

การฉาบผิวและการทดสอบเลนส์

1. การฉาบผิว

การฉาบผิวกรณีที่ทำนี้ จะนำแก้วซึ่งฝนเป็นผิวราบ และทดสอบแล้วมาฉาบ การฉาบจะฉาบด้วย โลหะและฉาบให้ผิวสะท้อนแสง (เป็นกระจก) เนื่องจากกระจกที่ฉาบนี้ ใช้สะท้อนแสงอย่างเดียว ไม่ได้ใช้เป็นตัวแบ่งแสง จึงไม่ต้องเข้มงวดในเรื่องของปริมาณการฉาบมาก เดิมกำหนดว่าจะฉาบ ด้วยอลูมิเนียม เพราะมีคุณสมบัติ ในการสะท้อนแสง และทนกับสภาวะแวดล้อมได้ดี ไม่หมองเร็ว แต่มีปัญหาเรื่องตัวให้ความร้อน (heater) ที่จะใช้ในขั้นตอนการฉาบ ซึ่งต้องใช้หลอดทั้งสี่เตน ปรากฏว่าหลอดทั้งสี่เตน ที่โรงงานของภาควิชาฟิสิกส์หมด จึงเลือกใช้เงินซึ่งมีตัวให้ความร้อนที่ เหมาะสมอยู่แล้วมาฉาบแทน ถึงแม้ว่าจะสะท้อนแสงได้ดีกว่าอลูมิเนียม แต่ก็หมองเร็วกว่า เพราะทำปฏิกิริยากับอากาศรวดเร็วกว่า ดังนั้นอายุการใช้งานจึงสั้นกว่า

การฉาบผิวสะท้อนแสงนั้น แบ่งตามลักษณะที่จะฉาบได้สองประการคือ ฉาบที่ผิวหลังของ แก้ว ใต้แก่กระจกที่ใช้ล่องหน้าทั่วไป ในสายงานทางทัศนศาสตร์ บางครั้งกระจกซึ่งฉาบผิวหลัง ทำให้เกิดภาพซ้อนรบกวน เพื่อแก้ปัญหากการเกิดภาพซ้อนดังกล่าว เราจึงฉาบที่ผิวหน้าของแก้ว

เนื่องจากผิวที่จะใช้เป็นผิวสะท้อนแสงนั้น ต้องเป็นผิวที่มีความเงามันสูง (high polish) และมีค่าการสะท้อน (reflectance) สูง ดังนั้นสิ่งที่จะนำมาทำเป็นผิวสะท้อนแสง แต่ก่อนจึงใช้โลหะเช่น เงิน ทองแดง ภายหลังพบว่าแก้วหรือควอทซ์ สามารถนำมาฝนและขัดให้ ได้ผิวที่มีความเงามันสูงได้ ถ้าหากว่าฉาบด้วยโลหะที่มีค่าการสะท้อนสูง จะได้ผิวสะท้อนแสงที่ดี ได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามการทำผิวสะท้อนแสงจากแก้ว ยังมีข้อไม่สะดวกอยู่ อาทิ ผิวอาจปิด เบสึยนรูปเมื่อใช้ไปนาน ผิวขนาดใหญ่ทำให้อยู่ในลักษณะที่ต้องการได้ยาก

2. วิธีการฉาบผิว ⁽²⁰⁾

การฉาบผิวทำได้หลายวิธี ⁽²⁰⁾ เช่น วิธีการทางเคมี (chemical deposition) วิธีการให้ความร้อนกับผิว (burning-on) และวิธีการชุบด้วยไฟฟ้า (electro plating)

ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการเคลือบผิวโลหะด้วยโครเมียมหรืออลูมิเนียม แต่วิธีที่ใช้คือฉาบ โดยการทำให้โลหะกลายเป็นไอในสุญญากาศ (evaporation process or metallization process) อันเป็นวิธีการที่นิยมกันในปัจจุบัน เพราะสะดวกและใช้เวลาไม่มาก แต่ผิวที่ฉาบต้องสะอาดมาก ข้อดีของการฉาบผิวด้วยวิธีนี้พอสรุปได้ดังนี้

2.1 ผิวของแก้วยิ่งขัดไล่เท่าใดก็ยิ่งสะท้อนดีเท่านั้น เพราะฟิล์มบางของโลหะที่ติดที่ผิวของแก้ว ในกรณีฉาบอย่างนี้จะมันเงาเท่า ๆ กับผิวที่อยู่ด้านหลังของฟิล์ม ซึ่งถ้าฉาบด้วยวิธีอื่น จะไม่ได้ความมันเงาขนาดนี้

2.2 ในขั้นตอนการฉาบไม่ได้ทำให้แก้วร้อนมากเหมือนบางวิธี จึงไม่ทำให้แก้วเสียรูป

2.3 อาจจะทำการฉาบหลายชั้น ในกรณีที่ต้องการให้โลหะติดผิวสะท้อนดี ๆ เช่น ฉาบด้วยโครเมียมเป็นชั้นแรก เพราะโครเมียมเป็นโลหะที่ติดแน่นกับผิว แล้วจึงฉาบทับด้วยอลูมิเนียม ซึ่งมีสมบัติในการสะท้อนดี ผลจะทำให้ได้ผิวสะท้อนแสงดีและติดแน่นทนทาน⁽²¹⁾ เป็นต้น

2.4 ผิวแก้วบริเวณใต้หลอด (อาจจะเกิดจากขัดไล่ไม่ดี หรือทำความสะอาดไม่ดี) การฉาบด้วยวิธีนี้ จะเห็นได้อย่างชัดเจน แม้ว่าก่อนฉาบจะสังเกตเห็นไม่เห็นก็ตาม

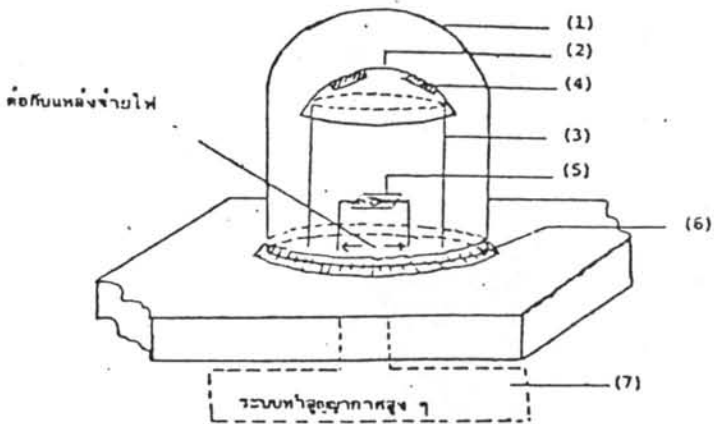
3. การฉาบผิวโดยการทำให้โลหะกลายเป็นไอในสุญญากาศ⁽²⁰⁾

การฉาบผิวด้วยวิธีนี้เริ่มมาตั้งแต่ปี 1912 โดยปริงไฮม์ (P. Pringheim) และพอห์ล (R. Pohl) แต่ยังไม่แพร่หลาย จนหลายปีต่อมาจึงได้มีการนำมาดัดแปลงกันใหม่ แนวทางในการดัดแปลง ก็เพื่อแก้ปัญหาลำบากประการคือ เรื่องตัวให้ความร้อนกับโลหะ การทำสุญญากาศให้ได้ค่าสูง ๆ และวิธีการทำความสะอาดผิวที่จะฉาบ จะกล่าวถึงการฉาบด้วยวิธีนี้ เป็นหัวข้อดังนี้

3.1 หลักการ โลหะบางชนิด เช่น เงิน อลูมิเนียม ทองแดง ทองคำ หรือโครเมียม ถ้าทำให้ร้อนมากพอในภาชนะสุญญากาศ ซึ่งมีความดันบรรยากาศ 10^{-11} - 10^{-2} มิลลิเมตรของปรอท^(15,20) หรือทอร์ (Torr) (1 Torr = ความดัน 1 มิลลิเมตรของปรอท) โลหะจะหลอมและกลายเป็นไอ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อย⁽²¹⁾ จะให้อิออนของโลหะ (metal rays) นั้น ออกไปทุกทิศทาง ถ้านำผิวแก้ว หรือผิวที่ต้องการจะฉาบไปขวาง เพื่อรับไอดังกล่าว มันจะชนและติดกับแก้ว กลายเป็นฟิล์มบางหรือหนาตามต้องการได้ ระดับความเป็นสุญญากาศ (degree of vacuum) ที่ต้องให้สูง ๆ นั้น เพื่อให้ระยะทางอิสระเฉลี่ย (mean free path)

ของไอของโลหะมีค่ามาก ๆ ซึ่งอย่างน้อยต้องมากกว่าขนาดของภาชนะที่ใส่ ถ้าค่าระยะทางอิสระ
เฉลี่ยมากพอ ไอของโลหะที่ออกมา จะไม่ชนกับอะตอมของก๊าซ ก่อนมาชนกับผิวของแก๊วที่จะ
ฉาบ ทำให้โมเลกุลของโลหะที่มาชนกับผิวแก๊ว มีความเร็วสูงมาก จึงปะทะด้วยแรงที่มากพอ
ที่จะติดกับผิวแก๊วได้⁽²¹⁾

3.2 วิธีการฉาบ รูปของอุปกรณ์สำหรับฉาบผิว แสดงในรูป 3.1 จากรูป 3.1

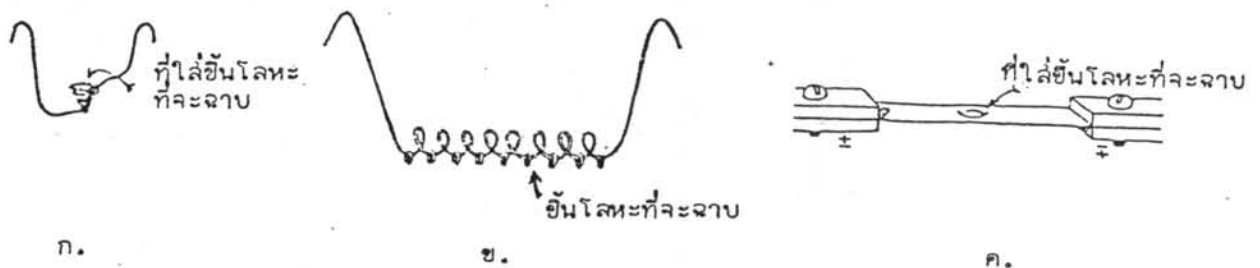


รูป 3.1 อุปกรณ์สำหรับฉาบผิว

หมายเลข (1) คือครอบแก๊วหนารูปประฆัง ซึ่งทนต่อความดันบรรยากาศได้ดี หมายเลข (2) เป็นที่ติด
หรือยึดแผ่นแก๊ว มีรูปเป็นส่วนหนึ่งของทรงกลม วางอยู่บนขาตั้งหมายเลข (3) หมายเลข (4) เป็น
แผ่นแก๊วที่จะฉาบผิว หมายเลข (5) คือตัวให้ความร้อน ในที่นี้จะใช้แผ่นโมลิบดีนัม (molybdenum)
ตรงกลางเป็นแอ่ง ที่จะวางชิ้นเงินเล็ก ๆ ลงไป ปลายทั้งสองข้างของตัวให้ความร้อนต่อกับแหล่ง
จ่ายไฟ (power supply) วงแหวนหมายเลข (6) คือยางรอบ ๆ ฐานของครอบแก๊วเพื่อกันอากาศ
รั่ว หมายเลข (7) เป็นระบบทำสุญญากาศ

ความจริงแล้วเวลาที่ใช้ฉาบจริง ๆ นั้นไม่นาน แต่ขั้นการเตรียมเพื่อให้ได้สุญญากาศนั้นต้องใช้เวลา รายละเอียดการทำสุญญากาศจะไม่กล่าวถึง แต่หลักการทั่วไปนั้นมีสองตอน ตอนแรกเป็นการสูบล้ออากาศออก โดยใช้ปั๊มสุบล้อธรรมดา หลังจากสูบล้ออากาศออกจนสูบล้อไม่ลงต่อไปอีกแล้ว ก็เปิดเครื่องทำสุญญากาศสูง (high vacuum pump) การฉาบที่ความดัน จะทำสุญญากาศจนได้ประมาณ 10^{-5} ทอร์ ซึ่งจะเริ่มฉาบ การฉาบจะต้องค่อย ๆ เริ่มกระแสไฟฟ้าไปที่ตัวให้ความร้อน เมื่อขึ้นเงินหลอมทั่วก้อนแล้ว จึงค่อยหยุดเพิ่มกระแส ช่วงนี้ความดันบรรยากาศจะเพิ่มขึ้นบ้าง แต่ต้องระวังอย่าให้มากกว่า 10^{-2} ทอร์⁽²⁰⁾ ซึ่งควบคุมได้โดยลดกระแสลง สาเหตุที่ความดันเพิ่มขึ้น เพราะมีไอของเงินมากขึ้นในครอบแก้วนั่นเอง การฉาบให้ได้ผิวสะท้อนแสง สะดวกตรงที่ไม่ต้องกังวลกับความหนาของฟิล์มที่จะติด ฉาบไปจนครบแสงก็เป็นอันใช้ได้

3.3 ตัวให้ความร้อนและโลหะที่จะใช้ฉาบ^(20,21) รูปลักษณะของตัวให้ความร้อน และโลหะที่จะใช้ฉาบต้องเลือกให้เหมาะสม⁽²⁰⁾ เช่น หลอมโลหะโดยทั่วไปในหลอดทั้งสี่เตนที่หุ้มเป็นรูปก้นหอย ดังรูป 3.2 ก. แต่สำหรับอลูมิเนียมรูปลักษณะที่เหมาะสมที่สุด คือหลอดทั้งสี่เตนทำเป็นคอยล์ ดังรูป 3.2 ข. ส่วนเงินและทองแดงนั้น ใช้ตัวให้ความร้อนเป็นเบ้าหลอมทำด้วยแผ่นโลหะโมลิบดีนัมหรือแทนทาลัม (tantalum) มีลักษณะดังรูป 3.2 ค. แต่ในงานนี้จะใช้เบ้าหลอมโลหะ



รูป 3.2 รูปลักษณะต่าง ๆ ของตัวให้ความร้อน

โมลิบดีนัม โลหะที่จะใช้ฉาบคือ เงิน ซึ่งมีอุณหภูมิของการกลายเป็นไอ⁽²⁰⁾ 1319 เคลวิน ที่ 10^{-2} ทอร์ คุณสมบัติในการสะท้อนแสงของเงิน จะสะท้อนได้ดีในระบะที่ฉาบเสิร์ฟใหม่ ๆ⁽²¹⁾ กล่าวคือ ค่าการสะท้อนของเงิน โนแลงส์เหลือประมาณ 0.9 เมื่อถึงไว้นาน ๆ อาจลดลงเหลือ 0.5 แต่ในช่วงรังสีเหนือม่วงประมาณ 300 นาโนเมตร ค่าดังกล่าวจะลดลงเหลือ 0.05 เรียกย่านนี้ว่า ย่านปลอดการสะท้อนของเงิน (hole in silver) ซึ่งเป็นย่านที่ฉาบด้วยเงินแล้วใช้สะท้อนไม่ได้

3.4 องค์ประกอบที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ได้จากการฉาบ^(20,21)

3.4.1 ความบริสุทธิ์ของโลหะที่จะมาฉาบผิว

3.4.2 ความดันบรรยากาศขณะจwab และอัตราการกลายเป็นไอของโลหะในการจwab ความดันบรรยากาศต้องต่ำ ๆ ส่วนอัตราการเป็นไอของโลหะ ในการจwabนั้น ถ้าเร็วไปจะทำให้ ความดันบรรยากาศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ไอโลหะที่ไปติดผิวก็จะไม่แน่น จึงต้องควบคุมมิให้กระแส ที่ใช้หลอมโลหะมากเกินไป

3.4.3 ความสะอาดของผิวที่จะจwab เป็นเรื่องสำคัญ ถ้าผิวไม่สะอาดเป็นคราบสกปรก อาจเป็นแกนกลางทำให้เกิดปฏิกิริยากับอากาศหรือน้ำ เกิดเป็นรอยต่างได้

4. การทดสอบเลนส์ที่ผันชั้น

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงการออกแบบ และการผันเลนส์กระจก ที่จะต้องสร้างเป็นจำนวน 2 ตัว เพื่อใช้เป็นตัวทำแสงขนาน และเป็นตัวรวมแสงขนานเข้าสู่ตาอย่างละตัว

คำว่า การทดสอบในกรณีนี้ จะมีความหมายเพียงการทดสอบ เพื่อหาคุณภาพของเลนส์เท่านั้น โดยหาความคลาดที่ยังหลงเหลือ อันเป็นการทดสอบของผู้ผลิตอุปกรณ์ เพื่อจะได้พัฒนาปรับปรุงการออกแบบและสร้างให้ดียิ่งขึ้น และเพื่อกำจัดความคลาดที่ยังหลงเหลืออยู่ การทดสอบที่จะกระทำแบ่ง เป็นหัวข้อดังนี้

4.1 ขนาดและความหนาของเลนส์ วัดความหนาของเลนส์ โดยใช้เวอร์เนีย⁽²¹⁾ กระจก

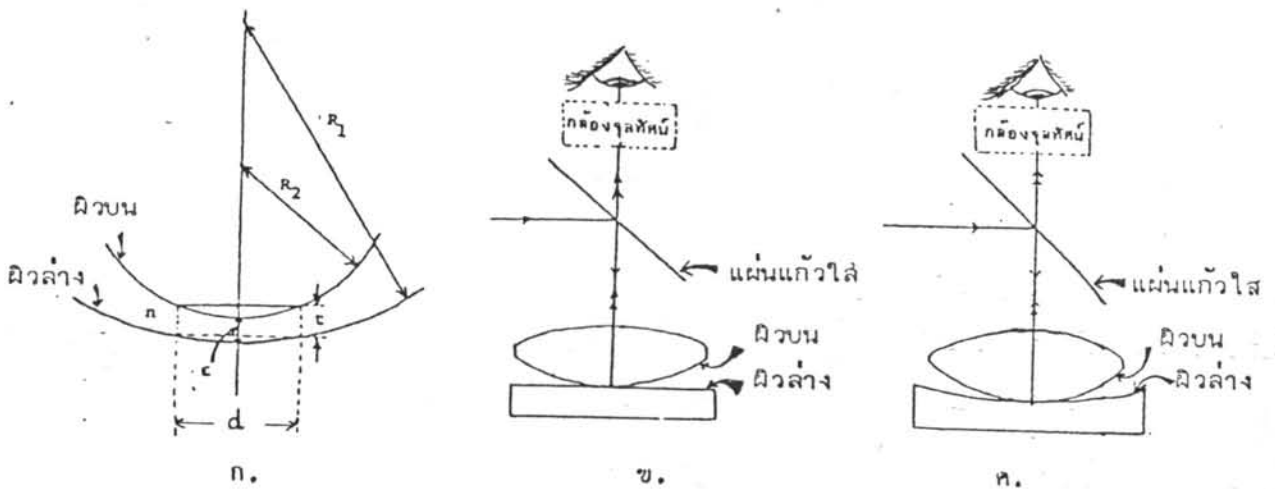
การจะวัดความหนาบริเวณจุดศูนย์กลางของเลนส์ และการวัดแบ่งเป็นสองตอน คือ วัดความหนาของเลนส์องค์ประกอบแต่ละชิ้นก่อนที่จะประกบและวัดความหนาของเลนส์องค์ประกอบแล้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์วัดด้วยเวอร์เนีย ผลการวัดความหนาและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์แสดง ในตาราง 3.1

เลนส์องค์ที่ 1	เลนส์องค์ที่ 2
เลนส์นูน หนา 7.40 มิลลิเมตร	เลนส์นูน หนา 7.35 มิลลิเมตร
เลนส์เว้าหนา 4.30 มิลลิเมตร	เลนส์เว้าหนา 4.15 มิลลิเมตร
ความหนาเมื่อประกบกาวแล้ว	ความหนาเมื่อประกบกาวแล้ว
11.75 มิลลิเมตร	11.55 มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.50 เซนติเมตร	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.50 เซนติเมตร

ตาราง 3.1 แสดงความหนาและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์องค์ทั้งสองชุด

4.2 การหาค่ารัศมีความโค้งของแต่ละผิวของเลนส์ อาจกระทำได้ โดยใช้ผิวทรงกลมมาตรฐาน (spherical test plate) ซึ่งจะให้ผลดี แต่เนื่องจากหาไม่ได้ จึงต้องใช้ผิวราบมาตรฐาน (flat test plate) หรือผิวโค้งที่ทราบค่าแทน เรียกว่าการทดสอบโดยวิธีวงแหวนของนิวตัน (Newton's ring method) ซึ่งความจริงวิธีนี้ให้ผลดีไม่ถูกต้องนัก เพราะบริเวณของผิวที่ทำการศึกษาค่ารัศมีความโค้งนั้นแคบมาก เมื่อเทียบกับผิวทั้งหมด จะอย่างไรก็ตาม นับว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุดที่จะทำได้

วงแหวนของนิวตันนั้น เกิดที่ฟิล์มบาง ๆ ของอากาศ ที่อยู่ระหว่างผิวของเลนส์กับผิวราบมาตรฐาน ณ จุดสัมผัสและบริเวณใกล้เคียง ๆ รูป 3.3 เป็นรูปแสดงการหาค่ารัศมีความโค้งโดยวิธีวงแหวนของนิวตัน รูป 3.3 ก. แสดงผิวสองผิวซึ่งผิวล่างมีรัศมีความโค้ง R_1 และผิวบนมีรัศมีความโค้ง R_2 วางไม่สัมผัสกันตันทัน ห่างกันเล็กน้อยเป็นระยะ e (ความหมายคือ ผิวทั้งสองไม่สะอาดดีเมื่อวางให้สัมผัสซึ่งห่างกัน), n เป็นดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวทั้งสอง โดยใช้กฎโคไซน์ของการแทรกสอด⁽⁹⁾ ซึ่งจะกล่าวในภาคผนวก ก. ประกอบกับความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต สามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีความโค้งของผิวทั้งสอง กับเส้นผ่าศูนย์กลางของริ้วการแทรกสอด⁽⁷⁾ (เส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนนิวตัน) ได้ดังสมการ (3-1)



รูป 3.3 การหาค่ารัศมีความโค้งโดยวิธีวงแหวนของนิวตัน

$$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = \frac{4(m_j - m_i)\lambda}{n(d_j^2 - d_i^2)} = \frac{4\Delta m \lambda}{n\Delta d^2} = \frac{4\beta\lambda}{n} \dots (3-1)$$

โดยที่ R_1 คือรัศมีความโค้งของผิวล่าง, R_2 เป็นรัศมีความโค้งของผิวบน, n คือดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวที่สัมผัสกัน, m_j และ m_i เป็นอันดับที่ของวงแหวนมืดของผิวชั้น j และ i ตามลำดับ โดยที่ $j > i$, d_j และ d_i เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนมืด j และ i ตามลำดับ, Δm เป็นผลต่างของอันดับที่ของวงแหวนมืด j และ i มีค่า $= m_j - m_i$, $\Delta d^2 = d_j^2 - d_i^2$ เป็นผลต่างของเส้นผ่าศูนย์กลางกำลังสองของวงแหวนมืด j และ i ,

$$\beta = \frac{\Delta m}{\Delta d^2} \text{ เป็นค่าคงที่ } \lambda \text{ เป็นความยาวคลื่นแสงที่ใช่ ซึ่งจะใช่แสงสีเหลือง}$$

(D-line) ของหลอดโซเดียม = 589.3 นาโนเมตร จากสมการ (3-1) นั้น ถ้ารู้ค่า R ค่าใดค่าหนึ่ง และได้ค่า Δm กับ Δd^2 จากการวัดวงแหวนมืดโดยตรง จะหาค่า R อีกค่าหนึ่งได้ ซึ่งการหารัศมีความโค้งของแต่ละผิวของเลนส์ทรงคี่จะนำสมการ (3-1) ไปใช้ ดังนี้

4.2.1 การหารัศมีความโค้งของเลนส์นูน (คือผิวที่ 1 และผิวที่ 2 ของเลนส์ทรงคี่ และผิวบนอ้างอิง R_2) ชุดอุปกรณ์ เพื่อวัดขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนมืดชั้น ดังรูป 3.3 ข. การหารัศมีความโค้งในกรณีนี้ จะใช้ผิวล่างเป็นผิวราบมาตรฐานและผิวบนเป็นผิวของเลนส์นูน ที่ต้องการจะหาค่ารัศมีความโค้ง จัดให้ผิวทั้งสองสัมผัสกัน ในห้องปฏิบัติการ นั่นคือ ตัวกลางระหว่างผิวทั้งสองก็คืออากาศ ซึ่งมีดัชนีหักเหมีค่า $= 1$ ดังนั้น ถ้าใช้ค่า $R_1 = \infty$ (ความหมายคือ ผิวล่างเป็นผิวราบ) และ $n = 1$ (คือดัชนีหักเหของตัวกลางระหว่างผิวทั้งสอง ซึ่งก็คืออากาศ มีค่า $= 1$) แทนลงในสมการ (3-1) จะได้สมการของรัศมีความโค้งของผิวบน (R_2) ซึ่งเป็นสมการที่จะนำไปใช้ในการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 1 และผิวที่ 2 ของเลนส์ทรงคี่ และผิวบนอ้างอิง R_2 ดังนี้

$$\frac{1}{R_2} = \frac{4\beta\lambda}{n} \dots (3-2)$$

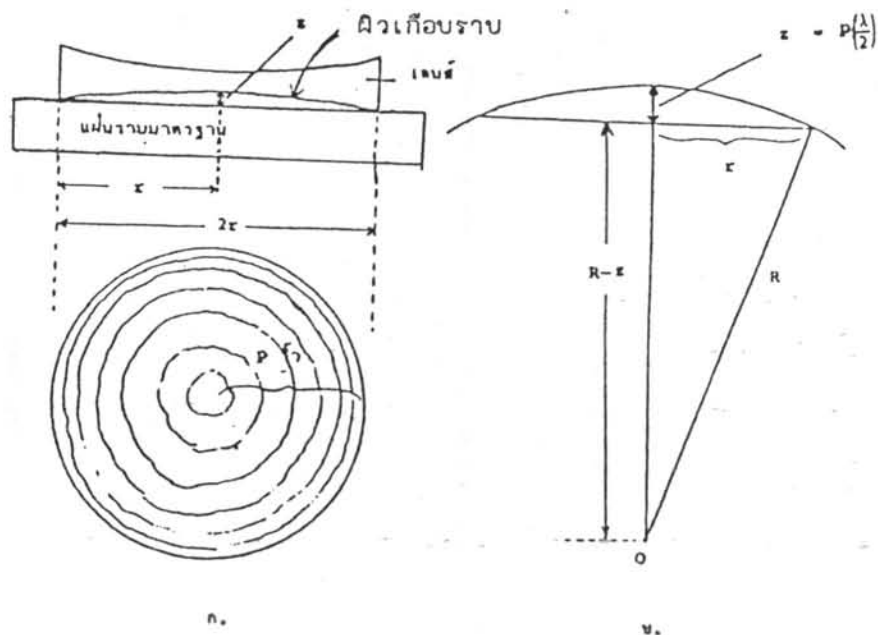
4.2.2 การหารัศมีความโค้งของผิวเว้าของเลนส์เว้า (คือผิวที่ 3 ของเลนส์ทรงคี่) ชุดอุปกรณ์ ดังรูป 3.3 ค. ซึ่งจากรูป 3.3 ค. จะจัดให้ผิวเว้าของเลนส์เว้า (ที่ต้องการจะทราบค่ารัศมีความโค้ง) เป็นผิวล่าง และผิวบนที่ทราบค่าแล้วอีกผิวหนึ่งเป็นผิวบน ซึ่งรัศมีความโค้งของผิวบน

นี้ จะต้องมีย่านน้อยกว่ารัศมีความโค้งของผิวเว้าของเลนส์เว้า (คือ $R_2 < R_1$) เพื่อที่จะได้วางให้ผิวทั้งสองสัมผัสกันตรงกลาง และทำให้เกิดวงแหวนนิวตัน ดังนั้น ถ้าใช้ค่า R_2 (รัศมีความโค้งของผิวบน ซึ่งเป็นรัศมีความโค้งของผิวบนอ้างอิง) ที่ทราบค่า และ n คือดัชนีหักเหของอากาศ = 1 แทนลงในสมการ (3-1) จะได้สมการของรัศมีความโค้งของผิวล่าง ซึ่งเป็นสมการที่จะนำไปใช้ในการหารัศมีความโค้ง ของผิวที่ 3 ของเลนส์ทรงค้ ดังนี้

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2} - 4\beta\lambda \quad \text{-----}(3-3)$$

4.2.3 การหารัศมีความโค้งของผิวเกือบราบของเลนส์เว้า (คือผิวที่ 4 ของเลนส์ทรงค้)

เนื่องจากออกแบบเลนส์ ให้หน้าทั้งสองของเลนส์ทรงค้เป็นผิวราบก็จริง แต่การทำผิวราบนั้นยาก ผลการฝนผิวดังกล่าวยังเป็นผิวเว้าอยู่ ู้ได้โดยการพิจารณาวิธีการแทรกสอดที่เกิดขึ้น เมื่อลองเทียบกับผิวราบมาตรฐาน ดังรูป 3.4 และรัศมีความโค้งของผิวเกือบราบนี้ สามารถหาได้ จากการพิจารณา ลักษณะและจำนวนวิธีการแทรกสอด ดังนี้ จากรูป 3.4 ก. ซึ่งแสดงการตรวจสอบผิวเกือบราบของเลนส์ ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $2r$ ลักษณะของวิธีการแทรกสอดที่ได้ เป็นริ้ววงกลมศูนย์กลางร่วม ดังในรูป 3.4 ก. ซึ่ง p คือจำนวนริ้วที่นับได้ แต่ละริ้วจะบอกถึงบริเวณที่มีความลึกต่างกัน $\frac{\lambda}{2}$ ดังนั้น



รูป 3.4 การตรวจสอบผิวราบโดยใช้แผ่นราบมาตรฐาน

จะทำให้เราทราบได้ทันทีว่า ผิวเกือบราบที่กำลังตรวจสอบนี้ บริเวณกลางผิวจะลึกกว่าขอบเป็นระยะ $p\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ โดยที่ λ คือความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการตรวจสอบ และถ้าให้ z เป็นความลึกของผิว บริเวณกลาง ๆ จากขอบของผิว ดังนั้น $z = p\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ ส่วนรูป 3.4 ข เป็นภาพขยาย บริเวณที่สัมผัสกันของผิวทั้งสอง, R คือรัศมีความโค้งของผิวเกือบราบ, r คือครึ่งหนึ่งของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของผิวเกือบราบ จากรูป 3.4 ข. เราสามารถหาความสัมพันธ์ได้ว่า

$$r^2 = R^2 - (R - z)^2 = 2Rz - z^2 \quad \text{----- (3-4)}$$

โดยที่ค่า $z \ll R$ จึงตัดเทอมสุดท้ายในสมการ (3-4)ทิ้งได้ ดังนั้นจากสมการ (3-4) จะได้ว่า

$$R = \frac{r^2}{2z} \quad \text{----- (3-5)}$$

แทนค่า $z = p\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ จะได้

$$R = \frac{r^2}{p\lambda} \quad \text{----- (3-6)}$$

สมการ (3-6) เป็นสมการที่จะนำไปใช้ ในการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 4 ของเลนส์ทรงคี่ ซึ่งเว้าเล็กน้อย โดยที่ p คือจำนวนริ้วที่นับได้, $2r =$ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของผิวเลนส์ (ที่นับจำนวนริ้ว) การพิจารณาว่าเป็นริ้วของผิวเว้าหรือผิวบุมน รายละเอียดอยู่ในบทที่ 2 ในหัวข้อการทดสอบผิวราบโดยการแทรกสอด (หัวข้อ 3.3.2 ของบทที่ 2) ถ้าหากพิจารณาได้ว่าผิวของเราเป็นผิวบุมน สมการ (3-6) ก็ยังสามารถใช้ได้เช่นกัน และการนับจำนวนริ้วนั้น จะนับจากรีวกึ่งกลางจนถึงขอบของผิวเลนส์ จะให้สะดวก ก็ใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดเลื่อนได้ในแนวอนช่วย

4.2.4 ผลการทดสอบ เลนส์ที่ฝนทั้งหมดมี 4 ชั้น คือเลนส์บุมน 2 ชั้น และเลนส์เว้า 2 ชั้น ซึ่งจะต้องวัดค่ารัศมีความโค้งของเลนส์องค์ประกอบ ดังกล่าวทุกชั้น การวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนนิวตัน (คือวัดระยะ d_i, d_j) จะกระทำ 4 แนวรอบจุดสัมผัส ซึ่งก็คือจุดศูนย์กลางของวงแหวนนิวตัน ซึ่งแต่ละแนวที่มุมประมาณ 45 องศา กับอีกแนวหนึ่ง ผลการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนนิวตันแต่ละแนว จะนำมาคำนวณหารัศมีความโค้งของผิวเลนส์ได้ค่าหนึ่ง แล้วนำผลจากทั้งสี่แนวมาเฉลี่ย เป็นรัศมีความโค้งสุดท้ายอีกครั้ง การเฉลี่ยใช้ตัวกลางเลขคณิต ค่ารัศมีความโค้งที่ได้ จะคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation ซึ่งใช้ตัวย่อ σ) ไว้ด้วย

ตาราง 3.2 เป็นตารางแสดงการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์รองคี่ที่ 1 โดยใช้วิธีวงแหวนของนิวตัน ซึ่งจะวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนนิวตันเป็นสี่แนว แต่ละแนว จะได้รัศมีความโค้งเฉลี่ย (\bar{R}) ค่าหนึ่ง ซึ่งจะอยู่ในช่องขวามือ และได้คำนวณค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานไว้ด้วย รัศมีความโค้งของผิวนี้ได้จากการเฉลี่ยค่ารัศมีความโค้ง ที่คำนวณได้จากแนววัด ทั้งสี่ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยก็เช่นกัน ได้จากการเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละแนว จากตาราง 3.2 จะได้ว่าผิวแรกของเลนส์รองคี่ที่ 1 มีรัศมีความโค้ง 15.22 ± 0.16 เซนติเมตร

ตาราง 3.3 เป็นตารางแสดงการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์รองคี่ที่ 1 โดยใช้วิธีวงแหวนของนิวตัน ซึ่งจะได้ว่า รัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์รองคี่ที่ 1 นี้ มีค่า 15.21 ± 0.21 เซนติเมตร

ตาราง 3.4 เป็นตารางแสดงการหารัศมีความโค้งของผิวหน้าอ้างอิง R_2 โดยใช้วิธีวงแหวนของนิวตัน จะได้ว่า รัศมีความโค้งของผิวหน้าอ้างอิง R_2 นี้ มีค่า 4.01 ± 0.27 เซนติเมตร เรา จะใช้ผิวหน้าอ้างอิง R_2 นี้ ในการหาค่ารัศมีความโค้งของผิวที่ 3 (คือผิวเว้าของเลนส์เว้า) ของเลนส์รองคี่ทั้งสองชุด

ตาราง 3.5 เป็นตารางแสดงการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 3 ของเลนส์รองคี่ที่ 1 เทียบกับผิวหน้าอ้างอิง R_2 จะได้ว่า รัศมีความโค้งของผิวนี้มีค่า 15.00 ± 0.07 เซนติเมตร

ตาราง 3.6, 3.7 และ 3.8 เป็นตารางแสดงการหารัศมีความโค้ง ของผิวต่าง ๆ ของเลนส์รองคี่ที่ 2 ตาราง 3.6 เป็นตารางแสดงการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์รองคี่ที่ 2 ซึ่งจะได้ว่า มีรัศมีความโค้ง 14.23 ± 0.06 เซนติเมตร ตาราง 3.7 เป็นตารางแสดงการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์รองคี่ที่ 2 ซึ่งจะได้ว่ามีรัศมีความโค้ง 14.20 ± 0.09 เซนติเมตร ตาราง 3.8 เป็นตารางแสดงการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 3 ของเลนส์รองคี่ที่ 2 เทียบกับผิวหน้าอ้างอิง R_2 ซึ่งจะได้ว่ามีรัศมีความโค้งเฉลี่ย 14.00 ± 0.05 เซนติเมตร

สำหรับผิวเกือบราบของเลนส์เว้า (คือผิวที่ 4) ของเลนส์รองคี่ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 เมื่อทดสอบกับผิวราบมาตรฐาน ทำให้ทราบว่า เป็นผิวเว้าทั้งคู่ ลักษณะของริ้วเป็นวงกลมศูนย์กลางร่วม การนับริ้วการแทรกสอด จะใช้กล้องจุลทรรศน์ช่วย โดยนับจากจุดศูนย์กลางของริ้วการแทรกสอด ไปยังขอบของผิวเลนส์ การนับจำนวนริ้วจะนับ 4 แนว ซึ่งแต่ละแนวจะตั้งฉากกัน นำจำนวน

ตารางที่ 3.2 แสดงการหาค่าความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์ทรงคี่ที่ 1

โดยวิธีวางแหวนของนิวตัน

m_1	m_j	$\Delta m = m_j - m_1$	d_1 เซนติเมตร	d_j เซนติเมตร	$\Delta d^2 = d_j^2 - d_1^2$ (เซนติเมตร) ²	$R = (4 \cdot \beta \cdot \lambda)^{-1}$ เซนติเมตร	$\bar{R} \pm \sigma$ เซนติเมตร
แนววัดที่ 1							
5	10	5	0.1284	0.1853	0.01785	15.14	15.25 ± 0.17
6	11	5	0.1409	0.1951	0.01821	15.45	
7	12	5	0.1521	0.2026	0.01791	15.20	
8	13	5	0.1644	0.2119	0.01787	15.16	
9	14	5	0.1759	0.2220	0.01834	15.56	
10	15	5	0.1853	0.2290	0.01810	15.36	
11	16	5	0.1951	0.2364	0.01782	15.12	
12	17	5	0.2026	0.2424	0.01771	15.03	
แนววัดที่ 2							
5	10	5	0.1280	0.1848	0.01777	15.07	15.23 ± 0.13
6	11	5	0.1405	0.1947	0.01817	15.41	
7	12	5	0.1517	0.2026	0.01803	15.30	
8	13	5	0.1639	0.2115	0.01787	15.16	
9	14	5	0.1756	0.2212	0.01809	15.35	
10	15	5	0.1848	0.2285	0.01806	15.32	
11	16	5	0.1947	0.2362	0.01788	15.17	
12	17	5	0.2026	0.2424	0.01771	15.03	
แนววัดที่ 3							
5	10	5	0.1256	0.1837	0.01797	15.25	15.22 ± 0.17
6	11	5	0.1375	0.1925	0.01815	15.40	
7	12	5	0.1509	0.2012	0.01771	15.03	
8	13	5	0.1635	0.2109	0.01775	15.06	
9	14	5	0.1742	0.2196	0.01788	15.17	
10	15	5	0.1837	0.2268	0.01769	15.01	
11	16	5	0.1925	0.2350	0.01817	15.42	
12	17	5	0.2012	0.2422	0.01818	15.42	
แนววัดที่ 4							
5	10	5	0.1252	0.1832	0.01789	15.18	15.19 ± 0.17
6	11	5	0.1372	0.1920	0.01804	15.31	
7	12	5	0.1500	0.2008	0.01782	15.12	
8	13	5	0.1631	0.2106	0.01775	15.06	
9	14	5	0.1740	0.2190	0.01768	15.00	
10	15	5	0.1832	0.2264	0.01769	15.01	
11	16	5	0.1920	0.2345	0.01813	15.39	
12	17	5	0.2008	0.2420	0.01824	15.48	

รัศมีความโค้งของผิวนี้คือ

= 15.22 ± 0.16 เซนติเมตร

โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน

m_1	m_j	$\Delta m = m_j - m_1$	d_1 เซนติเมตร	d_j เซนติเมตร	$\Delta d^2 = d_j^2 - d_1^2$ (เซนติเมตร) ²	$R = (4 \cdot \beta \cdot \lambda)^{-1}$ เซนติเมตร	$\bar{R} \pm \sigma$ เซนติเมตร
แนววัดที่ 1							
5	10	5	0.1251	0.1841	0.01824	15.48	15.22 ± 0.25
6	11	5	0.1412	0.1934	0.01747	14.82	
7	12	5	0.1511	0.2018	0.01789	15.18	
8	13	5	0.1636	0.2110	0.01776	15.06	
9	14	5	0.1733	0.2201	0.01841	15.62	
10	15	5	0.1841	0.2280	0.01809	15.35	
11	16	5	0.1934	0.2354	0.01801	15.28	
12	17	5	0.2018	0.2415	0.01760	14.93	
แนววัดที่ 2							
5	10	5	0.1250	0.1830	0.01786	15.16	15.19 ± 0.19
6	11	5	0.1383	0.1932	0.01820	15.44	
7	12	5	0.1522	0.2025	0.01784	15.14	
8	13	5	0.1621	0.2110	0.01824	15.48	
9	14	5	0.1732	0.2183	0.01766	14.98	
10	15	5	0.1830	0.2259	0.01754	14.88	
11	16	5	0.1932	0.2349	0.01785	15.15	
12	17	5	0.2025	0.2429	0.01799	15.27	
แนววัดที่ 3							
5	10	5	0.1254	0.1845	0.01832	15.54	15.23 ± 0.28
6	11	5	0.1415	0.1937	0.01750	14.84	
7	12	5	0.1514	0.2021	0.01792	15.21	
8	13	5	0.1638	0.2113	0.01782	15.12	
9	14	5	0.1737	0.2205	0.01845	15.65	
10	15	5	0.1845	0.2283	0.01808	15.34	
11	16	5	0.1937	0.2358	0.01808	15.34	
12	17	5	0.2021	0.2415	0.01748	14.83	
แนววัดที่ 4							
5	10	5	0.1264	0.1835	0.01770	15.01	15.19 ± 0.17
6	11	5	0.1413	0.1949	0.01802	15.29	
7	12	5	0.1530	0.2029	0.01776	15.07	
8	13	5	0.1648	0.2120	0.01778	15.09	
9	14	5	0.1749	0.2209	0.01821	15.45	
10	15	5	0.1835	0.2277	0.01818	15.42	
11	16	5	0.1949	0.2359	0.01766	14.99	
12	17	5	0.2029	0.2430	0.01788	15.17	

ตาราง 3.4 แสดงการหาค่ามีความโค้งของผิวพูนอ้างอิง R_2 โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน

m_1	m_j	Δm	d_1 เซนติเมตร	d_j เซนติเมตร	$\Delta d^2 \times 10^{+3}$ (เซนติเมตร) ²	$R = (4.8\lambda)^{-1}$ เซนติเมตร	$\bar{R} \pm \sigma$ เซนติเมตร
แนววัดที่ 1							
2	6	4	0.0379	0.0739	4.025	4.27	3.94 \pm 0.48
3	7	4	0.0485	0.0799	4.032	4.28	
4	8	4	0.0583	0.0860	3.997	4.24	
5	9	4	0.0656	0.0912	3.856	3.03	
6	10	4	0.0739	0.0956	3.678	3.90	
แนววัดที่ 2							
2	6	4	0.0373	0.0730	3.938	4.18	4.05 \pm 0.13
3	7	4	0.0487	0.0797	3.980	4.22	
4	8	4	0.0593	0.0854	3.777	4.00	
5	9	4	0.0663	0.0901	3.722	3.95	
6	10	4	0.0730	0.0948	3.658	3.88	
แนววัดที่ 3							
2	6	4	0.0375	0.0742	4.099	4.35	3.94 \pm 0.28
3	7	4	0.0500	0.0802	3.932	4.17	
4	8	4	0.0600	0.0841	3.473	3.68	
5	9	4	0.0677	0.0896	3.445	3.65	
6	10	4	0.0742	0.0955	3.615	3.83	
แนววัดที่ 4							
2	6	4	0.0366	0.0699	3.546	4.23	4.14 \pm 0.20
3	7	4	0.0478	0.0786	3.893	4.13	
4	8	4	0.0578	0.0862	4.090	4.34	
5	9	4	0.0639	0.0873	3.538	3.75	
6	10	4	0.0699	0.0942	3.988	4.23	

รัศมีความโค้งของผิวพูนอ้างอิง = 4.01 \pm 0.27 เซนติเมตร

ตาราง 3.5 แสดงการหารค่ามีความโค้งของผิวที่ 3 ของเลนส์ทรงคี่ที่ 1

เทียบกับผิวหน้าอ้างอิง R_2 โดยวิธีวางแหวนของนิวตัน

m_i	m_j	Δm	d_i เซนติเมตร	d_j เซนติเมตร	$\Delta d^2 \times 10^3 / R = \left[\frac{1}{R_2} - 4.B.\lambda \right]^{-1}$ เซนติเมตร ²	$\bar{R} \pm \sigma$ เซนติเมตร
แนววัดที่ 1						
3	8	5	0.0590	0.0998	6.479	14.86
4	9	5	0.0688	0.1058	6.460	14.98
5	10	5	0.0767	0.1110	6.438	15.12
6	11	5	0.0855	0.1172	6.426	15.20
7	12	5	0.0925	0.1225	6.450	15.04
8	13	5	0.0998	0.1281	6.450	15.05
แนววัดที่ 2						
3	8	5	0.0597	0.1001	6.456	15.01
4	9	5	0.0685	0.1056	6.459	14.99
5	10	5	0.0779	0.1119	6.453	15.02
6	11	5	0.0856	0.1175	6.479	14.86
7	12	5	0.0925	0.1225	6.450	15.04
8	13	5	0.1001	0.1284	6.467	14.94
แนววัดที่ 3						
3	8	5	0.0598	0.1002	6.464	14.96
4	9	5	0.0686	0.1057	6.466	14.94
5	10	5	0.0779	0.1119	6.453	15.02
6	11	5	0.0857	0.1175	6.462	14.97
7	12	5	0.0926	0.1226	6.456	15.01
8	13	5	0.1002	0.1284	6.446	15.07
แนววัดที่ 4						
3	8	5	0.0589	0.0996	6.451	15.04
4	9	5	0.0677	0.1050	6.442	15.10
5	10	5	0.0765	0.1110	6.469	14.93
6	11	5	0.0857	0.1175	6.462	14.97
7	12	5	0.0923	0.1224	6.462	14.97
8	13	5	0.0996	0.1280	6.464	14.96

รัศมีความโค้งของผิวนี้มีค่า

15.00 \pm 0.07 เซนติเมตร

ตาราง 3.6 แสดงการหาค่ามีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์ทรงคี่ 2

โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน

m_i	m_j	Δm	d_i เซนติเมตร	d_j เซนติเมตร	$\Delta d^2 = d_j^2 - d_i^2$ เซนติเมตร ²	$R = [4 \cdot \delta \cdot \lambda]^{-1}$ เซนติเมตร	$\bar{R} \pm \delta$ เซนติเมตร	
แนววัดที่ 1								
5	10	5	0.1280	0.1819	0.01670	14.17	14.20 \pm 0.07	
6	11	5	0.1395	0.1903	0.01675	14.22		
7	12	5	0.1514	0.1989	0.01664	14.12		
8	13	5	0.1618	0.2070	0.01667	14.14		
9	14	5	0.1712	0.2150	0.01692	14.35		
10	15	5	0.1819	0.2232	0.01673	14.20		
11	16	5	0.1903	0.2302	0.01678	14.24		
12	17	5	0.1989	0.2373	0.01675	14.21		
แนววัดที่ 2								
5	10	5	0.1258	0.1806	0.01679	14.25		14.25 \pm 0.07
6	11	5	0.1389	0.1903	0.01692	14.36		
7	12	5	0.1497	0.1980	0.01679	14.25		
8	13	5	0.1610	0.2069	0.01689	14.33		
9	14	5	0.1708	0.2141	0.01667	14.14		
10	15	5	0.1806	0.2221	0.01671	14.18		
11	16	5	0.1903	0.2302	0.01678	14.24		
12	17	5	0.1980	0.2367	0.01682	14.27		
แนววัดที่ 3								
5	10	5	0.1260	0.1807	0.01678	14.23	14.24 \pm 0.06	
6	11	5	0.1391	0.1905	0.01694	14.37		
7	12	5	0.1501	0.1983	0.01679	14.25		
8	13	5	0.1617	0.2071	0.01674	14.21		
9	14	5	0.1709	0.2143	0.01672	14.18		
10	15	5	0.1807	0.2222	0.01672	14.19		
11	16	5	0.1905	0.2305	0.01684	14.29		
12	17	5	0.1983	0.2368	0.01675	14.21		
แนววัดที่ 4								
5	10	5	0.1275	0.1817	0.01676	14.22		14.23 \pm 0.06
6	11	5	0.1403	0.1910	0.01680	14.25		
7	12	5	0.1578	0.1992	0.01664	14.12		
8	13	5	0.1630	0.2082	0.01678	14.24		
9	14	5	0.1727	0.2161	0.01687	14.32		
10	15	5	0.1817	0.2232	0.01680	14.26		
11	16	5	0.1910	0.2309	0.01683	14.28		
12	17	5	0.1992	0.2375	0.01672	14.19		

ตาราง 3.7 แสดงการหารค่ามีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์ทรงคี่ 2

โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน

m_i	m_j	Δm	d_1 เซนติเมตร	d_j เซนติเมตร	$\Delta d^2 = d_j^2 - d_1^2$ เซนติเมตร ²	$R = [4 \cdot \beta \cdot \lambda]^{-1}$ เซนติเมตร	$\bar{R} \pm \sigma$ เซนติเมตร
แนววัดที่ 1							
5	10	5	0.1176	0.1750	0.01680	14.25	14.18 ± 0.11
6	11	5	0.1270	0.1810	0.01663	14.11	
7	12	5	0.1419	0.1920	0.01673	14.19	
8	13	5	0.1549	0.2017	0.01677	14.23	
9	14	5	0.1655	0.2099	0.01667	14.14	
10	15	5	0.1750	0.2172	0.01655	14.04	
11	16	5	0.1810	0.2230	0.01697	14.40	
12	17	5	0.1920	0.2312	0.01659	14.08	
แนววัดที่ 2							
5	10	5	0.1173	0.1749	0.01683	14.28	14.20 ± 0.13
6	11	5	0.1306	0.1833	0.01654	14.04	
7	12	5	0.1424	0.1932	0.01704	14.46	
8	13	5	0.1548	0.2012	0.01652	14.02	
9	14	5	0.1650	0.2095	0.01666	14.14	
10	15	5	0.1749	0.2176	0.01676	14.22	
11	16	5	0.1833	0.2245	0.01680	14.26	
12	17	5	0.1932	0.2325	0.01673	14.19	
แนววัดที่ 3							
5	10	5	0.1219	0.1780	0.01682	14.27	14.20 ± 0.05
6	11	5	0.1352	0.1871	0.01673	14.19	
7	12	5	0.1452	0.1944	0.01671	14.18	
8	13	5	0.1561	0.2026	0.01668	14.15	
9	14	5	0.1678	0.2119	0.01674	14.21	
10	15	5	0.1780	0.2199	0.01667	14.15	
11	16	5	0.1871	0.2277	0.01684	14.29	
12	17	5	0.1944	0.2335	0.01673	14.20	
แนววัดที่ 4							
5	10	5	0.1218	0.1778	0.01678	14.24	14.21 ± 0.06
6	11	5	0.1351	0.1870	0.01672	14.18	
7	12	5	0.1450	0.1942	0.01659	14.16	
8	13	5	0.1561	0.2027	0.01672	14.19	
9	14	5	0.1677	0.2117	0.01669	14.16	
10	15	5	0.1778	0.2199	0.01674	14.20	
11	16	5	0.1870	0.2278	0.01692	14.36	
12	17	5	0.1942	0.2334	0.01676	14.22	

ตาราง 3.8 แสดงการหาค่ามีความโค้งของผิวที่ 3 ของเลนส์ทรงคี่ที่ 2

เทียบกับผิวหน้าอ้างอิง R_2 โดยวิธีวงแหวนนิวตัน

m_1	m_2	Δm	d_1 เซนติเมตร	d_2 เซนติเมตร	$\Delta d^2 \times 10^3$ (เซนติเมตร) ²	$R_1 = \left[\frac{1}{R_2} - 4 \cdot \beta \cdot \lambda \right]^{-1}$ เซนติเมตร	$\bar{R}_1 \pm \sigma$ เซนติเมตร	
แนววัดที่ 1								
3	8	5	0.0569	0.0993	6.623	14.04	14.01 \pm 0.04	
4	9	5	0.0675	0.1058	6.637	13.96		
5	10	5	0.0777	0.1126	6.641	13.94		
6	11	5	0.0858	0.1183	6.633	13.98		
7	12	5	0.0926	0.1233	6.628	14.01		
8	13	5	0.0993	0.1284	6.626	14.02		
9	14	5	0.1058	0.1335	6.628	14.01		
10	15	5	0.1126	0.1389	6.614	14.08		
แนววัดที่ 2								
3	8	5	0.0591	0.1006	6.628	14.01		13.99 \pm 0.04
4	9	5	0.0690	0.1068	6.645	13.92		
5	10	5	0.0764	0.1117	6.640	13.95		
6	11	5	0.0851	0.1178	6.635	13.98		
7	12	5	0.0939	0.1243	6.633	13.98		
8	13	5	0.1006	0.1294	6.624	14.03		
9	14	5	0.1068	0.1343	6.630	14.00		
10	15	5	0.1117	0.1382	6.622	14.04		
แนววัดที่ 3								
3	8	5	0.0583	0.1002	6.641	13.94	13.99 \pm 0.05	
4	9	5	0.0683	0.1063	6.635	13.98		
5	10	5	0.0771	0.1122	6.644	13.92		
6	11	5	0.0863	0.1186	6.618	14.06		
7	12	5	0.0935	0.1240	6.634	13.98		
8	13	5	0.1002	0.1291	6.627	14.02		
9	14	5	0.1063	0.1339	6.630	14.00		
10	15	5	0.1122	0.1386	6.621	14.05		
แนววัดที่ 4								
3	8	5	0.0583	0.1001	6.621	14.05		14.00 \pm 0.05
4	9	5	0.0693	0.1069	6.625	14.03		
5	10	5	0.0777	0.1126	6.641	13.94		
6	11	5	0.0867	0.1189	6.620	14.05		
7	12	5	0.0944	0.1247	6.639	13.95		
8	13	5	0.1001	0.1290	6.621	14.05		
9	14	5	0.1069	0.1344	6.636	13.97		
10	15	5	0.1126	0.1390	6.642	13.94		

รั้วที่ได้ทั้งสี่แนวนั้น มาเฉลี่ยเป็นจำนวนรั้วที่นับได้ จากผิวที่กำลังทอดลอบอีกครั้งหนึ่ง

ผลการนับจำนวนรั้วของผิวที่ 4 ของเลนส์รองคี่ที่ 1 จำนวนรั้วที่นับได้ทั้งสี่แนวเป็น 60, 63, 64 และ 61 รั้ว ตามลำดับ ดังนั้น จำนวนรั้วเฉลี่ยจะเป็น 62 รั้ว ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์ตอนที่นับรั้ว $= 2 \times 2.54 = 5.08$ เซนติเมตร ดังนั้นแทนค่า $p = 62$ รั้ว และ $r =$ ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์ที่นับรั้ว $= 2.54$ เซนติเมตร ลงในสมการ (3-6) จะได้ว่า รั้วมีความโค้งของผิวที่สี่ของเลนส์รองคี่ที่ 1 มีค่า 1766 เซนติเมตร

ผลการนับจำนวนรั้วของผิวที่ 4 ของเลนส์รองคี่ที่ 2 จำนวนรั้วที่นับได้ทั้งสี่แนวเป็น 81, 84, 83 และ 80 รั้ว ตามลำดับ ดังนั้นจำนวนรั้วเฉลี่ยเป็น 82 รั้ว ตามลำดับ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์ตอนที่นับรั้ว $= 2 \times 2.54 = 5.08$ เซนติเมตร เมื่อแทนค่า $p = 82$ รั้ว และ $r =$ ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์ที่นับรั้ว $= 2.54$ เซนติเมตร ลงในสมการ (3-6) จะได้ว่า รั้วมีความโค้งของผิวที่สี่ของเลนส์รองคี่ที่ 2 มีค่า 1335 เซนติเมตร

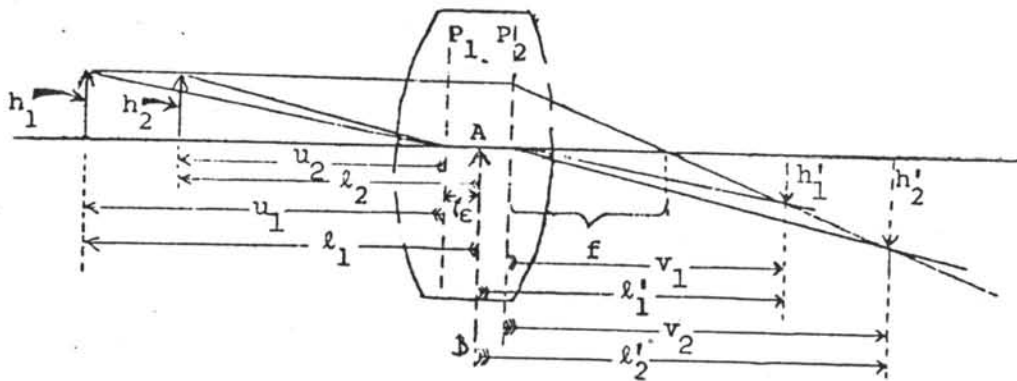
ผลสรุปของการหารั้วมีความโค้งของผิวต่าง ๆ ของเลนส์รองคี่ทั้งสองชุด ดังตาราง 3.9 และในการประกบเป็นเลนส์รองคี่ใหม่ ทั้งสองชุดจะใช้ผิวที่ 2 ประกบกับผิวที่ 3

เลนส์รองคี่ที่ 1		เลนส์รองคี่ที่ 2	
ผิวที่ 1	= 15.22 เซนติเมตร	ผิวที่ 1	= 14.23 เซนติเมตร
ผิวที่ 2	= 15.21 เซนติเมตร	ผิวที่ 2	= 14.20 เซนติเมตร
ผิวที่ 3	= 15.00 เซนติเมตร	ผิวที่ 3	= 14.00 เซนติเมตร
ผิวที่ 4	= 1766 เซนติเมตร	ผิวที่ 4	= 1335 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.9 แสดงรั้วมีความโค้งของผิวต่าง ๆ ของเลนส์รองคี่ทั้งสองชุด

4.3 การหาความยาวโฟกัสของเลนส์รวม (6,4) จะใช้วิธีการนากำลังขยายของเลนส์ (magnification method)

4.3.1 หลักการ วิธีการนากำลังขยายของเลนส์ เป็นวิธีที่เหมาะสมในการหาความยาวโฟกัสของเลนส์ประเภททุกชนิด (6) เพราะการหาความยาวโฟกัสโดยวิธีอื่น มักจะลุ่มมุดว่าเลนส์บาง แล้วใช้สูตรเลนส์บางในการคำนวณ ในขณะที่เลนส์ประเภท จะใช้สูตรเลนส์บางไม่ค่อยถูกต้อง แต่ยังมีวิธีการ ที่จะหาความยาวโฟกัสได้ เพราะที่ค้นค่าสูตรของเกาส์ (Gaussian optics) ถือว่าระยะต่าง ๆ วัดจากจุดมูขยสำคัญ (principal point) และระนาบมูขยสำคัญ (principal plane) ของเลนส์ แทนที่จะวัดจากตำแหน่งของเลนส์ตั้ง ในกรณีเลนส์บาง วิธีการพิจารณากำลังขยายของเลนส์ยึดหลักดังกล่าว



รูป 3.5 การหาความยาวโฟกัสโดยพิจารณากำลังขยาย

พิจารณากรูป 3.5 P₁ คือระนาบมูขยสำคัญทางด้านวัตถุ และ P₂ คือ ระนาบมูขยสำคัญทางด้านภาพ ใช้ความสัมพันธ์ $\frac{1}{v} - \frac{1}{u} = \frac{1}{f}$ และ $m = \frac{h'}{h} = \frac{v}{u}$ โดยที่ u คือระยะวัตถุ, v คือระยะภาพ, f คือความยาวโฟกัส, m คือกำลังขยาย, h' คือ ขนาดของภาพ, h คือขนาดวัตถุ สามารถหาความสัมพันธ์ (6) ได้ ดังสมการ (3-7 a) และ (3-7 b)

$$f = \begin{cases} -\frac{(v_2 - v_1)}{(m_2 - m_1)} & \text{----- (3-7 a)} \\ \frac{(u_2 - u_1)}{\left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_1}\right)} & \text{----- (3-7 b)} \end{cases}$$

โดยที่ f คือความยาวโฟกัส ซึ่งวัดจากระนาบमुखยสำคัญ P_2 , u_1 และ u_2 คือระยะวัตถุครั้งแรกและครั้งหลัง ซึ่งวัดจากตำแหน่งระนาบमुखยสำคัญ P_1 , v_1 และ v_2 คือระยะภาพของวัตถุครั้งแรกและครั้งหลัง ซึ่งวัดจากระนาบमुखยสำคัญ P_2 , $m_1 = \frac{h'_1}{h_1}$ = กำลังขยายของภาพของวัตถุครั้งแรก, $m_2 = \frac{h'_2}{h_2}$ = คือกำลังขยายของภาพของวัตถุครั้งหลัง, การนำสมการ (3-7 a) และ (3-7 b) ไปใช้ในการปฏิบัติจริง จะมีข้อไม่สะดวก เพราะระยะ u_1 , u_2 , v_1 และ v_2 จะต้องวัดจากระนาบमुखยสำคัญ P_1 และ P_2 ดังรูป 3.5 ในการปฏิบัติแล้วการวัดระยะดังกล่าวทำได้ยาก อย่างไรก็ตาม เราสามารถนำสมการทั้งสองไปใช้ในการปฏิบัติจริงได้ คือแทนที่จะใช้ระยะ u_1 , u_2 , v_1 และ v_2 ซึ่งเราไม่ทราบ ก็เสี่ยงไปใช้ระยะ ℓ_1 , ℓ_2 และ ℓ'_1 , ℓ'_2 ดังรูป 3.5 ซึ่งวัดได้ในการปฏิบัติจริงแทน โดยที่ ℓ_1 , ℓ_2 คือระยะวัตถุครั้งแรกและครั้งหลัง ซึ่งวัดจากตำแหน่งที่ตั้งของเลนส์ และ ℓ'_1 , ℓ'_2 คือ ระยะภาพของวัตถุครั้งแรกและครั้งหลัง ซึ่งวัดจากตำแหน่งที่ตั้งของเลนส์

สิ่งที่จะกระทำต่อไป คือ หาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวโฟกัส (วัดจากระนาบमुखยสำคัญ P_2) กับค่าที่วัดได้จริงในการปฏิบัติ คือ ระยะ ℓ_1 , ℓ_2 , ℓ'_1 และ ℓ'_2 พิจารณารูป 3.5 สมมุติว่า AB คือระนาบของตำแหน่งที่ตั้งเลนส์, ℓ_1 และ ℓ_2 คือระยะวัตถุครั้งแรกและครั้งหลังที่วัดได้จริงในการปฏิบัติ, ℓ'_1 และ ℓ'_2 คือระยะภาพของวัตถุครั้งแรกและครั้งหลัง ที่วัดได้จริงในการปฏิบัติ ถ้าสมมุติว่า ระนาบ AB ห่างจากระนาบमुखยสำคัญ P_1 เป็น e จากรูป 3.5 จะเห็นได้ทันทีว่า $u_1 = \ell_1 - e$, $u_2 = \ell_2 - e$, $v_1 = \ell'_1 - (P_1 P_2 - e)$ และ $v_2 = \ell'_2 - (P_1 P_2 - e)$ แทนค่า v_1, v_2 และ u_1, u_2 ลงในสมการ (3-7 a) และ (3-7 b) จะได้

$$f = \left\{ \begin{array}{l} \frac{(\ell_2' - \ell_1')}{(m_2 - m_1)} \quad \text{----- (3-8 a)} \\ \frac{(\ell_2 - \ell_1)}{\left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_1}\right)} \quad \text{----- (3-8 b)} \end{array} \right.$$

สมการ (3-8 a) และ (3-8 b) เป็นสมการที่จะนำไปใช้ ในการหาความยาวโฟกัสของเลนส์ทรงคี่ ทั้งที่ฝนชิ้นเอง และที่เชื่อมมา โดยที่ f คือความยาวโฟกัสของเลนส์ทรงคี่ ซึ่งวัดจากระนาบมูขยสำคัญ P_2 การปฏิบัติที่ท่า จะตั้งเลนส์ทรงคี่บนเบนซ์ (optical bench) ดังนั้น ℓ_1 และ ℓ_2 ก็คือระยะวัตถุครั้งแรกและครั้งหลัง ที่วัดจากตำแหน่งที่ตั้งของเลนส์บนเบนซ์, ℓ_1' และ ℓ_2' ก็คือระยะภาพของวัตถุครั้งแรกและครั้งหลัง ที่วัดจากตำแหน่งที่ตั้งของเลนส์บนเบนซ์, $m_1 = \frac{h_1'}{h_1}$ = กำลังขยายของภาพของวัตถุครั้งแรก และ $m_2 = \frac{h_2'}{h_2}$ = กำลังขยายของภาพของวัตถุครั้งหลัง, h_1 และ h_2 คือขนาดของวัตถุครั้งแรก และครั้งหลัง, h_1' และ h_2' คือขนาดภาพของวัตถุครั้งแรกและครั้งหลัง

สมการ (3-8 a) และ (3-8 b) นั้น ในการนำไปใช้ จะเลือกใช้สมการใดก็ได้ ผลที่ได้คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์เหมือนกัน แต่สำหรับงานที่ท่า เลือกใช้สมการ (3-8 b) เพราะการวัดระยะวัตถุ (คือ ℓ_1 และ ℓ_2) จะวัดได้ค่าแน่นอนกว่าการวัดระยะภาพของวัตถุ (คือ ℓ_1' และ ℓ_2')

4.3.2 วิธีการและผลการหาความยาวโฟกัสโดยพิจารณากำลังขยาย วัตถุ h_1 และ h_2 (ขนาดวัตถุครั้งแรกและครั้งหลัง) นั้น ใช้สเกลละเอียด $\frac{1}{100}$ เซนติเมตร และใช้ความสัมพันธ์ (3-8 b) ในการหาค่าความยาวโฟกัส สำหรับระยะ ℓ_1 และ ℓ_2 คือระยะของวัตถุครั้งแรกและครั้งหลังที่วัดจากตำแหน่งที่ตั้งของเลนส์ตามลำดับ ใช้เลนส์ใกล้ตาที่มีสเกล สามารถอ่านค่าขนาดของภาพสเกลละเอียดนั้นได้ และก็สามารหหาขนาดกำลังขยายของเลนส์ เมื่อวัตถุอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้ การปฏิบัติ จะหาค่าความยาวโฟกัสออกมาหลายค่าแล้วเฉลี่ย ผลการทดลองดังแสดงในตาราง 3.10 และตาราง 3.11 ซึ่งตาราง 3.10 แสดงการหาความยาวโฟกัส ของเลนส์ทรงคี่ที่ 1 และ ตาราง 3.11 แสดงการหาความยาวโฟกัส ของเลนส์ทรงคี่ที่ 2

ตาราง 3.10 การหาความยาวโฟกัสของเลนส์ทรงคี่ที่ 1 โดยพิจารณาจากกำลังขยาย

l_1	l_2	$(l_2 - l_1)$	$m_1 = \frac{h_1'}{h_1}$	$m_2 = \frac{h_2'}{h_2}$	$\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_1}$	$f = \frac{l_2 - l_1}{\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_1}}$
เซนติเมตร	เซนติเมตร	เซนติเมตร				เซนติเมตร
-80.0	-35.0	45.0	-0.518	-3.650	1.656	27.17
-85.0	-40.0	45.0	-0.475	-2.193	1.649	27.29
-90.0	-45.0	45.0	-0.435	-1.563	1.659	27.13
-95.0	-50.0	45.0	-0.415	-1.299	1.640	27.45
-100.0	-55.0	45.0	-0.375	-0.990	1.657	27.16
-105.0	-60.0	45.0	-0.350	-0.833	1.657	27.16
-110.0	-65.0	45.0	-0.330	-0.725	1.650	27.27
-115.0	-70.0	45.0	-0.310	-0.635	1.652	27.24
-120.0	-75.0	45.0	-0.294	-0.571	1.651	27.25

$$\bar{f} = 27.23 \pm 0.10$$

ตาราง 3.11 การหาความยาวโฟกัสของเลนส์ทรงคี่ 2 โดยพิจารณาทำสังขยา

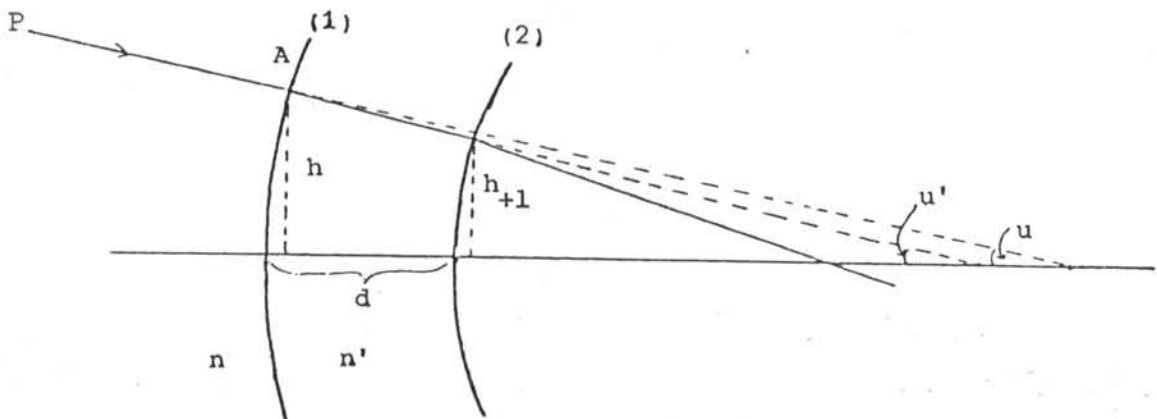
l_1 เซนติเมตร	l_1 เซนติเมตร	$(l_2 - l_1)$ เซนติเมตร	$m_1 = \frac{h_1}{h_1'}$	$m_2 = \frac{h_2}{h_2'}$	$\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_1}$	$f = \frac{l_2 - l_1}{\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_1}}$ เซนติเมตร
-80.0	-35.0	45.0	-0.480	-2.941	1.743	25.81
-85.0	-40.0	45.0	-0.440	-1.916	1.751	25.70
-90.0	-45.0	45.0	-0.405	-1.401	1.755	25.69
-95.0	-50.0	45.0	-0.375	-1.099	1.757	25.62
-100.0	-55.0	45.0	-0.350	-0.904	1.751	25.70
-105.0	-60.0	45.0	-0.325	-0.763	1.767	25.47
-110.0	-65.0	45.0	-0.310	-0.671	1.736	25.93
-115.0	-70.0	45.0	-0.290	-0.588	1.748	25.74
-120.0	-75.0	45.0	-0.275	-0.532	1.756	25.62

$\bar{f} = 25.69 \pm 0.12$

ผลการหาความยาวโฟกัสจากตาราง 3.10 และ 3.11 ได้คำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานไว้ด้วย ซึ่งจะได้ว่า เลนส์ครั้งที่ 1 มีความยาวโฟกัส 27.23 ± 0.10 เซนติเมตร และเลนส์ครั้งที่ 2 มีความยาวโฟกัส 25.69 ± 0.12 เซนติเมตร

4.4 การทดลองเพื่อพิจารณาคุณภาพของเลนส์^(2,4,22) จะเป็นการพิจารณาความคลาดที่ยังหลงเหลืออยู่ ที่เลนส์ครั้งที่สอง แยกเป็นหัวข้อดังนี้

4.4.1 พิจารณาความคลาดของเลนส์โดยการแกะรอยรังสี สัมการที่ใช้ในการแกะรอยรังสี เป็นผลจากการพิจารณาการหักเหของรังสีใกล้แกนमुखยสำคัญ ผ่านผิวหักเห รูป 3.6 แสดงการหักเหของรังสีใกล้แกนमुखยสำคัญ PA ผ่านผิวหักเห (1) และผิวหักเห (2), u คือมุมที่รังสีใกล้แกนทำกับแกนमुखยสำคัญ (หรือเรียกว่ามุมชน) เมื่อรังสีนั้นตกกระทบผิว (1), u' คือมุมที่รังสีใกล้แกนทำกับแกนमुखยสำคัญ (มุมชน) เมื่อหักเหที่ผิว (1) แล้ว, h คือความสูงของรังสีใกล้แกน (วัดจากแกนमुखยสำคัญ) ที่ตกที่ผิว (1), h_{+1} คือความสูงของรังสีใกล้แกนที่ตกที่ผิว (2), n และ n' คือดัชนีหักเหของตัวกลาง ก่อนและหลังที่รังสีใกล้แกนจะหักเหผ่านผิวหักเห (1) จากรูป 3.6 สัมการที่จะใช้ในการแกะรอยรังสีใกล้แกนमुखยสำคัญ ผ่านผิว (1) ไปยังผิว (2) เป็นดังนี้



รูป 3.6 การหักเหของรังสีใกล้แกน ผ่านผิวหักเห 2 ผิว

$$\text{สัมการหักเห} \quad u' = \frac{nu + hk}{n'} \quad \text{-----}(3-9)$$

$$\text{สัมการส่งผ่าน} \quad h_{+1} = h - du' \quad \text{-----}(3-10)$$

$$\text{สมการตรวจสอบ} \quad n(hc - u) = n'(hc - u') \quad \text{-----}(3-11)$$

โดยที่ n และ n' คือดัชนีหักเหของตัวกลางก่อนและหลังการหักเห ที่ผิว (1), u และ u' คือมุมอินที่รังสีกระทำกับแกนमुखยสำคัญก่อนและหลังการหักเหที่ผิว (1), h คือความสูงของรังสีใกล้แกนที่ตกที่ผิว (1) วัดจากแกนमुखยสำคัญ, k คือกำลังของผิว (1) มีค่า $= (n' - n) \cdot c$ โดยที่ c คือความโค้งของผิว (1), h_{+1} คือความสูงของรังสีใกล้แกน ซึ่งตกที่ผิวถัดไป และ d คือระยะระหว่างผิวที่กำลังพิจารณากับผิวถัดไป สำหรับสมการตรวจสอบในกรณีของรังสีใกล้แกน ก็คือค่านิลของการหักเห $A = n(hc - u)$ นั้นเอง ทั้งนี้เนื่องจากการหักเหผ่านผิวใด ๆ ก็ตาม ค่านิลของการหักเหก่อนและหลังการหักเห จะมีค่าเท่ากันดังสมการ (3-11) และได้ใช้สมการนี้ ในการตรวจสอบการแกะรอยรังสี ในตาราง 3.12 และ 3.13 ด้วย

ในกรณีที่ เป็นรังสีमुखยสำคัญ สมการที่ใช้ในการแกะรอยรังสี จะเหมือนสมการ (3-9) และ (3-10) และสมการตรวจสอบจะเหมือนสมการ (3-11) แต่ในกรณีนี้ u , u' , h , h' และ A จะใช้ \bar{u} , \bar{u}' , \bar{h} , \bar{h}' และ B แทน เพื่อให้แตกต่างจากรังสีใกล้แกน ดังนั้นสมการการแกะรอยรังสีमुखยสำคัญคือ

$$\text{สมการหักเห} \quad \bar{u}' = \frac{n\bar{u} + \bar{h}k}{n'} \quad \text{-----}(3-12)$$

$$\text{สมการส่งผ่าน} \quad \bar{h}_{+1} = \bar{h} - d\bar{u}' \quad \text{-----}(3-13)$$

$$\text{สมการตรวจสอบ} \quad n(\bar{h}c - \bar{u}) = n'(\bar{h}c - \bar{u}') \quad \text{-----}(3-14)$$

จากการแกะรอยรังสี นำไปสู่การหาค่าสัมประสิทธิ์ (ส.ป.ส.) ของความคลาดของรังสีใกล้แกน (Siedel aberration coefficient or paraxial aberration coefficient) ซึ่งก็คือ ค่าสูงที่สุดของความคลาดของรังสีใกล้แกนนั้นเอง มีอยู่ 5 ชนิด สำหรับแสงสีเดียว สามารถเขียนอยู่ในรูปความคลาดเชิงหน้าคลื่น (wavefront aberration) ได้ดังนี้^(2,4,22)

$$\text{ส.ป.ส. ความคลาดทรงกลม} \quad 0W_{40} = \frac{1}{8} S_I = \frac{1}{8} \Sigma A^2 h \Delta \left(\frac{u}{n} \right) \quad \text{---(3-15 a)}$$

$$\text{ส.ป.ส. ของโคมา} \quad 1W_{31} = \frac{1}{2} S_{II} = \frac{1}{2} \Sigma ABh \Delta \left(\frac{u}{n} \right) \quad \text{---(3-15 b)}$$

$$\text{ส.ป.ส. ความคลาดเฉียง} \quad 2W_{22} = \frac{1}{2} S_{III} = \frac{1}{2} \Sigma B^2 h \Delta \left(\frac{u}{n} \right) \quad \text{---(3-15 c)}$$

$$\text{ส.ป.ส. ความโค้งสนาม} \quad 2W_{20} = \frac{1}{4} (S_{III} + S_{IV}) = \frac{1}{4} \left[\Sigma B^2 h \Delta \left(\frac{u}{n} \right) - H^2 \Sigma c \Delta \left(\frac{1}{n} \right) \right] \quad \text{---(3-15 d)}$$

$$\text{ส.ป.ส. ความบิดเบี้ยว} \quad 3W_{11} = \frac{1}{2} S_V = \frac{1}{2} \Sigma \frac{B}{A} (S_{III} + S_{IV}) \quad \text{---(3-15 e)}$$

โดยที่ $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V$ คือผลรวมของไซเดล (Seidel sums) ของความคลาดทรงกลม, ของโคมา, ของความคลาดเฉียง, ของความโค้งของสนาม และของความบิดเบี้ยว ตามลำดับ มีค่าดังได้เขียนในสมการ (3-15) โดยที่

$$A = \text{ค่าผลของการหักเหของรังสีใกล้แกนมุขยสำคัญ} = n(hc - u) = n'(hc - u') \quad \text{---(3-16 a)}$$

$$B = \text{ค่าผลของการหักเหของรังสีมุขยสำคัญ} = n(\bar{h}c - \bar{u}) = n'(\bar{h}c - \bar{u}') \quad \text{---(3-16 b)}$$

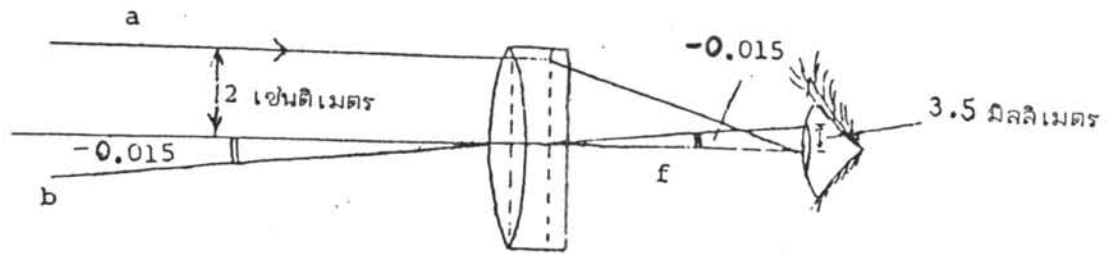
$$H = \text{ค่าผลของลากรองค์} = nu\eta = nu'\eta' = n(u\bar{h} - \bar{u}h) \quad \text{---(3-16 c)}$$

$$\Delta \left(\frac{u}{n} \right) = \text{ค่าแตกต่างของ } \frac{u}{n} \text{ หลังและก่อนหักเห} = \frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \quad \text{---(3-16 d)}$$

$$\Delta \left(\frac{1}{n} \right) = \text{ค่าแตกต่างของ } \frac{1}{n} \text{ หลังและก่อนหักเห} = \frac{1}{n'} - \frac{1}{n} \quad \text{---(3-16 e)}$$

ค่าต่าง ๆ ใน (3-16) เป็นดังนี้ n และ n' เป็นดัชนีหักเหของตัวกลาง ก่อนและหลังหักเห, c เป็นค่าความโค้ง ของผิวหักเห, u และ u' เป็นมุมอินที่รังสีกระทำกับแกนมุขยสำคัญก่อนและหลังการหักเห, η และ η' เป็นขนาดวัตถุและขนาดภาพของระบบ, h เป็นความสูงของรังสีตกที่ผิวห่างจากแกนมุขยสำคัญ ค่าเหล่านี้ในกรณีของรังสีมุขยสำคัญ เขียนได้เป็น $\bar{u}, \bar{u}', \bar{h}, n, n', c, \eta$ และ η'

4.4.1.1 วิธีการ การหาค่า ส.ป.ส. ความคลาดไซเดล ทำได้โดยการแกะรอยรังสีใกล้แกนมุขยสำคัญจากตำแหน่งวัตถุบนแกนไปยังขอบของตัวจำกัดแสง ในลักษณะนี้จะได้ค่า u, u', h, A และแกะรอยรังสีมุขยสำคัญ จากขอบของสนามของวัตถุ (field size) ผ่านจุดกึ่งกลางของตัวจำกัดแสง จะได้ค่า $\bar{u}, \bar{u}', \bar{h}$ และ B แทนค่าใน (3-15) จะได้ ส.ป.ส. ของความคลาดต่าง ๆ ตามต้องการ



รูป 3.7 รังสีที่ใช้ในการแกะรอยรังสีเพื่อพิจารณาความคลาด

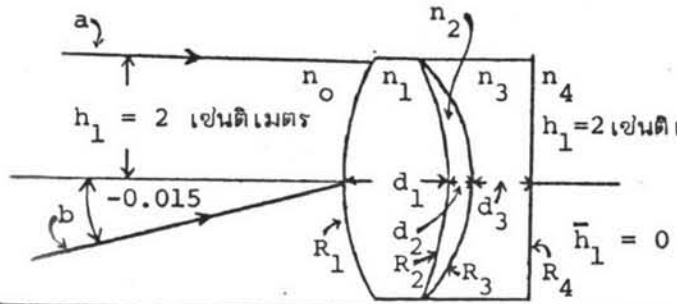
การแกะรอยรังสีที่ทำนั้น แกะรอยรังสีจากวัตถุในแกนमुखยสำคัญ ณ จุดอนันต์มาที่ขอบของช่องเปิดใช้ค่า $h = 2$ เซนติเมตร ตั้งรังสี a ในรูป 3.7 และแกะรอยรังสีमुखยสำคัญจากขอบส่วนวัตถุมายังจุดกึ่งกลางของเลนส์ โดยถือว่าขอบเลนส์คือตัวจำกัดแสง ท่วมกับแกนमुखยสำคัญ -0.015 เรเดียน [โดยคิดว่าภาพจากอนันต์มาเต็มม่านตาที่เปิดเต็มที่มีขนาดประมาณ 7 มิลลิเมตร⁽²⁾ และคิดระยะความยาวโฟกัส 27.23 และ 25.69 เซนติเมตร] ตั้งรังสี b ในรูป 3.7 การที่ใช้ค่าลบ เพราะจะทำให้ปริมาณอื่น ๆ เป็นบวก รายละเอียดในการแกะรอยรังสีของเลนส์ทั้งสองอยู่ในตาราง 3.12 และตาราง 3.13

4.4.1.2 ผลการแกะรอยรังสี จากตาราง 3.12 และ 3.13 อาจมาเขียนสรุปผลการคำนวณค่า ส.ป.ส. ความคลาดต่าง ๆ ได้ ดังแสดงในตาราง 3.14 ซึ่งค่า λ เป็นความยาวคลื่นของเส้นสีเปกตรัม D คือ 589.3 นาโนเมตร ความคลาดนี้เป็นความคลาดเชิงหน้าคลื่น อาจเปลี่ยนให้เป็นความคลาดเชิงรังสีได้ เนื่องจากวัตถุอยู่บนแกน ความคลาดทรงกลมเท่านั้นที่จะพิจารณาเปลี่ยนให้เป็นความคลาดเชิงรังสี ใช้ความสัมพันธ์⁽²²⁾ ดังนี้

$$\text{ความคลาดทรงกลมตามยาว} = -\frac{S_I}{2n'_k u'_k{}^2} \quad \text{----- (3-17)}$$

$$\text{ความคลาดทรงกลมตามขวาง} = -\frac{S_I}{2n'_k u'_k} \quad \text{----- (3-18)}$$

โดยที่ S_I คือ ผลรวมของไซเคิลของความคลาดทรงกลม, n'_k คือมุมชั้นของรังสีใกล้แกนमुखยสำคัญ ที่ผิวสุดท้ายของระบบ และ n'_k คือ ดัชนีหักเหของตัวกลางหลังผิวสุดท้ายของระบบ จากตาราง (3.12) $n'_k = n'_4 = 1$ และ $u'_k = u'_4 = 0.0722909$ เรเดียน แทนค่าในสมการ (3-17) และ (3-18) จะได้ความคลาดทรงกลมเชิงรังสีของเลนส์ครั้งที่ 1 ดังแสดงไว้ในตาราง 3.15 และ



$n_0 = 1$
 $n_1 = 1.62270$
 $n_2 = 1.55000$
 $n_3 = 1.68880$
 $n_4 = 1$

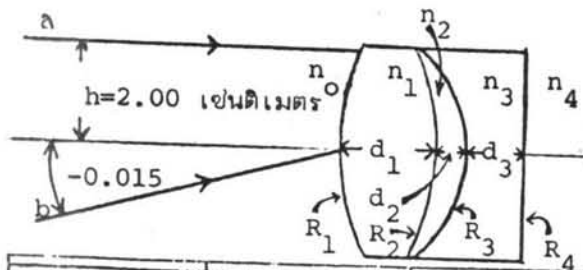
$R_1 = 15.22$ เซนติเมตร
 $R_2 = 15.21$ เซนติเมตร
 $R_3 = 15.00$ เซนติเมตร
 $R_4 = 1766$ เซนติเมตร
 $d_1 = 0.740$ เซนติเมตร
 $d_2 = 0.005$ เซนติเมตร
 $d_3 = 0.430$ เซนติเมตร

ผิวที่	$c = \frac{1}{R}$ (เซนติเมตร) ⁻¹	n	$u' = \frac{nu + hk}{n'}$	d เซนติเมตร	$h_{+1} = h - du'$ เซนติเมตร	$k = (n' - n)c$ (เซนติเมตร) ⁻¹	ตารางสอบ $A = n(hc - u) = n'(hc - u')$
รังสีใกล้แกน a							
1	0.0657030	1	0	-	2	0.0409133	0.131406 = 0.131405
2	-0.0657462	1.62270	0.0504262	0.740	1.96268	0.00477975	-0.291218 = -0.291218
3	-0.0666666	1.55000	0.0588437	0.005	1.96239	-0.00925333	-0.293988 = -0.293988
4	0.000566251	1.68880	0.0432550	0.430	1.94379	-0.000390034	-0.0711902 = -0.0711902
		1	0.0722909	-			
ผิวที่	$c = \frac{1}{R}$ (เซนติเมตร) ⁻¹	n	$\bar{u}' = \frac{n\bar{u} + \bar{h}k}{n'}$	d เซนติเมตร	$\bar{h}_{+1} = \bar{h} - d\bar{u}'$ เซนติเมตร	$k = (n' - n)c$ (เซนติเมตร) ⁻¹	ตารางสอบ $B = n(\bar{h}c - \bar{u}) = n'(\bar{h}c - \bar{u}')$
รังสีขอบสำคัญ b							
1	0.0657030	1	-0.0150000	-	0	0.0409133	0.0150000 = 0.0149999
2	-0.0657462	1.62270	-0.00924385	0.740	0.00684045	0.00477975	0.0142702 = 0.0142702
3	-0.0666666	1.55000	-0.00965632	0.005	0.00688873	-0.00925333	0.0142555 = 0.0142555
4	0.000566251	1.68880	-0.00890043	0.430	0.0107159	-0.000390034	0.0150413 = 0.0150413
		1	-0.0150352	-			

ตาราง 3.12 ก. การแกะรอยรังสีของ เลนส์องค์ที่ 1

ลำดับ	$A = \begin{cases} n(hc-u) \\ n'(hc-u') \end{cases}$	$B = \begin{cases} n(hc-\bar{u}) \\ n'(hc-\bar{u}') \end{cases}$	h เซนทิลเมตร	$\frac{h}{n}$	$\Delta\left(\frac{u}{n}\right) = \frac{u' - u}{n}$	$S_{II} = \lambda^2 h \Delta\left(\frac{u}{n}\right)$ เซนทิลเมตร	$S_{III} = \lambda \Delta h \Delta\left(\frac{u}{n}\right)$ เซนทิลเมตร	$S_{III} = \lambda^2 h \Delta\left(\frac{u}{n}\right)$ เซนทิลเมตร
1	0.131406	0.0150000	2	.0	0.0310755	0.00107320	0.000122505	0.0000139840
2	-0.291218	0.0142702	1.96268	0.0310755	0.00688820	0.00114655	-0.0000561828	0.00000275306
3	-0.293988	0.0142555	1.96239	0.0379637	-0.0123508	-0.00209478	0.000101576	-0.00000492544
4	-0.0711902	0.0150413	1.94379	0.0256129	0.0466780	0.000459835	-0.0000971555	0.0000205273
				0.0722909				
						$S_I = \sum S_{II} =$ 0.000584805	$S_{III} = \sum S_{III} =$ 0.0000707427	$S_{III} = \sum S_{III} =$ 0.0000323399
						$0^{W_{40}} = \frac{1}{8} S_I =$ 0.0000731006	$1^{W_{31}} = \frac{1}{2} S_{III} =$ 0.0000353714	$2^{W_{22}} = \frac{1}{2} S_{III} =$ 0.0000161695
						= 1.24 λ	= 0.60 λ	= 0.27 λ

ตาราง 3.12 ข. การแกะรอยรังสีของ เสน่ห์รงค์ที่ 1 (ต่อ)



$n_0 = 1$
 $n_1 = 1.62270$
 $n_2 = 1.55000$
 $n_3 = 1.68880$
 $n_4 = 1$
 $h_1 = 2$ เซนติเมตร
 $\bar{h}_1 = 0$ เซนติเมตร

$R_1 = 14.23$ เซนติเมตร
 $R_2 = 14.20$ เซนติเมตร
 $R_3 = 14.00$ เซนติเมตร
 $R_4 = 1335$ เซนติเมตร

$d_1 = 0.735$ เซนติเมตร
 $d_2 = 0.005$ เซนติเมตร
 $d_3 = 0.415$ เซนติเมตร

ลำดับ	$c = \frac{1}{R}$ (เซนติเมตร) ⁻¹	n	$u' = \frac{nu + hk}{n'}$	d เซนติเมตร	$h_{+1} = h - du'$ เซนติเมตร	$k = (n' - n)c$ (เซนติเมตร) ⁻¹	ตารางคูณ $A = n(hc - u) = n'(hc - u')$
รังสีใกล้แกน a							
1	0.0702741	1	0	-	2	0.0437597	0.140548 = 0.140548
2	-0.0704225	1.62270	0.0539344	0.735	1.96036	0.00511972	-0.311539 = -0.311539
3	-0.0714286	1.55000	0.0629392	0.005	1.96004	-0.00991429	-0.314560 = -0.314560
4	0.000749064	1.68880	0.0462596	0.415	1.94084	-0.000515955	-0.0756680 = -0.0756680
5		1	0.0771218	-			
ลำดับ	$c = \frac{1}{R}$ (เซนติเมตร) ⁻¹	n	$\bar{u}' = \frac{n\bar{u} + \bar{h}k}{n'}$	d เซนติเมตร	$\bar{h}_{+1} = \bar{h} - d\bar{u}'$ เซนติเมตร	$k = (n' - n)c$ (เซนติเมตร) ⁻¹	ตารางคูณ $B = n(\bar{h}c - \bar{u}) = n'(\bar{h}c - \bar{u}')$
รังสีขอบสำคัญ b							
1	0.0702741	1	-0.0150000	-	0	0.0437597	0.0150000 = 0.0149999
2	-0.0704225	1.62270	-0.00924385	0.735	0.00679423	0.00511972	0.0142236 = 0.0142236
3	-0.0714286	1.55000	-0.00965497	0.005	0.00684250	-0.00991429	0.0142076 = 0.0142076
4	0.000749064	1.68880	-0.00890161	0.415	0.0105367	-0.000515955	0.0150464 = 0.0150464
5		1	-0.0150385	-			

ตาราง 3.13 ก. การแกะรอยรังสีของเลนส์อรรถที่ 2

แถวที่	$A = \begin{cases} n(hc-u) \\ n'(hc-u') \end{cases}$	$B = \begin{cases} n(\tilde{h}c-\tilde{u}) \\ n'(\tilde{h}c-\tilde{u}') \end{cases}$	h เลขทศนิยม	$\frac{u}{n}$	$\Delta\left(\frac{u}{n}\right) = \frac{u'}{n'} - \frac{u}{n}$	$S_{II} = \lambda^2 h \Delta\left(\frac{u}{n}\right)$ เลขทศนิยม	$S_{III} = ABh \Delta\left(\frac{u}{n}\right)$ เลขทศนิยม	$S_{III} = B^2 h \Delta\left(\frac{u}{n}\right)$ เลขทศนิยม
1	0.140548	0.0150000	2	0 0.0332374	0.0332374	0.00131313	0.000140144	0.0000149568
2	-0.311539	0.0142236	1.96036	0.0406059	0.00736850	0.00140197	-0.0000640084	0.0000292236
3	-0.314560	0.0142076	1.96004	0.0273920	-0.0132139	-0.00256273	0.000115750	-0.00000522802
4	-0.0756680	0.0150464	1.94084	0.0771218	0.0497298	0.000552626	-0.000109888	0.0000218510..
						$S_I = \sum S_{II} =$ 0.000704996	$S_{II} = \sum S_{III} =$ 0.0000819976	$S_{III} = \sum S_{III} =$ 0.0000345021
						$0^{M40} = \frac{1}{8} S_I =$ 0.0000881245	$1^{M31} = \frac{1}{2} S_{II} =$ 0.0000409988	$2^{M22} = \frac{1}{2} S_{III} =$ 0.0000172511
						= 1.49 λ	= 0.70 λ	= 0.29 λ

ตาราง 3.13 การแกะรอยรังสีของ เลขสี่รงค์ที่ 2 (ต่อ)

และจากตาราง 3.13 $n'_k = n'_4 = 1$ และ $u'_k = u'_4 = 0.0771218$

เรเดียน เมื่อแทนค่าลงในสมการ (3-17) และ (3-18) จะได้ความคลาดทรงกลมเชิงรังสีของเลนส์ครั้งที่ 2 ดังแสดงในตาราง 3.15

ส.ป.ส. ความคลาดหน้าคลื่น	เลนส์ครั้งที่ 1	เลนส์ครั้งที่ 2
ความคลาดทรงกลม (${}_0W_{40}$)	1.24λ	1.49λ
โคมา (${}_1W_{31}$)	0.60λ	0.70λ
ความคลาดเอียง (${}_2W_{22}$)	0.27λ	0.29λ

ตาราง 3.14 สรุปผลการคำนวณค่า ส.ป.ส. ความคลาดต่าง ๆ ของเลนส์ครั้งที่ผ่านขึ้น โดยการแกะรอยรังสี

	เลนส์ครั้งที่ 1	เลนส์ครั้งที่ 2
ความคลาดทรงกลมตามยาว	- 0.0560 เซนติเมตร	- 0.0593 เซนติเมตร
ความคลาดทรงกลมตามขวาง	- 0.00404 เซนติเมตร	- 0.00457 เซนติเมตร

ตาราง 3.15 แสดงความคลาดทรงกลมเชิงรังสีของเลนส์ครั้งที่ผ่านขึ้นเอง

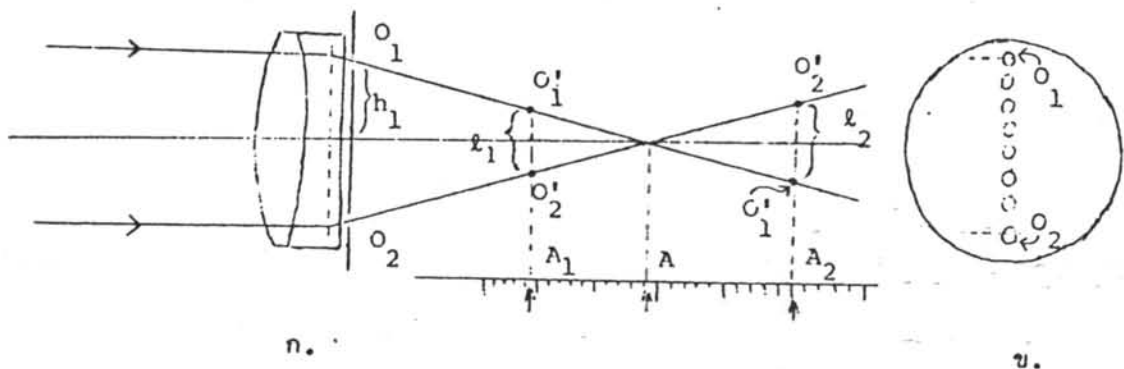
โดยการแกะรอยรังสี

ผลที่แสดงไว้ในตาราง 3.14 และ 3.15 นั้นมีความหมายว่า ถ้าเราฝนเลนส์ให้แต่ละผิว เป็นผิวทรงกลมอย่างแท้จริง และมีรัศมีความโค้งตามตาราง 3.9 แล้ว จะได้ค่าความคลาดดังตาราง 3.14 และ 3.15 แต่ผิวที่ฝนได้อาจจะไม่เป็นผิวทรงกลมอย่างแท้จริง และมีรัศมีความโค้งอาจจะบิดจากที่ออกแบบไว้ ซึ่งการวัดความคลาดโดยทางปฏิบัติ จะบอกได้ว่าผิวเลนส์ของเรา จะผิดจากการคำนวณมากหรือน้อย ดังจะได้กล่าวในตอนต่อไป

4.4.2 พิจารณาความคลาดของเลนส์โดยการทดลอง โดยใช้วิธีดังต่อไปนี้

4.4.2.1 โดยวิธีฮาร์ทแมน ⁽²³⁾ (Hartmann test) เป็นการพิจารณาจุดโฟกัส ที่มาจากแต่ละโซน (zone) ของเลนส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งรังสีใกล้แกนमुखยสำคัญ กับรังสีจากขอบ ๆ ของเลนส์ เป็นวิธีที่หาความคลาดทรงกลมตามยาวโดยตรง

วิธีการนั้นจะจัดรูปการทดลองดังรูป 3.8 ก. ใช้แผ่นโลหะบาง ๆ เจาะรูมีลักษณะดังรูป 3.8 ข. วางไว้ด้านหลังของเลนส์ที่กำลังรับแสงจากแหล่งกำเนิดแสงขนานสี่เดียว จัดให้อยู่ในลักษณะสัมพันธ์กับแกนमुखยสำคัญ ดังรูป 3.8 ก. เปิดให้แสงผ่านรูที่ละคู่ (เช่น O_1 กับ O_2) เพื่อให้แสงจาก O_1 และ O_2 แทนรังสีที่มาจากโซนเดียวกันของเลนส์ วัดระยะระหว่างภาพรูคู่ (เช่น O'_1 กับ O'_2) ทั้งในและนอกโฟกัส (ในรูปคือระยะ ℓ_1 และ ℓ_2 ตามลำดับ) แล้วเปลี่ยนรูให้แสงผ่านคู่อื่น ตั้งแต่



รูป 3.8 การทดลองเลนส์โดยวิธีฮาร์ทแมน

คู่ใกล้แกนลู่ถึงคู่ที่อยู่ชิดขอบเลนส์ การวัดระยะภาพทำได้สองวิธี คือ การถ่ายภาพแล้ววัดระยะภาพจากฟิล์ม แต่ในการทดลองนี้ ใช้เลนส์ใกล้ตาซึ่งเลื่อนได้ วัดระยะดังกล่าว ถ้า A_1 และ A_2 คือตำแหน่งที่วัดระยะภาพในโฟกัสและนอกโฟกัสตามลำดับ ตำแหน่ง A คือตำแหน่งของจุดโฟกัสของแต่ละโซนของเลนส์ (ในรูป 3.8 ก A คือตำแหน่งของจุดโฟกัสจากโซน h_1) สามารถหาได้โดยใช้ความสัมพันธ์⁽²³⁾

$$A = A_1 + \frac{l}{l_1 + l_2} \cdot (A_2 - A_1) \quad \text{-----}(3-19)$$

ในการทดลอง ได้ทำการวัดระยะของภาพของรูคู่ จากโซนใกล้แกนमुखยสำคัญ จนถึงโซนที่ขอบของเลนส์องค์ แล้วนำมาคำนวณหาตำแหน่งของจุดโฟกัส ของรังสีจากโซนต่าง ๆ โดยใช้สมการ (3-19) ผลการทดลองแสดงในตาราง 3.16 และตาราง 3.17 และตำแหน่งของจุดโฟกัสของแต่ละโซน ได้คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไว้ด้วยโดยใช้ตัวย่อ σ

จากตารางที่ 3.16 เป็นตารางแสดงผลการหาตำแหน่งของจุดโฟกัส ของรังสีจากโซนต่าง ๆ ของเลนส์องค์ที่ 1 โดยวิธีอาร์ตแมน จากตาราง 3.16 นั้น ทำให้ทราบว่าเลนส์องค์ที่ 1 มีความคลาดทรงกลมตามยาวแบบแก๊ซาด มีค่า 2.26 เซนติเมตร จากตาราง 3.16 อาจเขียนเป็นรูปคร่าว ๆ แสดงตำแหน่งของจุดโฟกัสของรังสีจากบางโซน ของเลนส์องค์ที่ 1 ได้ดังรูป 3.9 ซึ่งตำแหน่ง h_1 , h_3 และ h_5 คือตำแหน่งของโซนที่สอดคล้องกับตาราง 3.16

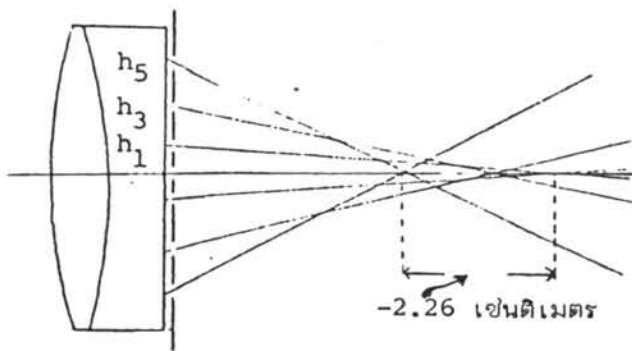
ตาราง 3.17 เป็นตารางแสดงผลการหาตำแหน่งของจุดโฟกัส ของรังสีจากโซนต่าง ๆ ของเลนส์องค์ที่ 2 โดยวิธีอาร์ตแมน จากตาราง 3.17 ทำให้ทราบว่าเลนส์องค์ที่ 2 มีความคลาดทรงกลมตามยาวแบบแก๊ซาดมีค่า 0.77 เซนติเมตร จากตาราง 3.17 อาจเขียนเป็นรูปคร่าว ๆ แสดงตำแหน่งของจุดโฟกัสของรังสีจากบางโซนของเลนส์องค์ที่ 2 ได้ดังรูป 3.10 ซึ่งตำแหน่ง h_1 , h_3 และ h_4 คือ ตำแหน่งของโซน ที่สอดคล้องกับตาราง 3.17

ตาราง 3.16 แสดงผลการหาตำแหน่งของจุดโฟกัส ของรังสีจากโซนต่าง ๆ
ของเลนส์ออร์บิทัล 1 โดยวิธีอาร์ตแมน

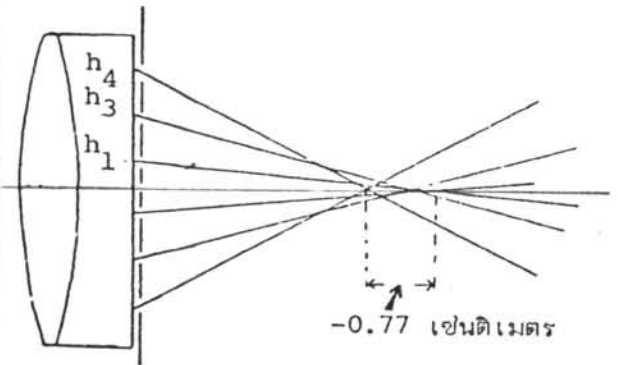
A_1	A_2	$A_2 - A_1$	l_1	l_2	$l_1 + l_2$	$A = A_1 + \frac{l_1}{l_1 + l_2} \cdot (A_2 - A_1)$	$\bar{A} \pm \sigma$
เซนติเมตร	เซนติเมตร	เซนติเมตร	มิลลิเมตร	มิลลิเมตร	มิลลิเมตร	เซนติเมตร	เซนติเมตร
$h = .25$ เซนติเมตร							
18.0	28.0	10.0	1.549	0.317	1.866	26.30	26.51 \pm 0.1
20.0	29.0	9.0	1.253	0.454	1.707	26.61	
21.0	30.0	9.0	0.979	0.641	1.620	26.44	
22.0	31.0	9.0	0.839	0.849	1.688	26.47	
23.0	32.0	9.0	0.695	0.986	1.645	26.61	
24.0	33.0	9.0	0.485	1.207	1.692	26.58	
25.0	34.0	9.0	0.305	1.451	1.756	26.56	
$h = .75$ เซนติเมตร							
18.0	28.0	10.0	4.712	0.890	5.602	26.41	26.35 \pm 0.0
20.0	29.0	9.0	3.514	1.500	5.014	26.31	
21.0	30.0	9.0	2.991	2.003	4.994	26.39	
22.0	31.0	9.0	2.422	2.631	5.053	26.31	
23.0	32.0	9.0	1.891	3.156	5.047	26.37	
24.0	33.0	9.0	1.297	3.763	5.060	26.31	
25.0	34.0	9.0	0.736	4.226	4.962	26.33	
$h = 1.25$ เซนติเมตร							
18.0	27.0	9.0	7.506	1.145	8.651	25.81	25.81 \pm 0.0
20.0	27.3	7.3	5.757	1.423	7.180	25.85	
21.0	27.5	6.5	4.829	1.690	6.519	25.81	
22.0	27.8	5.8	3.674	1.962	5.636	25.78	
23.0	28.0	5.0	2.653	2.108	4.761	25.79	
24.0	29.5	5.5	1.714	3.485	5.199	25.81	
25.0	30.0	5.0	0.731	3.600	4.331	25.84	
$h = 1.75$ เซนติเมตร							
18.0	26.0	8.0	9.610	1.885	11.495	24.69	24.72 \pm 0.0
19.0	26.5	7.5	8.073	2.552	10.625	24.69	
20.0	26.8	6.8	6.742	3.011	9.753	24.70	
21.0	27.0	6.0	5.272	3.062	8.334	24.80	
22.0	27.5	5.5	3.842	3.841	7.683	24.75	
23.0	27.8	4.8	2.356	4.384	6.740	24.68	
24.0	28.0	4.0	1.038	4.591	5.629	24.74	
$h = 2.00$ เซนติเมตร							
20.0	25.0	5.0	6.982	1.170	8.152	24.28	24.25 \pm 0.0
22.0	25.5	3.5	3.634	2.204	5.838	24.18	
22.5	26.0	3.5	3.006	2.798	5.804	24.31	
20.0	25.5	5.5	6.982	2.204	9.186	24.18	
22.5	25.0	2.5	3.006	1.170	4.176	24.29	

ตาราง 3.17 แสดงผลการหาตำแหน่งของจุดโฟกัส ของรังสีจากโซนต่าง ๆ
ของเลนส์อรรถกั 2 โดยวิธีอาร์ตแมน

A_1	A_2	$(A_2 - A_1)$	l_1	l_2	$(l_1 + l_2)$	$A = A_1 + \frac{1}{l_1 + l_2} (A_2 - A_1)$	$\bar{A} \pm \sigma$
เซนติเมตร	เซนติเมตร	เซนติเมตร	มิลลิเมตร	มิลลิเมตร	มิลลิเมตร	เซนติเมตร	เซนติเมตร
$h_1 = .25$ เซนติเมตร							
19.0	27.0	8.0	2.206	0.801	3.007	24.87	25.02 \pm 0.0
20.0	28.0	8.0	1.961	1.164	3.125	25.02	
21.0	29.0	8.0	1.565	1.482	3.047	25.11	
22.0	30.0	8.0	1.168	1.956	3.124	24.99	
23.0	31.0	8.0	0.803	2.258	3.061	25.10	
24.0	32.0	8.0	0.384	2.687	3.071	25.00	
$h_2 = 1.00$ เซนติเมตร							
19.0	26.0	7.0	4.825	0.766	5.591	25.04	24.98 \pm 0.07
20.0	27.0	7.0	3.964	1.655	5.619	24.94	
21.0	28.0	7.0	3.285	2.338	5.623	25.09	
22.0	29.0	7.0	2.400	3.333	5.733	24.93	
23.0	30.0	7.0	1.575	4.215	5.790	24.90	
24.0	31.0	7.0	0.785	4.947	5.732	24.96	
$h_3 = 1.50$ เซนติเมตร							
19.0	25.5	6.5	6.971	1.114	8.085	24.60	24.62 \pm 0.0
20.0	25.5	5.5	5.835	1.114	6.949	24.62	
21.0	26.0	5.0	4.453	1.738	6.191	24.60	
22.0	26.5	4.5	3.149	2.216	5.365	24.64	
23.0	27.0	4.0	2.018	2.903	4.921	24.64	
24.0	27.0	3.0	0.772	2.903	3.675	24.63	
$h_4 = 2.00$ เซนติเมตร							
19.0	25.0	6.0	8.480	1.295	9.775	24.21	24.25 \pm 0.0
20.0	25.0	5.0	6.840	1.295	8.135	24.20	
21.0	25.0	4.0	5.171	1.295	6.466	24.20	
22.0	27.0	5.0	3.472	4.695	8.167	24.12	
23.0	27.0	4.0	1.907	4.695	6.602	24.16	
24.0	27.0	3.0	1.205	4.695	5.900	24.61	



รูป 3.9 ตำแหน่งโฟกัสของรังสีจากโซนต่าง ๆ
ของเลนส์รูปที่ 1



รูป 3.10 ตำแหน่งโฟกัสของรังสีจากโซนต่าง ๆ
ของเลนส์รูปที่ 2

ความคลาดทรงกลมตามยาวของเลนส์รูปที่ 1 และเลนส์รูปที่ 2 ที่ได้จากการทดลอง โดยวีริอาร์ตแมน ซึ่งคิดเฉพาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์ ที่จะนำไปใช้งาน คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร (หรือ รัศมีของช่องเปิด (h) มีค่าเป็น 2 เซนติเมตร) จะมีค่าเป็น -2.26 และ -0.77 เซนติเมตร ตามลำดับ (เครื่องหมายลบ หมายถึงความคลาดทรงกลมแบบแก๊ซาด ซึ่งการคิดเครื่องหมาย จะถือจุดโฟกัสของรังสีใกล้แกนमुखยสำคัญเป็นหลัก ระยะที่วัดไปทางซ้ายเป็นลบ ส่วนระยะที่วัดไปทางขวาเป็นบวก ดังรูป 3.9 และ 3.10)

ความคลาดทรงกลมตามยาว ที่ได้จากการแกะรอยรังสี ซึ่งคิดเมื่อรัศมีของช่องเปิดเป็น 2 เซนติเมตรเช่นกัน ดังตาราง 3.15 ของเลนส์รูปที่ 1 และเลนส์รูปที่ 2 มีค่า -0.0560 และ -0.0593 เซนติเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ผิวของเลนส์ที่ผ่นขึ้นไม่เป็นผิวทรงกลมอย่างแท้จริง

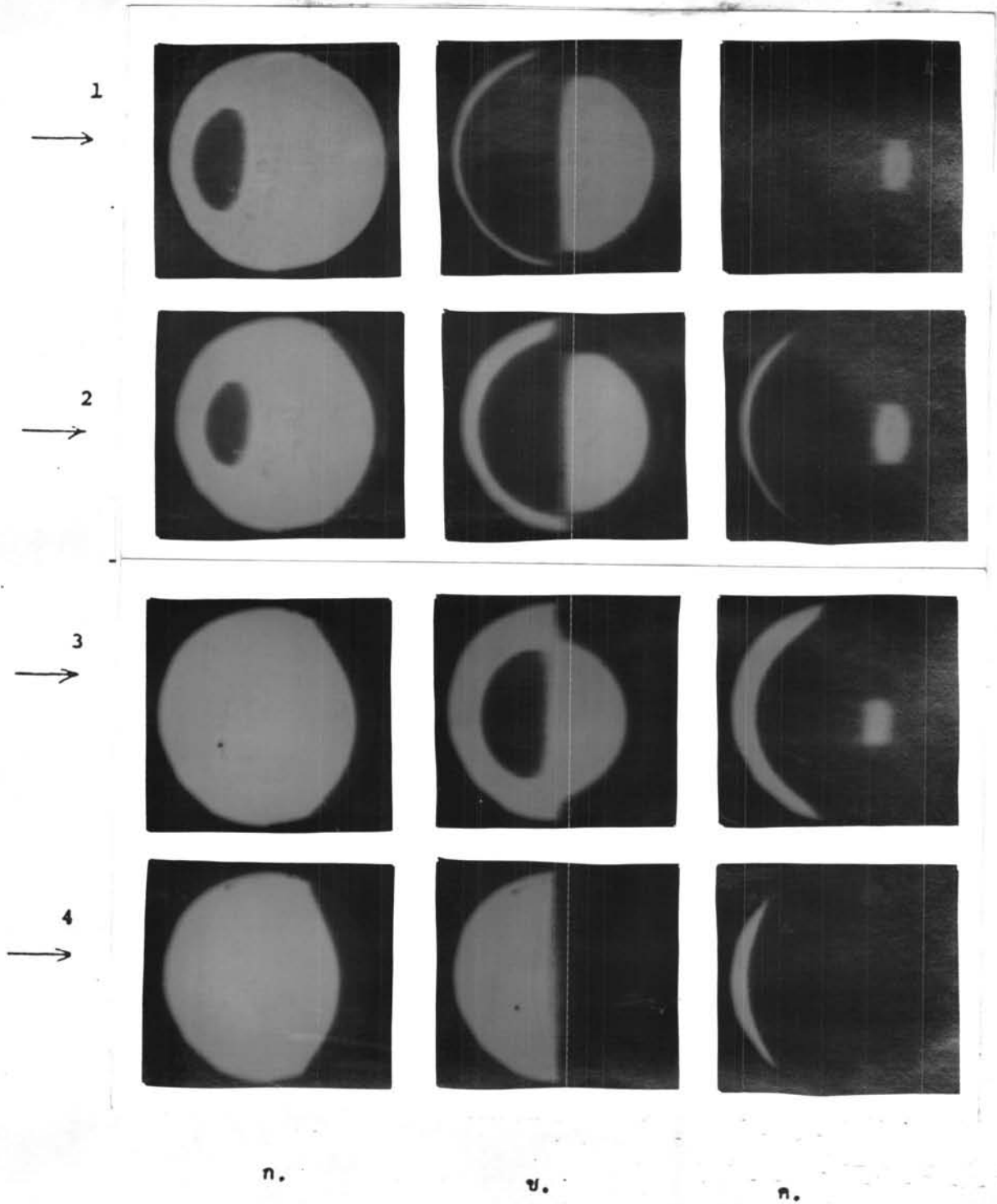
4.4.2.2 การทดสอบด้วยคมมีด (knife-edge test) เมื่อใช้เลนส์รับแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสีเดียวที่เป็นจุดเล็กและอยู่ไกลมาก ภาพของวัตถุจะได้ ณ ตำแหน่งโฟกัส ถ้าเอาคมมีดที่ทึบแสงเคลื่อนผ่านจุดโฟกัส ในกรณีที่เลนส์ไม่มีความคลาด เมื่อใบมีดถึงจุดโฟกัสรังสีจะถูกตัดหมด ไม่มีรังสีใดผ่านเข้ามา ผลที่เห็นคือหน้าเลนส์จะมืดโดยสม่ำเสมอ แต่ถ้าเลนส์มีความคลาด เช่น ความคลาดทรงกลม รังสีของแสงจากส่วนต่าง ๆ ของเลนส์ จะไม่ตัดที่จุดโฟกัสเดียวกัน ถ้าใช้ใบมีด

ตัดผ่านตำแหน่งโฟกัส จะเห็นว่าหน้าเลนส์มีดไม่พร้อมกัน การทดลองโดยวิธีนี้ อาจบอกค่าความคลาด
ทรงกลมตามยาวและตามขวางได้ แต่ไม่ดีนักโดยเฉพาะความคลาดทรงกลมตามขวาง เพราะมีการ
เลี้ยวเบนของลำแสงที่ขอบใบมีด ในการทดลอง ซึ่งได้แต่หาความคลาดทรงกลมตามยาวเพียงอย่างเดียว

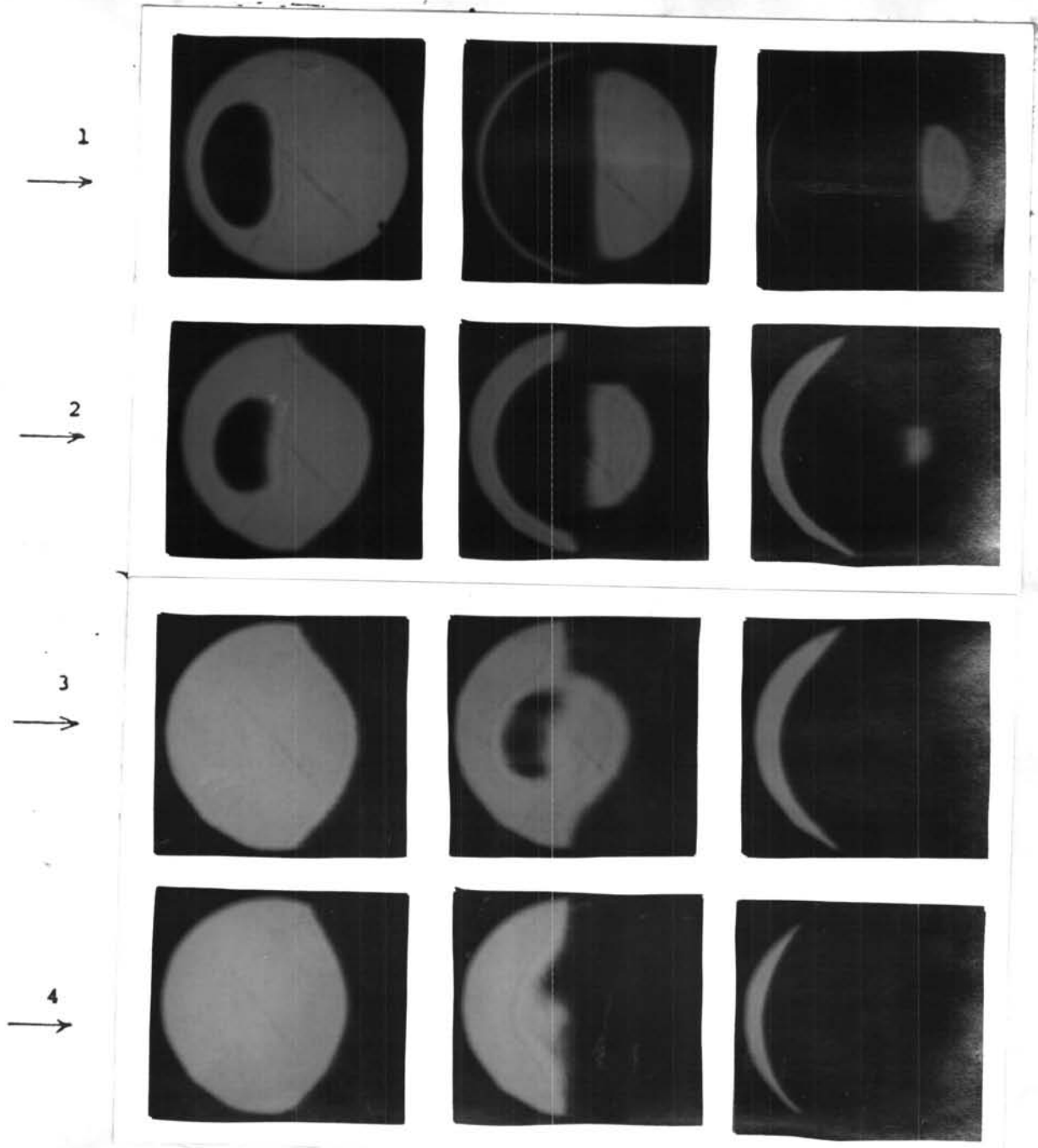
ในการทดลอง แหล่งกำเนิดแสงสีแดงที่เป็นจุดเล็กที่ใช้ เป็นแสงจากหลอดโซเดียม
($\lambda = 589.3$ นาโนเมตร) ใช้ใบมีดตัดลำแสงในและนอกตำแหน่งโฟกัส คำว่าตำแหน่งโฟกัสในที่นี้
หมายถึงตำแหน่งของวงกลม ที่มีความสับสนน้อยที่สุด (circle of least confusion) จากการ
พิจารณาภาพจากรูปถ่ายในระยะต่าง ๆ กัน สามารถหาค่าความคลาดทรงกลมตามยาวได้ ผลการทดลอง
ซึ่งได้ถ่ายภาพไว้ แสดงในรูป 3.11 และ 3.12

รูป 3.11 แสดงภาพถ่ายของการเลื่อนใบมีด จากซ้ายไปขวาของเลนส์ทรงคี่ที่ 1 แถวที่ 1
และ ที่ 2 เป็นตำแหน่งที่ใบมีดตัดลำแสงภายในตำแหน่งโฟกัส แถวที่ 3 และ 4 เป็นตำแหน่งที่ใบมีด
ตัดลำแสงภายนอกตำแหน่งโฟกัส ตำแหน่งที่ใบมีดตัดลำแสง ดังกล่าว วัดจากตำแหน่งที่ตั้งของเลนส์
ในกรณีของรูป 3.11 นี้แถว 1, 2, 3 และ 4 คือ ตำแหน่งที่ใบมีดตัดลำแสงที่ ระยะ 26.5, 27.0, 27.5
และ 29.0 เซนติเมตรตามลำดับ ช่อง ก. ข. และ ค. ในแนวดิ่ง หมายถึงตำแหน่งของใบมีด ที่ห่าง
จากแกนमुखยสำคัญโดยประมาณ โดยที่ ก. คือตำแหน่งที่ใบมีดอยู่นอกแกนमुखยสำคัญทางซ้าย ข. คือตำแหน่ง
ที่ใบมีดอยู่ที่แกนमुखยสำคัญ และ ค. เป็นตำแหน่งที่ใบมีดตัดเลยแกนमुखยสำคัญ มาอยู่ทางขวามือ ถ้าพิจารณา
รูป 3.13 และ 3.14 ไปด้วย จะเห็นได้ชัดเจน รูป 3.11 นั้นถ้ามาเขียนภาพ แสดงรังสีของแสงจาก
จากส่วนต่าง ๆ ของเลนส์ และทิศทาง การตัดของใบมีด ให้สอดคล้องกันแล้ว จะได้ดังรูป 3.13
สอดคล้องหมายถึงว่า ภาพ ก. 1 ในรูป 3.11 จะตรงกับตำแหน่ง ก. 1 ในรูป 3.13 ภาพอื่น ๆ
ก็คล้ายกัน ผลการทดลองได้ว่า ค่าความคลาดทรงกลมตามยาว ของเลนส์ทรงคี่ที่ 1 ก็คือระยะระหว่าง
ตำแหน่งที่ใบมีดตัดลำแสงตำแหน่งที่ 4 กับตำแหน่งที่ 1 มีค่า -2.5 เซนติเมตร เป็นความคลาดแบบแก๊ซาด

รูป 3.12 แสดงภาพถ่ายการทดลองด้วยใบมีดของเลนส์ทรงคี่ที่ 2 การกำหนดตำแหน่งของ
ภาพเหมือนกรณีที่ผ่านมาแล้ว แต่กรณีของรูป 3.12 นี้ แถวที่ 1, 2, 3 และ 4 คือ ตำแหน่งที่ใบมีดตัดลำ
แสงที่ระยะ 25.0, 25.5, 25.7 และ 26.0 จากตำแหน่งที่ตั้งเลนส์ ตามลำดับ รูปที่ 3.14 แสดง
แผนภาพรังสีของแสงจากเลนส์ทรงคี่ที่ 2 และการตัดของใบมีดซึ่งตำแหน่งต่าง ๆ จะสอดคล้องกับรูป
3.12 ผลการทดลองได้ว่า ความคลาดทรงกลมตามยาวของเลนส์ทรงคี่ที่ 2 ก็คือระยะระหว่างตำแหน่ง
ที่ใบมีดตัดลำแสงตำแหน่งที่ 4 กับตำแหน่งที่ 1 มีค่า -1 เซนติเมตร เป็นความคลาดแบบแก๊ซาดเช่นกัน



รูป 3.11 ภาพแสดงผลการทดลองเลนส์รังสีที่ 1 โดยใช้ควมมืด
ทิศทางของอุปกรณ์แสดงทิศการเลื่อนของควมมืด
($f/1.4$, 8.5 นาที)

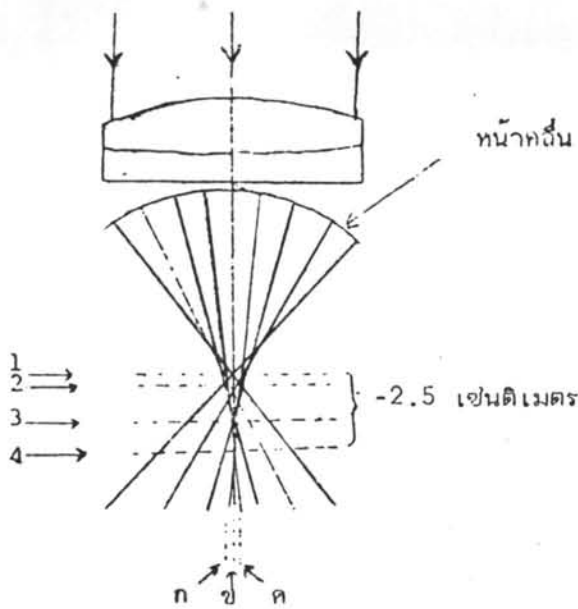


ก.

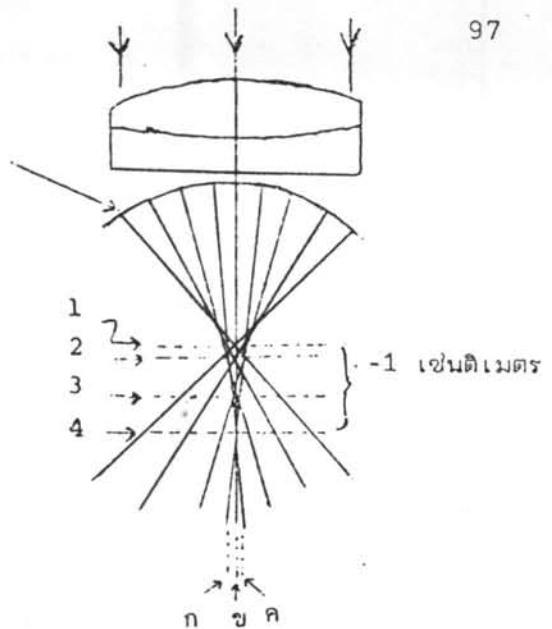
ข.

ค.

รูป 3.12 ภาพแสดงผลการทดลองเลนส์ทรงรีที่ 2 โดยใช้ขนาด
ทิศทางของลูกศรแสดงทิศการเลื่อนของคมมืด
($f/1.4$, 9 นาที)



รูป 3.13 การตีความภาพ 3.9 ในเชิงรังสี



รูป 3.14 การตีความภาพ 3.10 ในเชิงรังสี

การตีความภาพ 3.11, 3.12 มาเป็นแผนภาพ 3.13, 3.14 นั้น พิจารณาเฉพาะผิวหน้าเลนส์ที่นำไปใช้งาน คือ เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4 เซนติเมตร และภาพถ่ายทั้งสองชุดมีขนาด $\frac{4}{5}$ เท่าของของจริง วิธีการถ่ายภาพใช้กล้องเพนแทกซ์ และฟิล์มโกดักไตรเอกซ์ เอ.เอส.เอ.400 วางหลังคมมืด โดย โฟกัสเลนส์กล้องถ่ายรูปไปที่หน้าเลนส์ที่ทดสอบ ขนาดหน้ากล้องและความเร็วตั้งแสดงไว้ได้ภาพ 3.11 และ 3.12

4.4.2.3 ทดสอบโดยใช้เกรตติงของรอนชี (Ronchi grating test)

ผู้คิดวิธีขึ้นมา คือ รอนชี (Ronchi) เมื่อปี 1923 และเจนท์ช์ (Jentsch) เมื่อปี 1928 โดยใช้เกรตติงเส้นยาวเบน แบบส่งผ่าน (transmission grating) รอนชีใช้เกรตติงชนิด 100-200 เส้นต่อเซนติเมตร แต่เจนท์ช์ใช้เกรตติงชนิด 40-80 เส้นต่อเซนติเมตร

วิธีการคือวางเกรตติงไว้หลังเลนส์ที่จะทดสอบ (ด้านรวมแสง) โดยใช้ดาวประดิษฐ์ (artificial star) เป็นวัตถุ ถ้าเลนส์ไม่มีความคลาดจะได้รั้วจากเกรตติงนี้ เป็นเส้นตรงไม่บิดเบี้ยว แต่หากมีความคลาด จะได้ภาพเป็นรั้วที่บิดเบี้ยวไป

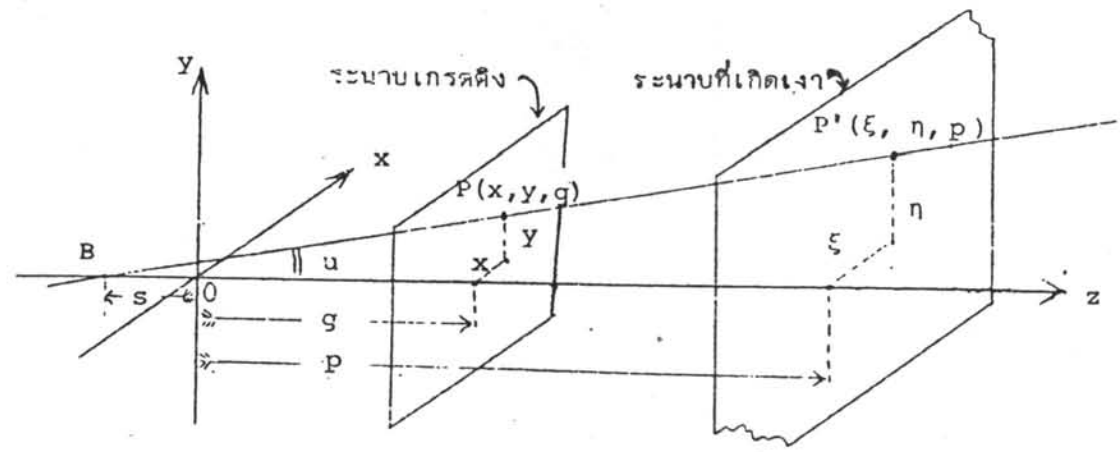
การทดสอบที่ค่า ใช้เกรตติงชนิด 80 เส้นต่อเซนติเมตร และใช้แหล่งกำเนิดแสงสีเดียวที่เป็นจุดเล็ก ซึ่งเป็นแสงจากหลอดโซเดียม ตำแหน่งที่วาง เกรตติงจะวางใกล้จุดโฟกัส (ทั้งบริเวณภายในจุดโฟกัส และบริเวณภายนอกจุดโฟกัส) การสังเกตรั้วที่เกิดขึ้น ทำได้โดยให้ตาอยู่หลังเกรตติง แล้วมองผ่านเกรตติง ไปที่เลนส์ที่จะทดสอบ การบันทึกภาพรั้วที่เกิดขึ้น ทำได้โดยใช้กล้องวางหลัง เกรตติง และโฟกัสกล้องไปที่เลนส์ที่กำลังทดสอบ กล้องที่ใช้ถ่ายภาพเป็นกล้องเพนแทกซ์ ฟิล์มโกดักไตรเอกซ์

เอ.เอส.เอ.400 ซึ่งขนาดหน้ากล้องและความเร็ว ดังแสดงไว้ใต้อภาพ 3.16 และ 3.17

สำหรับลักษณะของริ้วที่จะกล่าวในที่นี้ เป็นการอธิบายโดยวิธีทางเรขาคณิตของเจมทซ์⁽²³⁾

ซึ่งจะเรียกริ้วที่เกิดขึ้นนี้ว่า "ริ้วเงา" (the shadow fringes or the shadow pattern)

จากรูป 3.15 ลักษณะของการจัดวางอุปกรณ์ ที่สอดคล้องกับรูป 3.15 นั้น เลนส์ที่กำลังทดลอง จะต้องอยู่ทางขวามือ โดยรังสีของแสงจะมาจากทางขวา แต่การอธิบายของเจมทซ์ จะถือว่ารังสีแสงออกมาจากจุด B โดยทำมุม u กับแกน z ของระบบพิกัดจากที่มีจุดกำเนิด 0 เป็นจุดโฟกัสของรังสีใกล้แกนมุขยสำคัญ $P(x, y, g)$ เป็นจุดบนระนาบเกรตติงเงาของจุด P บนระนาบที่เกิดเงา (projection plane) คือ P' ซึ่งพิกัดของ P' คือ (ξ, η, p) ส่วนตัดแกน (intercept) z คือ $OB = s$ ซึ่งจะเป็นความคลาดทรงกลมตามยาว ของรังสีที่ทำมุม



รูป 3.15 การเกิดริ้วจากเกรตติงของรอนซี โดยวิธีทางเรขาคณิตของเจมทซ์

u กับแกน z จากรูป 3.15 ใช้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต จะได้ว่า

$$\frac{\xi}{x} = \frac{\eta}{y} = \frac{p - s}{g - s} \quad \text{-----(3-20)}$$

และ $\tan u = \frac{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}{p - s} \quad \text{-----(3-21)}$

ความคลาดทรงกลมตามยาว ของรังสีใกล้แกนमुखสำคัญ อาจเขียนโดยประมาณได้เป็น⁽²³⁾ (ซึ่งจะกล่าวในภาคผนวก ข.)

$$s \cong A \tan^2 u \quad \text{-----} (3-22)$$

การคิดเครื่องหมายของ s , g และ p จะถือตามเครื่องหมายของระยะในแนวแกน z จากจุดกำเนิด 0 s และ A จะมีเครื่องหมายเหมือนกัน จากสมการ (3-20), (3-21) และ (3-22) เราสามารถกำจัด s และ $\tan u$ ได้ดังนี้

จาก (3-21) และ (3-22) จะได้ว่า

$$s = A \frac{(\xi^2 + \eta^2)}{(p - s)^2} \quad \text{-----} (3-23)$$

จาก (3-20) จะได้ว่า

$$\frac{\xi}{x} = \frac{p - s}{g - s}$$

ซึ่งจะได้ว่า $s = \frac{\xi g - px}{\xi - x} \quad \text{-----} (3-24)$

จาก (3-20) อีกเช่นกัน เราสามารถเขียนได้ว่า

$$p - s = \frac{\xi(p - g)}{\xi - x} \quad \text{-----} (3-25)$$

จากสมการ (3-23), (3-24) และ (3-25) จะได้ว่า

$$A(\xi^2 + \eta^2)(\xi - x)^3 = (g\xi - px)(p - g)^2 \cdot \xi^2 \quad \text{-----} (3-26)$$

พิจารณากรณีที่ความคลาดทรงกลมเป็นศูนย์ คือ $A = 0$ จากสมการ (3-26) จะได้ว่า

$$(g\xi - px)(p - g)^2 \cdot \xi^2 = 0$$

ซึ่งจะได้ว่า $(g\xi - px) = 0$

$$\xi = \frac{p}{g} \cdot x \quad \text{-----} (3-27)$$

หรือ $\xi^2 = 0$

$$\xi = 0 \quad \text{-----} (3-28)$$

หรือ $(p - g)^2 = 0$

$$p = g \quad \text{-----} (3-29)$$

ถ้าเกรตติงที่ใช้ เป็นเกรตติงเส้นตรงขนาน โดยแนวของเส้นของเกรตติงขนานกับแกน y เราอาจแทน $x = N \cdot \delta$ โดยที่ N คืออันดับของเส้นของเกรตติง ที่นับจากแนวแกน z ไปตามแนวแกน x ดังนั้นค่าของ N ก็คือ $N = \dots -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ และ δ คือระยะระหว่างเส้นของเกรตติง ซึ่งจะเป็นค่าคงที่สำหรับเกรตติงอันหนึ่ง p คือตำแหน่งของระนาบที่เกิดเงา และ g คือตำแหน่งของระนาบเกรตติง จากสมการ (3-27) จึงสามารถเขียนได้เป็น

$$\xi = \frac{p\delta}{g} \cdot N \quad \text{-----}(3-30)$$

จากสมการ (3-30) ถ้าพิจารณาตำแหน่งของระนาบที่เกิดเงา ที่ตำแหน่ง p (คือ p คงที่) และถ้าวางเกรตติง ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง คือ g คงที่ ค่าทางขวามือของสมการ (3-30) จะคงที่เมื่อ N มีค่าเป็นค่าใดค่าหนึ่ง นั่นก็หมายความว่า แต่ละแนวเส้นในเกรตติง จะให้เงาซึ่งเรียกว่าริ้วเงาเป็นเส้นตรง ขนานกับแกน y บนระนาบที่เกิดเงา แสดงว่าถ้าความคลาดทรงกลมเป็นศูนย์ ริ้วของเงาที่ได้ จะเป็นเส้นตรงขนานกับแกน y ด้วย สำหรับสมการ (3-28) เป็นกรณีเฉพาะของ สมการ (3-27) คือพิจารณาริ้วเงาจากเส้นของเกรตติงเส้นกลาง ($N = 0$) จะได้ $\xi = 0$ แสดงว่าริ้วเงาที่ได้ จะขนานกับเส้นของเกรตติงเส้นกลาง

สำหรับสมการ (3-29) คือ $p = g$ ความหมาย ก็คือ การวางเกรตติงที่ตำแหน่งของระนาบที่เกิดเงา เราอาจพิจารณาลักษณะของริ้วเงา ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ได้ โดยแทน $p = g$ ในสมการ (3-27) ซึ่งจะได้ว่า

$$\xi = x \quad \text{-----}(3-31)$$

ความหมายของสมการ (3-31) คือ ริ้วเงาที่เกิดขึ้นบนระนาบที่เกิดเงา จะเป็นริ้วที่ขนานกับแกน y และแต่ละริ้วจะห่างกัน เท่ากับระยะห่างระหว่างเส้นในเกรตติง (คือระยะระหว่างริ้วจะมีค่า δ)

พิจารณากรณีที่มีความคลาดทรงกลม คือ A ไม่เป็นศูนย์ กำหนดให้ $x = N \cdot \delta$ เช่นกัน ในกรณีนี้สมการ (3-26) จะให้รูปเงาที่เป็นเส้นโค้งต่าง ๆ กัน ที่ระนาบที่เกิดเงา ลักษณะของริ้วเงา ในกรณีทั่วไป ($N \neq 0$) นั้นยุ่งยาก (มีลักษณะดังรูป 3.16 และ 3.17) ซึ่งจะขอกล่าวเฉพาะกรณี $N = 0$ (คือ $x = 0$) คือพิจารณาแต่เพียงลักษณะริ้วเงา ของเส้นของเกรตติงเส้นกลาง เมื่อเลนส์ที่ทดสอบมีความคลาดทรงกลม ($A \neq 0$) ดังนั้น ถ้าแทนค่า $x = 0$ ในสมการ (3-26) จะได้ว่า

$$A\xi^3(\xi^2 + \eta^2) = g\xi^3(p - g)^2$$

$$\xi^3[A(\xi^2 + \eta^2) - g(p - g)^2] = 0$$

ซึ่งจะได้ว่า $\xi = 0$ -----(3-32)

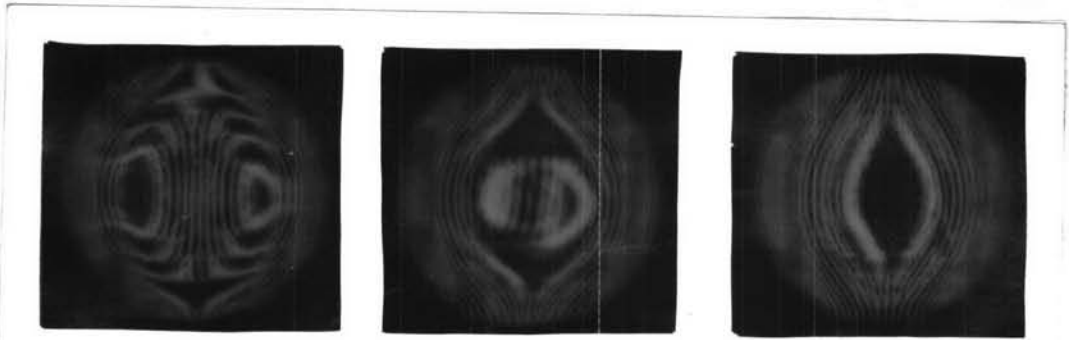
หรือ $\xi^2 + \eta^2 = \frac{g}{A}(p - g)^2$ -----(3-33)

จากสมการ (3-32) และ (3-33) แสดงถึงลักษณะของรั้วเงา ของเส้นเกรตติงเส้นกลาง ซึ่งจะเป็นเส้นตรง ที่มีแนวขนานกับเส้นของเกรตติงเส้นกลางนั้น ดังสมการ (3-32) หรืออาจจะมีลักษณะของเงาเป็นเส้นโค้งดังสมการ (3-33) ซึ่งสมการ (3-33) นี้จะเป็นจริง คือเป็นรั้ววงกลมเมื่อ g และ A มีเครื่องหมายเหมือนกัน แสดงว่า เราสามารถเห็นลักษณะของรั้วที่เป็นวงกลม ที่เกิดจากเส้นของเกรตติงเส้นกลางได้เพียงด้านใดด้านหนึ่งของจุดโฟกัสเท่านั้น เช่นกรณีความคลาดทรงกลมแบบแก๊ซาด จะเห็นรั้วลักษณะนี้ได้ เมื่อเกรตติงอยู่ภายในจุดโฟกัส (คำว่าจุดโฟกัสในกรณีนี้ หมายถึงจุดโฟกัสของรังสีใกล้แกนमुखยสำคัญ) ดังรูป 3.16 และรูป 3.17 ซึ่งรูป 3.16 แสดงรั้วที่เกิดเมื่อใช้เกรตติงชนิด 80 เส้นต่อเซนติเมตร ทดสอบเลนส์องค์ที่ 1 รูป 3.16 ก. แสดงรั้วเมื่อเกรตติงอยู่ภายในจุดโฟกัส รูป 3.16 ข. เป็นรั้วเมื่อเกรตติงอยู่ที่จุดโฟกัส และ รูป 3.16 ค. เมื่อเกรตติงอยู่นอกจุดโฟกัส ผลที่ได้คือเลนส์องค์ที่ 1 มีความคลาดทรงกลมแบบแก๊ซาด รูป 3.17 แสดงรั้วที่เกิดเมื่อใช้เกรตติงชนิด 80 เส้นต่อเซนติเมตร ทดสอบเลนส์องค์ที่ 2 รูป 3.17 ก. ข. และ ค. เป็นรั้วที่เกิดเมื่อเกรตติงอยู่ภายในจุดโฟกัส ที่จุดโฟกัสและภายนอกจุดโฟกัสตามลำดับ ผลที่ได้คือเลนส์องค์ที่ 2 มีความคลาดทรงกลมชนิดแก๊ซาดเช่นกัน

5. การทดสอบเลนส์ที่ซื้อ

เลนส์ที่ซื้อมาจากต่างประเทศหนึ่งคู่ นั้น มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร เป็นเลนส์องค์ที่แก้แล้ว แต่เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบ ดูว่าคุณภาพของเลนส์ที่ซื้อมาเป็นอย่างไร จึงทำการทดสอบโดยใช้วิธีเดียวกับการทดสอบเลนส์ที่ผ่านชั้นเองทุกประการ เว้นแต่การแกะรอยรังสี เพื่อทราบค่าความคลาดของเลนส์ ซึ่งไม่ได้ทำ เพราะไม่ทราบข้อมูลของรั้วมีความโค้งของแต่ละผิว ผลการทดสอบเป็นดังนี้

5.1 การวัด ความยาวโฟกัส จากการหาความยาวโฟกัสของเลนส์องค์ทั้งสอง โดยวิธีพิจารณากำลังขยายของเลนส์ ดังตาราง 3.18 ผลคือ ความยาวโฟกัสของเลนส์ทั้งสอง 250.7 ± 1.5 และ 251.0 ± 1.4 มิลลิเมตร จากข้อมูลที่ให้มาเกี่ยวกับเลนส์นั้น บอกความยาวโฟกัสเป็น 250 มิลลิเมตรทั้งคู่

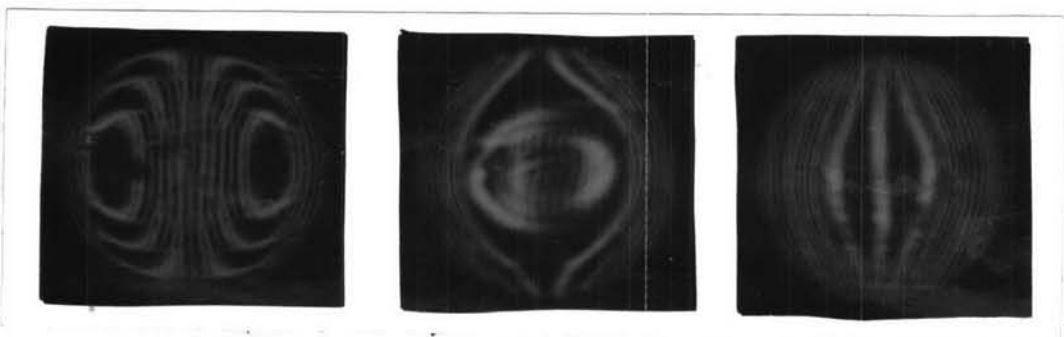


ก.

ข.

ค.

รูป 3.16 ภาพแสดงผลการทดสอบเลนส์องศาที่ 1 โดยใช้เกรตติงของรอนซี ($f/1.4$, 10 นาที)



ก.

ข.

ค.

รูป 3.17 ภาพแสดงผลการทดสอบเลนส์องศาที่ 2 โดยใช้เกรตติงของรอนซี ($f/1.4$, 10 นาที)

ตาราง 3.18 แสดงผลการหาความยาวโฟกัส ของเลนส์รวมที่เข้ามา โดยวิธีพิจารณากำลังขยาย

l_1 เซนติเมตร	l_2 เซนติเมตร	$(l_2 - l_1)$ เซนติเมตร	m_1	m_2	$\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_1}$	$f = \frac{l_2 - l_1}{\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_1}}$ เซนติเมตร	$\bar{f} \pm \delta$ เซนติเมตร
เลนส์วางที่ 1							
-70.0	-35.0	35.0	-0.5650	-2.7320	1.404	24.93	25.07 \pm 0.
-75.0	-40.0	35.0	-0.5076	-1.7670	1.404	24.93	
-80.0	-45.0	35.0	-0.4610	-1.3120	1.407	24.87	
-85.0	-50.0	35.0	-0.4250	-1.0350	1.387	25.24	
-90.0	-55.0	35.0	-0.3920	-0.8547	1.381	25.34	
-95.0	-60.0	35.0	-0.3610	-0.7299	1.400	25.00	
-100.0	-65.0	35.0	-0.3380	-0.6369	1.388	25.20	
-105.0	-70.0	35.0	-0.3160	-0.5650	1.394	25.10	
-110.0	-75.0	35.0	-0.2970	-0.5076	1.397	25.05	
เลนส์วางที่ 2							
-70.0	-35.0	35.0	-0.5650	-2.7030	1.400	25.00	25.10 \pm 0.
-75.0	-40.0	35.0	-0.5076	-1.7730	1.406	24.89	
-80.0	-45.0	35.0	-0.4620	-1.3050	1.398	25.03	
-85.0	-50.0	35.0	-0.4210	-1.0330	1.407	24.87	
-90.0	-55.0	35.0	-0.3910	-0.8562	1.390	25.19	
-95.0	-60.0	35.0	-0.3620	-0.7299	1.392	25.14	
-100.0	-65.0	35.0	-0.3380	-0.6369	1.388	25.20	
-105.0	-70.0	35.0	-0.3170	-0.5650	1.384	25.28	
-110.0	-75.0	35.0	-0.2980	-0.5076	1.386	25.26	

5.2 ศึกษาความคลาดโดยวิธีอาร์ตแมน ข้อมูลแสดงการทดลองเลนส์รองที่ซื้อมา โดยวิธี อาร์ตแมนแสดงในตาราง 3.19 ผลการทดลองได้ว่าเลนส์ทั้งคู่ยังมีความคลาดทรงกลมหลงเหลืออยู่ เป็นความคลาดทรงกลมตามยาวแบบแก๊ซาด มีค่า -0.12 เซนติเมตร และ -0.03 เซนติเมตรตามลำดับ

5.3 ศึกษาความคลาดโดยวิธีใช้คมมีด จากการพิจารณาภาพ ที่ได้จากการใช้คมมีดตัด ณ ตำแหน่งใกล้ ๆ จุดโฟกัส (ทั้งภายในจุดโฟกัสและนอกจุดโฟกัส) ของเลนส์รองที่ซื้อมาทั้งสองตัว ดังแสดง ในรูป 3.18 และ 3.19 ตามลำดับ ทิศของลูกศรในรูปเป็นทิศการเลื่อนของคมมีด

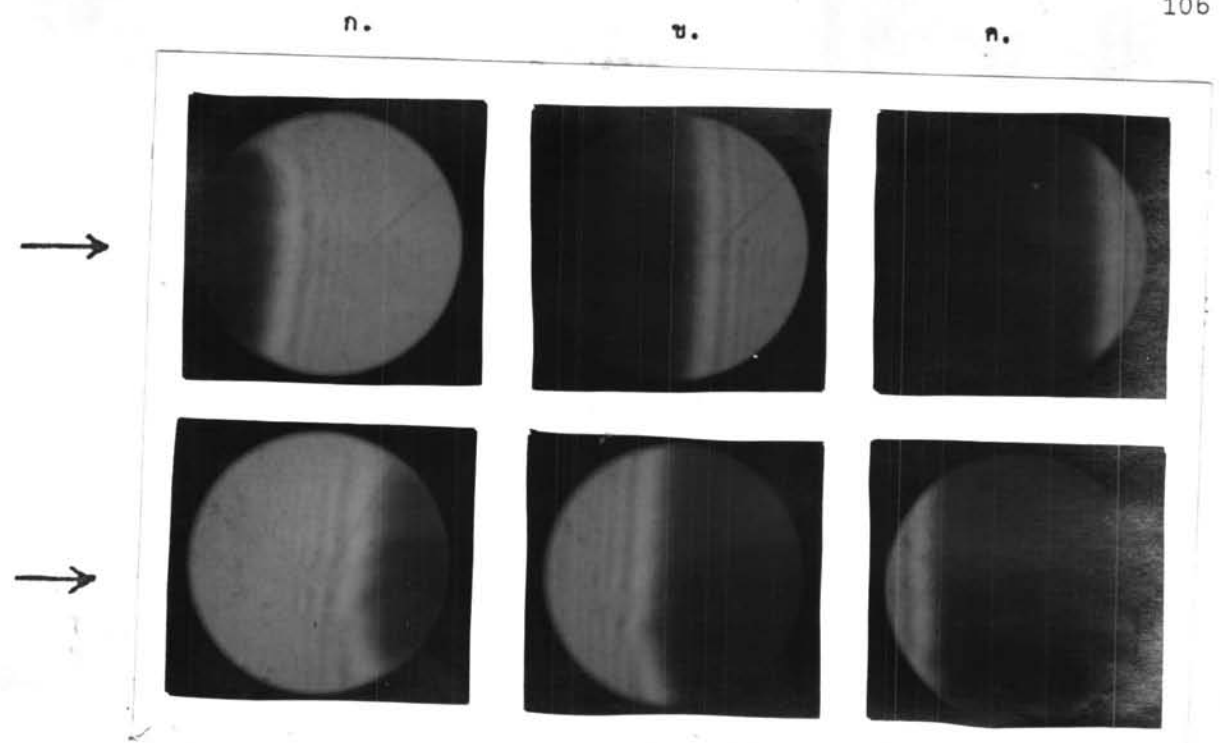
รูป 3.18 เป็นภาพของการทดลองเลนส์รองที่ 1 ที่ซื้อมา โดยใช้แสงสีเหลืองค่าความยาวคลื่น 589.3 นาโนเมตร รูป 3.18 ก., ข. และ ค. เป็นภาพที่ได้จากการใช้คมมีดตัดลำแสง ณ ตำแหน่งภายในจุดโฟกัส โดยที่คมมีดอยู่ริมซ้าย บริเวณแกนमुखยสำคัญและริมขวาตามลำดับ ส่วนรูป 3.18 ง., จ. และ ฉ. เป็นภาพที่ได้จากการใช้คมมีดตัดลำแสง ณ ตำแหน่งภายนอกจุดโฟกัส โดยที่คมมีดอยู่ริมซ้าย บริเวณแกนमुखยสำคัญและริมขวาตามลำดับ ตำแหน่งที่คมมีดตัดลำแสงทั้งสองตำแหน่งดังกล่าวนี้ ห่างกัน 2 มิลลิเมตร ลักษณะของภาพที่ได้ แสดงว่ายังมีความคลาดทรงกลมอยู่บ้างเล็กน้อย

รูป 3.19 เป็นภาพการทดลองของเลนส์รองที่ 2 ที่ซื้อมาในแสงสีเหลืองเช่นกัน รูป 3.19 ก., ข. และ ค. เป็นรูปที่ได้จากการใช้คมมีดตัดลำแสง ณ ตำแหน่งภายในจุดโฟกัส โดยที่คมมีดอยู่ริมซ้าย บริเวณแกนमुखยสำคัญ และริมขวามือตามลำดับ ส่วนรูป 3.19 ง., จ. และ ฉ. เป็นภาพที่ได้จากการใช้คมมีดตัด ณ ตำแหน่งนอกจุดโฟกัส โดยที่คมมีดอยู่ริมซ้าย บริเวณแกนमुखยสำคัญ และริมขวามือตามลำดับ ตำแหน่งที่คมมีดตัดลำแสงทั้งสองตำแหน่งดังกล่าวนี้ ห่างกัน 2 มิลลิเมตร ลักษณะของภาพที่ได้ ยังมีความคลาดทรงกลมแต่น้อยกว่าเลนส์รองที่ 1 ที่ซื้อมา

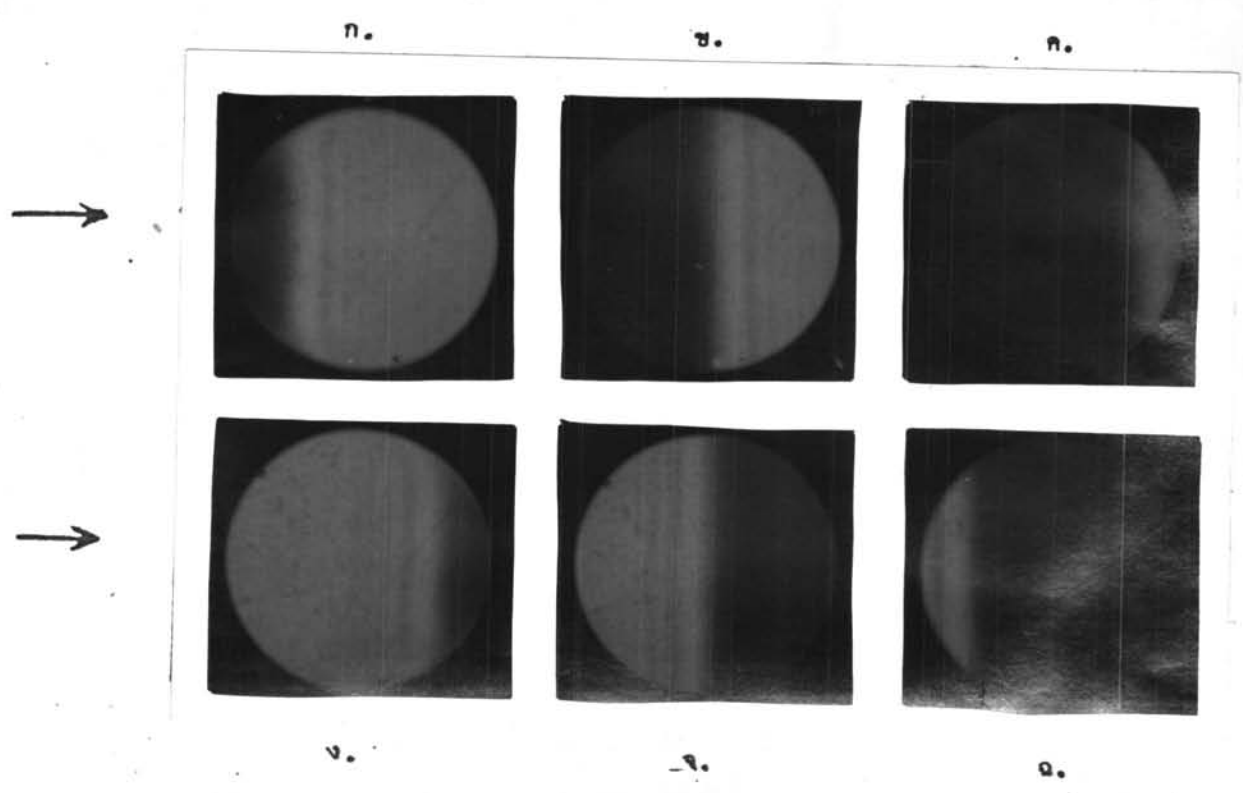
5.4 ศึกษาความคลาดโดยใช้เกรตติงของรอนซี การศึกษาความคลาดของเลนส์ที่ซื้อมา โดยวิธีนี้ จะใช้เกรตติงของรอนซี ซึ่งมี 80 เส้นต่อเซนติเมตร ในแสงสีเหลืองของหลอดโซเดียมเช่นกัน ผลการทดลองดังแสดงในรูป 3.20 และ 3.21 ตามลำดับ ทั้งสองรูปนั้น รูป ก., ข. และ ค. เป็นภาพของริ้วที่ได้จากการวางเกรตติง ณ ตำแหน่งในจุดโฟกัส จากไกลจนใกล้ตำแหน่งจุดโฟกัสตามลำดับ ส่วนรูป ง., จ. และ ฉ. เป็นภาพของริ้วที่ได้จากการวางเกรตติง ณ ตำแหน่งนอกจุดโฟกัส จากใกล้ ๆ จุดโฟกัส จนไกลจากจุดโฟกัสตามลำดับ จากการพิจารณาจะเห็นว่าริ้วที่ได้จากการทดลองเลนส์รองที่ 1 จะมีลักษณะบิดเบือนจากเส้นตรงไปเล็กน้อย จะเห็นได้ชัดจากรูป 3.20 ค. และ ง. อันเป็นภาพที่ตำแหน่งใกล้ ๆ โฟกัสบริเวณในและนอกจุดโฟกัสตามลำดับ ผลคือเลนส์รองที่ 1 ที่ซื้อมายังคงมีความคลาดทรงกลมเหลืออยู่บ้าง แต่จากการพิจารณาภาพของริ้วที่ได้จากการทดลองเลนส์รองที่ 2 (ในรูป 3.21) ลักษณะของริ้ว

ตาราง 3.19 แสดงผลการหาตำแหน่งของจุดโฟกัส ของรังสีจากเลนส์ต่าง ๆ ของเลนส์ออร์คที่เข้ามา โดยวิธีอาร์ตแมน

A ₁ เรขาคณิต เลนส์วางที่ 1	A ₂ เรขาคณิต	(A ₂ -A ₁) เรขาคณิต	l ₁ มิลลิเมตร	l ₂ มิลลิเมตร	(l ₁ +l ₂) มิลลิเมตร	$\lambda = A_1 + \frac{l_1}{l_1+l_2} \cdot (A_2-A_1)$ เรขาคณิต	$\bar{\lambda} \pm \sigma$ เรขาคณิต
h=2.25 เรขาคณิต							
22.5	25.5	3.0	0.927	0.235	1.162		
23.0	26.5	3.5	0.695	0.635	1.330	24.89	
23.5	26.5	3.0	0.652	0.635	1.287	24.83	
24.0	27.0	3.0	0.484	0.741	1.225	25.02	
24.5	27.5	3.0	0.228	0.975	1.203	25.18	25.00 ± 0.12
h=1.00 เรขาคณิต							
22.5	25.5	3.0	1.935	0.527	2.462		
23.0	26.0	3.0	1.604	0.760	2.364	24.86	
23.5	26.0	2.5	1.107	0.760	1.867	25.04	
24.0	26.5	2.5	0.801	1.345	2.146	24.98	
24.5	27.5	3.0	0.289	2.073	2.362	24.93	24.94 ± 0.07
h=1.50 เรขาคณิต							
22.5	26.0	3.5	2.856	1.280	4.136		
23.0	26.0	3.0	2.053	1.280	3.333	24.92	
23.5	26.0	2.5	1.492	1.280	2.772	24.85	
24.0	26.5	2.5	0.959	1.500	2.459	24.85	
24.5	26.5	2.0	0.470	1.500	1.970	24.98	24.91 ± 0.06
h=2.50 เรขาคณิต							
24.3	26.0	1.5	1.097	1.865	2.962		
24.0	26.5	2.5	1.478	2.567	4.045	24.86	24.88 ± 0.04
เลนส์วางที่ 2							
h₁=2.25 เรขาคณิต							
22.0	26.0	4.0	1.211	0.340	1.551		
22.5	26.5	4.0	1.020	0.468	1.488	25.12	
23.0	27.0	4.0	0.843	0.668	1.511	25.24	
23.5	27.5	4.0	0.639	0.813	1.452	25.23	
24.0	28.0	4.0	0.486	1.130	1.616	25.26	
24.5	28.5	4.0	0.311	1.241	1.552	25.20	25.23 ± 0.06
h=1.00 เรขาคณิต							
22.0	26.0	4.0	2.670	0.621	3.291		
22.5	26.5	4.0	2.186	1.040	3.226	25.24	
23.0	27.0	4.0	1.815	1.472	3.287	25.21	
23.5	27.5	4.0	1.411	1.875	3.286	25.21	
24.0	28.0	4.0	0.976	2.238	3.214	25.22	
24.5	28.5	4.0	0.560	2.660	3.220	25.21	25.22 ± 0.01
h=1.50 เรขาคณิต							
22.5	26.0	3.5	3.366	0.995	4.361		
23.0	26.5	3.5	2.778	1.510	4.288	25.20	
23.5	27.0	3.5	2.122	2.240	4.362	25.27	
24.0	27.5	3.5	1.612	2.820	4.432	25.20	
24.5	28.0	3.5	1.612	3.434	5.046	25.27	25.21 ± 0.06
h=2.50 เรขาคณิต							
24.0	26.2	2.2	1.787	1.560	3.347		
24.5	27.0	2.5	1.227	2.990	4.217	25.17	
						25.23	25.20 ± 0.03



รูป 3.18 ภาพแสดงผลการทดลองเลนส์รังสีที่ 1 ที่เข้ามาโดยใช้มุมวัด ทิศทางของ
 ลูกศรแสดงทิศการเลื่อนมุมวัด ($f/1.4$, 9 นาที)

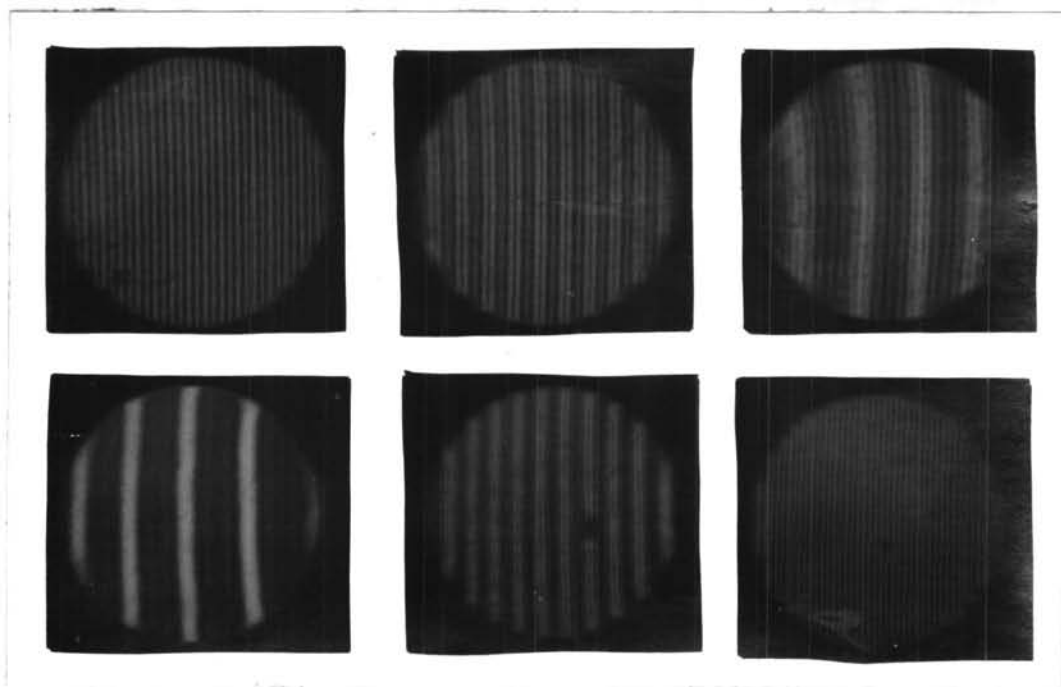


รูป 3.19 ภาพแสดงผลการทดลองเลนส์รังสีที่ 2 ที่เข้ามาโดยใช้มุมวัด ทิศของลูกศร
 แสดงทิศการเลื่อนมุมวัด ($f/1.4$, 9 นาที)

ก.

ข.

ค.



ง.

จ.

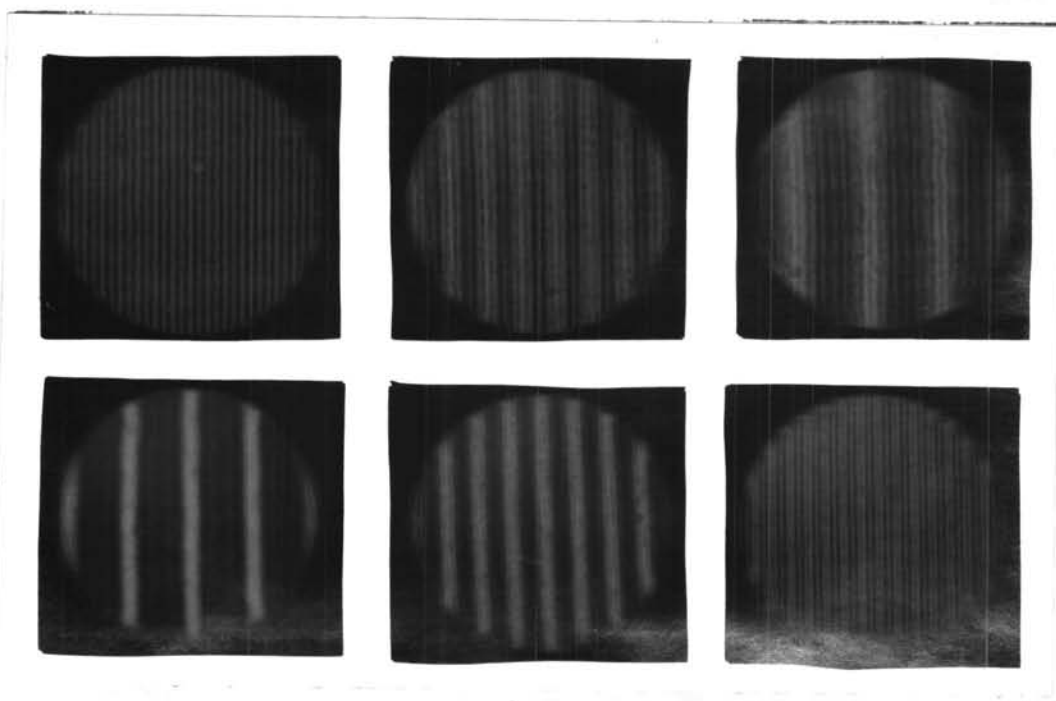
ฉ.

รูป 3.20 ภาพแสดงผลการทดลองเลนส์รังสีที่ 1 ที่ซื้อมาโดย ใช้เกรตติงของรอนซี
($f/1.4$, 9 นาที)

ก.

ข.

ค.



ง.

จ.

ฉ.

รูป 3.21 ภาพแสดงผลการทดลองเลนส์รังสีที่ 2 ที่ซื้อมาโดย ใช้เกรตติงของรอนซี
($f/1.4$, 9 นาที)

ที่ได้ บิดเบือนจากเส้นตรงน้อยมาก แสดงว่าเลนส์รองที่ 2 นี้มีความคลาดทรงกลมน้อยมาก

6. สรุปผลการทดสอบเลนส์

6.1 เลนส์รองที่ผ่านขึ้นเอง ผลการทดสอบเลนส์รองที่ผ่านขึ้นเอง โดยวิธีต่าง ๆ กัน แสดง
ในตาราง 3.20

ตาราง 3.20 สรุปผลการทดสอบเลนส์รองที่ผ่านขึ้นเอง โดยวิธีต่าง ๆ กัน

	เลนส์รองที่ 1 (เช่นติเมตร)	เลนส์รองที่ 2 (เช่นติเมตร)
ความยาวโฟกัส โดยวิธีพิจารณากำลังขยาย	27.23	25.69
ความคลาดทรงกลมตามยาว (คิดเฉพาะช่องเปิดที่จะนำไปใช้คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เช่นติเมตร)		
ก. โดยการแกะรอยรังสี	-0.0560	-0.0593
ข. โดยวิธีอาร์ตแมน	-2.26	-0.77
ค. โดยวิธีใช้คมมืด	-2.50	-1.00
ง. โดยใช้เกรตติงของรอนซี	เป็นความคลาด แบบแกชชาต	เป็นความคลาด แบบแกชชาต

เลนส์รองที่ผ่านขึ้นเอง ต้องการให้มีความยาวโฟกัสใกล้เคียงกับ 25 เช่นติเมตร แต่จาก
ตาราง 3.20 จะพบว่า ความยาวโฟกัสของเลนส์รองทั้งสองไม่เท่ากัน และไม่เท่ากับที่ต้องการ (คือ 25
เช่นติเมตร) ทั้งนี้เพราะ ยังขาดความชำนาญในการฝน ความคลาดทรงกลมตามยาว ในการทดสอบแต่ละ
วิธีนั้น คิดเฉพาะช่องเปิดที่จะนำไปใช้ คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เช่นติเมตร ผลความคลาดทรงกลม
ตามยาวโดยการแกะรอยรังสี ซึ่งมีค่าดังตาราง 3.20 หมายถึงว่า ถ้าฝนให้แต่ละผิวเป็นผิวทรงกลม
อย่างแท้จริงและแต่ละผิวมีรัศมีความโค้งเป็นไปตามตาราง 3.9 แล้ว จะได้ความคลาดทรงกลมตามยาว
มีค่าดังกล่าว แต่จากการทดสอบโดยทางปฏิบัติ โดยวิธีอาร์ตแมน และโดยวิธีใช้คมมืด พบว่า มีค่ามากกว่า
ค่าที่ได้จากการแกะรอยรังสีมาก แสดงว่าแต่ละผิวของเลนส์รองที่ผ่านเอง ไม่เป็นผิวทรงกลมอย่างแท้จริง

สำหรับผลการทดสอบโดยใช้เกรตติงนั้น จะทำให้ทราบได้แต่เพียงว่า เชนลิ่งรงค์ที่ผ่านมีความคลาด
ทรงกลมแบบแก๊ซาด ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบโดยวิธีอื่นข้างต้น

6.2 เลนลิ่งรงค์ที่เข้ามา ผลการทดสอบเลนลิ่งรงค์ที่เข้ามา โดยวิธีต่าง ๆ กัน แสดงใน
ตาราง 3.21 ความยาวโฟกัสของเลนลิ่งรงค์ที่เข้ามาทั้งสองชุด มีค่า 25.00 เซนติเมตรทั้งคู่ ซึ่งใกล้

ตาราง 3.21 สรุปผลการทดสอบเลนลิ่งรงค์ที่เข้ามา โดยวิธีต่าง ๆ กัน

	เลนลิ่งรงค์ที่ 1 (เซนติเมตร)	เลนลิ่งรงค์ที่ 2 (เซนติเมตร)
ความยาวโฟกัส (โดยวิธีพิจารณากำลังขยาย)	25.07	25.10
ความคลาดทรงกลมตามยาว (คิดขนาดช่องเปิดของเลนส์ 5 เซนติเมตร)		
ก. โดยวิธีอาร์ตแมน	-0.12	-0.03
ข. โดยวิธีไอคัมมิต	น้อย	น้อยมาก
ค. โดยใช้เกรตติงของรอนซี	น้อย	น้อยมาก

เทียบกับผลที่ทดสอบโดยวิธีพิจารณากำลังขยาย ความคลาดทรงกลมตามยาว ซึ่งได้จากการทดสอบโดย
วิธีอาร์ตแมน แสดงว่า เลนลิ่งรงค์ที่เข้ามาทั้งสองตัวยังคงมีความคลาดทรงกลมเหลืออยู่บ้างเล็กน้อย ซึ่ง
เป็นความคลาดทรงกลมแบบแก๊ซาด สำหรับผลการทดสอบโดยใช้คัมมิตนั้น เนื่องจากความคลาดทรงกลม
ตามยาวของเลนลิ่งรงค์ที่เข้ามา มีค่าน้อย ประกอบกับอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ละเอียดดีพอ จึงบอกได้เพียงว่ามี
ความคลาดน้อย และน้อยมากตามลำดับ ซึ่งจะให้ผล ที่สอดคล้องกับการทดสอบโดยใช้เกรตติงของรอนซี