หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

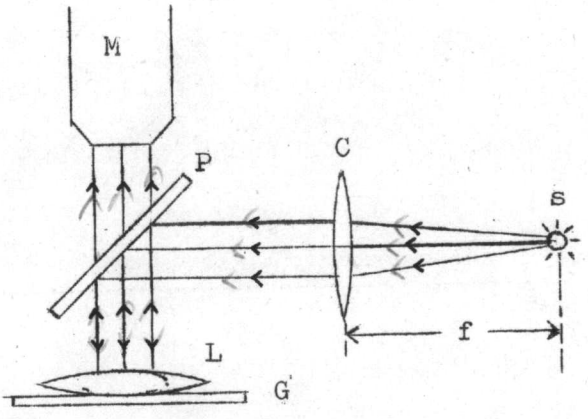
การทดสอบเลนส์ที่สร้างขึ้น

เมื่อสร้างเลนส์เสร็จเรียบร้อยดังกล่าวแล้วในบทที่ 3 ต้องนำเลนส์นั้นมาทดสอบคุณภาพ วิธีการทดสอบเลนส์จะได้กล่าวอย่างละเอียดในบทนี้

1. การหารัศมีความโค้งของแต่ละผิวของเลนส์โดยวิธีวงแหวนนิวตัน (12,13)

ถ้าผิวโค้งทรงกลมสองผิวที่มีรัศมีความโค้งต่างกันเล็กน้อยวางสัมผัสกันอยู่ และมีแสงสีเดียวตกกระทบผิวโค้งทั้งสองนี้ จะสังเกตเห็นวงแหวนมืดและสว่างสลับกันเรอบ ๆ จุดที่ผิวโค้งทั้งสองสัมผัสกัน เรียกวงแหวนเหล่านี้ว่า วงแหวนนิวตัน (Newton's ring) วงแหวนนี้เกิดจากการแทรกสอก (interfere) ของคลื่นแสงที่สะท้อนตรงผิวทั้งสองของฟิล์มบางของอากาศ (air thin film) ซึ่งอยู่ระหว่างผิวโค้งทั้งสอง

ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้สังเกตวงแหวนนิวตัน แสดงในรูปที่ 4.1 L เป็นเลนส์ที่ต้องการวัดรัศมีความโค้งของผิวล่างของเลนส์ G เป็นแก้วแผ่นราบวางสัมผัสกับ



รูปที่ 4.1 การจัดตั้งเครื่องมือของการทดลองวงแหวนนิวตัน

ผิวล่างของเลนส์ L ซึ่งทำให้เกิดฟิล์มบางของอากาศระหว่างผิวล่างของ L กับผิวบนของ G P เป็นแผ่นแก้ววางทำมุม 45° กับแนวระดับ M เป็นกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน ซึ่งเคลื่อนที่ได้ทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ ใช้สำหรับสังเกตและวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนนิวตัน S เป็นแหล่งกำเนิดแสงสีเดียว ในที่นี้ใช้หลอดโซเดียมซึ่งให้แสงเหลืองความยาวคลื่นแสงเป็น 589.3 นาโนเมตร วาง S ที่ตำแหน่งระยะโฟกัสของเลนส์บูน C เพื่อให้แสงที่ผ่านเลนส์ C และตกกระทบกับแผ่นแก้ว P เป็นลำแสงขนาน แสงบางส่วนที่สะท้อนจากแผ่นแก้ว P จะตกกระทบที่ผิวทั้งสองของฟิล์มบางของอากาศที่อยู่ระหว่างเลนส์ L กับผิวแก้ว G แล้วสะท้อนไปแทรกสอดกัน เกิดริ้วรอยของการแทรกสอด (interference fringe) เป็นวงกลม เรียกว่าวงแหวนนิวตัน ถ้าหากผิวโค้งที่จะวัดหารัศมีความโค้งเป็นผิวเว้า จะใช้ผิวบูนแทนแผ่นแก้ว G ผิวบูนที่นำมาใช้ต้องทราบรัศมีความโค้งแล้ว และในที่นี้ได้วางผิวบูนไว้บนผิวเว้าที่ต้องการวัดรัศมีความโค้ง

การวัดหารัศมีความโค้งของผิวเลนส์ทำได้โดยวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนนิวตันซึ่งเห็นผ่านกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน M ความสัมพันธ์ของรัศมีความโค้งของทั้งสองผิวเป็นดังนี้

$$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = \frac{4(m_1 - m_2)\lambda}{D_{m_1}^2 - D_{m_2}^2} \qquad (4.1)$$

ในเมื่อ R_1, R_2 เป็น รัศมีความโค้งของผิวโค้งผิวล่าง และผิวบนตามลำดับ มีค่าเป็นบวกเมื่อจุดศูนย์กลางของความโค้งของผิวอยู่เหนือผิวโค้ง และเป็นลบเมื่อจุดศูนย์กลางของความโค้งของผิวอยู่ใต้ผิวโค้ง

D_{m_1}, D_{m_2} เป็น เส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนลำดับที่ m_1 และ m_2 ตามลำดับ

λ เป็น ความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อนำค่า m มาเขียนกราฟเทียบกับ D_m^2 โดยให้ m เป็นแกน y และ D_m^2 เป็นแกน x จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเป็น

$$\text{ความชัน} = \tan\theta = \frac{m_1 - m_2}{D_{m_1}^2 - D_{m_2}^2} \qquad (4.2)$$

แทนค่าสมการ (4.2) ลงในสมการ (4.1) ได้ว่า

$$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = 4\lambda\tan\theta \qquad (4.3)$$

โดยทราบค่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการทดลองความชันของกราฟเส้นตรง และรัศมีความโค้งของผิวใดผิวหนึ่ง ก็สามารถหารัศมีความโค้งของอีกผิวหนึ่งได้

การวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนนิวตันแต่ละวง จะวัดใน 3 แนวด้วยกัน ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางของแต่ละแนวมีค่าเท่ากันหรือค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าผิวโค้งที่กำลังทดสอบเป็นส่วนหนึ่งของผิวทรงกลม แต่ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางนี้มีค่าแตกต่างกันมาก ผิวโค้งที่ทดสอบจะไม่เป็นผิวทรงกลม

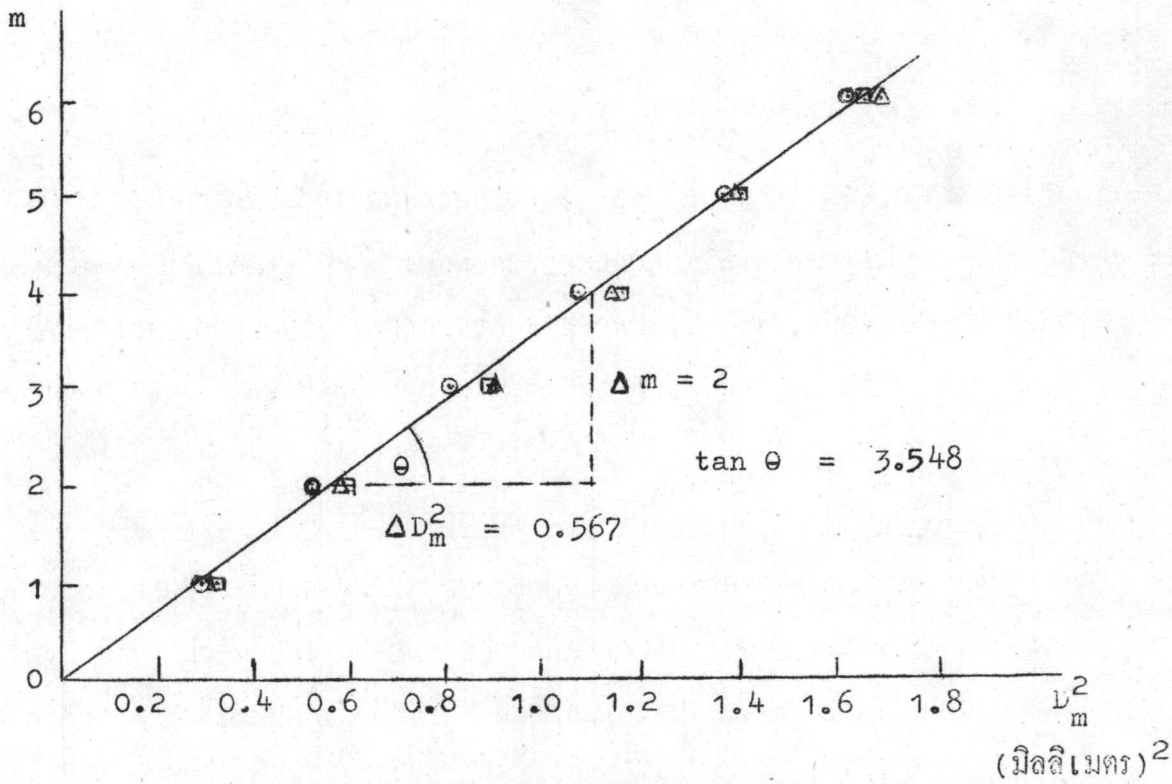
1.1 <u>การหารัศมีความโค้งของผิวเลนส์ประกอบของเลนส์รวงค์สำหรับคอลลิเมเตอร์</u> ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 1 ของบทที่ 3 ว่า เลนส์รวงค์ที่สร้างขึ้นสำหรับคอลลิเมเตอร์ประกอบด้วยเลนส์นูน และเลนส์เว้าประกบกันอยู่ เพราะฉะนั้น จะทำการวัดรัศมีความโค้งของผิวทั้งสองของเลนส์นูนและเลนส์เว้าก่อนที่จะนำเลนส์ทั้งสองมาประกบกันเป็นเลนส์รวงค์

เนื่องจากผิวที่ 1 ของเลนส์ได้ออกแบบและสร้างขึ้นก่อนข้างจะราบ เพื่อความสะดวกในการหารัศมีความโค้งของผิวนี้ จะให้ผิวที่ 1 นี้เป็นผิวล่าง และผิวโค้งที่ทราบรัศมีความโค้งเป็นผิวบน ทำการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางวงมืดของวงแหวนนิวตัน แล้วนำค่าลำดับที่ของวงมืด (m) กับเส้นผ่าศูนย์กลางของวงมืดของวงแหวนนิวตันยกกำลังสอง (D_m^2) มาเขียนกราฟ ได้กราฟเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4.2 คำนวณหาความชันของเส้นตรง

นี้โดยใช้เครื่องคำนวณของฮิวเลตต์–แพกการ์ด รุ่น เอช พี 97 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 3.548 (มิลลิเมตร)$^{-2}$ เนื่องจากความยาวคลื่นของแสงที่ใช้เป็น 589.3 นาโนเมตร และรัศมีความโค้งของผิวบนซึ่งได้ทำการวัดไว้มาก่อนเป็น $+1.158\times10^{2}$ มิลลิเมตร จากสมการ (4.3) คำนวณหารัศมีความโค้งของผิวล่างได้เป็น

$$R_1 = +3.689 \times 10^{3} \quad \text{มิลลิเมตร}$$

R_1 มีเครื่องหมายเป็นบวก หมายความว่าจุดศูนย์กลางของความโค้งของผิวล่างอยู่เหนือผิวโค้งนี้ ดังนั้น ผิวสัมผัสล่างจึงเป็นผิวเว้ามีรัศมีความโค้งเป็น 3.689×10^{3} มิลลิเมตร นั่นคือ ผิวที่ 1 ของเลนส์นูนเป็นผิวเว้ามีรัศมีความโค้งเป็น 3.689×10^{3} มิลลิเมตร



รูปที่ 4.2 กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์คอลลิเมเตอร์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน

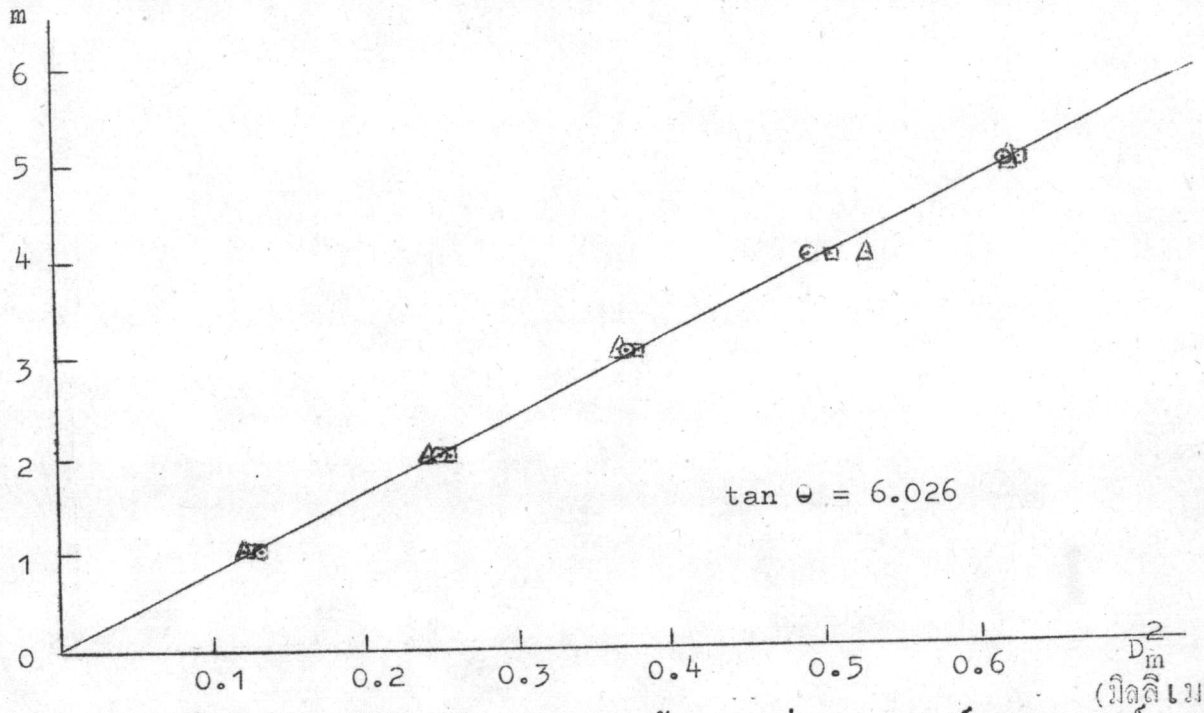
การหารัศมีความโค้งของผิวที่เหลือของเลนส์บูนและผิวทั้งสองของเลนส์เว้า จะปฏิบัติเช่นเดียวกับผิวที่ 1 ของเลนส์บูน กราฟระหว่าง m กับ D_m^2 อันเนื่องมาจากผิวที่ 2 ของเลนส์บูน ผิวที่ 1 ของเลนส์เว้าและผิวที่ 2 ของเลนส์เว้า ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.3 รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ตามลำดับ

จากกราฟในรูปที่ 4.3 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 6.026 (มิลลิเมตร)$^{-2}$ ทราบความยาวคลื่นของแสงที่ใช้และรัศมีความโค้งของผิวล่างเป็น ∞ ดังนั้น จากสมการ (4.3) คำนวณหารัศมีความโค้งของผิวบนได้เป็น + 52.82 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวบนมีเครื่องหมายเป็นบวก หมายความว่าจุดศูนย์กลางของความโค้งของผิวบนอยู่เหนือผิวโค้งนี้ ดังนั้นผิวที่ 2 ของเลนส์บูนจึงเป็นผิวบูนมีรัศมีความโค้งเป็น 52.82 มิลลิเมตร

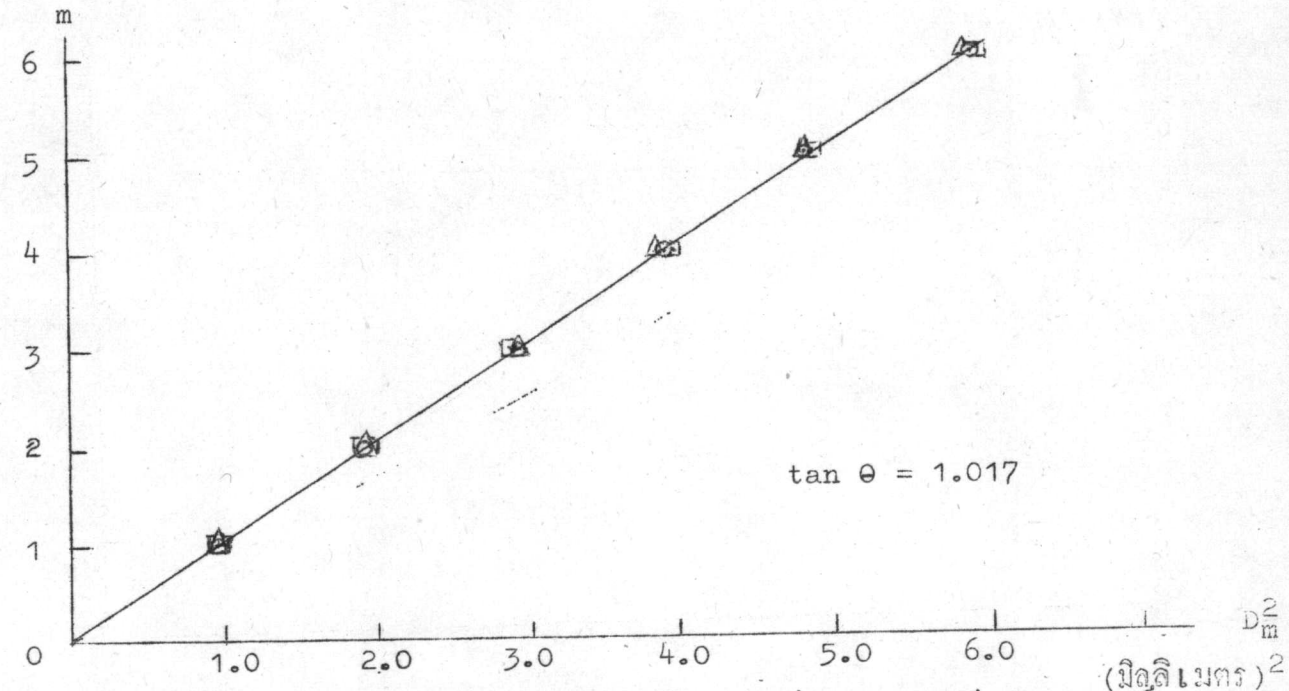
จากกราฟในรูปที่ 4.4 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 1.017 (มิลลิเมตร)$^{-2}$ รัศมีความโค้งของผิวบนที่ทราบค่าเป็น + 46.45 มิลลิเมตร จากสมการ (4.3) คำนวณหารัศมีความโค้งของผิวล่าง ได้เป็น 52.28 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวล่างมีเครื่องหมายเป็นบวก หมายความว่าจุดศูนย์กลางของความโค้งของผิวล่างอยู่เหนือผิวโค้งนี้ ดังนั้นผิวที่ 1 ของเลนส์เว้าจึงเป็นผิวเว้า มีรัศมีความโค้งเป็น 52.28 มิลลิเมตร

จากกราฟในรูปที่ 4.5 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 3.663 (มิลลิเมตร)$^{-2}$ รัศมีความโค้งของผิวล่างที่ทราบค่าเป็น ∞ จากสมการ (4.3) คำนวณหารัศมีความโค้งของผิวบนได้เป็น $+1.158 \times 10^2$ มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวบนมีเครื่องหมายเป็นบวก หมายความว่าจุดศูนย์กลางของความโค้งของผิวบนอยู่เหนือผิวโค้งนี้ ดังนั้น ผิวที่ 2 ของเลนส์เว้าจึงเป็นผิวบูนมีรัศมีความโค้งเป็น 1.158×10^2 มิลลิเมตร

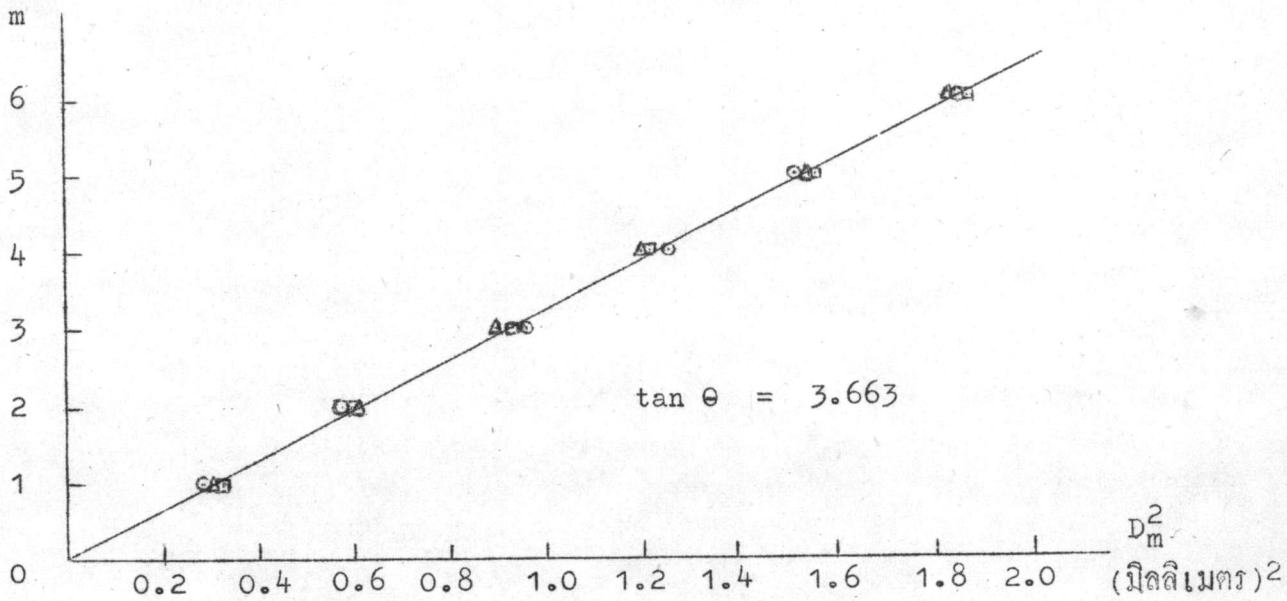
โดยใช้หัวข้อที่ 1.4 ของบทที่ 1 พิจารณาเครื่องหมายของรัศมีความโค้งของผิวเลนส์ได้ว่า เลนส์องค์นี้ประกอบด้วยเลนส์บูนที่มีผิวที่ 1 เป็นผิวเว้า และผิวที่ 2 เป็นผิวบูนมีรัศมีความโค้งของผิวเป็น -3.689×10^3 มิลลิเมตร และ -52.82 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีระยะระหว่างขั้วผิวเป็น 7.4 มิลลิเมตร และเลนส์เว้าที่มีผิวที่ 1 เป็นผิวเว้า และผิวที่ 2 เป็นผิวบูน มีรัศมีความโค้งของผิวเป็น -52.28 มิลลิเมตร และ -1.158×10^2 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีระยะระหว่างขั้วผิวเป็น 1.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.3 กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์คอลลิเมเตอร์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน



รูปที่ 4.4 กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 3 ของเลนส์คอลลิเมเตอร์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน



รูปที่ 4.5 กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 4 ของเลนส์คอลลิเมเตอร์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน

เมื่อทราบค่ารัศมีความโค้งของผิวของเลนส์นูนและเลนส์เว้าแล้ว นำเลนส์ทั้งสองมาประกบกันเพื่อให้เป็นเลนส์คู่ประกบ โดยใช้ซีเมนต์ที่มีดัชนีหักเห 1.55 เป็นตัวเชื่อม ดังนั้น เลนส์คู่ประกบที่ได้มีรัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ผิวที่ 2 ผิวที่ 3 และผิวที่ 4 เป็น -3.689×10^3 มิลลิเมตร -52.82 มิลลิเมตร -52.28 มิลลิเมตร และ -1.158×10^2 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 ประกบกันไม่สนิท ระยะห่างของขั้วผิวทั้งสองซึ่งมีซีเมนต์อยู่ระหว่างกลาง คำนวณได้เป็น 0.07 มิลลิเมตร ในการหาตำแหน่งของจุดโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์นี้เป็นการหาตำแหน่งของวัตถุซึ่งอยู่ด้านซ้ายของเลนส์ที่จะทำให้ภาพเกิดที่อนันต์ทางด้านขวาของเลนส์ โดยใช้สมการ (2.17)

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{R}$$

ซึ่งเป็นสมการของการหักเหที่ผิวทรงกลมเดี่ยวสำหรับรังสีใกล้แกน สามารถหาตำแหน่งของวัตถุเมื่อได้ภาพสุดท้ายเกิดที่อนันต์

โดยที่ทราบว่าภาพที่หักเหผ่านผิวที่ 4 ซึ่งมีรัศมีความโค้งเป็น -1.158×10^{2} มิลลิเมตร อยู่ที่อนันต์ ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้า และหลังผิวที่ 4 เป็น 1.69865 และ 1.0 ตามลำดับ แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.17) หาตำแหน่งวัตถุของผิวที่ 4 ได้

$$l_4 = -281.55 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ระยะวัตถุของผิวที่ 4 มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าวัตถุอยู่หน้าผิวที่ 4 และเป็นภาพของผิวที่ 3 อยู่ห่างจากผิวที่ 3 เป็นระยะ −280.15 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 3 เป็น −52.28 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 3 เป็น 1.55 และ 1.69865 ตามลำดับ แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.17) หาตำแหน่งวัตถุของผิวที่ 3 ได้

$$l_3 = -481.36 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ระยะวัตถุของผิวที่ 3 มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าวัตถุอยู่หน้าผิวที่ 3 และเป็นภาพของผิวที่ 2 อยู่ห่างจากผิวที่ 2 เป็นระยะ −481.29 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 2. เป็น −52.82 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 2 เป็น 1.62270 และ 1.55 ตามลำดับ แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.17) หาตำแหน่งวัตถุของผิวที่ 2 ได้

$$l_2 = -353.00 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ระยะวัตถุของผิวที่ 2 มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าวัตถุอยู่หน้าผิวที่ 2 และเป็นภาพของผิวที่ 1 อยู่ห่างจากผิวที่ 1 เป็นระยะ −345.60 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 เป็น -3.689×10^{3} มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 1 เป็น 1.0 และ 1.62270 ตามลำดับ แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.17) หาตำแหน่งวัตถุของผิวที่ 1 ได้

$$l_1 = -220.92 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ระยะวัตถุของผิวที่ 1 มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าวัตถุอยู่หน้าผิวที่ 1 ดังนั้นจุดโฟกัสปฐมภูมิอยู่ห่างจากผิวที่ 1 ของเลนส์เป็นระยะ −220.92 มิลลิเมตร และจากการแกะรอยรังสีซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 2 ของบทนี้ ได้ว่า จุดมุขยสำคัญปฐมภูมิ อยู่ห่างจากผิวที่ 1 ของเลนส์เป็นระยะ + 5.9 มิลลิเมตร เพราะฉะนั้น ทางยาวโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์นี้เป็น −226.82 มิลลิเมตร นั่นคือ ทางยาวโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์เป็น +226.8 มิลลิเมตร

1.2 <u>การหารัศมีความโค้งของผิวเลนส์ประกอบของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน</u> เลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อนประกอบด้วยเลนส์เว้าและเลนส์นูน ตามลำดับ การหารัศมีความโค้งของผิวทั้งสอง ของเลนส์เว้าและเลนส์นูนปฏิบัติเช่นเดียวกับการหารัศมีความโค้งของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ทุกประการ กราฟระหว่าง m กับ D_m^2 อันเนื่องมาจากผิวที่ 1 ของเลนส์เว้า ผิวที่ 2 ของเลนส์เว้า ผิวที่ 1 ของเลนส์นูน และผิวที่ 2 ของเลนส์นูน ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.6 รูปที่ 4.7 รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ

จากกราฟในรูปที่ 4.6 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 12.033(มิลลิเมตร)$^{-2}$ ผิวล่างเป็นผิวเรียบมีรัศมีความโค้งเป็น ∞ จากสมการ (4.3) คำนวณหารัศมีความโค้งของผิวบนได้เป็น +35.26 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวบนมีเครื่องหมายเป็นบวก หมายความว่าจุดศูนย์กลางของความโค้งของผิวบนอยู่เหนือผิวโค้งนี้ ดังนั้น ผิวที่ 1 ของเลนส์เลนส์เว้าจึงเป็นผิวนูน มีรัศมีความโค้งเป็น 35.26 มิลลิเมตร

จากกราฟในรูปที่ 4.7 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 6.026 (มิลลิเมตร)$^{-2}$ ผิวบนเป็นผิวนูนที่มีรัศมีความโค้งเป็น + 10.809 มิลลิเมตร จากสมการ (4.3) คำนวณหารัศมีความโค้งของผิวล่างได้เป็น +12.77 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวล่างมีเครื่องหมายเป็นบวก หมายความว่าจุดศูนย์กลางของความโค้งของผิวล่างอยู่เหนือผิวโค้งนี้ ดังนั้น ผิวที่ 2 ของเลนส์เว้า จึงเป็นผิวเว้ามีรัศมีความโค้งเป็น 12.77 มิลลิเมตร

จากกราฟในรูปที่ 4.8 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 39.247(มิลลิเมตร)$^{-2}$

รัศมีความโค้งของผิวด้านซึ่งใช้ชวยเป็น ∞ จากสมการ (4.3) คำนวณหารัศมีความโค้งของผิวบนได้เป็น +10.81 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวบนมีเครื่องหมายเป็นบวก หมายความว่า จุดศูนย์กลางของความโค้งของผิวบนอยู่เหนือผิวโค้งนี้ ดังนั้น ผิวที่ 1 ของเลนส์นูน จึงเป็นผิวนูนมีรัศมีความโค้งเป็น +10.81 มิลลิเมตร

จากกราฟในรูปที่ 4.9 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 22.819(มิลลิเมตร)$^{-2}$ รัศมีความโค้งของผิวด้านซึ่งใช้ชวยเป็น ∞ จากสมการ (4.3) คำนวณหารัศมีความโค้งของผิวบนได้เป็น +18.59 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวบนมีเครื่องหมายเป็นบวก หมายความว่าจุดศูนย์กลางของความโค้งของผิวบนอยู่เหนือผิวโค้งนี้ ดังนั้น ผิวที่ 2 ของเลนส์นูนจึงเป็นผิวนูนมีรัศมีความโค้งเป็น 18.59 มิลลิเมตร

โดยใช้หัวข้อที่ 1.4 ของบทที่ 1 พิจารณาเครื่องหมายของรัศมีของผิวเลนส์ได้ว่า เลนส์อรงค์นี้ประกอบด้วย เลนส์เว้าที่มีผิวที่ 1 เป็นผิวนูน และผิวที่ 2 เป็นผิวเว้า มีรัศมีความโค้งของผิวเป็น +35.26 มิลลิเมตร และ +12.77 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะระหว่างขั้วผิวเป็น 3.5 มิลลิเมตร และเลนส์นูนที่มีผิวที่ 1 เป็นผิวนูน และผิวที่ 2 เป็นผิวเว้า มีรัศมีความโค้งของผิวเป็น +10.81 มิลลิเมตร และ −18.59 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะระหว่างขั้วผิวเป็น 3.8 มิลลิเมตร

เมื่อทราบค่ารัศมีความโค้งของผิวของเลนส์เว้าและเลนส์นูนแล้ว นำเลนส์ทั้งสองมาประกบกันเพื่อให้เป็นเลนส์คู่ประกบโดยใช้ซีเมนต์ที่มีดัชนีหักเห 1.55 เป็นตัวเชื่อม ดังนั้น เลนส์คู่ประกบที่ได้มีรัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ผิวที่ 2 ผิวที่ 3 และผิวที่ 4 เป็น +35.26 มิลลิเมตร +12.77 มิลลิเมตร +10.81 มิลลิเมตร และ −18.59 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับผิวที่ 2 ซึ่งมีรัศมีความโค้งมากกว่าผิวที่ 3 เมื่อประกบกันแล้วขั้วของผิวทั้งสองจะสัมผัสกัน ดังนั้น ระยะห่างของขั้วผิวทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์ ในการหาตำแหน่งของจุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์นี้ เป็นการหาตำแหน่งของภาพซึ่งอยู่ด้านขวาของเลนส์ เมื่อวัตถุอยู่ด้านซ้ายของเลนส์ และอยู่ที่อนันต์ โดยใช้สมการ (2.17)

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{R}$$

สามารถหาตำแหน่งของภาพของแต่ละผิวจนกระทั่งได้ภาพสุดท้าย

จากที่ทราบว่าวัตถุอยู่ที่อนันต์ และหักเหผ่านผิวที่ 1 ซึ่งมีรัศมีความโค้งเป็น +35.26 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 1 เป็น 1.0 และ 1.169865 ตามลำดับ แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.17) หาตำแหน่งภาพของผิวที่ 1 ได้

$$1'_1 = +85.73 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ระยะภาพของผิวที่ 1 มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่า ภาพอยู่หลังผิวที่ 1 และเป็นวัตถุเสมือนของผิวที่ 2 อยู่ห่างจากผิวที่ 2 เป็น +82.23 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 2 เป็น +2.77 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 2 เป็น 1.69865 และ 1.55 ตามลำดับ แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ(2.17) หาตำแหน่งภาพของผิวที่ 2 ได้

$$1'_2 = +171.90 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ระยะภาพของผิวที่ 2 มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่าภาพอยู่หลังผิวที่ 2 และเป็นวัตถุเสมือนของผิวที่ 3 อยู่ห่างจากผิวที่ 3 เป็น +171.90 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 3 เป็น +10.81 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 3 เป็น 1.55 และ 1.62270 ตามลำดับ แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.17) หาตำแหน่งภาพของผิวที่ 3 ได้

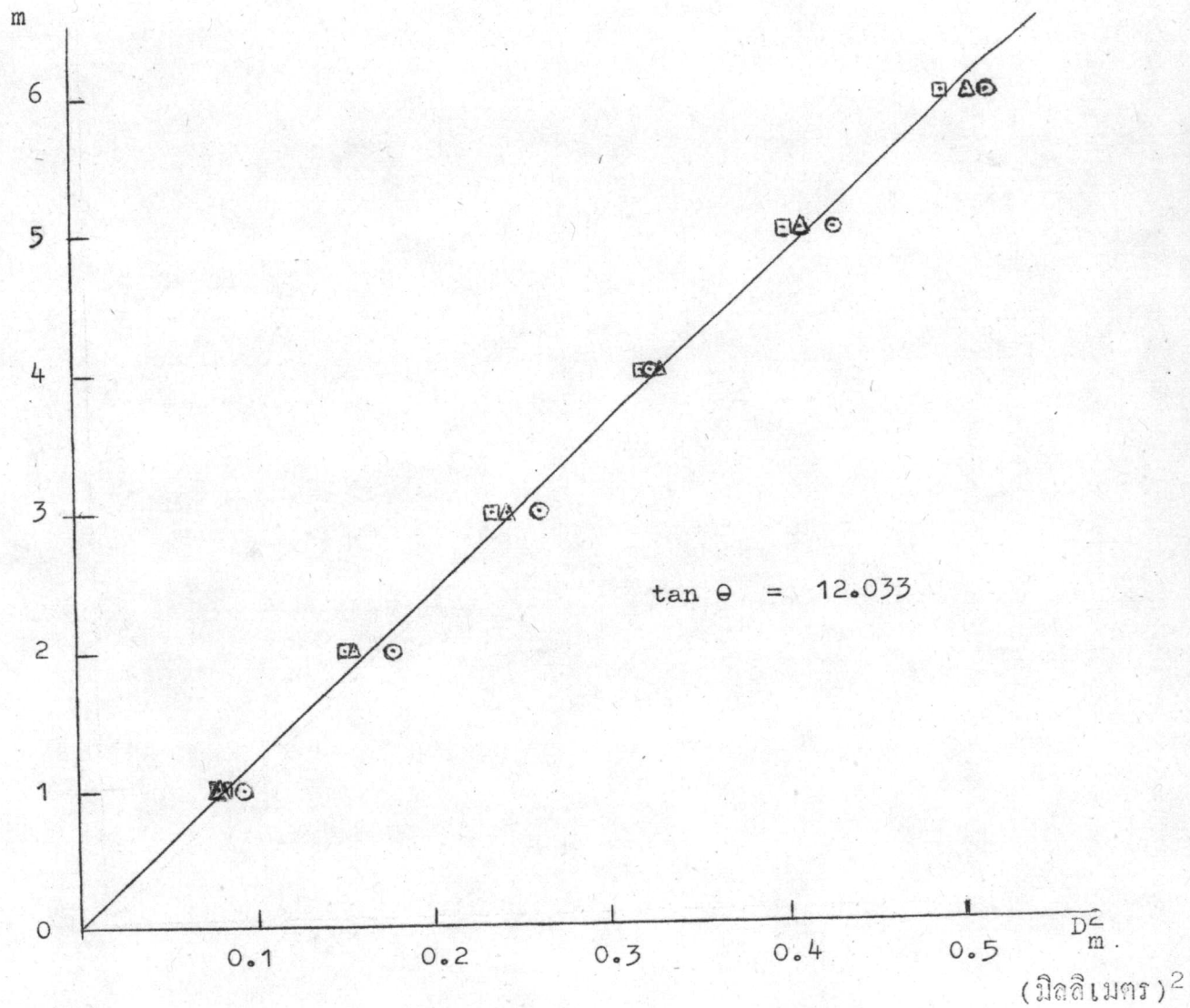
$$1'_3 = +103.08 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ระยะภาพของผิวที่ 3 มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่าภาพอยู่หลังผิวที่ 3 และเป็นวัตถุเสมือนของผิวที่ 4 อยู่ห่างจากผิวที่ 4 เป็น +99.28 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 4 เป็น −18.59 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 4 เป็น 1.62270 และ 1.0 ตามลำดับ แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (2.17) หาตำแหน่งภาพของผิวที่ 4 ได้

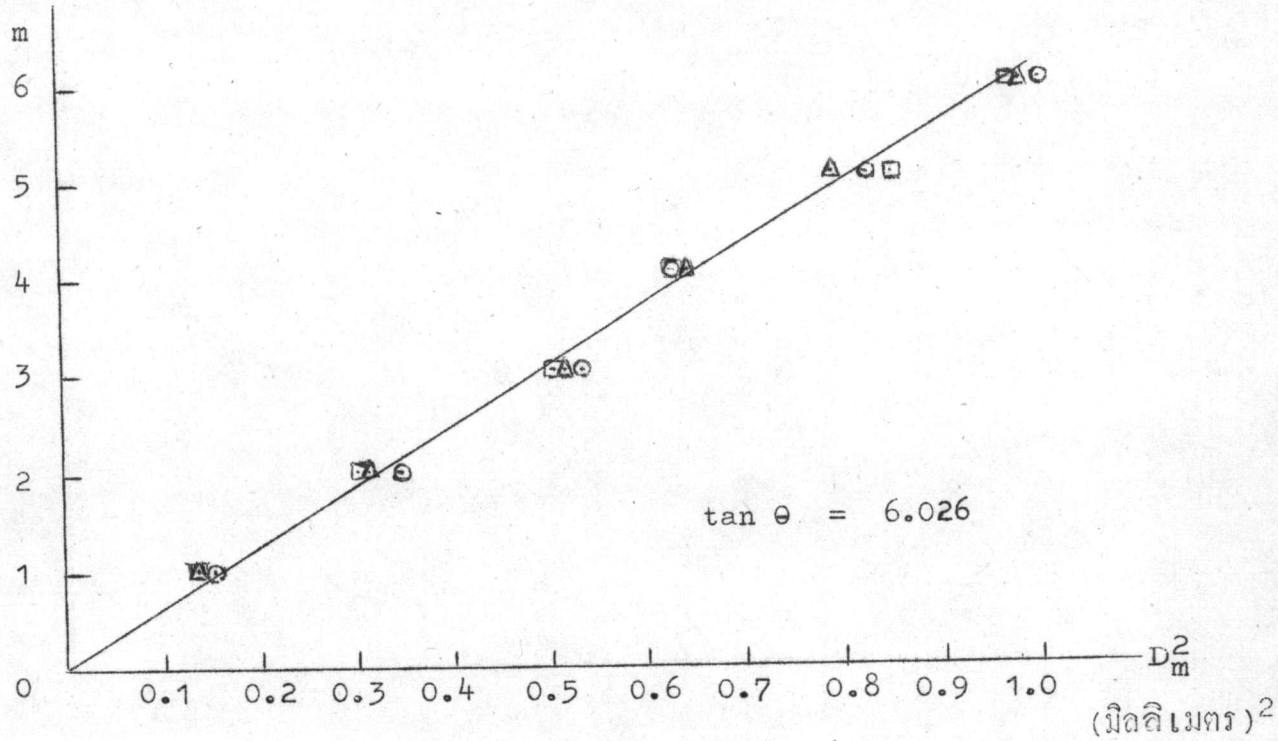
$$1'_4 = +20.06 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ระยะภาพของผิวที่ 4 มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่าภาพอยู่หลังผิวที่ 4 ดังนั้น จุดโฟกัส

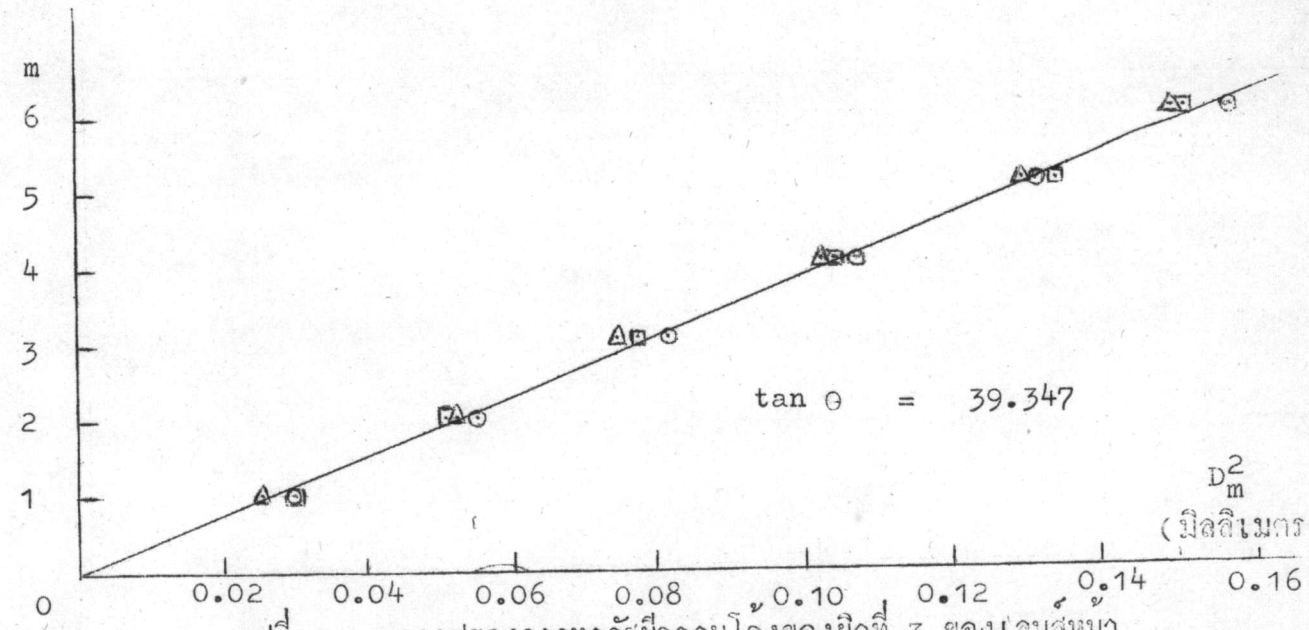
ทุติยภูมิอยู่ห่างจากผิวที่ 4 ของเลนส์เป็นระยะ +20.06 มิลลิเมตร และจากการแกะรอยรังสีในหัวข้อที่ 2 ของบทนี้ได้ว่า จุดมุขยสำคัญทุติยภูมิอยู่ห่างจากผิวที่ 4 ของเลนส์เป็นระยะ −1.6 มิลลิเมตร เพราะฉะนั้นทางยาวโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์นี้เป็น +21.66 มิลลิเมตร นั่นคือทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์เป็น +21.7 มิลลิเมตร



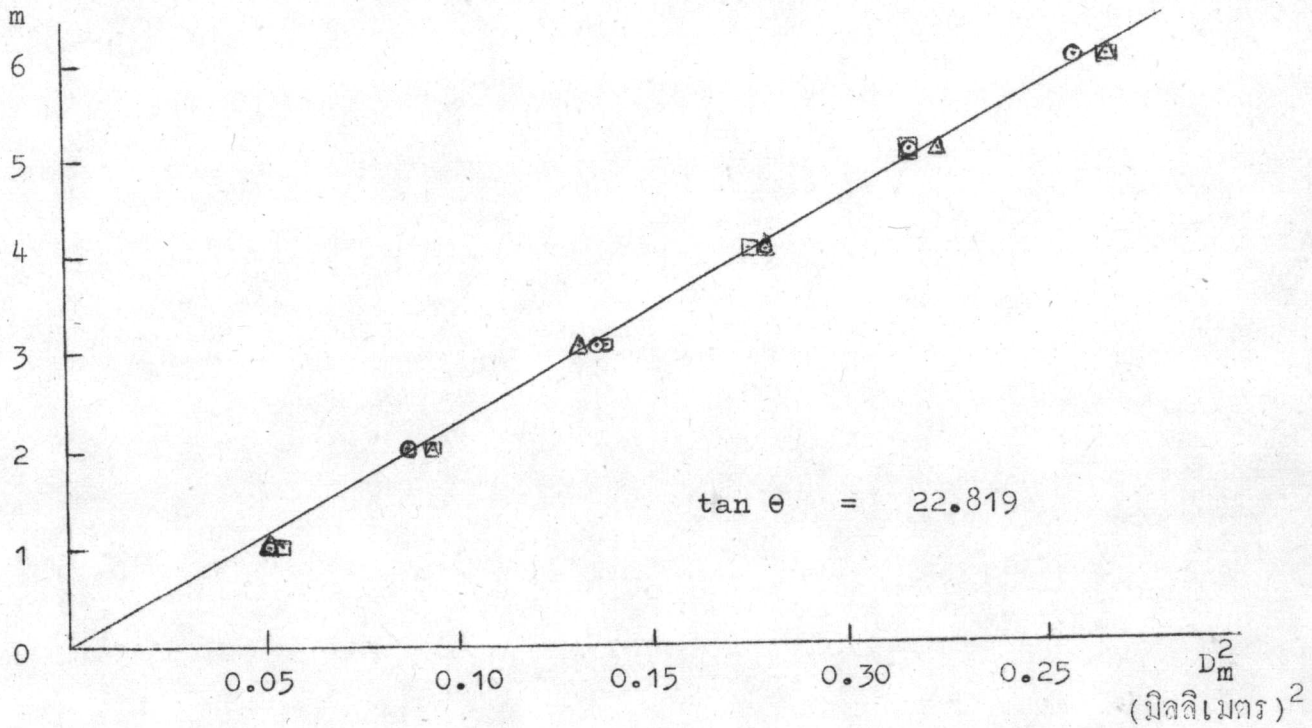
รูปที่ 4.6 กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน



รูปที่ 4.7 กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน



รูปที่ 4.8 กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 3 ของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน



รูปที่ 4.9 กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 4 ของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน

1.3 <u>การหารัศมีความโค้งของผิวเลนส์ประกอบของเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน</u> การหารัศมีความโค้งของผิวทั้งสองของเลนส์เว้าและเลนส์นูนของเลนส์ใกล้ตาปฏิบัติเช่นเดียวกับที่ทำมาแล้ว กราฟระหว่าง m กับ D_m^2 อันเนื่องมาจากผิวที่ 1 ของเลนส์เว้า ผิวที่ 2 ของเลนส์เว้า ผิวที่ 1 ของเลนส์นูน และผิวที่ 2 ของเลนส์นูน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 รูปที่ 4.11 รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 ตามลำดับ

จากกราฟในรูปที่ 4.10 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 10.889 (มิลลิเมตร)$^{-2}$ รัศมีความโค้งของผิวล่างซึ่งใช้ช่วยเป็น ∞ จากสมการ (4.3) คำนวณหารัศมีความโค้งของผิวบนได้เป็น +38.96 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวบนมีเครื่องหมายเป็นบวก หมายความว่าจุดศูนย์กลางของความโค้งของผิวบนอยู่

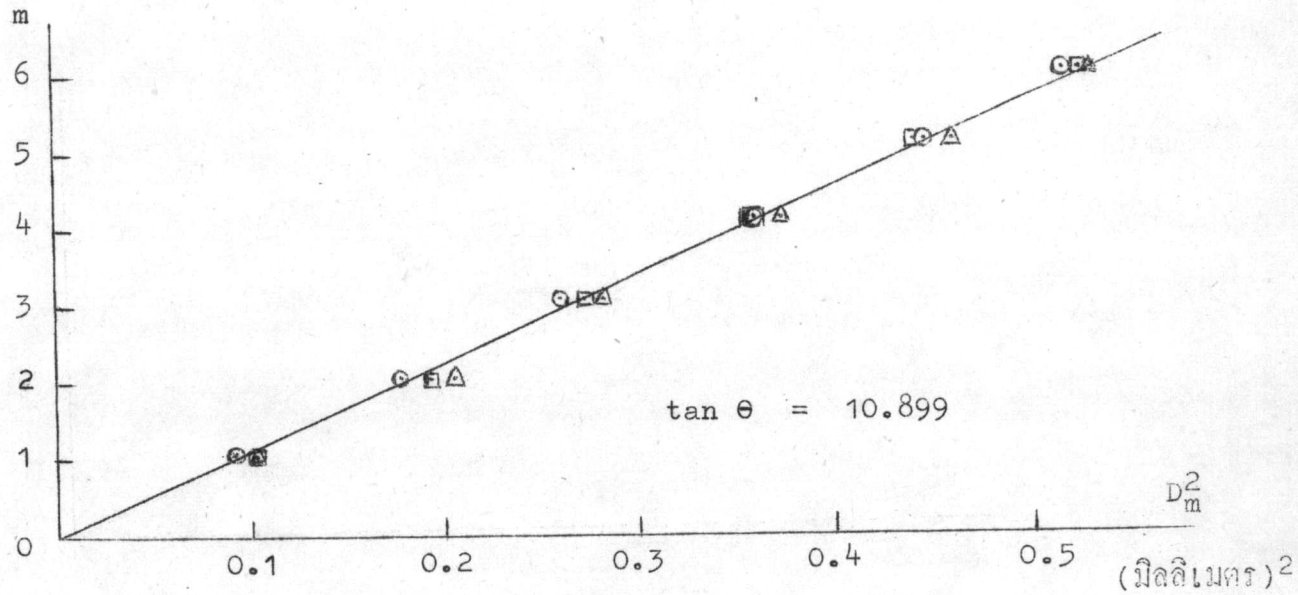
เหนือผิวโค้งนี้ ดังนั้น ผิวที่ 1 ของเลนส์เว้าจึงเป็นผิวนูน มีรัศมีความโค้งเป็น 38.96 มิลลิเมตร

จากกราฟในรูปที่ 4.11 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 6.390 (มิลลิเมตร)$^{-2}$ ผิวบนเป็นผิวนูนที่มีรัศมีความโค้งเป็น +10.81 มิลลิเมตร จากสมการ (4.3) คำนวณหารัศมีความโค้งของผิวล่างได้เป็น +12.91 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวล่างมีเครื่องหมายเป็นบวก หมายความว่า จุดศูนย์กลางของความโค้งของผิวล่างอยู่เหนือผิวโค้งนี้ ดังนั้น ผิวที่ 2 ของเลนส์เว้า จึงเป็นผิวเว้า มีรัศมีความโค้งเป็น 12.91 มิลลิเมตร

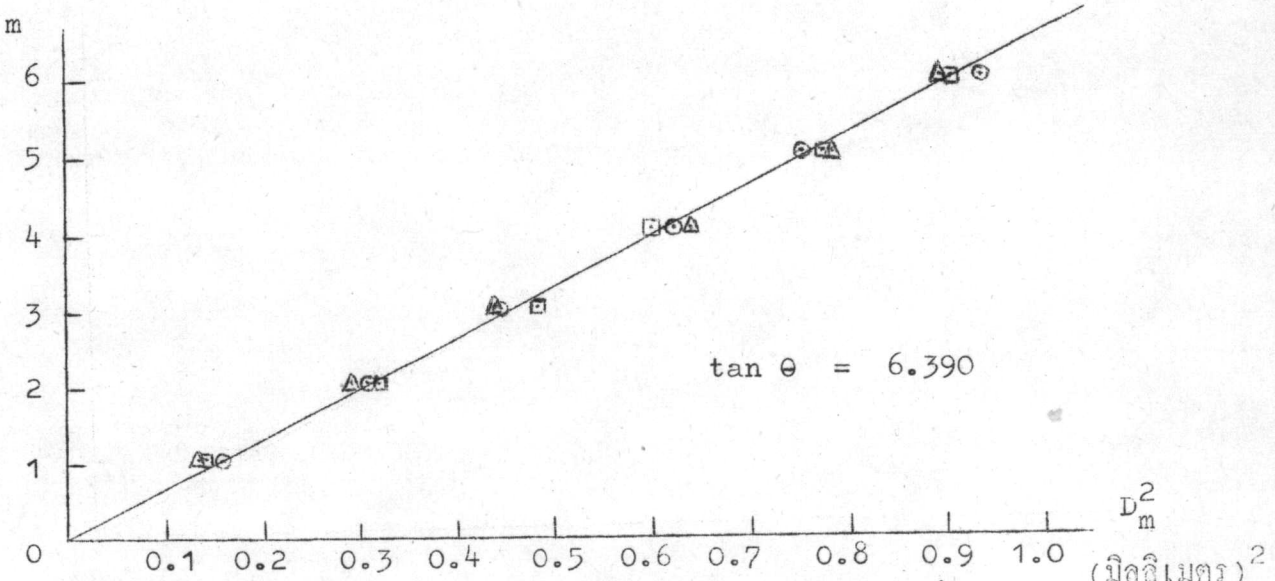
จากกราฟในรูปที่ 4.12 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 31.584 (มิลลิเมตร)$^{-2}$ รัศมีความโค้งของผิวล่างซึ่งใช้ช่วยเป็น ∞ จากสมการ (4.3) ได้รัศมีความโค้งของผิวบนได้เป็น +13.43 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวบนมีเครื่องหมายเป็นบวก หมายความว่าจุดศูนย์กลางของความโค้งของผิวบนอยู่เหนือผิวโค้งนี้ ดังนั้น ผิวที่ 1 ของเลนส์นูนจึงเป็นผิวนูน มีรัศมีความโค้งเป็น 13.43 มิลลิเมตร

จากกราฟในรูปที่ 4.13 ได้ค่าความชันของเส้นตรงเป็น 20.885 (มิลลิเมตร)$^{-2}$ รัศมีความโค้งของผิวล่างซึ่งใช้ช่วยเป็น ∞ จากสมการ (4.3) คำนวณหารัศมีความโค้งของผิวบนได้เป็น +20.31 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวบนมีเครื่องหมายเป็นบวก หมายความว่าจุดศูนย์กลางของความโค้งของผิวบนอยู่เหนือผิวโค้งนี้ ดังนั้น ผิวที่ 2 ของเลนส์นูน จึงเป็นผิวนูน มีรัศมีความโค้งเป็น 20.31 มิลลิเมตร

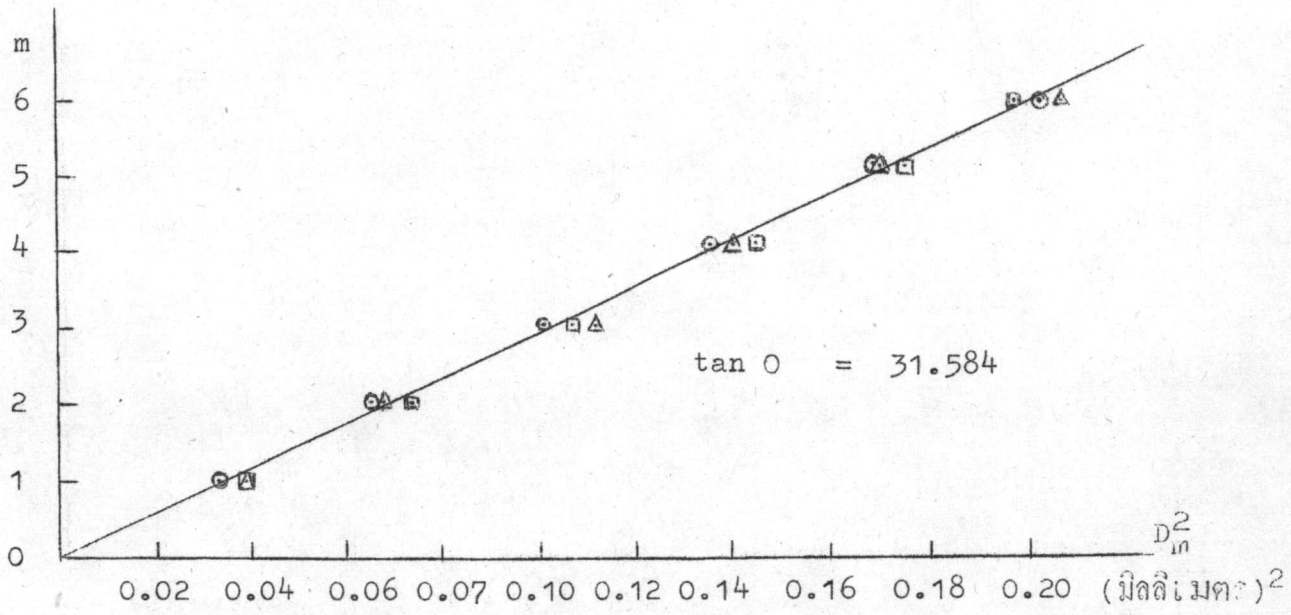
โดยใช้หัวข้อที่ 1.4 ของบทที่ 1 พิจารณาเครื่องหมายของรัศมีความโค้งของผิวเลนส์ได้ว่า เลนส์อรงค์นี้ประกอบด้วยเลนส์เว้าที่มีผิวที่ 1 เป็นผิวนูน และผิวที่ 2 เป็นผิวเว้า มีรัศมีความโค้งของผิวเป็น +38.96 มิลลิเมตร และ +12.91 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะระหว่างขั้วผิวเป็น 1.8 มิลลิเมตร และเลนส์นูนที่มีผิวที่ 1 เป็นผิวนูน และผิวที่ 2 เป็นผิวเว้า มีรัศมีความโค้งของผิวเป็น +13.43 มิลลิเมตร และ −20.31 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะระหว่างขั้วผิวเป็น 3.5 มิลลิเมตร



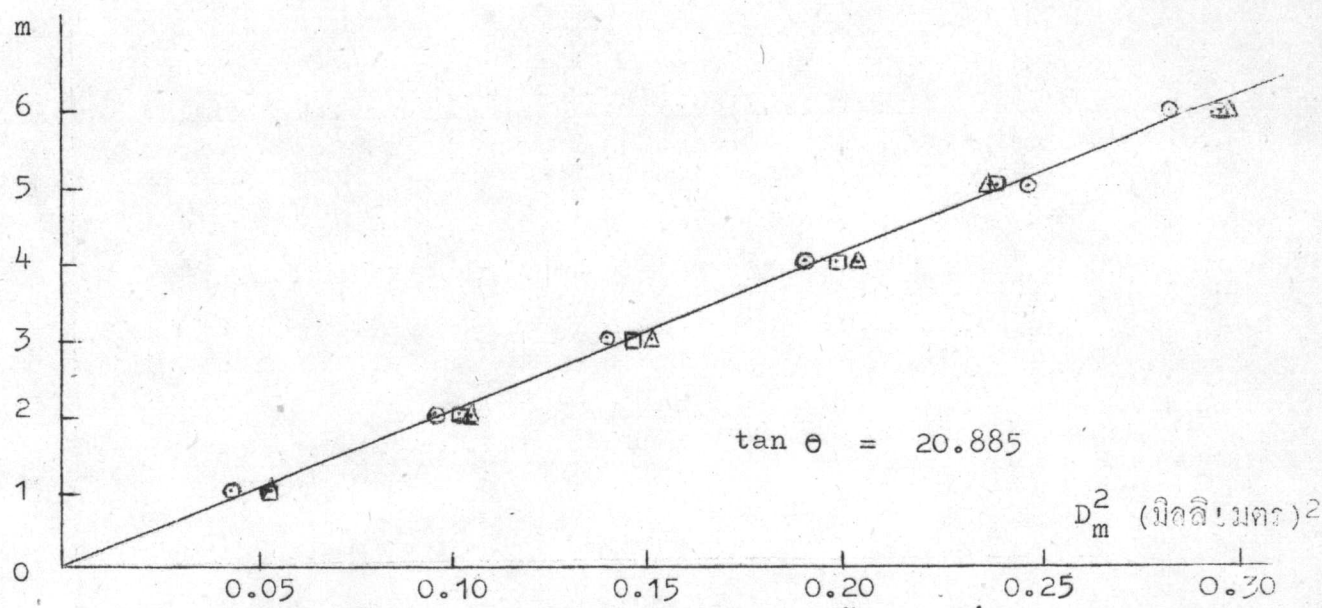
รูปที่ 4.10 กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์ใกล้ตา โดยวิธีวงแหวนนิวตัน



รูปที่ 4.11 กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์ใกล้ตา โดยวิธีวงแหวนนิวตัน



รูปที่ 4.12 กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 3 ของเลนส์ใกล้ตา โดยวิธีวงแหวนนิวตัน



รูปที่ 4.13 กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 4 ของเลนส์ใกล้ตา โดยวิธีวงแหวนนิวตัน

เมื่อทราบค่ารัศมีความโค้งของผิวเลนส์เว้าและเลนส์นูนแล้ว นำเลนส์ทั้งสองมาประกบกันเพื่อให้เป็นเลนส์คู่ประกบ โดยใช้ซีเมนต์ที่มีดัชนีหักเห 1.55 เป็นตัวเชื่อม ดังนั้น เลนส์คู่ประกบที่ได้มีรัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ผิวที่ 2 ผิวที่ 3 และผิวที่ 4 เป็น +38.96 มิลลิเมตร +12.91 มิลลิเมตร +13.43 มิลลิเมตร และ −20.31 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 ประกบกันไม่สนิท ระยะห่างของขั้วผิวทั้งสอง ซึ่งมีซีเมนต์อยู่ระหว่างกลาง คำนวณได้เป็น 0.01 มิลลิเมตร ในการหาตำแหน่งของจุดโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์นี้เป็นการหาตำแหน่งของวัตถุ ซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายของเลนส์ เพื่อที่จะให้ภาพเกิดที่อนันต์ทางด้านขวาของเลนส์ โดยใช้สมการ (2.17)

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{R}$$

สามารถหาตำแหน่งของวัตถุเมื่อภาพสุดท้ายเกิดที่อนันต์

โดยที่ทราบว่าภาพที่หักเหผ่านผิวที่ 4 ซึ่งมีรัศมีความโค้งเป็น −20.31 มิลลิเมตร อยู่ที่อนันต์ ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 4 เป็น 1.62270 และ 1.0 ตามลำดับ แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.17) หาตำแหน่งวัตถุของผิวที่ 4 ได้

$$l_4 = -52.93 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ระยะวัตถุของผิวที่ 4 มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าวัตถุอยู่หน้าผิวที่ 4 และเป็นภาพของผิวที่ 3 อยู่ห่างจากผิวที่ 3 เป็นระยะ −49.43 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 3 เป็น +13.43 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 3 เป็น 1.55 และ 1.62270 แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.17) หาตำแหน่งวัตถุของผิวที่ 3 ได้

$$l_3 = -40.53 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ระยะวัตถุของผิวที่ 3 มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าวัตถุอยู่หน้าผิวที่ 3 และเป็นภาพของผิวที่ 2 อยู่ห่างจากผิวที่ 2 เป็นระยะ −40.52 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 2 เป็น + 12.91 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 2 เป็น 1.69865

และ 1.55 ตามลำดับ แทนค่าต่าง ๆ ในสมการ (2.17) หาตำแหน่งวัตถุของผิวที่ 2 ได้

$$l_2 = -63.53 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ระยะวัตถุของผิวที่ 2 มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าวัตถุอยู่หน้าผิวที่ 2 และเป็นภาพของผิวที่ 1 อยู่ห่างจากผิวที่ 1 เป็นระยะ −61.73 มิลลิเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 เป็น +38.96 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางหน้าและหลังผิวที่ 1 เป็น 1.0 และ 1.69865 ตามลำดับ แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (2.17) หาตำแหน่งของวัตถุของผิวที่ 1 ได้

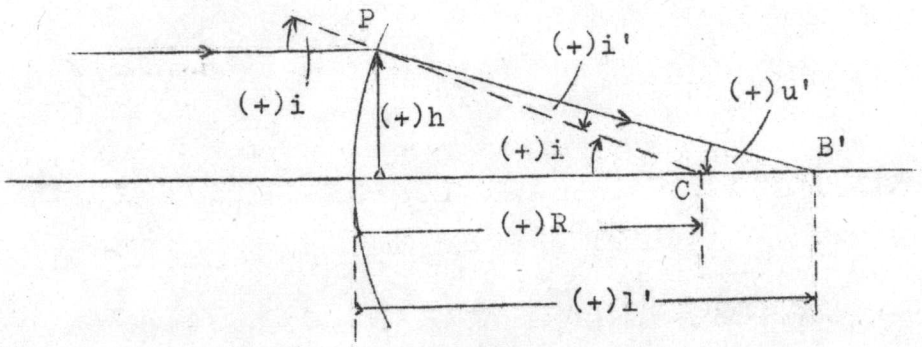
$$l_1 = -22.00 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ระยะวัตถุของผิวที่ 1 มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าวัตถุอยู่หน้าผิวที่ 1 ดังนั้น จุดโฟกัสปฐมภูมิอยู่ห่างจากผิวที่ 1 ของเลนส์เป็นระยะ −22.00 มิลลิเมตร และจากการแกะรอยรังสีในหัวข้อที่ 2 ของบทนี้ได้ว่า จุดมุขยสำคัญปฐมภูมิ อยู่ห่างจากผิวที่ 1 ของเลนส์เป็นระยะ +2.3 มิลลิเมตร เพราะฉะนั้นทางยาวโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์นี้เป็น −24.30 มิลลิเมตร นั่นคือ ทางยาวโฟกัสของเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์เป็น +24.3 มิลลิเมตร

2. การหาตำแหน่งของจุดโฟกัสของเลนส์โดยการแกะรอยรังสี[1]

การคำนวณหาตำแหน่งของจุดโฟกัสของเลนส์ที่สร้างขึ้นใช้วิธีการแกะรอยรังสีซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4 ของบทที่ 2 โดยการแกะรอยรังสีใกล้แกนที่ขนานกับแกนมุขยสำคัญจนได้ตำแหน่งภาพซึ่งเป็นจุดโฟกัสของเลนส์ และยังสามารถหาตำแหน่งของจุดมุขยสำคัญที่สอดคล้องกับจุดโฟกัสของเลนส์ได้ ดังนั้น ระยะห่างของจุดโฟกัสกับจุดมุขยสำคัญที่สอดคล้องกันจะเป็นทางยาวโฟกัสของเลนส์นั้น และด้วยวิธีนี้สามารถหาความคลาดทรงกลมตามยาวเชิงรังสีได้อีก โดยแกะรอยรังสีขอบเลนส์ที่ขนานกับแกนมุขยสำคัญจนได้ตำแหน่งภาพ ผลต่างของตำแหน่งภาพที่ได้จากการแกะรอยรังสีขอบเลนส์และรังสีใกล้แกนเป็นปริมาณความคลาดทรงกลมตามยาวเชิงรังสี

สำหรับการแกะรอยของรังสีตกกระทบที่ขนานกับแกนมุขยสำคัญ ดังรูปที่ 4.14 ได้ว่า



รูปที่ 4.14 การหักเหที่ผิวทรงกลมเดี่ยว เมื่อรังสีตกกระทบเป็นรังสีขนานกับแกน

$$\sin i = \frac{h}{R}$$

และใช้สมการ (2.11) ถึงสมการ (2.15) ซึ่งมีรูปสมการตามลำดับเป็น

$$\sin i = \frac{(1 - R) \sin u}{R}$$

$$\alpha = u + i = u' + i'$$

$$u' = u + i - i'$$

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

และ

$$l' - R = \frac{R \sin i'}{\sin u'}$$

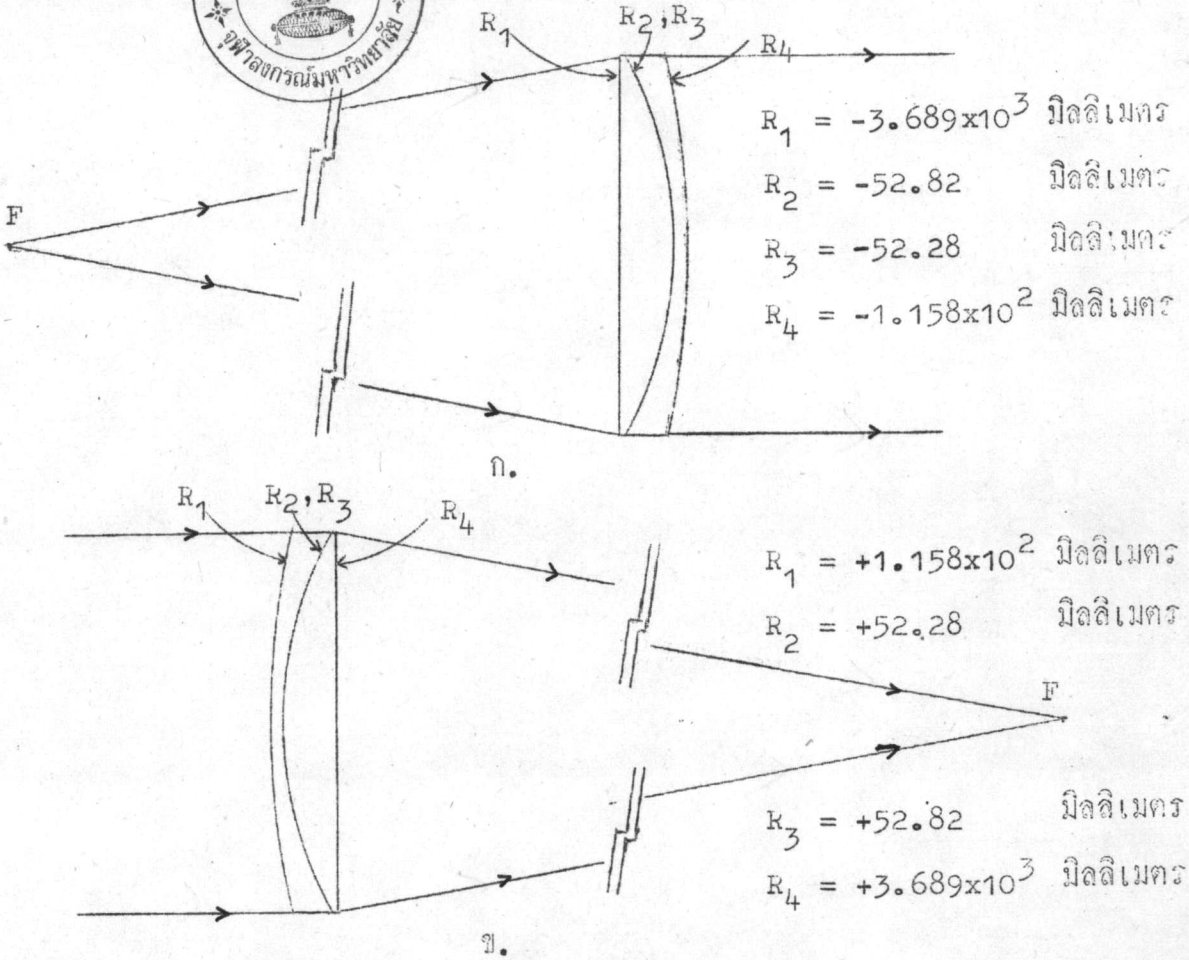
โดยใช้สมการดังกล่าวแกะรอยของรังสีตกกระทบที่ขนานกับแกนจากผิวแรกไปสู่ผิวถัด ๆ ไป สามารถหาระยะห่างของจุดโฟกัสจากผิวสุดท้ายของเลนส์ได้ กรณีที่จะแกะรอยรังสีใกล้แกนสมการ (2.13) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\sin u' = \sin u + \sin i - \sin i'$$

2.1 <u>การหาตำแหน่งของจุดโฟกัสของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์</u> ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1 ของบทที่ 1 ว่าคอลลิเมเตอร์เป็นทัศนอุปกรณ์ที่ให้ลำแสงขนาน โดยวางต้นกำเนิดแสงไว้ที่จุดโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์นูน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทราบตำแหน่งของจุดโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์ เพื่อใช้ในการสร้างคอลลิเมเตอร์

จากการทดสอบวงแหวนนิวตัน ทำให้ทราบรัศมีความโค้งของผิวต่าง ๆ ของเลนส์ว่า รัศมีความโค้งของผิวที่1(R_1) เป็น -3.689×10^{3} มิลลิเมตร ผิวที่ 2 (R_2) เป็น −52.82 มิลลิเมตร ผิวที่ 3 (R_3) เป็น −52.28 มิลลิเมตร และผิวที่ 4 (R_4) เป็น -1.1589×10^{2} มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 1 กับผิวที่ 2 (n_{12}) เป็น 1.62270 ระยะห่างระหว่างขั้วของผิวทั้งสอง (t_{12}) เป็น 7.4 มิลลิเมตร เนื่องจากผิวที่ 2 และผิวที่ 3 ประกบกันไม่สนิท ดังนั้น ระยะระหว่างขั้วของผิวที่ 2 และผิวที่ 3 (t_{23}) คำนวณได้เป็น 0.07 มิลลิเมตร และดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 2 และผิวที่ 3 ซึ่งเป็นซีเมนต์ (n_{23}) มีค่าเป็น 1.55 ระยะระหว่างขั้วของผิวที่ 3 และผิวที่ 4 (t_{34}) เป็น 1.4 มิลลิเมตร และดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวทั้งสอง (n_{34}) เป็น 1.69865 เพื่อความสะดวกในการแกะรอยรังสี เพื่อหาระยะระหว่างจุดโฟกัสปฐมภูมิกับผิวที่ 1 ของเลนส์ จำเป็นต้องแกะรอยของรังสีขนานจากผิวที่ 4 มายังผิวที่ 1 และเนื่องจากได้กำหนดว่า การแกะรอยรังสีต้องแกะรอยรังสีจากซ้ายมือ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนผิวที่ 4 อยู่ทางซ้ายมือแทนผิวที่ 1 และรัศมีความโค้งของผิวต่าง ๆ จะมีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับของเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.15

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 ก. รูปร่างจริงของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์
ข. รูปร่างของเลนส์ที่ใช้ในการแกะรอยรังสี

เพราะฉะนั้น รูปร่างของเลนส์ที่ใช้ในการแกะรอยรังสี จะเป็นดังนี้ รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 (R_1) เป็น $+1.158 \times 10^2$ มิลลิเมตร ผิวที่ 2 (R_2) เป็น +52.28 มิลลิเมตร ผิวที่ 3 (R_3) เป็น +52.82 มิลลิเมตร และผิวที่ 4 (R_4) เป็น $+3.689 \times 10^3$ มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 1 กับผิวที่ 2 (n_{12} เป็น 1.69865 ระยะระหว่างขั้วผิวทั้งสอง (t_{12}) เป็น 1.4 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 (n_{23}) เป็น 1.55 ระยะระหว่างขั้ว (t_{23}) เป็น 0.07 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 3 กับผิวที่ 4 (n_{34})

เป็น 1.62270 ระยะระหว่างขั้วของผิวทั้งสอง (t_{34}) เป็น 7.4 มิลลิเมตร

ในที่นี้จะแกะรอยรังสี 2 รังสีด้วยกัน คือ รังสีขอบเลนส์ซึ่งสูงจากแกนเป็นระยะ 20.0 มิลลิเมตร กับรังสีใกล้แกน ผลของการแกะรอยรังสีทั้งสอง แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลจากการแกะรอยรังสีใกล้แกนและรังสีขอบเลนส์ของเลนส์**ดอลลิเมเตอร์**

	รังสีขอบเลนส์	รังสีใกล้แกน
u_1	0°	0
$\sin i_1 = h/R_1$	+0.172711	+0.172711
$\sin i'_1 = \frac{n_1}{n_{12}} \sin i_1$	+0.101675	+0.101675
i_1	+9.945480°	
i'_1	+5.835633°	
$u'_1 = u_1 + i_1 - i'_1$	+4.109847°	
$\sin u'_1$	+0.071669	+0.071036
$l'_1 - R_1 = \frac{R_1 \sin i'_1}{\sin u'_1}$	+164.282535	+165.746453
l'_1	+280.082535	+281.546453
$l_2 = l'_1 - t_{12}$	+278.682535	+280.146453

	รังสีขอบเลนส์	รังสีใกล้แกน
$l_2 - R_2$	+226.402535	+227.866453
$(l_2 - R_2)/R_2$	+4.330576	+4.358578
$u_2 = u'_1$	+4.109847°	
$\sin i_2 = \frac{(l_2-R_2)\sin u_2}{R_2}$	+0.310368	+0.309616
$\sin i'_2 = \frac{n_{12}}{n_{23}} \sin i_2$	+0.340133	+0.339309
i'_2	+19.884977°	
i_2	+18.081409°	
$u'_2 = u_2 + i_2 - i'_2$	+2.306279	
$\sin u'_2$	+0.040241	+0.041343
$l'_2 - R_2 = \frac{R_2 \sin i'_2}{\sin u'_2}$	+441.891435	+429.070811
l'_2	+494.171435	+481.350811
$l_3 = l'_2 - t_{23}$	+494.101435	+481.280811
$l_3 - R_3$	+441.281435	+428.460811

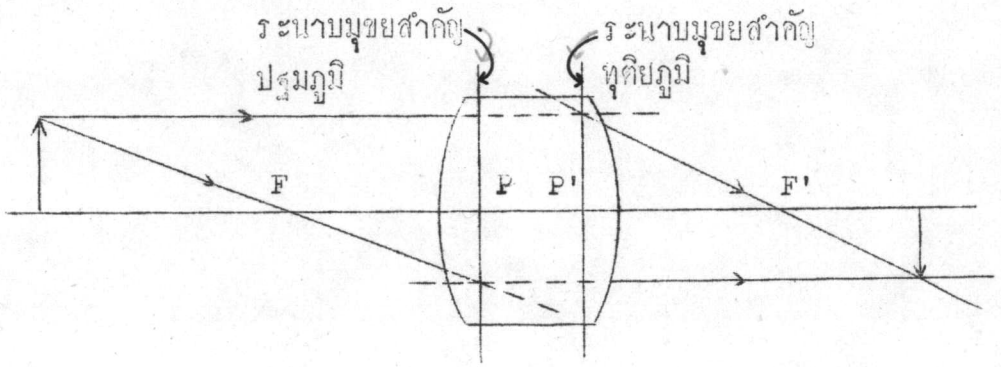
	รังสีขอบเลนส์	รังสีใกล้แกน
$(l_3 - R_3)/R_3$	+8.354438	+8.111715
$u_3 = u'_2$	+2.306279°	
$\sin i_3 = \frac{(l_3 - R_3) \sin u'_2}{R_3}$	+0.336191	+0.335363
$\sin i'_3 = \frac{n_{23}}{n_{34}} \sin i_3$	+0.321129	+0.320338
i'_3	+18.731216°	
i_3	+19.644978°	
$u'_3 = u_3 + i_3 - i'_3$	+3.220041°	
$\sin u'_3$	+0.056171	+0.056368
$l'_3 - R_3 = \frac{R_3 \sin i'_3}{\sin u'_3}$	+301.971369	+300.174801
l'_3	+354.791369	+352.994801
$l_4 = l'_3 - t_{34}$	+347.391369	+345.594801
$l_4 - R_4$	-3341.608631	-3343.405199
$(l_4 - R_4)/R_4$	-0.905830	-0.906317

	รังสีขอบเลนส์	รับสีใกล้แกน
$u_4 = u'_3$	+3.220041°	
$\sin i_4 = \frac{(l_3 - R_3) \sin u'_3}{R_4}$	-0.050881	-0.051087
$\sin i'_4 = \frac{n_{34}}{n_4} \sin i_4$	-0.082565	-0.082899
i'_4	-4.736017°	
i_4	-2.916526°	
$u'_4 = u_4 + i_4 - i'_4$	+5.039532°	
$\sin u'_4$	+0.087843	+0.088180
$l'_4 - R_4 = R_4 \frac{\sin i'_4}{\sin u'_4}$	-3467.348394	-3468.069981
l'_4	+221.651606	+220.930019
$\delta l'_4$	+0.721587	

จุดโฟกัสอยู่ห่างจากผิวที่ 4 เป็นระยะ 220.9 มิลลิเมตร

เมื่อหันเลนส์กลับสู่ลักษณะที่ใช้จริง (รูป 4.15 ก.) จะได้ว่า จุดโฟกัสปฐมภูมิอยู่ห่างจากผิวที่ 1 ของเลนส์ไปทางซ้าย 220.9 มิลลิเมตร หรืออยู่ห่างจากผิวที่ 4 ของเลนส์เป็น 229.7 มิลลิเมตร

ในทางทัศนศาสตร์เกาส์เซียน (Gaussian optics) ระนาบมุขยสำคัญที่สอดคล้องกับจุดโฟกัสเป็นระนาบที่เกิดจากส่วนต่อของรังสีที่ขนานกับแกนมุขยสำคัญตัดกับส่วนต่อของรังสีที่พุ่งออกหรือพุ่งเข้าจุดโฟกัสนั้น เช่น ระนาบมุขยสำคัญปฐมภูมิ คือ ระนาบที่เกิดจากส่วนต่อของรังสีที่ขนานกับแกนมุขยสำคัญตัดกับส่วนต่อของรังสีที่พุ่งออกจากจุดโฟกัสปฐมภูมิ (F) ดังรูปที่ (4.16) และระนาบมุขยสำคัญทุติยภูมิ คือ ระนาบที่เกิดจากส่วนต่อของรังสีที่ขนานกับแกนมุขยสำคัญ ตัดกับส่วนต่อของรังสีที่พุ่งเข้าสู่จุดโฟกัสทุติยภูมิ (F')



รูปที่ 4.16 ตำแหน่งของระนาบมุขยสำคัญ

ดังนั้น ถ้าทราบค่าไซน์ของมุมชันของรังสีใกล้แกนที่พุ่งออกหรือพุ่งเข้าจุดโฟกัส และรังสีขนานกับแกนที่พิจารณา สามารถหาตำแหน่งของระนาบมุขยสำคัญได้

สำหรับการหาตำแหน่งของระนาบมุขยสำคัญของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ โดยที่ทราบค่าไซน์ของมุมชันของรังสีใกล้แกนที่พุ่งออกจากจุดโฟกัสปฐมภูมิเป็น −0.088180 และรังสีขนานที่พิจารณาอยู่สูงจากแกนเป็น 20 มิลลิเมตร ได้ว่า ระยะระหว่างจุดโฟกัสปฐมภูมิกับระนาบมุขยสำคัญปฐมภูมิเป็น −226.8 มิลลิเมตร หรือก็คือทางยาวโฟกัสของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์เป็น + 226.8 มิลลิเมตร จากการแกะรอยของรังสีใกล้แกนทราบว่าจุดโฟกัสปฐมภูมิอยู่ห่างจากผิวที่ 1 เป็น −220.9 มิลลิเมตร ดังนั้น ระนาบมุขยสำคัญปฐมภูมิอยู่ห่างจากผิวที่ 1 ไปทางขวาเป็นระยะ 5.9 มิลลิเมตร

2.2 <u>การหาตำแหน่งของจุดโฟกัสของเลนส์หน้ากล้องจุลทัศน์</u> ในการสร้างกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน จำเป็นที่จะต้องทราบตำแหน่งจุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์หน้าและจุดโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์ใกล้ตา เพื่อที่จะได้จัดให้จุดโฟกัสของเลนส์ทั้งสองอยู่ห่างจากกันตามกำหนดได้

การแกะรอยรังสีเพื่อหาจุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์หน้า ทำได้เช่นเดียวกับในหัวข้อ 2.1 ของบทนี้ การทดสอบโดยวิธีวงแหวนนิวตันทำให้ทราบรัศมีความโค้งของผิวต่าง ๆ ดังนี้ รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 (R_1) เป็น +35.26 มิลลิเมตร ผิวที่ 2 (R_2) เป็น + 12.77 มิลลิเมตร ผิวที่ 3 (R_3) เป็น + 10.81 มิลลิเมตร และผิวที่ 4 (R_4) เป็น −18.59 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 1 กับผิวที่ 2 (n_{12}) เป็น 1.69865 ระยะระหว่างขั้วของผิวทั้งสอง (t_{12}) เป็น 3.5 มิลลิเมตร เนื่องจากขั้วของผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 สัมผัสกัน ดังนั้น ระยะระหว่างขั้วผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 (t_{23}) เป็นศูนย์ และดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวทั้งสอง (n_{23}) เป็น 1.55 ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 3 กับผิวที่ 4 (n_{34}) เป็น 1.62270 และระยะระหว่างขั้วของผิวทั้งสอง (t_{34}) เป็น 3.8 มิลลิเมตร

ในที่นี้จะแกะรอยรังสี 2 รังสี ด้วยกัน คือ รังสีขอบเลนส์ ซึ่งอยู่สูงจากแกนเป็นระยะ 5.0 มิลลิเมตร และรังสีใกล้แกน ผลของการแกะรอยรังสีทั้งสองแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลจากการแกะรอยรังสีใกล้แกนกับรังสีขอบเลนส์ของเลนส์หน้า

	รังสีขอบเลนส์	รังสีใกล้แกน
u_1	0°	0
$\sin i_1 = h/R_1$	+0.141804	+0.141804
$\sin i'_1 = \frac{n_1}{n_{12}} \sin i_1$	+0.083480	+0.083480
i_1	+8.152249°	
i'_1	+4.788625°	
$u'_1 = u_1 + i_1 - i'_1$	+3.363624°	
$\sin u'_1$	+0.058673	+0.058324
$l'_1 - R_1 = \frac{R_1 \sin i'_1}{\sin u'_1}$	+50.167961	+50.468157
l'_1	+85.427961	+85.728157
$l_2 = l'_1 - t_{12}$	+81.927961	+82.228157
$l_2 - R_2$	+69.157961	+69.458157
$(l_2 - R_2)/R_2$	+5.415659	+5.439167

	รังสีขอบเลนส์	รังสีใกล้แกน
$u_2 = u'_1$	+3.363624°	
$\sin i_2 = \frac{(l_2 - R_2) \sin u'_1}{R_2}$	+0.317753	+0.317234
$\sin i'_2 = \frac{n_{12}}{n_{23}} \sin i_2$	+0.348227	+0.347658
i'_2	+20.378909°	
i_2	+18.527090°	
$u'_2 = u_2 + i_2 - i'_2$	+1.511805°	
$\sin u'_2$	+0.026383	+0.027900
$l'_2 - R_2 = \frac{R_2 \sin i'_2}{\sin u'_2}$	+168.550157	+159.125185
l'_2	+181.320157	+171.895185
$l_3 = l'_2 - t_{23}$	+181.320157	+171.895185
$l_3 - R_3$	+170.510157	+161.085185
$(l_3 - R_3) / R_3$	+15.773373	+14.901497
$uu_3 = u'_2$	+1.511805°	
$\sin i_3 = \frac{(l_3 - R_3) \sin u'_2}{R_3}$	+0.416149	+0.415752
$\sin i'_3 = \frac{n_{23}}{n_{34}} \sin i_3$	+0.397505	+0.397125

	รังสีขอบเลนส์	รังสีใกล้แกน
i'_3	+23.422296°	
i_3	+24.591695°	
$u'_3 = u_3 + i_3 - i'_3$	+2.681204°	
$\sin u'_3$	+0.046779	+0.046502
$l'_3 - R_3 = \frac{R_3 \sin i'_3}{\sin u'_3}$	+91.858078	+92.316116
l'_3	+102.668078	+103.126916
$l_4 = l'_3 - t_{34}$	+98.868078	+99.326916
$l_4 - R_4$	+117.458078	+117.916916
$(l_4 - R_4) / R_4$	-6.318347	-6.343029
$u_4 = u'_3$	+2.681204°	
$\sin i_4 = \frac{(l_4 - R_4) \sin u'_3}{R_4}$	-0.295566	-0.294963

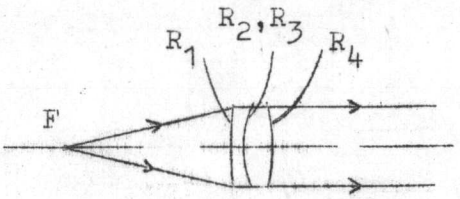
	รังสีขอบเลนส์	รังสีใกล้แกน
$\sin i'_4 = \frac{n_{34}}{n_4} \sin i_4$	-0.479615	-0.478636
i'_4	-28.660260°	
i_4	-17.191480°	
$u'_4 = u_4 + i_4 - i'_4$	+14.149984°	
$\sin u'_4$	+0.244461	+0.230175
$l'_4 - R_4 = \frac{R_4 \sin i'_4}{\sin u'_4}$	+36.472251	+38.656862
l'_4	+17.882251	+20.066862
$\delta l'_4$	-2.184611	

นั่นคือ จุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์ อยู่ห่างจากผิวที่ 4 ของเลนส์หน้าเป็นระยะ 20.1 มิลลิเมตร

การหาตำแหน่งของระนาบมุขยสำคัญทุติยภูมิของเลนส์นี้ ทำเช่นเดียวกับเลนส์สำหรับกอลลิเมเตอร์ โดยที่ทราบค่าไซน์ของมุมชันของรังสีใกล้แกนที่พุ่งเข้าสู่จุดโฟกัส

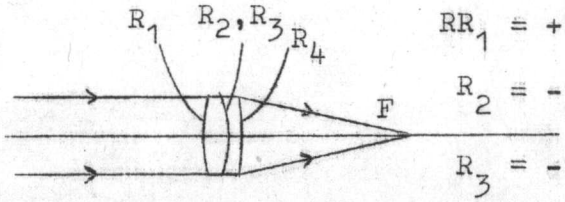
ทุติยภูมิเป็น +0.230175 และรังสีขนานที่พิจารณาสูงจากแกนเป็น 5 มิลลิเมตร ได้ว่า ระยะระหว่างจุดโฟกัสทุติยภูมิกับระนาบมุขยสำคัญทุติยภูมิเป็น 21.7 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นทางยาวโฟกัสของเลนส์นี้ จากการแกะรอยของรังสีใกล้แกนทราบว่า จุดโฟกัสทุติยภูมิอยู่ห่างจากผิวที่ 4 เป็น 20.1 มิลลิเมตร ดังนั้น ระนาบมุขยสำคัญอยู่ห่างจากผิวที่ 4 ไปทางซ้ายเป็นระยะ 1.6 มิลลิเมตร

2.3 <u>การหาตำแหน่งของจุดโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์ใกล้ตา</u> จุดโฟกัสที่ต้องการทราบตำแหน่งคือ จุดโฟกัสปฐมภูมิ รัศมีความโค้งของผิวต่าง ๆ ของเลนส์ซึ่งได้จากการทดสอบวงแหวนนิวตัน ได้เป็นดังนี้ รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 (R_1) เป็น +38.96 มิลลิเมตร ผิวที่ 2 (R_2) เป็น +12.91 มิลลิเมตร ผิวที่ 3 (R_3) เป็น +13.43 มิลลิเมตร และผิวที่ 4 (R_4) เป็น −20.31 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 1 กับผิวที่ 2 (n_{12}) เป็น 1.69865 ระยะระหว่างขั้วของผิวทั้งสอง (t_{12}) เป็น 1.8 มิลลิเมตร เนื่องจากผิวที่ 2 และผิวที่ 3 ประกบไม่สนิท ดังนั้น ระยะระหว่างขั้วของผิวทั้งสอง (t_{23}) เป็น −0.01 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวทั้งสอง (n_{23}) เป็น 1.55 ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 3 กับผิวที่ 4 (n_{34}) เป็น 1.62270 และระยะระหว่างขั้วของผิวทั้งสอง (t_{34}) เป็น 3.5 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากจุดโฟกัสที่ต้องการทราบตำแหน่ง คือ จุดโฟกัสปฐมภูมิ ดังนั้น เพื่อความสะดวกจึงต้องแกะรอยของรังสีขนานจากผิวที่ 4 มายังผิวที่ 1 เช่นเดียวกับการแกะรอยรังสีขนานของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ ในหัวข้อที่ 2.1 ของบทนี้ ดังนั้นรูปร่างของเลนส์ที่ใช้ในการแกะรอยรังสีจะเป็นดังแสดงในรูป 4.17 รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 (R_1) เป็น +20.31 มิลลิเมตร ผิวที่ 2 (R_2) เป็น −13.43 มิลลิเมตร ผิวที่ 3 (R_3) เป็น −12.91 มิลลิเมตร และผิวที่ 4 (R_4) เป็น -38.96 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 1 กับ ผิวที่ 2 (n_{12}) เป็น 1.62270 ระยะระหว่างขั้วของผิวทั้งสอง (t_{12}) เป็น 3.5 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 2 กับผิวที่ 3 (n_{34}) เป็น 1.55 ระยะระหว่างขั้วของผิวทั้งสอง (t_{23}) เป็น 0.01 มิลลิเมตร ดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่ 3 กับผิวที่ 4 (n_{34}) เป็น 1.69865 ระยะระหว่างขั้วของผิวทั้งสอง (t_{34}) เป็น 1.8 มิลลิเมตร



R_1 = +38.96 มิลลิเมตร
R_2 = +12.91 มิลลิเมตร
R_3 = +13.43 มิลลิเมตร
R_4 = -20.31 มิลลิเมตร

ก.



RR_1 = +20.31 มิลลิเมตร
R_2 = -13.43 มิลลิเมตร
R_3 = -12.91 มิลลิเมตร
R_4 = -38.96 มิลลิเมตร

ข.

รูปที่ 4.17 ก. รูปร่างจริงของเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์
ข. รูปร่างของเลนส์ใกล้ตาที่ใช้ในการแกะรอยรังสี

ในที่นี้จะแกะรอยรังสีขอบเลนส์ ซึ่งสูงห่างจากแกนเป็นระยะ 5.0 มิลลิเมตร กับรังสีใกล้แกน ผลของการแกะรอยรังสีทั้งสองแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลจากการแกะรอยรังสีใกล้แกนกับรังสีขอบเลนส์ของเลนส์ใกล้ตา

	รังสีขอบเลนส์	รังสีใกล้แกน
u_1	0°	0
$\sin i_1 = h/R_1$	+0.246184	+0.246184
$\sin i'_1 = \frac{n_1 \sin i_1}{n_{12}}$	+0.151713	+0.151713

	รังสีขอบเลนส์	รังสีใกล้แกน
i_1	+14.251315°	
i'_1	+8.726211°	
$u'_1 = i_1 - i'_1$	+5.525604°	
$\sin u'_1$	+0.096291	+0.094471
$l'_1 - R_1 = R_1 \frac{\sin i_1}{\sin i_1}$	+31.999782	+32.616263
l'_1	+52.309782	+52.926263
$l_2 = l'_1 - t_{12}$	+48.809782	+49.426263
$l_2 - R_2$	+62.239782	+62.856263
$(l_2 - R_2)/R_2$	-4.634384	-4.680288
$u_2 = u'_1$	+5.525604°	
$\sin i_2 = \frac{\sin u'_1 (l_2 - R_2)}{R_2}$	-0.446249	-0.442151
$\sin i'_2 = \frac{n_{12}}{n_{23}} \sin i_2$	-0.467179	-0.462889

	รังสีขอบเลนส์	รังสีใกล้แกน
i'_2	-27.851335°	
i_2	-26.503277°	
$u'_2 = u_2 + i_2 - i'_2$	+6.873662°	
$\sin u'_2$	+0.119680	+0.115209
$l'_2 - R_2 = \frac{R_2 \sin i'_2}{\sin u'_2}$	+52.424916	+53.959320
l'_2	+38.994916	+40.529320
$l_3 = l'_2 - t_{23}$	+38.984916	+40.519320
$l_3 - R_3$	+51.894916	+53.429320
$(l_3 - R_3)/R_3$	-4.019746	-4.138599
$u_3 = u'_2$	+6.873662°	
$\sin i_3 = \sin u'_2 \frac{(R_3 - l_3)}{R_3}$	-0.481083	-0.476804
$\sin i'_3 = \frac{n_{23}}{n_{34}} \sin i_3$	-0.438983	-0.435079
i'_3	-26.039011°	

	รังสีขอบเลนส์	รังสีใกล้แกน
i_3	-28.756158°	
$u'_3 = u_3 + i_3 - i'_3$	$+4.156515^\circ$	
$\sin u'_3$	+0.072481	+0.073484
$l'_3 - R_3 = \frac{R_3 \sin i'_3}{\sin u'_3}$	+78.189740	+76.436638
l'_3	+65.279740	+63.526638
$l_4 = l'_3 - t_{34}$	+63.479740	+61.726638
$l_4 - R_4$	+102.439740	+100.686638
$(l_4 - R_4) / R_4$	-2.629357	-2.584359
$u_4 = u'_3$	$+4.156515^\circ$	
$\sin i_4 = \frac{\sin u'_3 (l_4 - R_4)}{R_4}$	-0.190578	-0.189909
$\sin i'_4 = \frac{n_{34}}{n_4} \sin i_4$	-0.323725	-0.322589

	รังสีขอบเลนส์	รังสีใกล้แกน
i'_4	-18.888347°	
i_4	-10.986518°	
$u'_4 = u_4 + i_4 - i'_4$	+12.058344°	
$\sin u'_4$	+0.208907	+0.206164
$l'_4 - R_4 = R_4 \frac{\sin i'_4}{\sin u'_4}$	+60.372922	+60.961504
l'_4	+21.412922	+22.001504
$\delta l'_4$	-0.588835	-

จุดโฟกัสอยู่ห่างจากผิวที่ 4 เป็นระยะ 22.0 มิลลิเมตร

นั่นคือ จุดโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์ อยู่ห่างจากผิวที่ 1 ของเลนส์เป็นระยะ −22.0 มิลลิเมตร

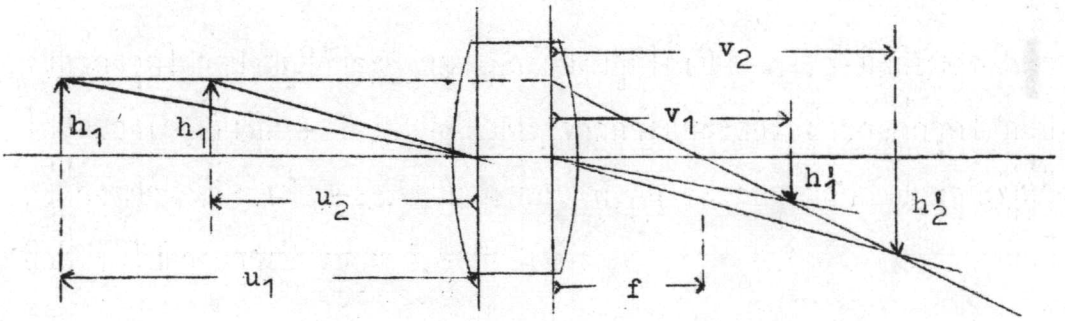
โดยที่ทราบค่าไซน์ของมุมชันของรังสีใกล้แกนที่พุ่งเข้าสู่จุดโฟกัสปฐมภูมิเป็น −0.206164 และรังสีขนานที่พิจารณาสูงจากแกนเป็น 5 มิลลิเมตร จะทำให้หาระยะ

ระหว่างจุดโฟกัสปฐมภูมิกับระนาบมุขยสำคัญปฐมภูมิได้เป็น −24.3 มิลลิเมตร และทางยาวโฟกัสของเลนส์นี้เป็น + 24.3 มิลลิเมตร จากการแกะรอยรังสีทราบว่าจุดโฟกัสปฐมภูมิอยู่ห่างจากผิวที่ 1 เป็น −22.0 มิลลิเมตร ดังนั้น ระนาบมุขยสำคัญปฐมภูมิอยู่ห่างจากผิวที่ 1 ไปทางขวาเป็นระยะ 2.3 มิลลิเมตร

3. การหาทางยาวโฟกัสของเลนส์โดยวิธีทดสอบกำลังขยาย (11)

วิธีทดสอบกำลังขยาย (magnification method) นี้ ใช้หาทางยาวโฟกัสของเลนส์หนาได้ พิจารณารูปที่ 4.18 วัตถุขนาด h_1 วางอยู่หน้าเลนส์เป็นระยะ u_1 ได้ภาพขนาด h'_1 อยู่หลังเลนส์และมีระยะภาพเป็น v_1 ดังนั้น กำลังขยายของเลนส์ในขณะนี้เป็น

$$m_1 = -h'_1/h_1 = -(v_1 - f)/f \qquad (4.5)$$



รูปที่ 4.18 การเกิดภาพของทัศนคาสตร์แบบเกาส์เซียน

ทำนองเดียวกัน ถ้าเลื่อนวัตถุนี้ให้ห่างจากเลนส์เป็นระยะ u_2 ดังรูปที่ 4.18 จะได้ภาพขนาด h'_2 อยู่หลังเลนส์ และมีระยะภาพเป็น v_2 ได้กำลังขยายของเลนส์เป็น

$$m_2 = -h'_2/h_1 = -(v_2 - f)/f \qquad (4.6)$$

จากสมการ (4.5) และสมการ (4.6) ได้ว่า

$$f = -\frac{v_2 - v_1}{m_2 - m_1} = -\frac{\Delta v}{\Delta m} \qquad (4.7)$$

จากสมการ (4.7) ถ้าทราบผลต่างของระยะภาพสองตำแหน่ง และทราบผลต่างของกำลังขยายที่ตำแหน่งภาพทั้งสอง สามารถหาทางยาวโฟกัสของเลนส์ได้

ทำการทดสอบกำลังขยายบนเบนช (bench) โดยใช้วัตถุซึ่งเป็นสเกล (graticule) วางไว้ด้านหนึ่งของเลนส์ หาระยะภาพ และวัดขนาดของภาพด้วยเลนส์ใกล้ตาพร้อมสเกลซึ่งอยู่อีกด้านหนึ่งของเลนส์ จากนี้คำนวณหากำลังขยายของเลนส์ เมื่อเลื่อนวัตถุออกจากตำแหน่งเดิม จะได้ภาพที่ตำแหน่งใหม่ ซึ่งทราบระยะภาพและวัดขนาดภาพได้ทำให้ทราบกำลังขยายของเลนส์ในขณะนั้น เลื่อนให้วัตถุอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน จะได้กำลังขยายของเลนส์เป็นค่าต่าง ๆ

3.1 <u>การหาทางยาวโฟกัสของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์</u> วางวัตถุที่เป็นสเกลไว้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ห่างจากเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ วัดระยะภาพและขนาดภาพด้วยเลนส์ใกล้ตาพร้อมสเกล ได้ระยะภาพและกำลังขยายเป็นค่าต่าง ๆ กัน ผลต่างของระยะภาพและผลต่างของกำลังขยาย แสดงในตารางที่ 4.4 หาทางยาวโฟกัสของเลนส์จากสมการ (4.7) ได้ว่าทางยาวโฟกัสของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ มีค่าเป็น

+ 231.7$\pm$16.8 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.4 หาทางยาวโฟกัสของเลนส์ด้วยวิธีทดสอบกำลังขยาย ของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์

Δm	Δv มิลลิเมตร	$f = -\frac{\Delta v}{\Delta m}$ มิลลิเมตร
−0.07	+13.5	+192.8
−0.14	+33.0	+235.7
−0.23	+56.5	+245.6
−0.37	+82.0	+221.6
−0.51	+117.5	+230.4
−0.68	+165.0	+242.6
−0.97	+219.5	+226.3
−1.40	+322.5	+230.4
−1.90	+450.0	+236.8
−2.46	+627.0	+254.9
		$f = +231.7 \pm 16.8$

3.2 <u>การหาทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้ากล้องจุลทัศน์</u> ทำการทดลองเช่นเดียวกับเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ ได้ค่าผลต่างของระยะภาพ และผลต่างของกำลังขยาย ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ใช้สมการ (4.7) หาทางยาวโฟกัสของเลนส์

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองด้วยวิธีทดสอบกำลังขยายของเลนส์หน้ากล้องจุลทัศน์

Δm	Δv มิลลิเมตร	$f = -\frac{\Delta v}{\Delta m}$ มิลลิเมตร
−0.34	+6.8	+20.0
−0.68	+13.5	+19.8
−1.56	+32.4	+20.8
−2.42	+47.3	+19.5
−3.44	+79.1	+23.0
−5.89	+118.5	+20.1
−14.23	+297.0	+20.9
		$f = +20.6 \pm 1.2$

ได้ทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้ากล้องจุลทัศน์ มีค่าเป็น +20.6 ± 1.2 มิลลิเมตร

3.3 <u>การหาทางยาวโฟกัสของเลนส์ใกล้ตา</u> ทำการทดลองเช่นเดียวกับเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ ได้ผลดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ได้ทางยาวโฟกัสของเลนส์ใกล้ตามีค่าเป็น +20.3 ± 1.9 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองด้วยวิธีทดสอบกำลังขยายของเลนส์ใกล้ตา

Δm	Δv มิลลิเมตร	$f = -\frac{\Delta v}{\Delta m}$ มิลลิเมตร
−0.30	+ 5.0	+16.7
−0.55	+10.5	+19.1
−1.04	+19.8	+19.0
−1.49	+31.0	+20.8
−2.08	+44.0	+21.2
−2.92	+65.0	+22.3
−5.61	+119.5	+21.3
−7.92	+173.3	+21.9
		$f = +20.3 \pm 1.9$

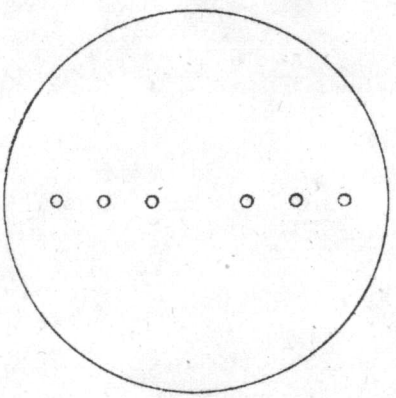
4. <u>วิธีทดสอบของฮาร์ตแมนน์</u>(11)

ทางยาวโฟกัสของโซนต่าง ๆ ของเลนส์อาจหาได้โดยใช้วิธีทดสอบของฮาร์ตแมนน์ (Hartmann test) โดยตัดกระดาษดำให้มีขนาดเท่ากับเลนส์ที่จะทดสอบแล้วเจาะรูให้เป็นคู่ ๆ ดังรูปที่ 4.19 ให้จุดศูนย์กลางของกระดาษดำเป็นจุดแกน รูที่เจาะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ใน 200 เท่าของทางยาวโฟกัสของเลนส์ที่จะทดสอบ(14) นำกระดาษดำที่เจาะรูวางไว้หลังเลนส์ที่จะทดสอบ วางต้นกำเนิดแสง

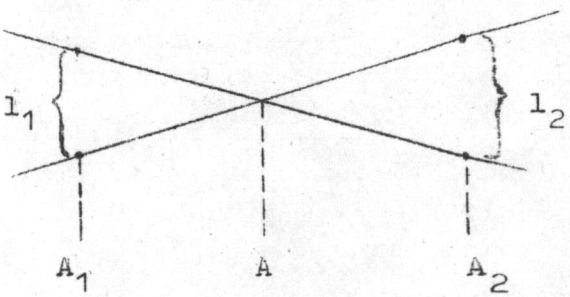
ซึ่งเป็นจุดอยู่ห่างจากเลนส์เป็นระยะอย่างน้อย 40 เท่า ของทางยาวโฟกัสของเลนส์ (11) เมื่อเปิดรูที่เจาะทีละคู่เสมือนว่าให้แสงผ่านแต่ละโซนของเลนส์ แสงที่ผ่านรูเปิดแต่ละคู่จะรวมกันที่จุด ๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นจุดโฟกัสของโซนนั้น ๆ ในรูปที่ 4.20 A เป็นจุดโฟกัสของรูเปิดคู่หนึ่ง ๆ l_1 และ l_2 เป็นระยะห่างของภาพดวงสว่าง 2 ดวง ซึ่งอยู่ภายในทางยาวโฟกัสที่ตำแหน่ง A_1 และอยู่ภายนอกทางยาวโฟกัสที่ตำแหน่ง A_2 ตามลำดับ โดยใช้สูตรของฮาร์ตแมนน์ (Hartmann formula)

$$A = A_1 + \frac{l_1}{l_1 + l_2}(A_2 - A_1) \qquad (4.8)$$

สามารถคำนวณหาตำแหน่งของจุดโฟกัสของรูเปิดคู่นั้น ๆ ได้



รูปที่ 4.19 กระดาษดำเจาะรูให้แสงผ่าน



รูปที่ 4.20 การทดสอบของฮาร์ตแมนน์

ในการทดลองเปิดให้ลำแสงผ่านรูทีละคู่ และใช้เลนส์ใกล้ตาชนิดเคลื่อนที่ได้สังเกตและวัดระยะห่าง l_1 และ l_2 ของดวงสว่างทั้งสองที่อยู่ตำแหน่ง A_1 และ A_2 ตามลำดับ ใช้สมการ (4.8) คำนวณหาตำแหน่งของจุดโฟกัสของโซนนั้น ๆ การทดลองนี้หาทางยาวโฟกัสของโซนต่าง ๆ ของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ได้เท่านั้น

เลนส์หน้าและเลนส์ใกล้ตาไม่สามารถหาได้ เนื่องจากเลนส์ทั้งสองมีขนาดเล็ก และมีทางยาวโฟกัสสั้น ดังนั้น รูแต่ละรูที่เจาะในกระดาษดำมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถที่จะสังเกตแสงที่ผ่านได้ ให้เลนส์อยู่ที่ตำแหน่ง 750.0 มิลลิเมตร บนเบนช ดังนั้น ผิวที่ 1 ของเลนส์อยู่ที่ตำแหน่ง 750.0+4.4 = 754.4 ผลของการทดลองแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลของการทดลองหาทางยาวโฟกัสของโซนต่าง ๆ ของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ ด้วยวิธีทดสอบของฮาร์ตแมนน์ แต่ละค่ามีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

h	A_1	A_2	A_2-A_1	l_1	l_2	l_1+l_2	A	ระยะระหว่างจุดโฟกัสกับผิวที่ 1
	950	985		0.654	0.242	0.896	975.5	+221.4
	955	990		0.560	0.413	0.973	975.1	+220.7
3.0	960	995	35	0.458	0.518	0.976	976.4	+222.0
	965	1000		0.290	0.715	1.005	975.1	+220.7
	970	1005		0.167	0.812	0.979	976.0	+221.6
	950	990		1.435	0.425	1.860	980.9	+226.5
	955	995		1.154	0.644	1.798	980.7	+226.3
5.0	960	1000	40	0.907	0.875	1.782	980.4	+226.0
	965	1005		0.660	1.103	1.762	980.0	+225.6
	970	1010		0.517	1.309	1.826	981.3	+226.9
	955	1000		2.593	0.904	3.497	988.4	+234.0
	960	1005		2.177	1.341	3.518	987.8	+233.4
9.0	965	1010	45	1.697	1.664	3.361	987.7	+233.3
	970	1015		1.428	2.033	3.461	988.5	+234.1
	975	1020		0.937	2.416	3.353	987.6	+233.2

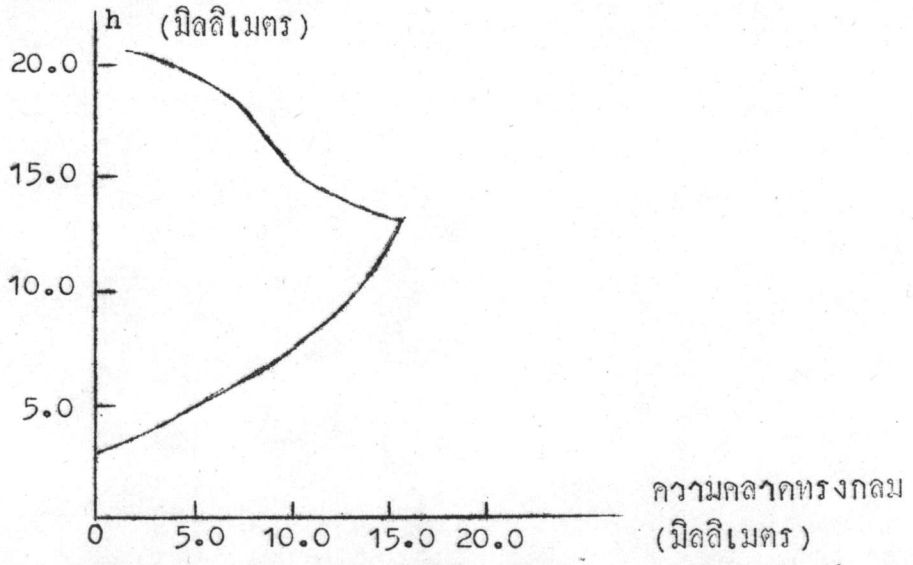
h	A_1	A_2	A_2-A_1	l_1	l_2	l_1+l_2	A	ระยะระหว่างจุดโฟกัสกับผิวที่ 1
	975	1000		1.796	0.927	2.723	991.5	+237.1
	978	1003		1.380	1.220	2.600	991.3	+236.9
13.0	981	1006	25	1.105	1.570	2.675	991.3	+236.9
	984	1009		0.861	1.856	2.717	991.9	+237.5
	987	1012		0.462	2.285	2.747	991.2	+236.8
	968	990		2.365	0.492	2.857	986.2	+231.8
	971	993		1.915	0.771	2.686	986.7	+232.3
15.0	974	996	22	1.559	1.295	2.854	986.0	+231.6
	977	999		1.058	1.583	2.641	985.0	+230.6
	980	1002		0.756	1.979	2.735	986.1	+231.7
	970	985		1.994	0.269	2.263	983.2	+228.8
	972	987		1.777	0.598	2.375	983.2	+228.8
18.0	974	989	15	1.545	0.867	2.412	983.6	+229.2
	976	991		1.147	1.211	2.358	983.3	+228.9
	978	993		0.828	1.498	2.326	983.3	+228.9
	960	982		0.816	0.144	0.960	978.7	+224.3
	963	985		9.707	0.223	0.930	979.6	+225.2
20.0	966	988	22	0.589	0.387	0.976	979.3	+224.9
	969	991		0.459	0.546	1.005	979.0	+224.6
	972	994		0.306	0.645	0.951	979.1	+224.7

นำค่าทางยาวโฟกัสของแต่ละโซนจากตารางที่ 4.7 มาหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ทางยาวโฟกัสแต่ละโซน โดยวิธีทดสอบของฮาร์ตแมนน์

h (มิลลิเมตร)	ระยะระหว่างจุดโฟกัสกับผิวที่ 1	ระยะระหว่างมุขยสำคัญกับผิวที่ 1	f (มิลลิเมตร)
3.0	+221.3±0.6	+5.9	+227.2±0.6
5.0	+226.3±0.5	+5.9	+232.2±0.5
9.0	+233.6±0.4	+5.9	+239.5±0.4
13.0	+237.0±0.3	+5.9	+242.9±0.3
15.0	+231.6±0.6	+5.9	+237.5±0.6
18.0	+228.9±0.2	+5.9	+234.8±0.2
20.0	+224.7±0.3	+5.9	+230.6±0.3

ตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า เลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์นี้ มีความคลาดทรงกลมเชิงโซน (zonal spherical aberration) ซึ่งเป็นความคลาดทรงกลมที่เกิดที่โซนกลาง ๆ ของเลนส์



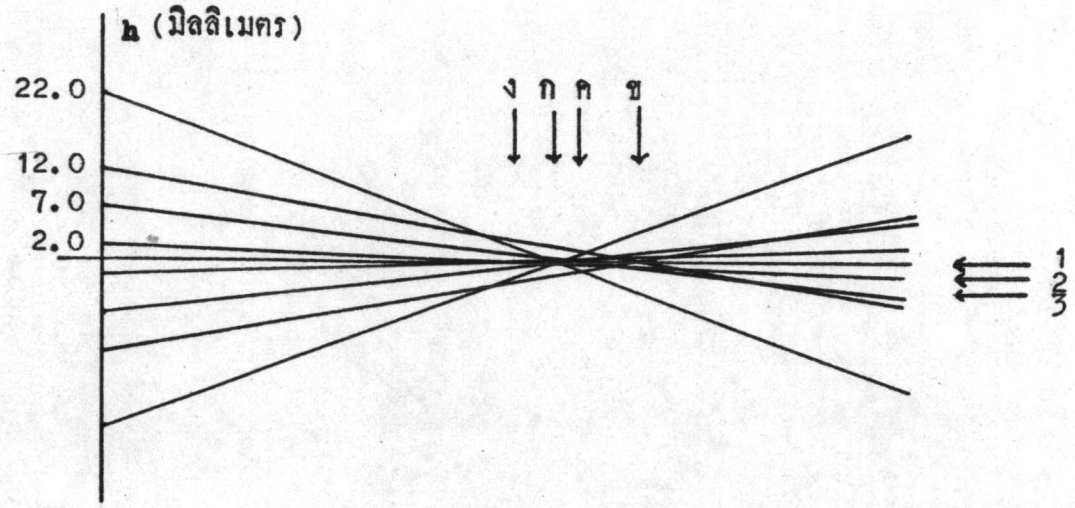
รูปที่ 4.21 ความคลาดทรงกลมของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ที่ความสูงต่าง ๆ จากวิธีทดสอบของฮาร์ตแมนน์

5. วิธีทดสอบด้วยคมมีดของโฟคอลท์ (4)

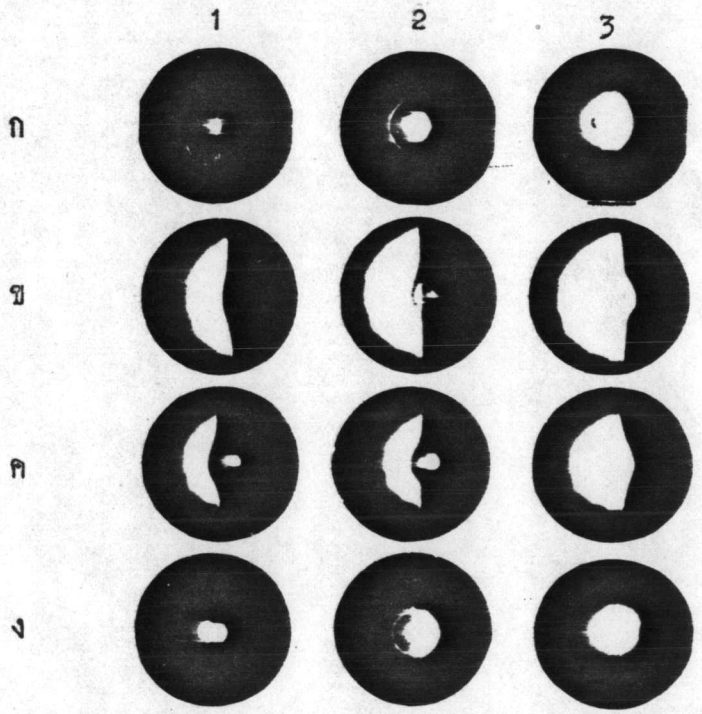
ในการหาความคลาดของเลนส์ สามารถกระทำได้โดยการตรวจสอบภาพจุด วิธีที่นิยมคือทดสอบโดยใช้คมมีด เรียกว่าวิธีทดสอบด้วยคมมีดของโฟคอลท์ (Foucault knife edge test) ซึ่งใช้ตรวจสอบคุณภาพของเลนส์ โดยวางคมมีดอยู่ในระนาบของภาพ แล้วเลื่อนคมมีดตัดผ่านภาพของวัตถุจุด ตาของผู้สังเกตจะอยู่หลังคมมีด และปรับตาให้มองเลนส์ ขณะที่คมมีดตัดผ่านภาพจะปรากฏเป็นเงามืดเคลื่อนที่ผ่านเลนส์ไป เลนส์ที่สมบูรณ์แบบจะมีภาพจุดเนื่องจากวัตถุจุดเพียงภาพเดียว ถ้าตำแหน่งของคมมีดอยู่ตำแหน่งของภาพจุดพอดี เมื่อเลื่อนคมมีดตัดผ่านระนาบของภาพ จะปรากฏว่าเลนส์มืดไปในทันที เนื่องจากคมมีดได้กั้นรังสีทุก ๆ รังสีไว้ไม่ให้เข้าตาของผู้สังเกต ถ้าตำแหน่งของคมมีดอยู่ภายในทางยาวโฟกัสของเลนส์ เมื่อเลื่อนคมมีดตัดผ่านระนาบของภาพ จะเห็นว่าเงามืดที่ปรากฏเคลื่อนที่ไปในทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของคมมีด และถ้าตำแหน่งของคมมีดอยู่ภายนอกทางยาวโฟกัสของเลนส์ เงามืดที่ปรากฏจะเคลื่อนที่ไปในทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของคมมีด โดยวิธีนี้ถ้าแบ่งเลนส์ให้เป็นโซนต่าง ๆ และสังเกตทิศทางการเคลื่อนที่ของเงามืด เนื่องจากคมมีดตัดผ่านระนาบของภาพ สามารถหาจุดโฟกัสของโซนนั้น ๆ ได้ ซึ่งนำมาเขียนแผนภาพของรังสีที่ผ่านเลนส์ทดสอบได้

ในการทดสอบเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ วางต้นกำเนิดแสงซึ่งเป็นจุดห่างจากเลนส์เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 4 ของบทนี้ เจาะกระดาษกำบังปิดเลนส์ เพื่อแบ่งเลนส์ให้เป็นโซนต่าง ๆ หาตำแหน่งของจุดโฟกัสของโซนนั้น ๆ เพื่อนำมาเขียนแผนภาพของรังสี ดังรูปที่ 4.22 แล้วจึงใช้คมมีดเลื่อนตัดระนาบภาพเมื่อเลนส์มีช่องเปิดเต็มที่ เพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของเงามืดและลักษณะของเงามืดเมื่อคมมีดอยู่ตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดลองนี้ได้ทำการบันทึกภาพของเงามืดเมื่อคมมีดอยู่ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยฟิล์มของโกดัก พลัส-เอ็กซ์ แพน (Kodak Plus-x Pan) ใช้เวลาบันทึกภาพ 1.5 นาที ล้างฟิล์มด้วยน้ำยาดี 76 (D-76) ของบริษัทโกดัก เป็นเวลา 8 นาที อัดภาพด้วยขนาดขยาย 4 เท่า ใช้เวลาบันทึกภาพลงบนกระดาษอัดรูป 15 วินาที

และใช้น้ำยาดี 72 (D-72) ของบริษัทโกดักล้างกระดาษอัดรูป เป็นเวลา 30 วินาที ได้ภาพ ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.22 แผนภาพของรังสีเมื่อผ่านเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์

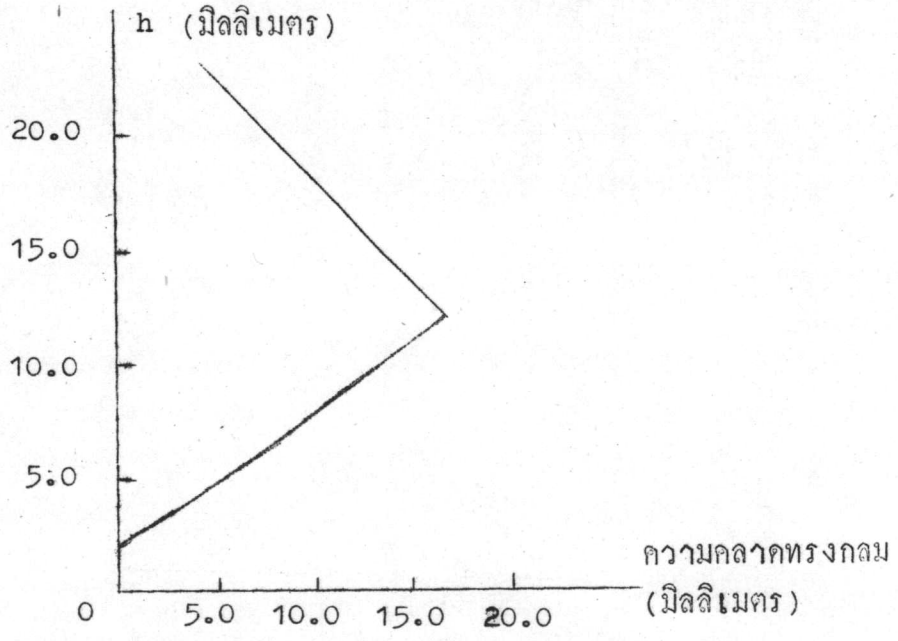


รูปที่ 4.23 ภาพเงามืดเมื่อคมมีดอยู่ตำแหน่งต่าง ๆ ในรูปที่ 4.22

ตารางที่ 4.9 ทางยาวโฟกัสของแต่ละโซนโดยวิธีทดสอบด้วยคมมีดของโฟคอลท์

h (มิลลิเมตร)	f (มิลลิเมตร)
2.0	$+226.3 \pm 0.5$
7.0	$+234.9 \pm 0.5$
12.0	$+243.1 \pm 0.5$
22.0	$+231.4 \pm 0.5$

การทดลองนี้ สรุปผลได้ว่าเลนส์มีความคลาดทรงกลมเชิงโซน กราฟแสดงความคลาดทรงกลมของเลนส์ที่ความสูงต่าง ๆ จากแกนซึ่งแสดงในรูปที่ 4.22 มีลักษณะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบของฮาร์ตแมนน์ ที่แสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.24 ความคลาดทรงกลมของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ที่ความสูงต่าง ๆ จากวิธีทดสอบด้วยคมมีดของโฟคอลท์

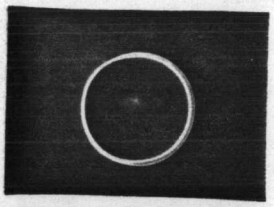
สำหรับเลนส์หน้าและเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์ ซึ่งมีขนาดเล็กและทางยาวโฟกัสสั้นมาก ไม่สามารถทดสอบด้วยวิธีนี้

6. <u>การทดสอบด้วยดาว</u> (11,15)

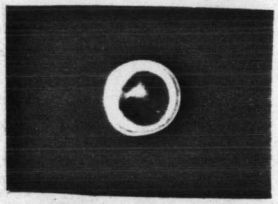
การทดสอบคุณภาพของเลนส์อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้คือ การทดสอบด้วยดาว (star test) โดยสังเกตภาพของดาวหรือแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นจุด (artificial star) ที่อยู่ในระยะไกลจะได้ภาพจานกลมแอรี (Airy's disk) มีลักษณะเป็นวงสว่างอยู่ตรงกลาง สลับด้วยวงมืดและวงสว่าง โดยที่วงสว่างวงนอก ๆ จะมีความเข้มลดลงไปอย่างรวดเร็ว ภาพจานกลมแอรีนี้เกิดจากการเลี้ยวเบน (diffraction) ของคลื่นแสงที่ผ่านช่องเปิดรูปวงกลม ซึ่งในที่นี้คือ เลนส์ที่ต้องการทดสอบนั่นเอง

หากเลนส์ที่ทดสอบเป็นเลนส์ที่ไม่มีความคลาดทรงกลมอยู่เลย ภาพที่ภายในและภายนอกโฟกัสจะเหมือนกัน แต่ถ้าเป็นเลนส์ที่มีความคลาดทรงกลมชนิดแก้ขาด จะได้ว่าภาพภายในโฟกัสชัดเจนกว่าภาพภายนอกโฟกัส และถ้าเป็นเลนส์ที่มีความคลาดทรงกลมชนิดแก้เกิน จะได้ว่าภาพภายนอกโฟกัสชัดเจนกว่าภาพภายในโฟกัส

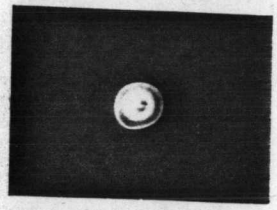
ในการทดสอบเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ วางต้นกำเนิดแสงซึ่งเป็นจุดห่างจากเลนส์เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 4 ของบทนี้ ให้แสงผ่านเลนส์ และทำการบันทึกภาพที่ตำแหน่งโฟกัส ตำแหน่งภายใน และภายนอกโฟกัสด้วยฟิล์มโกดักไตร-เอ็กซ์ แพน (Kodak Tri-x Pan) ใช้เวลาบันทึกภาพ 2 นาที ล้างฟิล์มด้วยน้ำยา ดี 76 ของบริษัทโกดัก เป็นเวลา 8 นาที อัดภาพด้วยขนาดขยาย 4 เท่า ใช้เวลาบันทึกภาพลงบนกระดาษอัดรูป 10 วินาที และใช้น้ำยาดี 72 ของบริษัทโกดักล้างกระดาษอัดรูป ใช้เวลาล้าง 30 วินาที ได้ภาพดังรูปที่ 4.25



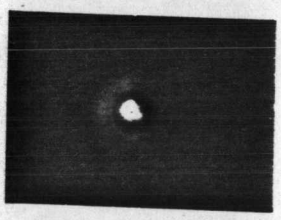
ก. ในโฟกัส



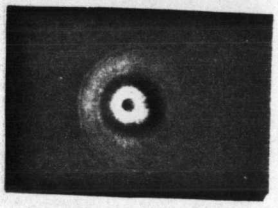
ข. ในโฟกัส



ค. ที่จุดโฟกัส



ง. นอกโฟกัส



จ. นอกโฟกัส

รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายจากการทดสอบด้วยดาวของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์

ในรูปที่ 4.25 (ก) เป็นภาพที่ตำแหน่งจุดโฟกัสซึ่งอยู่ห่างจากเลนส์เป็นระยะ 235.0 มิลลิเมตร พิจารณาจากรูปที่ 4.25 (ก) รูปที่ 4.25 (ข) ซึ่งเป็นภาพถ่ายภายในโฟกัส และรูปที่ 4.23 (ง) รูปที่ 4.25 (จ) ซึ่งเป็นภาพถ่ายภายนอกโฟกัส พอจะตีความได้ว่า เลนส์มีความคลาดทรงกลมชนิดแก้เกิน

สำหรับเลนส์หน้าและเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์ ซึ่งมีขนาดเล็กและมีทางยาวโฟกัสสั้น ไม่สามารถที่จะบันทึกภาพของต้นกำเนิดที่เป็นจุดด้วยฟิล์มได้

7. <u>การทดสอบหากำลังแยก</u>

เลนส์อันหนึ่ง ๆ มีค่ากำลังแยก (resolving power) แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาดของเลนส์นั้นและความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการทดสอบ ในทางทฤษฎีค่ากำลังแยกของเลนส์มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \qquad (4.9)$$

โดยที่ θ เป็น มุมตรงจุดกึ่งกลางเลนส์เป็นเรเดียนที่รองรับจุดศูนย์กลางของจานกลมแอรี่ 2 อัน ซึ่งพอจะมองเห็นว่าเริ่มแยกกันพอดี

λ เป็น ความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการทดสอบ

D เป็น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์

ดังนั้น เลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ที่สร้างขึ้นซึ่งมีขนาด 5.0 เซนติเมตร และทดสอบด้วยแสงเหลืองจากหลอดโซเดียม ซึ่งมีความยาวคลื่นเฉลี่ยเป็น 589.3 นาโนเมตร โดยสมการ (4.9) คำนวณได้ว่ากำลังแยกของเลนส์นี้ในทางทฤษฎีมีค่าเป็น

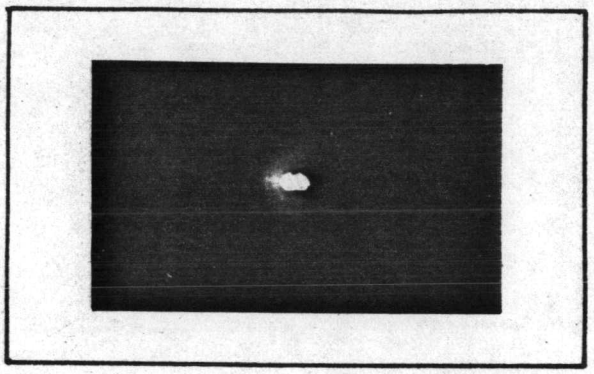
$$\theta = \frac{1.22 \times 589.3 \times 10^{-7}}{5.0}$$

$$= 0.000014 \quad \text{เรเดียน}$$

หรือ ≈ 3 ฟิลิปดา

ในการทดลอง ได้สังเกตต้นกำเนิดแสงซึ่งเป็นจุด 2 จุด ผ่านเลนส์ โดยที่จุด 2 จุดวัดด้วยกล้องจุลทัศน์มีระยะห่างกันเป็น 0.317 มิลลิเมตร แล้วเลื่อนหาตำแหน่งของเลนส์ที่ทำให้เมื่อมองผ่านเลนส์จะเห็นจุดทั้งสองแยกจากกันพอดี ซึ่งจะได้ผลดังกล่าวต่อเมื่อเลนส์อยู่ห่างจากจุดทั้งสองเป็นระยะ

5690 มิลลิเมตร แล้วทำการบันทึกภาพด้วยฟิล์มโกดักพลัส-เอ็กซ์ แพน โดยใช้เวลา 2 วินาที ล้างด้วยน้ำยาดี 76 ของบริษัทโกดัก เป็นเวลา 8 นาที ทำการอัดภาพด้วยขนาดขยาย 6 เท่า ใช้เวลาบันทึกภาพลงบนกระดาษอัดรูป 30 วินาที และใช้น้ำยา ดี 72 ของบริษัทโกดัก ล้างกระดาษอัดรูปใช้เวลาล้าง 30 วินาที ได้ภาพดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายของจุด 2 จุดที่แยกกันพอดี

โดยการทดลองได้กำลังแยกของเลนส์นี้เป็น

$$\theta = \frac{0.317}{5690}$$

$$= 0.00005 \quad \text{เรเดียน}$$

หรือ $\theta = 10.3$ ฟิลิปดา

นั่นคือ ค่ากำลังแยกเชิงมุมของเลนส์ สำหรับคอลลิเมเตอร์เป็น 0.00005 เรเดียน หรือ 10.3 ฟิลิปดา