for Reducing Lens Aberration in Optical Telescope
Students	Mr. Pattarakeat komkajohn Student ID 56051187
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physic
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Mr.Surachat kamondilok

Abstract

This special project aims to study in the field of lens modification system in purpose of reducing aberration in refraction telescope by using Winlens 3D. In the process, we use program to simulate the optical path within lens system in order to specify image distance, magnification and aberration in the system. As a result, we adapt the result of the simulation to recreate the demonstration kit in the use of reducing aberration. The kit itself is consisted of lens system which has chromatic aberration, and the other system which its chromatic aberration has been fixed by achromatic lens. Thence, both lens will be attached on the same sliding rail kit in order to indicate focal spot to provide the best image. After that, we use both lens to look through the same object with different range and collect the result to make a comparison between these two lens systems. The result has shown that the images taken by chromatic aberration are way more overlapped at any range. On the other hand, images that have been taken by the fixed achromatic lens are more constant and provide zero aberration at any range. As we mentioned earlier in the research, all the results provide the possible assumption that this demonstration kit convey a potential of reducing the aberration of the refraction telescope, also, it provide the comparison of the contrast between the aberration and the resolution by using simulation.

Keywords: chromatic aberration, lens system, refraction telescope, winlens3D

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณ อ.สุรชาติ กมลดีลิกที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษและขอขอบพระคุณ กรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ และดร.ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท สุวิทย์เทเลสโคป ที่ให้คำแนะนำในเรื่องเลนส์และให้ความอนุเคราะห์ในการจัดหาเลนส์ที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาฟิสิกส์ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่อาคารซ่อมสร้างที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือรวมทั้งให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ได้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ภัทรเกียรติ ขำขจร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
1.5 ช่วงเวลาการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สมบัติของแสง	3
2.1.1 สมบัติเชิงเรขาคณิต	3
2.1.2 สมบัติเชิงกายภาพ	6
2.2 การเกิดภาพจากเลนส์	7
2.2.1 เลนส์บาง	8
2.2.2 เลนส์หนา	12
2.3 ความคลาดของเลนส์	17
2.3.1 ความคลาดแสง	17
2.3.2 ความคลาดสี	21
2.4 กล้องโทรทรรศน์	22
2.4.1 กล้องโทรแบบหักเหแสง	22
2.4.2 กล้องโทรแบบสะท้อนแสง	24
2.4.3 กล้องโทรแบบผสม	25
2.5 โปรแกรม winlens3D	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	28
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน	33

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย	
4.1 การจำลองทางเดินแสงและผลของความคลาดสี่โดยใช้โปรแกรม	39
4.1.1 ทางเดินแสงและกราฟความคลาดสี่ของเลนส์ซึ่งไม่มีการแก้ความคลาด	39
4.1.2 ทางเดินของแสงและกราฟความคลาดสี่ของเลนส์ที่มีการแก้ความคลาดสี่	40
4.2 การวัดค่าความยาวโฟกัสของเลนส์ในทางปฏิบัติ	40
4.2.1 ผลการวัดความโค้งของเลนส์โดยใช้สเฟียโรมิเตอร์	40
4.2.2 ผลการวัดความยาวโฟกัสของเลนส์โดยใช้ฉากรับ	41
4.3 ภาพถ่ายจริงของระบบเลนส์ที่นำมาใช้	41
4.3.1 ระบบเลนส์ซึ่งประกอบด้วยเลนส์วัตถุที่ไม่แก้ความคลาด	41
4.3.2 ระบบเลนส์ซึ่งประกอบด้วยเลนส์วัตถุที่แก้ความคลาด	43
4.3.3 ระบบเลนส์ซึ่งประกอบด้วยเลนส์วัตถุแก้ความคลาดและเลนส์ใกล้ตาแก้ ความคลาด	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	45
5.2 เสนอแนะ	45
เอกสารอ้างอิง	46
ภาคผนวก	47

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ช่วงเวลาการดำเนินงาน	2
4.1 แสดงการวัดค่าความโค้งเลนส์โดยใช้สเฟียร์โรมิเตอร์	42
4.2 แสดงการวัดรัศมีของเลนส์โดยใช้ฉากรับ	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การสะท้อนของแสงที่วัตถุผิวเรียบเป็นมัน	4
2.2 การสะท้อนของแสงที่วัตถุผิวขรุขระ	4
2.3 กฎการสะท้อนของแสง	4
2.4 ปรากฏการณ์การหักเหของแสง	5
2.5 แสดงการกระจายแสงในปริซึม	6
2.6 การแทรกสอดเสริมและหักล้างกันของคลื่น	6
2.7 ภาพแสดงการเลี้ยวเบนผ่านช่องเปิดเล็กเดี่ยว	7
2.8 ภาพแสดงการรวมแสงของเลนส์นูนและการกระจายแสงของเลนส์เว้า	8
2.9 แสดงลักษณะเลนส์ในรูปแบบต่างๆ	8
2.10 แสดงส่วนประกอบของเลนส์เว้าและเลนส์นูน	8
2.11 แสดงหลักการเกิดภาพของเลนส์นูน	9
2.12 แสดงการเกิดภาพที่ระยะต่างของเลนส์นูน	10
2.13 แสดงการเกิดภาพที่ระยะต่างของเลนส์เว้า	11
2.14 แสดงจุดคาร์ดินัลในเลนส์หนา	12
2.15 แสดงจุดमुखสำคัญของเลนส์หนา	13
2.16 แสดงจุดโนดัลของเลนส์หนา	13
2.17 การเลือนของรังสี	14
2.18 การหักเหในเลนส์หนา	16
2.19 แสดงความคลาดแบบต่างๆของเลนส์	17
2.20 แสดงหลักการความคลาดแบบทรงกลม	18
2.21 แสดงภาพที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดความคลาดทรงกลม	18
2.22 แสดงหลักการของความคลาดแบบโคมา	18
2.23 แสดงภาพเมื่อเกิดความคลาดแบบโคมา	19
2.24 แสดงหลักการของความคลาดแบบพรั้า (Astigmatism)	19
2.25 แสดงภาพเมื่อเกิดความคลาดแบบพรั้า (Astigmatism)	19
2.26 แสดงภาพที่จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความคลาดแบบ Distortion	20
2.27 แสดงหลักการของเกิดความคลาดแบบ Distortion	20
2.28 แสดงภาพจริงที่เกิดความคลาดแบบ Distortion	21
2.29 ความคลาดสีในเลนส์บาง	21
2.30 แสดงลักษณะภาพที่เกิดจากความคลาดตรงค์	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

2.31 แสดงรูปร่างทั่วไปของเลนส์ประกอบรงค์	23
2.32 แสดงหลักการทำงานของกล้องโทรทรรศน์หักเหแสงเคปเลอร์	23
2.33 แสดงหลักการทำงานของกล้องโทรทรรศน์หักเหแสงกาลิเลโอ	24
2.34 ความคลาดสี่ซึ่งเกิดขึ้นจากเลนส์เดี่ยว	24
2.35 เลนส์อรงค์ช่วยลดความคลาดสี่	24
2.36 กล้องโทรแบบสะท้อนแสง	25
2.37 แสดงหลักการทำงานของกล้องโทรทรรศน์แบบชนิดที่-แคสิเกรนด	25
2.38 แสดงหลักการทำงานของกล้องทรรศน์แบบมีคชุทอป-แคสิเกรนด	26
2.39 ภาพแสดงตัวอย่างการใช้โปรแกรม winlens3D	26
2.40 ภาพแสดงตัวอย่างการใช้โปรแกรม winlens3D	27
3.1 คอมพิวเตอร์	28
3.2 เลนส์นูนใกล้วัตถุที่ไม่แก้ความคลาด	28
3.3 เลนส์นูน Bk7	29
3.4 เลนส์เว้าที่ใช้แก้ความคลาด	29
3.5 เลนส์นูนใกล้ตาที่ไม่แก้ความคลาด	29
3.6 เลนส์ตาประกอบที่แก้ความคลาดชั้นที่ 1	30
3.7 เลนส์ตาประกอบที่แก้ความคลาดชั้นที่ 2	30
3.8 ลำกล้องของเลนส์ใกล้ตา	30
3.9 แผ่นอะคริลิก	31
3.10 ถังมือยาง	31
3.11 อุปกรณ์ทำความสะอาดเลนส์	32
3.12 รางเลื่อน	32
3.13แสดงการเลือกชนิดแก้วด้วยโปรแกรม winlen3d	32
3.14 แสดงการเลือกชนิดแก้วด้วยโปรแกรม winlen3d	33
3.15 แสดงการออกแบบเลนส์เดี่ยวด้วยโปรแกรม winlen3d	33
3.16แสดงการออกแบบระบบเลนส์ด้วยโปรแกรม winlen3d	34
3.17 แสดงค่าความคลาดในระบบเลนส์ด้วยโปรแกรม winlen3d	34
3.18 แสดงการหาค่าความโค้งของเลนส์ด้วยสเฟียร์โรมิเตอร์	35
3.19 แสดงการทดลองหาความยาวโฟกัสของเลนส์	36
3.20 แสดงตำแหน่งต่างๆในการหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูน	36
3.21 ภาพแสดงตำแหน่งต่างๆในการหาโฟกัสของเลนส์เว้า	37
3.22 แสดงการหาค่าความคลาดของเลนส์แก้ความคลาดที่ประกบกัน	37
3.23 แสดงการออกแบบกล้องสำหรับการสร้างชุดสาธิตการแก้ความคลาดด้วย	

เอกสารนี้เป็นโปรแกรมลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
4.1 ภาพจำลองทางเดินของแสงและกราฟความคลาดในเลนส์วัตถุที่ไม่แก้ความคลาดสี	39
4.2 ภาพจำลองทางเดินของแสงและกราฟความคลาดในเลนส์ที่แก้ความคลาดสีจากโปรแกรมwinlen3d	40
4.3 ระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ตาที่ไม่แก้ความคลาด	41
4.4 ภาพจากระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ตาที่ไม่แก้ความคลาดซึ่งจะมีลักษณะของความคลาดสี	42
4.5 ระบบภาพดวงจันทร์จากระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ตาที่ไม่แก้ความคลาดซึ่งจะมีลักษณะของความคลาดสี	42
4.6 ระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุที่แก้ความคลาดกับเลนส์ตาที่ไม่แก้ความคลาด	43
4.7 ภาพจากระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุที่แก้ความคลาดกับเลนส์ตาที่ไม่แก้ความคลาดซึ่งภาพจะมีความคมชัดขึ้นเนื่องจากการแก้ความคลาดที่เลนส์ใกล้วัตถุ	43
4.8 ภาพดวงจันทร์จากระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุที่แก้ความคลาดกับเลนส์ตาที่ไม่แก้ความคลาดซึ่งภาพจะมีความคมชัดขึ้นเนื่องจากการแก้ความคลาดที่เลนส์ใกล้วัตถุ	44
4.9 ระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุที่แก้ความคลาดกับเลนส์ตาที่แก้ความคลาด	44
4.10 ภาพจากระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุที่แก้ความคลาด กับเลนส์ตาที่แก้ความคลาดซึ่งภาพจะมีความคมชัดที่สุดเนื่องจากการแก้ความคลาดที่เลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ใกล้ตา	45
4.11 ภาพดวงจันทร์จากระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุที่แก้ความคลาดกับเลนส์ตาที่แก้ความคลาดซึ่งภาพจะมีความคมชัดที่สุดเนื่องจากการแก้ความคลาดที่เลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ใกล้ตา	45

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีแสงมีบทบาทมากในชีวิตประจำวัน โดยแสงถูกนำมาใช้ประยุกต์ในงานมากมายหลายแขนง เช่น ด้านมาตรวิทยา ด้านการแพทย์ รวมทั้งด้านดาราศาสตร์ ซึ่ง เทคโนโลยีแสงเข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากตัวอย่างเช่นการประยุกต์เทคโนโลยีแสงในการตรวจวัดคลื่นแรงโน้มถ่วง ซึ่งเป็นการค้นพบสำคัญชิ้นหนึ่งของโลก

ในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาเทคโนโลยีทางแสงซึ่งนำมาช่วยในงานด้านดาราศาสตร์ นั่นคือ การนำทฤษฎีทางแสงมาช่วยในการออกแบบเลนส์ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของกล้องโทรทรรศน์เพื่อลดความคลาดของเลนส์ ที่เป็นข้อจำกัดสำคัญของการพัฒนาเลนส์ให้มีประสิทธิภาพ การ ออกแบบระบบเลนส์นี้จะนำโปรแกรม winlen3d ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถออกแบบ ระบบเลนส์และจำลองการเคลื่อนที่ของแสงเมื่อผ่านเลนส์แต่ละตัวรวมทั้งหาค่าความคลาดต่างๆของเลนส์ได้

นอกจากนี้ในงานวิจัยชิ้นนี้ยังนำระบบเลนส์ที่สร้างจากการออกแบบด้วยโปรแกรมมาสร้างให้เกิดเป็นชุดสาธิตความคลาดของเลนส์ทำให้สามารถจำลอง เปรียบเทียบ และแก้ไข ความคลาดของเลนส์ที่เกิดขึ้นจริงได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาหลักการของกล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสง
- 2) เพื่อศึกษาความคลาดในกล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสง
- 3) เพื่อศึกษาโปรแกรม winlens3D
- 4) เพื่อนำโปรแกรมwinlens3Dมาใช้ในการออกแบบระบบเลนส์ในกล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสง
- 5) เพื่อสร้างชุดสาธิตความคลาดของเลนส์ที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม winlen3d

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้จะใช้ หลักการทางแสง และโปรแกรม winlens3D มาช่วยออกแบบระบบเลนส์เพื่อช่วยลดการคลาด สีของเลนส์ในกล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสง และนำแบบที่จำลองได้จากโปรแกรมมาสร้างเป็นชุดสาธิตการแก้ความคลาดของเลนส์ในกล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจหลักการของกล้องโทรทรรศน์หักเหแสง
- 2) เข้าใจหลักการของความคลาดสี
- 3) สามารถใช้โปรแกรม WINLENS3D ออกแบบระบบเลนส์ในกล้องโทรทรรศน์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ช่วงเวลาการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ช่วงเวลาการดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
สิงหาคม-ธันวาคม	<ul style="list-style-type: none"> - ศึกษาหลักการและอุปกรณ์ของกล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสง - ศึกษาการใช้โปรแกรม winlens3D ในการออกแบบระบบเลนส์
มกราคม-กุมภาพันธ์	<ul style="list-style-type: none"> - จำลองระบบเลนส์ในชุดสาธิตความคลาดของเลนส์ในกล้องโทรทรรศน์โดยใช้โปรแกรม winlens3D - จัดเตรียมอุปกรณ์ในการสร้างชุดสาธิตความคลาดของเลนส์ในกล้องโทรทรรศน์
มีนาคม-พฤษภาคม	<ul style="list-style-type: none"> - สร้างชุดสาธิตความคลาดของเลนส์ในกล้องโทรทรรศน์ - สรุปและวิจารณ์ผลของโครงการพิเศษ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทัศนศาสตร์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลังจากการค้นพบ กล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสงครั้งแรกของโลก โดย Hans Lippershey ช่วงตัดแว่นชาวเนเธอร์แลนด์ ในปี ค.ศ.1608 กล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสงก็ถูกนำมาใช้ในงานด้านดาราศาสตร์ โดย Galileo Galilei ชาวอิตาลี ในปี ค.ศ.1609 หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนา กล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสง โดยการปรับปรุงคุณภาพของระบบเลนส์เรื่อยมา โดยในปี ค.ศ.1611 Christiaan Huygens นักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ได้นำเลนส์ประกอบสองเลนส์มาประกอบกันเป็นเลนส์ใกล้ตา ทำให้มีการแก้ไขความคลาดสีข้างแกนของภาพทำให้ภาพของวัตถุสีขาวสามารถมีสีที่เหมือนกันได้ในทุกมุม ปี ค.ศ. 1729 chestermoore hall นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ได้ค้นพบ เลนส์อโครเมติกขึ้นโดยสร้างจากการติดเลนส์สองชนิดที่มีค่าความคลาดสีหักล้างกันเข้าด้วยกัน จนในปี ค.ศ. 1757 john dolland ชาวอังกฤษ ได้สร้างกล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสงแบบอโครเมติกได้สำเร็จเป็นครั้งแรก หลังจากนั้นในปี ค.ศ.1760 klingentierna นักคณิตศาสตร์ชาวสวีเดน ได้มีการคิดค้นทัศนศาสตร์ซึ่งสามารถอธิบายหลักการของอโครเมติกเลนส์ จนกระทั่งในปี 1764 D'alembert ได้มีการอธิบายถึงการนำแก้วสามชนิดมาประกอบกัน เพื่อให้สามารถแก้ความคลาดทั้งความคลาดสีและความคลาดทรงกลมได้ ด้วยทัศนศาสตร์เหล่านี้ การผลิตกล้องโทรทรรศน์จึงเป็นไปอย่างหลากหลายจนถึงปัจจุบัน

2.1 สมบัติของแสง

แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ สมบัติเชิงเรขาคณิตและสมบัติทางกายภาพ

2.1.1 สมบัติเชิงเรขาคณิตแสงเชิงเรขาคณิต

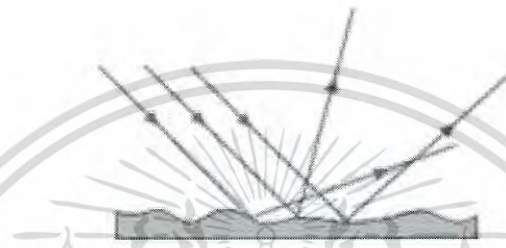
จะศึกษาโดยเขียนเส้นตรงแสดงทิศทาง การเคลื่อนที่โดยใช้ลูกศรกำกับ การพิจารณาแบบนี้จะพิจารณาว่าแสงเดินทางเป็นเส้นตรง จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาสมบัติของแสงต่อไป ซึ่งการพิจารณาเช่นนี้จำเป็นต้องให้วัตถุที่ถูกแสงผ่านเข้าไปมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นแสง ประกอบด้วย สมบัติการสะท้อนและหักเหแสง

2.1.1.1 สมบัติการสะท้อนแสง

การสะท้อนแสงเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อแสงไปกระทบสิ่งกีดขวาง แล้วแสงไม่สามารถทะลุผ่านวัตถุนั้นได้ก็จะเกิดการสะท้อนกลับในตัวกลางเดิม ซึ่งเกิดได้ทั้งวัตถุผิวเรียบและขรุขระ ซึ่งจะเป็นตามลักษณะดังนี้



รูปที่ 2.1 การสะท้อนของแสงที่วัตถุผิวเรียบเป็นมัน [1]



รูปที่ 2.2 การสะท้อนของแสงที่วัตถุผิวขรุขระ [2]

โดยเราจะเขียนรังสีแทนหน้าคลื่น เมื่อลำแสงตกกระทบก็จะเกิดการสะท้อนขึ้นโดยการสะท้อนจะมีลักษณะเป็นไปตามกฎการสะท้อนดังนี้

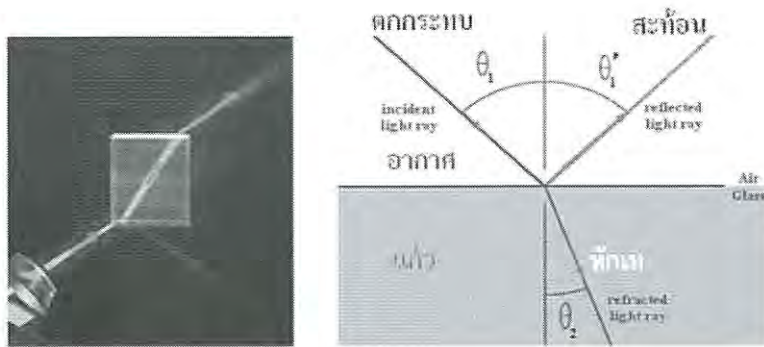
1. รังสีตกกระทบเส้นปกติ (เส้นตั้งฉากกับผิว) และรังสีสะท้อนจะอยู่บนระนาบเดียวกันเสมอ
2. มุมตกกระทบ เท่ากับมุมสะท้อน ณ ตำแหน่งที่แสงตกกระทบ จากกฎการสะท้อนจะแสดงได้ดังภาพ 3



รูปที่ 2.3 กฎการสะท้อนของแสง [3]

2.1.1.2 สมบัติการหักเห

การหักเห เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อแสงผ่านวัตถุโปร่งใส 2 อย่างที่อยู่ติดกัน และมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นผลทำให้อัตราเร็วแสงเปลี่ยนไป ความยาวคลื่นแสงเปลี่ยนแปลง ทิศทางของแสงเปลี่ยนแปลงไปด้วยโดยความถี่คงที่ ซึ่งในขณะที่แสงเกิดการหักเหก็จะเกิดการสะท้อนของแสงขึ้นพร้อมๆกันด้วย ดังรูปศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ปรากฏการณ์การหักเหของแสง [4]

จากรูป เมื่อแสงเดินทางผ่านอากาศ(ตัวกลางที่ 1) มีค่าดัชนีหักเห n_1 ไปยังแก้ว (ตัวกลางที่ 2) มีค่าดัชนีหักเห n_2 จะเห็นได้ว่ารังสีของแสงที่เข้าไปในตัวกลางที่ 2 มีแนวทางเปลี่ยนไป จากแนวรังสีตกกระทบเดิม แสงจะเกิดการหักเห โดยถ้าให้ θ_1 คือมุมที่รังสีตกกระทบทำกับเส้นปกติ และ θ_2 คือมุมที่รังสีหักเหทำกับเส้นปกติ เรียกว่ามุมหักเห (angle of refraction) จากกฎของสเนลล์ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบ θ_1 และมุมหักเห θ_2 และค่าดัชนีหักเหในตัวกลางทั้งสอง n_1 และ n_2 ซึ่งจากกฎของสเนลล์จะพบว่าเมื่อแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยเข้าสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่า แสงจะหักเหเข้าหาเส้นปกติ ในทางตรงกันข้ามถ้าแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากเข้าสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า แสงจะหักเหออกจากเส้นปกติ

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

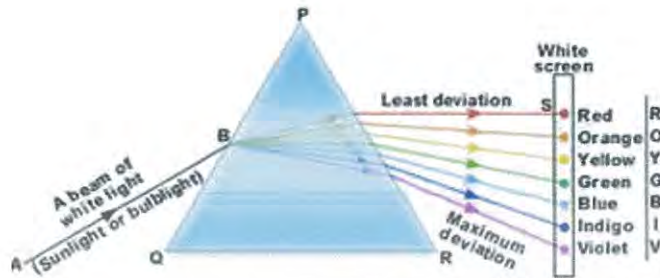
ซึ่งจากกฎของสเนลล์จะพบว่าเมื่อแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยเข้าสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่า แสงจะหักเหเข้าหาเส้นปกติ ในทางตรงกันข้ามถ้าแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากเข้าสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า แสงจะหักเหออกจากเส้นปกติ

2.1.1.2.1 การกระจายแสง

ในการศึกษาการกระหักเหแสงก่อนหน้านี้นี้ เราจะสมมติว่าแสงมีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวเท่านั้น ซึ่งเรียกว่า monochromatic light แต่ทั่วไปแสงจะเป็น polychromatic light คือแสงที่ประกอบไปด้วยคลื่นซึ่งความยาวคลื่นของมันมีค่ามากกว่า 1 ค่า ทำให้ที่ความเร็วของแสงในวัสดุขึ้นกับความยาวคลื่นของแต่ละคลื่น ดัชนีการหักเหจึงเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นด้วย การที่คลื่นที่เคลื่อนผ่านสสารแล้วความเร็วของคลื่นและดัชนีหักเหแปรตามความยาวคลื่นและเกิดการเบี่ยงเบน เราเรียกว่าการกระจายแสง โดยเมื่อแสงแต่ละความยาวคลื่นผ่านสสาร จะเกิดการเบี่ยงเบนขึ้นตามภาพที่ 2.5 แสงที่ถูกกระจายออกจะมีลักษณะเป็น สเปกตรัม ผลต่างระหว่างมุมเบี่ยงเบนของรังสีสองลำใดๆเรียกว่า การกระจายเชิงมุมของรังสีนั้น ในวัสดุแต่ละชนิดจะมีการกระจายของแสงที่แตกต่างกัน โดยจะบอกด้วยค่าคงตัวการกระจายแสง V (dispersive index) โดยค่า V จะเป็นส่วนกลับของค่ากำลังการกระจายแสง Δ (dispersive power) ซึ่งเป็นอัตราส่วนเอกสารระหว่าง การกระจายเชิงมุมต่อมุมเบี่ยงเบนเฉลี่ย โดยค่าคงตัวการกระจายแสง V จะแปรเป็นไปตามสมการ

ไม่ว่าอย่างไรก็ตาม ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = \frac{1}{\Delta} = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (1)$$



รูปที่ 2.5 แสดงการกระจายแสงในปริซึม [5]

2.1.2 สมบัติเชิงกายภาพ ศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ทางแสงที่ไม่สามารถ อธิบายได้ด้วยแสงเชิงเรขาคณิต ประกอบด้วย ปรากฏการณ์ดังนี้การแทรกสอด (Interference) การเลี้ยวเบน (Diffraction)

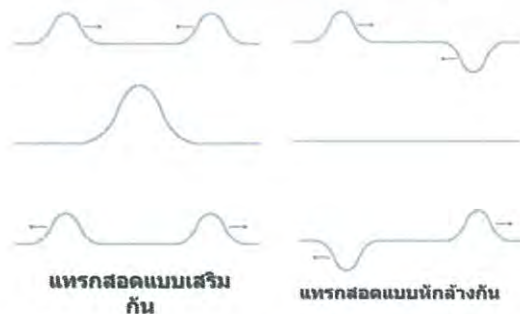
2.1.2.1 สมบัติการแทรกสอด

การแทรกสอดเป็น ปรากฏการณ์ ที่เกิดขึ้นได้เมื่อคลื่นสองขบวนเคลื่อนที่บนตัวกลางเดียวกันมาพบกัน ทำให้เกิดคลื่นลัพธ์จากการรวมกันของคลื่นทั้งสองขณะที่เกิดการซ้อนทับกัน การแทรกสอดกันของคลื่นมี 2 แบบ คือ แบบเสริม (Constructive interference) และการแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive interference)

แบบที่ 1 การแทรกสอดแบบเสริมกัน การเกิดในลักษณะนี้มีได้สองกรณีคือ เมื่อคลื่นมาเจอกับคลื่น และเมื่อท้องคลื่นมาเจอกับท้องคลื่น

แบบที่ 2 การแทรกสอดแบบหักล้างกัน (Destructive interference) จะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นหรือส่วนของคลื่นที่มาเจอกันมีการกระจัดในทิศตรงข้ามกัน ดังรูป

การแทรกสอด (Interference)



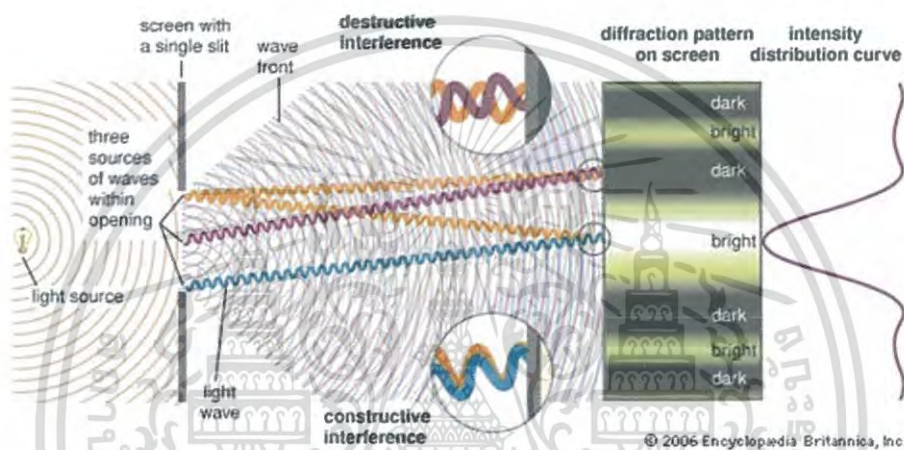
รูปที่ 2.6 การแทรกสอดเสริมและหักล้างกันของคลื่น [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 สมบัติการเลี้ยวเบน

เมื่อคลื่นเดินทางผ่านสิ่งกีดขวาง (เช่น ขอบของวัตถุ ช่องเปิดเล็กเล็ก) คลื่นจะเกิดการเลี้ยวเบน(diffraction) กระจายตัวออกจากทิศการเคลื่อนที่ในแนวเดิม แสงที่เดินทางผ่านสิ่งกีดขวางจะเลี้ยวเบนที่ขอบ คลื่นที่เลี้ยวเบนผ่านส่วนต่าง ๆ ของสิ่งกีดขวางนั้นจะเกิดการแทรกสอดกัน สามารถสังเกตผลการแทรกสอด (interference pattern) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ของแถบสว่างสลับกับแถบมืดบนฉาก (เกิดจากการแทรกสอดของคลื่นแสงที่เลี้ยวเบนออกจากส่วนต่าง ๆ ของสิ่งกีดขวาง)

หลักการเลี้ยวเบนศึกษาได้จากการเลี้ยวเบนผ่านช่องเปิดเล็กเดี่ยว



รูปที่ 2.7 ภาพแสดงการเลี้ยวเบนผ่านช่องเปิดเล็กเดี่ยว [7]

ผลที่ได้บนฉากคือภาพของแถบสว่างและแถบมืดสลับกัน โดยมีแถบสว่างกลางอยู่บริเวณแนว กลางที่มุม $\theta = 0$ ตามด้วยแถบมืดและแถบสว่างสลับกันไป ซึ่งเป็นผลจากการแทรกสอดของแสง ที่ออกมาจากช่องเปิด

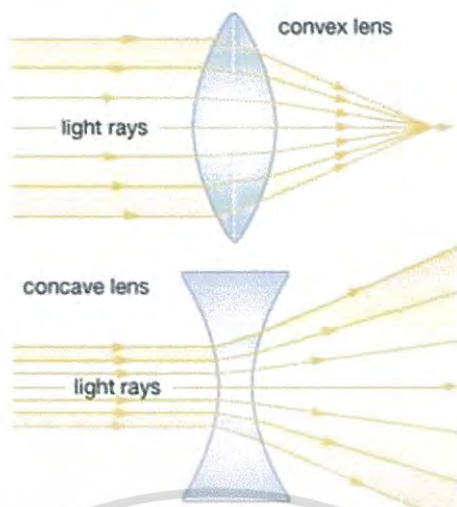
2.2 การเกิดภาพจากเลนส์

เลนส์ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ช่วยรวมแสงและกระจายแสง

เลนส์มี 2 ชนิดคือ

- 1.เลนส์นูนคือ เลนส์ที่ทำหน้าที่รวมแสงเมื่อมีรังสีขนานตกกระทบบนเลนส์
- 2.เลนส์เว้าคือ เลนส์ที่ทำหน้าที่ถ่างรังสีแสงเมื่อรังสีขนานมาตกกระทบบนเลนส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.8 ภาพแสดงการรวมแสงของเลนส์นูนและการกระจายแสงของเลนส์เว้า [7]

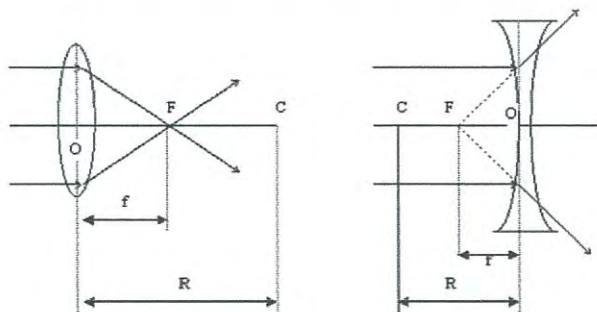


รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะเลนส์ในรูปแบบต่างๆ [8]

2.2.1 เลนส์บาง

เป็นพื้นฐานของการพิจารณาภาพที่เกิดจากเลนส์โดยพิจารณาว่าเลนส์ไม่มีความหนา ซึ่งการพิจารณาเลนส์สามารถทำได้โดยการเขียนแผนภาพรังสีแสดงทิศทางที่รังสีตกกระทบและเกิดการหักเห และการคำนวณ

2.2.1.1 ส่วนประกอบของเลนส์



รูปที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบของเลนส์เว้าและเลนส์นูน [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แนวทิศทางของแสงที่ส่องมายังเลนส์เรียกว่า แนวรังสีของแสง ถ้าแสงมาจากระยะไกลมากหรือระยะอนันต์ เช่นแสงจากดวงอาทิตย์หรือดวงดาวต่างๆ แสงจะส่องมาเป็นรังสีขนาน
- จุดโฟกัสของเลนส์หรือจุด F ถ้าเป็นเลนส์นูนจะเกิดจากรังสีหักเหไปรวมกันที่จุดโฟกัส แต่ถ้าเป็นเลนส์เว้าจะเกิดจุดเสมือนแสงมารวมกันหรือจุดโฟกัสเสมือน
- แกนमुखสำคัญ (Principal axis) คือเส้นตรงที่ลากผ่านกึ่งกลางของเลนส์และจุดศูนย์กลางความโค้งของผิวเลนส์
- จุด O คือ จุดใจกลางเลนส์ (Optical center)
- จุด C คือ จุดศูนย์กลางความโค้งของผิวเลนส์ (Center of Curvature)
- OC เป็น รัศมีความโค้ง (Radius of curvature) เขียนแทนด้วย R
- F เป็นความยาวโฟกัส (Focal length) โดยความยาวโฟกัสจะเป็นครึ่งหนึ่งของรัศมีความโค้ง ($R = 2F$)

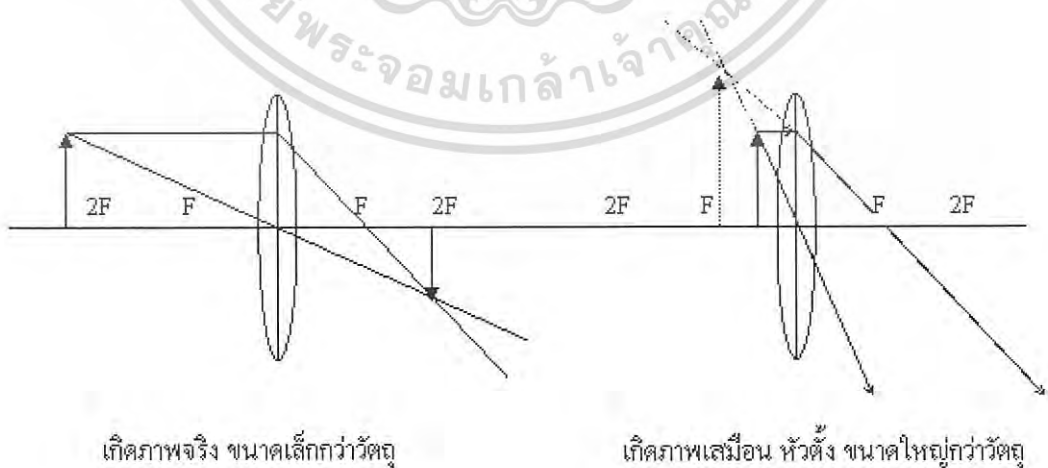
2.2.1.2 ภาพที่เกิดจากเลนส์บาง

2.2.1.2.1. ภาพที่เกิดจากเลนส์นูน

เลนส์นูนสามารถให้ทั้งภาพจริงและภาพเสมือน และภาพจริงเป็นภาพที่ฉากสามารถรับได้เป็นภาพหัวกลับกับวัตถุ ส่วนภาพเสมือนเป็นภาพที่ฉากไม่สามารถรับได้ เป็นภาพหัวตั้งเหมือนวัตถุ

ภาพจริงที่เกิดจากเลนส์นูนมีหลายขนาด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะวัตถุและตำแหน่งภาพจริงที่จะเกิดหลังเลนส์

ภาพเสมือนที่เกิดจากเลนส์นูนมีขนาดใหญ่กว่าวัตถุและตำแหน่งภาพเสมือนจะเกิดหน้าเลนส์



รูปที่ 2.11 แสดงหลักการเกิดภาพของเลนส์นูน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลนส์นูนจะให้ทั้งภาพจริงและภาพเสมือน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของวัตถุ ถ้าระยะวัตถุมากกว่าความยาวโฟกัส จะเกิดภาพจริง แต่ถ้าระยะวัตถุน้อยกว่าความยาวโฟกัส จะเกิดภาพเสมือน

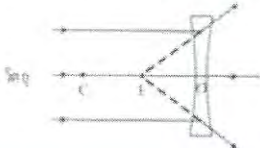

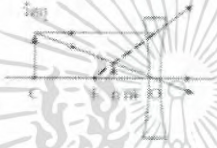



ตำแหน่งวัตถุ	การเขียนรังสีแสง	ชนิดภาพ	ขนาดภาพ	ตำแหน่งภาพ
วัตถุอยู่ไกลมากที่ระยะอนันต์ $s \Rightarrow \infty$		ภาพจริง	เป็นจุด	หลังเลนส์ที่จุด F'
วัตถุอยู่หน้า C $2f < s < \infty$		ภาพจริง หัวกลับ	เล็กกว่าวัตถุ	หลังเลนส์ระหว่าง C' กับ F'
วัตถุอยู่ที่ C $s = 2f$		ภาพจริง หัวกลับ	เท่าวัตถุ	หลังเลนส์ที่จุด C'
วัตถุอยู่ระหว่าง C กับ F $f < s < 2f$		ภาพจริง หัวกลับ	ใหญ่กว่าวัตถุ	หลังเลนส์เลยจุด C'
วัตถุอยู่ที่ F $s = f$		ภาพไม่ชัด	ใหญ่ที่สุด	ระยะอนันต์
วัตถุอยู่ระหว่าง F กับ O $0 < s < f$		ภาพเสมือน หัวตั้ง	ใหญ่กว่าวัตถุ	หน้าเลนส์เกินระยะวัตถุ

รูปที่ 2.12 แสดงการเกิดภาพที่ระยะต่างของเลนส์นูน [11]

2. ภาพที่เกิดจากเลนส์เว้า

เลนส์เว้าให้ภาพเสมือนเพียงอย่างเดียว ไม่ว่าจะระยะวัตถุจะมากหรือน้อยกว่าความยาวโฟกัส และขนาดภาพมีขนาดเล็กกว่าวัตถุนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งวัตถุ	ภาพเขียนรังสีแสง	ชนิดภาพ	ขนาดภาพ	ตำแหน่งภาพ
วัตถุอยู่ไกลมากที่ระยะอนันต์ $s \Rightarrow \infty$		ภาพเสมือน	เป็นจุด	หน้าเลนส์ที่จุด F
วัตถุอยู่หน้า C $2f < s < \infty$		ภาพเสมือนหัวตั้ง	เล็กกว่าวัตถุ	หน้าเลนส์ระหว่าง F กับ O
วัตถุอยู่ที่ C $s = 2f$		ภาพเสมือนหัวตั้ง	เล็กกว่าวัตถุ	หน้าเลนส์ระหว่าง F กับ O
วัตถุอยู่ระหว่าง C กับ F $f < s < 2f$		ภาพเสมือนหัวตั้ง	เล็กกว่าวัตถุ	หน้าเลนส์ระหว่าง F กับ O
วัตถุอยู่ที่ F $s = f$		ภาพเสมือนหัวตั้ง	เล็กกว่าวัตถุ	หน้าเลนส์ระหว่าง F กับ O
วัตถุอยู่ระหว่าง F กับ O $0 < s < f$		ภาพเสมือนหัวตั้ง	เล็กกว่าวัตถุ	หน้าเลนส์ระหว่าง F กับ O

รูป 2.13 การเกิดภาพที่ระยะต่างของเลนส์เว้า [12]

2.2.1.3 การคำนวณหาชนิดและตำแหน่งของภาพที่เกิดจากเลนส์บาง

การคำนวณหาชนิดและตำแหน่งของภาพที่เกิดจากเลนส์หาได้จากสมการ

$$1/f = 1/s + 1/s' \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{s} - \frac{1}{s'} \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

s คือ ระยะวัตถุ

(จะมีเครื่องหมายเป็น + เมื่อเป็นวัตถุจริง เป็น - เมื่อเป็นวัตถุเสมือน)

s' คือ ระยะภาพ

(ถ้าภาพจริงใช้เครื่องหมาย + และภาพเสมือนใช้เครื่องหมาย -)

f คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์ และ P คือกำลังการหักเห ซึ่งมีหน่วยเป็น ไดออปเตอร์

(เครื่องหมาย + สำหรับเลนส์นูน และเครื่องหมาย - สำหรับเลนส์เว้า)

การคำนวณหากำลังขยายของเลนส์ หาได้จากสมการ

$$m = I / O = s' / s \quad (4)$$

m คือ กำลังขยายของเลนส์

(เครื่องหมาย + สำหรับภาพจริง และภาพเสมือนใช้เครื่องหมาย -)

I คือ ขนาดหรือความสูงของภาพ

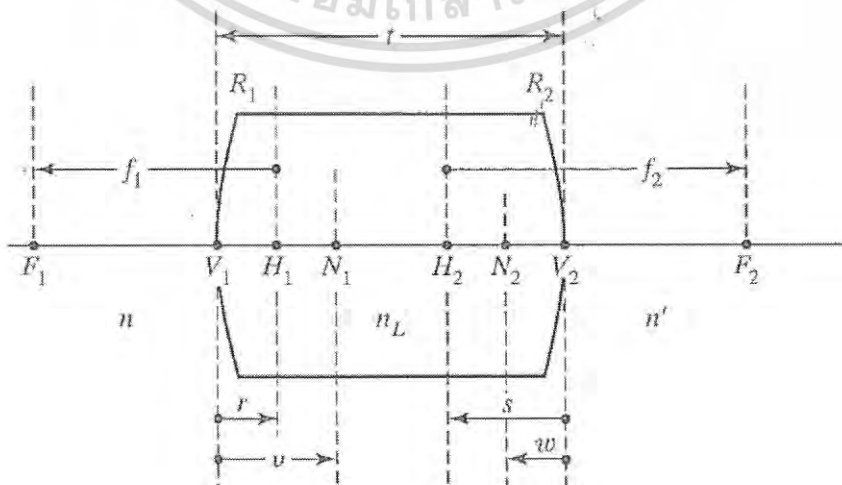
(เครื่องหมาย + สำหรับภาพจริง และภาพเสมือนใช้เครื่องหมาย -)

O คือ ความสูงของวัตถุ (มีเครื่องหมาย + เสมอ)

2.2.2 เลนส์หนา

เลนส์หนาเป็นเลนส์ที่ถูกใช้กันทั่วไปประกอบด้วยสองผิวและมีความหนา เลนส์หนาจะมีจุดพิเศษหลักที่เกี่ยวข้องกับการเกิดภาพของวัตถุจำนวน 6 จุดบนแกนของเลนส์เรียกว่าจุดคาร์ดินัล

2.2.2.1 จุดคาร์ดินัล มี 6 จุดดังนี้

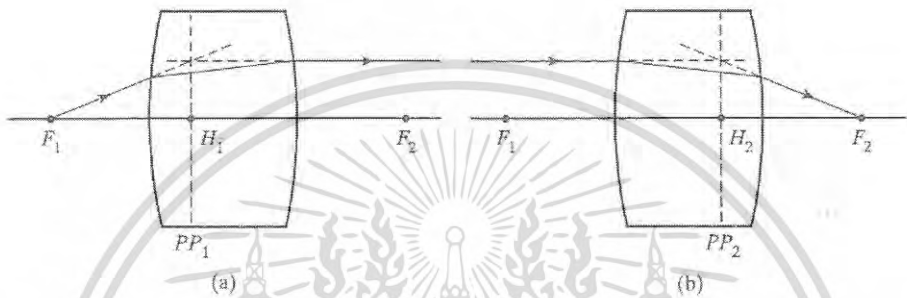


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.14 แสดงจุดคาร์ดินัลในเลนส์หนา [13] ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

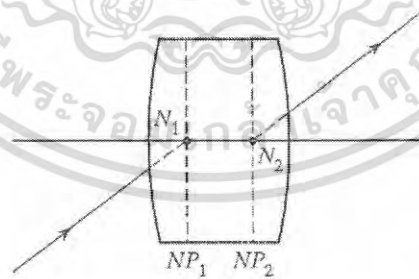
1. จุดโฟกัสที่ 1 F_1 และจุดโฟกัสที่ 2 F_2

2. H_1 และ H_2 คือจุดที่ระนาบमुखย์สำคัญตัดกับแกนमुखย์สำคัญ ซึ่งเรียกว่าจุดमुखย์สำคัญที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยรังสีที่ตกกระทบจากจุดโฟกัสที่ 1 เมื่อหักเหผ่านเลนส์หนาจะเป็นรังสีขนานกับแกนเชิงแสงดังแสดงในรูปที่ 2.15 a รังสีตกกระทบที่ขนานกับแกนเชิงแสงจะหักเหไปตัดกับแกนเชิงแสงที่จุดโฟกัสที่ 2 ดังแสดงในรูป 2.15b เมื่อต่อแนวรังสีตกกระทบและรังสีหักเหที่ออกจากเลนส์จะพบว่าแนวรังสีทั้งสองตัดกันที่ระนาบमुखย์สำคัญ



รูปที่ 2.15 แสดงจุดमुखย์สำคัญของเลนส์หนา [14]

3. N_1 และ N_2 คือจุดโนตัล เป็นจุดบนแกนमुखย์สำคัญที่มีขนาดขยายเชิงมุมเท่ากัน โดยรังสีที่พุ่งเข้าหาจุดโนตัล N_1 จะออกจากระบบเชิงแสงในแนวขนานกับรังสีตกกระทบ แต่จะเลื่อนไปเสมือนกับพุ่งออกมาจากจุดโนตัล N_2 ดังรูป 2.15



รูปที่ 2.16 แสดงจุดโนตัลของเลนส์หนา [14]

2.2.2.2 การคำนวณในเลนส์หนา

หาระยะ f_1 และ f_2 สามารถคำนวณได้จากสมการข้างทำเลนส์ คือ

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)t}{nR_1R_2} \right) \quad \text{โดย } f_2 = -\frac{n'}{n} f \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาระยะ r และ s ได้จากสมการ

$$s = \frac{n_L - n'}{n_L R_2} f_1 t \quad \text{และ} \quad s = -\frac{n_L - n}{n_L R_1} f_2 t \quad (6)$$

หาระยะ v และ w จากสมการ

$$v = \left(1 - \frac{n'}{n} + \frac{n_L - n'}{n_L R_2} t\right) f_1 \quad \text{และ} \quad w = \left(1 - \frac{n}{n'} + \frac{n_L - n}{n_L R_1} t\right) f_2 \quad (7)$$

หาระยะภาพจากสมการหาค่าลิ่งขยายจากสมการ

$$-\frac{f_1}{s_o} + \frac{f_2}{s_i} = 1 \quad \text{และ} \quad m = -\frac{n s_i}{n' s_o} \quad (8)$$

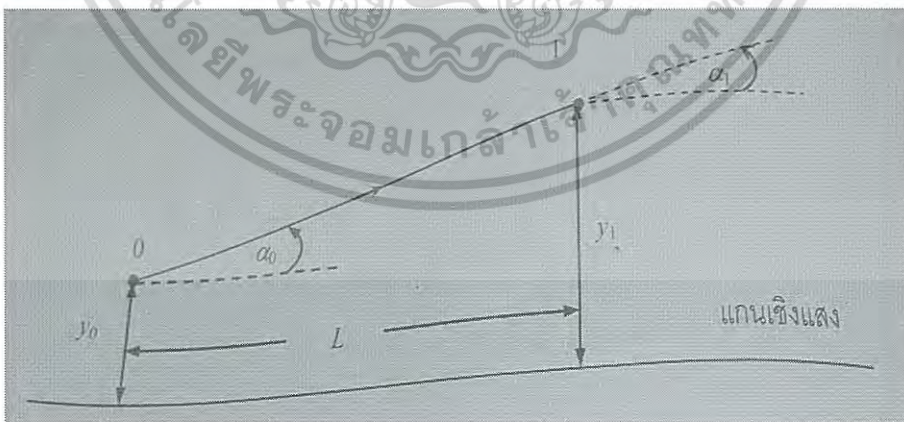
2.2.2.3 การใช้ matrix ช่วยวิเคราะห์เลนส์หนา

MATRIX เป็นอีกวิธีที่ช่วยในการวิเคราะห์หาค่าตำแหน่งของภาพของเลนส์ได้
เหมาะสำหรับการวิเคราะห์แสงที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหลายตัวกลาง

2.2.2.3.1 เมทริกซ์การเลื่อน

พิจารณาการเลื่อนของรังสีในตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังภาพที่
2.16 กำหนดรังสีเลื่อนไปในแนวแกนเชิงแสงเป็นระยะ L พิกัดของ จุด 0 และ 1 เป็น (y_0, α_0) และ
 (y_1, α_1) ตามลำดับ จากรูปจะได้

$$\alpha_1 = \alpha_0 \quad \text{และ} \quad y_1 = y_0 + L \tan \alpha_0 \quad (9)$$



รูปที่ 2.17 การเลื่อนของรังสี [15]

จากการประมาณรังสีข้างแกน $\tan \alpha \cong \alpha$

$$\text{จะได้} \quad y_1 = (1)y_0 + (L)\alpha_0 \quad \text{และ} \quad \alpha_1 = (0)y_0 + (1)\alpha_0 \quad (10)$$

เมื่อนำมาเขียนในรูป matrix จะได้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0 \\ \alpha_0 \end{bmatrix} \quad \text{ซึ่งเรียกเมทริกซ์นี้ว่า เมทริกซ์การถ่ายโอนรังสี}$$

2.2.2.3.2 เมทริกซ์การหักเห

$$\alpha' = \theta' - \phi = \theta' - \frac{y}{R} \quad (11)$$

และ
$$\alpha = \theta - \phi = \theta - \frac{y}{R} \quad (12)$$

จากการประมาณรังสีข้างแกนของกฎของสเนลล์ จะเป็น

$$n\theta = n'\theta' \quad (13)$$

$$\alpha' = \left(\frac{n}{n'}\right)\theta - \frac{y}{R} = \left(\frac{n}{n'}\right)\left(\alpha + \frac{y}{R}\right) - \frac{y}{R} \quad (14)$$

$$\alpha' = \frac{1}{R} \left(\frac{n}{n'} - 1\right) y + \left(\frac{n}{n'}\right) \alpha \quad (15)$$

สมการเส้นตรงที่เหมาะสมสำหรับปัญหาคือ

$$y_1 = (1)y + (0)\alpha \quad (16)$$

$$\alpha' = \left[\left(\frac{1}{R}\right)\left(\frac{n}{n'} - 1\right)\right]y + \left(\frac{n}{n'}\right)\alpha \quad (17)$$

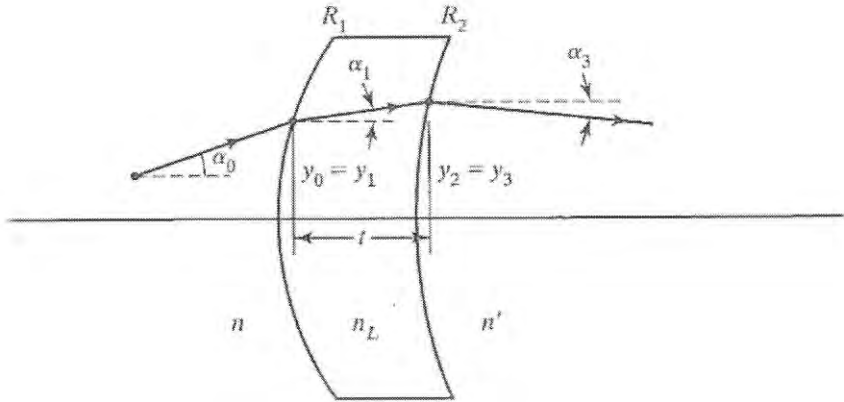
ซึ่งจะได้เมทริกซ์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} y' \\ \alpha' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R} \left(\frac{n}{n'} - 1\right) & \frac{n}{n'} \end{bmatrix} \quad (18)$$

2.2.2.3.3 เมทริกซ์การสำหรับเลนส์หนา

รูปที่ 2.18 แสดงเลนส์หนาโดยรัศมีความโค้งเป็นบวก ดัชนีหักเห n_L วางอยู่ในตัวกลาง n' และ n โดยมีการหักเหของรังสีสองครั้งและมีการเลื่อน 1 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 การหักเหในเลนส์หนา [16]

ความสัมพันธ์ของพิกัดต่างๆสามารถเขียนได้ คือ
การหักเหครั้งที่ 1

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} y_0 \\ \alpha_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

การเลื่อนของรังสี

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} y_1 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

การหักเหครั้งที่ 2

$$\begin{bmatrix} y_3 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = M_3 \begin{bmatrix} y_2 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า

$$\begin{bmatrix} y_3 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = M_3 M_2 M_1 \begin{bmatrix} y_0 \\ \alpha_0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

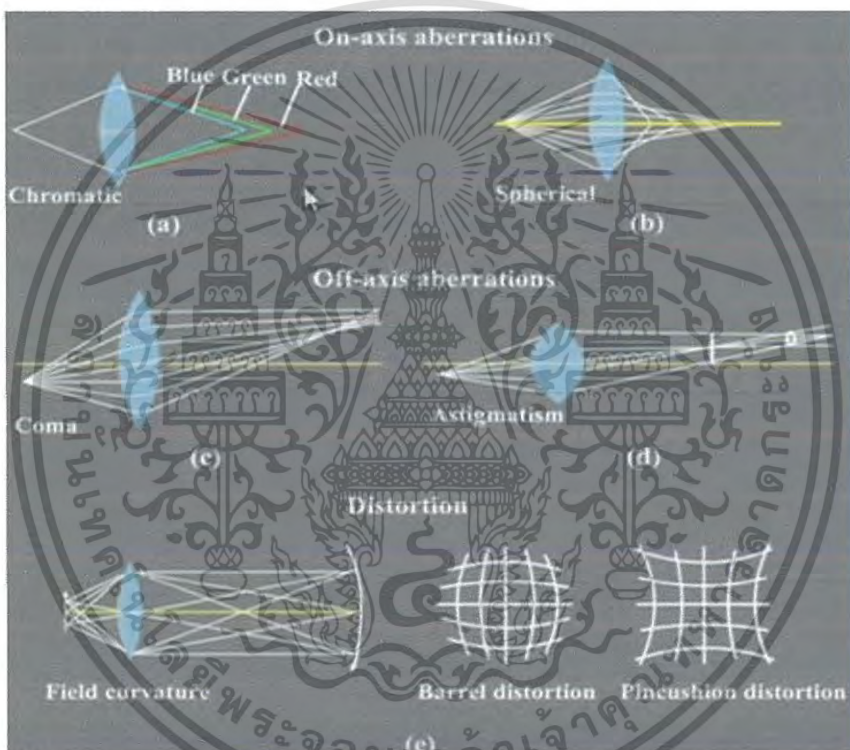
จากสมการ ดังนั้น เมทริกซ์ของเลนส์ตามรูป 2.17 คือ

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_L - n'}{n' R_2} & \frac{n_L}{n'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n - n_L}{n_L R_1} & \frac{n}{n_L} \end{bmatrix} \quad (23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ความคลาดของเลนส์

การบันทึกรอยเส้นรังสีและสูตรต่างๆสำหรับการเกิดภาพ ในหัวข้อการหักเหก่อนหน้านี จะถูกต้องเมื่อรังสีที่เกี่ยวข้องเป็นรังสีข้างแกนคือรังสีที่อยู่ใกล้กับแกนเชิงแสงและทำมุมขนาดเล็ก โดยสามารถประมาณ $\sin \theta = \theta$ นั่นคือจะถูกต้องเมื่อพิจารณาเฉพาะพจน์แรกของการกระจายอนุกรมฟังก์ชันไซน์ เรียกว่าการประมาณอันดับหนึ่ง เมื่อมุมของรังสีที่กระทำกับแกนแสงมีขนาดโตขึ้น การประมาณไซน์จะพิจารณาถึงพจน์เรียกว่าการประมาณอันดับสามซึ่งจะทำให้เกิดความคลาดสำหรับแสงเอกรงค์ (Optical aberration) จะมีความคลาดอยู่ 5 ชนิด คือ ความคลาดทรงกลม ความพรั่าแสงแบบโคมา ความคลาดเอียง ความโค้งของสนาม และความบิดเบี้ยว และสำหรับแสงที่มีหลายความยาวคลื่นจะเกิดความคลาดสี



รูปที่ 2.19 แสดงความคลาดแบบต่างๆของเลนส์ [17]

2.3.1 ความคลาดแสง (optical aberration)

จากทฤษฎีต่างๆที่ผ่านมาเราประมาณให้ $\sin \theta$ แทนได้ด้วย θ เป็นการกำจัดระบบให้พิจารณาเฉพาะภายในบริเวณรอบแกนเชิงแสงซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อพิจารณารังสีที่ทำให้เกิดภาพจากขอบนอกของเลนส์ การประมาณ $\sin \theta \approx \theta$ และกฎอย่างง่ายของสเนลล์จะไม่ถูกต้อง ในกรณีทั่วไปการกระจายอนุกรมของฟังก์ชันไซน์จะเป็น

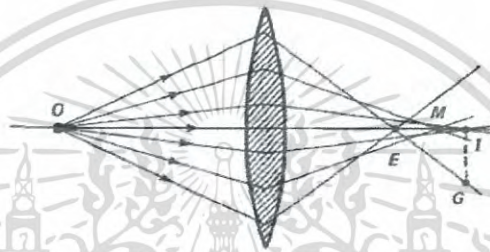
$$\sin \theta = \theta + \frac{\theta^3}{3} + \frac{\theta^5}{5} + \frac{\theta^7}{7} + \dots \quad (24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้านำสองพจน์แรกของการกระจายอนุกรมรวมเข้าไปในการประมาณ เราเรียกว่า การประมาณอันดับสาม ซึ่งแตกต่างจากการประมาณอันดับหนึ่ง ผลที่เกิดขึ้นจากการประมาณอันดับสามเป็นความคลาดปรัภูมิ ซึ่งประกอบด้วย ความคลาดทรงกลม ความพรั่างแสงแบบโคมา ความคลาดเอียง ความโค้งของสนามและความบิดเบี้ยว

2.3.1.1 Spherical aberration (ความคลาดทรงกลม)

Spherical aberration (ความคลาดทรงกลม)เป็นการที่แสงหักเหผ่านเลนส์หรือสะท้อนกับกระจกแล้วไม่ตกกระทบบนจุดเดียวกัน โดยจุดภาพของรังสีข้างแกนของเลนส์จะไม่อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับจุดภาพของรังสีในแนวแกนของเลนส์ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพ



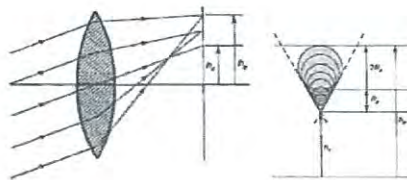
รูปที่ 2.20 แสดงหลักการความคลาดแบบทรงกลม [18]



รูปที่ 2.21 แสดงภาพที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดความคลาดทรงกลม [19]

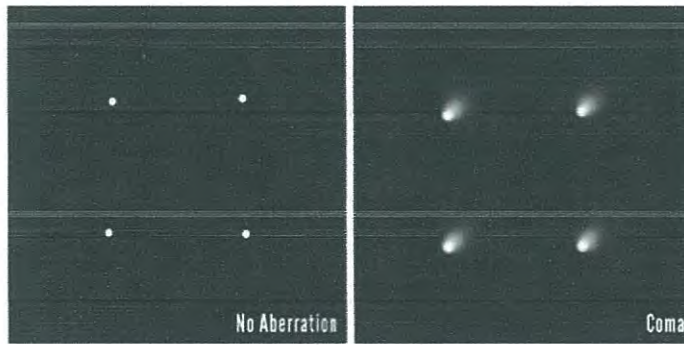
2.3.1.2 Coma

Coma (โคมา) เกิดจากการที่วัตถุอยู่นอกแกนทำให้เกิดการหักเหที่มุมต่างๆกันและเลนส์ไม่สามารถรวมแสง จากทุกส่วนของเลนส์ให้พบกันที่จุดเดียวได้ ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นจุดที่ไม่คมชัดคล้ายกับดาวหางที่มีส่วนหัวและหาง



รูปที่ 2.22 หลักการของความคลาดแบบโคมา [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 แสดงภาพเมื่อเกิดความคลาดแบบโคมา [21]

2.3.1.3 Astigmatism

Astigmatism (การพัว) เป็นข้อบกพร่องซึ่งทำให้จุดของภาพที่เกิดขึ้นเกิดการเบลอ โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดขึ้นคือการเพิ่มระยะภาพซึ่งจะส่งผลให้ภาพไม่ชัดเจนตามระยะที่ห่างออกไปโดยแสดงดังภาพ



รูปที่ 2.24 แสดงหลักการของความคลาดแบบพัว (Astigmatism) [22]



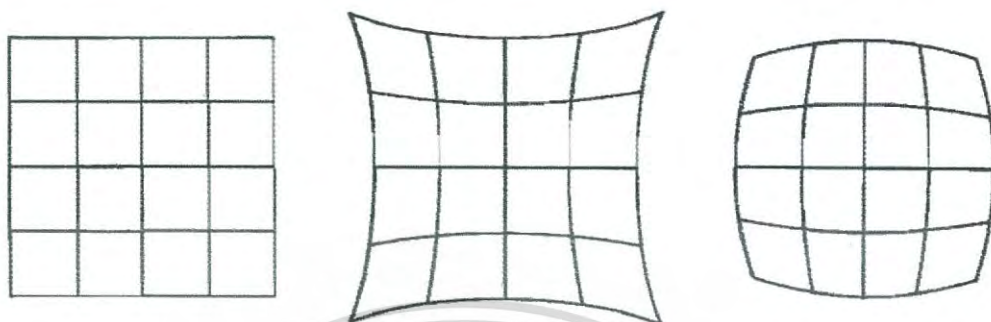
รูปที่ 2.25 แสดงภาพเมื่อเกิดความคลาดแบบพัว (astigmatism) [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

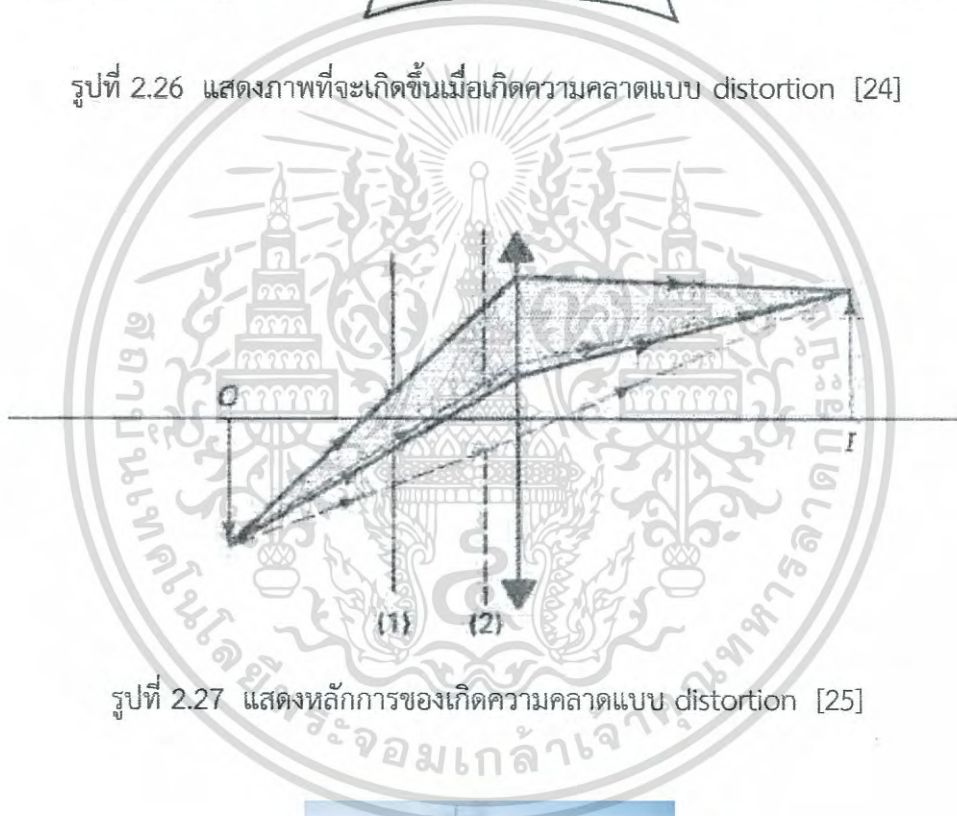
2.3.1.4 Distortion

Distortion (การบิดเบี้ยว) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงกำลังขยายของภาพ

โดยแสดงดังภาพ



รูปที่ 2.26 แสดงภาพที่จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความคลาดแบบ distortion [24]

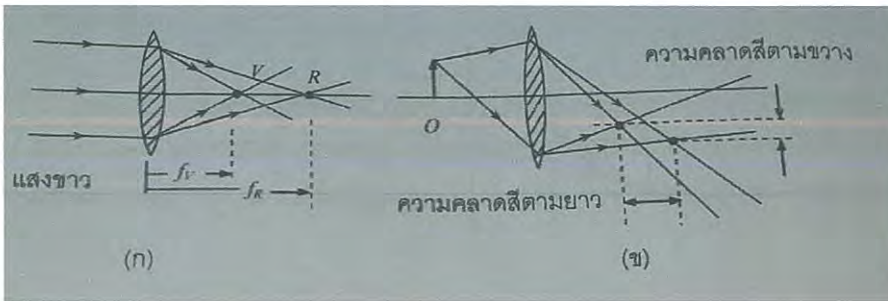


รูปที่ 2.27 แสดงหลักการของเกิดความคลาดแบบ distortion [25]



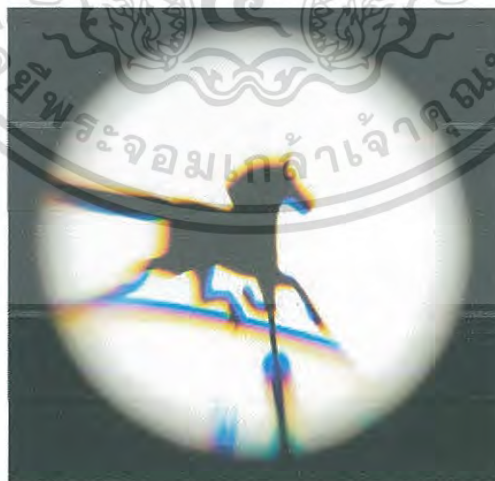
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.28 แสดงภาพจริงที่เกิดความคลาดแบบ distortion [26] ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ความคลาดสี (Chromatic aberration)



รูปที่ 2.29 ความคลาดสีในเลนส์บาง [27]

จากทฤษฎี ความคลาดสีที่ในหัวข้อที่ผ่านมาไม่ได้พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหที่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นหรือปรากฏการณ์การกระจายแสง ซึ่งจะทำให้เกิดความคลาดสี โดยภาพที่เกิดจากแสงสีแตกต่างกันจะไม่ซ้อนทับกัน ความคลาดสีของเลนส์แสดงในรูป 2.32 (ก) เนื่องจากความยาวโฟกัส f ของเลนส์ขึ้นอยู่กับดัชนีหักเห n ของแก้ว ดังนั้นความยาวโฟกัสจึงเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น จากรูป 2.32(ก) แสดงการลู่เข้าของรังสีสีน่านผ่านเลนส์ไปยังจุดโฟกัสที่แตกต่างกันสำหรับแสงสีแดงและสีม่วงของสเปกตรัมย่านตามองเห็น สังเกตว่ากรวยของแสงสีม่วงจะล้อมรอบด้วยแสงสีแดงที่จุด R ถ้าแสงตกกระทบบนประกอบด้วยแสงทุกความยาวคลื่นในย่านตามองเห็น จะมีจุดโฟกัสของแสงสีต่างๆ บนแกนระหว่างสองจุดนี้ รูป 6.12 (ข) แสดงความคลาดสีสำหรับจุดวัตถุนอกแกนซึ่งมีความคลาดสีตามยาวและตามขวาง สังเกตว่าถ้าไม่มีความคลาดสีตามยาว ความคลาดสีตามขวางสามารถอธิบายได้ว่าเป็นความแตกต่างของกำลังขยายสำหรับแสงสีต่างๆ โดยภาพที่เกิดจากแสงสีที่แตกต่างกันจะไม่ซ้อนทับกัน แสดงได้ดังภาพ



รูปที่ 2.30 แสดงลักษณะภาพที่เกิดจากความคลาดตรงค์ [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความคลาดสีสามารถกำจัดออกไปได้โดยการใช้เลนส์ประกอบรงค์ ซึ่งประกอบด้วยเลนส์นูนและเลนส์เว้าทำจากแก้วต่างชนิดกันเชื่อมติดกันโดยมีความยาวโฟกัสและกำลังของเลนส์ที่แตกต่างกัน ดังนั้น กำลังสุทธิของเลนส์ประกอบรงค์อาจจะเป็นบวกหรือเป็นลบก็ได้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเลนส์ซึ่งเงื่อนไขของการไม่เกิดความคลาดสี คือ

$$V_1 P_{1D} + V_2 P_{2D} = 0 \quad (25)$$

โดยค่าการกระจายแสง V นิยาม ดังสมการ

$$V = \frac{1}{\Delta} = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (26)$$

โดยค่า Δ คือ กำลังการกระจายแสง (dispersive power) และ ค่า P คือ กำลังของเลนส์



รูปที่ 2.31 แสดงรูปร่างทั่วไปของเลนส์ประกอบรงค์ [29]

2.4 กล้องโทรทรรศน์

คืออุปกรณ์ที่ใช้ขยายวัตถุท้องฟ้าโดยอาศัยหลักการรวมแสงเพื่อให้สามารถมองเห็นวัตถุท้องฟ้าที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือทำให้มองเห็นได้ชัดขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น

กล้องโทรแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ 1. กล้องโทรหักเหแสง 2. กล้องโทรสะท้อนแสง 3. กล้องโทรทรรศน์แบบผสม

2.4.1 กล้องโทรแบบหักเหแสง (Refractor telescope)

เป็นกล้องโทรทรรศน์ที่ใช้เลนส์นูนในการรวมแสง มีใช้กันอย่างแพร่หลายสามารถพบเห็นได้ทั่วไป กล้องโทรแบบหักเหแสงส่วนมากมักมีขนาดเล็กเนื่องจากเลนส์นูนส่วนใหญ่มีโฟกัสยาว (เลนส์โฟกัสสั้นสร้างยากและมีราคาสูงมาก) ดังนั้นถ้าเป็นกล้องโทรขนาดใหญ่จะยาวเกะกะ ลำกล้องมีน้ำหนักมาก เปลืองพื้นที่ในการติดตั้ง จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในหอดูดาว กล้องโทรแบบหักเหแสงเหมาะสำหรับใช้ศึกษาวัตถุที่สว่างมาก เช่น ดวงจันทร์และดาวเคราะห์ แต่ไม่เหมาะสำหรับการสังเกตวัตถุที่มีขนาดใหญ่แต่สว่างน้อย เช่น เนบิวลาและกาแล็กซี เนื่องจากมีกำลังรวมแสงน้อยและให้

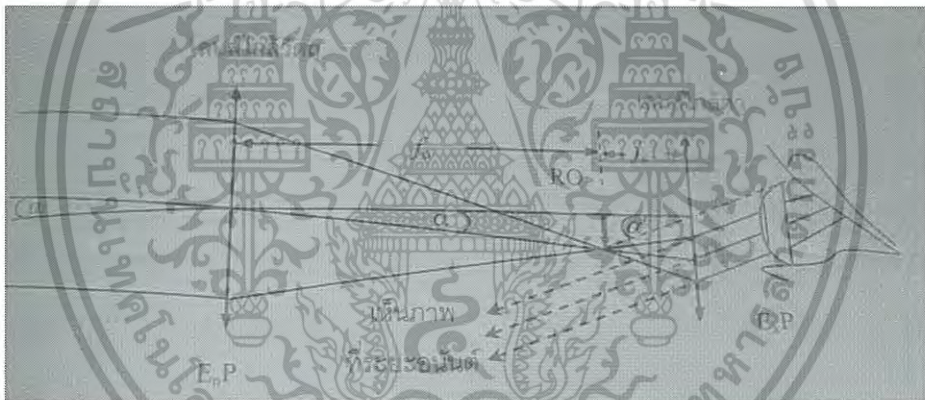
กำลังขยายมากเกินไป ภาพที่ได้จึงมีสว่างน้อยและมีขนาดใหญ่จนไม่สามารถมองเห็นภาพรวมของวัตถุ กล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ 1. กล้องโทรทรรศน์แบบเคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนและเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

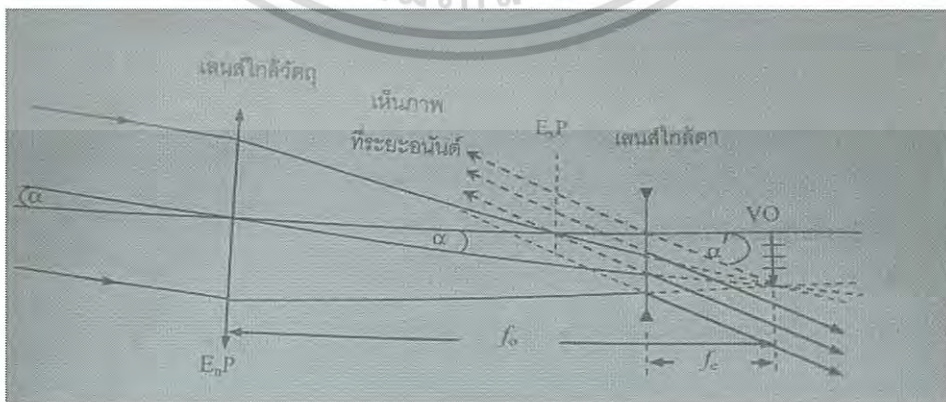
เลอร์ หรือมักนิยมเรียกว่ากล้องโทรทรรศน์ดาราศาสตร์ โดยกล้องโทรทรรศน์ประเภทนี้จะใช้เลนส์ใกล้ตา ความยาวโฟกัสเป็นบวก โดยภาพที่เกิดขึ้นจากเลนส์ใกล้ตาจะอยู่ที่บริเวณจุดโฟกัสของตา ซึ่งในกล้องโทรทรรศน์แบบเคปเลอร์จะให้วัตถุจริง ตามรูปที่ 2.32 2. กล้องโทรทรรศน์แบบกาลิเลโอ จะสร้างภาพหัวตั้งโดยใช้เลนส์ใกล้ตาความยาวโฟกัสเป็นลบ วัตถุที่ได้จากเลนส์ใกล้ตาของกล้องชนิดนี้จะเป็นวัตถุเสมือน ตามรูปที่ 2.33 โดยหลักการทำงานของกล้องทั้งสองประเภทคือ เมื่อรังสีขนานจากระยะไกลมายังกล้อง เลนส์ใกล้วัตถุจะรวบรวมแสงทำให้เกิดภาพจริงที่ระนาบโฟกัส หลังจากนั้นแสงจะเข้าไปยังเลนส์ใกล้ตา โดยแสงที่หักเหจากเลนส์ใกล้ตาจะเป็นรังสีขนาน หรือเกือบจะเป็นรังสีขนาน ทำให้ตาเห็นภาพที่ระยะอนันต์ ซึ่งมีการขยายเชิงมุมโดยนิยามเป็นอัตราส่วนของมุม α'/α รังสีจากวัตถุ จะทำมุม α กับตาเปล่าและทำมุม α' กับเลนส์ใกล้ตาจากสามเหลี่ยมมุมฉากสองรูปที่มีด้านร่วมกัน เป็นขนาดของภาพที่เกิดจากเลนส์ใกล้วัตถุ จากรูป 2.33 จะได้ $\tan \alpha = \frac{-s'}{f_o}$ และ $\tan \alpha' = \frac{-s'}{f_e}$ โดย

การประมาณมุม α ให้มีขนาดเล็กๆ ดังนั้นการขยายเชิงมุม M จะเป็น $M = \frac{\alpha'}{\alpha} = -\frac{f_o}{f_e}$

เครื่องหมายลบ บ่งชี้ว่า ภาพกลับหัว เมื่อ $f_e > 0$ และหัวตั้งเมื่อ $f_e < 0$ ซึ่งทั้งสองกรณี ความยาวของกล้องโทรทรรศน์ L จะเป็น $L = f_o + f_e$



รูปที่ 2.32 ภาพแสดงหลักการทำงานของกล้องโทรทรรศน์หักเหแสงเคปเลอร์ [30]



รูปที่ 2.33 ภาพแสดงหลักการทำงานของกล้องโทรทรรศน์หักเหแสงกาลิเลโอ [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลนส์ที่ใช้ในกล้องโทรทรรศน์เป็นเลนส์อครอแมติก (Achromatic lens) ซึ่งมีสมบัติในการแก้ความคลาดสี แสงที่ตาเห็น (Visible light) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร สีม่วงมีความยาวคลื่นสั้นที่สุด สีแดงมีความยาวคลื่นมากที่สุด เมื่อแสงมีความยาวคลื่นไม่เท่ากันถูกหักเหผ่านเลนส์ จุดโฟกัสที่เกิดขึ้นจึงไม่ใช่จุดเดียวกันทำให้เกิด ความคลาดสี (Chromatic aberration) ดังรูปที่ 2.34 เมื่อนำมาส่องก็จะมองเห็นขอบวัตถุเป็นสีรุ้ง ดังนั้นหากนำมาส่องมองดาวก็จะไม่ทราบเลยว่า ดาวที่อยู่นั้นแท้ที่จริงเป็นสีอะไร ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงออกแบบเลนส์อครอแมติกขึ้นมาโดยใช้แก้วคราวน์ (Crown) และแก้วฟลินท์ (Flint) ซึ่งมีดัชนีการหักเหแสงตรงข้ามกัน มาประกบกันเพื่อทำให้แสงทุกความยาวคลื่นหักเหมารวมที่จุดโฟกัสเดียวกันดัง รูปที่ 2.35 เลนส์อครอแมติกมีน้ำหนักมากและราคาแพงมาก การประดิษฐ์กล้องโทรทรรศน์ขนาดใหญ่จึงเลี่ยงไปใช้กระจกเว้าแทน

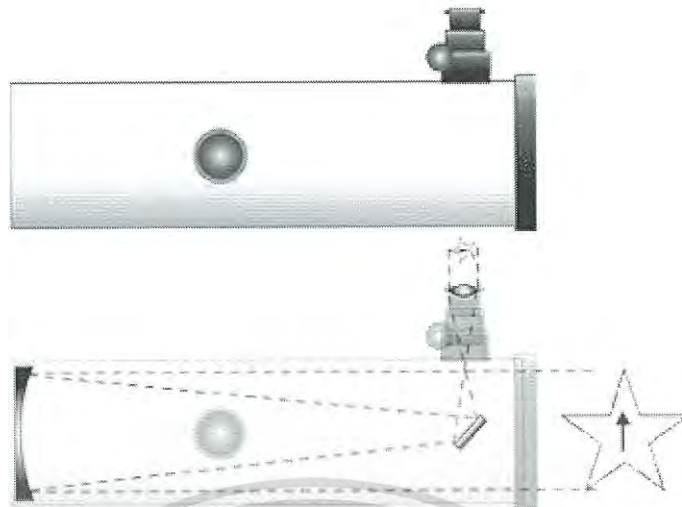


รูปที่ 2.34 ความคลาดสีซึ่งเกิดขึ้นจากเลนส์เดี่ยว [32]

รูปที่ 2.35 เลนส์อครอแมติกช่วยลดความคลาดสี [33]

2.4.2 กล้องโทรแบบสะท้อนแสง

กล้องโทรแบบสะท้อนแสง (Reflector telescope) ถูกคิดค้นโดย เซอร์ไอแซคนิวตัน บางครั้งจึงถูกเรียกว่า "กล้องโทรแบบนิวโทเนียน" (Newtonian telescope) กล้องโทรแบบนี้ใช้กระจกเว้าทำหน้าที่เลนส์ใกล้วัตถุแทนเลนส์นูน รวบรวมแสงส่งไปยังกระจุกทุติยภูมิซึ่งเป็นกระจุกเงาระนาบขนาดเล็กติดตั้งอยู่ในลำกล้อง สะท้อนลำแสงให้ตั้งฉากออกมาที่เลนส์ตาที่ติดตั้งอยู่ที่ด้านข้างเอกสาคือของลำกล้อง ดังรูปที่ 2.36 ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

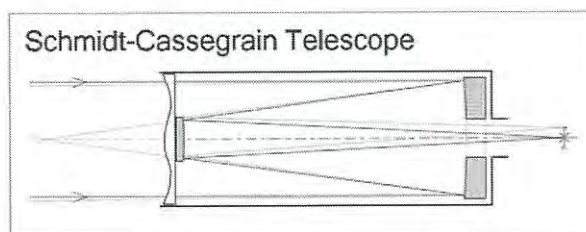


รูปที่ 2.36 กล้องโทรแบบสะท้อนแสง [34]

กล้องโทรขนาดใหญ่ส่วนมากเป็นกล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสง เนื่องจากกระจกเว้ามีน้ำหนักเบาและราคาถูกกว่าเลนส์ทรงรี นอกจากนี้กระจกเว้ายังสามารถสร้างให้มีความยาวโฟกัสสั้นได้ง่าย หอดูดาวจึงนิยมติดตั้งกล้องโทรแบบสะท้อนแสงขนาดใหญ่ซึ่งมีกำลังรวมแสงสูง ทำให้สามารถสังเกตเห็นวัตถุที่มีความสว่างน้อยและอยู่ไกลมาก เช่น เนบิวลาและกาแล็กซี อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกล้องโทรแบบหักเหแสงกับกล้องโทรแบบสะท้อนแสงที่มีขนาดเท่ากัน กล้องโทรแบบหักเหแสงจะให้ภาพสว่างและคมชัดกว่า เนื่องจากกล้องโทรแบบสะท้อนแสงมีกระจกหูดุมอยู่ในลำกล้องซึ่งเป็นอุปสรรคขวางทางเดินของแสง ทำให้ความสว่างของภาพลดลง นอกจากนี้ภาพที่เกิดจากหักเหผ่านเลนส์ทรงรีก็มีความคมชัดและสว่างกว่าภาพที่ได้จากการสะท้อนของกระจกเว้า

2.4.3 กล้องโทรแบบผสม มีสองชนิดหลักๆคือ

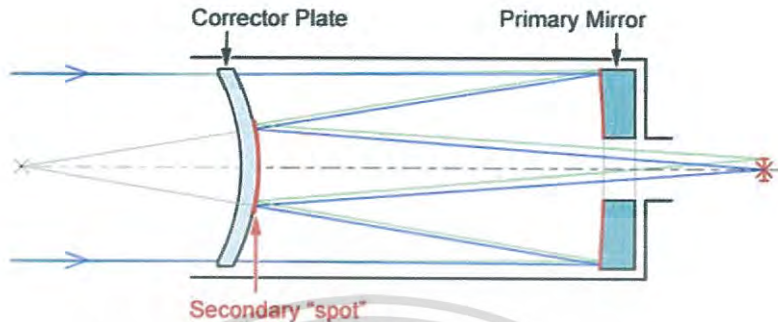
1. กล้องโทรแบบผสมชนิด ชมิทท์-แคสสิเกรน (Schmidt Cassegrain) ซึ่งมีความยาวโฟกัสค่อนข้างยาว ในขณะที่มีลำกล้องสั้นกะทัดรัด เนื่องจากการออกแบบให้ลำแสงจะสะท้อนกลับไปมาหลายครั้งในกล้อง



รูปที่ 2.37 แสดงหลักการทำงานของกล้องโทรทรรศน์แบบชมิทท์-แคสสิเกรน [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

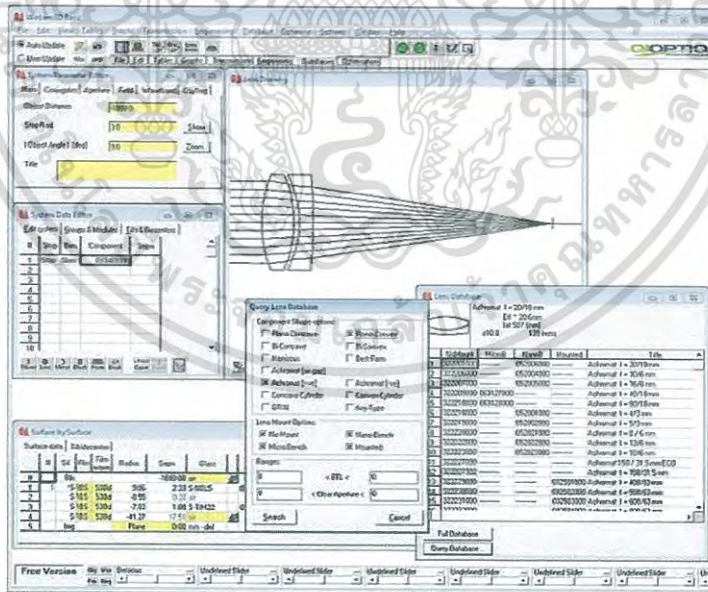
2. กล้องโทรแบบผสมชนิดแมคซูทอฟ - แคสสิเกรน (Maksutov Cassegrain) ซึ่งมีความยาวโฟกัสยาวมาก และมีความคมชัดในระดับที่เทียบได้กับกล้องโทรแบบหักเหแสงที่มีขนาดเท่ากัน มักใช้สำหรับสังเกตดาวเคราะห์และวัตถุที่ต้องการความคมชัดสูง



รูปที่ 2.38 แสดงหลักการทำงานของกล้องโทรทรรศน์แบบแมคซูทอฟ-แคสสิเกรน [36]

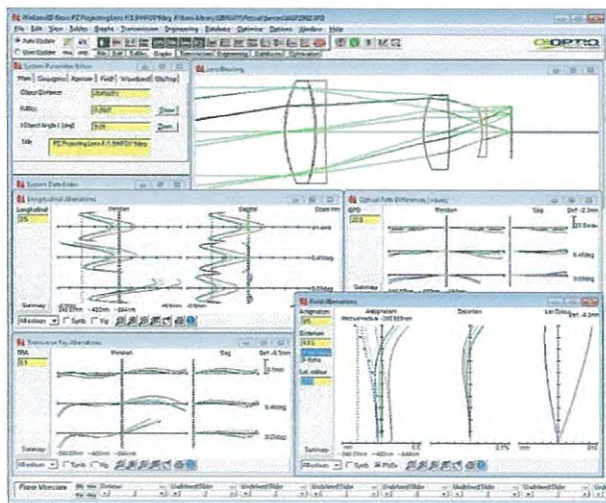
2.5 โปรแกรม winlens3D

โปรแกรม winlens3D เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดย กลุ่ม Qioptiq ตั้งแต่ปี 1992 โปรแกรมนี้สามารถออกแบบเลนส์โดยจำลองการเคลื่อนที่ของแสงในเลนส์ได้ นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าความคลาดของแสงได้อีกด้วย ซึ่งเวอร์ชันที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้คือ WinLens 3D v1.2.6 โดยรูปแบบโปรแกรมแสดงดังภาพ



รูปที่ 2.39 ภาพแสดงตัวอย่างการใช้โปรแกรม winlens3D [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.40 ภาพแสดงตัวอย่างการใช้โปรแกรม winlens3D [38]



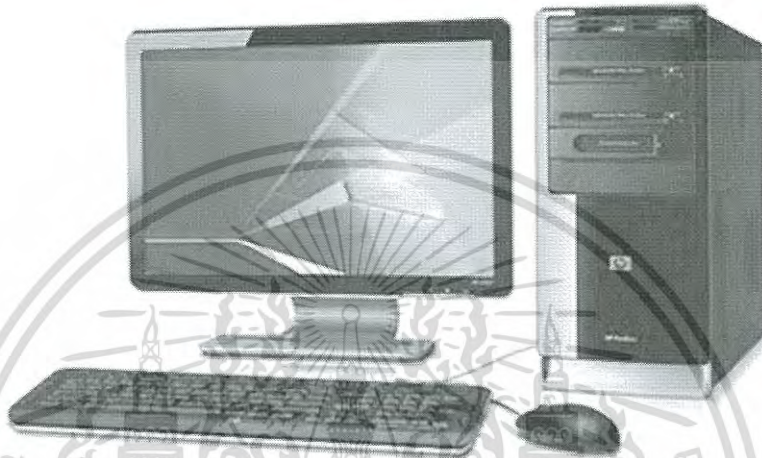
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.1. คอมพิวเตอร์ในการออกแบบเลนส์



รูปที่ 3.1 คอมพิวเตอร์

3.1.2. เลนส์ที่ใช้ในการสร้างชุดสาริต ซึ่งประกอบด้วย

3.1.2.1 เลนส์นูนใกล้วัตถุที่ไม่แก้ความคลาด (เลนส์ silica)



รูปที่ 3.2 เลนส์นูนใกล้วัตถุที่ไม่แก้ความคลาด

3.1.2.2 เลนส์ใกล้วัตถุที่แก้ความคลาดแล้วซึ่งประกอบด้วย

3.1.2.2.1 เลนส์นูน Bk7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เลนส์นูน Bk7

3.1.2.2.2 เลนส์เว้าที่ใช้แก้ความคลาด



รูปที่ 3.4 เลนส์เว้าที่ใช้แก้ความคลาด

3.1.2.3 เลนส์นูนใกล้ตาที่ไม่แก้ความคลาด (เลนส์ silica)



รูปที่ 3.5 เลนส์นูนใกล้ตาที่ไม่แก้ความคลาด

3.1.2.4 เลนส์นูนใกล้ตาที่แก้ความคลาดแล้วซึ่งประกอบด้วย

3.1.2.4.1 เลนส์ตาประกอบที่แก้ความคลาดแล้วความยาวโฟกัส 5 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เลนส์ตาประกอบที่แก้ความคลาดชั้นที่ 1

3.1.2.4.2 เลนส์ตาประกอบที่แก้ความคลาดแล้วความยาวโฟกัส 5 cm



รูปที่ 3.7 เลนส์ตาประกอบที่แก้ความคลาดชั้นที่ 2

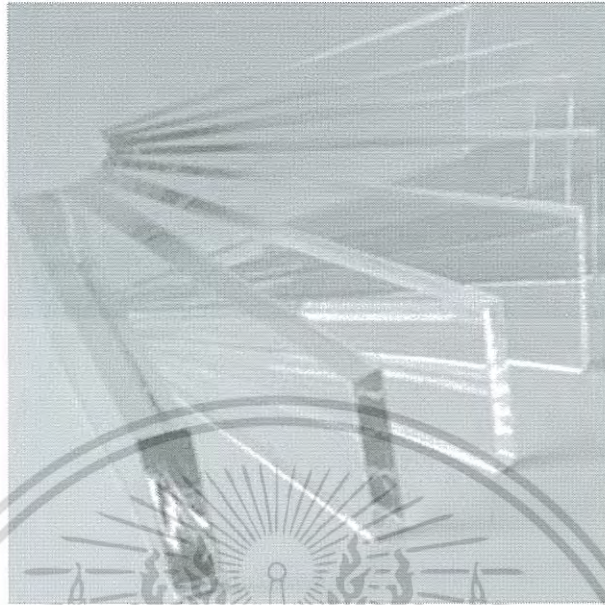
3.1.3. ลำกล้องของเลนส์ใกล้ตา



รูปที่ 3.8 ลำกล้องของเลนส์ใกล้ตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4. แผ่นอะคริลิก



รูปที่ 3.9 แผ่นอะคริลิก

3.1.5. ถุงมือยาง



รูปที่ 3.10 ถุงมือยาง

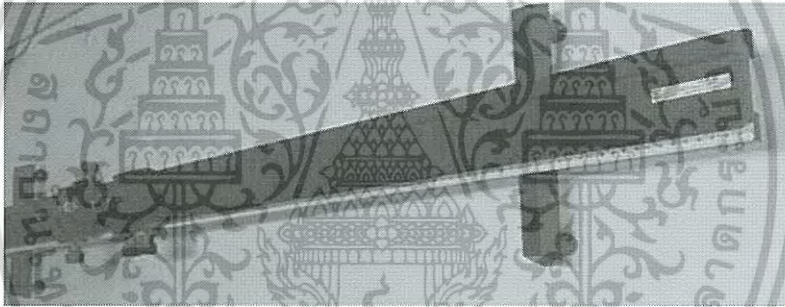
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6. อุปกรณ์ทำความสะอาดเลนส์



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ทำความสะอาดเลนส์

3.1.7. รางเลื่อน



รูปที่ 3.12 รางเลื่อน

3.1.8. น้ำยาเชื่อมอะคริลิก



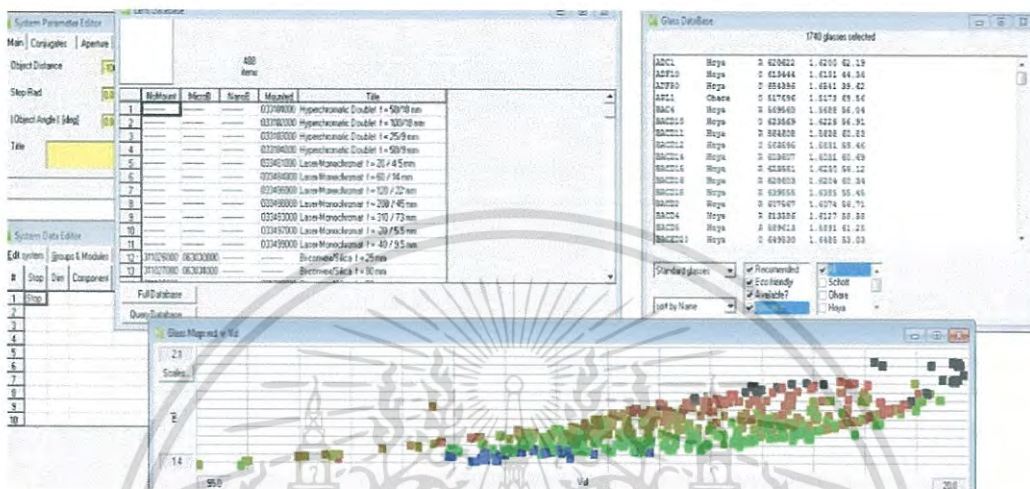
รูปที่ 3.13 น้ำยาเชื่อมอะคริลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

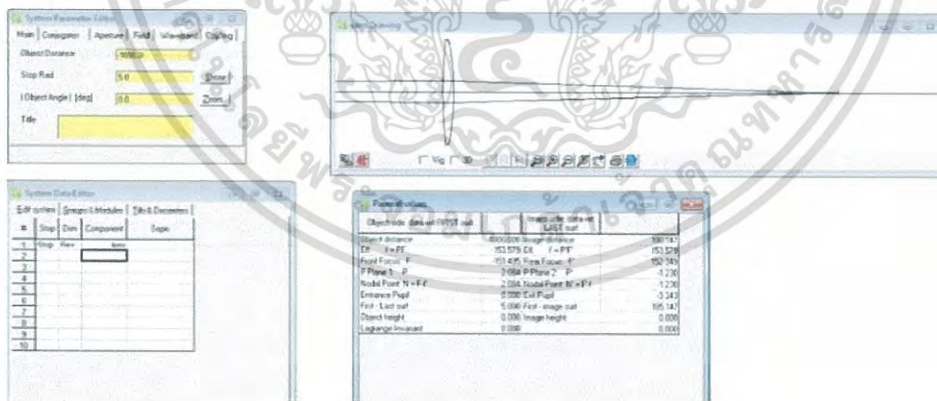
3.2.1. ออกแบบและคำนวณค่าองค์ประกอบต่างๆภายในระบบเลนส์ จากองค์ความรู้ด้านฟิสิกส์เชิงแสง

3.2.2. ใช้ฐานข้อมูลของโปรแกรม winlen3D ในการวิเคราะห์เพื่อหาวัสดุที่เหมาะสมในการสร้างเลนส์แต่ละชิ้น



รูปที่ 3.14 แสดงการเลือกชนิดแก้วด้วยโปรแกรม winlen3d

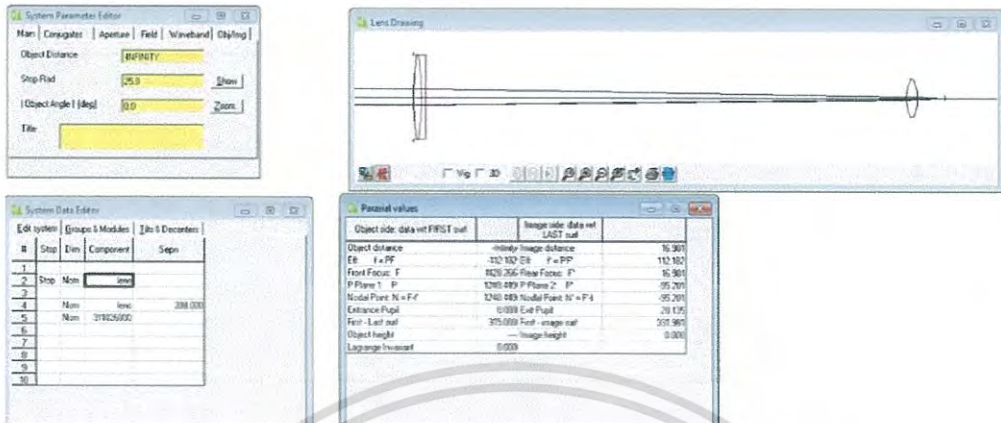
3.2.3. กำหนดค่าองค์ประกอบต่างๆภายในเลนส์ ตามที่ได้คำนวณไว้ในข้อ 1 เพื่อจำลองเลนส์แต่ละตัวในโปรแกรม ตามรูป



รูปที่ 3.15 แสดงการออกแบบเลนส์เดี่ยวด้วยโปรแกรม winlen3d

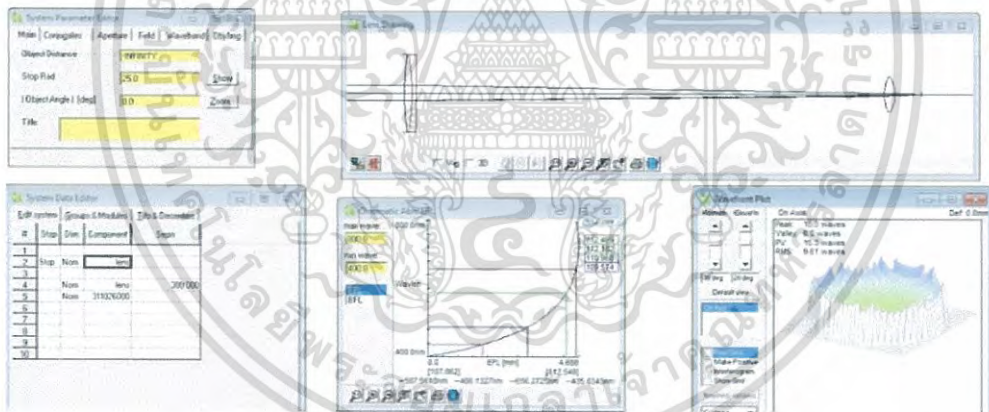
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4. นำเลนส์ที่ออกแบบเลนส์ในข้อ 3 หลายๆเลนส์ มารวมกันเป็นระบบเลนส์ที่ต้องการ ตามที่คำนวณไว้



รูปที่ 3.16 แสดงการออกแบบระบบเลนส์ด้วยโปรแกรม winlen3d

3.2.5. นำระบบเลนส์ที่ทำไว้มาหาค่าความคลาดต่างๆ โดยใช้โปรแกรมในการพล็อตกราฟเพื่อแสดงความคลาดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.17 แสดงค่าความคลาดในระบบเลนส์ด้วยโปรแกรม winlen3d

3.2.6. จัดหาเลนส์ใกล้ตาและใกล้วัตถุ ที่ได้ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรม

3.2.7. นำเลนส์แต่ละตัวมาวัดความโค้งของเลนส์ในแต่ละด้าน ด้วย spherometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แสดงการหาค่าความโค้งของเลนส์ด้วยสเฟียโรมิเตอร์

3.2.7.1 วิธีการวัดความโค้งด้วยสเฟียโรมิเตอร์

- 3.2.7.1.1 วัดระยะห่างของ L ซึ่งเป็นระยะห่างเฉลี่ยระหว่างจุดปลายขาตั้งทั้งสาม
- 3.2.7.1.2 หาค่าระนาบอ้างอิงโดยการวัดค่า d ซึ่งคือ ระยะจากปลายสกรูถึงระนาบของจุดปลายขาตั้งของ สเฟียโรมิเตอร์โดยเมื่อนำสเฟียโรมิเตอร์ไปวัดอ้างอิงกับกระจกราบ จะทำให้สามารถตั้ง ศูนย์ของสเฟียโรได้
- 3.2.7.1.3 วัดค่า d ของชิ้นงาน โดยทำเหมือนขั้นที่ 2
- 3.2.7.1.4 นำค่า d ที่วัดได้จากชิ้นงาน หักลบกับค่าอ้างอิงในข้อ 2
- 3.2.7.1.5 นำค่า d ที่หักลบระนาบอ้างอิงแล้วและ L จากข้อ 1 มาแทนในสมการ $R = \frac{d}{2} + \frac{L^2}{6d}$ จะได้ค่า R ซึ่งคือความโค้งของเลนส์

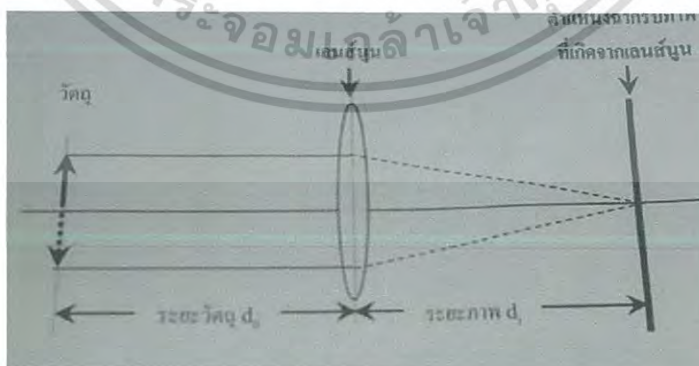
3.2.8. นำเลนส์ใกล้ตาและใกล้วัตถุมาวัดความยาวโฟกัสโดยคำนวณจากการเกิดภาพบนฉาก



รูปที่ 3.19 แสดงการทดลองหาความยาวโฟกัสของเลนส์

3.2.8.1 วิธีหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูน

3.2.8.1.1 วางวัตถุ (หลอดไฟ) ไว้หน้าเลนส์นูน แล้วเลื่อนตำแหน่งหาภาพจริงที่จะปรากฏบนฉากอีกด้านหนึ่ง โดยการเลื่อนฉากแล้วคอยสังเกตว่าภาพชัดเจนหรือยัง เมื่อได้ภาพที่ชัดเจนแล้วก็วัดระยะภาพ (d_0) และระยะวัตถุ (d_1) นำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูน (f) จากสมการ $\frac{1}{f} = \frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_1}$ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยการเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุให้ต่างจากเดิม



รูปที่ 3.20 แสดงตำแหน่งต่างๆในการหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.8.2 วิธีการหาความยาวโฟกัสของเลนส์เว้า

3.2.8.2.1 เอ่วัตถุ S (หลอดไฟ) มาวางหน้าเลนส์นูน (L_1) แล้วหาดำแหน่งภาพที่เกิดจากเลนส์นูน ได้ที่ตำแหน่ง S_1 (ดังรูป 3.19) ซึ่งจำทำหน้าที่เป็นตำแหน่งวัตถุเสมือนของเลนส์เว้า ต่อมานำเลนส์เว้า (L_2) มาวางระหว่างเลนส์นูน (L_1) กับภาพ (S_1) ตอนนี้ภาพ (S_1) จะทำหน้าที่เป็นวัตถุ(วัตถุเสมือน)ของเลนส์เว้า (L_2) บั้นที่ระยะวัตถุ (U_2) โดยวัดจากเลนส์เว้า (L_2) ไปถึงฉากจากนั้นเลื่อนฉากอย่างเดียว จนเกิดภาพชัด (S_2) แล้ววัดระยะภาพ (V_2) โดยวัดจากเลนส์เว้า (L_2) ไปจนถึงฉาก แล้วคำนวณหาความยาวโฟกัสจากสมการ $\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}$ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งโดยการเปลี่ยนตำแหน่งวัตถุให้ต่างจากเดิม



รูปที่ 3.21 ภาพแสดงตำแหน่งต่างๆในการหาโฟกัสของเลนส์เว้า

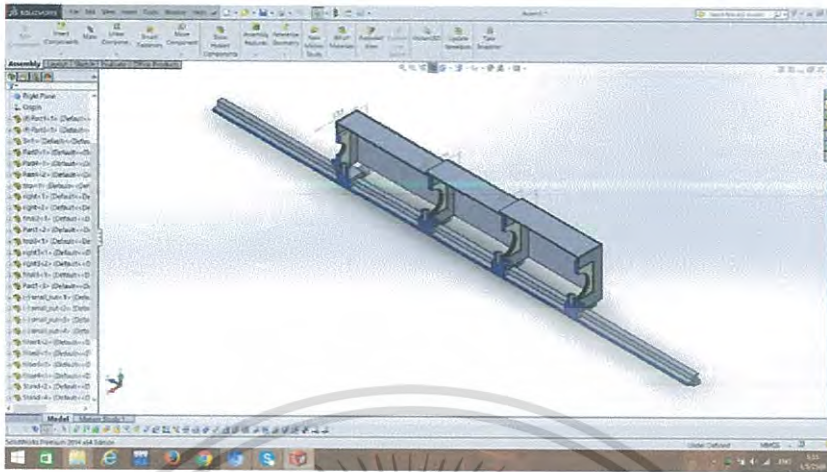
3.2.9. นำเลนส์ที่แก้ความคลาดมาประกบกันแล้ววัดความยาวโฟกัสโดยใช้วิธีตามข้อ 7



รูปที่ 3.22 แสดงการหาค่าความคลาดของเลนส์แก้ความคลาดที่ประกบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.10. ออกแบบกล่องสาธิตการแก้ความคลาดด้วยโปรแกรม solid work



รูปที่ 3.23 แสดงการออกแบบกล่องสำหรับการสร้างชุดสาธิตการแก้ความคลาดด้วยโปรแกรม solid work

- 3.2.11. นำชิ้นส่วนของกล่องสาธิตที่ได้ออกแบบไว้มาตัดให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการ
- 3.2.12. ประกอบชิ้นส่วนกล่องทั้งหมดเข้าด้วยกัน ด้วยกาวอะคริลิก
- 3.2.13. นำเลนส์ที่ได้ออกแบบไว้มาใส่ในกล่องสาธิต
- 3.2.14. นำชุดสาธิตความคลาดสีไปถ่ายภาพวัตถุเพื่อเปรียบเทียบผลของความคลาดสี (Chromatic aberration) ในเลนส์แต่ละชนิดที่ได้ออกแบบไว้
- 3.2.15. วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้
- 3.2.16. เขียนคู่มือสำหรับการใช้ชุดสาธิตการแก้ความคลาดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

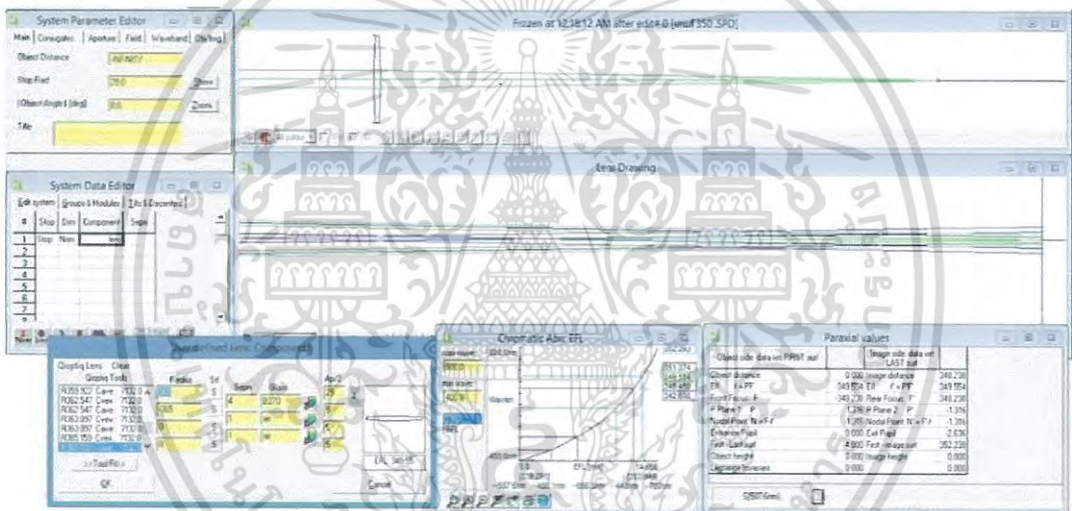
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ผลการวิจัยจะแบ่งเป็น 3 ตอน โดยตอนที่ 1 จะเป็นการจำลองทางเดินแสงและความคลาดของระบบ โดยใช้โปรแกรม winlen3d ในการ simulation โดยจะเป็นการเปรียบเทียบเลนส์ที่ไม่มีการแก้ความคลาด และเลนส์ที่มีการแก้ความคลาด ตอนที่ 2 จะเป็นการวัดค่าความยาวโฟกัสเลนส์ในทางปฏิบัติที่หาได้ด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ ตอนที่ 3 จะเป็นการแสดงผลภาพจากเลนส์จริง โดยใช้กล้องถ่าย ระบบเลนส์ 3 แบบ ซึ่งแสดงรายละเอียดดังนี้

4.1 การจำลองทางเดินแสงและผลของความคลาดโดยใช้โปรแกรม

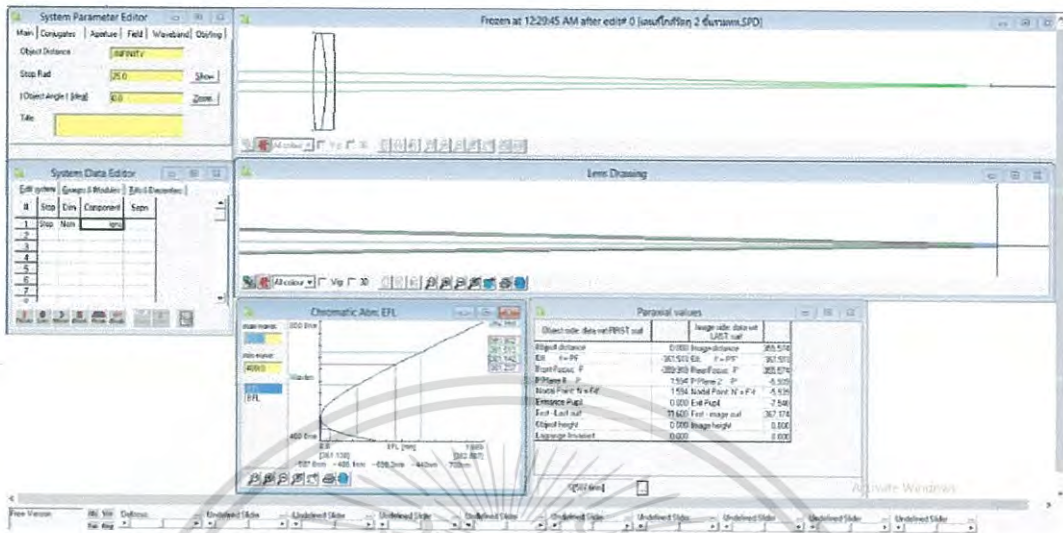
4.1.1 ทางเดินแสงและกราฟความคลาดของเลนส์วัตถุที่ไม่แก้ความคลาด



รูปที่ 4.1 ภาพจำลองทางเดินของแสงและกราฟความคลาดในเลนส์วัตถุที่ไม่แก้ความคลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ทางเดินของแสงและกราฟความคลาดสีของเลนส์ใกล้วัตถุที่มีการแก้ความคลาดสี



รูปที่ 4.2 ภาพจำลองทางเดินของแสงและกราฟความคลาดสีในเลนส์ที่แก้ความคลาดสีจากโปรแกรมwinlen3d

4.2 การวัดค่าความยาวโฟกัสของเลนส์ในทางปฏิบัติ

4.2.1 ผลการวัดความโค้งของเลนส์โดยใช้สเฟียโรมิเตอร์

ตารางที่ 4.1 แสดงการวัดค่าความโค้งเลนส์โดยใช้สเฟียโรมิเตอร์

ชนิดของเลนส์	ด้านของเลนส์	ความสูงของผิวโค้งเฉลี่ย	รัศมีความโค้งของเลนส์	ความกว้างของเลนส์	ความยาวโฟกัสของเลนส์
เลนส์นูนไม่แก้ความคลาดสี	หน้า	0.29	553.81	4	512.45
	หลัง	0.31	518.15		
เลนส์นูนแก้ความคลาด	หน้า	0.7566	212.617	7	153.26
	หลัง	1.2866	125.45		
เลนส์เว้าแก้ความคลาด	หน้า	-1.3	-124.806	4.6	-264.34
	หลัง	0.25	610.72		
เลนส์แก้ความคลาดรวม	-	-	-	11.6	361.513

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการวัดความยาวโฟกัสของเลนส์โดยใช้ฉากรับ

ตารางที่ 4.2 แสดงการวัดรัศมีของเลนส์โดยใช้ฉากรับ

ชนิดของเลนส์	ความยาวโฟกัสของเลนส์
เลนส์นูนไม่แก้ความคลาด	50.644 เซนติเมตร
เลนส์นูนแก้ความคลาด	15.46 เซนติเมตร
เลนส์เว้าแก้ความคลาด	26.74 เซนติเมตร
เลนส์รวมแก้ความคลาด	38.186 เซนติเมตร
เลนส์ใกล้ตาไม่แก้ความคลาด	4.589 เซนติเมตร
เลนส์ใกล้ตาแก้ความคลาดขั้นที่ 1	4.9825 เซนติเมตร
เลนส์ใกล้ตาแก้ความคลาดขั้นที่ 2	5.015 เซนติเมตร

4.3 ภาพถ่ายจริงของระบบเลนส์ที่นำมาใช้

4.3.1 ระบบเลนส์ซึ่งประกอบด้วยเลนส์วัตถุที่ไม่แก้ความคลาด 506.44 mm และเลนส์ใกล้ตาที่ไม่แก้ความคลาด 45.89 mm โดยมี focal length = 552.33 mm



รูปที่ 4.3 ระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ตาที่ไม่แก้ความคลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.4 ภาพจากระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ตาที่ไม่แก้
ความคลาดซึ่งจะมีลักษณะของความคลาดสี



รูปที่ 4.5 ภาพดวงจันทร์จากระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ตาที่ไม่แก้
ความคลาดซึ่งจะมีลักษณะของความคลาดสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ระบบเลนส์ซึ่งประกอบด้วยเลนส์วัตถุที่แก้ความคลาด 381.86 mm และเลนส์ใกล้ตาที่ไม่แก้ความคลาด 45.89 mm โดยมี focal length = 427.75 mm



รูปที่ 4.6 ระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุที่แก้ความคลาดกับเลนส์ตาที่ไม่แก้ความคลาด



รูปที่ 4.7 ภาพจากระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุที่แก้ความคลาดกับเลนส์ตาที่ไม่แก้ความคลาดซึ่งภาพจะมีความคมชัดขึ้นเนื่องจากการแก้ความคลาดที่เลนส์ใกล้วัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ภาพดวงจันทร์จากระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุที่แก้ความคลาดกับเลนส์ตาที่ไม่แก้ความคลาดซึ่งภาพจะมีความคมชัดขึ้นเนื่องจากการแก้ความคลาดที่เลนส์ใกล้วัตถุ

4.3.3 ระบบเลนส์ซึ่งประกอบด้วยเลนส์วัตถุที่แก้ความคลาด 381.89 mm และเลนส์ประกอบใกล้ตาที่แก้ความคลาด 25 mm โดยมี focal length = 406.86 mm



รูปที่ 4.9 ระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุที่แก้ความคลาดกับเลนส์ตาที่แก้ความคลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ภาพจากระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุที่แก้ความคลาดกับเลนส์ตาที่แก้ความคลาดซึ่งภาพจะมีความคมชัดที่สุดเนื่องจากการแก้ความคลาดที่เลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ใกล้ตา



รูปที่ 4.11 ภาพดวงจันทร์จากระบบเลนส์ที่ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุที่แก้ความคลาดกับเลนส์ตาที่แก้ความคลาดซึ่งภาพจะมีความคมชัดที่สุดเนื่องจากการแก้ความคลาดที่เลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ใกล้ตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในโครงการพิเศษขึ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและแก้ไขความคลาดในกล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสง โดยโครงการวิจัยชิ้นนี้จะเปรียบเทียบระบบเลนส์ที่ใช้สร้างเป็นกล้องโทรทรรศน์ 3 ระบบ คือ 1.ระบบเลนส์ทั่วไปซึ่งไม่มีการแก้ความคลาดใดๆ 2.ระบบเลนส์ที่มีการแก้ความคลาดที่เลนส์ใกล้วัตถุเพียงเลนส์เดียว 3.ระบบเลนส์ที่มีการแก้ความคลาดที่ทั้งเลนส์ใกล้ตาและเลนส์ใกล้วัตถุ ซึ่งผลลัพธ์ที่ออกมาพบว่า ระบบเลนส์ที่ไม่มีการแก้ความคลาดจะเกิดการเลื่อมของสีในภาพเป็นอย่างมากทำให้ภาพที่ออกมา มีความผิดเพี้ยนไป โดยเมื่อเราแก้ความคลาดในส่วนของเลนส์ใกล้วัตถุพบว่าภาพที่เกิดขึ้นมีความเหลื่อมกันของสีในภาพที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งทำให้รายละเอียดของภาพที่เกิดขึ้นมีความชัดเจนยิ่งขึ้น แต่ยังมีผลของความเหลื่อมกันของสีในภาพเล็กน้อย สุดท้ายเมื่อนำเลนส์ใกล้ตาที่แก้ความคลาดแล้วมาแทนเลนส์ทั่วไป พบว่าภาพที่เกิดขึ้นยังมีความชัดเจนยิ่งขึ้นกล่าวคือภาพที่เกิดขึ้นมีการเหลื่อมกันของสีน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ ทำให้รายละเอียดของภาพที่เกิดขึ้นมีความชัดเจนที่สุด ซึ่งจากการศึกษาทดลองทั้งหมด พบว่าเป็นไปตามสมมติฐานในการทดลองโดยสอดคล้องกับทฤษฎีทางแสง รวมทั้งยังให้ผลที่คล้ายกับการจำลองทางเดินของแสงจากโปรแกรม วินเลนส์ทีดี ที่ได้ออกแบบไว้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าความคลาดมีผลกระทบต่อภาพที่เกิดจากกล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสงเป็นอย่างมากโดยเราสามารถลดผลกระทบของความคลาดนี้ โดยการใช้เลนส์ที่สามารถแก้ความคลาดได้ ซึ่งหากต้องการลดผลกระทบทั้งหมดนั้น จำเป็นต้องแก้ความคลาดทั้งเลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ใกล้ตา

5.2 ข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษชิ้นนี้เป็นเพียงพื้นฐานของกล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสงโดยมุ่งเน้นไปในการแก้ความคลาดของเลนส์ที่มีผลกระทบต่อกล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสงมากที่สุดนั่นคือความคลาดสี ในทางปฏิบัติยังมีความคลาดอื่นๆ รวมทั้งปัจจัยอื่น เช่น ปัญหาของแสงรอบตัวกล้องโทรทรรศน์ ปัญหาของมลภาวะทางอากาศในขณะที่ส่องกล้อง เป็นต้น ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นและทำให้เกิดผลกระทบต่อภาพที่ได้ ซึ่งจากหลายปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นทำให้โครงการพิเศษชิ้นนี้ยังสามารถต่อยอดเพื่อศึกษาวิจัยเพิ่มเติมได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งการออกแบบในโครงการพิเศษนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งซึ่งเป็นพื้นฐานในงานออกแบบเลนส์เท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

- นิรันดร์ แนนชิด. 2523. **แสงประยุกต์**. กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- สุรศักดิ์ เชียงกา. 2557. **ทัศนศาสตร์เบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- BruceMacEvoy. (26 พ.ย. 2013). **Astronomical Optics Part 4: Optical Aberrations**. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 ก.พ. 2017 จาก <https://www.handprint.com>:
<https://www.handprint.com/ASTRO/ae4.html>
- BruceMacEvoy. (26 พ.ย. 2013). **Astronomical Optics Part 1: Basic Optics**. เข้าถึงเมื่อวันที่ 19 ก.พ. 2017 จาก <https://www.handprint.com/>:
<https://www.handprint.com/ASTRO/ae1.html>
- DanielMalacara. (2004). **Handbook of optical design**.NEW YORK: MARCELU EKKERIN.
- milton laikin. (2007). **LENS DESIGN**.NEWYORK: CRC Press.
- rudolf kingslae. (2009). **Lens Design Fundamentals**.Burlington: imprint of Elsevier.
- VladimirSacek. (14 มิ.ย. 2006). **INTRINSIC TELESCOPE ABERRATIONS**. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 ก.พ. 2017 จาก <http://www.telescope-optics.net/>: <http://www.telescope-optics.net/spherical1.htm#specified>
- VladimirSacek. (12 มิ.ย. 2006). **LENS OBJECTIVE**. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 ก.พ. 2017 จาก <http://www.telescope-optics.net/>: <http://www.telescope-optics.net/refractor.htm>
- vladimir sacek. (12 มิ.ย. 2006). **CHROMATIC ABERRATION**. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 ก.พ. 2017 จาก <http://www.telescope-optics.net/>: <http://www.telescope-optics.net/chromatic.htm>
- WarrenSmith. (2000). **modern optical engineering**.New York: McGraw-Hill



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มาของรูป

[1] ,[2]

<http://arts.kmutt.ac.th/ssc210/Group%20Project/ASSC210/1.48LearningForFun/File/2.htm>

[4] <http://oknation.nationtv.tv/blog/Kruploy/2012/01/19/entry-1>

[5] http://nomyensci.blogspot.com/2010/09/blog-post_9198.html

[6] <https://www.gotoknow.org/posts/226209>

[7] <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1148->

[http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1148-%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B8%B5%E0%B9%89%E0%B8%A2%E0%B8%A7%E0%B9%80%E0%B8%9A%E0%B8%99%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%AA%E0%B8%87+\(Diffraction\)?groupid=241](http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1148-%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B8%B5%E0%B9%89%E0%B8%A2%E0%B8%A7%E0%B9%80%E0%B8%9A%E0%B8%99%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%AA%E0%B8%87+(Diffraction)?groupid=241) และ

<https://researchthetopic.wikispaces.com/What+are+concave+and+convex+lenses%3F+Part+2?responseToken=57f9fd944a634b0b952a048f5698fa74>

[8] <http://www.trueplookpanya.com/learning/detail/31433-044031>

[9]

<https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B8%99%E0%B8%AA%E0%B9%8C%E0%B8%9A%E0%B8%B2%E0%B8%87>

[10]

<https://bussbakorn5651.wordpress.com/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%AB%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%AA%E0%B8%87/%E0%B8%A0%E0%B8%B2%E0%B8%9E%E0%B8%97>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B8%B4%E0%B8%94%E0%B8%88%
E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B8%99%E0%B8%AA%E0%B9%8C/

[11] <https://orapanwaipan.wordpress.com>

[12] <https://orapanwaipan.wordpress.com/>

[13], [14], [15], [16], [18], [24], [25], [27], [29], [30], [31]

หนังสือแสงประยุกต์ สุรศักดิ์ เขียงกา

[17] <http://www.tutorial9.net/tutorials/photography-tutorials/correcting-and-preventing-chromatic-aberration/>

[19], [21] <http://www.lonelyspeck.com/a-practical-guide-to-lens-aberrations-and-the-lonely-speck-aberration-test/>

[20] <http://www.telescope-optics.net/coma.htm>

[22] <http://www.olympusmicro.com/primer/lightandcolor/opticalaberrations.html>

[23] <http://www.airoptix.com/contact-lenses/astigmatism.shtml>

[26] http://www.optics-online.com/dslr_fisheye.asp

[28] <http://wonderfuloptic.blogspot.com/2012/04/chromatic-aberration.html>

[32], [33] https://en.wikipedia.org/wiki/Chromatic_aberration

[34] <https://oraphan0149.wordpress.com/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[35] https://en.wikipedia.org/wiki/Schmidt_camera

[36] https://en.wikipedia.org/wiki/Maksutov_telescope

[37], [38], [39] <http://www.winlens.de/index.php?id=5>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการวัดค่าความโค้งของเลนส์โดยใช้ สเตียโรมิเตอร์

เลนส์นูนไม่แก้ความคลาด(ด้านแรก)

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้เมื่อปลายสกรูสัมผัสแผ่นกระจกราบ (มม.)	ค่าที่อ่านได้เมื่อปลายสกรูสัมผัสแผ่นเหล็กนูน (มม.)	ความสูงของผิวโค้ง (มม.)
1	0.07	0.38	0.31
2	0.07	0.34	0.27
3	0.07	0.36	0.29

ค่าเฉลี่ยของความสูง(d) = 0.29 mm

ค่าเฉลี่ยของระยะระหว่างขาทั้งสาม(L) = 31.04 mm

รัศมีความโค้งหาจาก $R = \frac{d^2}{2} + \frac{L^2}{6d} = 553.87 \text{ mm}$

เลนส์นูนไม่แก้ความคลาด(ด้านสอง)

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้เมื่อปลายสกรูสัมผัสแผ่นกระจกราบ (มม.)	ค่าที่อ่านได้เมื่อปลายสกรูสัมผัสแผ่นเหล็กนูน (มม.)	ความสูงของผิวโค้ง (มม.)
1	0.07	0.38	0.31
2	0.07	0.39	0.32
3	0.07	0.37	0.30

ค่าเฉลี่ยของความสูง(d) = 0.31 mm

ค่าเฉลี่ยของระยะระหว่างขาทั้งสาม(L) = 31.04 mm

รัศมีความโค้งหาจาก $R = \frac{d^2}{2} + \frac{L^2}{6d} = 518.15 \text{ mm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลนส์นูนแก้ความคลาด(ด้านแรก)

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้เมื่อปลายสกรูสัมผัสแผ่นกระจกราบ (มม.)	ค่าที่อ่านได้เมื่อปลายสกรูสัมผัสแผ่นเหล็กนูน (มม.)	ความสูงของผิวโค้ง (มม.)
1	0.07	0.84	0.77
2	0.07	0.82	0.75
3	0.07	0.82	0.75

ค่าเฉลี่ยของความสูง(d) = 0.7566 mm

ค่าเฉลี่ยของระยะระหว่างขาทั้งสาม(L) = 31.04 mm

รัศมีความโค้งหาจาก $R = \frac{d}{2} + \frac{L^2}{6d} = 212.617 \text{ mm}$

เลนส์นูนแก้ความคลาด(ด้านสอง)

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้เมื่อปลายสกรูสัมผัสแผ่นกระจกราบ (มม.)	ค่าที่อ่านได้เมื่อปลายสกรูสัมผัสแผ่นเหล็กนูน (มม.)	ความสูงของผิวโค้ง (มม.)
1	0.07	1.36	1.29
2	0.07	1.35	1.28
3	0.07	1.36	1.29

ค่าเฉลี่ยของความสูง(d) = 1.2866 mm

ค่าเฉลี่ยของระยะระหว่างขาทั้งสาม(L) = 31.04 mm

รัศมีความโค้งหาจาก $R = \frac{d}{2} + \frac{L^2}{6d} = 125.45 \text{ mm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลนส์เว้าแก้ความคลาด(ด้านเว้า)

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้เมื่อปลายสกรูสัมผัส แผ่นกระจกราบ (มม.)	ค่าที่อ่านได้เมื่อปลายสกรู สัมผัสแผ่นเหล็กนูน (มม.)	ความสูงของผิวโค้ง (มม.)
1	0.07	-1.23	-1.30
2	0.07	-1.23	-1.30
3	0.07	-1.23	-1.30

ค่าเฉลี่ยของความสูง(d) = -1.30 mm

ค่าเฉลี่ยของระยะระหว่างขาทั้งสาม(L) = 31.04 mm

รัศมีความโค้งหาจาก $R = \frac{d}{2} + \frac{L^2}{6d} = -124.806 \text{ mm}$

เลนส์นูนแก้ความคลาด(ด้านสอง)

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้เมื่อปลายสกรูสัมผัส แผ่นกระจกราบ (มม.)	ค่าที่อ่านได้เมื่อปลายสกรู สัมผัสแผ่นเหล็กนูน (มม.)	ความสูงของผิวโค้ง (มม.)
1	0.07	0.33	0.26
2	0.07	0.32	0.25
3	0.07	0.31	0.24

ค่าเฉลี่ยของความสูง(d) = 0.25 mm

ค่าเฉลี่ยของระยะระหว่างขาทั้งสาม(L) = 31.04 mm

รัศมีความโค้งหาจาก $R = \frac{d}{2} + \frac{L^2}{6d} = 610.72 \text{ mm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการหาความยาวโฟกัสของเลนส์โดยใช้ฉากรับ

เลนส์นูนใกล้วัตถุไม่แก้ความคลาด

ครั้งที่	ระยะวัตถุ (cm)	ระยะภาพ (cm)	ความยาวโฟกัส (cm)
1	13.4	10.6	50.728
2	11.1	9.1	50.505
3	10.5	8.7	50.75

ความยาวโฟกัสเฉลี่ย = 50.644 cm

เลนส์นูนใกล้วัตถุแก้ความคลาด

ครั้งที่	ระยะวัตถุ (cm)	ระยะภาพ (cm)	ความยาวโฟกัส (cm)
1	30	32	15.48
2	35	28	15.55
3	25	39.8	15.35

ความยาวโฟกัสเฉลี่ย = 15.46 cm

เลนส์เว้าใกล้วัตถุแก้ความคลาดโดยใช้เลนส์นูนช่วย

ครั้งที่	ระยะวัตถุ (cm)	ระยะภาพ (cm)	ความยาวโฟกัส (cm)
1	10.6	17.6	-26.65
2	10.9	18.5	-26.53
3	11.7	20.8	-26.74

ความยาวโฟกัสเฉลี่ย = -26.64 cm

เลนส์นูนใกล้ตาไม่แก้ความคลาด

ครั้งที่	ระยะวัตถุ (cm)	ระยะภาพ (cm)	ความยาวโฟกัส (cm)
1	10	8.5	4.594
2	13	7.1	4.59
3	15	6.5	4.583
4	17	6.3	4.59

ความยาวโฟกัสเฉลี่ย = 4.58925cm

เลนส์นูนใกล้ตาแก้ความคลาด(ชั้นที่ 1)

ครั้งที่	ระยะวัตถุ (cm)	ระยะภาพ (cm)	ความยาวโฟกัส (cm)
1	10	9.4	4.84
2	15	7.5	5
3	13	8.1	4.99
4	17	7.3	5.10

ความยาวโฟกัสเฉลี่ย = 4.9825 cm

เลนส์นูนใกล้ตาแก้ความคลาด(ชั้นที่ 2)

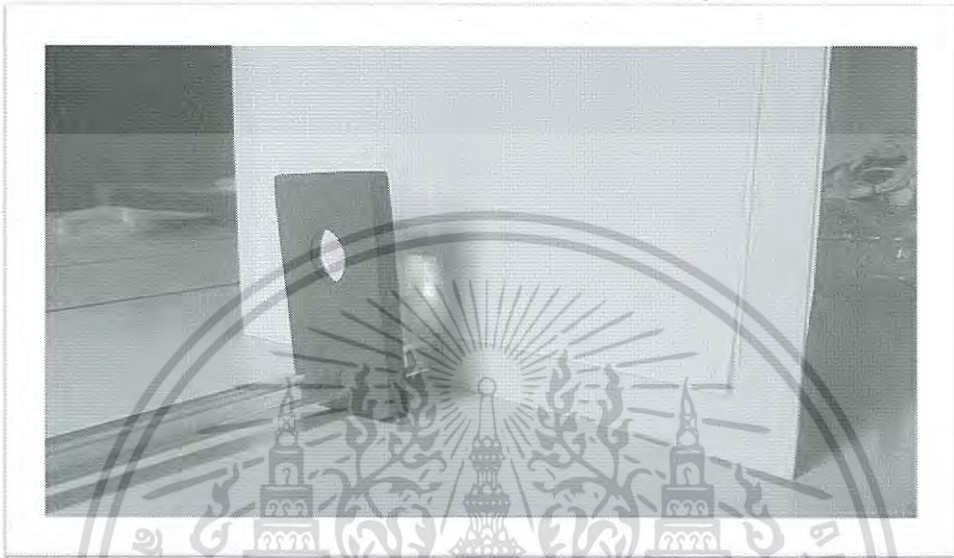
ครั้งที่	ระยะวัตถุ (cm)	ระยะภาพ (cm)	ความยาวโฟกัส (cm)
1	10	9.9	4.97
2	13	8	4.95
3	15	7.6	5.04
4	17	7.3	5.10

ความยาวโฟกัสเฉลี่ย = 5.015 cm

คู่มือชุดสาริตการแก้ความคลาดของเลนส์

ตอนที่ 1 หาจุดโฟกัสเลนส์ใกล้ตาที่ไม่แก้ความคลาดโดยใช้ฉากรับ

1. นำเลนส์ที่มื่ทราบจุดโฟกัสมาเสียบเข้ากับไม้ตามรูป



2. นำเลนส์ไปส่องยังวัตถุที่ไกลมากๆ แล้วหาจุดที่ทำให้เกิดภาพบนฉากชัดที่สุดซึ่งคือจุดโฟกัสของเลนส์นี้

ตอนที่ 2 หาจุดโฟกัสของเลนส์ทั้งหมด

3. นำเลนส์ที่ทราบความยาวโฟกัสแล้วมาหาความยาวโฟกัสของเลนส์ที่เหลือ ซึ่งประกอบด้วย เลนส์ใกล้วัตถุที่ไม่แก้ความคลาด เลนส์ประกบใกล้วัตถุที่แก้ความคลาดแล้ว เลนส์ประกบใกล้ตาที่แก้ความคลาดแล้ว โดยนำชุดเลนส์ทั้งสองมาประกบกันบนราง ตามรูป
4. หาความยาวของชุดเลนส์แต่ละชุด โดยใช้หลักการของกล้องโทรทรรศน์แบบเครปเลอร์ โดยนำเลนส์ที่ทราบความยาวโฟกัสมาช่วยในการหา
5. บันทึกภาพที่ถ่ายวัตถุที่ระยะไกลมากๆ ที่ได้จากแต่ละระบบเลนส์ทั้งหมด
6. หากำลังขยายและความยาวของกล้องโทรทรรศน์ L ของแต่ละระบบเลนส์ ตามทฤษฎีของกล้องโทรทรรศน์
7. หาค่าความโค้งของเลนส์ใกล้วัตถุด้านหน้า (R_1) ที่ไม่แก้ความคลาดโดยใช้ข้อมูลตามข้างบน กำหนดให้ แก้วที่ใช้ในการผลิตเลนส์คือ B270 โดย $n_L = 1.5231$ $R_2 = -518.15$ mm และเลนส์หนา 30 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. สร้างตารางเปรียบเทียบ ความยาวของกล้องโทรทรรศน์ กำลังขยายของกล้องโทรทรรศน์ และ ภาพที่เกิดขึ้นจริงในกล้องโทรทรรศน์ของทุกระบบเลนส์
9. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง



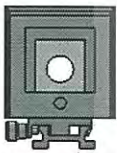
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบเลนส์	ความยาวของ กล้อง โทรทรรศน์	กำลังขยาย ของกล้อง โทรทรรศน์	ภาพที่เกิดขึ้นจริงในกล้องโทรทรรศน์
เลนส์ใกล้ตา และใกล้วัตถุไม่ แก้ความคลาด			
เลนส์ใกล้ตาแก้ ความคลาด เลนส์ใกล้วัตถุไม่ แก้ความคลาด			
เลนส์ใกล้ตาไม่ แก้ความคลาด เลนส์ใกล้วัตถุ แก้ความคลาด			
เลนส์ใกล้ตา และใกล้วัตถุแก้ ความคลาด			

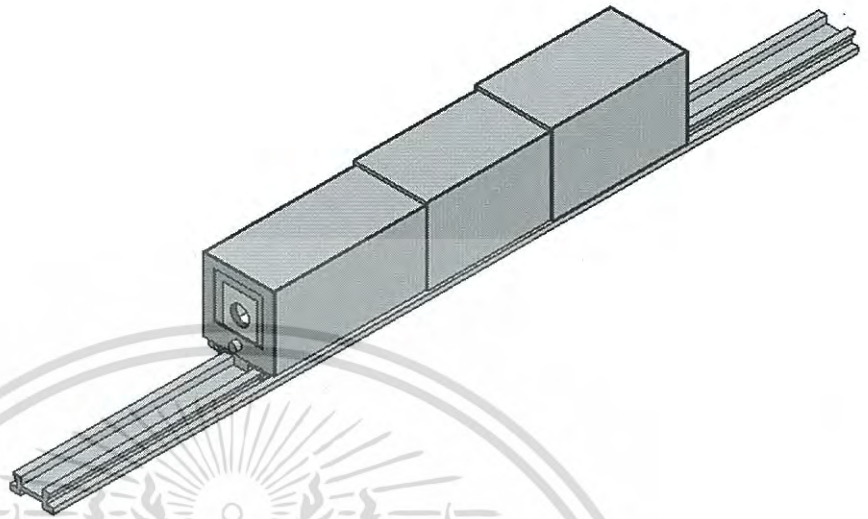




SCALE 1 : 10



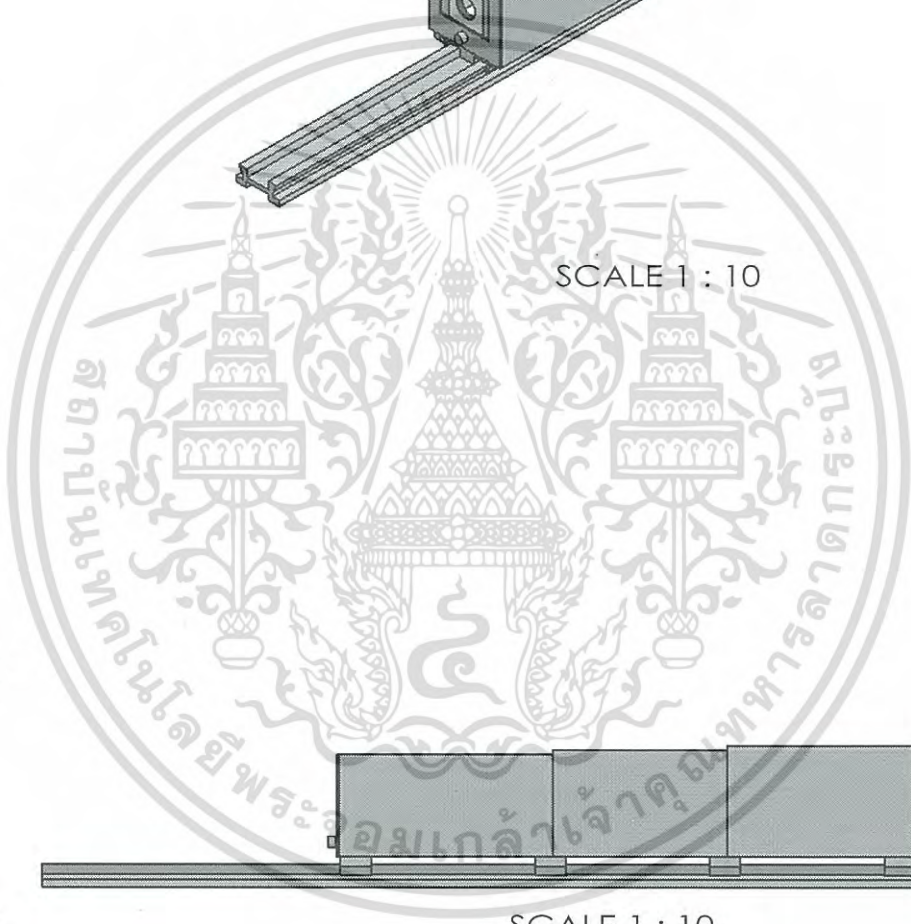
SCALE 1 : 10



SCALE 1 : 10



SCALE 1 : 10

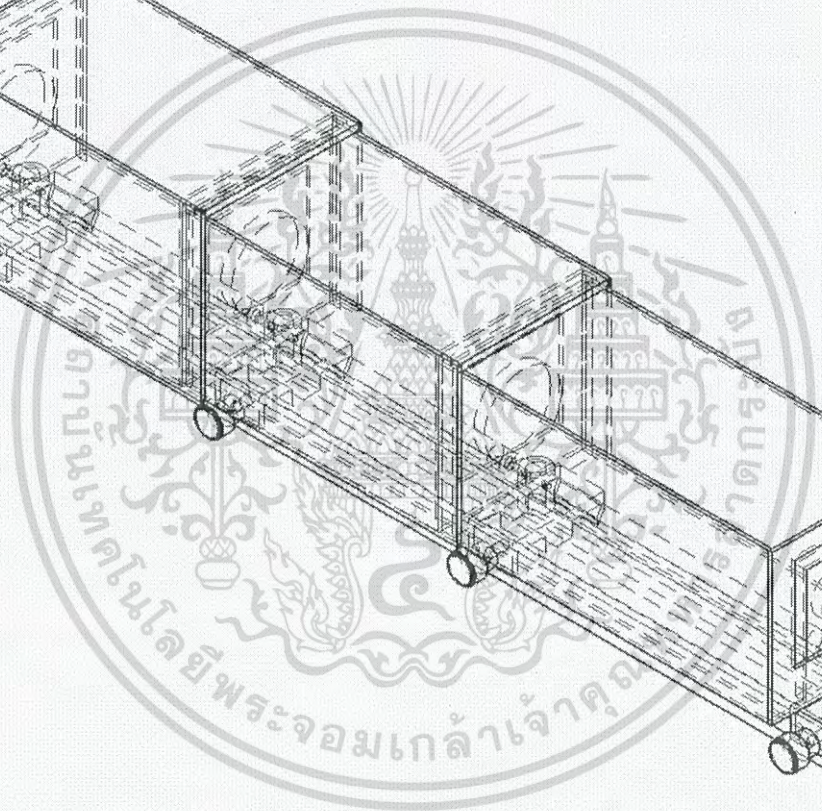
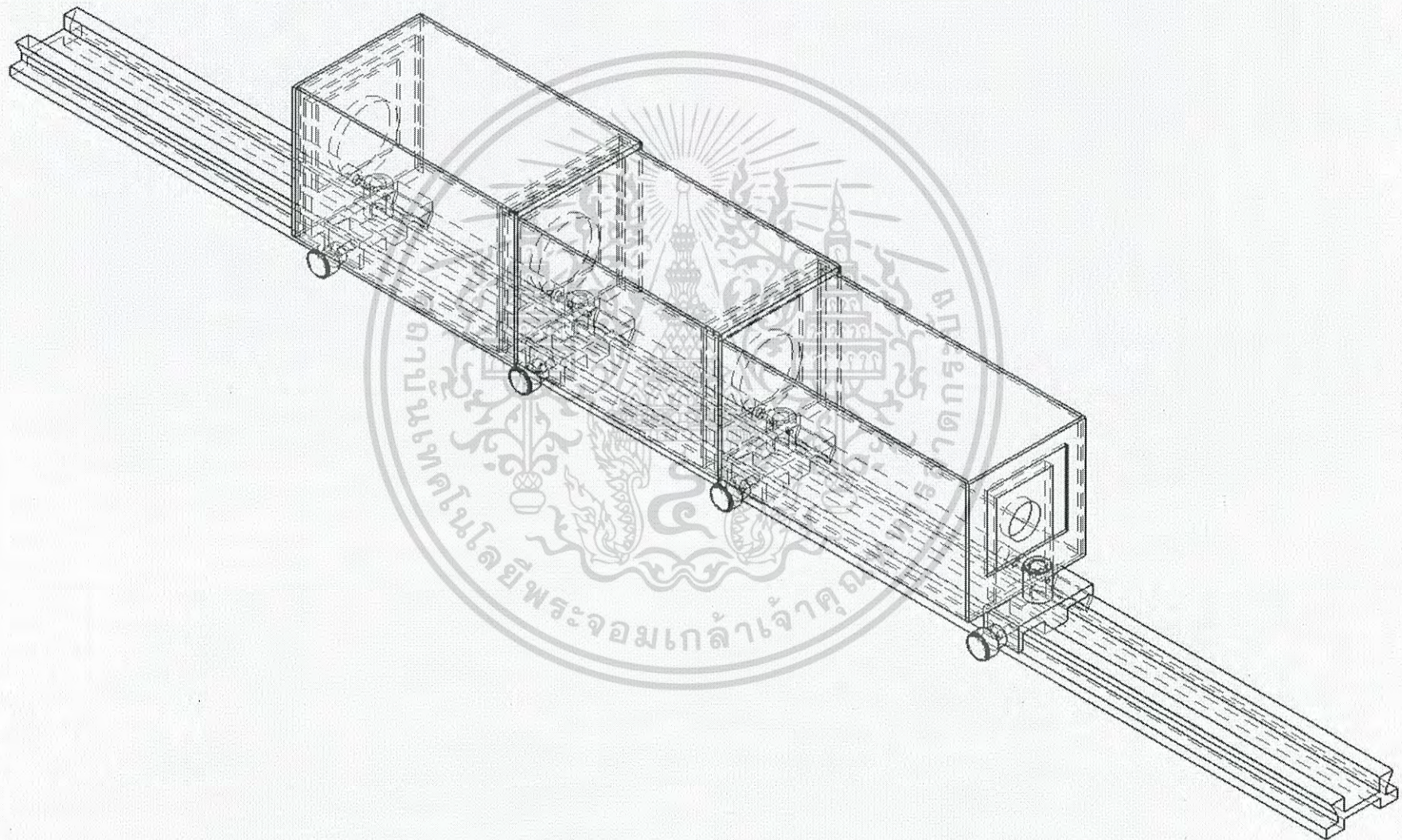


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
DRAWN					
CHK'D					
APPVD					
MFG					
Q.A					
WEIGHT:			SCALE:1:20	SHEET 1 OF 1	

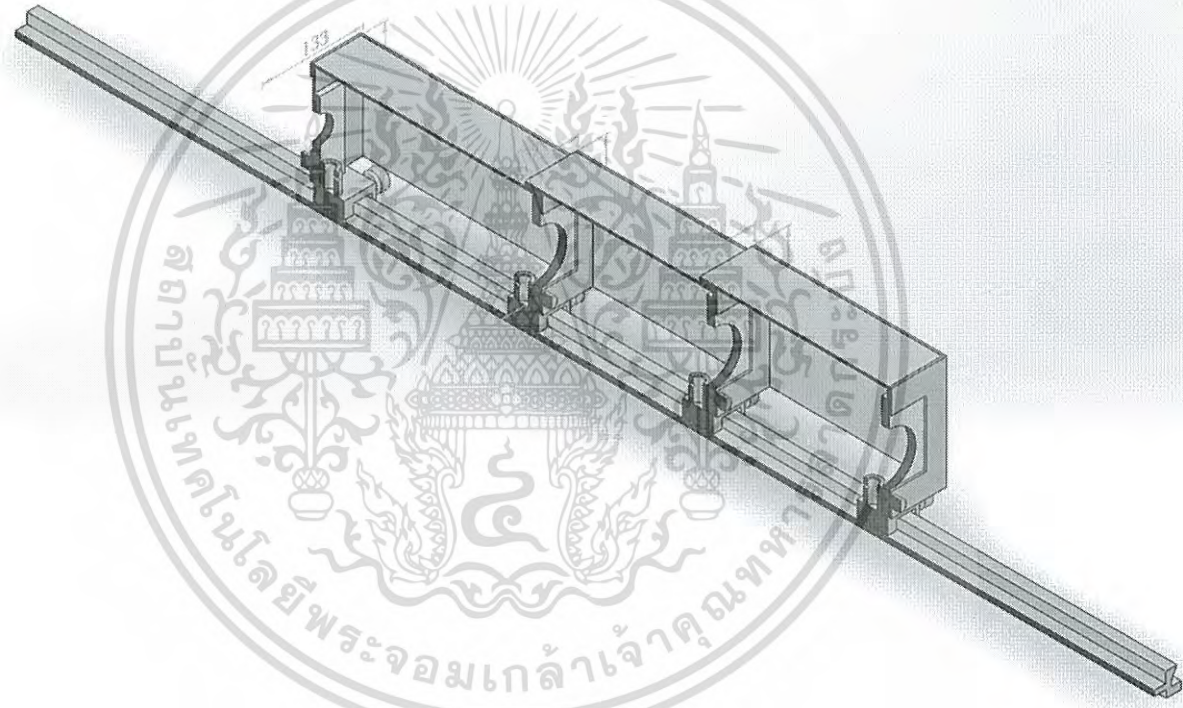
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่สิ้น อก MATERIAL: ไม้เห็ดดแบบงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Assem1

A4



- Right Plane
- 1. Origin
- (f) Part1<1> (Default<<
- (f) Part3<1> (Default<<
- 5<1> (Default<<Defau
- Part2<1> (Default<<De
- Part4<1> (Default<<De
- Part4<2> (Default<<De
- top<1> (Default<<Def
- right<1> (Default<<De
- right<2> (Default<<De
- final2<1> (Default<<D
- Part1<2> (Default<<De
- top3<1> (Default<<De
- right3<1> (Default<<D
- right3<2> (Default<<D
- final3<1> (Default<<D
- Part1<3> (Default<<De
- (-) small_nut<1> (Defa
- (-) small_nut<2> (Defa
- (-) small_nut<3> (Defa
- (-) small_nut<4> (Defa
- filter1<2> (Default<<D
- filter2<1> (Default<<D
- filter3<1> (Default<<D
- filter4<1> (Default<<D
- Stand<2> (Default<<D
- Stand<4> (Default<<D



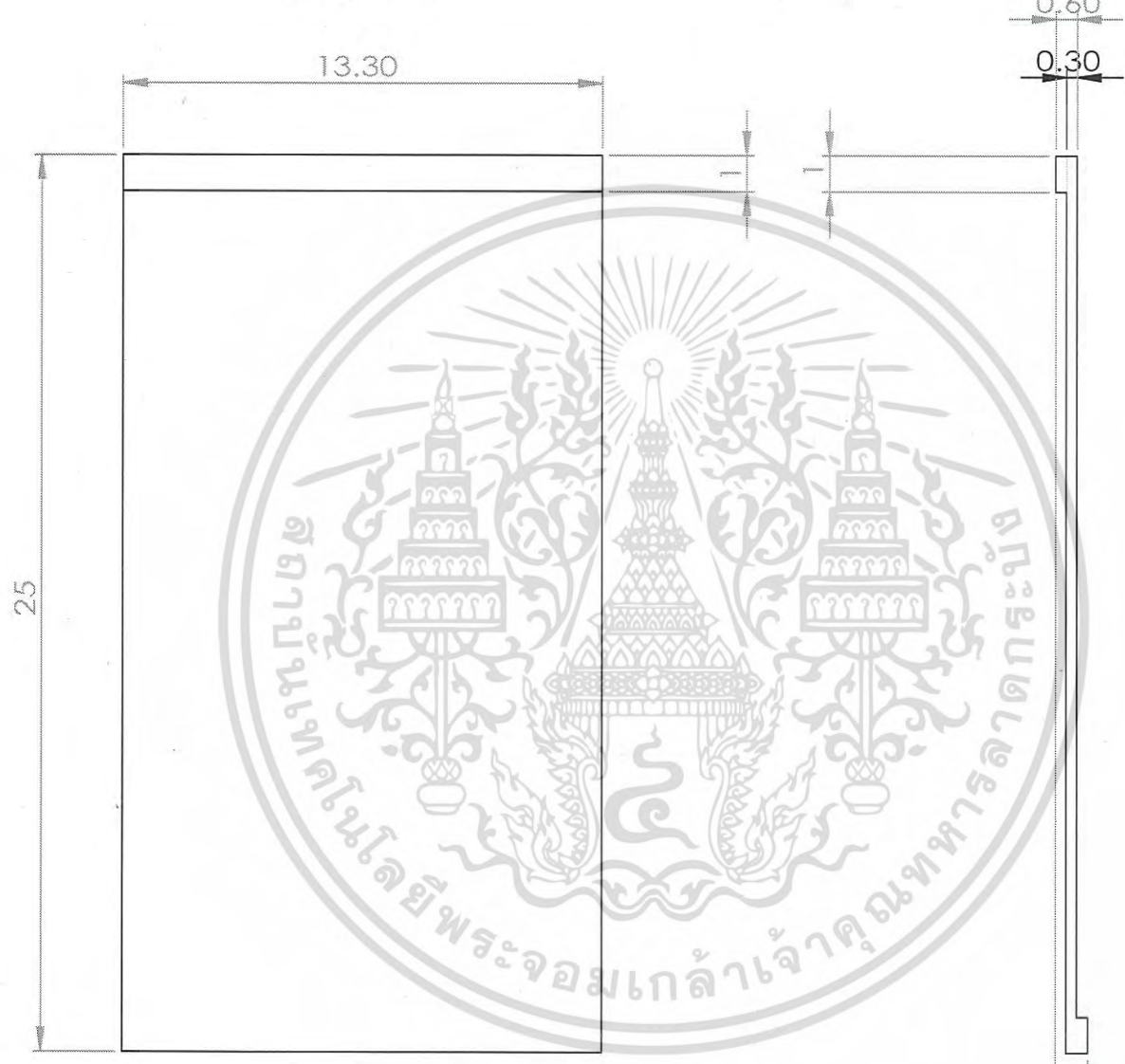
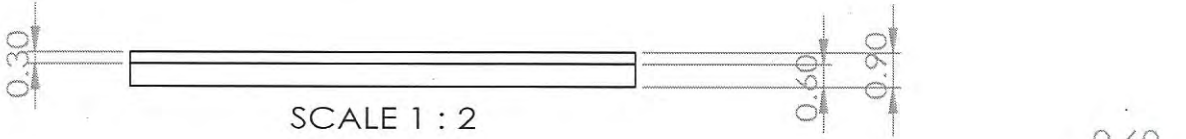


SCALE 1 : 2

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN									
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A									
						DWG NO.		A4	
						SCALE:1:5		SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

top31



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN						TITLE:	
CHK'D							
APPV'D							
MFG							
Q.A							
MATERIAL:						DWG NO.	
WEIGHT:						SCALE:1:5	
						SHEET 1 OF 1	

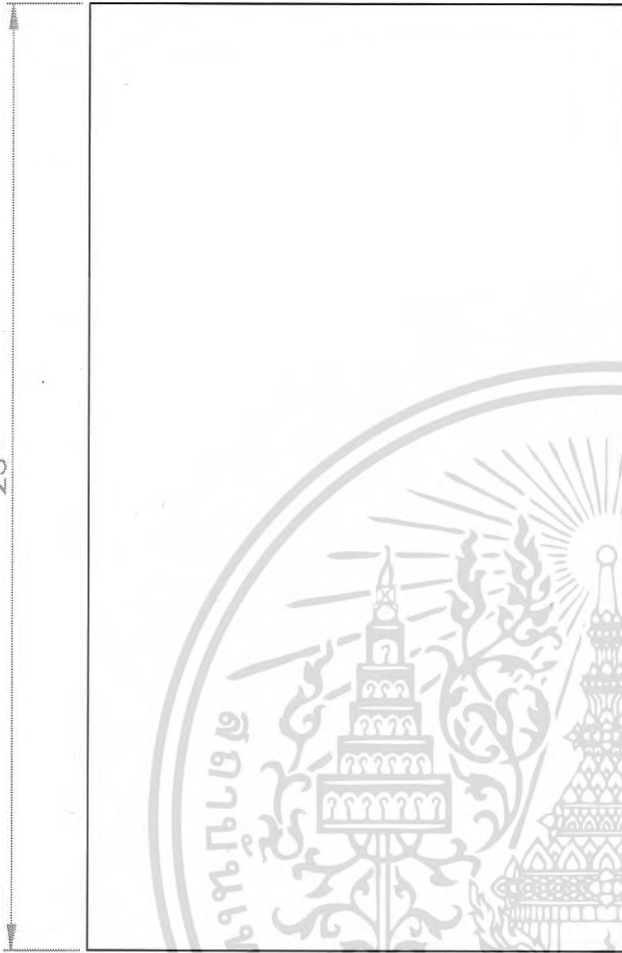
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

top

A4

25

0.30



SCALE 1 : 2

SCALE 1 : 2

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

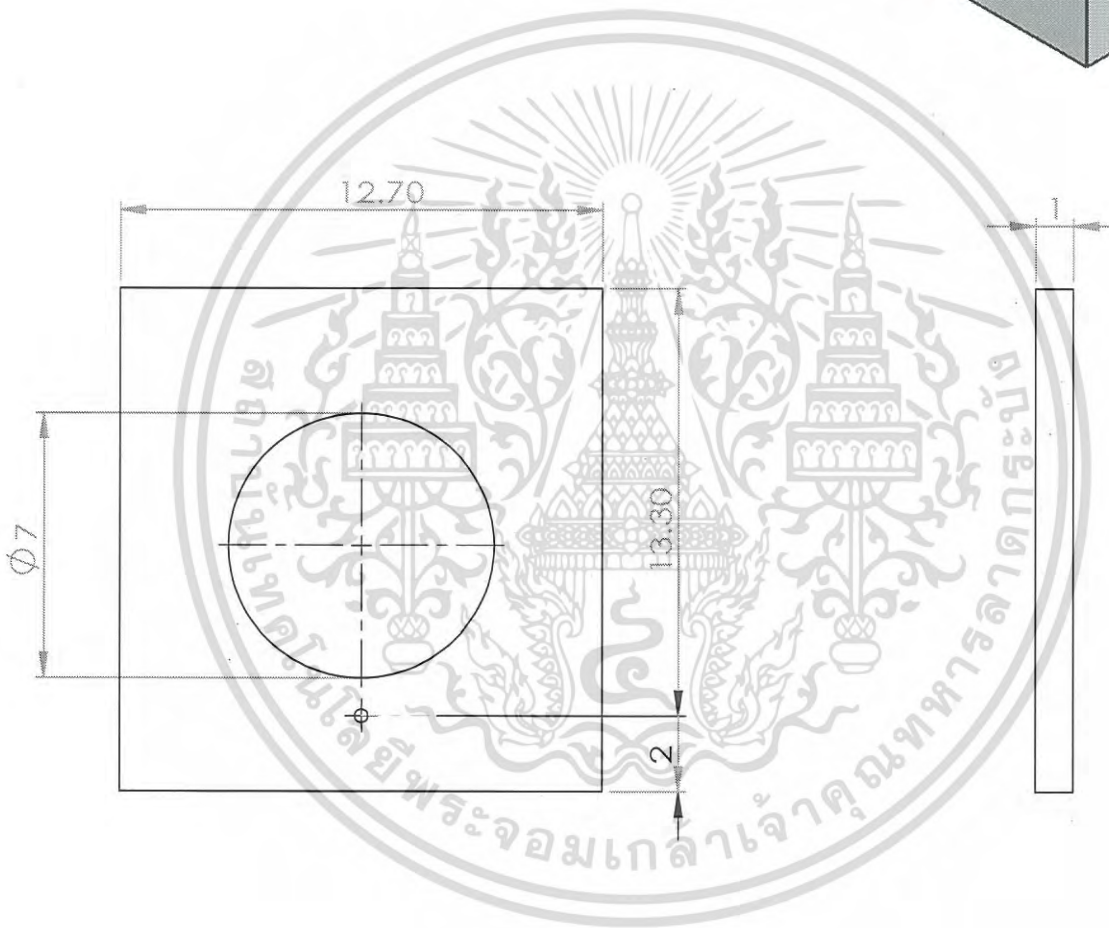
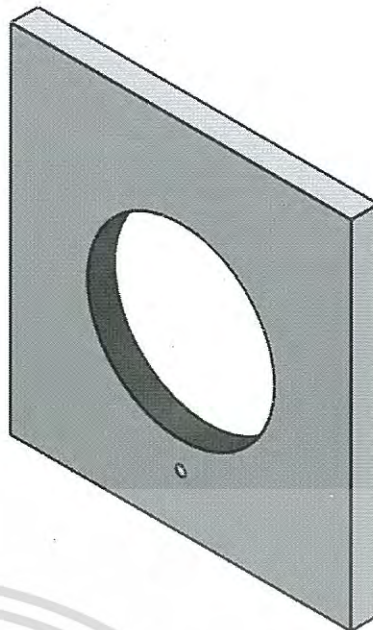
NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN		
CHKD		
APPVD		
MFG		
Q.A		

TITLE:	
WEIGHT:	
SCALE:1:5	
SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง MATERIAL: ใ้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

rightx2

A4



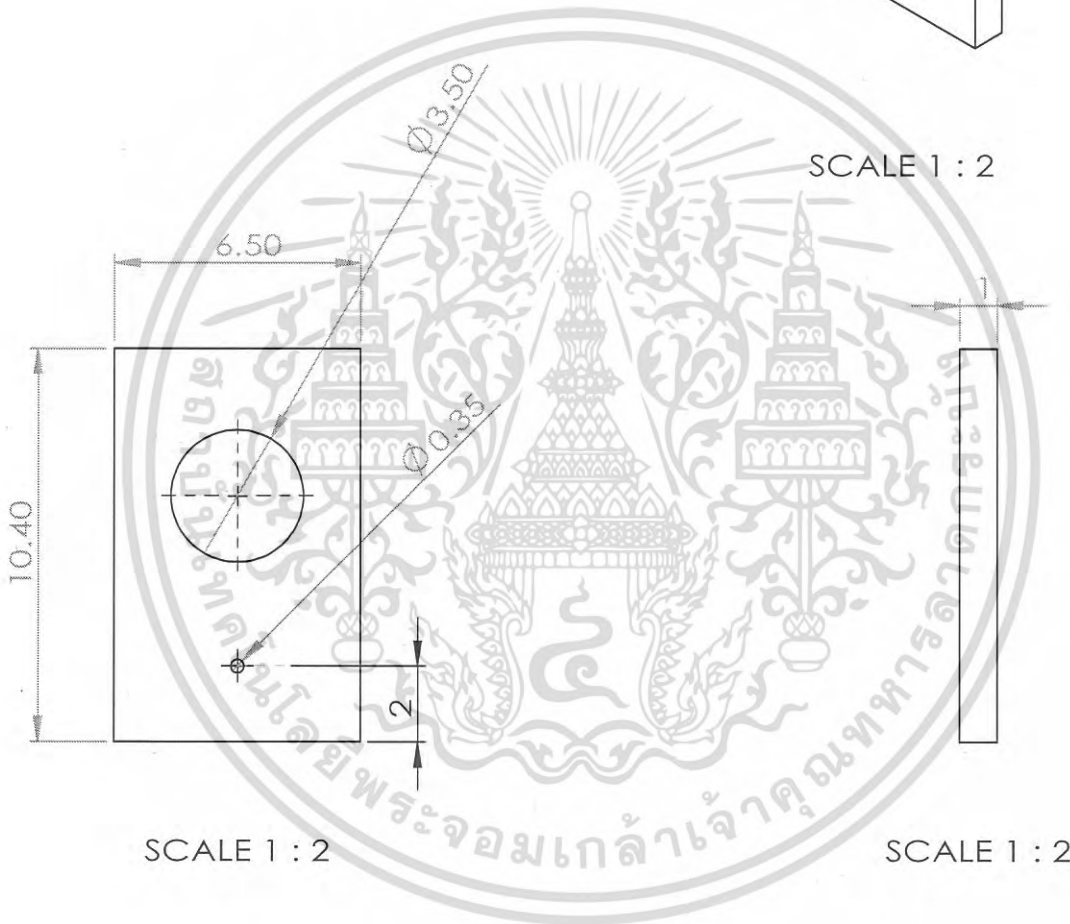
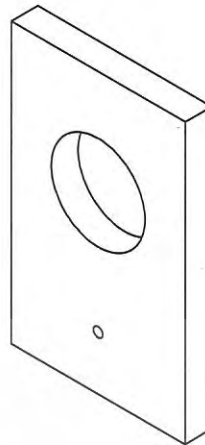
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN			TITLE:		
CHK'D			MATERIAL:		
APP'VD			DWG NO.		
MFG			WEIGHT:		
Q.A			SCALE:1:2		
			SHEET 1 OF 1		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามคัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Part1

A4



SCALE 1 : 2

SCALE 1 : 2

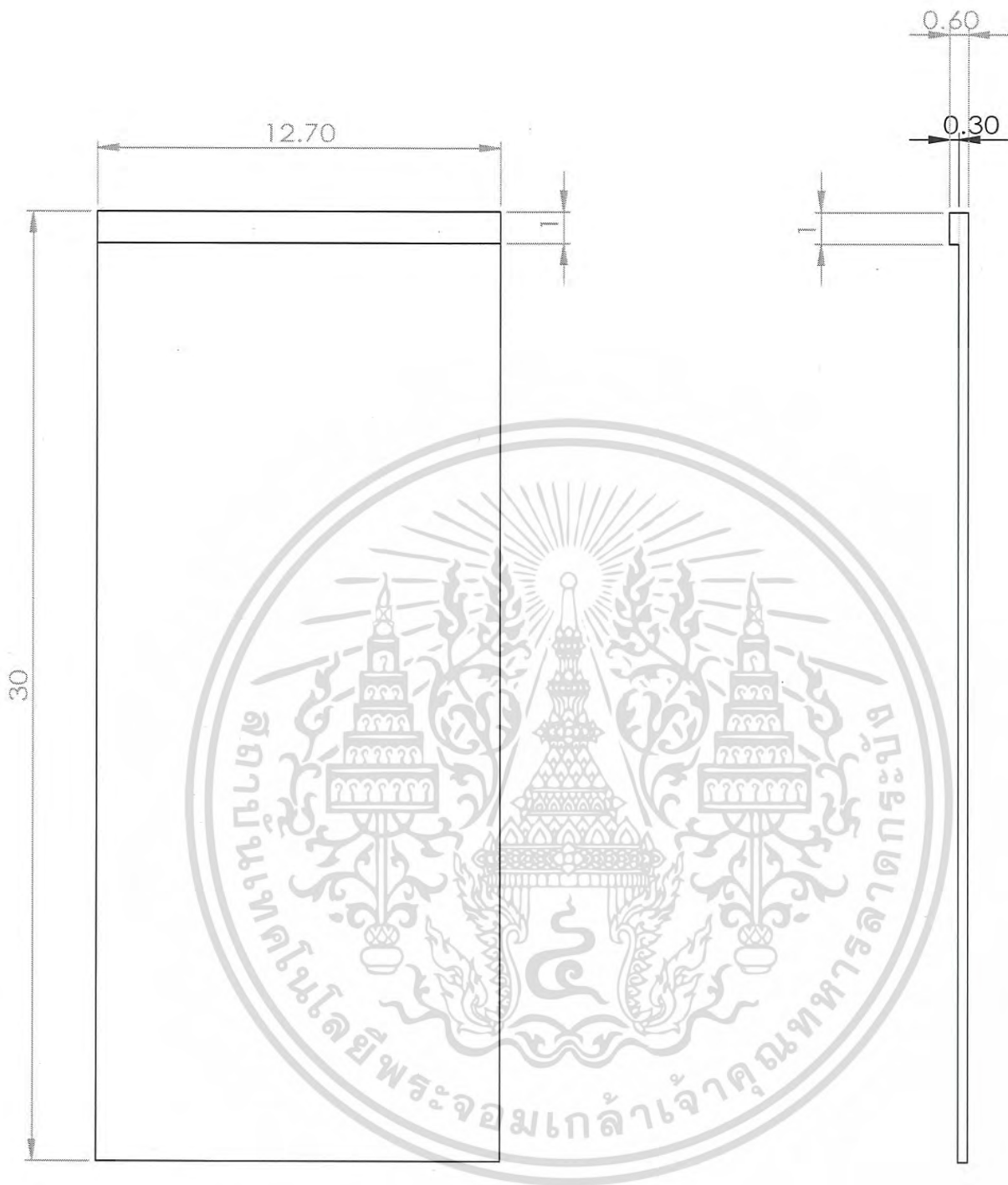
SCALE 1 : 2

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN			NAME		TITLE:	
CHK'D			SIGNATURE		DATE	
APPV'D			DATE		MATERIAL:	
MFG			DATE		DWG NO.	
Q.A			DATE		WEIGHT:	
					SCALE:1:1	
					SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Part2

A4



SCALE 1 : 2

SCALE 1 : 2

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME			SIGNATURE	DATE	TITLE:
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
MATERIAL:			DWG NO.		
WEIGHT:			SCALE: 1:5		SHEET 1 OF 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Part3

A4

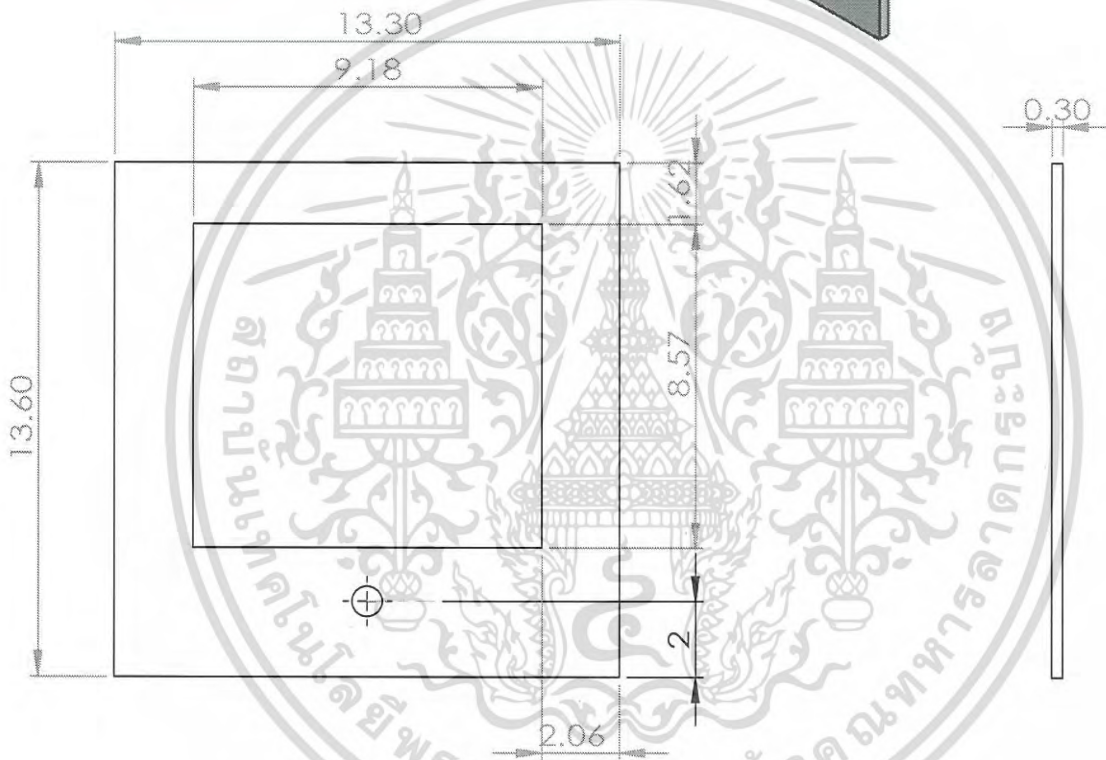
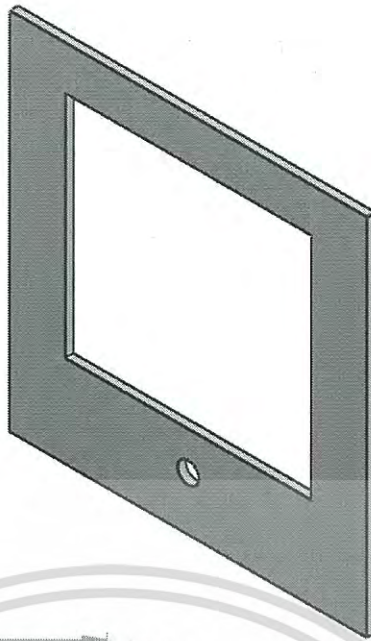


SCALE 1 : 2

SCALE 1 : 2

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:		
DRAWN					
CHKD					
APPVD					
MFG					
Q.A					
MATERIAL: ใ้ห้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้			DWG NO.	Part4	
WEIGHT:			SCALE:1:5	SHEET 1 OF 1	

A4



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

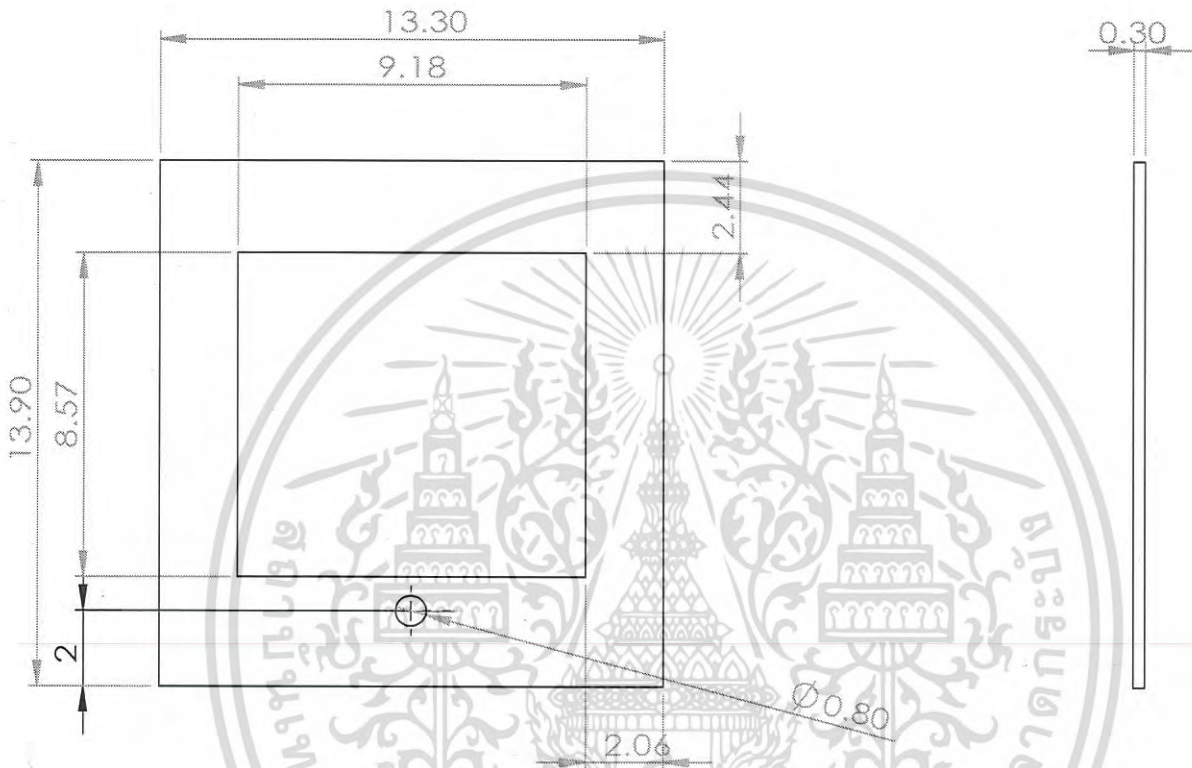
DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN		
CHK'D		
APP'VD		
MFG		
Q.A		

TITLE:	
filter1	A4
SCALE: 1:2	SHEET 1 OF 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้น MATERIAL: ใ้ห้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN		
CHK'D		
APP'VD		
MFG		
Q.A		

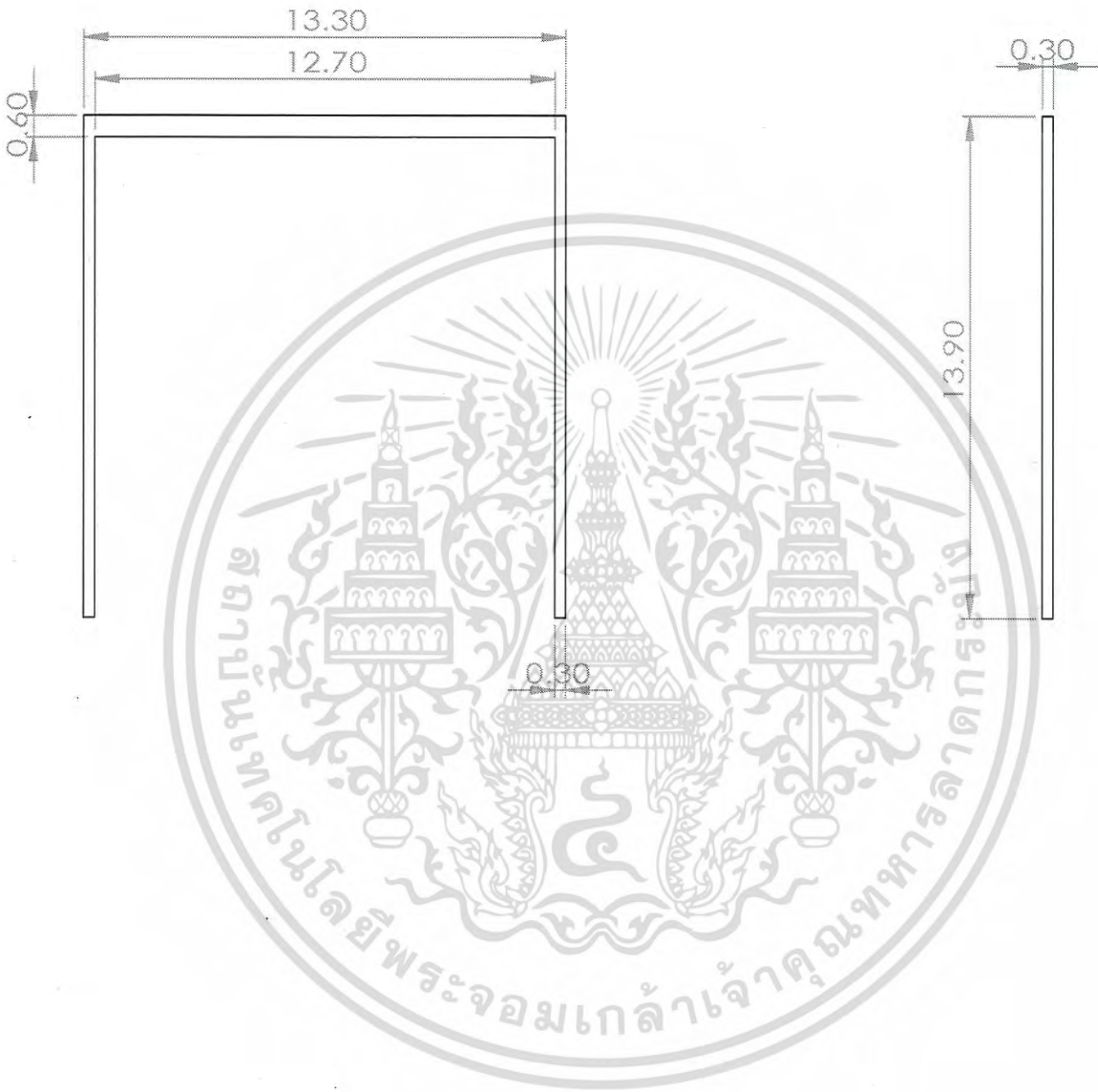
TITLE:	
filter2	A4
SCALE: 1:2	SHEET 1 OF 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้น วัสดุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WEIGHT:

SCALE: 1:2

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN				
CHK'D				
APPV'D				
MFG				
Q.A				

TITLE:	
DWG No.	final2
WEIGHT:	
SCALE: 1:2	
SHEET 1 OF 1	A4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ใดๆทั้งสิ้น หากมีการแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีก/MATERIAL: วัสดุเหล็กแผ่นเนื้อหนา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

DWG No.

5

A4

WEIGHT:

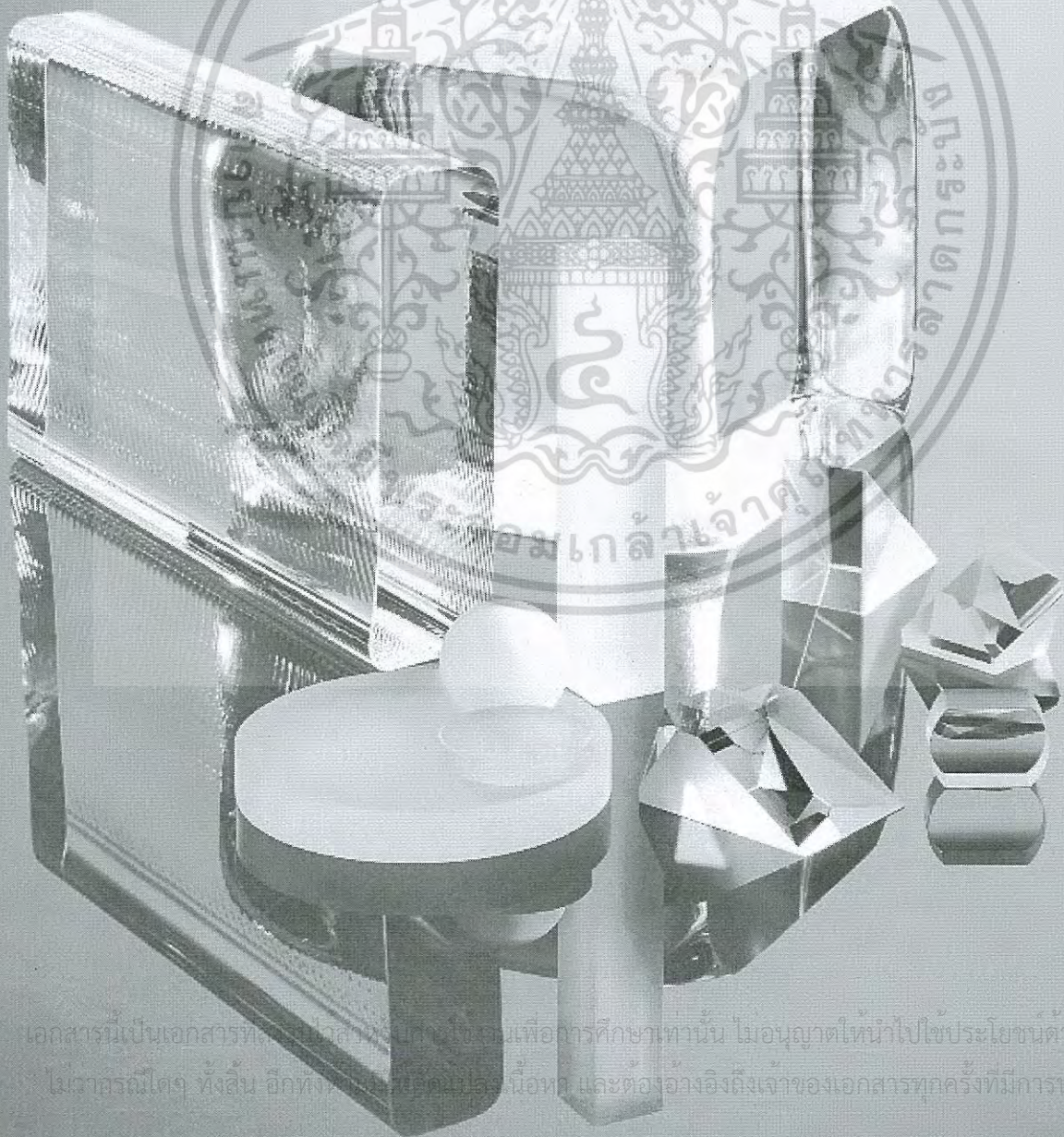
SCALE:1:2

SHEET 1 OF 1

SCHOTT
glass made of ideas

Optical Glass

Data Sheets



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Explanations

Refractive indices

The refractive indices n are listed for a maximum of 23 wavelengths in the range between 248.2 nm and 2325.4 nm.

Constants of the dispersion formula

From the Sellmeier dispersion formula

$$n^2(\lambda) - 1 = \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3}$$

the refractive indices for any wavelength within the range from the near UV to 2.3 μm can be calculated with the help of the constants $B_1, B_2, B_3,$ and C_1, C_2, C_3 .

Constants of the formula dn/dT

The temperature dependence of the refractive index can be calculated using the following formula:

$$\frac{dn_{\text{abs}}(\lambda, T)}{dT} = \frac{n^2(\lambda, T_0) - 1}{2 n(\lambda, T_0)} \left(D_0 + 2 D_1 \Delta T + 3 D_2 \Delta T^2 + \frac{E_0 + 2 E_1 \Delta T}{\lambda^2 - \lambda_{TK}^2} \right)$$

The constants are valid for a temperature range from -100°C to $+140^\circ\text{C}$ and a wavelength range from 0.365 μm to 1.014 μm . The temperature coefficients in the data sheets are guideline values.

Temperature coefficient of refraction

$\Delta n_{\text{rel}} / \Delta T$ referring to air at normal pressure 1013.3 mbar

$\Delta n_{\text{abs}} / \Delta T$ referring to vacuum

Internal transmittance τ_i

The internal transmittance in the wavelength range between 250 nm and 2500 nm is listed for thickness of 10 and 25 mm. The internal transmittance and color code listed in the data sheet represent median values from several melts of one glass type. For HT and HTultra grade, the internal transmittance in the visible spectrum includes guaranteed minimum values.

Color code

The color code lists the wavelength λ_{80} and λ_5 at which the transmittance is 0.80 and 0.05 at 10 mm thickness. The values are rounded off to 10 nm and denoted by eliminating the first digit. For high index glass types with $nd > 1.83$, the data of the color codes (marked by *) refers to the transmittance values 0.70 and 0.05 (λ_{70} and λ_5).

Relative partial dispersion

The relative partial dispersions P_{xy} and P'_{xy} for the wavelengths x and y are derived from the equations.

$$P_{xy} = \frac{n_x - n_y}{n_F - n_C} \quad \text{und} \quad P'_{xy} = \frac{n_x - n_y}{n_F' - n_C'}$$

Deviation of the relative partial dispersion from the "normal line" ΔP

The term ΔP_{xy} quantitatively describes a deviation relation of the dispersion from the "normal glasses".

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Other characteristics

$\alpha_{-30/+70}$	= The coefficient of thermal expansion in the temperature range between -30°C und $+70^{\circ}\text{C}$ in $10^{-6}/\text{K}$
$\alpha_{20/300}$	= The coefficient of linear thermal expansion in the temperature range between $+20^{\circ}\text{C}$ und $+300^{\circ}\text{C}$ in $10^{-6}/\text{K}$
Tg	= Transformation temperature in $^{\circ}\text{C}$
T _{10^{13.0}}	= Temperature of the glass in $^{\circ}\text{C}$ at a viscosity of 10^{13} dPa·s
T _{10^{7.6}}	= Temperature of the glass in $^{\circ}\text{C}$ at a viscosity of $10^{7.6}$ dPa·s
c _p	= average specific heat capacity in J/(g·K)
λ	= Thermal conductivity in W/(m·K)
AT*	= Yield point/sag temperature in $^{\circ}\text{C}$
ρ	= Density in g/cm ³
E	= Elasticity modulus in 10^3 N/mm ²
μ	= Poisson's ratio
K	= Stress optical coefficient in 10^{-6} mm ² /N
HK	= Knoop hardness
HG	= Grindability class (ISO 12844)
Abrasion Aa*	= Grindability according to JOGIS**
CR	= Climatic resistance Resistance to moisture in the air expressed in CR classes 1 (high) to 4 (low).
FR	= Stain resistance Resistance to stain formation expressed in FR classes 0 (high) to 5 (low).
SR	= Acid resistance Resistance to acid solutions expressed in SR classes 1 (high) to 4 (low) and 51 to 53 (very low).
AR	= Alkali resistance Resistance to alkaline solutions expressed in AR classes 1 (high) to 4 (low).
PR	= Phosphate resistance Resistance to alkaline phosphate containing solutions expressed in PR classes 1 (high) to 4 (low).
SR-J*	= Acid resistance class according to JOGIS**
WR-J*	= Water resistance class according to JOGIS**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

* only precision molding glasses

** JOGIS = Japanese Optical Glass Industrial Standards

SCHOTT N-BK 7® 517642.251

$n_d = 1.51680$	$v_d = 64.17$	$n_F - n_C = 0.008054$
$n_e = 1.51872$	$v_e = 63.96$	$n_{F'} - n_{C'} = 0.008110$

Refractive Indices		
	λ [nm]	
$n_{2325.4}$	2325.4	1.48921
$n_{1970.1}$	1970.1	1.49495
$n_{1529.6}$	1529.6	1.50091
$n_{1060.0}$	1060.0	1.50669
n_t	1014.0	1.50731
n_s	852.1	1.50980
n_r	706.5	1.51289
n_C	656.3	1.51432
$n_{C'}$	643.8	1.51472
$n_{632.8}$	632.8	1.51509
n_D	589.3	1.51673
n_d	587.6	1.51680
n_e	546.1	1.51872
n_F	486.1	1.52238
$n_{F'}$	480.0	1.52283
n_g	435.8	1.52668
n_h	404.7	1.53024
n_i	365.0	1.53627
$n_{334.1}$	334.1	1.54272
$n_{312.6}$	312.6	1.54862
$n_{296.7}$	296.7	
$n_{280.4}$	280.4	
$n_{248.3}$	248.3	

Internal Transmittance τ_i		
λ [nm]	τ_i (10mm)	τ_i (25mm)
2500	0.665	0.360
2325	0.793	0.560
1970	0.933	0.840
1530	0.992	0.980
1060	0.999	0.997
700	0.998	0.996
660	0.998	0.994
620	0.998	0.994
580	0.998	0.995
546	0.998	0.996
500	0.998	0.994
460	0.997	0.993
436	0.997	0.992
420	0.997	0.993
405	0.997	0.993
400	0.997	0.992
390	0.996	0.989
380	0.993	0.983
370	0.991	0.977
365	0.988	0.971
350	0.967	0.920
334	0.905	0.780
320	0.770	0.520
310	0.574	0.250
300	0.292	0.050
290	0.063	
280		
270		
260		
250		

Relative Partial Dispersion	
$P_{s,t}$	0.3098
$P_{C,s}$	0.5612
$P_{d,C}$	0.3076
$P_{e,d}$	0.2386
$P_{g,F}$	0.5349
$P_{i,h}$	0.7483
$P'_{s,t}$	0.3076
$P'_{C,s}$	0.6062
$P'_{d,C'}$	0.2566
$P'_{e,d}$	0.2370
$P'_{g,F'}$	0.4754
$P'_{i,h}$	0.7432

Deviation of Relative Partial Dispersions ΔP from the "Normal Line"	
$\Delta P_{C,t}$	0.0216
$\Delta P_{C,s}$	0.0087
$\Delta P_{F,e}$	-0.0009
$\Delta P_{g,F}$	-0.0009
$\Delta P_{i,g}$	0.0035

Constants of Dispersion Formula	
B_1	1.03961212
B_2	0.231792344
B_3	1.01046945
C_1	0.00600069867
C_2	0.0200179144
C_3	103.560653

Other Properties	
$\alpha_{-30/+70^\circ\text{C}} [10^{-6}/\text{K}]$	7.1
$\alpha_{+20/+300^\circ\text{C}} [10^{-6}/\text{K}]$	8.3
$T_g [^\circ\text{C}]$	557
$T_{10}^{13.0} [^\circ\text{C}]$	557
$T_{10}^{7.6} [^\circ\text{C}]$	719
$c_p [\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})]$	0.858
$\lambda [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	1.114

Constants of Dispersion dn/dT	
D_0	$1.86 \cdot 10^{-6}$
D_1	$1.31 \cdot 10^{-8}$
D_2	$-1.37 \cdot 10^{-11}$
E_0	$4.34 \cdot 10^{-7}$
E_1	$6.27 \cdot 10^{-10}$
$\lambda_{TK} [\mu\text{m}]$	0.17

Color Code	
λ_{80}/λ_5	33/29
(* = λ_{70}/λ_5)	

Remarks	
step 0.5 available	

$\rho [\text{g}/\text{cm}^3]$	2.51
$E [10^3 \text{N}/\text{mm}^2]$	82
μ	0.206
$K [10^{-6} \text{mm}^2/\text{N}]$	2.77
$\text{HK}_{0.1/20}$	610
HG	3
CR	1
FR	0
SR	1
AR	2.3
PR	2.3

Temperature Coefficients of Refractive Index						
	$\Delta n_{\text{rel}}/\Delta T [10^{-6}/\text{K}]$			$\Delta n_{\text{abs}}/\Delta T [10^{-6}/\text{K}]$		
$[\text{K}]$	1060.0	1060.0	1060.0	1060.0	1060.0	1060.0
-40/-20	2.4	2.9	3.3	0.3	0.8	1.2
+20/+40	2.4	3.0	3.5	1.1	1.6	2.1
+60/+80	2.5	3.1	3.7	1.5	2.1	2.7

N-BK7HT
517642.251

$n_d = 1.51680$	$v_d = 64.17$	$n_F - n_C = 0.008054$
$n_e = 1.51872$	$v_e = 63.96$	$n_{F'} - n_{C'} = 0.008110$

Refractive Indices		
	λ [nm]	
$n_{2325.4}$	2325.4	1.48921
$n_{1970.1}$	1970.1	1.49495
$n_{1529.6}$	1529.6	1.50091
$n_{1060.0}$	1060.0	1.50669
n_t	1014.0	1.50731
n_s	852.1	1.50980
n_r	706.5	1.51289
n_C	656.3	1.51432
$n_{C'}$	643.8	1.51472
$n_{632.8}$	632.8	1.51509
n_D	589.3	1.51673
n_d	587.6	1.51680
n_e	546.1	1.51872
n_F	486.1	1.52238
$n_{F'}$	480.0	1.52283
n_g	435.8	1.52668
n_h	404.7	1.53024
n_i	365.0	1.53627
$n_{334.1}$	334.1	1.54272
$n_{312.6}$	312.6	1.54862
$n_{296.7}$	296.7	
$n_{280.4}$	280.4	
$n_{248.3}$	248.3	

Internal Transmittance τ_i		
λ [nm]	τ_i (10mm)	τ_i (25mm)
2500	0.752	0.490
2325	0.845	0.657
1970	0.954	0.888
1530	0.995	0.987
1060	0.999	0.999
700	0.999	0.998
660	0.999	0.997
620	0.999	0.997
580	0.999	0.998
546	0.999	0.998
500	0.999	0.997
460	0.998	0.996
436	0.998	0.996
420	0.998	0.996
405	0.998	0.996
400	0.998	0.996
390	0.998	0.994
380	0.997	0.992
370	0.996	0.989
365	0.994	0.985
350	0.985	0.964
334	0.948	0.875
320	0.815	0.600
310	0.567	0.242
300	0.221	0.023
290	0.040	
280		
270		
260		
250		

Relative Partial Dispersion	
$P_{s,t}$	0.3098
$P_{C,s}$	0.5612
$P_{d,C}$	0.3076
$P_{e,d}$	0.2386
$P_{g,F}$	0.5349
$P_{i,h}$	0.7483
$P'_{s,t}$	0.3076
$P'_{C,s}$	0.6062
$P'_{d,C'}$	0.2566
$P'_{e,d}$	0.2370
$P'_{g,F'}$	0.4754
$P'_{i,h}$	0.7432

Deviation of Relative Partial Dispersions ΔP from the "Normal Line"	
$\Delta P_{C,t}$	0.0216
$\Delta P_{C,s}$	0.0087
$\Delta P_{F,e}$	-0.0009
$\Delta P_{g,F}$	-0.0009
$\Delta P_{i,g}$	0.0035

Constants of Dispersion Formula	
B_1	1.03961212
B_2	0.231792344
B_3	1.01046945
C_1	0.00600069867
C_2	0.0200179144
C_3	103.560653

Other Properties	
$\alpha_{-30/+70^\circ\text{C}} [10^{-6}/\text{K}]$	7.1
$\alpha_{+20/+300^\circ\text{C}} [10^{-6}/\text{K}]$	8.3
$T_g [^\circ\text{C}]$	557
$T_{10}^{13.0} [^\circ\text{C}]$	557
$T_{10}^{7.6} [^\circ\text{C}]$	719
$c_p [\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})]$	0.858
$\lambda [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	1.114

Constants of Dispersion dn/dT	
D_0	$1.86 \cdot 10^{-6}$
D_1	$1.31 \cdot 10^{-8}$
D_2	$-1.37 \cdot 10^{-11}$
E_0	$4.34 \cdot 10^{-7}$
E_1	$6.27 \cdot 10^{-10}$
$\lambda_{TK} [\mu\text{m}]$	0.17

Color Code	
λ_{80}/λ_5	33/29
(* = λ_{70}/λ_5)	
Remarks	
step 0.5 available	

Temperature Coefficients of Refractive Index						
	$\Delta n_{rel}/\Delta T [10^{-6}/\text{K}]$			$\Delta n_{abs}/\Delta T [10^{-6}/\text{K}]$		
$[\text{C}^\circ]$	1060.0	1060.0	1060.0	1060.0	1060.0	1060.0
-40/ -20	2.4	2.9	3.3	0.3	0.8	1.2
+20/ +40	2.4	3.0	3.5	1.1	1.6	2.1
+60/ +80	2.5	3.1	3.7	1.5	2.1	2.7

$\rho [\text{g}/\text{cm}^3]$	2.51
$E [10^3 \text{N}/\text{mm}^2]$	82
μ	0.206
$K [10^{-6} \text{mm}^2/\text{N}]$	2.77
$HK_{0.1/20}$	610
HG	3
CR	1
FR	0
SR	1
AR	2.3
PR	2.3

N-BK7HTI
517642.251

$n_d = 1.51680$	$v_d = 64.17$	$n_F - n_C = 0.008054$
$n_e = 1.51872$	$v_e = 63.96$	$n_F' - n_C' = 0.008110$

Refractive Indices		
	λ [nm]	
$n_{2325.4}$	2325.4	1.48921
$n_{1970.1}$	1970.1	1.49495
$n_{1529.6}$	1529.6	1.50091
$n_{1060.0}$	1060.0	1.50669
n_i	1014.0	1.50731
n_s	852.1	1.50980
n_r	706.5	1.51289
n_C	656.3	1.51432
$n_{C'}$	643.8	1.51472
$n_{632.8}$	632.8	1.51509
n_D	589.3	1.51673
n_d	587.6	1.51680
n_e	546.1	1.51872
n_F	486.1	1.52238
$n_{F'}$	480.0	1.52283
n_g	435.8	1.52668
n_h	404.7	1.53024
n_i	365.0	1.53627
$n_{334.1}$	334.1	1.54272
$n_{312.6}$	312.6	1.54862
$n_{296.7}$	296.7	
$n_{280.4}$	280.4	
$n_{248.3}$	248.3	

Internal Transmittance τ_i		
λ [nm]	τ_i (10mm)	τ_i (25mm)
2500	0.752	0.490
2325	0.845	0.657
1970	0.954	0.888
1530	0.995	0.987
1060	0.999	0.999
700	0.999	0.998
660	0.999	0.997
620	0.999	0.997
580	0.999	0.998
546	0.999	0.998
500	0.999	0.997
460	0.998	0.996
436	0.998	0.996
420	0.998	0.996
405	0.998	0.996
400	0.998	0.996
390	0.998	0.994
380	0.997	0.992
370	0.996	0.989
365	0.994	0.985
350	0.985	0.964
334	0.948	0.875
320	0.815	0.600
310	0.567	0.242
300	0.221	0.023
290	0.040	
280		
270		
260		
250		

Relative Partial Dispersion	
$P_{s,t}$	0.3098
$P_{C,s}$	0.5612
$P_{d,C}$	0.3076
$P_{e,d}$	0.2386
$P_{g,F}$	0.5349
$P_{i,h}$	0.7483
$P'_{s,t}$	0.3076
$P'_{C,s}$	0.6062
$P'_{d,C'}$	0.2566
$P'_{e,d}$	0.2370
$P'_{g,F'}$	0.4754
$P'_{i,h}$	0.7432

Constants of Dispersion Formula	
B_1	1.03961212
B_2	0.231792344
B_3	1.01046945
C_1	0.00600069867
C_2	0.0200179144
C_3	103.560653

Deviation of Relative Partial Dispersions ΔP from the "Normal Line"	
$\Delta P_{C,t}$	0.0216
$\Delta P_{C,s}$	0.0087
$\Delta P_{F,e}$	-0.0009
$\Delta P_{g,F}$	-0.0009
$\Delta P_{i,g}$	0.0035

Other Properties	
$\alpha_{-30/+70^\circ\text{C}} [10^{-6}/\text{K}]$	7.1
$\alpha_{+20/+300^\circ\text{C}} [10^{-6}/\text{K}]$	8.3
$T_g [^\circ\text{C}]$	557
$T_{10}^{13.0} [^\circ\text{C}]$	557
$T_{10}^{7.6} [^\circ\text{C}]$	719
$c_p [\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})]$	0.858
$\lambda [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	1.114
$\rho [\text{g}/\text{cm}^3]$	2.51
$E [10^3 \text{N}/\text{mm}^2]$	82
μ	0.206
$K [10^{-6} \text{mm}^2/\text{N}]$	2.77
$\text{HK}_{0.1/20}$	610
HG	3
CR	1
FR	0
SR	1
AR	2.3
PR	2.3

Constants of Dispersion dn/dT	
D_0	$1.86 \cdot 10^{-6}$
D_1	$1.31 \cdot 10^{-8}$
D_2	$-1.37 \cdot 10^{-11}$
E_0	$4.34 \cdot 10^{-7}$
E_1	$6.27 \cdot 10^{-10}$
$\lambda_{TK} [\mu\text{m}]$	0.17

Color Code	
λ_{80}/λ_5	33/29
(* = λ_{70}/λ_5)	

Remarks	
i-line glass	

Temperature Coefficients of Refractive Index						
	$\Delta n_{rel}/\Delta T [10^{-6}/\text{K}]$			$\Delta n_{abs}/\Delta T [10^{-6}/\text{K}]$		
$[\text{^\circ C}]$	1060.0	e	g	1060.0	e	g
-40/ -20	2.4	2.9	3.3	0.3	0.8	1.2
+20/ +40	2.4	3.0	3.5	1.1	1.6	2.1
+60/ +80	2.5	3.1	3.7	1.5	2.1	2.7

P-BK7
516641.243

$n_d = 1.51640$	$v_d = 64.06$	$n_F - n_C = 0.008061$
$n_e = 1.51832$	$v_e = 63.87$	$n_{F'} - n_{C'} = 0.008115$

Refractive Indices		
	λ [nm]	
$n_{2325.4}$	2325.4	1.48811
$n_{1970.1}$	1970.1	1.49407
$n_{1529.6}$	1529.6	1.50025
$n_{1060.0}$	1060.0	1.50620
n_t	1014.0	1.50683
n_s	852.1	1.50936
n_r	706.5	1.51248
n_C	656.3	1.51392
$n_{C'}$	643.8	1.51431
$n_{632.8}$	632.8	1.51469
n_D	589.3	1.51633
n_d	587.6	1.51640
n_e	546.1	1.51832
n_F	486.1	1.52198
$n_{F'}$	480.0	1.52243
n_g	435.8	1.52628
n_h	404.7	1.52982
n_i	365.0	1.53583
$n_{334.1}$	334.1	1.54227
$n_{312.6}$	312.6	
$n_{296.7}$	296.7	
$n_{280.4}$	280.4	
$n_{248.3}$	248.3	

Internal Transmittance τ_i		
λ [nm]	τ_i (10mm)	τ_i (25mm)
2500	0.733	0.460
2325	0.867	0.700
1970	0.967	0.920
1530	0.992	0.979
1060	0.999	0.999
700	0.999	0.997
660	0.999	0.997
620	0.999	0.997
580	0.999	0.997
546	0.999	0.997
500	0.998	0.996
460	0.998	0.995
436	0.998	0.994
420	0.997	0.994
405	0.997	0.993
400	0.997	0.992
390	0.996	0.990
380	0.994	0.986
370	0.992	0.979
365	0.989	0.973
350	0.971	0.930
334	0.882	0.730
320	0.565	0.240
310	0.180	0.020
300	0.004	
290		
280		
270		
260		
250		

Relative Partial Dispersion	
$P_{s,t}$	0.3143
$P_{C,s}$	0.5649
$P_{d,C}$	0.3082
$P_{e,d}$	0.2387
$P_{g,F}$	0.5335
$P_{i,h}$	0.7455
$P'_{s,t}$	0.3122
$P'_{C',s}$	0.6102
$P'_{d,C'}$	0.2571
$P'_{e,d}$	0.2371
$P'_{g,F'}$	0.4742
$P'_{i,h}$	0.7405

Deviation of Relative Partial Dispersions ΔP from the "Normal Line"	
$\Delta P_{C,t}$	0.0303
$\Delta P_{C,s}$	0.0126
$\Delta P_{F,e}$	-0.0016
$\Delta P_{g,F}$	-0.0025
$\Delta P_{i,g}$	-0.0017

Constants of Dispersion Formula	
B_1	1.18318503
B_2	0.0871756426
B_3	1.03133701
C_1	0.00722141956
C_2	0.0268216805
C_3	101.702362

Other Properties	
$\alpha_{-30/+70^\circ\text{C}} [10^{-6}/\text{K}]$	6.0
$\alpha_{+20/+300^\circ\text{C}} [10^{-6}/\text{K}]$	7.3
$T_g [^\circ\text{C}]$	498
$T_{10}^{13.0} [^\circ\text{C}]$	498
$T_{10}^{7.6} [^\circ\text{C}]$	657
$c_p [\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})]$	0.870
$\lambda [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	1.130
AT [°C]	546
$\rho [\text{g}/\text{cm}^3]$	2.43
E [$10^3 \text{N}/\text{mm}^2$]	85
μ	0.202
K [$10^{-6} \text{mm}^2/\text{N}$]	2.77
HK _{0.1/20}	627
HG	
Abrasion Aa	66
CR	1
FR	0
SR	1
AR	2.3
PR	2.3
SR-J	1
WR-J	4

Constants of Dispersion dn/dT	
D_0	
D_1	
D_2	
E_0	
E_1	
$\lambda_{TK} [\mu\text{m}]$	

Color Code	
λ_{80}/λ_5	33/30
(* = λ_{70}/λ_5)	
Remarks	
suitable for precision molding	

Temperature Coefficients of Refractive Index			
	$\Delta n_{rel}/\Delta T [10^{-6}/\text{K}]$	$\Delta n_{abs}/\Delta T [10^{-6}/\text{K}]$	
[°C] สารนี้ เป็น 1060.0 การที่สง e น โส สำหรับ การ ใช้ การ 1060.0 การ e ษา เทา ษา g โส			
-40/ -20			
+20/ +40			
+60/ +80			

F2
620364.360

$n_d = 1.62004$
 $n_e = 1.62408$

$v_d = 36.37$
 $v_e = 36.11$

$n_F - n_C = 0.017050$
 $n_{F'} - n_{C'} = 0.017284$

Refractive Indices		
	λ [nm]	
$n_{2325.4}$	2325.4	1.58465
$n_{1970.1}$	1970.1	1.58958
$n_{1529.6}$	1529.6	1.59513
$n_{1060.0}$	1060.0	1.60190
n_i	1014.0	1.60279
n_s	852.1	1.60671
n_r	706.5	1.61227
n_C	656.3	1.61503
$n_{C'}$	643.8	1.61582
$n_{632.8}$	632.8	1.61656
n_D	589.3	1.61989
n_d	587.6	1.62004
n_e	546.1	1.62408
n_F	486.1	1.63208
$n_{F'}$	480.0	1.63310
n_g	435.8	1.64202
n_h	404.7	1.65064
n_i	365.0	1.66623
$n_{334.1}$	334.1	1.68455
$n_{312.6}$	312.6	
$n_{296.7}$	296.7	
$n_{280.4}$	280.4	
$n_{248.3}$	248.3	

Internal Transmittance τ_i		
λ [nm]	τ_i (10mm)	τ_i (25mm)
2500	0.809	0.589
2325	0.859	0.685
1970	0.949	0.876
1530	0.996	0.989
1060	0.999	0.998
700	0.999	0.998
660	0.999	0.997
620	0.999	0.998
580	0.999	0.998
546	0.999	0.998
500	0.999	0.997
460	0.998	0.994
436	0.997	0.993
420	0.996	0.991
405	0.995	0.987
400	0.994	0.985
390	0.991	0.977
380	0.985	0.963
370	0.975	0.940
365	0.968	0.921
350	0.905	0.780
334	0.537	0.211
320	0.080	
310		
300		
290		
280		
270		
260		
250		

Relative Partial Dispersion	
$P_{s,t}$	0.2301
$P_{C,s}$	0.4882
$P_{d,C}$	0.2938
$P_{e,d}$	0.2370
$P_{g,F}$	0.5828
$P_{i,h}$	0.9142
$P'_{s,t}$	0.2270
$P'_{C',s}$	0.5270
$P'_{d,C'}$	0.2443
$P'_{e,d}$	0.2338
$P'_{g,F'}$	0.5159
$P'_{i,h}$	0.9018

Constants of Dispersion Formula	
B_1	1.34533359
B_2	0.209073176
B_3	0.937357162
C_1	0.00997743871
C_2	0.0470450767
C_3	111.886764

Deviation of Relative Partial Dispersions ΔP from the "Normal Line"	
$\Delta P_{C,t}$	0.0008
$\Delta P_{C,s}$	0.0005
$\Delta P_{F,e}$	0.0000
$\Delta P_{g,F}$	0.0002
$\Delta P_{i,g}$	0.0006

Other Properties	
$\alpha_{-30/+70^\circ\text{C}} [10^{-6}/\text{K}]$	8.2
$\alpha_{+20/+300^\circ\text{C}} [10^{-6}/\text{K}]$	9.2
$T_g [^\circ\text{C}]$	434
$T_{10}^{13,0} [^\circ\text{C}]$	430
$T_{10}^{7,6} [^\circ\text{C}]$	594
$c_p [\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})]$	0.557
$\lambda [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	0.780

Constants of Dispersion dn/dT	
D_0	$1.51 \cdot 10^{-6}$
D_1	$1.56 \cdot 10^{-8}$
D_2	$-2.78 \cdot 10^{-11}$
E_0	$9.34 \cdot 10^{-7}$
E_1	$1.04 \cdot 10^{-9}$
$\lambda_{TK} [\mu\text{m}]$	0.25

Color Code	
λ_{80}/λ_5	35/32
(* = λ_{70}/λ_5)	

Remarks	
lead containing glass type	

$\rho [\text{g}/\text{cm}^3]$	3.60
$E [10^3 \text{N}/\text{mm}^2]$	57
μ	0.220
$K [10^{-6} \text{mm}^2/\text{N}]$	2.81
$HK_{0,1/20}$	420
HG	2
CR	1
FR	0
SR	1
AR	2.3
PR	1.3

Temperature Coefficients of Refractive Index						
[$^\circ\text{C}$]	$\Delta n_{rel}/\Delta T [10^{-6}/\text{K}]$			$\Delta n_{abs}/\Delta T [10^{-6}/\text{K}]$		
	1060.0	e	g	1060.0	e	g
-40/-20	2.4	3.9	5.5	0.3	1.6	3.2
+20/+40	2.7	4.4	6.3	1.3	3.0	4.8
+60/+80	3.0	4.8	6.8	1.9	3.7	5.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัท SCHOTT AG ซึ่งในเอกสารนี้มีการใช้เครื่องหมายการค้าและชื่อผลิตภัณฑ์ของ SCHOTT AG และอาจมีเครื่องหมายการค้าและชื่อผลิตภัณฑ์ของผู้อื่นปรากฏในเอกสารนี้โดยไม่มีการแจ้งให้ทราบ