

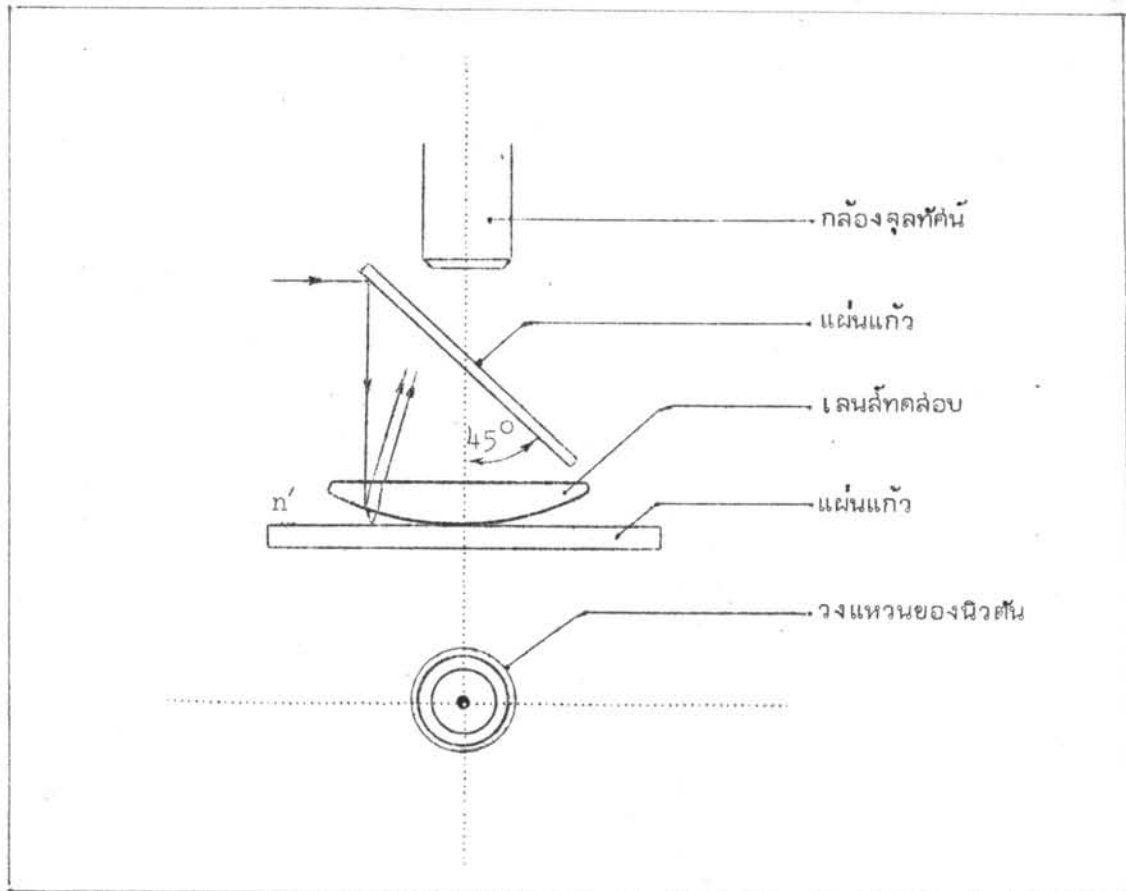


การทดสอบเลนส์ที่สร้างขึ้น

(1) การทดสอบระบบทัศนมิติ ๆ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้ทดสอบ เช่น การทดสอบหาความคลาดที่ยังเหลืออยู่ในระบบทัศนมิติ มักเป็นการทดสอบของผู้ผลิต เพื่อจะหาวิธีอื่น ๆ ก่าแก้ความคลาดที่ยังเหลืออยู่นั้นต่อไป อีกแบบหนึ่งคือ พิจารณาภาพที่ได้จากระบบทัศนมิติ โดยใช้วัตถุทดสอบที่มีแบบเฉพาะอย่างหนึ่ง เช่น เป็นจุด หรือช่องแคบเป็นต้นซึ่งเป็นการทดสอบคุณภาพ ผู้ใช้ระบบทัศนมิติค่าสถิตินั้นมักจะเป็นผู้ทดสอบ และมีวิธีทดสอบหลาย ๆ แบบ สำหรับในการทดลองนี้ จะทดสอบคุณภาพของเลนส์องค์สำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์และสำหรับเลนส์โทรทัศนมิติ วิธีการทดสอบจะได้กล่าวโดยละเอียดต่อไป

1. การทดสอบด้วยวิธีวงแหวนของนิวตัน (14, 17)

การทดสอบด้วยวิธีวงแหวนของนิวตัน (Newton's rings) อาศัย การแทรกสอด (interference) ของคลื่นแสงจากฟิล์มบาง จะได้รัศมีมีความโค้งของผิวเลนส์ที่ทดสอบ จากนั้น นำรัศมีความโค้งนี้ไปคำนวณหาตำแหน่งของภาพ, ทางยาวโฟกัสของเลนส์ทดสอบ และความคลาดทรงกลมได้ลำดับต่อไป สัตว่างเลนส์ทดสอบลงบนผิวแก้วระนาบหรือผิวโค้งแล้วแต่กรณี ทำให้แสงตกตั้งฉาก (โดยประมาณ) กับผิวเลนส์ด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 สังเกตการแทรกสอดด้วยกล้องจุลทรรศน์ ถ้าแสงที่ไปเป็นแสงขาว จะเห็นภาพเป็นวงแหวนสีต่าง ๆ ในสเปกตรัมเรียงกันไป แต่ถ้าเป็นแสงสีเดียว จะเห็นเป็นวงมืดและสว่างเรียงสลับกันไป เรียกว่า วงแหวนของนิวตัน ซึ่งเกิดจากคลื่นแสงสะท้อนที่ผิวบนและล่างของฟิล์มอากาศบาง ๆ ที่อยู่ระหว่างผิวล่างของเลนส์ทดสอบกับผิวบนของแผ่นแก้วที่รองรับเลนส์ไปแทรกสอดกันในสนามของภาพ และลักษณะของภาพขึ้นอยู่กับรัศมีความโค้งของผิวเลนส์และของแผ่นแก้ว พิจารณารูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 การทดลองด้วยวิธีวงแหวนของนิวตัน

ให้ r เป็นรัศมีความโค้งของผิวทรงกลมใดๆ จากสามเหลี่ยม ABC จะได้

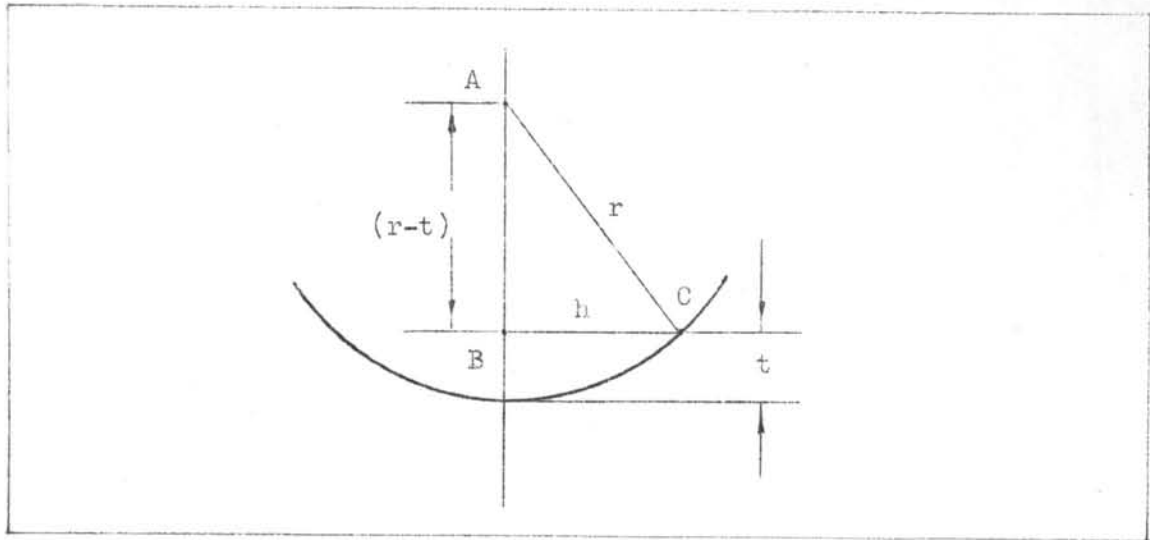
$$r^2 = (r - t)^2 + h^2$$

$$= r^2 - 2rt + t^2 + h^2$$

หรือ $2rt - t^2 = h^2$

ในกรณีที่ t มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ r ($t \ll r$) ค่า $t^2 \rightarrow 0$ สมการ (4.1)

จะเป็น $t = \frac{h^2}{2r}$ (4.2)



รูปที่ 4.2 การหาระยะห่างจากจุดสัมผัสของผิวโค้งทรงกลม

ใช้สมการ (4.2) หาความหนาของฟิล์มผิวโค้ง ได้ เช่น ในรูปที่ 4.3(ก) จะได้

$$d = d_2 - t_2$$

หรือ

$$d = (t_1 + e) - t_2$$

โดย e เป็นระยะระหว่างผิวของผิวโค้ง r_1 และ r_2 เป็นรัศมีความโค้งของผิวบนและล่างตามลำดับ แทนค่า $t_1 = h^2/2r_1$ และ $t_2 = h^2/2r_2$ ได้ความหนาของฟิล์มเป็น

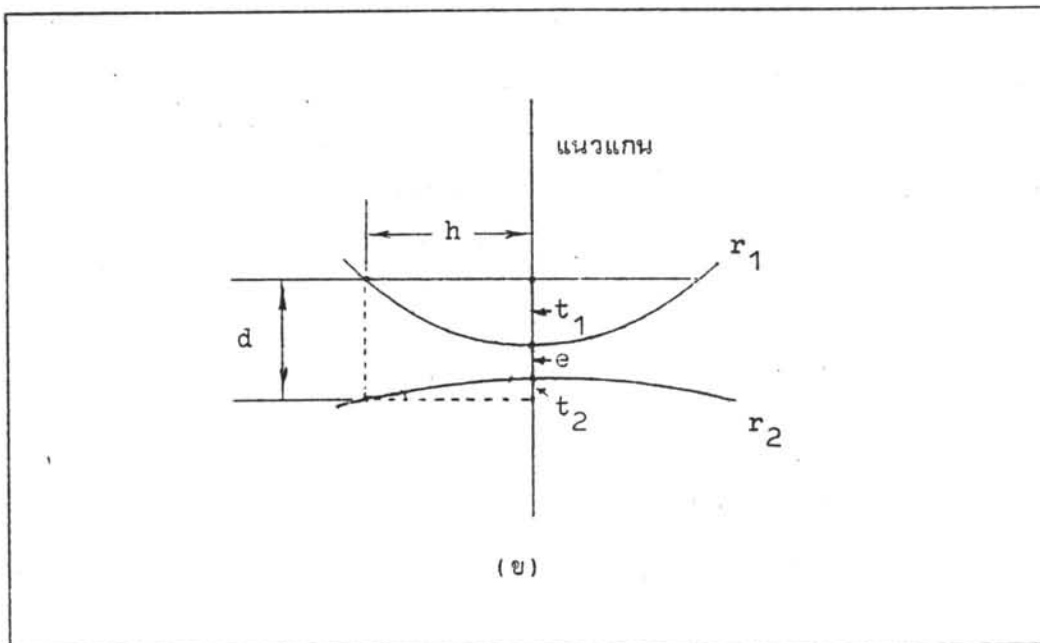
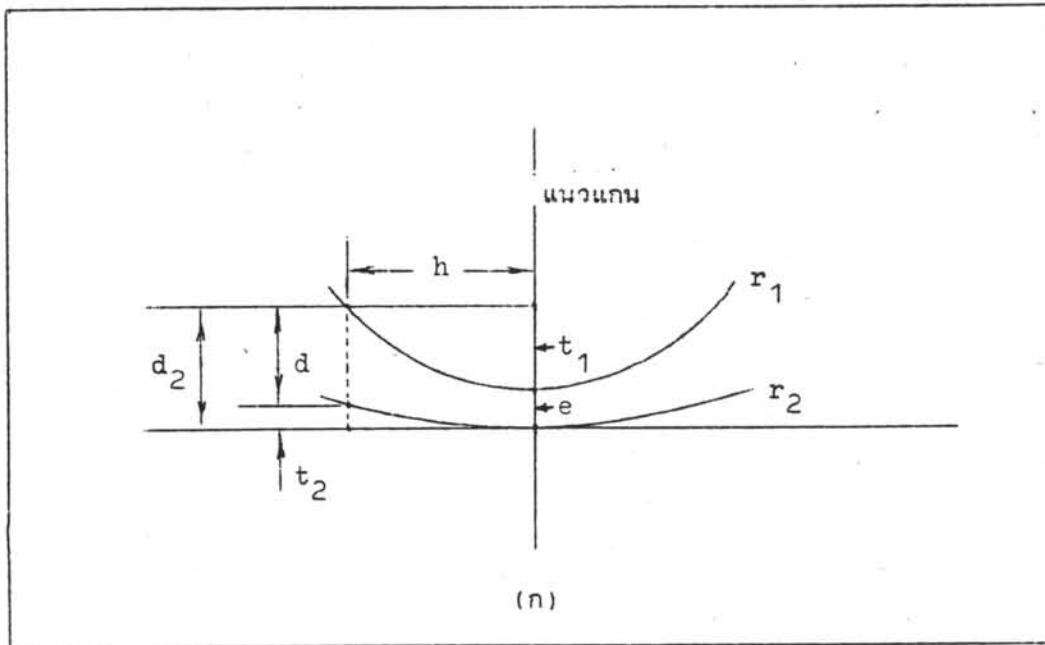
$$d = \frac{h^2}{2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + e \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

ในกรณีของรูปที่ 4.3 (ข) ก็เช่นเดียวกัน ความหนาของฟิล์ม คือ

$$d = t_1 + t_2 + e$$

แทนค่า t_1 และ t_2 เช่นสมการ (4.3) จะได้

$$d = \frac{h^2}{2} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) + e \quad \dots\dots\dots(4.4)$$



รูปที่ 4.3 การหาความหนาของฟิล์มบาง

อย่างไรก็ตาม สมการ (4.3) และ (4.4) เป็นสมการเดียวกัน โดยกำหนดเครื่องหมายของ r_1 และ r_2 ในทิศทางหนึ่งให้เป็นบวก ในทิศทางตรงกันข้ามจะเป็นลบ ดังนั้น จึงใช้สมการ

(4.3) หาความสัมพันธ์กับปรากฏการณ์ การแทรกสอดได้ โดยที่ทราบว่า ถ้าฟิล์มมีค่าดัชนีหักเห (n') อยู่ระหว่างค่าดัชนีหักเหของเลนส์ทั้งสองและผิวโค้งเบื้องล่าง ตำแหน่งวงมืดจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$2n'd \cos \theta_t = m\lambda \quad \dots\dots\dots(4.5)$$

- เมื่อ
- d เป็นความหนาของฟิล์ม
 - θ_t เป็นมุมหักเหที่ผิวแรกของฟิล์ม
 - m เป็นลำดับของวงมืด
- และ
- λ เป็นความยาวคลื่นแสงที่ใช้

แทนค่า d จากสมการ (4.3) ลงในสมการ (4.5) ได้ว่า

$$2n' \left\{ \frac{h^2}{2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + e \right\} \cos \theta_t = m\lambda \quad \dots\dots\dots(4.6)$$

โดยทั่วไป จะให้แสงตกตั้งฉาก (หรือเกือบตั้งฉาก) กับผิวแรกของเลนส์ทั้งสอง ดังนั้นมุมหักเห θ_t จะมีค่าน้อย ซึ่งได้ $\cos \theta_t = 1$ สมการ (4.6) เขียนเป็น

$$2n' \left\{ \frac{h^2}{2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + e \right\} = m\lambda \quad \dots\dots\dots(4.7)$$

เมื่อพิจารณาวงแหวนมืดที่ i และที่ j จากสมการ (4.7) จะเขียนได้ว่า

วงแหวนมืดที่ i ; $2n' \left\{ \frac{h_i^2}{2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + e \right\} = m_i \lambda \quad \dots\dots\dots(4.8)$

วงแหวนมืดที่ j ; $2n' \left\{ \frac{h_j^2}{2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + e \right\} = m_j \lambda \quad \dots\dots\dots(4.9)$

สมการที่ (4.8) ลบด้วยสมการ (4.9) จะได้

$$n' (h_i^2 - h_j^2) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = (m_i - m_j) \lambda \quad \dots\dots(4.10)$$

ในที่นี้ h_i และ h_j เป็นรัศมีของวงแหวนมืดที่ i และที่ j ตามลำดับ

ให้ D_i และ D_j เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนมืดที่ i และที่ j ตามลำดับ

$$(D_i = 2h_i ; D_j = 2h_j)$$

เขียนสมการ (4.10) ใหม่เป็น

$$\frac{n'}{4} (D_i^2 - D_j^2) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = (m_i - m_j) \lambda$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = \frac{4}{n'} \left(\frac{m_i - m_j}{D_i^2 - D_j^2} \right) \lambda$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = \frac{4}{n'} \left(\frac{\Delta m}{\Delta D^2} \right) \lambda \quad \dots\dots(4.11)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง m กับ D^2 โดยให้ D^2 เป็นแกนนอน และ m เป็นแกนตั้ง

ค่า $\Delta m / \Delta D^2$ คือ ความชัน (slope) ของกราฟเส้นตรง และสมการ (4.11) เขียนใหม่เป็น

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = \frac{4\lambda}{n'} (\text{slope}) \quad \dots\dots(4.12)$$

ดังนั้นถ้าทราบรัศมีความโค้ง r_2 , ความยาวคลื่นที่ใช้ λ และค่าดัชนีหักเหของฟิล์ม n'

ซึ่งค่าความชันหาได้จากกราฟ ก็สามารถคำนวณหาค่ารัศมีความโค้ง r_1 ได้โดยใช้สมการ (4.12)

1.1 การหารัศมีความโค้งของผิวและทางยาวโพทิล์ของเลนส์ประกอบสำหรับเลนส์

คอลลิเมเตอร์กำหนดเครื่องหมายของ r_1 และ r_2 จากสมการ (4.12) เป็นบวกเมื่อจุดศูนย์กลางของความโค้งอยู่เหนือผิวโค้ง เป็นลบเมื่อจุดศูนย์กลางของความโค้งอยู่ใต้ผิวโค้ง และเนื่องจากเลนส์คอลลิเมเตอร์เป็นเลนส์ออร์คซ์ชนิดคู่ประกบ ของเลนส์นูนกับเลนส์เว้า ในที่นี้จะได้กล่าวถึงการหารัศมีความโค้งของเลนส์ประกอบแต่ละอันต่อไป

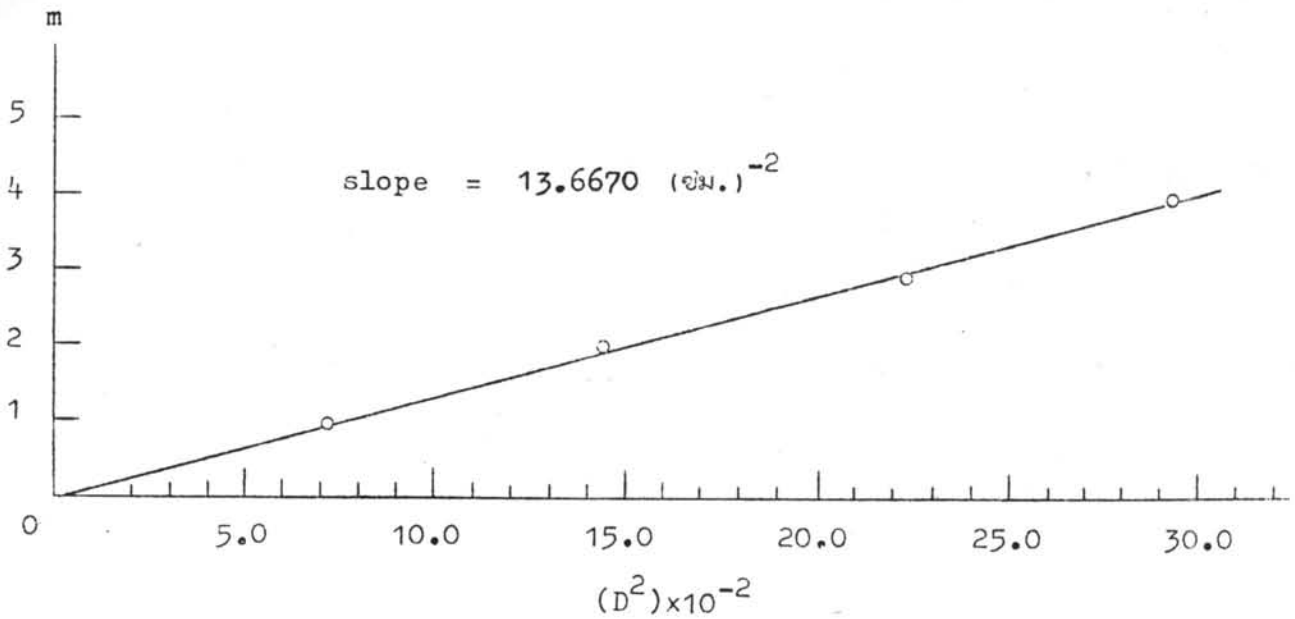
วางผิวที่ 1 ของเลนส์นูนบนผิวแก้วระนาบ ($r_2 = \infty$) วัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงมิตในลำดับที่ต่าง ๆ กัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบเลื่อน แล้วนำลำดับที่ (m) ของวงมิต กับกำลังสองของเส้นผ่าศูนย์กลางของวงมิต (D^2) ไปเขียนกราฟ จะได้กราฟเส้นตรง ดังรูปที่ 4.4 คำนวณความชันของเส้นตรงได้ 13.6670 (เซนติเมตร)⁻² ความยาวคลื่นของแสงเหลือง จากหลอดโซเดียมที่ใช่เป็น 589.300 นาโนเมตร และฟิล์มมีค่าดัชนีหักเห $n = 1.00000$ จากสมการ (4.12) จะได้

$$r_1 = + 310.415 \quad \text{เซนติเมตร}$$

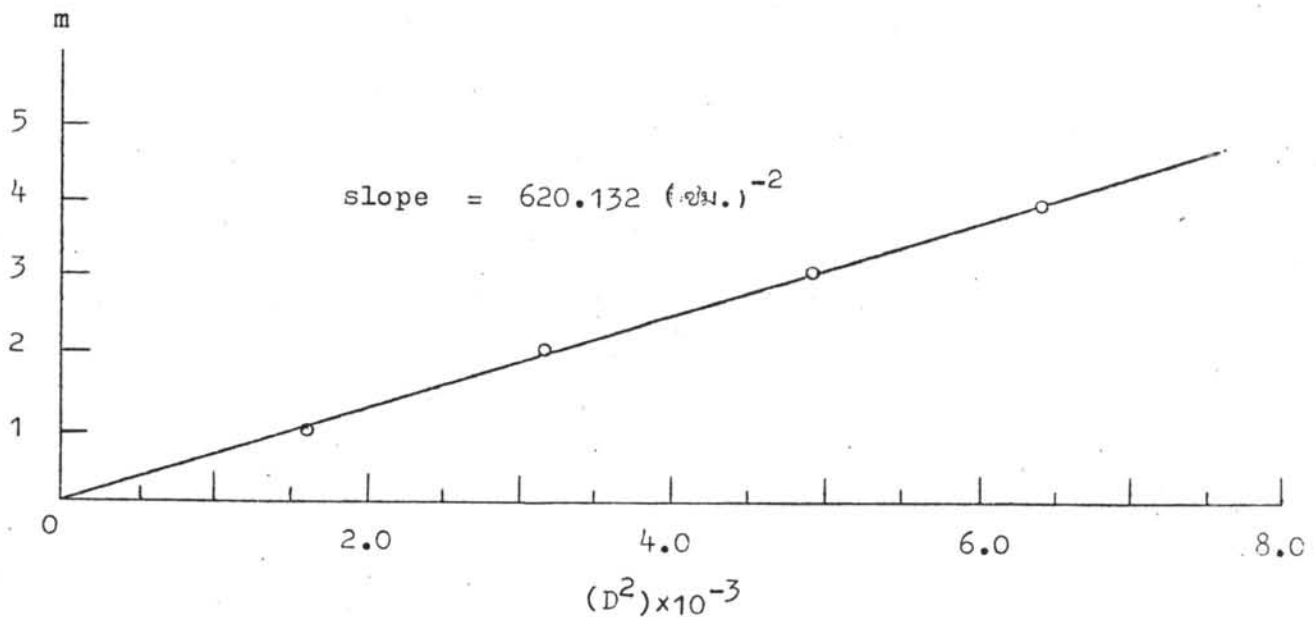
r_1 เป็นเครื่องหมายบวก แสดงว่า จุดศูนย์กลางความโค้งอยู่เหนือผิวโค้ง r_1 ผิวโค้ง r_1 จึงเป็นผิวนูนเข้าหาผิวระนาบที่รองรับ

สำหรับผิวโค้งที่เหลือ กระทำเช่นเดียวกับผิวที่ 1 ในกรณีผิวที่ 1 ของเลนส์เว้า ใช้ผิวโค้งที่ทราบค่า ด้วยการคำนวณโดยวิธีเดียวกันนี้เป็น $+6.53200$ เซนติเมตร ช่วยในการหารัศมีความโค้ง เมื่อนำค่า m กับ D^2 ไปเขียนกราฟของผิวที่ 2 ของเลนส์นูน ผิวที่ 1 และผิวที่ 2 ของเลนส์เว้าจะได้ดังรูปที่ 4.5 รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ

จากกราฟในรูปที่ 4.5 . คำนวณความชันของเส้นตรงได้ 620.132 (เซนติเมตร)⁻² รัศมีความโค้งของผิวล่างเป็นอนันต์ ความยาวคลื่น 589.300 นาโนเมตร จากสมการ (4.12) จะได้รัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์นูนเป็น $+6.84100$ เซนติเมตร ซึ่งมีเครื่องหมายบวก แสดงว่า จุดศูนย์กลางความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์นูน อยู่เหนือผิวระนาบที่รองรับ และโค้งนูน



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟการหารค่ามีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์นูนสำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์ ด้วยวิธีทดลองวงแหวนของนิวตัน ; D มีหน่วยเป็น เซนติเมตร



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟการหารค่ามีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์นูน สำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์ ด้วยวิธีทดลองวงแหวนของนิวตัน ; D มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

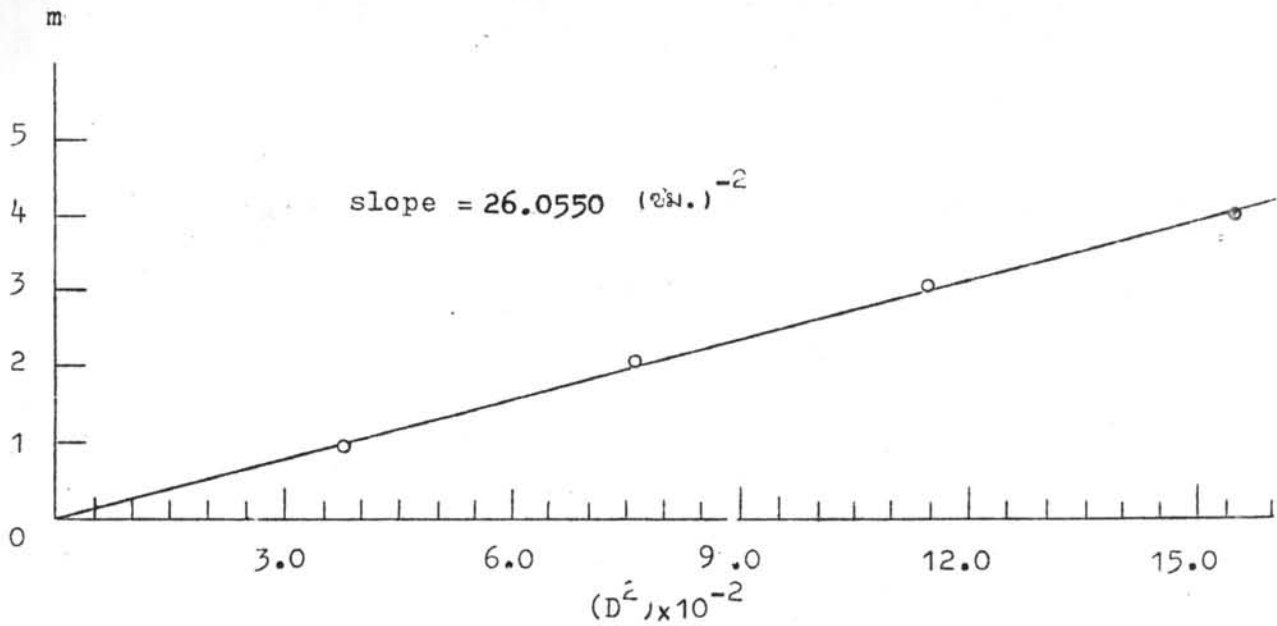
เข้าหาผิวระนาบนั้น

จากกราฟในรูปที่ 4.6 ค่าแนวความชันของเส้นตรงได้ 26.0550 (เซนติเมตร)⁻² รัศมีความโค้งของผิวล่างเป็นผิวที่ 1 ของเลนส์เว้า ซึ่งคำนวณโดยใช้สมการ (4.12) ได้เป็น +6.80500 เซนติเมตร โดยที่ผิวบนเป็นผิวพุ่มมีรัศมีความโค้งด้วยการคำนวณโดยวิธีเดียวกันนี้เป็น +6.53200 เซนติเมตร ความยาวคลื่นแสงที่ใช้เป็น 589.300 นาโนเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์เว้าเป็นบวก แสดงว่า จุดศูนย์กลางความโค้งอยู่เหนือจุดสัมผัสของผิวโค้ง ทั้งสองที่ใช้ในกรณีนี้

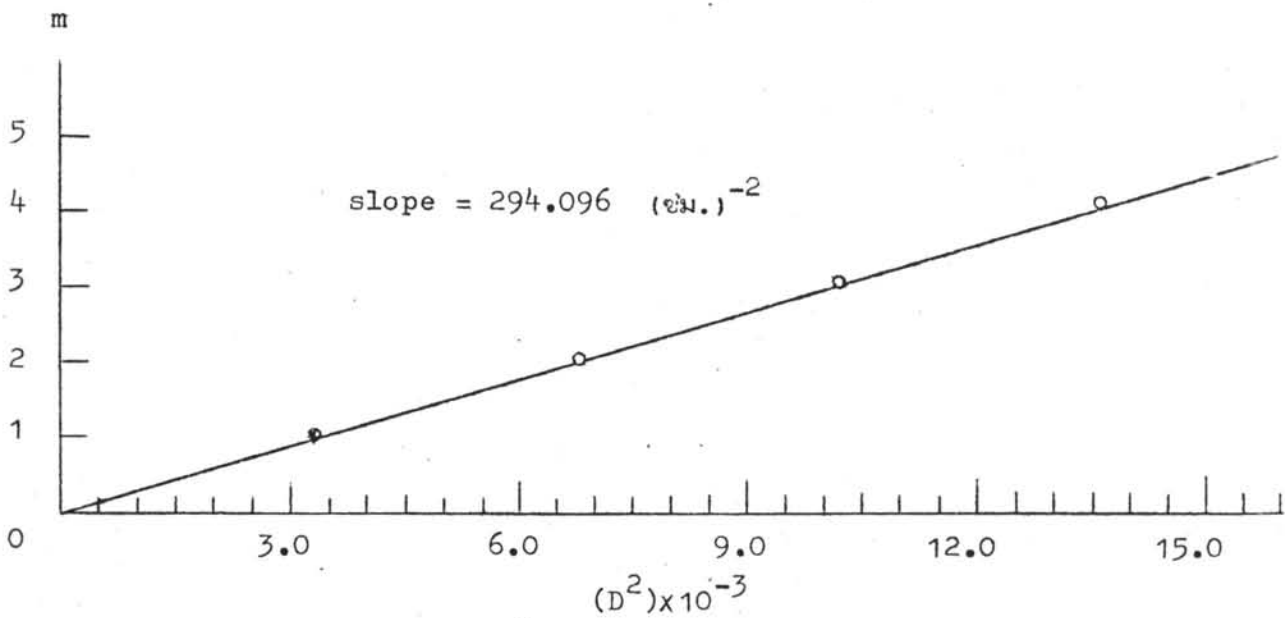
จากกราฟในรูปที่ 4.7 ค่าแนวความชันของเส้นตรงได้ 294.096 (เซนติเมตร)⁻² ผิวล่างเป็นระนาบ ความยาวคลื่นแสงที่ใช้เป็น 589.300 นาโนเมตร จากสมการ (4.12) ค่าแนวรัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์เว้าได้เป็น +14.4250 เซนติเมตร มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่า จุดศูนย์กลางความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์เว้าอยู่เหนือผิวระนาบ และผิวโค้งพุ่มเข้าหาผิวระนาบเบื้องล่าง

เมื่อทราบค่ารัศมีความโค้งของผิวเลนส์นูนและของผิวเลนส์เว้าแล้ว นำเลนส์ทั้งสองเชื่อมติดกันด้วยซีเมนต์ที่มีค่าดัชนีหักเห 1.55000 เลนส์คู่ประกบ ที่ได้มีรัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ผิวที่ 2 ผิวที่ 3 และผิวที่ 4 เป็น +310.415 เซนติเมตร, -6.84100 เซนติเมตร, -6.80500 เซนติเมตร และ -14.4250 เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 ประกบกันไม่สนิท สามารถคำนวณหาระยะระหว่างขั้วของผิวได้เป็น 1.65400×10^{-3} เซนติเมตร วัดความหนาของขอบเลนส์นูนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องตัดค่าเฉลี่ย 0.229000 เซนติเมตร และของขอบเลนส์เว้าได้ 0.327000 เซนติเมตร เมื่อเลนส์มีรัศมี 2.00000 เซนติเมตร ค่าแนวระยะระหว่างขั้วผิวที่ 1 และ 2 ได้เป็น 0.534000 เซนติเมตร และระหว่างขั้วผิวที่ 3 และ 4 เป็น 0.166000 เซนติเมตร ดังนั้นรูปร่างของเลนส์องค์ สำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์ที่สร้างขึ้น เป็นดังรูปที่ 4.8

ในการคำนวณหาตำแหน่งโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์คอลลิเมเตอร์นี้ อาจทำได้หาตำแหน่งวัตถุที่อยู่ด้านซ้ายของเลนส์ที่ทำให้เกิดภาพอยู่ทางด้านขวาของเลนส์ที่ระยะอนันต์ หรือหาตำแหน่งของภาพทางด้านซ้ายของเลนส์ที่เกิดจากวัตถุทางด้านขวาของเลนส์ และห่างจากเลนส์เป็นระยะอนันต์



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟการหารค่าความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์เว้า สำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์ ด้วยวิธีทดลองวงแหวนของนิวตัน ; D มีหน่วยเป็น เซนติเมตร



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟการหารค่าความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์เว้าสำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์ ด้วยวิธีทดลองวงแหวนของนิวตัน ; D มีหน่วยเป็น เซนติเมตร

ในที่นี้จะใช้วิธีหลัง คำนวณหาตำแหน่งโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์คอลลิเมเตอร์ เพื่อความสะดวกเรื่อง
เครื่องหมาย จะกลับผิวเลนส์ โดยให้ผิวที่ 1 , ผิวที่ 2 , ผิวที่ 3 , และผิวที่ 4 เป็นผิวที่
4 , ผิวที่ 3 , ผิวที่ 2 และผิวที่ 1 ตามลำดับ ดังนั้นรูปร่างของเลนส์ที่ใช้คำนวณหาตำแหน่ง
โฟกัสปฐมภูมิของเลนส์คอลลิเมเตอร์ เป็นดังรูปที่ 4.9 ใช้สมการ (2.29) ซึ่งเป็นสมการ
ของการหักเหที่ผิวทรงกลมเดี่ยวหรือเป็นสมการใกล้แกนหรือสมการเกาส์เซียน คือ

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n'-n}{r} \quad \dots\dots\dots(2.29)$$

คำนวณหาระยะภาพ ได้ดังนี้

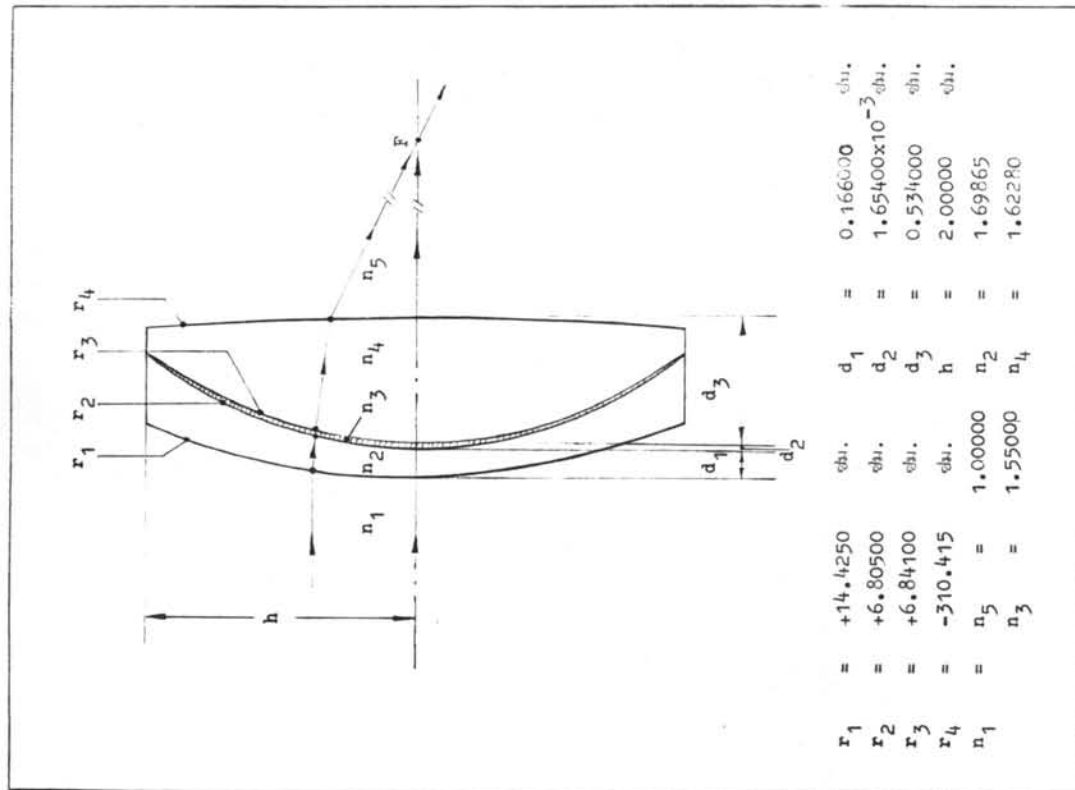
เมื่อรัศมีความโค้งของผิวที่ 1 เป็น +14.4250 เซนติเมตร ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าผิว
ที่ 1 เป็น 1.00000 ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางหลังผิวที่ 1 เป็น 1.69865 ระยะวัตถุของ
ผิวที่ 1 เป็นอนันต์ แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.29) จะได้ระยะภาพของผิวที่ 1 เป็น

$$l'_1 = + 35.0719 \quad \text{เซนติเมตร}$$

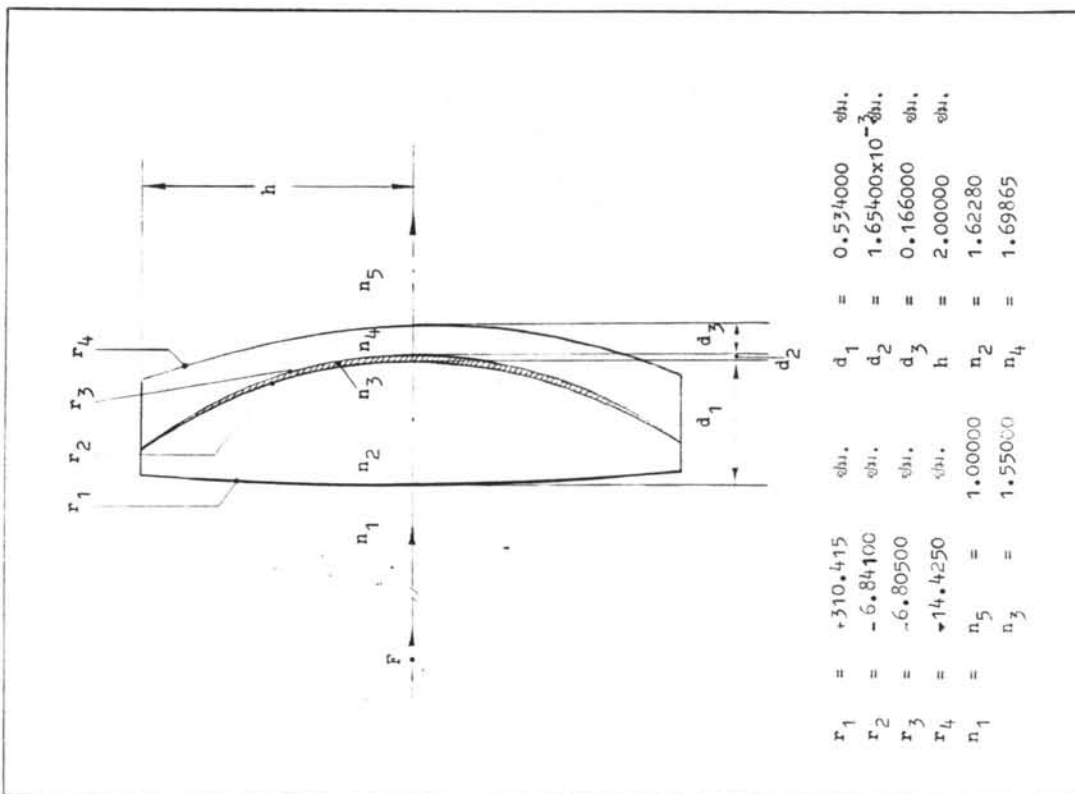
ระยะภาพของผิวที่ 1 มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่าจุดภาพอยู่หลังผิวที่ 1 เนื่องจากขั้วผิว
ที่ 1 และผิวที่ 2 ห่างกัน 0.166000 เซนติเมตร ดังนั้นระยะวัตถุของผิวที่ 2 คือ
+ 34.9059 เซนติเมตร เมื่อรัศมีความโค้งของผิวที่ 2 เป็น +6.80500 เซนติเมตร
ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าผิวที่ 2 เป็น 1.69865 ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางหลังผิวที่ 2
เป็น 1.55000 แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.29) จะได้ระยะภาพของผิวที่ 2 เป็น

$$l'_2 = + 57.7940 \quad \text{เซนติเมตร}$$

ระยะภาพของผิวที่ 2 มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่าจุดภาพอยู่หลังผิวที่ 2 เนื่องจากขั้ว
ผิวที่ 2 และผิวที่ 3 ห่างกัน 1.65460×10^{-3} เซนติเมตร ดังนั้น ระยะวัตถุของผิวที่
2 คือ + 57.7923 เซนติเมตร เมื่อทราบรัศมีความโค้งของผิวที่ 3 เป็น +6.84100
เซนติเมตร ค่าดัชนีหักเหหน้าผิวที่ 3 เป็น 1.55000



รูปที่ 4.9 รูปร่างของเลนส์คอสตินเนตอร์ที่นำมาจากทฤษฎีการหักเหของแสง



รูปที่ 4.8 รูปร่างของเลนส์คอสตินเนตอร์ที่นำมาจากทฤษฎีการหักเหของแสง

1.62280 แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.29) จะได้ระยะภาพของผิวที่ 3 เป็น

$$z'_3 = + 43.3187 \quad \text{เซนติเมตร}$$

ระยะภาพของผิวที่ 3 มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่าจุดภาพอยู่หลังผิวที่ 3 เนื่องจากขั้วผิวที่ 3 และผิวที่ 4 ห่างกัน 0.534000 เซนติเมตร ดังนั้นระยะวัตถุของผิวที่ 4 คือ + 42.7847 เซนติเมตร เมื่อทราบรัศมีความโค้งของผิวที่ 4 เป็น - 310.415 เซนติเมตร ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าผิวที่ 4 เป็น 1.62280 ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางหลังผิวที่ 4 เป็น 1.00000 แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.29) จะได้ระยะภาพของผิวที่ 4 เป็น

$$z'_4 = + 25.0402 \quad \text{เซนติเมตร}$$

ระยะภาพของผิวที่ 4 มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่า จุดภาพอยู่หลังผิวที่ 4 ถ้ากลุ่มการหักเหทางยาวโฟกัส (4.19) ในหัวข้อ ที่ 2 ของบทที่ 4 ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป คือ

$$f = z'_1 \left(\frac{z'_2}{z_2} \right) \left(\frac{z'_3}{z_3} \right) \left(\frac{z'_4}{z_4} \right) \dots \dots \dots (4.19)$$

แทนค่า z และ z' ต่าง ๆ ข้างต้นในสมการ (4.19) คำนวณทางยาวโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์คอลลิเมเตอร์ได้เป็น

$$f = + 25.4740 \quad \text{เซนติเมตร}$$

คือ ทางยาวโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์คอลลิเมเตอร์จากการทดสอบด้วยวิธีวงแหวนของนิวตันเมื่อกลับผิวเลนส์ให้เป็นดังรูปที่ 4.8 เป็น -25.4740 เซนติเมตร เครื่องหมายเป็นลบแสดงถึงตำแหน่งโฟกัสอยู่ด้านซ้ายของผิวที่ 1 ของเลนส์คอลลิเมเตอร์

1.2 การหารัศมีความโค้งของผิวและทางยาวโฟกัสของเลนส์ประกอบสำหรับเลนส์โทรทรรศน์
เลนส์โทรทรรศน์ เป็นเลนส์ออร์คัลชนิดคู่ประกอบ ซึ่งประกอบด้วยเลนส์นูน และเลนส์เว้า เป็น

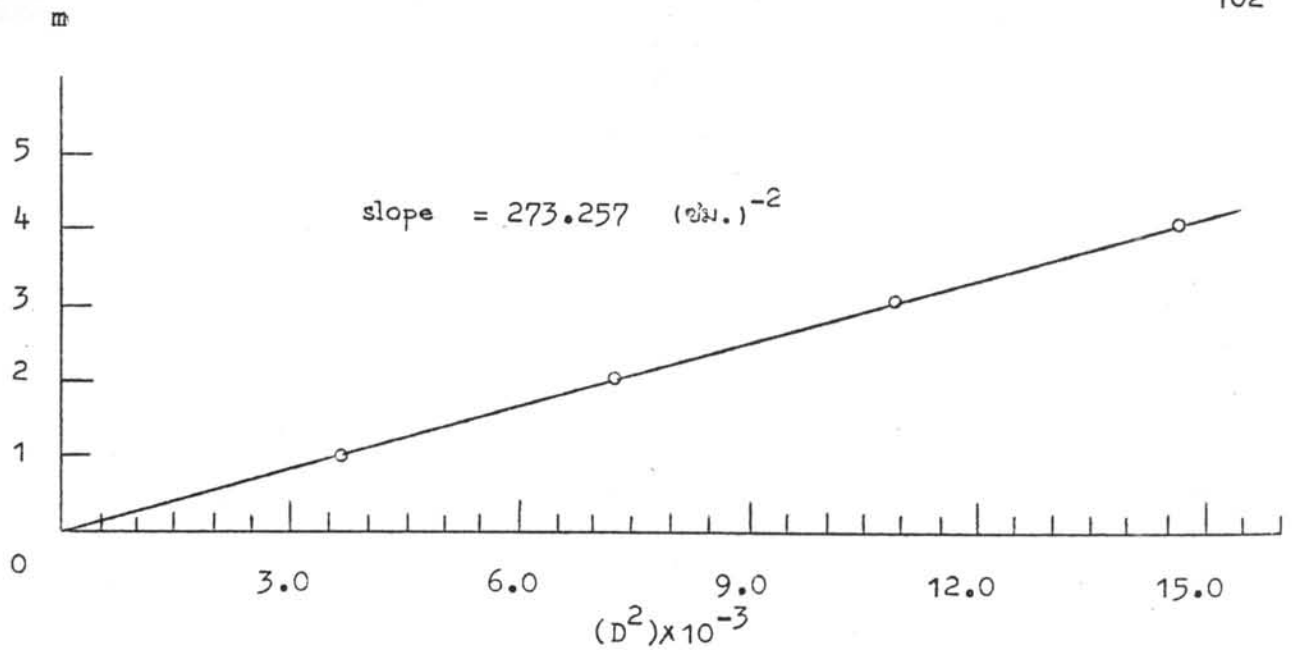
เดียวกับเลนส์คอลลิเมเตอร์ และการหารัศมีความโค้งของผิวเลนส์ประกอบสำหรับเลนส์โทรทรรศน์
กระทำเช่นเดียวกับ การหารัศมีความโค้งของเลนส์ประกอบสำหรับคอลลิเมเตอร์ กราฟระหว่าง m
กับ D^2 ของผิวที่ 1, ผิวที่ 2 ของเลนส์นูน ผิวที่ 1, ผิวที่ 2 ของเลนส์เว้า แสดงดังรูป
ที่ 4.10, รูปที่ 4.11, รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 ตามลำดับ

จากกราฟรูปที่ 4.10 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 273.257 (เซนติเมตร)⁻²
ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ 589.300 นาโนเมตร ผิวล่างเป็นผิวระนาบ จากสมการ (4.12) คำนวณ
หารัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์นูนได้เป็น +15.5250 เซนติเมตร มีเครื่องหมายเป็น
บวก แสดงว่าจุดศูนย์กลางความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์นูน อยู่เหนือผิวระนาบและโค้งนูนเข้าหา
ผิวระนาบนั้น

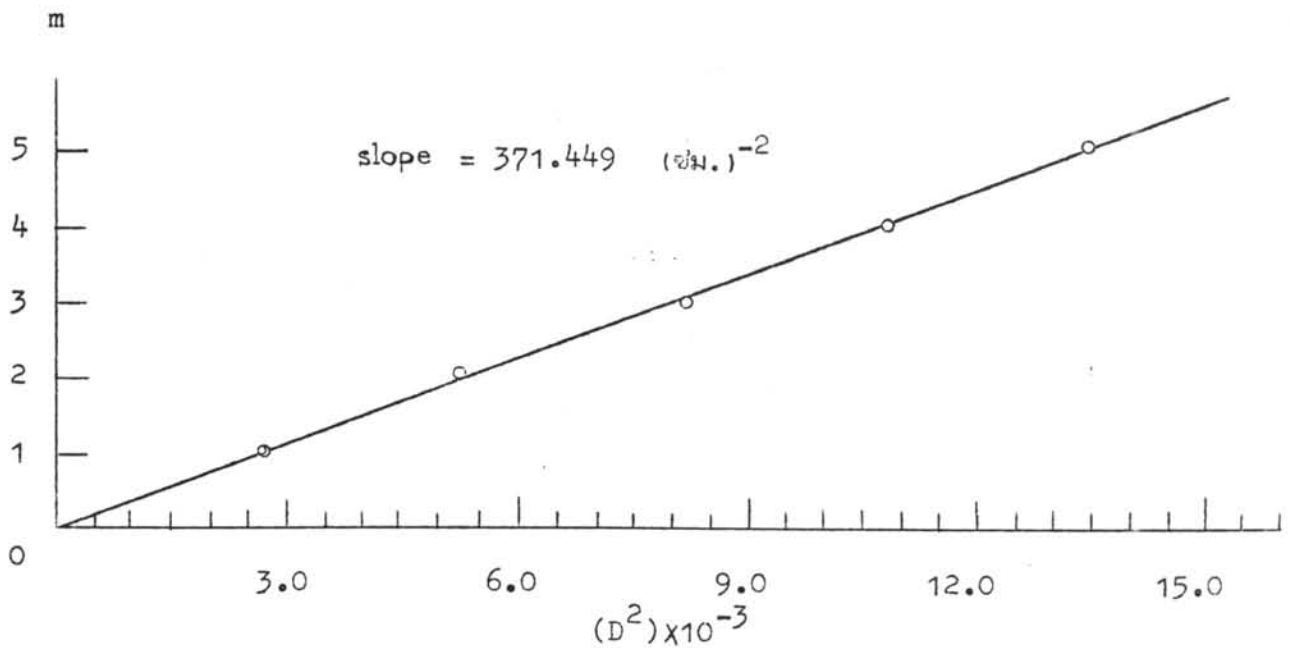
จากกราฟรูปที่ 4.11 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 371.449 (เซนติเมตร)⁻²
ความยาวคลื่นแสงที่ใช้เป็น 589.300 นาโนเมตร ผิวล่างเป็นผิวระนาบ จากสมการ (4.12)
คำนวณหารัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์นูนได้เป็น +11.4210 เซนติเมตร มีเครื่องหมาย
เป็นบวก แสดงว่าจุดศูนย์กลางความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์นูน อยู่เหนือผิวระนาบและโค้งนูนเข้า
หาผิวระนาบนั้น

จากกราฟรูปที่ 4.12 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 30.1620 (เซนติเมตร)⁻²
รัศมีของผิวล่างเป็นผิวที่ 1 ของเลนส์เว้า คำนวณจากสมการ (4.12) ได้เป็น +11.3950
เซนติเมตร โดยผิวบนเป็นผิวนูนทราบรัศมีความโค้งด้วยการคำนวณโดยวิธีเดียวกันนี้ เป็น +10.5410
เซนติเมตร ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ 589.300 นาโนเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 1
ของเลนส์เว้าเป็นบวก แสดงว่า จุดศูนย์กลางความโค้ง อยู่เหนือ จุดสัมผัสของผิวโค้งทั้งสองดังกล่าว

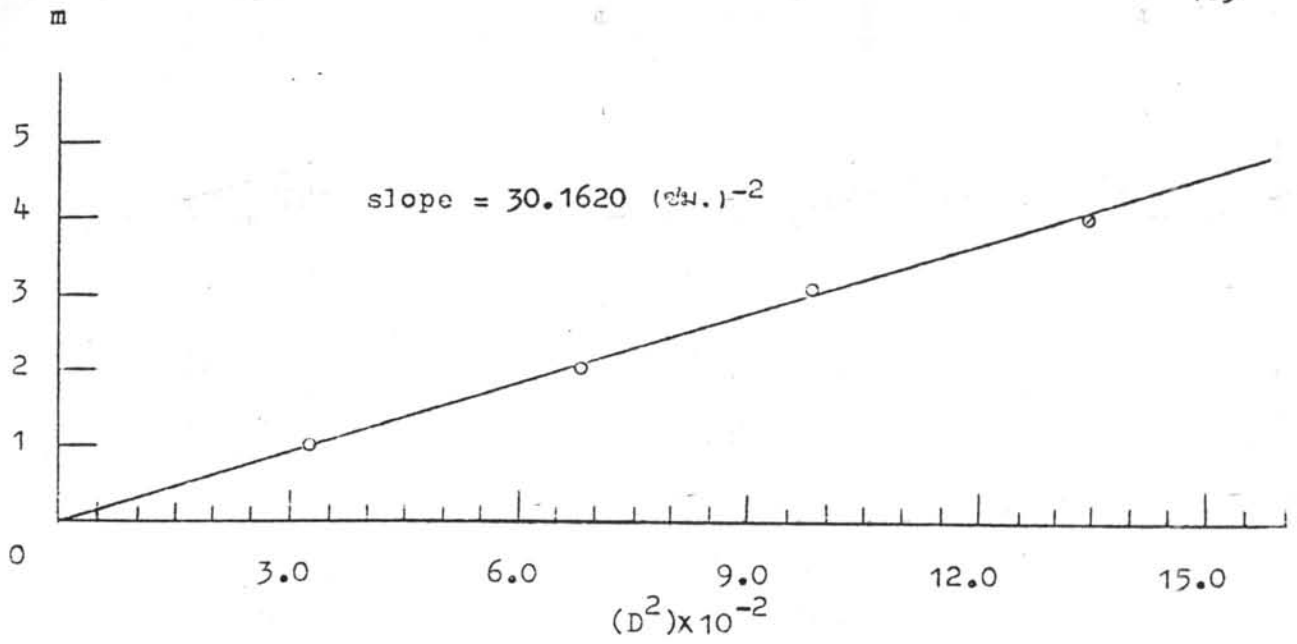
จากกราฟรูปที่ 4.13 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 50.2970 (เซนติเมตร)⁻²
ผิวล่างเป็นผิวระนาบ ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ 589.300 นาโนเมตร จากสมการ (4.12)
จะได้รัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์เว้าเป็น +84.3450 เซนติเมตร มีเครื่องหมายเป็น
บวก แสดงว่า จุดศูนย์กลางความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์เว้าอยู่เหนือผิวระนาบ และโค้งนูนเข้า
หาผิวระนาบนั้น



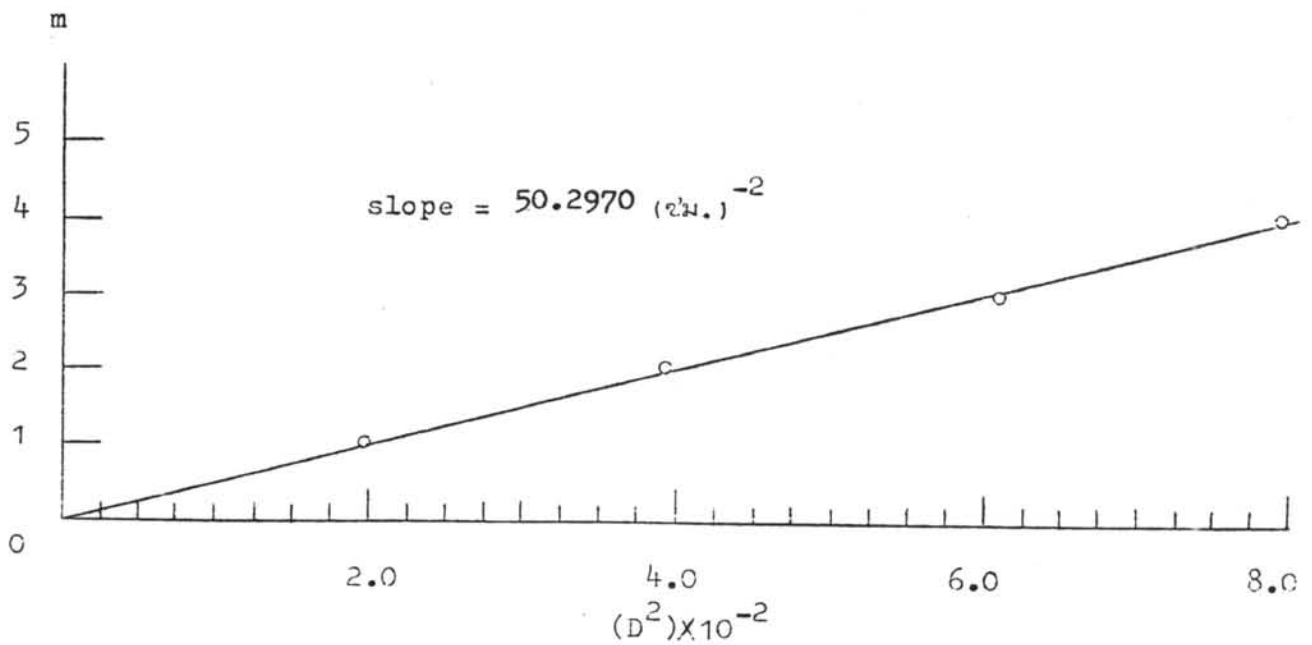
รูปที่ 4.10 แสดงกราฟการหารค่ามีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์นูนสำหรับเลนส์โทรทรรศน์ ด้วยวิธีทดลองวงแหวนของนิวตัน; D มีหน่วยเป็นเซนติเมตร



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟการหารค่ามีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์นูนสำหรับเลนส์โทรทรรศน์ ด้วยวิธีทดลองวงแหวนของนิวตัน ; D มีหน่วยเป็นเซนติเมตร



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟการหารค่าความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์เว้าสำหรับเลนส์โทรทรรศน์ ด้วยวิธีทดลองวงแหวนของนิวตัน; D มีหน่วยเป็นเซนติเมตร



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟการหารค่าความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์เว้าสำหรับเลนส์โทรทรรศน์ ด้วยวิธีทดลองวงแหวนของนิวตัน; D มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

เมื่อทราบรัศมีความโค้งของผิวเลนส์นูนและของผิวเลนส์เว้าแล้ว นำเลนส์ทั้งสองเชื่อมติดกันด้วยซีเมนต์ที่มีค่าดัชนีหักเห 1.55000 เลนส์คู่ประกบกันได้ มีรัศมีความโค้งของผิวที่ 1, ผิวที่ 2, ผิวที่ 3 และผิวที่ 4 เป็น $+15.5250$ เซนติเมตร, -11.4210 เซนติเมตร, -11.3950 เซนติเมตร และ -84.3450 เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 ประกบกันไม่สนิท สามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 ได้เป็น 4.08800×10^{-4} เซนติเมตร วัดความหนาของขอบเลนส์นูน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบเลื่อนได้ค่าเฉลี่ย 0.219000 เซนติเมตร และของขอบเลนส์เว้าได้ 0.307000 เซนติเมตร เมื่อเลนส์มีรัศมี 2.00000 เซนติเมตร คำนวณระยะห่างระหว่างผิวที่ 1 และ 2 ได้เป็น 0.525000 เซนติเมตร และระหว่างผิวที่ 3 และ 4 เป็น 0.154000 เซนติเมตร ดังนั้นรูปร่างของเลนส์องค์สำหรับเลนส์โทรทรรศน์ที่สร้างขึ้นเป็นดังรูปที่ 4.14

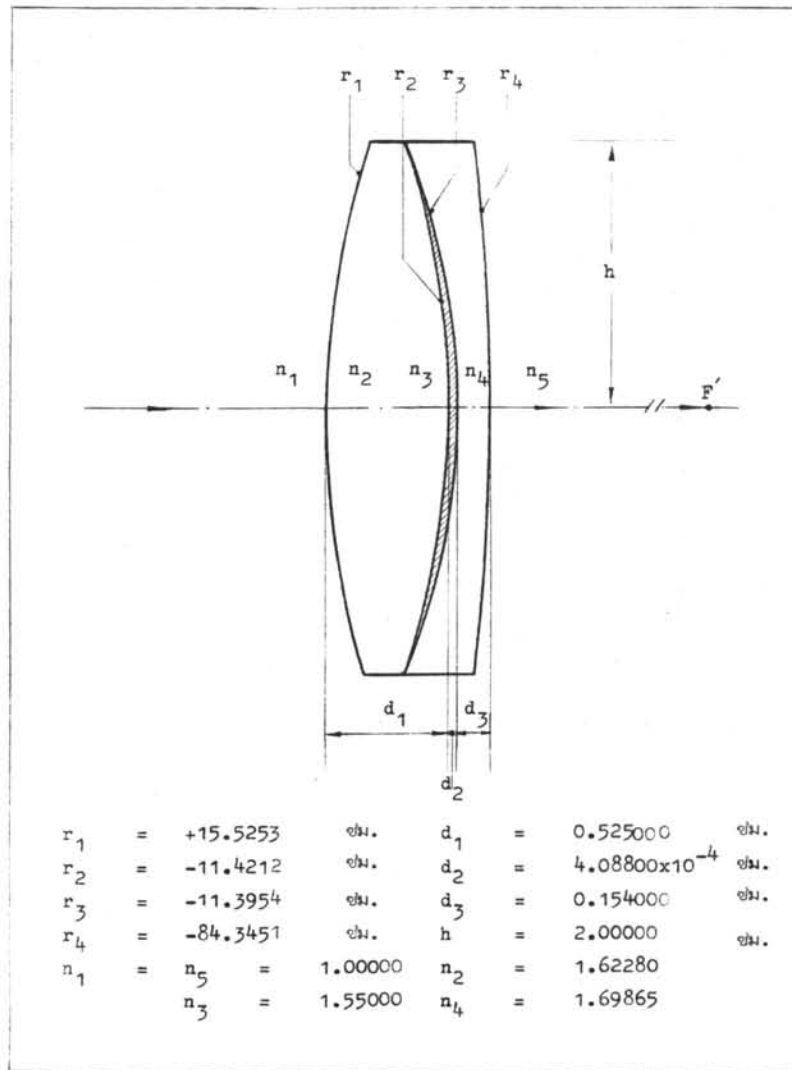
ในการคำนวณหาตำแหน่งโฟกัสหลักของเลนส์โทรทรรศน์ ทำโดยหาจุดภาพของวัตถุที่อยู่ด้านซ้ายและห่างจากเลนส์โทรทรรศน์เป็นระยะอนันต์ จากสมการ (2.29)

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \dots\dots\dots(2.29)$$

รูปร่างของเลนส์โทรทรรศน์ที่ใช้คำนวณหาตำแหน่งโฟกัสหลักเป็นเช่นเดียวกับรูปที่ 4.14 เมื่อรัศมีความโค้งของผิวที่ 1 เป็น $+15.5250$ เซนติเมตร ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 1 เป็น 1.00000 และ 1.62280 ตามลำดับ ระยะวัตถุของผิวที่ 1 เป็นอนันต์ แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.29) ได้ระยะภาพของผิวที่ 1 เป็น

$$l'_1 = +40.4527 \text{ เซนติเมตร}$$

ระยะภาพของผิวที่ 1 เป็นบวก แสดงว่า อยู่หลังผิวที่ 1 เนื่องจากผิวที่ 1 และผิวที่ 2 ห่างกัน 0.525000 เซนติเมตร ดังนั้นระยะวัตถุของผิวที่ 2 เป็น $+39.9277$ เซนติเมตร เมื่อรัศมีความโค้งของผิวที่ 2 เป็น -11.4210 เซนติเมตร ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 2 เป็น 1.62280 และ 1.55000 ตามลำดับ แทนค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.14 รูปร่างของเลนส์โทรทรรศน์จากการสร้าง

ในสมการ (2.29) จะได้ระยะภาพของผิวที่ 2 เป็น

$$l'_2 = + 32.9663 \quad \text{เซนติเมตร}$$

ระยะภาพของผิวที่ 2 มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่า อยู่หลังผิวที่ 2 เนื่องจากขั้วผิวที่ 2 และที่ 3 ห่างกัน 4.08800×10^{-4} เซนติเมตร ดังนั้นระยะวัตถุของผิวที่ 3 เป็น $+32.9659$ เซนติเมตร เนื่องจากรัศมีความโค้งของผิวที่ 3 เป็น -11.3950 เซนติเมตร ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 3 เป็น 1.55000 และ 1.69865 ตามลำดับ แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.29) จะได้ระยะภาพของผิวที่ 3 เป็น

$$l'_3 = + 49.9999 \quad \text{เซนติเมตร}$$

ระยะภาพของผิวที่ 3 มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่าอยู่หลังผิวที่ 3 เนื่องจากขั้วผิวที่ 3 และที่ 4 ห่างกัน 0.154000 เซนติเมตร ดังนั้นระยะวัตถุของผิวที่ 4 เป็น $+ 49.8459$ เซนติเมตร เมื่อทราบรัศมีความโค้งของผิวที่ 4 เป็น -84.3450 เซนติเมตร ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 4 เป็น 1.69865 และ 1.00000 ตามลำดับ แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.29) จะได้ระยะภาพของผิวที่ 4 เป็น

$$l'_4 = + 23.6064 \quad \text{เซนติเมตร}$$

ระยะภาพของผิวที่ 4 มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่าจุดภาพอยู่หลังผิวที่ 4 จากสมการ (4.19) คือ

$$f = \frac{l'_1}{l_1} \left(\frac{l'_2}{l_2} \right) \left(\frac{l'_3}{l_3} \right) \left(\frac{l'_4}{l_4} \right) \dots \dots \dots (4.19)$$

แทนค่า l และ l' ต่าง ๆ ย่างต้นในสมการ (4.19) คำนวณทางยาวโฟกัสสุดท้ายของเลนส์โทรทรรศน์ได้เป็น

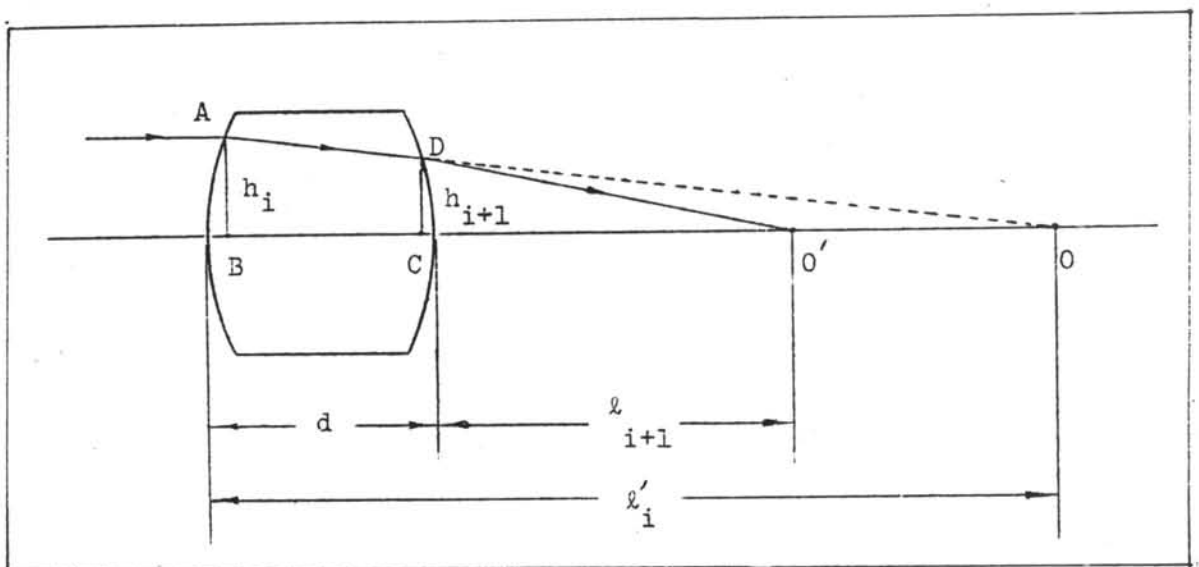
$$f = +23.9911 \quad \text{เซนติเมตร}$$

นี่คือ ทางยาวโฟกัสที่หาค่าได้ของเลนส์โทรทรรศน์ จากการทดลองด้วยวิธีวางแหวนของนิวตันเป็น $+23.9911$ เซนติเมตร เครื่องหมายเป็นบวก แสดงถึง ตำแหน่งโฟกัสอยู่ด้านขวาของผิวที่ 4 ของเลนส์โทรทรรศน์

2. การคำนวณหาตำแหน่งและทางยาวโฟกัสของเลนส์โดยการแกะรอยรังสี (7,13)

การแกะรอยรังสีสามารถคำนวณหาตำแหน่งของภาพได้ ไม่ว่าจะรังสีที่ใช้จะตกที่จุดใดของผิว และวิธีการได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4 ของบทที่ 2 ในหัวข้อนี้ จะพิจารณาให้เลนส์องค์ที่สร้างชิ้นทั้งเลนส์คอลลีเมเตอร์และเลนส์โทรทรรศน์เป็นเลนส์หนา เมื่อต้องการตำแหน่งของภาพเป็นตำแหน่งโฟกัส จะต้องแกะรอยรังสีใกล้แกนมุขยสำคัญ เมื่อทราบตำแหน่งของจุดโฟกัส ก็สามารถคำนวณหาทางยาวโฟกัส และหาตำแหน่งของจุดมุขยสำคัญได้อีกด้วย ถึงแม้ไม่ทราบตำแหน่งของจุดมุขยสำคัญ จะทราบทางยาวโฟกัสได้เช่นกัน เมื่อทราบระยะวัตถุและระยะภาพของแต่ละผิว หรือมี ฉะนั้นก็ต้องทราบมุมชันทางด้านภาพของผิวสุดท้าย

ระนาบมุขยสำคัญ เป็นระนาบที่เกิดจากแนวของ รังสีที่ขนานกับแกนมุขยสำคัญ ไปตัดกับแนวของรังสีที่ลากผ่านจุดโฟกัส ถ้าเป็นระนาบที่เกิดจากแนวของรังสีขนานตัดกับแนวของรังสีที่ลากผ่านจุดโฟกัสปฐมภูมิ เรียกว่า ระนาบปฐมภูมิ ถ้าเกิดจากแนวของรังสีขนานตัดกับแนวของรังสีที่ลากผ่านจุดโฟกัสทุติยภูมิ เรียกว่า ระนาบทุติยภูมิ จุดตัดของระนาบปฐมภูมิกับแกนมุขยสำคัญ เรียกว่า จุดมุขยสำคัญปฐมภูมิ และจุดตัดของระนาบทุติยภูมิกับแกนมุขยสำคัญ เรียกว่า จุด มุขยสำคัญทุติยภูมิ



รูปที่ 4.15 การหาทางยาวโฟกัสโดยการแกะรอยรังสี

พิจารณารูปที่ 4.15 ให้รังสีขนานตกบนผิวโค้งทรงกลม i สูงกว่าแกน h_i หักเหไปตกบนผิวโค้งทรงกลม $i + 1$ สูงกว่าแกน h_{i+1} เนื่องจากสามเหลี่ยม ABO คล้ายกับสามเหลี่ยม DCO ดังนั้นได้

$$\frac{h_i}{l'_i} = \frac{h_{i+1}}{l_{i+1}} \dots\dots\dots (4.13)$$

เมื่อรังสีผ่านผิวโค้งหลายผิว จากสมการ (4.13) เมื่อรังสีตกบนผิวที่ 1 และ ผิวที่ 2 จะได้

$$\frac{h_1}{l'_1} = \frac{h_2}{l_2} \dots\dots\dots(4.14)$$

เมื่อรังสีตกบนผิวที่ 2 และผิวที่ 3 จะได้

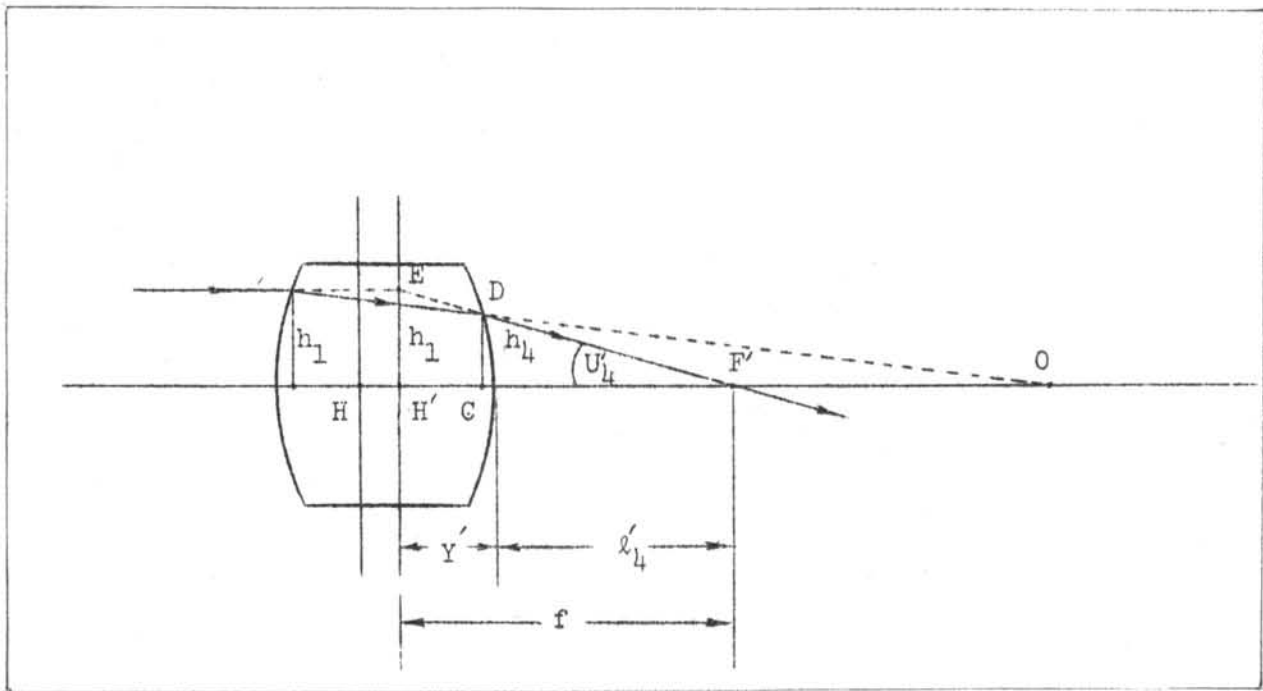
$$\frac{h_2}{l'_2} = \frac{h_3}{l_3} \dots\dots\dots(4.15)$$

และเมื่อรังสีตกบนผิวที่ 3 และผิวที่ 4 จะได้

$$\frac{h_3}{l'_3} = \frac{h_4}{l_4} \dots\dots\dots(4.16)$$

พิจารณารูปที่ 4.16 รังสีตกบนผิวโค้งทรงกลมที่ 4 สูงกว่าแกน h_4 ระยะเวลาเป็น l'_4 มุมขึ้นด้านภาพของผิวที่ 4 ซึ่งเป็นผิวสุดท้าย เป็น U'_4 H และ H' เป็นจุดมวบค่าศักย์ประมุข และจุดมวบค่าศักย์ทุติยภูมิตามลำดับ f เป็นทางยาวโฟกัส เนื่องจากสามเหลี่ยม EHF คล้ายกับสามเหลี่ยม DCF

จะได้
$$\frac{h_4}{f} = \frac{h_1}{l'_4} \dots\dots\dots(4.17)$$



รูปที่ 4.16 แสดงการหาทางยาวโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์หนา
H และ H' คือจุดมอยบสำคัญของเลนส์หนา

จากสมการ (4.14) ถึง (4.16) หาความสัมพันธ์ระหว่าง h_1 กับ h_4 ได้เป็น

$$h_4 = \left(\frac{l_2}{l_1'}\right)\left(\frac{l_3}{l_2'}\right)\left(\frac{l_4}{l_3'}\right) h_1 \dots\dots\dots(4.18)$$

เมื่อแทนสมการ (4.18) ในสมการ (4.17) จะได้ทางยาวโฟกัสเป็น

$$f = l_1' \left(\frac{l_2'}{l_2}\right)\left(\frac{l_3'}{l_3}\right)\left(\frac{l_4'}{l_4}\right) \dots\dots\dots(4.19)$$

ในกรณีทั่ว ๆ ไป จะเขียนสมการ (4.19) ได้เป็น

$$f = l_1' \left(\frac{l_2'}{l_2}\right)\left(\frac{l_3'}{l_3}\right) \dots\dots\dots(4.20)$$

สมการ (4.19) ใช้คำนวณหาทางยาวโฟกัสของเลนส์ที่มีผิวโค้งทรงกลม 4 ผิว เมื่อทราบระยะ
วัตถุ (l) และทราบระยะภาพ (l') ของแต่ละผิว ในกรณีที่ทราบมุมขนานภาพ (U)
เช่นในรูปที่ 4.16 ทางยาวโฟกัสสามารถคำนวณได้อีกวิธีหนึ่ง โดยพิจารณาสามเหลี่ยม $h_1 I_1 F$
จะได้ว่า

$$f = h_1 \cot U'_4 \quad \dots\dots\dots(4.21)$$

และตำแหน่งของจุดมูขยล้าคัญ หาได้เป็น

$$Y' = l'_4 - f \quad \dots\dots\dots(4.22)$$

ถ้า Y' เป็นลบ แสดงว่า อยู่หน้าผิวที่ 4 และถ้า Y เป็นบวกแสดงว่าอยู่หลังผิวที่ 4

นอกจากการแกะรอยรังสีจะสามารถหา ตำแหน่งโฟกัส ตำแหน่งของจุดมูขยล้าคัญ และ
ทางยาวโฟกัสได้แล้ว ยังหาความคลาดทรงกลมเชิงรังสีได้อีกโดยการแกะรอยรังสีที่ขอบและรังสี
ใกล้แกน ผลต่างของตำแหน่งภาพสุดท้ายที่ได้จากการแกะรอยรังสีทั้งสองนี้ เป็นความคลาดทรงกลม
เชิงรังสี ถ้าผลต่างดังกล่าวเป็นบวก แสดงว่าเป็นความคลาดทรงกลมเกิน ถ้าเป็นลบแสดงว่า
เป็นความคลาดทรงกลมขาด ซึ่งสมการที่ใช้ในการแกะรอยรังสี เป็นเช่นเดียวกับสมการต่าง ๆ
ในหัวข้อที่ 4 ของบทที่ 2 เมื่อให้รังสีตกกระทบผิวแรก เป็นรังสีขนาน สมการการแกะรอย
รังสีเป็นดังนี้

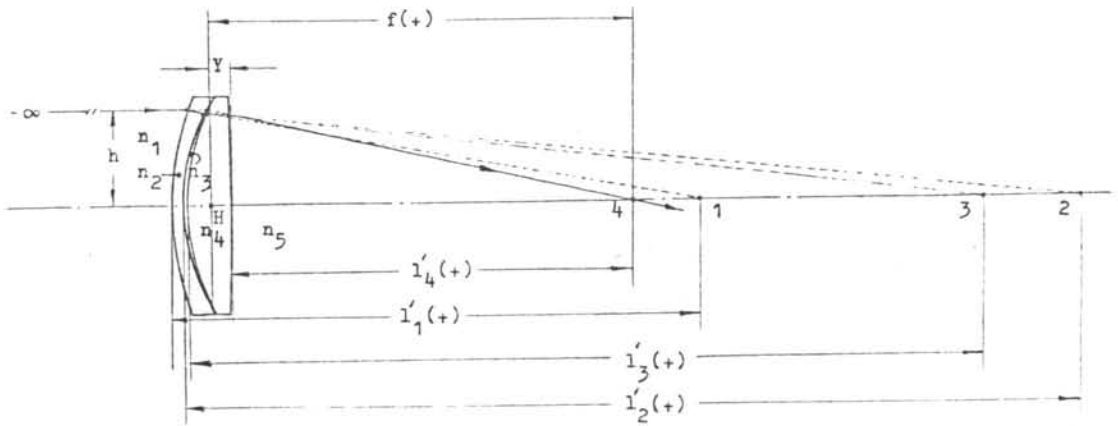
$$\sin I = h/r = \sin \theta$$

และใช้สมการ (2.23) ถึง (2.27) ดังนี้

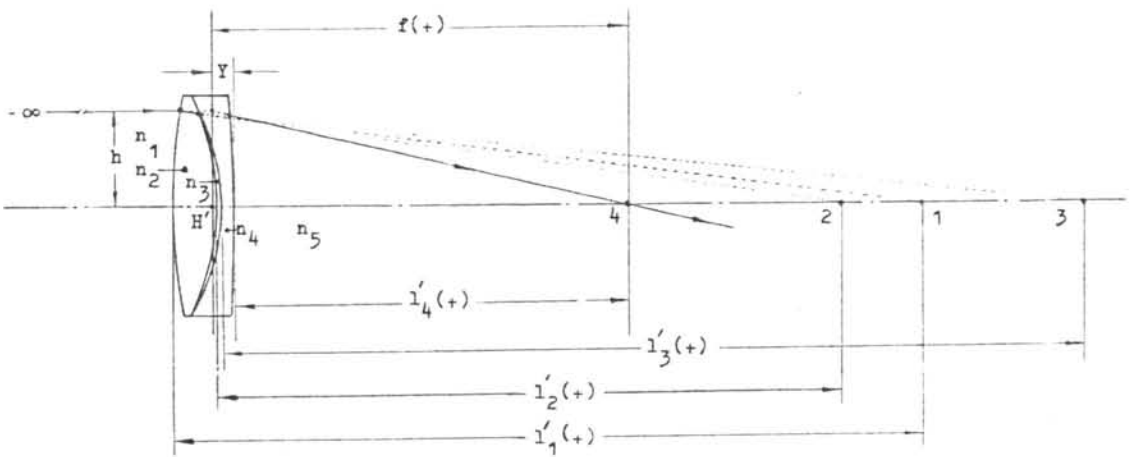
$$\sin I = \frac{(l - r) \sin U}{r}$$

$$U' = U + I - I'$$

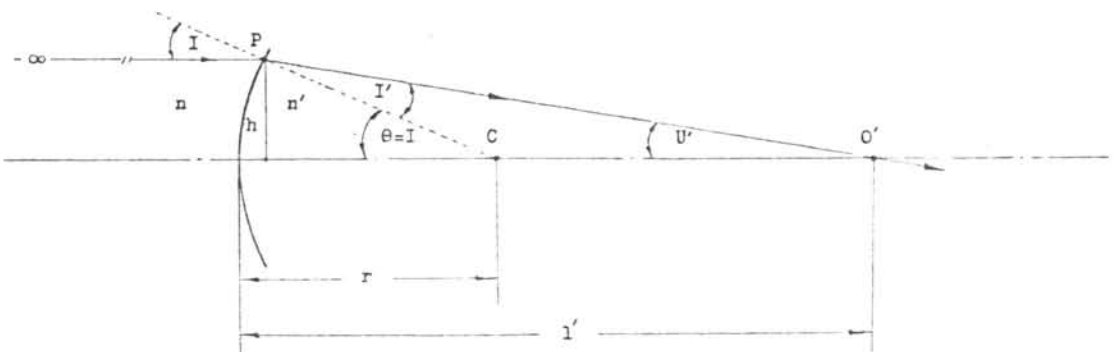
$$\sin I' = \frac{n}{n'} \sin I$$



(ก) การหาตำแหน่งและทางยาวโฟกัสโดยการแกะรอยรังสีสำหรับเลนส์คอลลิมเนเตอร์



(ข) การหาตำแหน่งและทางยาวโฟกัสโดยการแกะรอยรังสีสำหรับเลนส์โทรทรรศน์



รูปที่ 4.17 การหักเหที่ผิวทรงกลมเดี่ยวเมื่อรังสีตกกระทบเป็นรังสีขนาน

$$\text{และ} \quad \ell' - r = r \frac{\sin I'}{\sin U'}$$

2.1 การหาตำแหน่งและทางยาวโฟกัสของเลนส์คอลลิเมเตอร์ ในการคำนวณ

หาตำแหน่งโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์คอลลิเมเตอร์ กระทำเช่นเดียวกับการคำนวณโดยใช้สมการเกาส์เขียนในหัวข้อที่ 1.1 ของบทที่ 4 กล่าวคือ กลับผิวที่ 1 ให้เป็นผิวที่ 4 โดยแกะรอยรังสีขนานตกที่ขอบและรังสีไกล่แกนจากผิวที่ 4 ไปยังผิวที่ 1 จนได้ภาพ โดยรังสีตกกระทบผิวที่ 4 สูงกว่าแกน (h) 3 ค่า คือ ที่ $h = 2.0, 1.0$ และ 0.5 เซนติเมตร ตามลำดับ รูปร่างของเลนส์คอลลิเมเตอร์ที่ใช้หาตำแหน่งโฟกัสปฐมภูมิดังวิธีนี้ เป็นเช่นเดียวกับรูปที่ 4.9 ของหัวข้อที่ 1.1 ในบทที่ 4 แสดงผลที่ได้ดังตารางที่ 4.1 ตารางที่ 4.1 ผลจากการแกะรอยรังสีในโซนต่าง ๆ ของเลนส์คอลลิเมเตอร์

ความสัมพันธ์ และสมการ	ผิวที่ 1		
	$h = 2.00000$	$h = 1.00000$	$h = 0.500000$
U_1	0.00000°	0.00000°	0.00000°
$\sin I_1 = h/r_1$	0.138648	6.93240×10^{-2}	3.46620×10^{-2}
$\sin I'_1 = \frac{n_1}{n_2} \sin I_1$	8.16230×10^{-2}	4.08110×10^{-2}	2.04060×10^{-2}
I_1	7.96963°	3.97517°	1.98639°
I'_1	4.68184°	2.33896°	1.16924°
$U'_1 = U_1 + I_1 - I'_1$	3.28779°	1.63620°	0.817148°
$\sin U'_1$	5.73510×10^{-2}	2.85530×10^{-2}	1.42610×10^{-2}
$\ell'_1 - r_1 = r_1 \frac{\sin I'_1}{\sin U'_1}$	20.5297	20.6177	20.6397
ℓ'_1	34.9547	35.0427	35.0647

ความสูงพื้น และสมการ	ดาวที่ 2		
	h = 2.00000	h = 1.00000	h = 0.500000
$l_2 = l_1' - d_1$	34.7887	34.8767	34.8987
$l_2 - r_2$	27.9837	28.0717	28.0937
$(l_2 - r_2)/r_2$	4.11223	4.12516	4.12839
$U_2 = U_1'$	3.28779°	1.63620°	0.817148°
$\sin I_2 = \frac{(l_2 - r_2) \sin U_2}{r_2}$	0.235842	0.117787	5.88770x10 ⁻²
$\sin I_2' = \frac{n_2}{n_3} \sin I_2$	0.258459	0.129083	6.45230x10 ⁻²
I_2	13.6412°	6.76439°	3.37534°
I_2'	14.9786°	7.41659°	3.69947°
$U_2' = U_2 + I_2 - I_2'$	1.95035°	0.983991°	0.493012°
$\sin U_2'$	3.40330x10 ⁻²	1.71730x10 ⁻²	8.60457x10 ⁻³
$l_2' - r_2 = r_2 \frac{\sin I_2'}{\sin U_2'}$	51.6790	51.1505	51.0288
l_2'	57.4840	57.9555	57.8338
	ดาวที่ 3		
$l_3 = l_2' - d_2$	57.4824	57.9538	57.9912
$l_3 - r_3$	51.6414	51.1128	50.9911
$(l_3 - r_3)/r_3$	7.54881	7.47154	7.45375
$U_3 = U_2'$	1.95035°	0.983991°	0.493012°
$\sin I_3 = \frac{(l_3 - r_3) \sin U_3}{r_3}$	0.256912	0.128309	6.41360x10 ⁻²

ความถี่ และสมการ	ตัวที่ 3		
	h = 2.00000	h = 1.00000	h = 0.500000
$\sin I'_3 = \frac{n_3}{n_4} \sin I_3$	0.245387	0.122553	6.12590×10^{-2}
I_3	14.8869°	7.37189°	3.67726°
I'_3	14.2047°	7.03947°	3.51209°
$U'_3 = U_3 + I_3 - I'_3$	2.63257°	1.31641°	0.658188°
$\sin U'_3$	4.59310×10^{-2}	2.29740×10^{-2}	1.14870×10^{-2}
$\lambda'_3 - r_3 = r_3 \frac{\sin I'_3}{\sin U'_3}$	36.5482	36.4932	36.4815
λ'_3	43.3892	43.3342	43.3225
	ตัวที่ 4		
$\lambda_4 = \lambda'_3 - d_3$	42.8552	42.8002	42.7885
$\lambda_4 - r_4$	353.270	353.215	353.203
$(\lambda_4 - r_4)/r_4$	-1.13806	-1.13788	-1.13784
$U_4 = U'_3$	2.63257°	1.31641°	0.658188°
$\sin \bar{I}_4 = \frac{(\lambda_4 - r_4) \sin U_4}{r_4}$	-5.22720×10^{-2}	-2.61410×10^{-2}	-1.30710×10^{-2}
$\sin \bar{I}'_4 = \frac{n_4}{n_5} \sin \bar{I}_4$	-8.48270×10^{-2}	-4.24220×10^{-2}	-2.12110×10^{-2}
I_4	-2.99633°	-1.49796°	-0.748919°

ความสัมพันธ์ และสมการ	ฉากรที่ 4		
	$h = 2.00000$	$h = 1.00000$	$h = 0.500000$
I'_4	-4.86608°	-2.43134°	-1.21540°
$U'_4 = U_4 + I_4 - I'_4$	4.50232°	2.24979°	1.12467°
$\sin U'_4$	7.84990×10^{-2}	3.92560×10^{-2}	1.96280×10^{-2}
$l'_4 - r_4 = r_4 \frac{\sin I'_4}{\sin U'_4}$	335.436	335.449	335.454
l'_4	25.0215	25.0344	25.0387
$\delta l'$	- 0.0172000		
$f = h \cot U'_4$	+25.4689		
$f = l'_1 \left(\frac{l'_2}{l'_2}\right) \left(\frac{l'_3}{l'_3}\right) \left(\frac{l'_4}{l'_4}\right)$	+25.4724		
$Y' = l'_4 - f$	- 0.430200		

จากตารางที่ 4.1 ค่าความคลาดทรงกลมเชิงรังสี ($\delta l'$) เป็นผลต่างของตำแหน่งโฟกัส (l'_4) เมื่อรังสีตกที่ขอบ ($h = 2.0$ เซนติเมตร) กับเมื่อรังสีตกใกล้แกน ($h = 0.5$ เซนติเมตร) มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่า เลนส์คอลลิเมเตอร์มีความคลาดทรงกลมแก่ชัด และขนาดของความคลาดเชิงรังสีจากการแกะรอยรังสีเป็น 0.0172000 เซนติเมตร เมื่อกลับผิวเลนส์ให้เป็นดังรูปที่ 4.8 เลนส์คอลลิเมเตอร์จะมีทางยาวโฟกัสปฐมภูมิ - 25.4689 เซนติเมตร และจุดमुखยสำคัญปฐมภูมิห่างจากผิวที่ 1 + 0.430200 เซนติเมตร มีเครื่องหมายเป็นบวกแสดงถึงว่า อยู่หลังผิวที่ 1

2.2 การหาตำแหน่งและทางยาวโฟกัสของเลนส์โทรทรรศน์ ในการคำนวณ

หาตำแหน่งโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์โทรทรรศน์ กระทำเช่นเดียวกับการคำนวณ โดย ใช้สมการเกาส์เขียนของหัวข้อที่ 1.2 ในบทที่ 4 โดยแกะรอยรังสี ขนานตกที่ขอบและแกะรอยรังสีใกล้แกน จากผิวที่ 1 ไปยังผิวที่ 4 ให้รังสีตกกระทบผิวที่ 1 สูงกว่าแกน (h) 3 ค่า คือ ที่ $h = 2.0$, 1.0 และ 0.5 เซนติเมตร ตามลำดับ รูปร่างของเลนส์โทรทรรศน์ที่ใช้หาตำแหน่งโฟกัสทุติยภูมิด้วยวิธีนี้ เป็นเช่นเดียวกับรูปที่ 4.14 ของหัวข้อที่ 1.2 ในบทที่ 4 แสดงผลได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลจากการแกะรอยรังสีในโซนต่าง ๆ ของเลนส์โทรทรรศน์

ความสัมพันธ์ และสมการ	ผิวที่ 1		
	$h = 2.00000$	$h = 1.00000$	$h = 0.500000$
U_1	0.00000°	0.00000°	0.00000°
$\sin I_1 = h_1/r_1$	0.128224	6.44120×10^{-2}	3.22060×10^{-2}

ความสัมพันธ์ และสมการ	ฉวที่ 1		
	h = 2.00000	h = 1.00000	h = 0.500000
$\sin I'_1 = \frac{n_1}{n_2} \sin I_1$	7.93840×10^{-2}	3.96920×10^{-2}	1.98460×10^{-2}
I_1	7.40167°	3.69311°	1.84559°
I'_1	4.55316°	2.27478°	1.13717°
$U'_1 = U_1 + I_1 - I'_1$	2.84851°	1.41832°	0.708426°
$\sin U'_1$	4.96950×10^{-2}	2.47520×10^{-2}	1.23640×10^{-2}
$\ell'_1 - r_1 = r_1 \frac{\sin I'_1}{\sin U'_1}$	24.7998	24.8959	24.9198
ℓ'_1	40.3248	40.4209	40.4448
	ฉวที่ 2		
$\ell_2 = \ell'_1 - d_1$	39.7998	39.8959	39.9198
$\ell_2 - r_2$	51.2208	51.3169	51.3408
$(\ell_2 - r_2)/r_2$	-4.48479	-4.49320	-4.49529
$U_2 = U'_1$	2.84851°	1.41832°	0.708426°
$\sin I_2 = \frac{(\ell_2 - r_2) \sin U_2}{r_2}$	-0.222873	-0.111215	-0.055580
$\sin I'_2 = \frac{n_2}{n_3} \sin I_2$	-0.233341	-0.116439	-5.81900×10^{-2}
I_2	-12.8779°	-6.38537°	-3.18615°

ความสัมพันธ์ และสมการ	ตัวที่ 2		
	$h = 2.00000$	$h = 1.00000$	$h = 0.500000$
I_2'	-13.4939°	-6.68661°	-3.33596°
$U_2' = U_2 + I_2 - I_2'$	3.46451°	1.71957°	0.858238°
$\sin U_2'$	6.04300×10^{-2}	3.00080×10^{-2}	1.49790×10^{-2}
$l_2' - r_2 = r_2 \frac{\sin I_2'}{\sin U_2'}$	44.1002	44.3170	44.3698
l_2'	32.6792	32.8960	32.9488
	ตัวที่ 3		
$l_3 = l_2' - d_2$	32.6788	32.8956	32.9484
$l_3 - r_3$	44.0738	44.2906	44.3434
$(l_3 - r_3)/r_3$	-3.86782	-3.88684	-3.89148
$U_3 = U_2'$	3.46451°	1.71957°	0.858238°
$\sin I_3 = \frac{(l_3 - r_3) \sin U_3}{r_3}$	-0.233733	-0.116635	-5.82890×10^{-2}
$\sin I_3' = \frac{n_3}{n_4} \sin I_3$	-0.213279	-0.106428	-5.31880×10^{-2}
I_3	-13.5170°	-6.69793°	-3.34159°
I_3'	-12.3146°	-6.10945°	-3.04887°

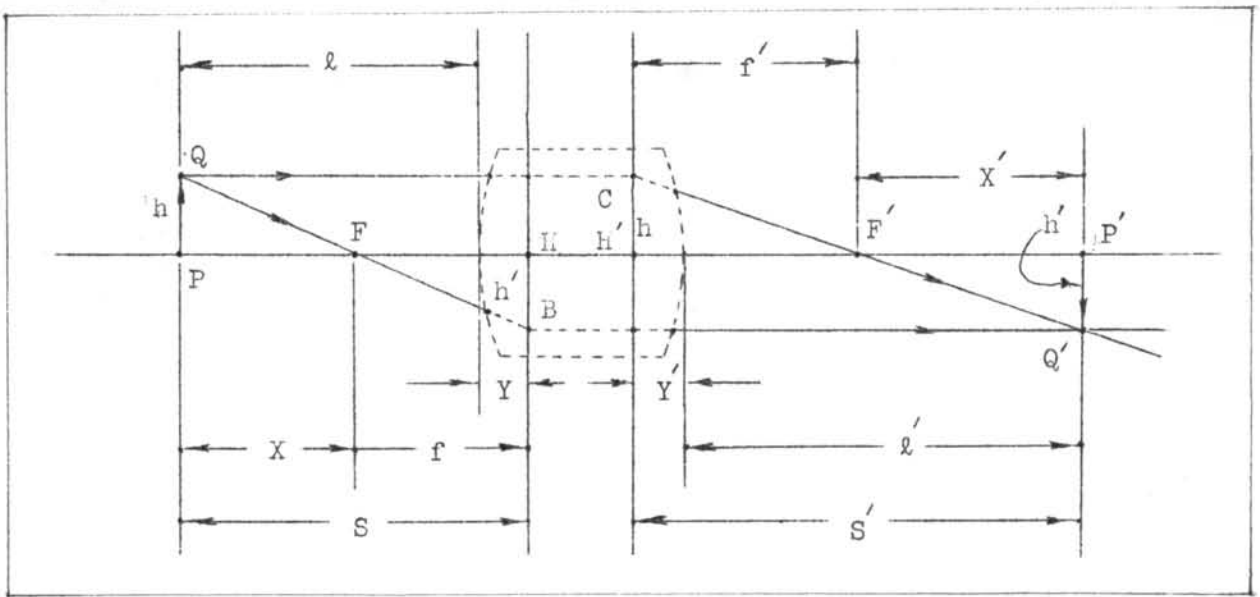
ความสัมพันธ์ และสมการ	ฉวที่ 3		
	h = 2.00000	h = 1.00000	h = 0.500000
$U'_3 = U_3 + I_3 - I'_3$	2.26214°	1.13109°	0.565524°
$\sin U'_3$	3.94710×10^{-2}	1.97390×10^{-2}	9.87009×10^{-3}
$\lambda'_3 - r_3 = r_3 \frac{\sin I'_3}{\sin U'_3}$	61.5715	61.4363	61.4051
λ'_3	50.1765	50.0413	50.0101
	ฉวที่ 4		
$\lambda_4 = \lambda'_3 - d_3$	50.0225	49.8873	49.8561
$\lambda_4 - r_4$	134.368	134.232	134.201
$(\lambda_4 - r_4)/r_4$	-1.59307	-1.59147	-1.59109
$U_4 = U'_3$	2.26214°	1.13109°	0.565524°
$\sin I_4 = \frac{(\lambda_4 - r_4) \sin U_4}{r_4}$	-6.28810×10^{-2}	-3.14150×10^{-2}	-1.57040×10^{-2}
$\sin I'_4 = \frac{n_4}{n_5} \sin I_4$	-0.106812	-5.33640×10^{-2}	-2.66760×10^{-2}
I_4	-3.60518°	-1.80027°	-0.899826°
I'_4	-6.13159°	-3.05897°	-1.52861°
$U'_4 = U_4 + I_4 - I'_4$	4.78855°	2.38979°	1.19431°
$\sin U'_4$	8.34790×10^{-2}	4.16980×10^{-2}	2.08430×10^{-2}
$\lambda'_4 - r_4 = r_4 \frac{\sin I'_4}{\sin U'_4}$	107.921	107.943	107.949

ความสูงหิ้ง และลุ่มการ	ผิวที่ 4		
	$h = 2.00000$	$h = 1.00000$	$h = 0.500000$
λ'_4	23.5758	23.5979	23.6043
$\delta \lambda'$	- 0.0284700		
$f = h \cot U'_4$	+ 23.9836		
$f = \lambda'_1 \left(\frac{\lambda'_2}{\lambda'_2}\right) \left(\frac{\lambda'_3}{\lambda'_3}\right) \left(\frac{\lambda'_4}{\lambda'_4}\right)$	+ 23.9889		
$Y' = \lambda'_4 - f$	- 0.379300		

จากตารางที่ 4.2 ค่าความคลาดทรงกลมเชิงรังสีเป็น -0.0284700 เซนติเมตร เป็นผลต่างของตำแหน่งโฟกัส (λ'_4) เมื่อรังสีตกที่ขอบ ($h = 2.0$ เซนติเมตร) กับ เมื่อรังสีตกใกล้แกน ($h = 0.5$ เซนติเมตร) มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่า เลนส์โทรทรรศน์ มีความคลาดทรงกลมแก้ขาด มีทางยาวโฟกัส $+ 23.9836$ เซนติเมตร และจุดมูขยสำคัญที่อยู่อยู่ห่างจากผิวที่ 4 เป็นระยะ -0.379300 มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงถึงว่าอยู่หน้าผิวที่ 4

3. การทดลองกำลังขยาย (8, 13)

วัตถุประสงค์ในการทดลองกำลังขยาย (magnification method) ในการทดลองนี้ เพื่อหาทางยาวโฟกัสของเลนส์ คอลลิเมเตอร์ และของเลนส์โทรทรรศน์ โดยพิจารณาการเกิดภาพของวัตถุในทางที่ค้นค่าสเตรเกิลเซียน กำลังขยายของเลนส์ขึ้นอยู่กับระยะวัตถุ ถ้าเปลี่ยนระยะวัตถุจะทำให้กำลังขยายเปลี่ยนไป หากความสัมพันธ์ระหว่าง ทางยาวโฟกัส, ระยะวัตถุ, ระยะภาพ และกำลังขยายโดยพิจารณารูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การเกิดภาพทางทัศนศาสตร์เกาส์เซียน

วัตถุสูง h วางห่างหน้าเลนส์เป็นระยะ l ทำให้เกิดภาพสูง h' ห่างจากหลังเลนส์เป็น l' กำลังขยายคือ

$$m = -\frac{h'}{h} \dots\dots\dots(4.23)$$

เนื่องจากสามเหลี่ยม PQF คล้ายกับสามเหลี่ยม FHB ได้

$$\frac{h'}{h} = \frac{f}{X} = \frac{f}{(s - f)} \dots\dots\dots(4.24)$$

และเนื่องจากสามเหลี่ยม P'Q'F' คล้ายกับสามเหลี่ยม F'H'C จะได้

$$\frac{h'}{h} = \frac{X'}{f'} = \frac{(s' - f')}{f'} \dots\dots\dots(4.25)$$

จากสมการ (4.23) กับ (4.24) ได้ว่า

$$f(1 - \frac{1}{m}) = s \dots\dots\dots(4.26)$$

และจากสมการ (4.23) กับ (4.25) ได้

$$f'(1 - m) = s' \dots\dots\dots(4.27)$$

เมื่อเลื่อนวัตถุให้ห่างจากหน้าเลนส์ S_i และ S_j กำลังขยายเปลี่ยนไปเป็น m_i และ m_j และระยะภาพเปลี่ยนไปเป็น S'_i และ S'_j ตามลำดับ

จากสมการ (4.26) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} f\left(1 - \frac{1}{m_i}\right) &= S_i \\ \text{และ} \quad f\left(1 - \frac{1}{m_j}\right) &= S_j \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} f\left(1 - \frac{1}{m_i}\right) &= S_i \\ f\left(1 - \frac{1}{m_j}\right) &= S_j \end{aligned}} \right\} \dots\dots\dots(4.28)$$

เช่นเดียวกัน สมการ (4.27) จะเป็น

$$\begin{aligned} f'(1 - m_i) &= S'_i \\ f'(1 - m_j) &= S'_j \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} f'(1 - m_i) &= S'_i \\ f'(1 - m_j) &= S'_j \end{aligned}} \right\} \dots\dots\dots(4.29)$$

ดังนั้นผลต่างในสมการ (4.28) คือ

$$\begin{aligned} -f\left(\frac{1}{m_i} - \frac{1}{m_j}\right) &= S_i - S_j \\ \text{หรือ} \quad -f &= \frac{S_i - S_j}{1/m_i - 1/m_j} \\ \text{หรือ} \quad f &= -\frac{\Delta S}{\Delta(1/m)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(4.30)$$

และเช่นกันผลต่างในสมการ (4.29) จะให้ผลลัพธ์เป็น

$$\begin{aligned} -f' &= \frac{S'_i - S'_j}{m_i - m_j} \\ \text{หรือ} \quad f' &= -\frac{\Delta S'}{\Delta m} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(4.31)$$

ลุ่มการ (4.30) ใช้หาทางยาวโฟกัสปฐมภูมิ และลุ่มการ (4.31) ใช้หาทางยาวโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์ได้

3.1 การหาทางยาวโฟกัสของเลนส์คอลลิเมเตอร์โดยการทดลองกำลังขยาย ในภาว

ทดลองนี้ จะหาเฉพาะทางยาวโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์คอลลิเมเตอร์ โดยวางวัตถุที่เป็นล่เกล ไว้หน้าเลนส์คอลลิเมเตอร์ที่มีรูปร่างเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 2.1 ของบทที่ 4 คือ กสับผิวที่ 4 เป็นผิวที่ 1 และเรียงไปตามลำดับ วัตถุความสูงของภาพ (h) โดยให้วัตถุตั้งคงที่ ($h = 1.0$ เซนติเมตร) ด้วยเลนส์ใกล้ตาที่มีล่เกลหลาย ๆ ค่า เมื่อวัตถุห่างจากเลนส์ในระยะต่าง ๆ วัตถุระยะภาพที่ล่อดคล้องกัน อุปกรณ์การทดลองทั้งหมดอยู่บนรางเลื่อน (bench) และอาศัยผลจากหัวข้อที่ 2.1 ของบทที่ 4 ได้ระยะ Y' เป็น -0.43 เซนติเมตร เครื่องหมายลบแสดงถึงอยู่หน้าผิวสุดท้าย การทดลองได้ผลดังตารางที่ 4.3 ได้ทางยาวโฟกัสเฉลี่ย (\bar{f}) เป็น $+25.691$ เซนติเมตร เมื่อกสับเลนส์ให้อยู่ในล่ภาพที่ใช้งานจริง ๆ ทางยาวโฟกัสที่ได้นี้จะอยู่ทางด้านซ้ายของเลนส์ แสดงว่า ทางยาวโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์คอลลิเมเตอร์เป็น -25.691 เซนติเมตร

3.2 การหาทางยาวโฟกัสของเลนส์โทรทรรศน์โดยการทดลองกำลังขยาย ในกรณี

ของเลนส์โทรทรรศน์จะหาทางยาวโฟกัส ทุติยภูมิ การทดลองกระทำเช่นเดียวกับของเลนส์คอลลิเมเตอร์ รูปร่างของเลนส์เป็นเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 2.2 ของบทที่ 4 และอาศัยผลจากหัวข้อที่ 2.2 ของบทที่ 4 ได้ระยะ Y' เป็น -0.38 เซนติเมตร เครื่องหมายลบแสดงถึงอยู่หน้าผิวสุดท้าย การทดลองได้ผลดังตารางที่ 4.4 ได้ทางยาวโฟกัสเฉลี่ย (\bar{f}) เป็น $+24.273$ เซนติเมตร นั่นคือ ทางยาวโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์โทรทรรศน์ จากการทดลองกำลังขยายเป็น $+24.273$ เซนติเมตร

4. การทดลองด้วยดาว (8, 10)

การทดลองด้วยดาว (star test) ต้นกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลองจะต้องมีขนาดเล็กมากจนเป็น

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองหาทางยาวโฟกัสของเลนส์คอนเวกซ์
ด้วยการทดลองกำลังขยาย

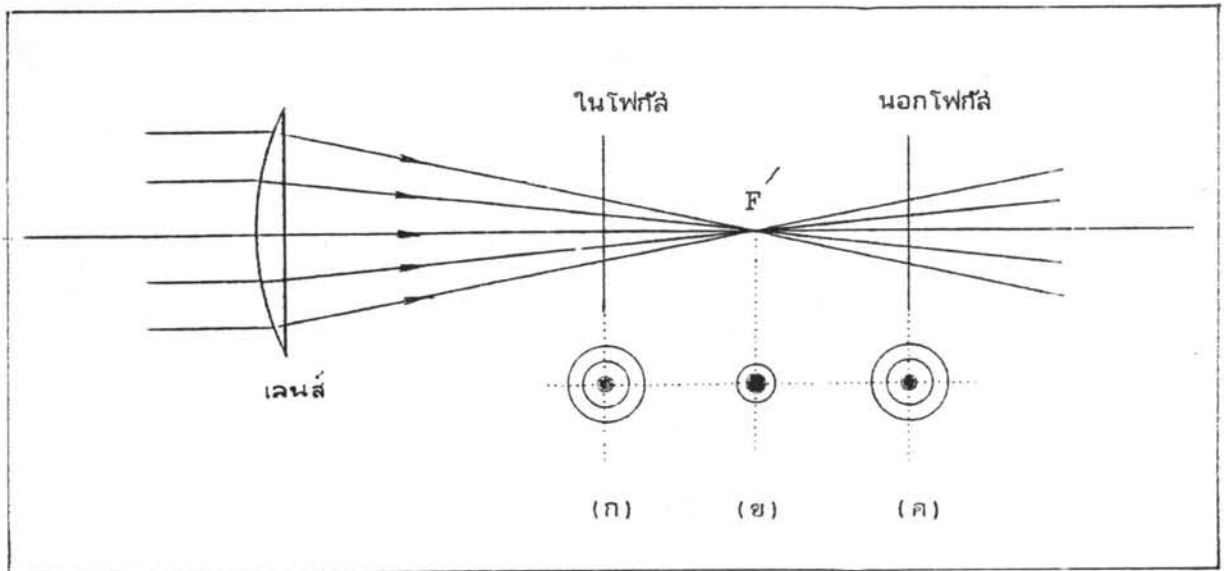
$h = 1.00$ ซม. ; $Y' = -0.43$ ซม.			
$\Delta S'$	Δm	$f' = -\Delta S' / \Delta m$	\bar{f}'
14.150	-0.550	25.727	+25.691
9.900	-0.381	25.984	
7.040	-0.278	25.324	
5.400	-0.212	25.472	
4.050	-0.151	26.821	
2.950	-0.112	26.339	
2.180	-0.081	26.914	
1.360	-0.054	25.185	
0.900	-0.033	27.273	
0.350	-0.016	21.875	
0.000	0.000	-	

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองหาทางยาวโฟกัสของเลนส์โทรทัศน
ด้วยการทดลองกำลังขยาย

$h = 1.00$ ซม. ; $Y' = -0.38$ ซม.			
$\Delta S'$	Δm	$f' = -\Delta S' / \Delta m$	\bar{f}'
12.160	-0.493	24.665	+24.273
8.750	-0.358	24.441	
6.460	-0.274	23.577	
4.910	-0.204	24.069	
3.250	-0.137	23.723	
2.400	-0.105	22.857	
1.730	-0.072	24.028	
1.170	-0.048	24.375	
0.770	-0.031	24.839	
0.340	-0.013	26.154	
0.000	0.000	-	

จุด เช่นดาวจริง ๆ หรือดาวประดิษฐ์ก็ได้ ในการทดลองนี้ใช้ต้นกำเนิดแสงเป็นรูเข็มที่สว่างระยะจากรูเข็มถึงเลนส์ประมาณ 40 เท่าของทางยาวโฟกัสของเลนส์ เมื่อมองผ่านเลนส์จะไม่เห็นขอบของรูเข็ม หรือ มุมที่เลนส์รับรูเข็ม (θ) จะตํ่ากว่าก่าสังแยกของเลนส์ ($\theta < 1.22\lambda/D$ เมื่อ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์) จากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของคลื่นแสง ภาพที่ได้จากเลนส์ที่ไม่มี ความคลาดจะเป็นจานกลมของแอรีย์ (Airy disc) แทนที่จะเป็นจุด การทดลองด้วยดาวมักใช้กับ เครื่องมือที่ให้ภาพขนาดเล็ก เช่น เลนส์ใกล้วัตถุของกล้องโทรทรรศน์ และของกล้องจุลทรรศน์ เป็นต้น ในกรณีที่เลนส์มีความคลาด ภาพจานกลมของแอรีย์ จะบิดเบือนไปซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของความคลาดนั้นๆ พิจารณาภาพของดาวจากเลนส์ที่มีความคลาดทรงกลม แบ่งออกได้ 3 ลักษณะ ดังนี้

1. ภาพของดาวจากเลนส์ที่ล้มบุรณ ไม่มี ความคลาดทรงกลม

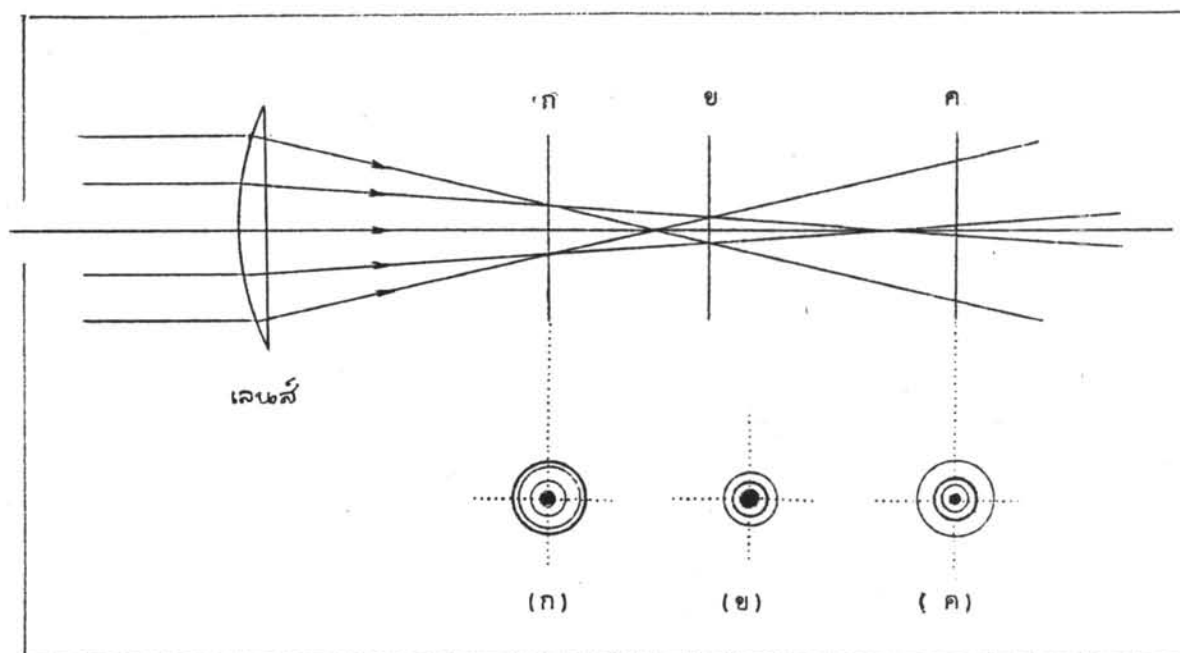


รูปที่ 4.19 ภาพของดาวจากเลนส์ที่ล้มบุรณบริเวณที่แลเงา คือ บริเวณสว่าง

รังสีจากทุก ๆ โชนของเลนส์จะไปตัดกันที่จุดโฟกัส (F') ภาพของดาวที่ตำแหน่งในระยะ โฟกัส , จุดโฟกัส และ นอกกระยะโฟกัส แสดงดังรูปที่ 4.19 (ก) , รูปที่ 4.19 (ข) และรูป ที่ 4.19 (ค) ตามลำดับ ถ้าตำแหน่งในระยะโฟกัส และ นอกกระยะโฟกัสห่างจากจุดโฟกัสเท่ากัน

รูปที่ 4.19 (ก) และรูปที่ 4.19 (ค) จะไม่แตกต่างกัน

2. ภาพของดาวจากเลนส์ที่มีความคลาดทรงกลมแก้ไข

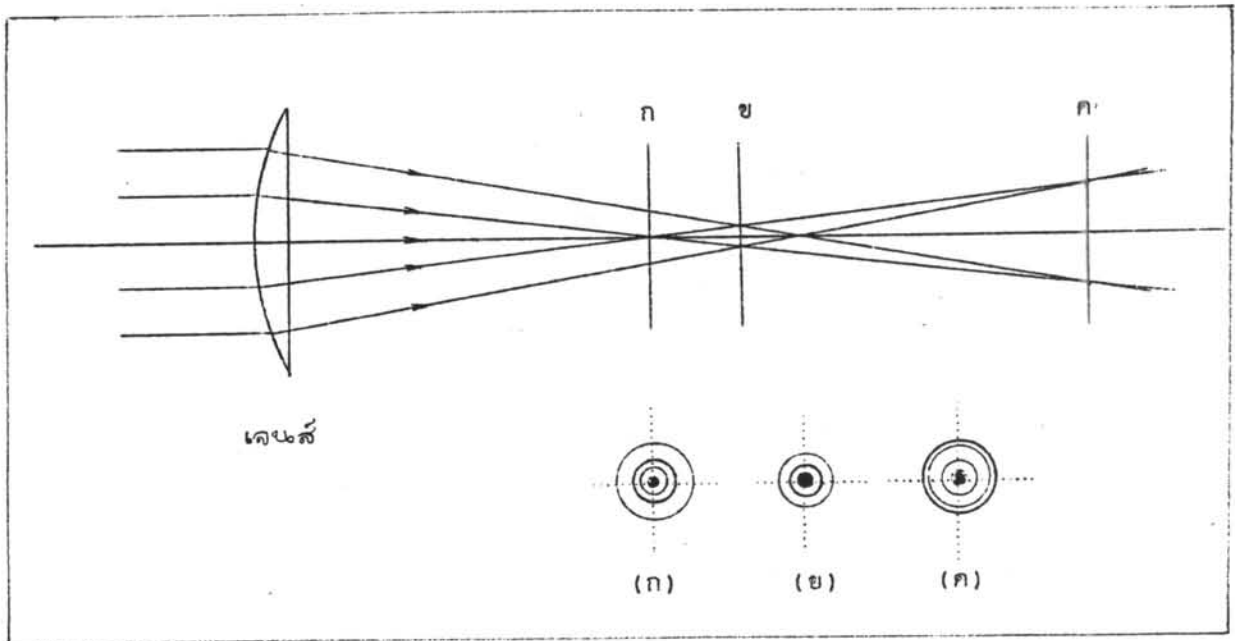


รูปที่ 4.20 ภาพของดาวจากเลนส์ที่มีความคลาดทรงกลมแก้ไข

บริเวณที่แสงเงา คือ บริเวณสว่าง

รังสีไกลแกนमुखสำคัญจะไปตัดกันที่จุดใกล้เลนส์เข้ามา แต่รังสีไกลแกนमुखสำคัญ ไปตัดกันที่จุดไกลออกไปจากเลนส์ ภาพที่ตำแหน่ง ก, ตำแหน่ง ข (ซึ่งเป็นตำแหน่งของวงกลมที่มีความสับสนน้อยที่สุด และที่ตำแหน่งนี้จะได้ภาพที่ดีที่สุด) และตำแหน่ง ค แสดงได้ดังรูปที่ 4.20 (ก), รูปที่ 4.20 (ข) และรูปที่ 4.20 (ค) ตามลำดับ จะเห็นว่า ภาพที่ตำแหน่ง ก และ ที่ตำแหน่ง ค ไม่เหมือนกัน ภาพที่ ตำแหน่ง ก จะมีลักษณะ ขอบนอกมีความสว่างมากกว่าบริเวณตัดเข้าไปยังจุดศูนย์กลาง ภาพที่ตำแหน่ง (ค) จะตรงกันข้าม กล่าวคือ บริเวณขอบนอกความสว่างน้อยกว่าบริเวณตัดเข้าไปยังจุดศูนย์กลาง

3. ภาพของดาวจากเลนส์ที่มีความคลาดทรงกลมแก้ไข



รูปที่ 4.21 ภาพของดาวจากเลนส์ที่มีความคลาดทรงกลมแก้ไข บริเวณที่แสงเข้าคือ บริเวณสว่าง

รังสีไกลแกนมุมยว้าเข้าไปตัดกันที่จุดไกลออกไปจากเลนส์ แต่รังสีไกลแกนมุมยว้าเข้าไปตัดกันที่จุดใกล้เลนส์เข้ามา ภาพที่ตำแหน่ง ก, ตำแหน่ง ข และตำแหน่ง ค แสดงได้ดังรูปที่ 4.21 (ก), รูปที่ 4.21 (ข) และรูปที่ 4.21 (ค) ตามลำดับ จะเห็นว่า ภาพของดาวที่ตำแหน่ง ก และตำแหน่ง ค ไม่เหมือนกัน ภาพที่ตำแหน่ง ก จะมีลักษณะบริเวณขอบนอกมีความสว่างน้อยกว่าบริเวณตัดเข้าไปยังจุดศูนย์กลาง ภาพที่ตำแหน่ง ค จะตรงกันข้าม กล่าวคือ บริเวณขอบนอกมีความสว่างมากกว่าบริเวณตัดเข้าไปยังจุดศูนย์กลาง

สรุปแล้วจะเห็นว่า ถ้าเลนส์ไม่มีความคลาดทรงกลม หรือไม่มีข้อบกพร่องในเนื้อแก้วที่ใช้ทำเลนส์ เช่น มีฟองอากาศ, มีความเครียด (strain) เป็นต้น ภาพของดาวจะเป็นจางกลมของแอสรี โดยความเข้มของแสงลดลง จากจุดศูนย์กลางถึงวงภายนอก และให้จุดโฟกัสเพียงจุดเดียว แต่ถ้าเลนส์มีความคลาดทรงกลม จางกลมของแอสรีจะบิดเบือนไป แล้วแต่กรณี

ในการทดลองได้กระทำดังนี้

4.1 การทดสอบด้วยดาวสำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์ ใช้รูเข็ม มี

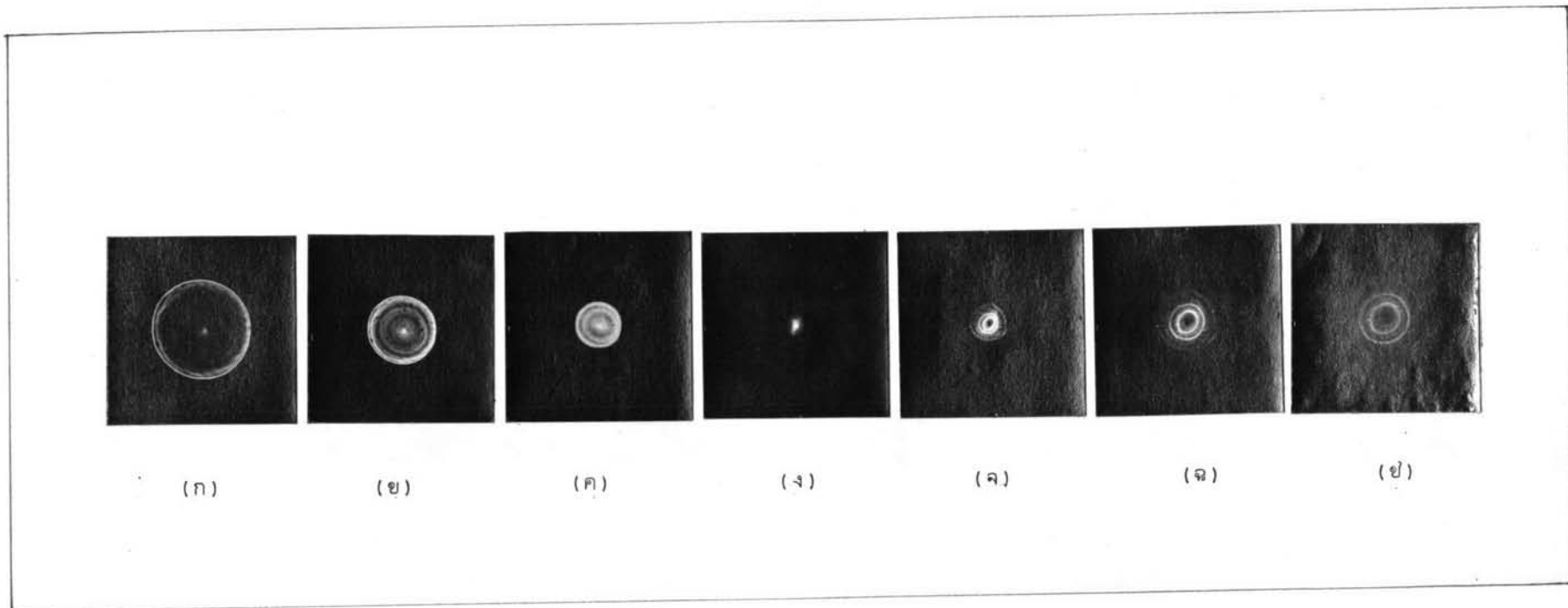
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.031 เซนติเมตร (วัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบเลื่อน)
วางหน้าหลอดโฮโตเทียม วางเลนส์คอลลิเมเตอร์ห่างจากรูเข็มประมาณ 10 เมตร รูเข็มนี้ทำ
หน้าที่เป็นดาวประดิษฐ์ให้แสงตกบนเลนส์คอลลิเมเตอร์ ซึ่งจะให้ภาพของรูเข็มชัดที่จุดโฟกัสปฐมภูมิ
(รูปร่างของเลนส์ที่ทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.9 ของหัวข้อที่ 1.1 ในบทที่ 4) ได้ใช้กล้องถ่ายภาพ
รีเฟล็กซ์แบบเลนส์เดี่ยวโดยถอดเลนส์ของกล้องออกวางรับภาพ สดให้ฟิล์มของกล้องอยู่ที่ตำแหน่ง
โฟกัสของเลนส์ และที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งห่างออกไปจากตำแหน่งโฟกัสตามแนวแกนทั้งทางด้านหน้า
และด้านหลัง หรือที่เรียกว่า ตำแหน่งในระยะโฟกัส และตำแหน่งนอกระยะโฟกัส ตามลำดับแต่
ละตำแหน่งที่ถ่ายภาพจะห่างกัน 0.8 เซนติเมตร โดยมีตำแหน่งโฟกัสเป็นหลัก ใช้ฟิล์มโฟมาแพน
(Fomapan) บันทึกภาพในแต่ละครั้งเป็นเวลา 50 วินาที แล้วล้างฟิล์มด้วยน้ำยา ๕ - 76 (D-76)
ของบริษัทโกดักเป็นเวลา 10 นาที อดภาพ โดย ใช้เวลาบันทึกภาพลงบนกระดาษอัดรูป 10 วินาที
แล้วใช้น้ำยา ๕ - 72(D - 72) ของบริษัทโกดัก ล้างกระดาษอัดรูปเป็นเวลา 30 วินาที ได้ภาพ
ดังรูปที่ 4.22 ทิศทางรูปที่ 4.22 (ก) รูปที่ 4.22 (ข) และรูปที่ 4.22 (ค) รูปที่ 4.22 (ง)
ซึ่งเป็นภาพขยาย 5 เท่าของภาพบนฟิล์ม จะเห็นได้ชัดเจนว่า เลนส์คอลลิเมเตอร์มีความคลาดทรง
กลมแก่ขาด ซึ่งให้ค่าความคลาดทรงกลมเป็นลบ

4.2 การทดสอบด้วยดาวสำหรับเลนส์โทรทรรศน์ กระทำเช่นเดียวกับ

การทดสอบเลนส์คอลลิเมเตอร์ ภาพที่ได้จากการทดสอบ ด้วยดาว สำหรับ
เลนส์โทรทรรศน์ แสดงดังรูปที่ 4.23 ทิศทางรูปที่ 4.23 (ก) รูปที่ 4.23 (ข) และรูปที่
4.23 (ค) รูปที่ 4.23 (ง) จะเห็นได้ชัดเจนว่า เลนส์โทรทรรศน์มีความคลาดทรงกลมแก่ขาด
ซึ่งให้ค่าความคลาดทรงกลมเป็นลบ

5. การทดสอบด้วยคมมีดของฟูคอลลท์ (1,14)

การทดสอบด้วยคมมีดของฟูคอลลท์ (Foucault knife - edge test) สามารถหา



รูป 4.22 ภาพถ่ายจากการทดลองด้วยดาวสำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์
 รูป(ก), รูป(ข) และรูป(ค) เป็นภาพที่ตำแหน่งโฟกัส
 รูป (ง) เป็นภาพที่ตำแหน่งโฟกัสห่างจากเลนส์ 25.57 เซนติเมตร
 รูป (ฉ), รูป(ฉ) และรูป (ข) เป็นภาพที่ตำแหน่งนอกระยะโฟกัส





(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

(จ)

(ฉ)

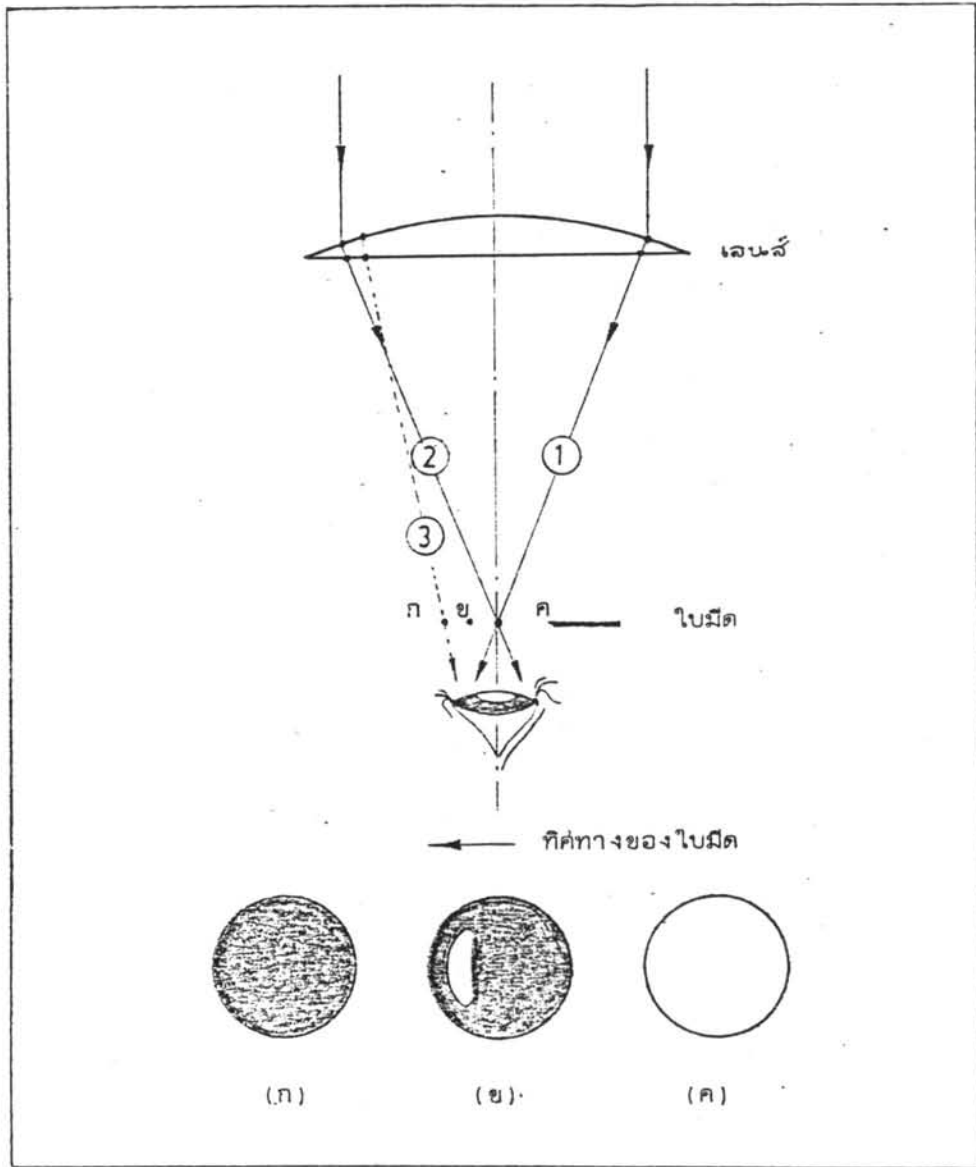
(ช)

รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายจากการทดลองด้วยดาวสำหรับเลนส์โทรทรรศน์
รูป (ก), รูป(ข) และรูป(ค) เป็นภาพที่ตำแหน่งโฟกัส
รูป(ง) เป็นภาพที่ตำแหน่งโฟกัสห่างจากเลนส์ 23.94 เซนติเมตร
รูป(จ), รูป(ฉ) และรูป(ช) เป็นภาพที่ตำแหน่งนอกระยะโฟกัส

ตำแหน่งโฟกัสของเลนส์ทศลอบได้เป็นอย่างดี ต้นกำเนิดแสงที่ใช้เป็นจุด เช่นเดียวกับการทศลอบด้วยดาว การทศลอบด้วยวิธีนี้ต้องให้สายตาของผู้สังเกตอยู่หลังตำแหน่งของภาพเล็กน้อยมองไปยังเลนส์ทศลอบจะเห็นหน้าเลนส์สว่างเป็นแผ่นกลมเลื่อนใบมีดไปตัดลำแสงที่มาจากเลนส์ ถ้าเลื่อนใบมีดให้ผ่านจุดโฟกัส ในกรณีที่เลนส์ไม่มีความคลาด เมื่อใบมีดถึงจุดโฟกัส จะบังแสงทุกส่วนที่จะเข้าตาไว้หมด ทำให้เห็นภาพหน้าเลนส์มืดอย่างสม่ำเสมอ แต่ถ้าเลนส์มีความคลาด เช่น ดังรูปที่ 4.24 โดยรังสี ③ เบี่ยงเบนไป เมื่อใบมีดอยู่ที่ตำแหน่ง ค. ใบมีดไม่บังรังสีใดๆเลยจะเห็นหน้าเลนส์สว่างทั้งหมด ดังรูปที่ 4.24 (ค) เมื่อใบมีดเลื่อนบังจุดโฟกัสที่ตำแหน่ง ข. ใบมีดจะบังรังสีส่วนมาก และบังรังสีจากขอบด้านซ้ายมือของเลนส์ด้วย แต่ไม่บังรังสี ③ ภาพหน้าเลนส์จะเป็นดังรูปที่ 4.24 (ข) เมื่อใบมีดเลื่อนไปถึงตำแหน่ง ก. จะบังรังสีทุก ๆ ส่วนบนหน้าเลนส์ จะเห็นหน้าเลนส์มืดสม่ำเสมอดังรูปที่ 4.24 (ก) ระยะที่ใบมีดเลื่อนจากจุดโฟกัส (ตำแหน่ง ข) ไปบังรังสี ③ ทั้งหมด เป็นค่าความคลาดเชิงรังสีตามขวาง แต่ค่าที่วัดได้อาจไม่ถูกต้องนักเนื่องจากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของคลื่นแสงตรงขอบคมมีด

ในกรณีที่เลนส์ไม่มีความคลาด เมื่อใบมีดอยู่ที่ตำแหน่งภายในระยะโฟกัส ใบมีดจะบังแสงออกจากขอบเลนส์ไปกลางเลนส์ แล้วไปขอบเลนส์อีกด้านหนึ่ง ดังนั้น ถ้าเลื่อนใบมีดจากขวาไปซ้าย รังสี ① ในรูปที่ 4.24 จะถูกบังก่อน จนถึงรังสี ② ภาพหน้าเลนส์ที่เห็น จะเริ่มจากสว่างเต็มหน้า (เมื่อยังไม่บังรังสี ①) แล้วค่อย ๆ มืดจากซ้ายไปขวา และมีมืดเต็มหน้าอย่างสม่ำเสมอ (เมื่อบังรังสี ②) และถ้าเลื่อนใบมีดกลับจากซ้ายไปขวา ภาพที่เห็นจะกลับกับที่กล่าวข้างต้น ถ้าใบมีดอยู่ที่ตำแหน่งนอกระยะโฟกัส เมื่อเลื่อนใบมีด จากขวาไปซ้าย ใบมีดจะบังรังสี ② ก่อน รังสี ① ดังนั้นภาพหน้าเลนส์ที่เห็นจะเริ่มจากสว่างเต็มหน้า แล้วค่อย ๆ มืดจากขวาไปซ้าย หน้าเลนส์จะมืดทั้งหมดเมื่อใบมีดบังรังสี ① และถ้าเลื่อนใบมีดกลับที่เดิม ภาพหน้าเลนส์จะค่อย ๆ สว่างจากซ้ายไปขวา จนสว่างเต็มหน้าเมื่อใบมีดเลยรังสี ① ออกไป

สรุปแล้ว ถ้าใบมีดอยู่ที่ตำแหน่งในระยะโฟกัส ภาพหน้าเลนส์จะค่อย ๆ มืดในทิศทางตรงกันข้ามกับที่เลื่อนใบมีด แต่ถ้าใบมีดอยู่นอกระยะโฟกัส ภาพหน้าเลนส์จะค่อย ๆ มืดในทิศทางเดียวกับทิศที่เลื่อนใบมีดไป



รูปที่ 4.24 แสดงการสกัดอุปกรณืตลอบด้วยคมมีด
รูป(ก), (ข), และ (ค) แสดงภาพหน้าเลนส์
เมื่อไวมืดเลื่อนบั้งรังสีจากขวาไปซ้าย

5.1 การทดสอบด้วยคมมีดสำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์ ในการทดสอบด้วยคมมีด

สำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์ โกว้างจุดกำเนิดแสง ซึ่งเป็นรูเข็มที่ว่าง จากหลอด
โซเดียม ห่างจากเลนส์ 10 เมตร (ประมาณ 40 เท่าของทางยาวโฟกัส) ตัดกระดาษดำปิด
เลนส์เพื่อแบ่งให้เป็นโซนต่าง ๆ หาตำแหน่งจุดโฟกัสปฐมภูมิในแต่ละโซนของเลนส์ที่มีรูปร่างดังรูปที่
4.9 ได้ดังตารางที่ 4.5 แล้วนำไปเขียนแผนภาพของรังสี ได้ดังรูปที่ 4.25

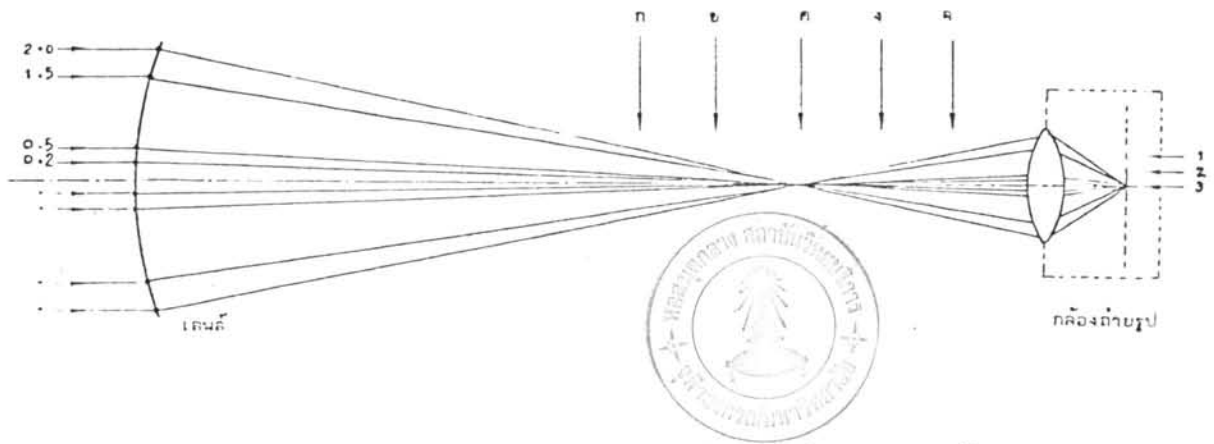
ตารางที่ 4.5 ทางยาวโฟกัสในแต่ละโซนจากการทดสอบด้วยคมมีด
ของฟูคอลลี สำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์

h (เซนติเมตร)	f (เซนติเมตร)
0.2	25.65 ± 0.05
0.5	25.51 ± 0.05
1.5	25.45 ± 0.05
2.0	25.32 ± 0.05

จากนั้นสังเกตการเคลื่อนที่และลักษณะของหน้าเลนส์เมื่อเลนส์มีช่องเปิดเต็มที่ โดยเลื่อนใบมีด บัง
แสง ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน แล้วบันทึกภาพด้วยฟิล์มโฟมาแพน ใช้เวลาบันทึกภาพลงบนฟิล์มครึ่งละ 4
นาที วิธีบันทึกภาพ ใช้กล้องรีเฟล็กซ์แบบเลนส์เดี่ยว ไม่ถอดเลนส์ของกล้องออก ตั้งกล้องให้ห่าง
จากเลนส์ทดสอบ 35.0 เซนติเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ลำแสงจากเลนส์ทดสอบผ่านช่องเปิดของ
กล้องได้ทั้งหมด โฟกัสไปยังหน้าของเลนส์ทดสอบ แล้วถ่ายภาพ เมื่อใบมีดเลื่อนบังแสงที่ตำแหน่ง
ต่าง ๆ กัน และเลื่อนใบมีดไปตามแนวแกนครึ่งละ 0.15 เซนติเมตร ล้างฟิล์มด้วยน้ำยา
ดี - 76 ของบริษัทโกดักเป็นเวลา 10 นาที อัดภาพโดยใช้เวลาบันทึกภาพลงบนกระดาษอัดรูป
20 วินาที และใช้น้ำยาดี - 72 ของบริษัทโกดักล้างกระดาษอัดรูปเป็นเวลา 30 วินาที
ได้ภาพดังรูปที่ 4.26 ซึ่งเป็นภาพขยาย 3.2 เท่า ของภาพบนฟิล์ม

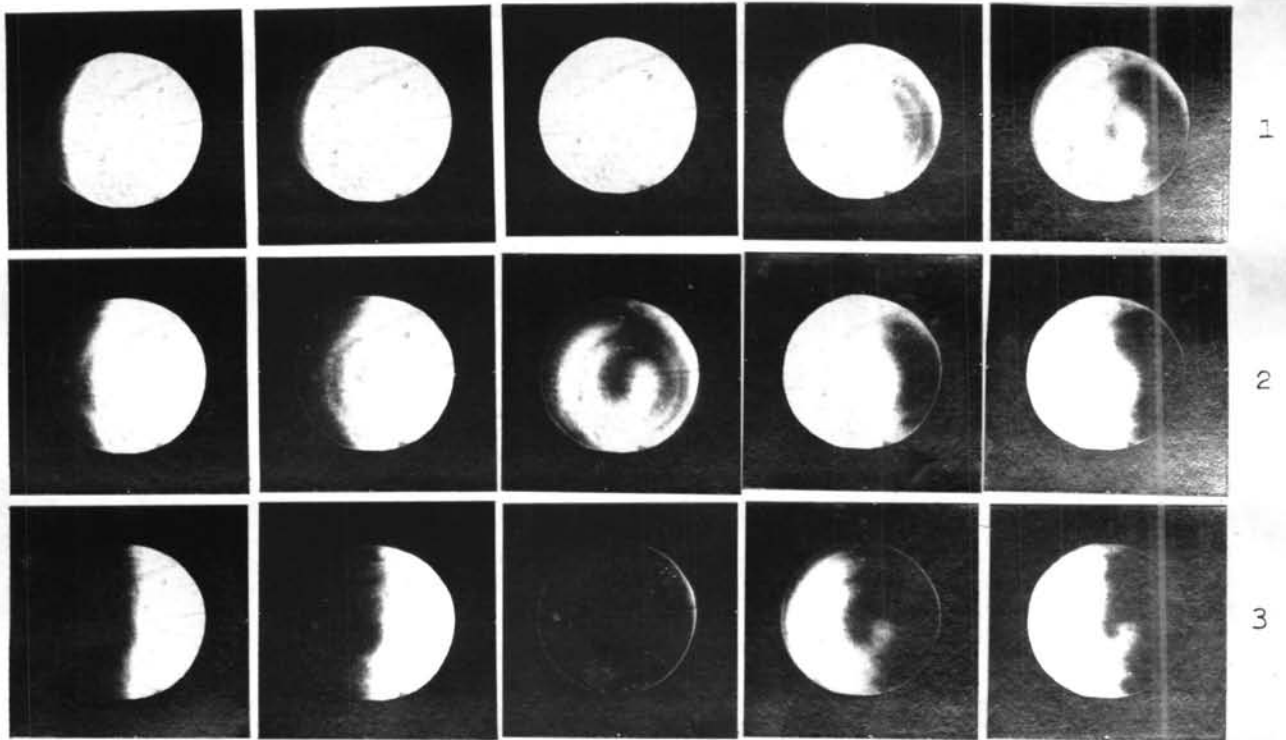
5.2 การทดสอบด้วยคมมีดสำหรับเลนส์โทรทรรศน์ กระทำเช่นเดียวกับการ

ทดสอบ ด้วยคมมีด สำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์ หาตำแหน่งจุดโฟกัสทุติยภูมิ .

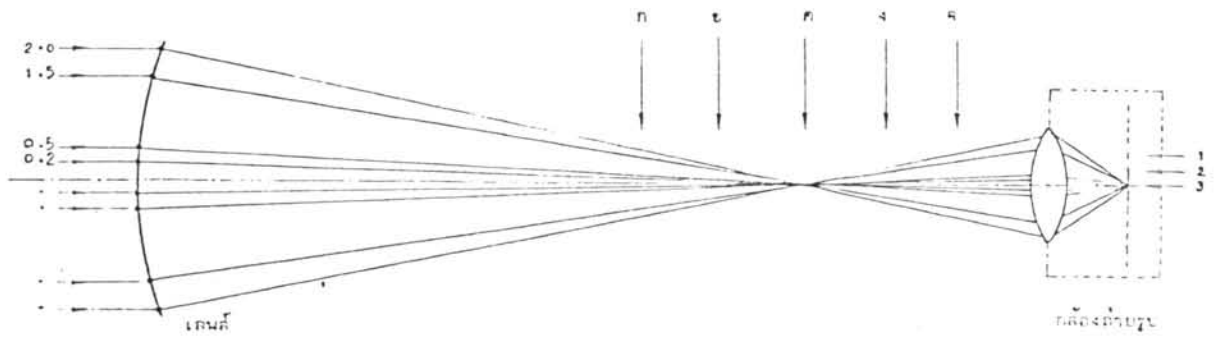


รูปที่ 4.25 แผนภาพของรังสีเมื่อผ่านเลนส์คอลลิเมเตอร์

ก ข ค ง ฉ

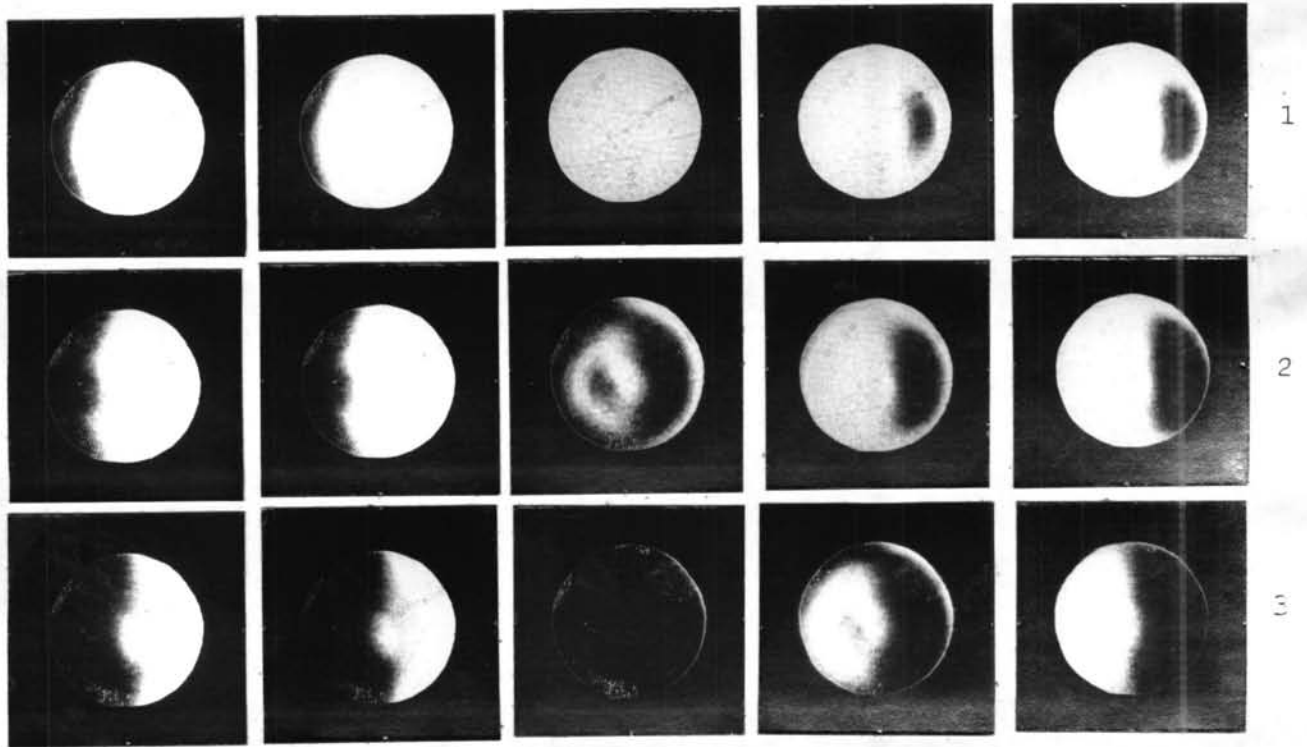


รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายหน้าเลนส์คอลลิเมเตอร์เมื่อใบมีดอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.27 แผนภาพของรังสีเมื่อผ่านเลนส์โทรทรรศน์

ก ข ค ง ฉ



รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายหน้าเลนส์โทรทรรศน์ เมื่อใบมีดอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามรูปที่ 4.27

ในแต่ละโซนของเลนส์ที่มีรูปร่างดังรูปที่ 4.14 ได้ตั้งตารางที่ 4.6 แล้วนำไปเขียนแผนภาพของรังสี ดังรูปที่ 4.27 ภาพหน้าเลนส์โทรทรรศน์ แสดงในรูปที่ 4.28

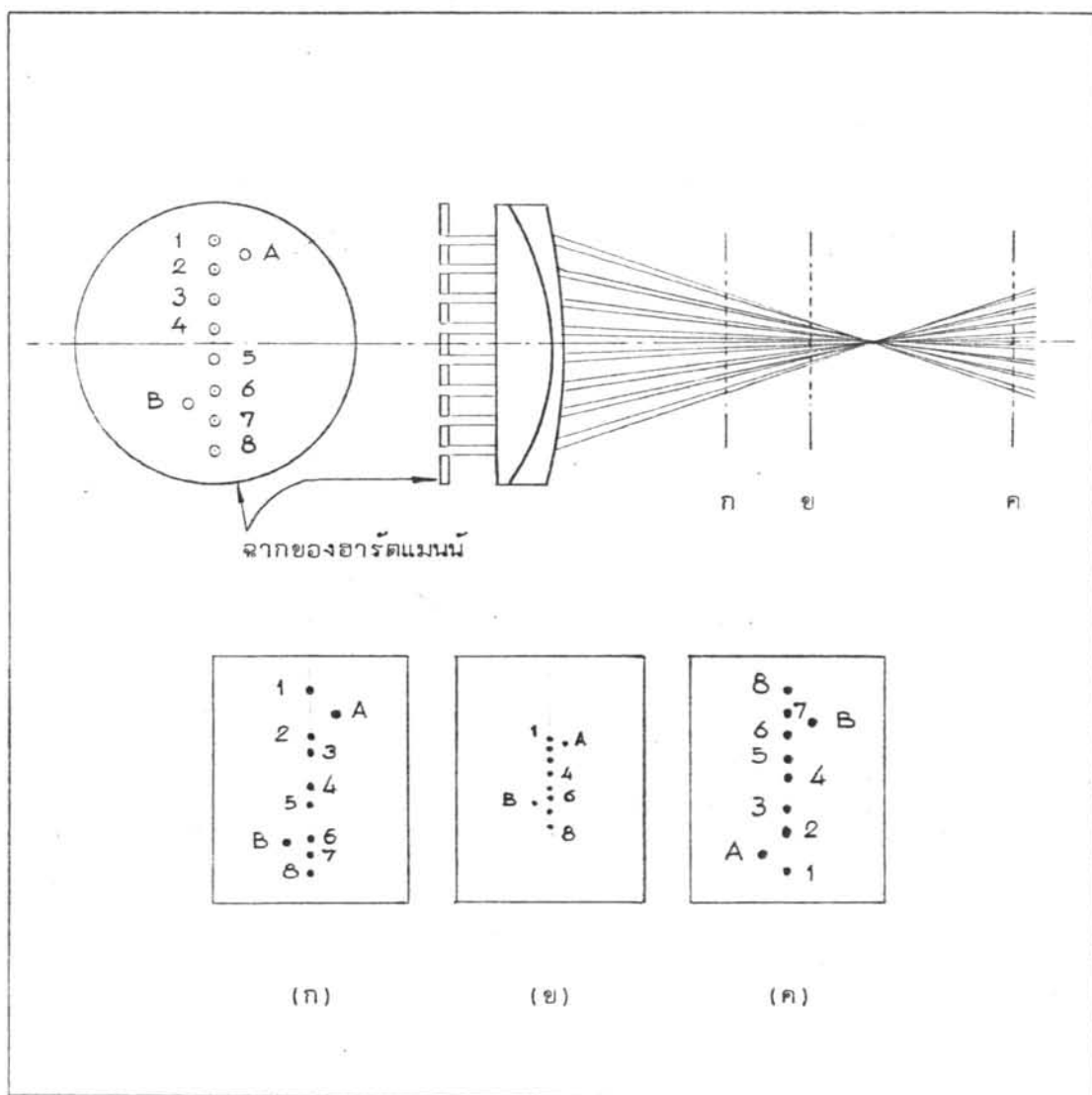
ตารางที่ 4.6 ทางยาวโฟกัสในแต่ละโซนจากการทดลองด้วยคมมีดของฟูคอลท์ สำหรับเลนส์โทรทรรศน์

h (เซนติเมตร)	f (เซนติเมตร)
0.2	23.94 ± 0.05
0.5	23.86 ± 0.05
1.5	23.72 ± 0.05
2.0	23.65 ± 0.05

6. การทดลองด้วยวิธีของฮาร์ตแมนน์ (8, 10, 16)

การทดลองด้วยวิธีของฮาร์ตแมนน์ (Hartmann test) อาศัยการแกะรอยรังสีแล้วพิจารณาภาพหรือตำแหน่งของภาพ ต้นกำเนิดแสงเป็นจุดสว่าง เช่นเดียวกับการทดลองด้วยดาวและการทดลองด้วยคมมีด ถ้าเลนส์ไม่มีความคลาดรังสีจากทุก ๆ โซนของเลนส์จะต้องไปตัดที่จุดเดียวกัน ถ้าต้นกำเนิดแสงอยู่ไกลมาก (ประมาณ 40 เท่าของทางยาวโฟกัส) จุดตัดดังกล่าวคือจุดโฟกัสของเลนส์ แต่ถ้าเลนส์มีความคลาดรังสีจากทุก ๆ โซนไม่ตัดที่จุดเดียวกันซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของความคลาดนั้น ๆ

สร้างกระดาษเจาะรูขนาดเล็กประมาณ $1/200$ เท่าของทางยาวโฟกัสของเลนส์ทดลองเรียงกัน (9) ซึ่งเรียกว่า ฉากรองฮาร์ตแมนน์ (10) (Hartman screen) ดังแสดงในรูปที่ 4.29 รูป A และ B บนฉากของฮาร์ตแมนน์ มีไว้เพื่อบอกตำแหน่งภาพของจุดต่าง ๆ อย่างถูกต้อง รูป 4.29 (ก), 4.29 (ข) และ 4.29 (ค) แสดงภาพที่ปรากฏตรงตำแหน่ง ก. ตำแหน่ง ข. และตำแหน่ง ค. ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 แสดงการสัจุดอุปกรณ์ทดลองด้วยวิธีของอาร์ตแมนน์รูป (ก), (ข) และ (ค) แสดงภาพตรงตำแหน่ง ก, ข, และ ค ตามลำดับ

พิจารณารูปกลมคู่ ที่ห่างจากแกนมุขยล้าตัญเท่า ๆ กัน สมมุติว่าตรงตำแหน่งล่เกล F_1 และ F_2 จุดภาพ 2 จุดอยู่ห่างกัน a และ b ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.30 จาก สามเหลี่ยม CDE คล้ายกับ สามเหลี่ยม EGK จะได้

$$\frac{\text{ระยะจาก } F \text{ ถึง } F_1}{\text{ระยะจาก } F \text{ ถึง } F_2} = \frac{CD}{GK}$$

หรือ
$$\frac{F - F_1}{F_2 - F} = \frac{a}{b}$$

คูณไขว้ จะได้
$$(F - F_1) b = (F_2 - F) a$$

หรือ
$$F(a + b) = F_2 a + F_1 b$$

$$F = \frac{F_2 a + F_1 b}{(a + b)}$$

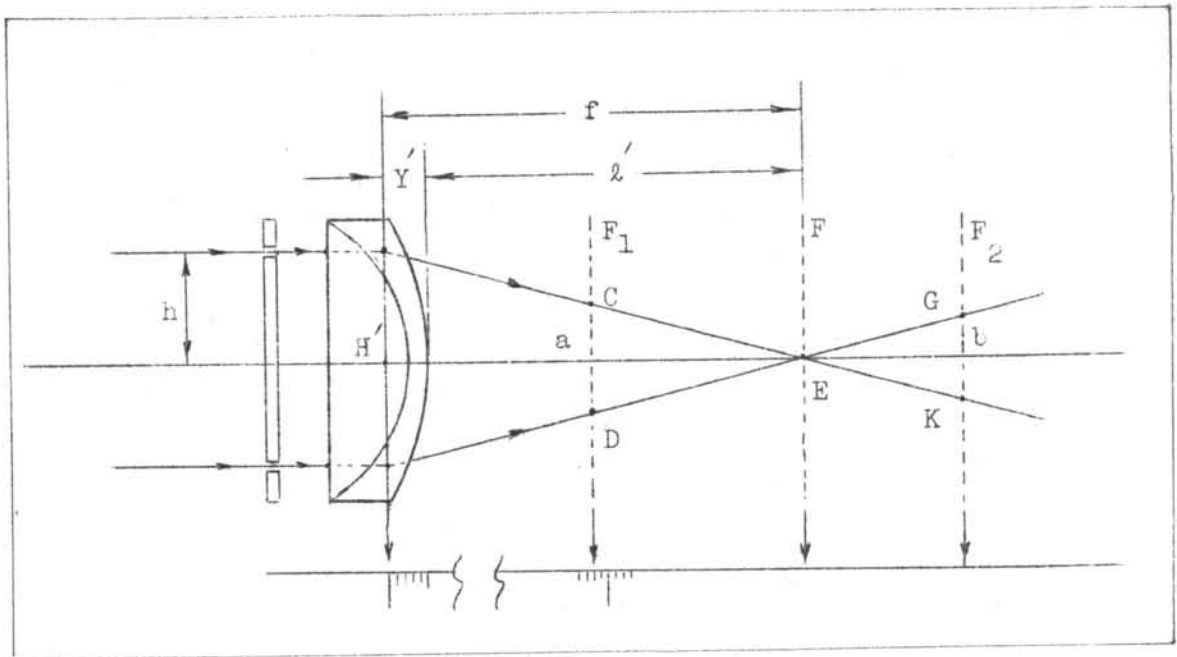
เพิ่มและลบออกด้วย $F_1(a + b)$ จะได้

$$F = \frac{F_1(a + b) - F_1(a + b) + F_2 a + F_1 b}{(a + b)}$$

$$= F_1 + \frac{-F_1 a - F_1 b + F_2 a + F_1 b}{(a + b)}$$

ดังนั้น
$$F = F_1 + \frac{a}{(a + b)} (F_2 - F_1) \dots\dots\dots(4.32)$$

ซึ่ง F เป็นล่เกลที่อ่านได้ในขณะนั้น เมื่อทราบตำแหน่งของเลนส์ (หรือระนาบมุขยล้าตัญ) ก็สามารถคำนวณหาทางยาวโฟกัสของเลนส์ในแต่ละชิ้นได้ และผลต่างของตำแหน่งโฟกัสจากรังสีไกลแก่กับรังสีที่ขอบเป็นค่าความคลาดทรงกลมเชิงรังสี



รูปที่ 4.30 แสดงแผนภาพเพื่อหาทางยาวโฟกัสของเลนส์
ด้วยวิธีของฮาร์ทแมนน์

6.1 การทดลองด้วยวิธีของฮาร์ทแมนน์สำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์ ในกรณี

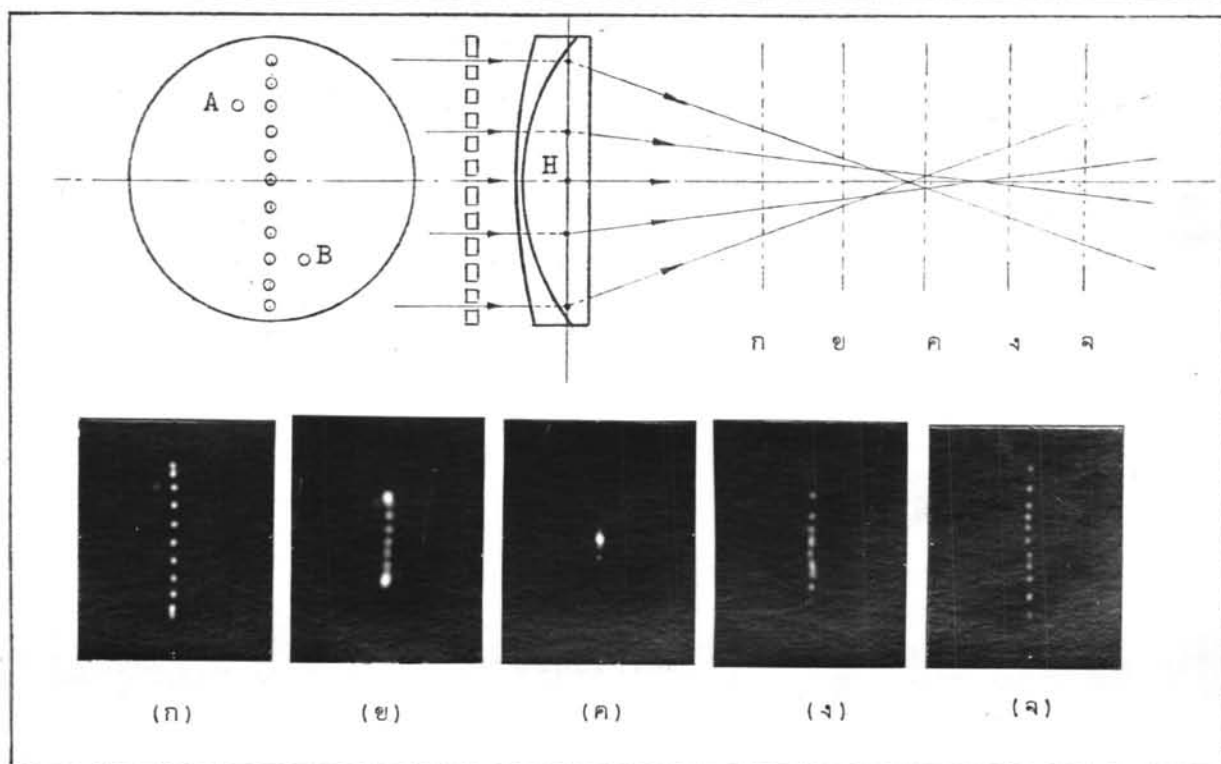
ทดลองเลนส์คอลลิเมเตอร์ จะหาทางยาวโฟกัสปฐมภูมิ โดยรูปร่างของเลนส์
ทดลองเป็นดังรูปที่ 4.9 เปิดให้แสงผ่านรูครึ่งละคู่ ใช้เลนส์ใกล้ตาชนิดเคลื่อนที่ได้ สังเกต
และวัด a กับ b ของดวงสว่างคู่ ที่ตำแหน่ง F_1 และ F_2 ตามลำดับ จัดให้ผิวสุดท้าย
ของเลนส์คอลลิเมเตอร์อยู่ที่สเกล 20.00 เซนติเมตร ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.7
บันทึกภาพด้วยฟิล์ม โฟมาแพน โดยใช้เวลานับที่ภาพครึ่งละ 15 นาที รัศมีบันทึกภาพ กระทำ
เช่นเดียวกับการทดลองด้วยดาว และเลื่อนฟิล์มไปตามแนวแกนमुखสำคัญ ครึ่งละ 1.20 เซนติเมตร
ล้างฟิล์มด้วยน้ำยา ดี - 76 ของบริษัทโกดักเป็นเวลา 12 นาที อัดภาพด้วยขนาดขยาย 5
เท่า ใช้เวลานับที่ภาพลงบนกระดาษอัดรูป 30 วินาที และใช้น้ำยา ดี - 72 ของบริษัท
โกดัก ล้างกระดาษอัดรูปเป็นเวลา 30 วินาที ได้ภาพดังรูปที่ 4.31 โดยรูปที่ 4.31
(ก), 4.31 (ข), 4.31 (ค), 4.31 (ง) และ 4.31 (จ) เป็นภาพของรูจากฉาก
ของฮาร์ทแมนน์ ที่ตำแหน่ง ก, ข, ค, ง, และ จ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองหาทางยาวโฟกัสในแต่ละชั้นจากการทดลองด้วยวิธีของฮาร์ตแมนน์สำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์

$Y' = -0.430$ ซม.

h (ซม.)	F ₁ (ซม.)	F ₂ (ซม.)	F ₂ -F ₁ (ซม.)	a (ซม.)	b (ซม.)	a+b (ซม.)	F (ซม.)	f' (ซม.)	f' (ซม.)	f' (ซม.)
0.4	34.0	54.0	20.0	0.384	0.280	0.664	45.566	25.566	25.625	25.668
	35.0	55.0		0.365	0.305	0.670	45.896	25.896		
	36.0	56.0		0.318	0.351	0.669	45.507	25.507		
	37.0	57.0		0.282	0.370	0.652	45.650	25.650		
	38.0	58.0		0.242	0.403	0.645	45.504	25.504		
0.8	34.0	59.0	25.0	0.746	0.880	1.626	45.469	25.469	25.509	25.552
	35.0	60.0		0.690	0.948	1.638	45.653	25.653		
	36.0	61.0		0.618	1.008	1.626	45.502	25.502		
	37.0	62.0		0.554	1.080	1.634	45.476	25.476		
	38.0	63.0		0.475	1.120	1.595	45.445	25.445		
1.2	35.0	54.0	19.0	0.998	0.870	1.868	45.151	25.151	25.274	25.317
	36.0	55.0		0.898	0.965	1.863	45.148	25.158		
	37.0	56.0		0.802	1.061	1.863	45.179	25.179		
	38.0	57.0		0.718	1.130	1.848	45.382	25.382		
	39.0	58.0		0.635	1.221	1.856	45.501	25.501		
1.6	36.0	54.0	18.0	1.194	1.165	2.359	45.111	25.111	25.155	25.190
	37.0	55.0		1.066	1.280	2.346	45.179	25.179		
	38.0	56.0		0.922	1.422	2.344	45.080	25.080		
	39.0	57.0		0.826	1.600	2.426	45.129	25.129		
	40.0	58.0		0.730	1.760	2.490	45.277	25.277		
2.0	35.0	56.0	21.0	1.623	1.780	3.403	45.016	25.016	25.134	25.177
	36.0	57.0		1.498	1.995	3.493	45.006	25.006		
	37.0	58.0		1.387	2.210	3.597	45.156	25.156		
	38.0	59.0		1.255	2.305	3.560	45.403	25.403		
	39.0	60.0		0.985	2.412	3.397	45.089	25.089		

ความคลาดทางกลมเชิงรังสี = -0.491 ซม.



รูปที่ 4.31 แสดงภาพถ่ายจากการทดลองเลนส์คอลลิเมเตอร์ด้วยวิธีของฮาร์ตแมนน์

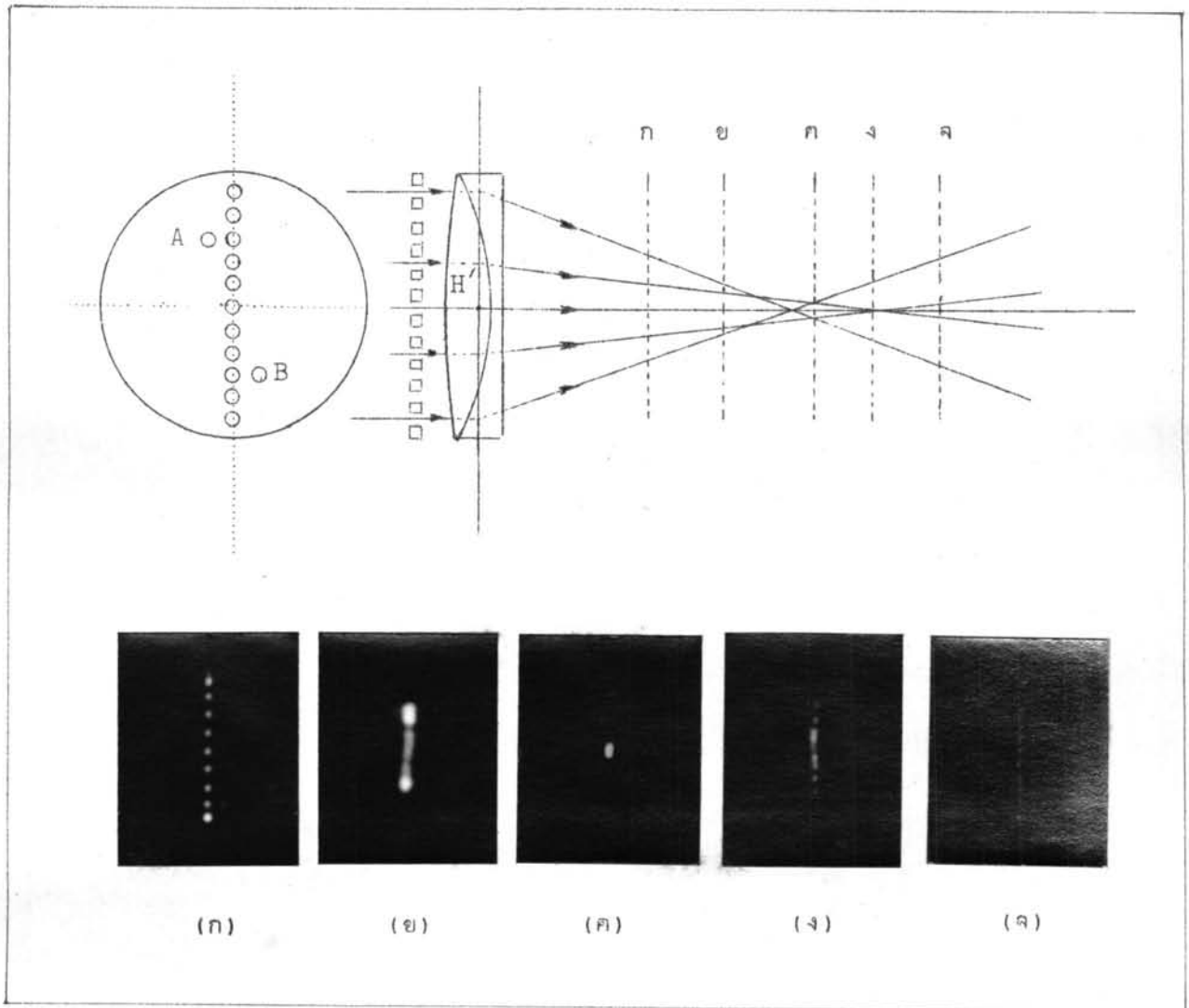
ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองหาทางยาวโฟกัสในแค้มและโชนจากการทดลองด้วยวิธีของมาร์ทินแกม สำหรับเลนส์โทรทรรศน์

$Y' = -0.379$ ซม.										
h (ซม.)	F_1 (ซม.)	F_2 (ซม.)	$F_2 - F_1$ (ซม.)	a (ซม.)	b (ซม.)	a+b (ซม.)	F (ซม.)	l' (ซม.)	\bar{l}' (ซม.)	\bar{f}' (ซม.)
0.4	30.0	54.0	24.0	0.500	0.320	0.820	44.634	24.634	24.552	24.931
	31.0	55.0		0.461	0.355	0.816	44.559	24.559		
	32.0	56.0		0.422	0.399	0.821	44.336	24.336		
	33.0	57.0		0.399	0.420	0.819	44.692	24.692		
	34.0	58.0		0.360	0.460	0.820	44.537	24.537		
0.8	30.0	53.0	23.0	1.000	0.600	1.600	44.375	24.375	24.456	24.835
	31.0	54.0		0.922	0.660	1.582	44.405	24.405		
	32.0	55.0		0.843	0.720	1.563	44.405	24.405		
	33.0	56.0		0.799	0.799	1.598	44.500	24.500		
	34.0	57.0		0.720	0.843	1.563	44.595	24.595		
1.2	32.0	53.0	21.0	1.265	0.850	2.115	44.560	24.560	24.421	24.480
	33.0	54.0		1.195	0.990	2.185	44.485	24.485		
	34.0	55.0		1.075	1.089	2.164	44.432	24.432		
	35.0	56.0		0.950	1.201	2.151	44.275	24.275		
	36.0	57.0		0.845	1.280	2.125	44.351	24.351		
1.6	32.0	52.0	20.0	1.682	1.120	2.802	44.006	24.006	23.998	24.377
	33.0	53.0		1.595	1.280	2.875	44.096	24.096		
	34.0	54.0		1.420	1.421	2.841	43.996	23.996		
	35.0	55.0		1.280	1.595	2.875	43.904	23.904		
	36.0	56.0		1.118	1.682	2.800	43.986	23.986		
2.0	30.0	54.0	24.0	2.498	1.810	4.308	43.916	23.916	23.924	24.303
	31.0	55.0		2.300	1.995	4.295	43.852	23.852		
	32.0	56.0		2.102	2.110	4.212	43.977	23.977		
	33.0	57.0		1.980	2.357	4.337	43.957	23.957		
	34.0	58.0		1.776	2.525	4.301	43.910	23.910		
ความคลาดทางกมเบี่ยงรังสี = -0.628 ซม.										

141

6.2 การทดสอบด้วยวิธีของฮาร์ตแมนสำหรับเลนส์โทรทรรศน์ กระทำเช่นเดียว

กับการทดสอบเลนส์คอลลิเมเตอร์ สอดผิวที่ 4 ของเลนส์โทรทรรศน์ ให้อยู่ที่สเกล 20.00 เซนติเมตร ผลจากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.8. แสดงภาพถ่าย จากการทดสอบ ดังรูปที่ 4.32 โดยรูปที่ 4.32 (ก) , 4.32 (ข) , 4.32 (ค) , 4.32 (ง) และ 4.32 (จ) เป็นภาพของรู จากฉากของฮาร์ตแมน ที่ตำแหน่ง ก, ข, ค, ง, และ จ ตามลำดับ

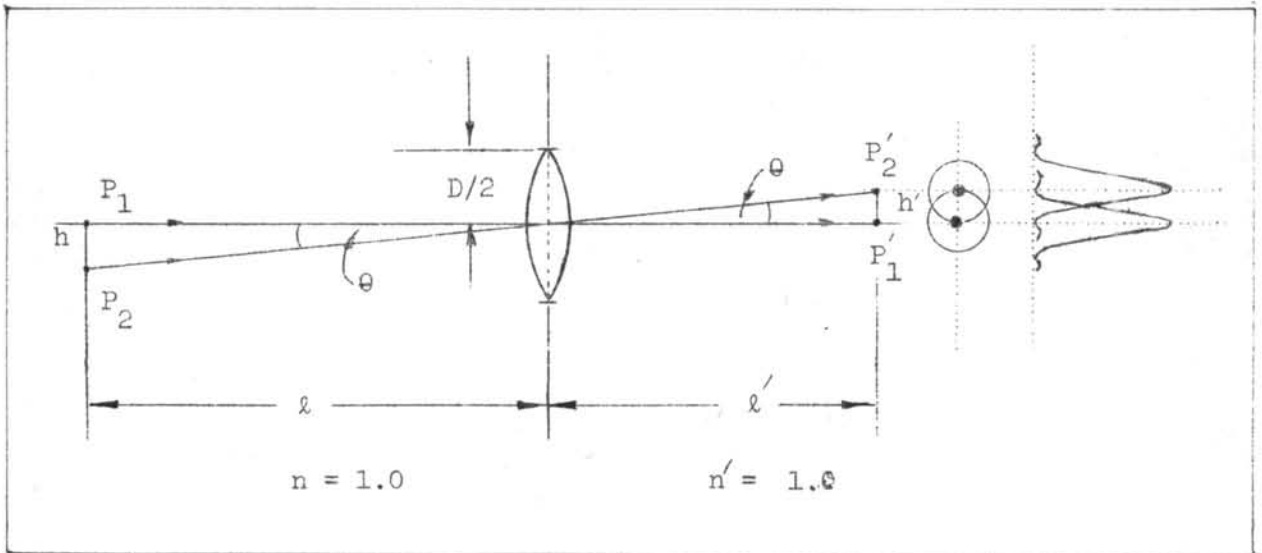


รูปที่ 4.32 แสดงภาพถ่ายจากการทดสอบเลนส์โทรทรรศน์ด้วยวิธีของฮาร์ตแมน

7. การทดสอบหาค่าสังแยก

เลนส์แต่ละอันจะให้ค่าสังแยกแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาดของเลนส์และความยาวคลื่นแสงที่ใช้ ในกรณีที่จุดวัตถุ 2 จุด จะแยกออกจากกันได้พอดี (just resolved) ก็ต่อเมื่อ จุดกลางสว่าง (central maximum) ของจานกลมแอร่าในปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของคลื่นแสงจากจุดวัตถุจุดหนึ่ง อยู่ที่เดียวกับตำแหน่งมีดอันดับแรกของจานกลมแอร่าของอีกจุดหนึ่ง⁽¹⁹⁾ ตามทฤษฎี เมื่อรังสีตกกระทบบนขอบของเลนส์เป็นมุม θ แสงที่ใช้มีความยาวคลื่น λ และช่องเปิดแสงเป็น D ตามรูปที่ 4.33 จะได้

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \dots\dots\dots(4.33)$$



รูปที่ 4.33 ปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของคลื่นแสงจากจุดวัตถุ 2 จุด

ดังนั้นค่าค่าสังแยกเชิงมุมจากสมการ(4.33) คือ

$$\theta = \sin^{-1} \left(1.22 \frac{\lambda}{D} \right) \dots\dots\dots(4.34)$$

ในกรณีที่มุม θ น้อยมาก จะได้ $\theta \approx \sin \theta = 1.22 \lambda/D$ เรเดียน ในการทดลอง

กันตลอดโดยใช้เย็บด้วยแผ่นอลูมิเนียมบาง (aluminum foil) ซึ่งเจาะรูไว้ 2 รู วัตรระยะห่างระหว่างรูทั้งสองด้วยกลิ้งลูกที่ค้นแบบเลื่อนไถ่ 0.027 เซนติเมตร สดให้รูทั้งสองห่างจากเลนส์ทดลองเป็นระยะต่าง ๆ บันทึกภาพของรูทั้งสองด้วยวิธีเดียวกับวิธีบันทึกภาพในการทดลองด้วยดาว คือ ให้แสงจากจุดกำเนิดทั้งสองข้างต้นผ่านเลนส์ทดลองไปตกบนฟิล์มโพมาแพน ซึ่งอยู่ในกล้องถ่ายรูปรีเฟล็กซ์แบบเลนส์เดี่ยวที่ถอดเลนส์ของกล้องออก ใช้เวลาบันทึกภาพลงบนฟิล์มภาพละ 50 วินาที ล้างฟิล์มด้วยน้ำยา ดี - 76 ของบริษัทโกดักเป็นเวลา 10 นาที ใช้เวลาบันทึกภาพจากฟิล์มลงบนกระดาษอีตริป 20 วินาที ด้วยขนาดขยาย 10 เท่า ของภาพบนฟิล์ม ใช้น้ำยา ดี - 72 ของบริษัทโกดักล้างกระดาษอีตริปเป็นเวลา 30 วินาที ภาพถ่ายและผลการทดลองแสดงในหัวข้อที่ 7.1 และ หัวข้อที่ 7.2

7.1 การทดลองหาค่าสังแยกของเลนส์คอลลิเมเตอร์ เลนส์คอลลิเมเตอร์

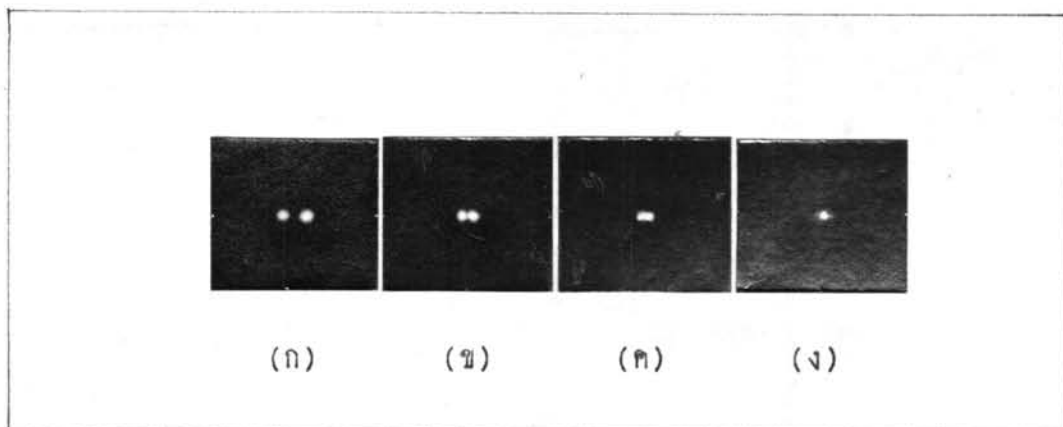
ที่สร้างขึ้น มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.00 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดของช่องเปิดแสงเหลือจากตลอดใช้เต็มที่มีความยาวคลื่น 589.3 นาโนเมตร และรูปร่างของเลนส์ในการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.9 จากสมการ (4.33) ได้

$$\begin{aligned}\theta &= \sin^{-1} \left(1.22 \frac{\lambda}{D} \right) \\ &= \sin^{-1} \left(\frac{1.22 \times 589.3 \times 10^{-7}}{4.00} \right) \\ &= 1.030 \times 10^{-3} \quad \text{องศา}\end{aligned}$$

หรือ $\theta = 3.707$ ฟิลิปดา

แสดงว่า ค่าค่าสังแยกเชิงมุมตามทฤษฎีของเลนส์คอลลิเมเตอร์เป็น 1.030×10^{-3} องศา หรือ 3.707 ฟิลิปดา

ในการทดลอง สดวางรูสว่างทั้งสองตามหัวข้อที่ 7 ให้ห่างจากเลนส์คอลลิเมเตอร์เป็นระยะต่าง ๆ กัน ภาพถ่ายของรูสว่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายของจุดกำเนิดแสง 2 จุดสำหรับเลนส์คอลลิเมเตอร์

รูป (ก)	จุดกำเนิดแสงอยู่ห่างจากเลนส์คอลลิเมเตอร์	40.00	เซนติเมตร
รูป (ข)	จุดกำเนิดแสงอยู่ห่างจากเลนส์คอลลิเมเตอร์	100.00	เซนติเมตร
รูป (ค)	จุดกำเนิดแสงอยู่ห่างจากเลนส์คอลลิเมเตอร์	300.00	เซนติเมตร
รูป (ง)	จุดกำเนิดแสงอยู่ห่างจากเลนส์คอลลิเมเตอร์	700.00	เซนติเมตร

รูปที่ 4.34 (ค) เป็นภาพที่จุดทั้งสองแยกจากกันพอดี วัดระยะวัตถุ (l) ระยะภาพ (l') และวัดระยะห่างระหว่างจุดทั้งสองบนฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบเลื่อนได้ผลดังตารางที่ 4.9

ตาราง 4.9 ข้อมูลการทดสอบหาค่ากำลังแยกของเลนส์คอลลิเมเตอร์

หน่วยเป็น ซม.	รูปที่ 4.34 (ก)	รูปที่ 4.34 (ข)	รูปที่ 4.34 (ค)	รูปที่ 4.34 (ง)
h	0.027	0.027	0.027	0.027
h'	-0.030	-0.015	-0.006	-
l	-40.000	-100.000	-300.000	700.000
l'	55.450	40.520	33.700	26.300

จากตารางที่ 4.9: หากค่ากำลังแยกเชิงมุมโดยฟิล์มของเลนส์คอลลิเมเตอร์ ได้เป็น

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{h'}{x'} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{0.006}{33.700} \right) \\ &= 0.010 \end{aligned}$$

องศา

หรือ $\theta = 36.724$

ฟิลิปดา

นี่คือค่ากำลังแยกเชิงมุมของเลนส์คอลลิเมเตอร์โดยฟิล์มถ่ายรูป เป็น 0.010 องศา หรือ 36.724 ฟิลิปดา จากสมการ (4.23) และสมการ (4.27) คือ

$$m = -h'/h \quad \dots\dots\dots(4.23)$$

$$f'(1 - m) = s' \quad \dots\dots\dots(4.27)$$

และใช้ค่าประมาณ $s' = x'$

สามารถใช้หาทางยาวโฟกัสของเลนส์คอลลิเมเตอร์ โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4.9 ได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ทางยาวโฟกัสของเลนส์คอลลิเมเตอร์จากการทดลองหาค่ากำลังแยก

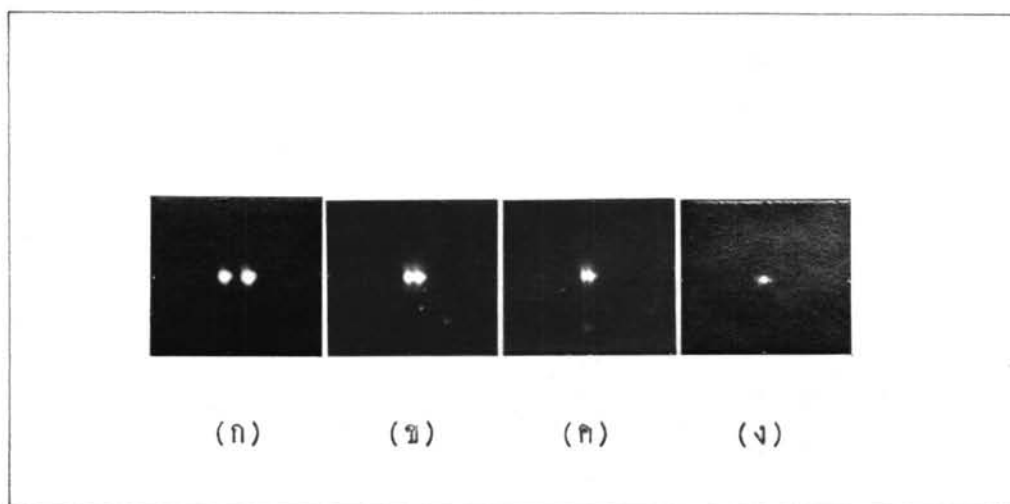
	รูปที่ 4.34 (ก)	รูปที่ 4.34 (ข)	รูปที่ 4.34 (ค)
s' (ซม.)	55.450	40.520	33.700
m	-1.111	-0.556	-0.222
f' (ซม.)	26.270	26.049	27.573
ทางยาวโฟกัสเฉลี่ย $\bar{f}' = 26.631$ เซนติเมตร			

จากตารางที่ 4.10 จะเห็นว่าทางยาวโฟกัสปฐมภูมิโดยเฉลี่ย (\bar{f}') ของเลนส์คอลลิเมเตอร์จากการทดสอบหักเหแสงแยกเป็น 26.631 เซนติเมตร

7.2 การทดสอบหักเหแสงแยกของเลนส์โทรทรรศน์ ขนาดของเลนส์โทรทรรศน์

และจุดกำเนิดแสงที่ใช้ เป็นเช่นเดียวกับของเลนส์คอลลิเมเตอร์

รูปร่างของเลนส์โทรทรรศน์ ในการทดสอบนี้เป็นดังรูปที่ 4.14 ได้ค่าหักเหแสงเชิงมุมเช่นเดียวกับของเลนส์คอลลิเมเตอร์ คือเป็น 1.030×10^{-3} องศา หรือ 3.707 พิลิปดา



รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายของจุดกำเนิดแสง 2 จุด สำหรับเลนส์โทรทรรศน์

รูป (ก)	จุดกำเนิดแสงอยู่ห่างจากเลนส์โทรทรรศน์	40.00	เซนติเมตร
รูป (ข)	จุดกำเนิดแสงอยู่ห่างจากเลนส์โทรทรรศน์	90.00	เซนติเมตร
รูป (ค)	จุดกำเนิดแสงอยู่ห่างจากเลนส์โทรทรรศน์	250.00	เซนติเมตร
รูป (ง)	จุดกำเนิดแสงอยู่ห่างจากเลนส์โทรทรรศน์	700.00	เซนติเมตร

กระทำเช่นเดียวกับการทดสอบเลนส์คอลลิเมเตอร์ ภาพถ่ายของรูปร่างทั้งสองแสดงดังรูปที่ 4.35 โดยรูปที่ 4.35 (ค) เป็นภาพที่จุดทั้งสองแยกจากกันพอดี วัดระยะวัดดู (2) ระยะภาพ (2') และวัดระยะห่างระหว่างจุดทั้งสองบนฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบเลื่อน ได้ผลดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลการทดสอบหากำลังแยกของ เลนส์โทรทัศน์

หน่วยเป็นมม.	รูปที่ 4.35 (ก)	รูปที่ 4.35 (ข)	รูปที่ 4.35 (ค)	รูปที่ 4.35 (ง)
h	0.027	0.027	0.027	0.027
h'	0.030	-0.015	-0.006	-
z	-40.000	-90.000	-250.000	700.00
z'	50.460	37.340	30.530	24.850

จากตารางที่ 4.11 หาค่ากำลังแยกเชิงมุมโดยฟิล์มของเลนส์โทรทัศน์ได้เป็น

$$\theta = \tan^{-1}(h'/z')$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{0.006}{30.530}\right)$$

$$= 0.011 \quad \text{องศา}$$

$$\text{หรือ } \theta = 40.537 \quad \text{ฟิลิปดา}$$

นี่คือ ค่ากำลังแยกเชิงมุมของเลนส์โทรทัศน์โดยฟิล์มถ้ารูปเป็น 0.011 องศา

หรือ 40.537 ฟิลิปดา จากสมการ (4.23) และสมการ (4.27) ใช้หาทาง

ยาวโฟกัสของเลนส์โทรทัศน์โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4.11 ได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ทางยาวโฟกัสของเลนส์โทรทรรศน์จากการทดลองกำลังแยก

	รูปที่ 4.35 (ก)	รูปที่ 4.35 (ข)	รูปที่ 4.35 (ค)
S' (ซม.)	50.460	37.340	30.530
m	-1.111	-0.556	-0.222
f' (ซม.)	23.902	23.997	24.980
ทางยาวโฟกัสเฉลี่ย $\bar{f}' = 24.293$ เซนติเมตร			

จากตารางที่ 4.12 จะเห็นว่าทางยาวโฟกัสที่ยุติโดยเฉลี่ย (\bar{f}') ของเลนส์โทรทรรศน์จากการทดลองกำลังแยกเป็น 24.293 เซนติเมตร