

การออกแบบ สี่ราง และทดสอบเลนส์

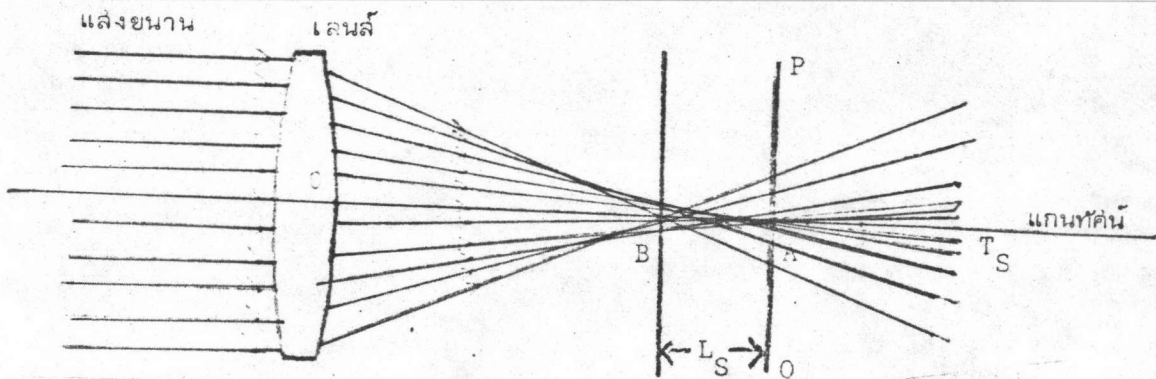
เลนส์ทำหน้าที่รวมแสงจากวัตถุเกิดเป็นภาพที่ระนาบโฟกัส แต่ภาพนี้ไม่เหมือนวัตถุจริงทีเดียว เนื่องจาก เลนส์ มีความคลาด

2.1 ความคลาดของเลนส์

ความคลาดของเลนส์ (lens aberration) มี 2 ประเภท คือ ความคลาดที่เกิดจากแสงหลายความยาวคลื่นเรียกว่าความคลาดรงค์ (chromatic aberration) และความคลาดที่เกิดจากแสงสีเดียว (monochromatic aberration) ซึ่งมีอยู่ 5 แบบ เรียกรวมกันว่าความคลาดของไซเดล (sidel error) คือ ความคลาดทรงกลม (spherical aberration) โคมา (coma) ความคลาดเฉียง (astigmatism) ความโค้งของสนาม (field curvature) และความบิดเบี้ยว (distortion)

2.1.1 ความคลาดทรงกลม

เป็นความคลาดเนื่องจากผิวเลนส์เป็นทรงกลม เมื่อลำแสงขนานกับแกนที่คั่นมาถึงผิวหน้าเลนส์ รังสีที่อยู่ห่างจากแกนที่คั่นเท่ากัน จะหักเหตัดแกนที่คั่นที่ตำแหน่งหนึ่ง ส่วนรังสีที่อยู่ห่างจากแกนที่คั่นต่างกันจะตัดกันที่ตำแหน่งต่างกัน ดังรูปที่ 2.1 รังสีไกลแกนที่คั่นมีจุดโฟกัสที่จุด A รังสีจากขอบนอกตัดแกนที่คั่นที่จุด B



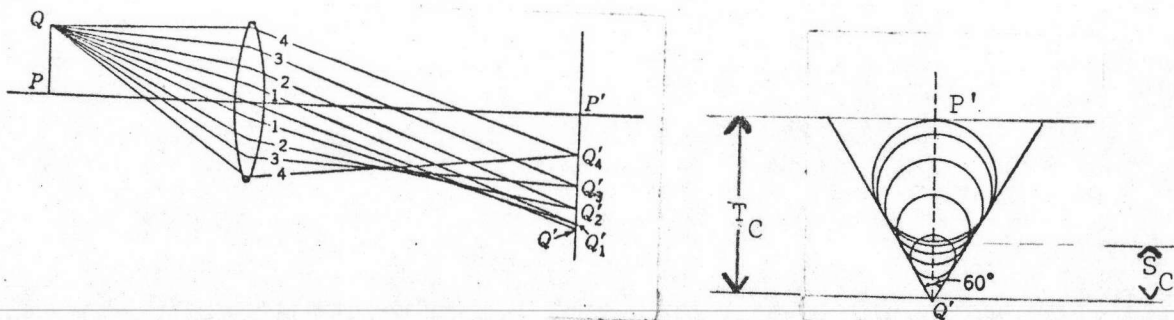
รูปที่ 2.1 ความคลาดทรงกลม

ถ้า  $OB$  มีค่าน้อยกว่า  $OA$  เมื่อ  $O$  คือจุดบนผิวหลังของเลนส์ที่อยู่บนแกนที่คั่นเรียกว่ามีความคลาดทรงกลมแบบแก้ขาด (undercorrected aberration) ดังรูปที่ 2.1 ถ้า  $OB$  มีค่ามากกว่า

OA เรียกความคลาดทรงกลมแบบแก้เกิน (overcorrected oberration) ถ้าวัตถุเป็นจุดเมื่อเอาฉากมารับที่ระนาบ PAQ ภาพจะเป็นจานล่่างโดยมีศูนย์กลางจานเป็นจุดล่่าง รัศมีของจานคือความคลาดทรงกลมตามขวาง  $T_S$  (transverse spherical aberration) ระยะ AB คือความคลาดทรงกลมตามยาว  $L_S$  (longitudinal spherical aberration) ความคลาดทรงกลมนี้ไม่สามารถขจัดให้หายไปหมดได้ แต่สามารถขจัดให้ความคลาดทรงกลมของเลนส์เหลือน้อยที่สุดได้ เช่นเลนส์เดี่ยวที่มีรูปร่างเป็นเลนส์นูนแกมระนาบเมื่อหันผิวนูนเข้าหาวัตถุความคลาดทรงกลมจะมีค่าน้อยที่สุด (Jenkins & White, 1957)

2.1.2 โคมา

เป็นความคลาดที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่นอกแกนทัศน แสงจากวัตถุเมื่อผ่านบริเวณต่าง ๆ ของเลนส์แล้วไม่รวมกันที่จุดเดียวที่ระนาบภาพ แต่จะเกิดเป็นภาพคล้ายดาวหาง โดยลำแสงที่ผ่านจุดศูนย์กลางเลนส์จะเป็นจุดเล็ก ๆ ส่วนลำแสงจากบริเวณอื่น ๆ จะมีขนาดกว้างขึ้น ดังรูปที่ 2.2 โดยแสงจากวัตถุ Q ผ่านบริเวณ



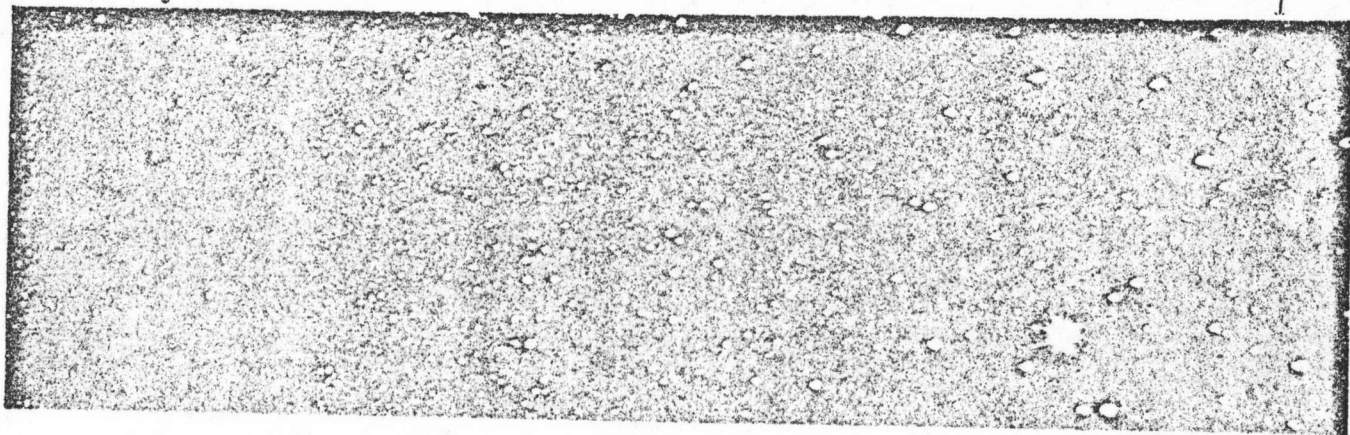
รูปที่ 2.2 การเกิดโคมาและภาพโคมา

ต่าง ๆ ของเลนส์เกิดภาพที่ระนาบ  $P'Q'$  แต่ละบริเวณของเลนส์จะให้ภาพวงกลม ซึ่งเรียกว่าวงกลมของโคมา (comatic circle) โดยแนวเส้นสัมผัสวงกลมทั้งสองด้านจะทำมุมกัน 60 องศา ช่วง  $P'Q'$  เรียกโคมาแทนเจนเชียล  $T_C$  (tangential coma) และช่วง  $1/3$  ของระนาบแทนเจนเชียลจาก Q ขึ้นมาเป็นบริเวณที่กว้างครึ่งของพลังงานอยู่เรียกว่าโคมาซากิตตัล (sagittal coma)  $S_C$  เมื่อใช้เลนส์ที่มีโคมาถ่ายภาพดาวภาพจะชัดที่บริเวณศูนย์กลางของสนาม ส่วนที่

บริเวณใกล้ขอบสนามจะพำและยาวดังรูปที่ 2.3

ศูนย์กลางสนาม

ขอบสนาม



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายท้องฟ้าจากเลนส์ที่มีโคมา

(จาก G.S Monk, Light Principles and Experiment  
1937)

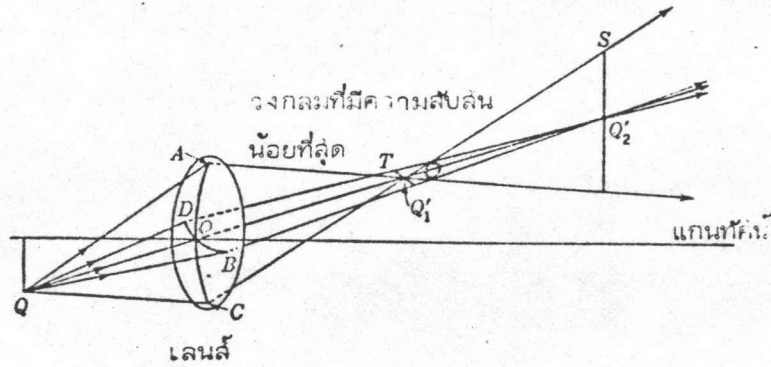
เมื่อกำแสงขยายของบริเวณขอบเลนส์มีค่าน้อยกว่าบริเวณกลางเลนส์ทำให้ภาพจากบริเวณกลางเลนส์  $Q$  อยู่ห่างแกนที่คั่นมากกว่าภาพจากบริเวณขอบเลนส์เรียกโคมาเป็นลบ ดังรูปที่ 2.2 ถ้ากำแสงขยายของบริเวณขอบเลนส์มีค่ามากกว่าจะมีโคมาเป็นบวก

โคมาสามารถทำให้หมดไปได้โดยเลนส์ตัวเดียว โดยการเลือกรูปปร่างเลนส์ที่เหมาะสม ปรกติเป็นแบบเลนส์นูนแกมระนาบ (Jenkins & White, 1957)

### 2.1.3 ความคลาดเอียง

เป็นความคลาดที่เกิดเมื่อวัตถุอยู่นอกแกนที่คั่น ภาพที่ได้จากเลนส์ที่มีความคลาดเอียงจะคมชัดที่ระนาบในระนาบหนึ่ง เช่นคมชัดที่ระนาบแทนเจนเชียล แต่จะพำที่ระนาบซีกิตตัส หรือกลับกัน การเกิดความคลาดนี้พิจารณาได้จากรูปที่ 2.4 โดย AOC เป็นระนาบแทนเจนเชียล ให้ภาพคมชัด T ที่ระนาบซีกิตตัส ส่วนระนาบซีกิตตัส BOD ให้ภาพคมชัด S ที่ระนาบแทนเจนเชียล โดยระนาบแทนเจนเชียลคือระนาบที่ประกอบด้วยแกนที่คั่นและจุดวัตถุบนแกนที่คั่น รังสีमुखยสำคัญ (principal ray) จะอยู่ในระนาบนี้ ส่วนระนาบซีกิตตัสเป็นระนาบที่มีรังสีमुखยสำคัญและตั้งฉาก

กับระนาบแทนเจนเชียล เมื่อวัตถุเป็นจุดภาพที่ S จะเป็นเส้นตรงในแนวตั้ง ส่วนภาพที่ T จะเป็นเส้นตรงในแนวราบ ตำแหน่งภาพที่ดีที่สุดเรียกว่า วงกลมที่มีความสับสนน้อยที่สุด (circle of least confusion) ซึ่งให้ภาพเป็นวงกลม ส่วนตำแหน่งอื่นให้ภาพเป็นรูปอิลลิปส์ (ellipse)



รูปที่ 2.4 ความคลาดเชิง

ความคลาดเชิงขึ้นอยู่กับรูปร่างเลนส์และระยะวัตถุลดลงได้โดยใช้ตัวจำกัดแสง (stop) ที่เหมาะสม

#### 2.1.4 ความโค้งของสนาม

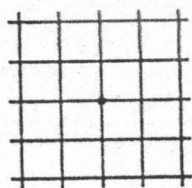
เป็นความคลาดที่ขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหของแก้ว และรัศมีความโค้งของผิวเลนส์ซึ่งเป็นผลทำให้ภาพวัตถุปรากฏชัดที่ผิวทรงกลมที่เรียกว่า ผิวเพชชีวาล (Petzval surface) ซึ่งทำให้ภาพชัดที่ตำแหน่งระนาบภาพตัดกับผิวเพชชีวาลเท่านั้น ส่วนที่ตำแหน่งอื่น ๆ บนระนาบภาพจะพร่ามัว

การแก้ความโค้งของสนามส่วนมากใช้ตัวจำกัดแสงเพื่อให้แสงผ่านเลนส์ในช่วงที่ได้ภาพคมชัดที่สุด นอกจากนี้อาจทำได้โดยใช้เลนส์เว้ามาประกบกับเลนส์นูนโดยการออกแบบที่เหมาะสม (Jenkin & White, 1957)

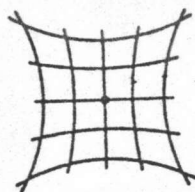
#### 2.1.5 ความบิดเบี้ยว

เป็นความคลาดที่เกิดจากระบบทัศนิกกำลังขยายไม่คงที่ทำให้ภาพบิดเบี้ยวไป แต่ไม่ทำให้คุณภาพของภาพเสีย ถ้าวัตถุมีรูปร่างดังรูปที่ 2.5 ก เลนส์ที่ให้ความบิดเบี้ยวแบบรูปหมอนปักเข็ม (pin - cushion distortion) ซึ่งมีค่า

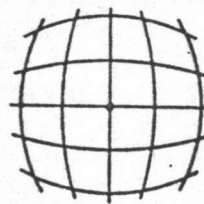




ก.



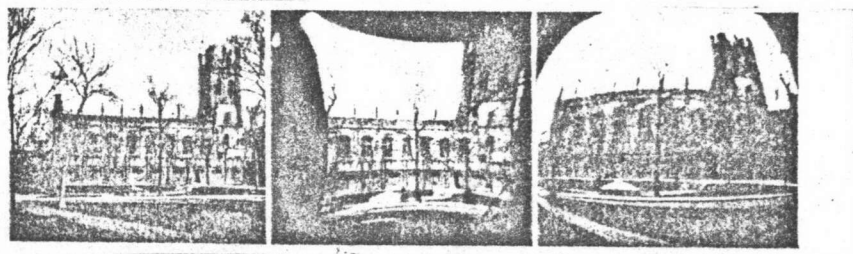
ข.



ค.

### รูปที่ 2.5 ความบิดเบี้ยว

เป็นบวกจะให้ภาพดังแสดงในรูปที่ 2.5 ข ส่วนเลนส์ที่ให้ความบิดเบี้ยวรูปสูง (barrel distortion) ซึ่งมีค่าเป็นลบจะให้ภาพดังแสดงโดยรูปที่ 2.5 ค ภาพถ่ายซึ่งแสดงโดยรูปที่ 2.6 แสดงถึงภาพที่เกิดจากเลนส์ปกติ เลนส์บิดเบี้ยวทางบวก และเลนส์บิดเบี้ยวทางลบตามลำดับ



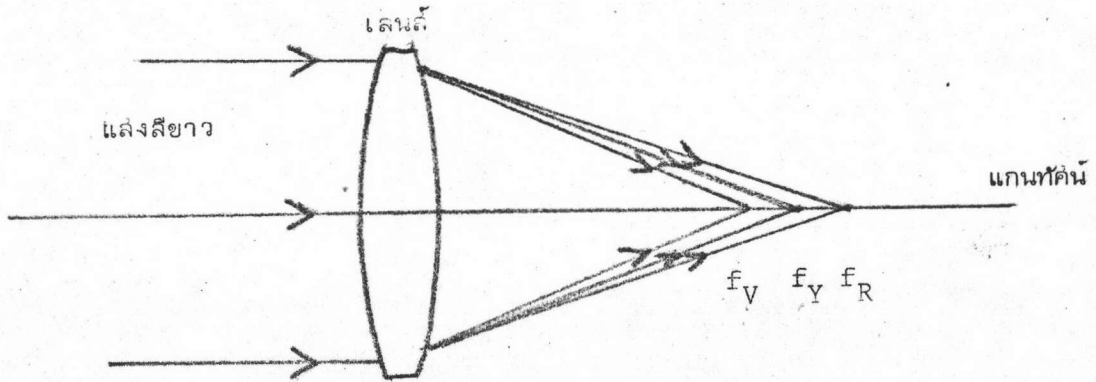
รูปที่ 2.6 ภาพที่เกิดจากเลนส์ปกติ, เลนส์บิดเบี้ยวทางบวก และเลนส์บิดเบี้ยวทางลบ  
(G.S Monk, Light Principles and Experiments, 1937)

ความบิดเบี้ยวจะเพิ่มขึ้นตามขนาดวัตถุ โดยความบิดเบี้ยวเป็นปฏิภาคกับกำลังสามของความสูงของภาพวัดจากจุดศูนย์กลางภาพ (Monk, 1937) เราอาจแก้ไขความบิดเบี้ยวได้โดยใช้ตัวตัวจำกัดแสง

#### 2.1.6 ความคลาดตรงค้

เป็นความคลาดที่เกิดจากการที่แสงที่มาตกที่เลนส์ประกอบด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นขนาดต่าง ๆ กัน เมื่อผ่านตัวกลางจะเกิดการหักเหที่ต่างกันเนื่องจากดัชนีหักเหของตัวกลางเปลี่ยนแปลง

ความยาวคลื่น เป็นผลทำให้ทางยาวโฟกัสของแต่ละคลื่นมีค่าต่างกันออกไปดังรูปที่ 2.7 เมื่อให้แสงสีขาวขนานกับแกนที่คั่น



รูปที่ 2.7 ความคลาดตรงค้ตามยาว

มาถึงผิวหน้าเลนส์ แต่ละคลื่นแสงจะมาโฟกัสที่ตำแหน่งต่างกันแสงสีแดงมีจุดโฟกัสที่  $f_R$  แสงสีเหลืองที่  $f_Y$  แสงสีม่วงที่  $f_V$  ระยะ  $f_V f_R$  คือความคลาดตรงค้ตามยาว (longitudinal chromatic aberration) ถ้าจุดโฟกัสของแสงสีม่วงอยู่ทางซ้ายของจุดโฟกัสของแสงสีแดงดังรูปที่ 2.7 เรียกว่าความคลาดตรงค้แก้ขาด (undercorrected chromatic aberration) มีค่าความคลาดเป็นลบ ถ้าจุดโฟกัสของแสงสีม่วงอยู่ทางขวาของจุดโฟกัสของแสงสีแดงเรียกความคลาดตรงค้แก้เกิน (overcorrected chromatic aberration) มีค่าความคลาดเป็นบวก ถ้าวัตถุอยู่นอกแกนที่คั่นจะมีความคลาดตรงค้ตามขวาง (lateral chromatic aberration) ที่ระนาบของภาพด้วย

การแก้ความคลาดตรงค้โดยปกติใช้เลนส์คู่ โดยเลนส์ตัวแรกเป็นเลนส์นูนทำจากแก้วคราวน์ และตัวที่สองเป็นเลนส์เว้าทำจากแก้วฟลินต์ เลนส์ทั้งสองอาจประกบกันหรือวางแยกจากกันก็ได้ โดยมีการออกแบบผิวหน้าทั้ง 4 ให้เหมาะสม

## 2.2 การออกแบบเลนส์คู่

เลนส์คู่ปกติประกอบด้วยเลนส์นูนซึ่งทำจากแก้วคราวน์และเลนส์เว้าซึ่งทำจากแก้วฟลินต์ใช้ร่วมกัน จุดมุ่งหมายหลักของเลนส์คู่เพื่อกำจัดความคลาดตรงค้โดยใช้คุณสมบัติที่ว่าดัชนีหักเหของแก้วเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นของแสง และคุณสมบัติการรวมและการกระจายแสงของเลนส์นูนและเลนส์เว้า

การออกแบบเพื่อกำจัดความคลาดตรงค์เราทำโดยออกแบบให้ทางยาวโฟกัสของสเปกตรัมสีน้ำเงินมีขนาดเท่ากับทางยาวโฟกัสของสเปกตรัมสีแดง สเปกตรัมสีน้ำเงินมักใช้เส้น F ของไฮโดรเจนซึ่งมีความยาวคลื่น 4861 อังสตรอม สเปกตรัมสีแดงมักใช้เส้น C ของไฮโดรเจนซึ่งมีความยาวคลื่น 6563 อังสตรอม (Jenkins & White, 1957)

นอกจากนี้เลนส์คู่แบบที่มีแก้วควานน์เป็นเลนส์นูนแบบผิวโค้งสองหน้าเท่ากันประกบกับเลนส์เว้าแกมราบของแก้วฟลินต์ โดยที่หน้าประกบกันมีรัศมีความโค้งเท่ากันจะให้ความคลาดทรงกลมน้อยที่สุด (Haviland, 1954)

ในการคำนวณหารัศมีความโค้งแต่ละผิวหน้าของเลนส์เราเริ่มจากสมการของผู้สร้างเลนส์ (lens makers' formula)

$$\frac{1}{f} = (n_D - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad 2.1$$

เมื่อ  $f$  คือทางยาวโฟกัสที่ต้องการ

$n_D$  คือดัชนีหักเหของเส้น D ของแก้วที่ทำเลนส์

$r_1, r_2$  คือรัศมีความโค้งของผิวที่ 1 และของผิวที่ 2 ตามลำดับ

ในกรณีของเลนส์อรงค์ ซึ่งทำจากแก้วควานน์และแก้วฟลินต์นั้นคำนวณได้จากสมการ 2.2 และสมการ 2.3 (Jenkins & White 1957)

$$f_c = \frac{v_c - v_f}{v_c} f \quad 2.2$$

$$f_f = - \frac{v_c - v_f}{v_f} f \quad 2.3$$

เมื่อ  $f$  คือทางยาวโฟกัสรวมของเลนส์คู่

$f_c$  คือทางยาวโฟกัสของเลนส์นูนที่ทำจากแก้วควานน์

$f_f$  คือทางยาวโฟกัสของเลนส์เว้าที่ทำจากแก้วฟลินต์

$v_c$  คือค่ารีของแก้วควานน์

$v_f$  คือค่ารีของแก้วฟลินต์

ค่า  $v$  (v value) ของแก้ว คำนวณจากความสัมพันธ์ของค่าดัชนีหักเหของแก้วที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ดังสมการ 2.4 (Jenkins & White, 1957)

$$\frac{1}{v} = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1} \quad 2.4$$

เมื่อ  $n_C$   $n_D$   $n_F$  เป็นค่าดัชนีหักเหของแก้วที่ความยาวคลื่น 6563 5893 และ 4861 อังสตรอมตามลำดับ

ในการคำนวณเริ่มจากหาทางยาวโฟกัสของเลนส์คู่ แล้วหาทางยาวโฟกัสของเลนส์นูนจากสมการ 2.2 และทางยาวโฟกัสของเลนส์เว้าจากสมการ 2.3 จากนั้นคำนวณหาราคีมีความโค้งของผิวจากสมการ 2.1

แก้วที่ใช้ฝนเลนส์ในการทดลองนี้ใช้แก้วที่สั่งมาจากต่างประเทศ โดยรู้ค่าดัชนีหักเหของแสงสีเหลือง ( $n_D$ ) และค่า  $v$  ของแก้วโดยทั่วไปเลนส์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 4 นิ้ว (101 มิลลิเมตร) มักใช้ค่าอัตราส่วนทางยาวโฟกัสต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 15 (Haviland, 1954)

แก้วที่ใช้ทำเลนส์ในการทดลองนี้ใช้แก้วที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 112 มิลลิเมตร โดย

$$\text{แก้วควานี้มี} \quad n_D = 1.573 \quad v = 57.4$$

$$\text{แก้วฟลินต์มี} \quad n_D = 1.621 \quad v = 36.2$$

เลนส์ที่สร้างขึ้นนี้มีผิวหน้า 3 ผิวเท่ากัน ( $r_1 = r_2 = r_3$ )

$$\begin{aligned} \text{และในการออกแบบใช้} \quad f/A &= 15 \\ \therefore f &= 15 A \\ &= 15 \times 112 \\ &= 1680 \quad \text{มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

จากสมการ 2.2 สำหรับแก้วควานี้ จะได้ทางยาวโฟกัสเป็น

$$f_c = f \frac{v_c - v_f}{v_c}$$



$$= 1680 \frac{57.4 - 36.2}{57.4}$$

$$= 620 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

จาก 2.3 สำหรับแก้วฟลินต์จะได้ทางยาวโฟกัสเป็น

$$\begin{aligned} f_f &= -f \cdot \frac{v_c - v_f}{v_f} \\ &= -1680 \frac{57.4 - 36.2}{36.2} \\ &= -984 \quad \text{มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

เราต้องการเลนส์ของแก้วควอทซ์เป็นแบบมีผิวสองหน้าเท่ากัน นั่นคือ  $r_1 = r_2$  จากสมการการสร้างเลนส์ (2.1)

$$\begin{aligned} \frac{1}{f_c} &= (n_D - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \\ &= (n_D - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{(-r_1)} \right) \\ &= (n_D - 1) \frac{2}{r_1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_1 &= 2(n_D - 1) f_c \\ &= 2(1.573 - 1)(620) \\ &= 711 \quad \text{มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

เราต้องการให้หน้าเลนส์ที่ประกบกับหน้าเลนส์อื่นมีขนาดเท่ากัน

$\therefore r_2 = r_3 = 711$  มิลลิเมตร และจากสมการ 2.2 จะได้

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= (n_D - 1) \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \\ \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} &= \frac{1}{f(n_D - 1)} \\ \frac{1}{-711} - \frac{1}{r_4} &= \frac{1}{-984(1.621 - 1)} \\ -.00141 - \frac{1}{r_4} &= -.00164 \\ \frac{1}{r_4} &= +0.000230 \end{aligned}$$

$$r_4 = 4348 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

นั่นคือเลนส์ที่สร้างจะมีความโค้งเป็น

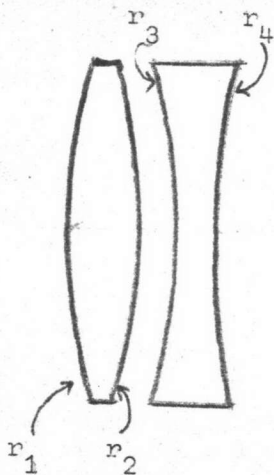
$$r_1 = 711 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$r_2 = -711 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$r_3 = -711 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$r_4 = 4348 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

เลนส์ที่สร้างขึ้นจึงมีรูปร่างเป็นดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 รูปร่างของเลนส์ที่จะสร้างขึ้น

### 2.3 การสร้างเลนส์ด้วยมือ

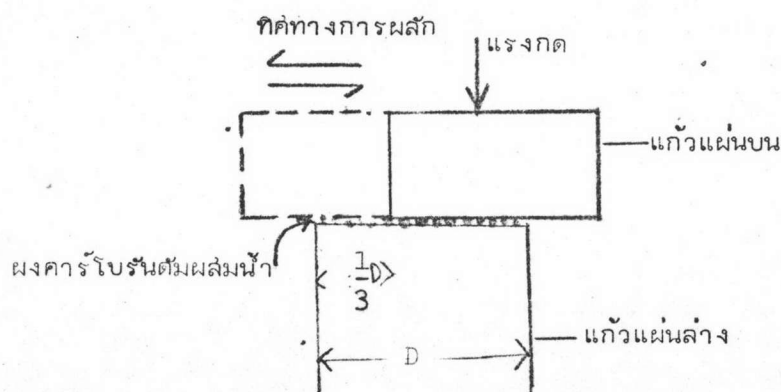
เมื่อเราทราบค่ารัศมีมีความโค้งที่ต้องการแล้ว ก็ฝนแก้วให้ได้ผิวหน้าที่เรียบใสและมีรัศมีความโค้งตามต้องการ การฝนเลนส์แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ การฝนหยาบ การฝนละเอียด และการขัดใส วัสดุที่ใช้ในการฝน คือ ผงคาร์โบรันดัม (carborundum) ขนาดต่าง ๆ วัสดุที่ใช้ในการขัดใส คือ ผงเหล็กออกไซด์ (barnesite) และยางมะตอยจากถ่านหิน (pitch)

การฝนเราต้องฝนแก้วบนโต๊ะขนาดสูงกว่าเอวผู้ฝนเพื่อให้ความสะดวกในการฝน โต๊ะนี้ต้องหนักพอสมควรเพื่อกันการเขยื้อนของโต๊ะเวลาฝนเพราะต้องต้านแรงผลึกที่สูง ก่อนการฝน

ควรยึดแผ่นแก้วไว้ให้แน่นไม่เขยื้อน ในการฝนนี้แก้วชั้นที่อยู่ข้างล่างจะให้ผิวหนูล้วนแก้วชั้นบนซึ่งเคลื่อนไหวไปมานั้นจะให้ผิวที่สัมผัสกับแก้วชั้นล่างเป็นผิวเว้า

### 2.3.1 การฝนหยาบ

การฝนหยาบเป็นการฝนเพื่อให้ได้ผิวโค้งตามต้องการ ทำโดยการโรยผงคาร์โบรันตัมเบอร์ 70 บนผิวแก้วตัวล่างแล้วเติมน้ำพอเปียก แล้วเอาแก้วอีกแผ่นวางทับลงไป เวลาฝนต้องออกแรงกด ที่ตรงกลางแก้วแผ่นบนและผลึกแก้วแผ่นบนให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยให้ขอบแก้วผิวบนอยู่ลึกเข้าไปจากแก้วผิวล่างไม่เกิน  $\frac{1}{3}$  ของเส้นผ่าศูนย์กลางแก้วแผ่นล่างแล้วดึงกลับมา การผลึกไปมาหนึ่งรอบเรียก 1 สโตรก (stroke) ดังรูป 2.9 การฝนนี้ต้องพยายามทำให้ทิศทางของการเคลื่อนที่ของแก้วแผ่นบนเป็นไปในแนวเดียวกันตลอด เมื่อฝนครบ 10 สโตรก



รูปที่ 2.9 ตำแหน่งแรงกดและการฝนสโตรก

แล้วก็หมุนแก้วแผ่นบนไปตามเข็มนาฬิกา 30 องศา ขณะเดียวกันผู้ฝนก็เลื่อนตัวเองไปตามทิศทางวนเข็มนาฬิกา 30 องศา เช่นกัน แล้วเริ่มต้นฝนสโตรกใหม่ ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ผิวโค้งตามที่ต้องการ ระหว่างฝนต้องคอยเติมน้ำพอเปียกและน้ำเล็มอ เพราะผงคาร์โบรันตัมนี้เมื่อถูกกดจะแตกแล้วเข้าผิวแก้วเป็นหลุมแล้วหมดสภาพจึงต้องเติมเรื่อย ๆ

เมื่อฝนนานพอสมควรก็วัดหารัศมีความโค้งของผิวโดยใช้สเฟียโรมิเตอร์ (spherometer) ซึ่งมีสูตรคำนวณตามลัมการ 2.5

$$R = \frac{r^2 + d^2}{2d} \quad 2.5$$

- โดย R คือรัศมีความโค้งที่ต้องการ  
 r คือระยะระหว่างขาของสเฟียโรมิเตอร์  
 d คือ ความสูงจากผิวราบซึ่งเป็นผลจากความโค้งของผิว

เนื่องจากค่า d มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ R  $d^2$  จึงสามารถตัดทิ้งได้ สมการ 2.5 จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$d = \frac{r^2}{2R} \quad 2.6$$

เมื่อรัศมีความโค้งของผิวที่ต้องการคือ 711 และ 4348 มิลลิเมตร และสเฟียโรมิเตอร์มีระยะห่างระหว่างขาเป็น 33 มิลลิเมตร จากสมการ 2.6 จะได้อัตราค่า d เป็น 0.76 และ 0.12 มิลลิเมตรตามลำดับ

เมื่อผ่านแล้วค่า d มีค่ามากเกินไปที่ต้องการ เราก็เปลี่ยนตำแหน่งแผ่นแก้วโดยให้แก้วผิวเว้าอยู่ข้างล่างและแก้วผิวนูนอยู่ข้างบนจนได้ผิวโค้งตามต้องการ

เมื่อได้ผิวโค้งที่ต้องการแล้วต้องล้างผิวบนของโต๊ะและแก้วทั้งสองแผ่นให้สะอาดที่สุด ปราศจากผงคาร์บอนัมเพื่อเตรียมการฝนละเอียดต่อไป

### 2.3.2 การฝนละเอียด

การฝนละเอียดเป็นการลดขนาดหลุมบนผิวแก้ว หลังจากล้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้สะอาดแล้วลึบตำแหน่งแผ่นแก้วโดยให้ผิวเว้าเป็นแผ่นอยู่ข้างล่างให้ผิวนูนอยู่ข้างบน แล้วใช้ผงคาร์บอนัมเบอร์ 120 แทนเบอร์ 70 แล้วทำการฝนสัปดาห์เหมือนการฝนหยาบฝนจนกระทั่งขนาดหลุมบนผิวแก้วทั้งสองมีขนาดเท่ากัน หลังจากนั้นล้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้สะอาดที่สุด แล้วเปลี่ยนผงคาร์บอนัมเบอร์ที่มีขนาดละเอียดขึ้นเรื่อย ๆ คือ จากหมายเลข 120 เป็นหมายเลข 220 320 400 และ 1,000 ตามลำดับโดยก่อนการเปลี่ยนเบอร์ผงคาร์บอนัมเบอร์ทุกครั้งต้องให้ขนาดหลุมที่ปรากฏบนผิวแก้วมีขนาดเท่ากันทั้งหมด แล้วต้องล้างอุปกรณ์ให้สะอาดจริง ๆ เพราะผงคาร์บอนัมเบอร์ที่มีขนาดผิดจากส่วนมากเพียงเม็ดเดียวจะทำให้แก้วเป็นรอยได้ และทุกครั้งที่เปลี่ยนขนาดผงคาร์บอนัมเบอร์



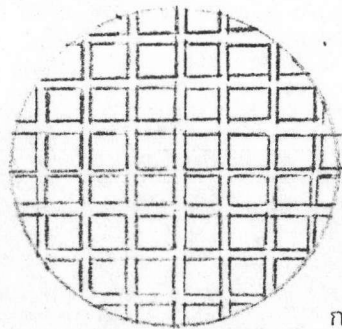
ต้องลึบตำแหน่งของแก้วผิวเว้าและผิวบนทุกครั้ง ทั้งนี้เพื่อรักษาความโค้งของผิวแก้วให้มีขนาดใกล้เคียงตามที่ต้องการที่สุด ในการฝนละเอียดด้วยผงคาร์โบรันต์เบอร์ 1,000 ควรฝนราว 2 ชั่วโมง เพื่อให้การขัดไล่ใช้เวลาน้อยลงในช่วงการฝนละเอียดต้องไม่ใช้สเปย์โรมิเตอร์วัดรัศมีความโค้ง เพราะจะทำให้เกิดหลุมใหญ่บนผิวแก้ว

หลังจากทำการฝนหยาบและฝนละเอียดทั้ง 4 ผิวแล้วโดยผิวที่ 4 ต้องใช้แก้วอีกแผ่นช่วยในการฝน ล้างอุปกรณ์ให้สะอาดเพื่อเตรียมการขัดไล่ต่อไป

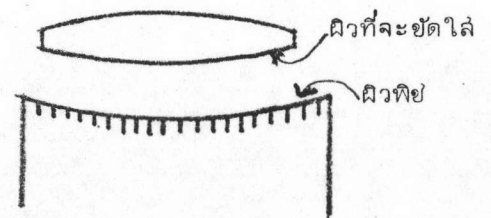
### 2.3.3 การขัดไล่

การขัดไล่เป็นการขูดหลุมเล็ก ๆ ที่ยังปรากฏอยู่ให้หายไปซึ่งจะทำให้แก้วใส วัสดุที่ใช้ในการขัดไล่คือพิทซ์(pitch) และผงแดงซึ่งเป็นออกไซด์ของเหล็ก ( $Fe_2O_3$ ) ซึ่งวัสดุทั้งสองเมื่อขัดร่วมกันกับผิวแก้วจะให้ความหนืดอย่างมาก ถ้าเราเอาชนะความหนืดนี้ได้จะเกิดความร้อนสูงพอจะทำให้แก้วละลายเพื่อปิดหลุมเล็ก ๆ เพื่อให้ได้แก้วที่เป็นผิวมันใส

ในการขัดไล่เราต้องเตรียมพิชให้มีความหนืดพอเหมาะโดยใช้น้ำมันสนช่วย หลอมพิชให้เป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าเลนส์เล็กน้อย ตัดผิวบนของพิชให้เป็นแท่งสี่เหลี่ยมขนาด 1 เซนติเมตรโดยระหว่างแท่งบนผิวพิชนี้จะมีร่องสั้น ๆ เพื่อช่วยลึบผงขัดไล่ ดังรูปที่ 2.10 ต้องทำผิวหน้าของพิช ให้มีความโค้งเท่ากับผิวแก้วหน้าที่จะขัดไล่ด้วย



ก. ด้านบน



ข. ด้านข้าง

รูปที่ 2.10 ผิวหน้าของพิช

เมื่อเตรียมฟิล์มเสร็จแล้วก็ผสมน้ำกับผงแดง ในการชดไล้ต้องยึดแท่งฟิล์มไว้กับโต๊ะฝน แล้วละเลงน้ำผสมผงแดงนี้ลงบนผิวฟิล์มจากนั้นวางแก้วที่จะชดไล้ทับลงไปแล้วทำการฝนสีโตรกเช่นเดียวกับการฝนหยาบแต่ด้วยอัตราเร็วขึ้นกว่าเดิม แล้วหมั่นเติมน้ำผสมผงแดงนี้เรื่อย ๆ ถ้าชดไล้ไปนาน ๆ จนร่องบนผิวหน้าฟิล์มหมดไป ต้องทำฟิล์มใหม่ให้มีร่องเหมือนเดิม แล้วทำการชดไล้ต่อไป จนกระทั่งผิวแก้วใสที่สุด ในการทดลองนี้ใช้เวลาชดไล้แต่ละหน้าราว 20 ชั่วโมง

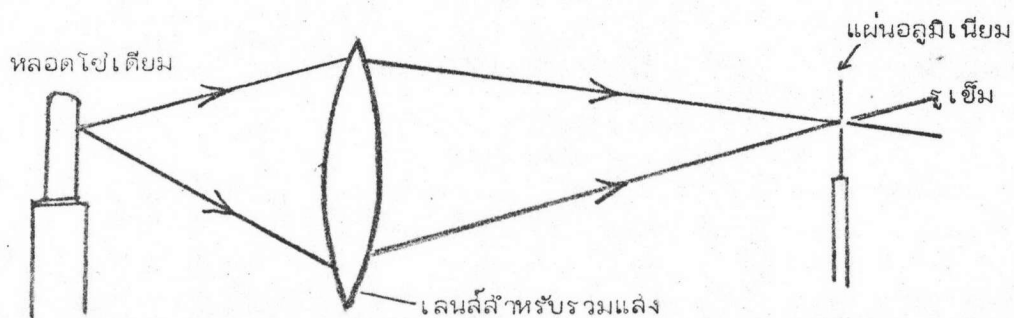
## 2.4 การทดสอบเลนส์

เป็นการทดสอบหาคุณสมบัติและความคลาดของเลนส์ที่สร้างขึ้น การทดสอบทั้งหมดทำในห้องปฏิบัติการที่คณิศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้ตาและฟิล์มรับภาพ มีการทดสอบ 6 อย่าง คือ การทดสอบ วงแหวนของนิวตัน (Newton's ring test) การทดสอบใช้คมมีด (knife - edge test), การทดสอบด้วยดาว (star test), การทดสอบของฮาร์ตแมนน์ (Hartmann's test), การทดสอบกำลังแยก (resolving power test) และการทดสอบความคลาดตรงคี่ ในการทดสอบเกือบทุกครั้ง ยกเว้นการทดสอบหา กำลังแยก และการทดสอบวงแหวนนิวตัน ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสงและผิวหน้าเลนส์จะคงที่ที่ 15.65 เมตร เล่มอ

### 2.4.1 การสร้างแหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงที่สร้างพยายามให้เป็นแบบจุด (point source) มากที่สุดทำโดยการเจาะรูบนแผ่นอลูมิเนียม (aluminium foil) โดยการวางแผ่นอลูมิเนียมบางที่ตัดเป็นแผ่นเล็ก ๆ ลงบนกระจกใสเรียบ แล้วใช้ปลายเข็มกดลงไปเบา ๆ แล้วนำไปส่องดูกับหลอดโซเดียม ว่า ทะลุหรือไม่ที่หลาย ๆ แผ่นจากนั้นนำแผ่นที่มีรูไปส่องดูกับกล้องจุลทรรศน์ว่ารูนั้นกลมหรือไม่ เลือกเอาแผ่นที่รูกลมที่สุด เล็กที่สุดและส่องกับหลอดโซเดียมแล้วให้แสงออกมาสม่ำเสมอมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นจุด

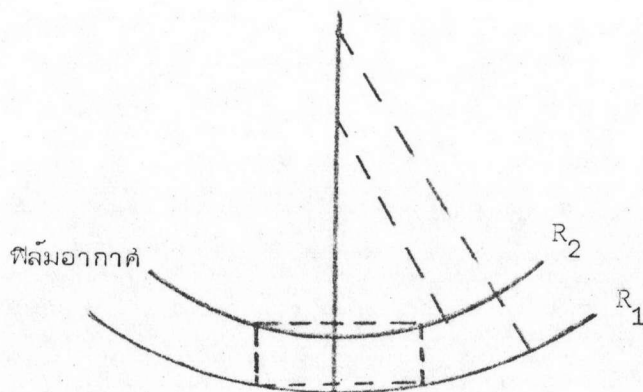
จากนั้นทำแหล่งกำเนิดแสงโดยการใช้เลนส์นูนรวมแสงจากหลอดโซเดียมให้มาโฟกัสที่จุดวัตถุ เพื่อให้แสงจากจุดมีความเข้มมากที่สุดดังรูปที่ 2.11 ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2.11 การสกัดแหล่งกำเนิดแสง

## 2.4.2 การทดสอบวงแหวนของนิวตัน

เป็นการทดสอบเพื่อหาว่ามีความโค้งของผิวเลนส์โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อผิวสองผิวมีรัศมีความโค้งต่างกันวางประกบกันจะเกิดฟิล์มบางของอากาศที่มีความหนาต่างกัน ณ จุดต่างๆ ระหว่างผิวประกบ เมื่อผ่านแสงสีเดียวเข้าไปยังฟิล์มจะเกิดการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนมาจากผิวทั้งสองของฟิล์ม เมื่อสังเกตที่ตำแหน่งสัมผัสจะเห็นเป็นวงแหวนมืดและสว่างสลับกัน เรียกวงแหวนของนิวตันโดยมีจุดศูนย์กลางวางอยู่ที่ตำแหน่งที่ผิวทั้งสองสัมผัสกัน (Valasek, 1956) ดังรูปที่ 2.12

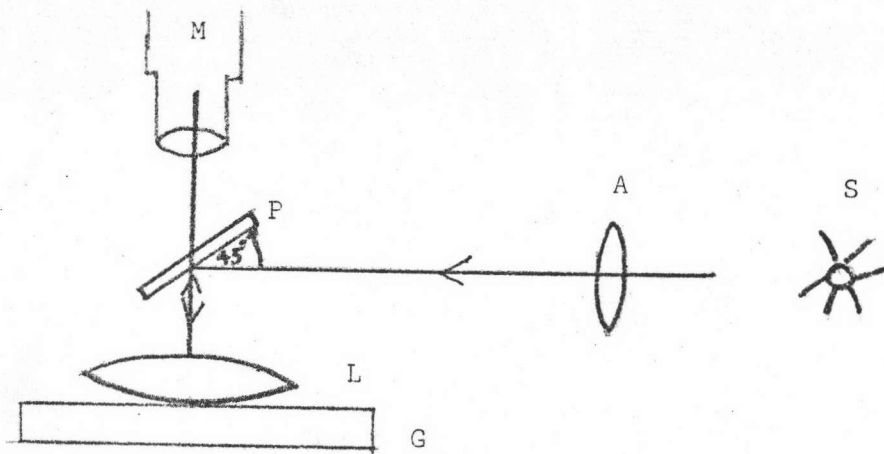


รูปที่ 2.12 การเกิดวงแหวนนิวตัน

โดยอาศัยความหนาของฟิล์ม และการเกิดวงแหวน เราสามารถคำนวณหาว่ารัศมีความโค้งของแต่ละผิวได้จากสมการ 2.7 (Valasek, 1956)

$$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = \frac{4\lambda (m_i - m_j)}{d_i^2 - d_j^2} \quad 2.7$$

- โดย  $R_1, R_2$  เป็นรัศมีความโค้งของผิวที่ 1 และผิวที่สองตามลำดับ
- $d_i, d_j$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนนิวตันวงที่  $m_i, m_j$  ตามลำดับ
- $m_i, m_j$  เป็นวงมืดที่  $i$  และวงมืดที่  $j$  ตามลำดับ
- $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นของแสงที่ใช้สังเกต



รูปที่ 2.13 การทดสอบวงแหวนของนิวตัน

ในการหาขนาดวงแหวนนิวตันชุดเครื่องมือดังรูปที่ 2.13 เริ่มจากโฟกัสกล้องจุลทรรศน์ M ให้อยู่ที่ผิวแก้วเรียบ G จากนั้นปล่อยให้แสงจากต้นกำเนิดแสง S ซึ่งเป็นแสงจากหลอดโซเดียม ซึ่งมีความยาวคลื่น 5893 ๕อังสตรอม โดยให้เลนส์ A เป็นตัวรวมแสงให้โฟกัสโดยประมาณที่กระจกใส P ซึ่งเอียงทำมุม 45 องศา กับแนวราบ แสงจะสะท้อนไปยังผิวแก้ว G แล้ว วางเลนส์ที่ จะทดสอบ L ลงบนผิวแก้ว G เมื่อมองที่กล้องจุลทรรศน์ จะเห็นวงแหวนของการแทรกสอด จากนั้นวัดหาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของวงที่  $m_i$  ได้ค่า  $d_i$  เมื่ออ่านหลาย ๆ ค่าก็หาค่า  $m_i$  และ  $d_i^2/4$  มาเขียนกราฟโดยให้  $m_i$  อยู่ในแกนตั้งและ  $d_i^2/4$  อยู่ในแกนราบ จากนั้นหาค่าความชันของกราฟ (slope) ซึ่งเท่ากับ  $\frac{\Delta m_i}{\Delta d_i^2/4}$  เมื่อแผ่นแก้วมีผิวราบนั้นคือ  $R_1 = \infty$



จากสมการ 2.7 จะได้

$$\frac{1}{R_2} = \text{slope} \times \lambda \quad 2.8$$

ก็สามารถหาค่าความโค้งของผิวที่ต้องการได้

ในกรณีหาความโค้งของผิวเว้าต้องใช้เลนส์นูนอีกตัวที่ทราบความโค้งของผิวแล้วช่วย โดยวางเลนส์ตัวนั้นบนแผ่นแก้ว G ให้ผิวเว้าหงายขึ้น แล้ววางผิวนูนที่ทราบความโค้งของผิวประกบลงบนผิวนั้น แล้วก็วัดอย่างเดียวกัน แต่คำนวณโดยใช้สมการ 2.7

เมื่ออ่านค่า  $m_i$  และ  $d_i$  แล้ว ก็หมุนเลนส์ไปราว  $120^\circ$  แล้วอ่านค่า  $m_i$  และ  $d_i$  อีก แล้วหมุนไปอีก  $120^\circ$  อ่านอีกเป็นครั้งที่สามเพื่อหาว่าเลนส์กลมมาตรงหรือไม่

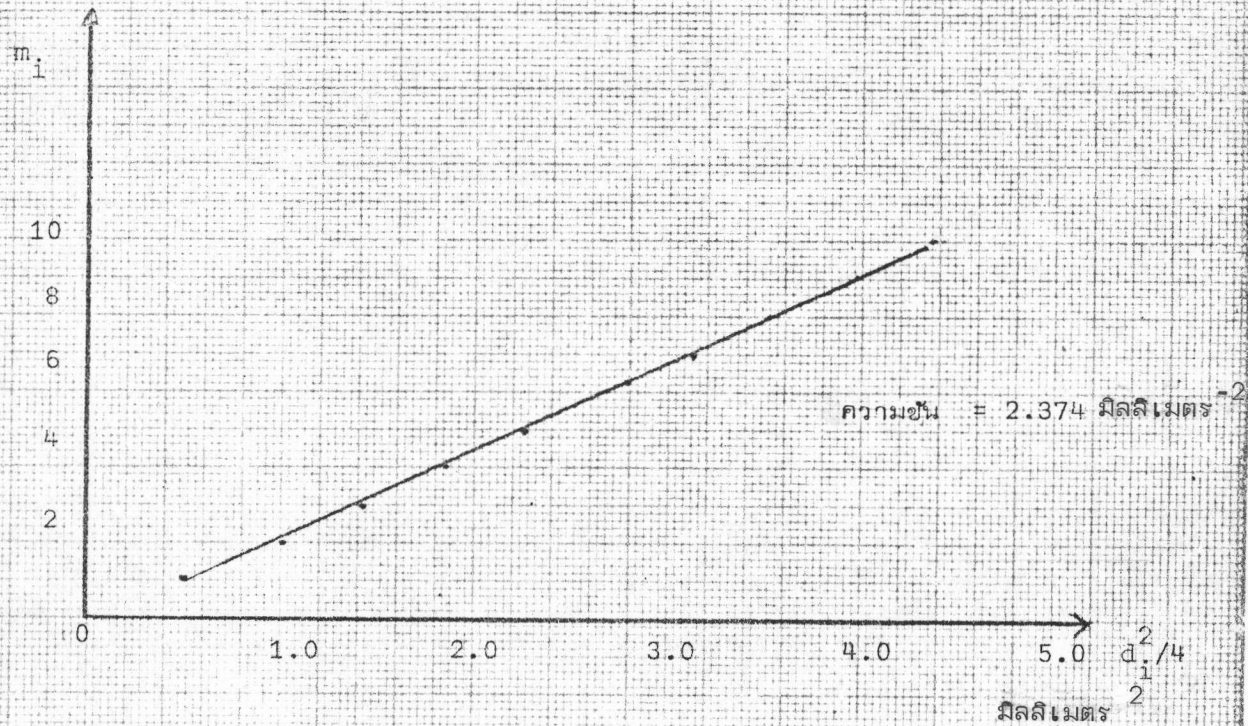
ค่า  $m_i$  และ  $d_i$  ที่วัดได้ของแต่ละวงของผิวที่ 1, 2, 3, 4 แสดงดังในตารางที่ 2.1, 2.2, 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

ทั้งนี้ผิวที่สามใช้ทดสอบร่วมกับเลนส์ที่มีรัศมีความโค้ง  $R_T = 529$  มิลลิเมตร

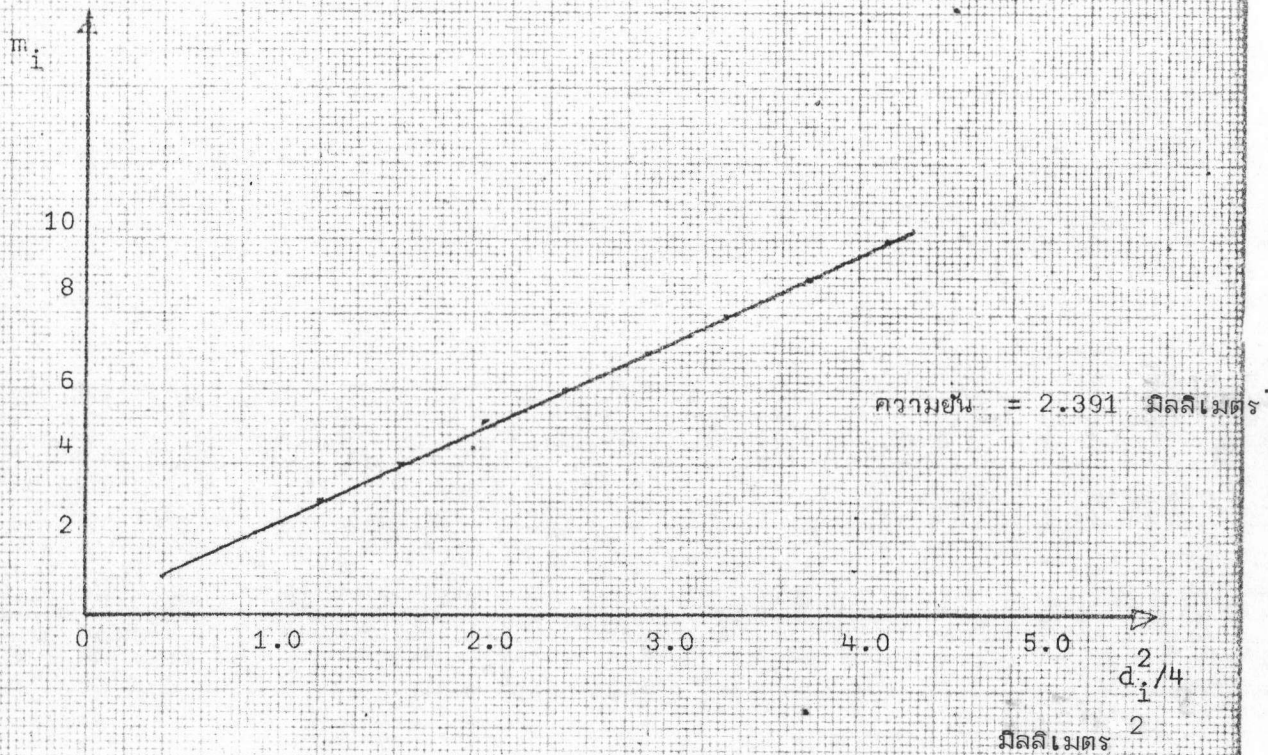
ความชันของกราฟแต่ละผิวแสดงในรูป 2.14 2.15 2.16 และ 2.17 ค่าคำนวณโดยใช้เครื่องคำนวณของฮิวเลต-แพกการ์ด รุ่น เฮย์ พี 97 การคำนวณใช้ความยาวคลื่นของแสงโซเดียมเป็น 5893 อังสตรอม

#### 2.4.3 การทดสอบแบบใช้คมมีด

เป็นการทดสอบหาทางยาวโฟกัสของบริเวณต่าง ๆ ของเลนส์โดยใช้คมมีดตัดลำแสงเพื่อหาตำแหน่งโฟกัสและความคลาดทรงกลมซึ่งใช้วิธีลดขนาดช่องเปิด (aperture) ของเลนส์การวัดเครื่องมือ ดังรูปที่ 2.18 ลำแสงที่ผ่านช่องเปิด จะไปรวมกันที่จุดโฟกัส ตามผู้สังเกตอยู่ที่แนวแกนที่คั่น ส่วนคมมีดซึ่งเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งฉากกับแกนที่คั่น ครั้งแรกวางอยู่ภายในระยะโฟกัสถ้าเลนส์ไม่มีความคลาด เมื่อเลื่อนคมมีดตัดลำแสงจะเห็นภาพเริ่มหายไปจากทางด้านเดียวกับคมมีด คือ เมื่อเลื่อนคมมีดจากซ้ายไปทางขวา ภาพที่สังเกตจะเห็นว่าเริ่มมืดจากทางซ้ายไปขวาเช่นเดียวกัน ในทางตรงข้ามถ้าคมมีดอยู่ที่ตำแหน่งนอกโฟกัสทิศทางเคลื่อนที่ของคมมีดจะกลับกับทิศทางของความมืดของภาพ เช่นเมื่อเลื่อนคมมีดจากซ้ายไปขวาภาพจะเริ่มมืดจากขวาไปซ้าย เมื่อคมมีดตัดที่จุดโฟกัสพอดี เพียงเลื่อนคม

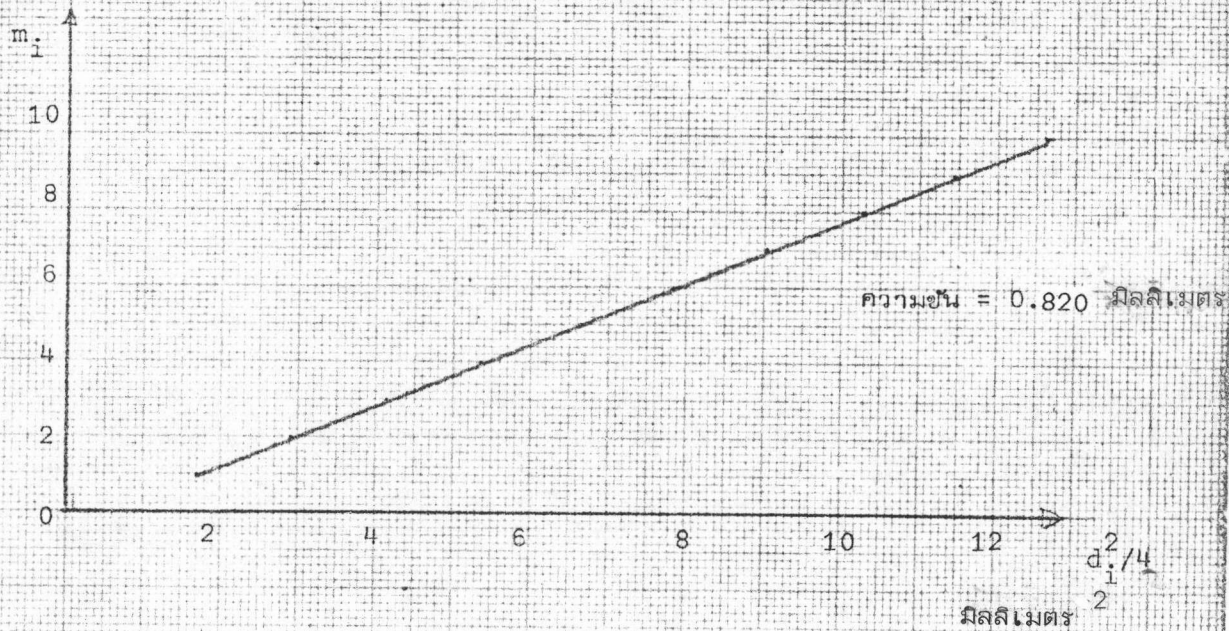


รูปที่ 2.14 กราฟของรัศมีความโค้งผิวที่หนึ่งโดยวิธีวงแหวนของนิวตัน

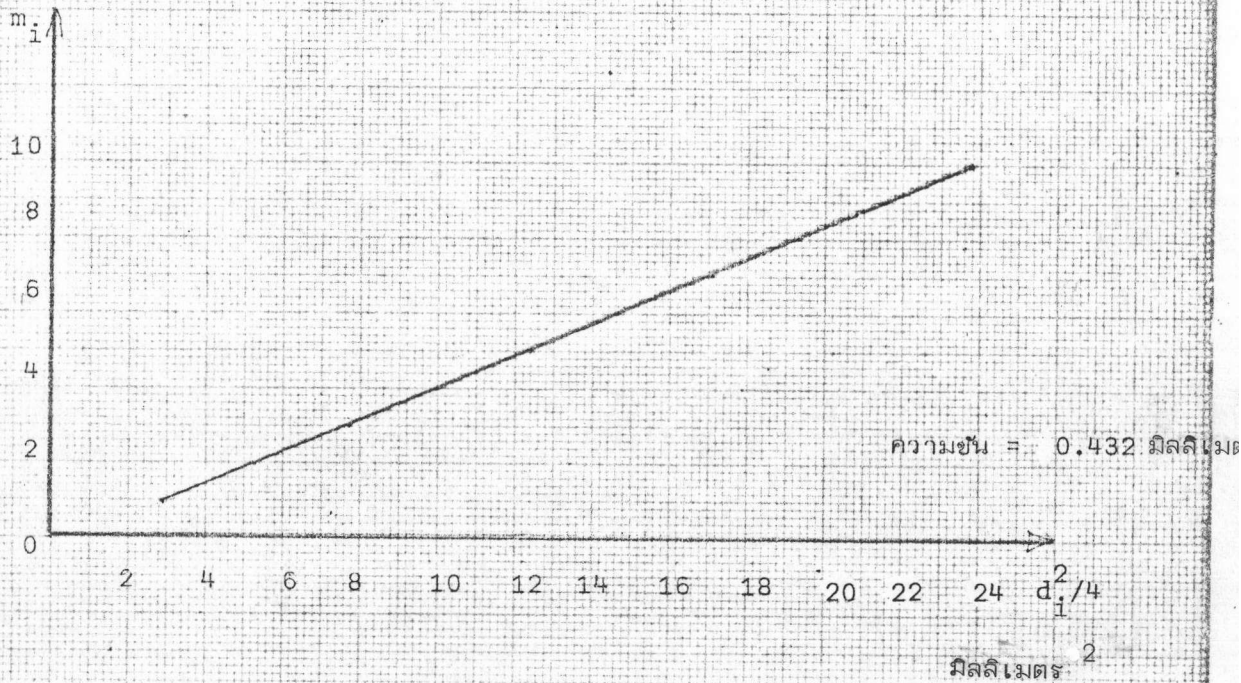


รูปที่ 2.15 กราฟของรัศมีความโค้งผิวที่สองโดยวิธีวงแหวนของนิวตัน





รูปที่ 2.16 กราฟของรัศมีมีความโค้งผิวที่ล้ามโดยวิธีวงแหวนนิวตัน



รูปที่ 2.17 กราฟของรัศมีมีความโค้งผิวที่ล้าโดยวิธีวงแหวนนิวตัน

ตารางที่ 2.1 เส้นผ่าศูนย์กลางวงแหวนของผิวต้นของผิวที่หนึ่ง

วง m	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$d_i$ มิลลิเมตร	$d_i^2/4$ มิลลิเมตร <sup>2</sup>	$d_i$ มิลลิเมตร	$d_i^2/4$ มิลลิเมตร <sup>2</sup>	$d_i$ มิลลิเมตร	$d_i^2/4$ มิลลิเมตร <sup>2</sup>
1	1.44	0.520	1.51	0.570	1.59	0.640
2	1.95	0.950	2.01	1.01	2.06	1.07
3	2.33	1.36	2.39	1.43	2.43	1.48
4	2.69	1.81	2.72	1.85	2.750	1.39
5	2.97	2.21	3.00	2.26	3.050	2.33
6	3.25	2.64	3.27	2.681	3.33	2.77
7	3.51	3.08	3.53	3.11	3.56	3.17
8	3.72	3.47	3.76	3.53	3.790	3.59
9	3.95	3.91	3.98	3.97	4.00	4.01
10	4.16	4.33	4.19	4.39	4.20	4.42
ความชัน (มิลลิเมตร <sup>-2</sup> )	2.36		2.36		2.37	
รัศมีความโค้ง (มิลลิเมตร)	718		718		715	
รัศมีความโค้ง เฉลี่ย (มิลลิเมตร)	717					

ตารางที่ 2.2 เส้นผ่าศูนย์กลางวงแหวนของนิวตันของผิวที่ส่อง

วงที่	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$d_i$ มิลลิเมตร	$d_i^2/4$ มิลลิเมตร	$d_i$ มิลลิเมตร	$d_i^2/4$ มิลลิเมตร	$d_i$ มิลลิเมตร	$d_i^2/4$ มิลลิเมตร
1	1.27	0.400	1.46	0.560	1.50	0.570
2	1.80	0.810	2.00	1.00	2.00	1.00
3	2.20	1.21	2.39	1.43	2.38	1.42
4	2.55	1.63	2.71	1.84	2.73	1.86
5	2.88	2.08	3.00	2.26	3.02	2.28
6	3.14	2.47	3.22	2.59	3.29	2.70
7	3.41	2.91	3.51	3.08	3.53	3.12
8	3.64	3.31	3.74	3.50	3.75	3.52
9	3.86	3.73	3.96	3.92	3.97	3.94
10	4.08	4.16	4.17	4.36	4.18	4.37
ความชัน (มิลลิเมตร <sup>2</sup> )		2.39	2.39		2.37	
รัศมีความโค้ง (มิลลิเมตร)		710	710		715	
รัศมีความโค้งเฉลี่ย (มิลลิเมตร)		712				

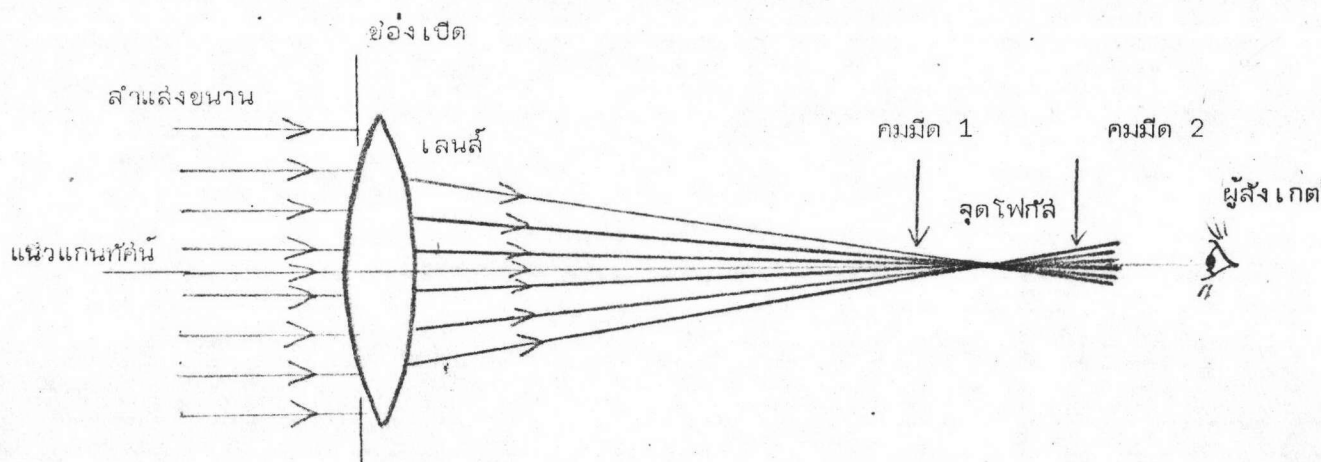


ตารางที่ 2.3 เส้นผ่าศูนย์กลางวงแหวนของนิวตันของผิวที่สาม

วงที่ m	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$d_i$ มิลลิเมตร	$d_i^2/4$ มิลลิเมตร <sup>2</sup>	$d_i$ มิลลิเมตร	$d_i^2/4$ มิลลิเมตร <sup>2</sup>	$d_i$ มิลลิเมตร	$d_i^2/4$ มิลลิเมตร <sup>2</sup>
1	2.60	1.69	2.61	1.71	2.56	1.64
2	3.47	3.02	3.41	2.91	3.40	2.89
3	4.13	4.26	4.07	4.15	4.09	4.18
4	4.69	5.50	4.64	5.38	4.62	5.35
5	5.19	6.73	5.16	6.66	5.16	6.64
6	5.64	7.97	5.59	7.81	5.57	7.77
7	6.06	9.18	6.02	9.06	6.00	9.00
8	6.45	10.4	6.41	10.2	6.38	10.1
9	6.81	11.5	6.76	11.4	6.76	11.4
10	7.15	12.7	7.12	12.6	7.10	12.6
ความชัน (มิลลิเมตร <sup>-2</sup> )		0.814		0.820		0.822
$\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_3}$		0.000479		0.000483		0.000485
$R_3$ (มิลลิเมตร)		710		711		711
รัศมีความโค้ง เฉลี่ย (มิลลิเมตร)		711				

ตารางที่ 2.4 เส้นผ่าศูนย์กลางวงแหวนของนิวตันของผิวที่สี่

วงที่ m	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$d_i$	$d_i^2/4$	$d_i$	$d_i^2/4$	$d_i$	$d_i^2/4$
	มิลลิเมตร	มิลลิเมตร <sup>2</sup>	มิลลิเมตร	มิลลิเมตร <sup>2</sup>	มิลลิเมตร	มิลลิเมตร <sup>2</sup>
1	2.52	1.59	3.42	2.93	2.59	1.68
2	3.94	3.89	4.64	5.39	3.99	3.98
3	4.95	6.14	5.56	7.74	5.00	6.25
4	5.79	8.38	6.33	10.0	5.86	8.60
5	6.57	10.7	7.33	12.4	6.60	10.9
6	7.20	12.9	7.65	14.6	7.32	13.4
7	7.80	15.2	8.75	17.0	7.89	15.5
8	8.38	17.5	8.79	19.3	8.47	17.9
9	8.88	19.7	9.28	21.5	9.00	20.2
10	9.38	22.0	9.76	23.8	9.46	22.3
ความชัน (มิลลิเมตร <sup>-2</sup> )	0.440		0.432		0.432	
รัศมีความโค้ง (มิลลิเมตร)	$3.86 \times 10^3$		$3.93 \times 10^3$		$3.93 \times 10^3$	
รัศมีความโค้ง เฉลี่ย (มิลลิเมตร)	$3.90 \times 10^3$					



รูปที่ 2.18 การทดสอบแบบใช้คมมืด

มิตินิตเดียว ภาพจากเป็นจนวนกลมสว่างจะหายไปทันทีเมื่อเลนส์ไม่มีความคลาดที่บางบริเวณ

รูปที่ 2.19 แสดงภาพที่ได้จากคมมืดตัดลำแสงที่ภายในและภายนอกโฟกัสทั้งนี้ตั้งกล้องถ่ายภาพไว้แทนตำแหน่งตาสังเกต

เมื่อเราเลื่อนคมมืดไปจนหาตำแหน่งโฟกัสของช่องเปิดได้แล้วก็ลดขนาดช่องเปิดแล้วเลื่อนคมมืดหาทางยาวโฟกัสของแต่ละบริเวณ พบว่าเลนส์นูนมีทางยาวโฟกัสที่แต่ละบริเวณต่างกันน้อยมากไม่อาจวัดค่าได้ ส่วนของเลนส์คู่มีค่าต่างกันเล็กน้อย ( $\pm 0.1$  เซนติเมตร) ดังแสดงไว้ในตาราง 2.5 แสดงว่าเลนส์นูนมีความคลาดทรงกลมอยู่น้อยมากส่วนเลนส์คู่ยังคงมีความคลาดทรงกลม

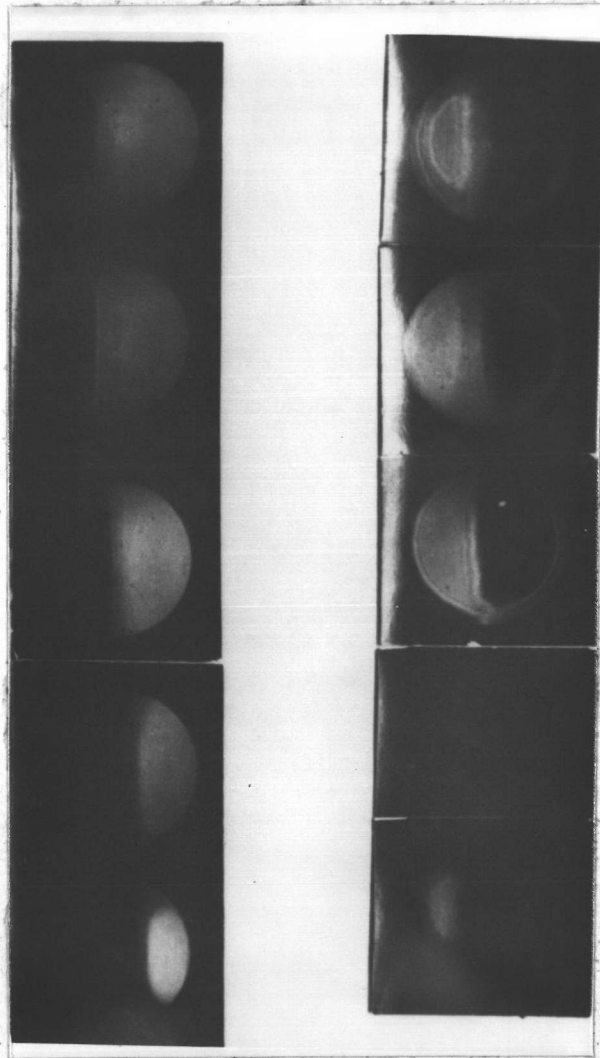
ตารางที่ 2.5 ทางยาวโฟกัสที่บริเวณต่าง ๆ จากการทดสอบแบบใช้คมมืด

เส้นผ่าศูนย์กลาง ของช่องเปิด (เซนติเมตร)	ทางยาวโฟกัส (เซนติเมตร)	
	เลนส์นูน	เลนส์คู่
10.4	56.2	94.3
9.0	56.2	94.4
8.0	56.2	94.4
7.0	56.2	94.4
6.0	56.2	94.4
5.0	56.2	94.3



→  
ทิศทางคมมีด

ตัดภายในโพทิส  
0.5 เซนติเมตร  
จากจุดโพทิส

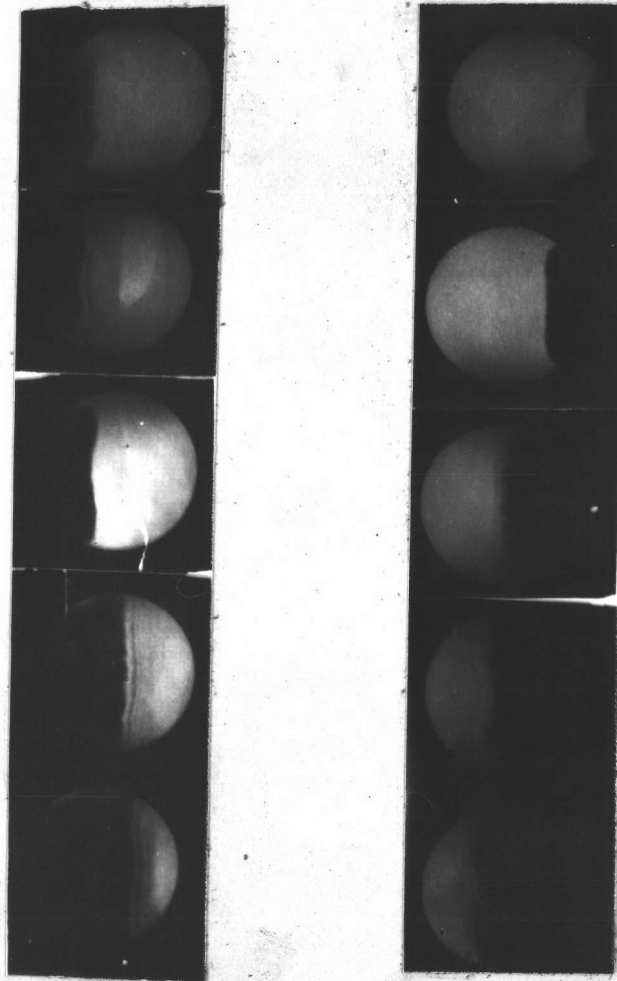


ตัดนอกโพทิส  
0.5 เซนติเมตร  
จากจุดโพทิส

รูปที่ 2.19 ก. ภาพการทดลองเลนส์นูนด้วยคมมีด

←  
ทิศทางลมมรสุม

ตัดภายในโฟกัส  
0.5 เซนติเมตร  
จากจุดโฟกัส



ตัดนอกโฟกัส  
0.5 เซนติเมตร  
จากจุดโฟกัส

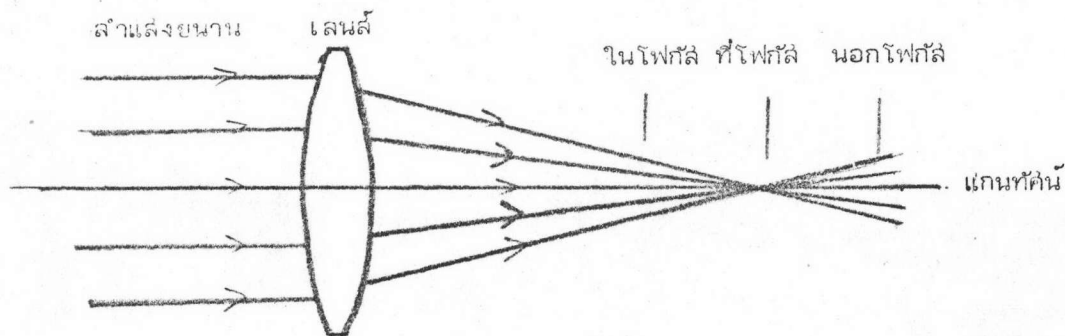
รูปที่ 2.19 ข. ภาพการทดลองเลนส์คู่ด้วยคมมืด

I1655686



#### 2.4.4 การทดสอบด้วยดาว

เป็นการทดสอบหาความคลาดทรงกลมของเลนส์ ว่าเลนส์เราเป็นแบบแก้ขาดหรือแบบแก้เกิน การทดลองดังรูปที่ 2 - 20 โดยการให้แสงขนานจากแหล่งกำเนิดเป็นจุด

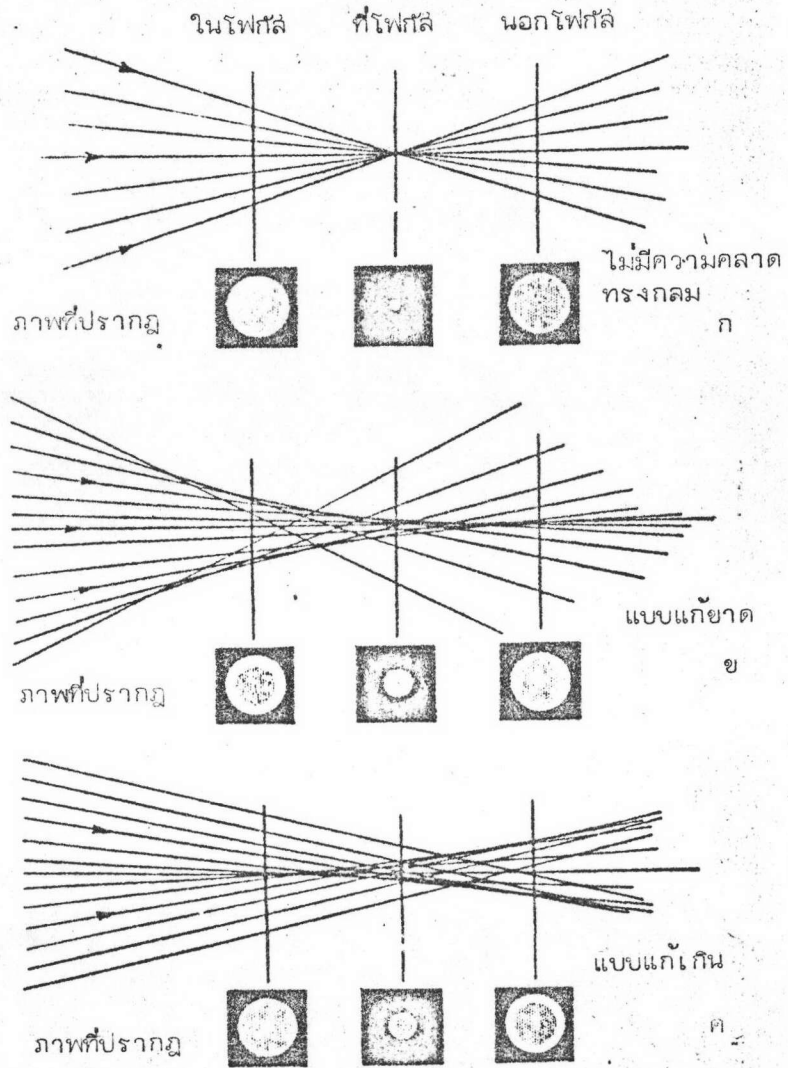


รูปที่ 2.20 ตำแหน่งที่สังเกตเห็นการทดสอบด้วยดาว

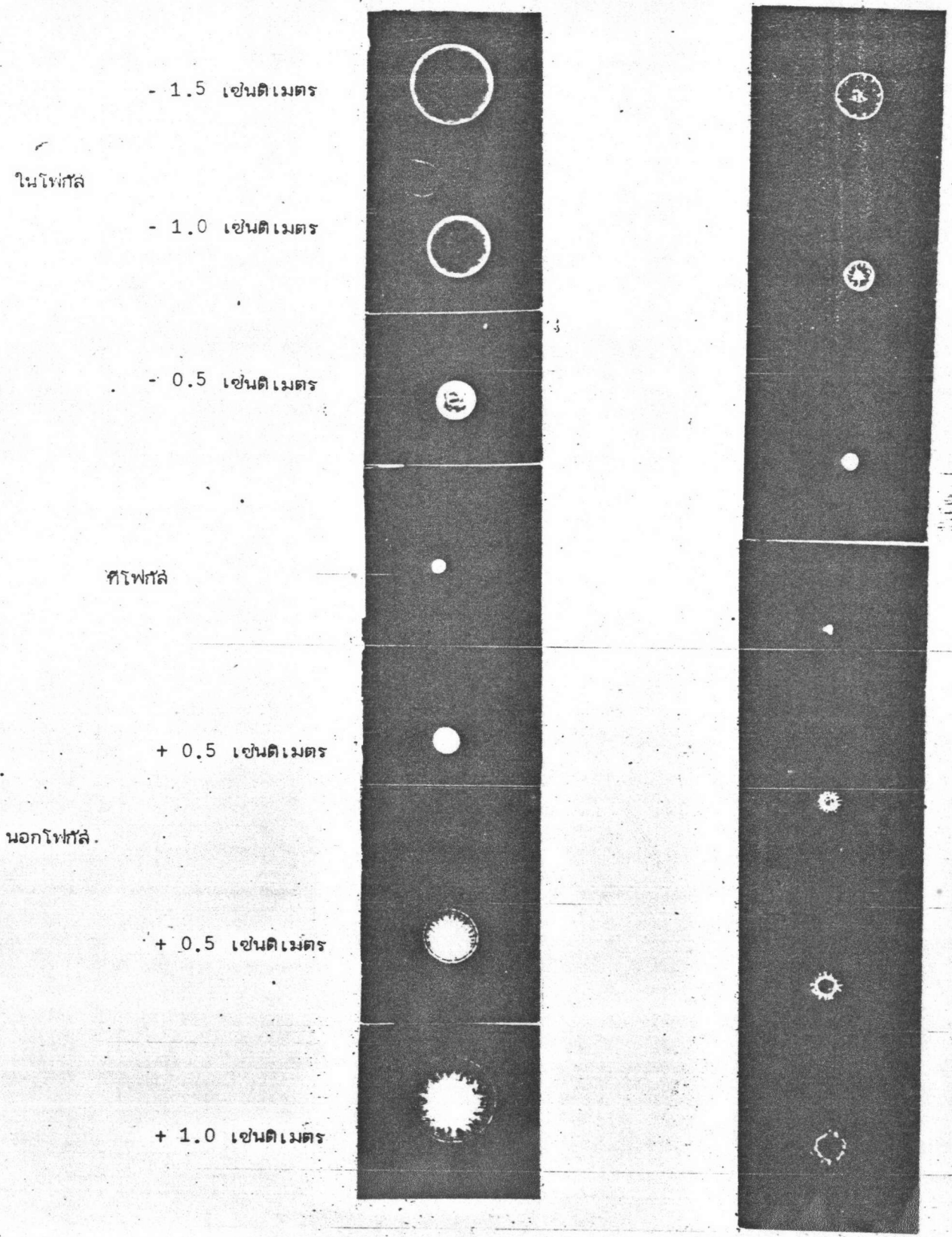
ผ่านเลนส์มาเกิดเป็นภาพ แล้วเราใช้เลนส์ใกล้ตาสังเกตดูภาพที่ตำแหน่งในโฟกัส ที่โฟกัสและที่นอกโฟกัส คุณภาพของเลนส์เป็นดังรูปที่ 2.21

ถ้าเลนส์ไม่มีความคลาดภาพในโฟกัสและนอกโฟกัสจะมีลักษณะไม่ต่างกันต่างกันเพียงความเข้มและที่จุดโฟกัสจะมีขนาดเล็กดังรูปที่ 2.21 ก ถ้าเลนส์เป็นแบบแก้ขาดภาพภายในโฟกัสที่นั่นแสงจะเข้มมากที่บริเวณขอบรูปแต่ที่บริเวณศูนย์กลางจะจาง ยิ่งห่างจากศูนย์กลางภาพจะยิ่งสว่างและคมชัดมากที่ขอบภาพ ส่วนภายนอกโฟกัสแสงจะเข้มมากที่ศูนย์กลางภาพซึ่งมีขนาดเล็กและสว่างเท่าที่จุดโฟกัสความสว่างของวงแหวนจะยิ่งน้อยลงเมื่ออยู่ห่างศูนย์กลางภาพ ขอบภาพจะจางและไม่ค่อยชัดดังรูปที่ 2.21 ข เมื่อเลนส์เป็นแบบแก้เกินภาพที่ปรากฏจะตรงข้ามกับแบบแก้ขาดดังรูป 2.21 ค (Sidgwick, 1954)

ผลการทดสอบเลนส์โดยใช้ดาวนี้แสดงในรูป 2.22 โดยรูป 2.22 ก แสดงผลจากเลนส์นูน รูป 2.22 ข แสดงผลจากเลนส์คู้ พบว่าเลนส์นูนเป็นแบบแก้ขาด และเลนส์คู้เป็นแบบแก้เกิน เลนส์นูนใช้เวลาบันทึกภาพ 10 นาที เลนส์คู้ใช้เวลาบันทึกภาพ 15 นาที



รูปที่ 2.21 ภาพจากการทดลองแบบดาวของเลนส์คุณภาพต่าง ๆ



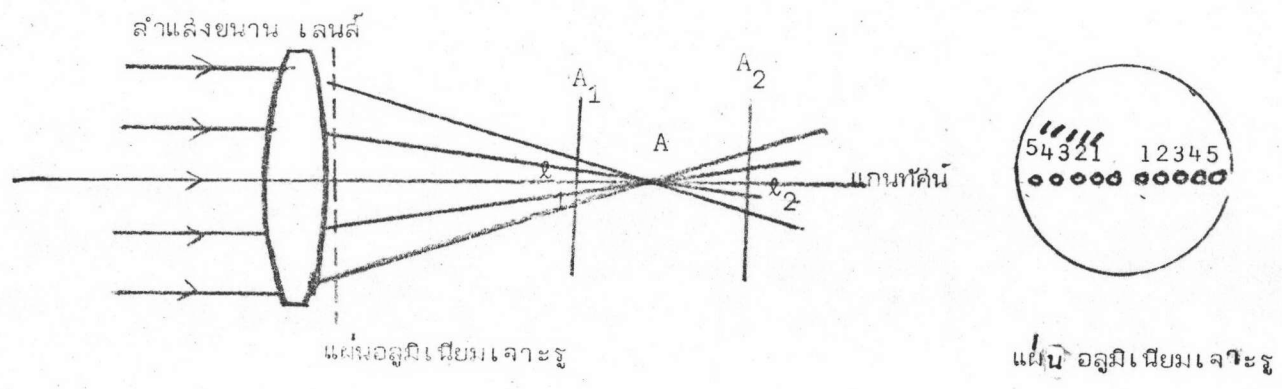
ก. เลนส์มุม

ข. เลนส์คู่

รูปที่ 2.22 ภาพถ่ายจากการทดลองด้วยดาว

2.4.5 การทดสอบของฮาร์ดแมนน์

เป็นการทดสอบหาความคลาดทรงกลมแบบหนึ่ง โดยตัดเครื่องมือดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การตัดเครื่องมือทดสอบแบบฮาร์ดแมนน์

โดยมีแผ่นอลูมิเนียมที่เจาะรูขนาดไม่เกิน  $\frac{1}{200}$  ของทางยาวโฟกัสของเลนส์ (Martin, 1932) ในที่นี้ใช้รูเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร แผ่นอลูมิเนียมวางอยู่ใกล้ผิวหลังของเลนส์ แล้วเปิดรูปล่อยให้แสงผ่านสี่ละคู่ เช่น 11', 22', ... เพื่อให้แสงผ่านไปโฟกัสโดยแต่ละรูจะแทนบริเวณนั้น ๆ ของเลนส์ ให้ A เป็นตำแหน่งจุดโฟกัสของแต่ละบริเวณ เราเอาฟิล์มรับภาพที่ตำแหน่ง  $A_1$  และที่  $A_2$  ของแต่ละคู่ที่เปิด โดย  $A_1$  เป็นตำแหน่งในโฟกัส  $A_2$  เป็นตำแหน่งนอกโฟกัส

เมื่อถ่ายภาพแล้วก็วัดหาระยะห่างระหว่างรูสว่างสองตำแหน่งทั้งในโฟกัสและนอกโฟกัส จากนั้นก็คำนวณหาตำแหน่งโฟกัสได้จากสมการ 2.9 (Martin, 1932)

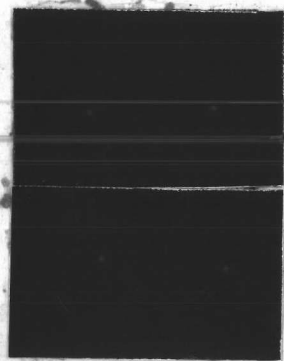
$$A = A_1 + \frac{l_1}{l_1 + l_2} (A_2 - A_1) \tag{2.9}$$

- A คือตำแหน่งจุดโฟกัสของแต่ละบริเวณ
- $A_1, A_2$  คือตำแหน่งภายในและภายนอกโฟกัสตามลำดับ
- $l_1$  คือ ระยะห่างระหว่างคู่ จุดที่ตำแหน่ง  $A_1$
- $l_2$  คือระยะห่างระหว่างคู่ จุดที่ตำแหน่ง  $A_2$

ในการถ่ายภาพจริงเปลี่ยนตำแหน่ง  $A_1$  และ  $A_2$  ไปสามครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 2.6 ภาพที่ได้จากการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 2.24 โดยเลนส์เดี่ยวใช้เวลาบันทึกภาพ 10 นาที เลนส์คู่ 15 นาที

ตารางที่ 2.6 ตำแหน่ง  $A_1$  และ  $A_2$  ที่ใช้ในการทดลองฮาร์ตแมนน์

	$A_1$ (เซนติเมตร)	$A_2$ (เซนติเมตร)	$A_2 - A_1$ (เซนติเมตร)
เลนส์คู่	52.7	58.5	6.0
	50.6	60.6	10.0
	48.7	62.7	14.0
เลนส์เดี่ยว	90.1	100.1	10.0
	87.5	102.5	15.0
	83.0	103.0	20.0



ก. เลนส์คู่



ข. เลนส์เดี่ยว

รูปที่ 2.24 ภาพจากการทดลองฮาร์ตแมนน์



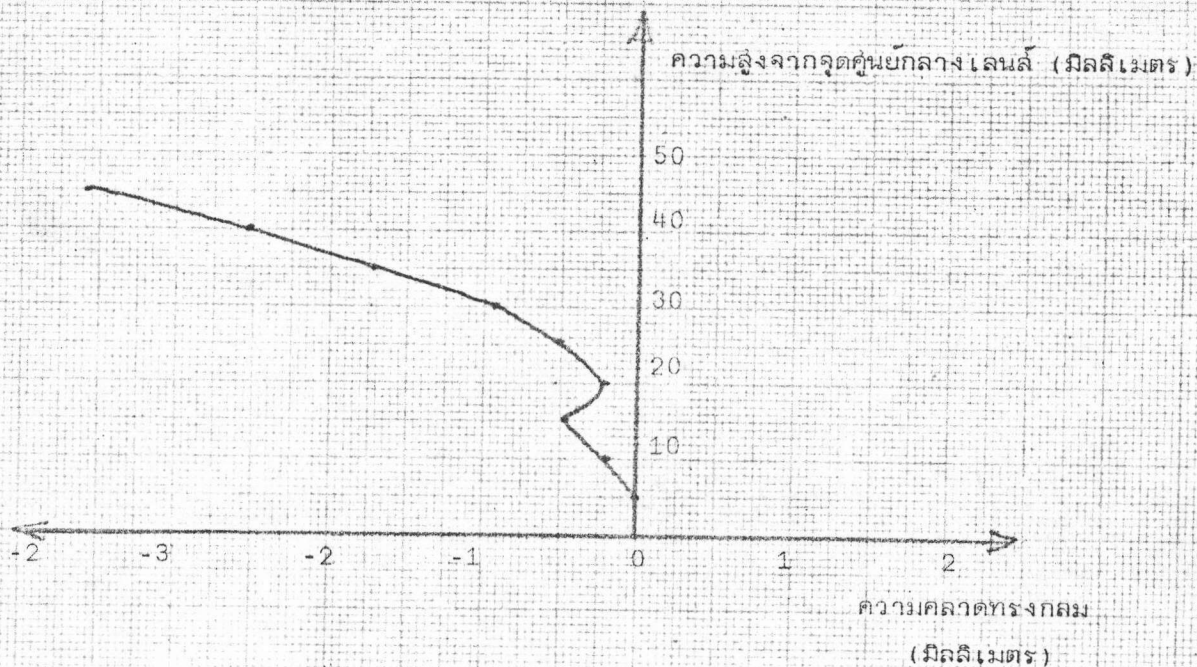
ในการทดลองได้แบ่งบริเวณบนเลนส์เป็น 9 บริเวณโดยแต่ละบริเวณอยู่ห่างกัน 5 มิลลิเมตร ทั้งหมดอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ผลจากการทดลองเลนส์นูนเป็นแบบแก๊ซาดตั้งตารางที่ 2.7 ซึ่งรูปร่างของความคลาดทรงกลม เป็นไปดังรูปที่ 2.25ก และเลนส์คู่ก็เป็นแบบแก๊ซาดตั้งตารางที่ 2.8 มีความคลาดทรงกลม เป็นดังรูปที่ 2.25 ข.

ตารางที่ 2.7 ตำแหน่งโฟกัส A ของบริเวณต่าง ๆ ของเลนส์นูนโดยวิธีอาร์ตแมนน์

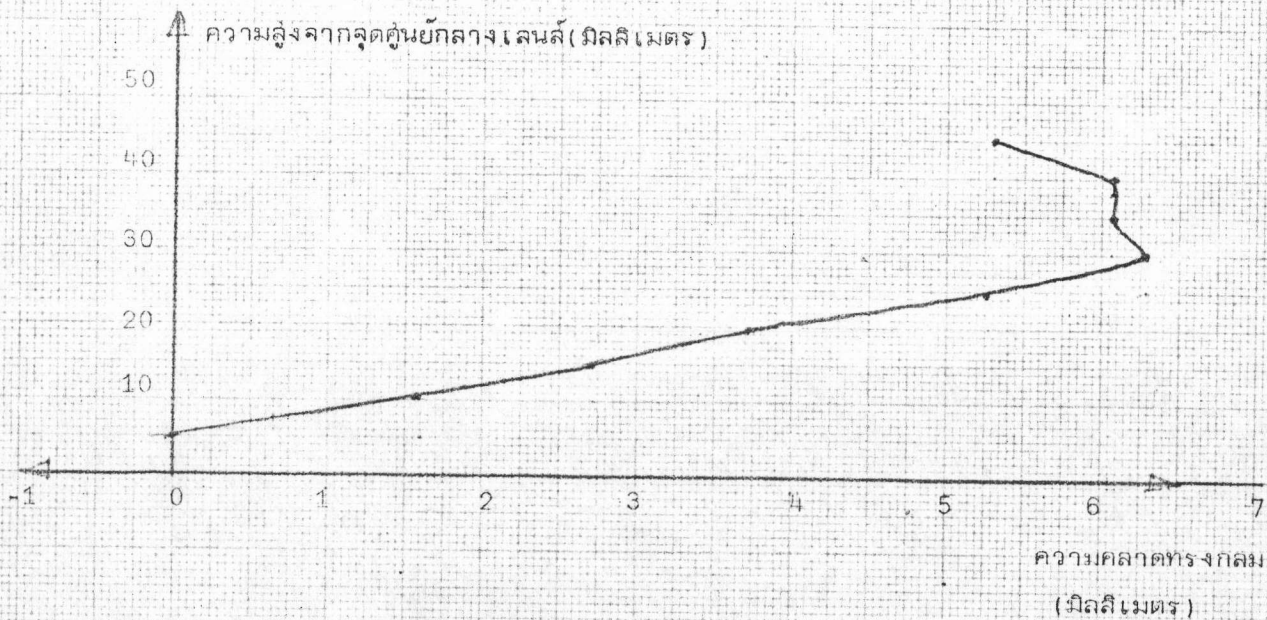
บริเวณห่างจาก ศูนย์กลางเลนส์ (มิลลิเมตร)	ตำแหน่งโฟกัส A (มิลลิเมตร)				ความคลาดทรง กลม (มิลลิเมตร)
	$A_2-A_1$	$A_2-A_1$	$A_2-A$	เฉลี่ย	
	6 เซนติเมตร	10 เซนติเมตร	14 เซนติเมตร		
5	561.8	562.0	561.5	561.8	0
10	561.7	561.7	561.2	561.5	-0.3
15	561.1	561.5	561.2	561.3	-0.5
20	561.3	562.0	561.3	561.5	-0.3
25	561.4	561.8	560.4	561.2	-0.6
30	560.5	561.6	560.0	560.8	-1.0
35	560.1	560.7	559.3	560.0	-1.8
40	559.3	559.8	558.6	559.2	-2.6
45	558.2	558.9	557.4	558.2	-3.6

ตารางที่ 2.8 ตำแหน่งโพส A ของบริเวณต่าง ๆ ของเลนส์คู่โดยวิธีอาร์ตแมนน์

บริเวณห่างจาก ศูนย์กลางเลนส์ (มิลลิเมตร)	ตำแหน่งโพส A (มิลลิเมตร)				ความคลาดทรง กลม (มิลลิเมตร)
	$A_1 - A_1$	$A_2 - A_1$	$A_2 - A_1$	เฉลี่ย	
	10 เซนติเมตร	15 เซนติเมตร	20 เซนติเมตร		
5	945.6	945.9	944.8	945.4	0
10	946.5	946.8	947.8	947.0	+1.6
15	947.7	948.7	948.1	948.2	+2.8
20	948.8	949.3	949.5	949.2	+3.8
25	950.8	950.4	951.0	950.7	+5.3
30	951.8	952.2	951.3	951.7	+6.3
35	951.6	951.5	951.5	951.5	+6.1
40	951.3	951.7	951.6	951.5	+6.1
45	950.9	950.2	951.2	950.7	+5.3



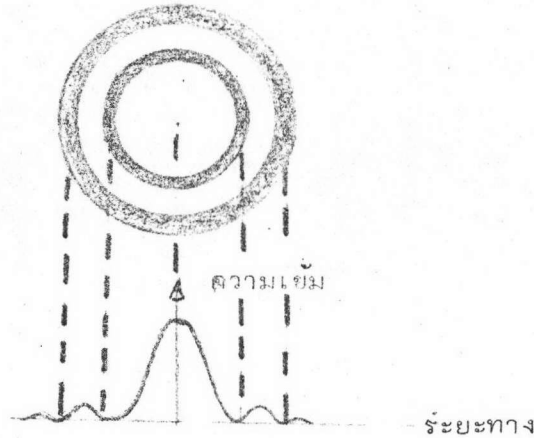
รูปที่ 2.25 ก. ความคลาดทรงกลมของเส้นฐานจากวิธีของฮาร์ตแมนน์



รูปที่ 2.25 ข. ความคลาดทรงกลมของเส้นคู่จากวิธีของฮาร์ตแมนน์

#### 2.4.6 การทดลองกำลังแยก

เนื่องจากวัตถุที่เป็นจุดเมื่อปรากฏเป็นภาพโดยเลนส์แล้วจะอยู่ในรูปผลรวมของการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) เป็นดวงสว่างล้อมรอบด้วยวงแหวนมืดและวงแหวนสว่างสลับกัน เราเรียกว่าจานกลมของแอร์ (Airy disc) ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งเป็นผลจากการแทรกสอดของแสง



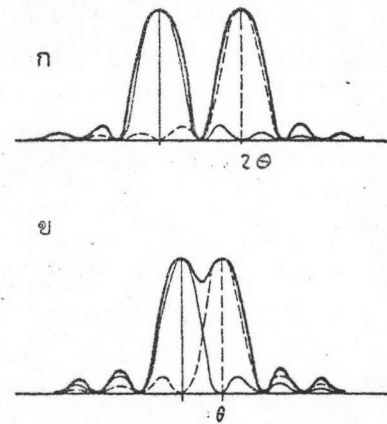
รูปที่ 2.26 ภาพจานกลมของแอร์

สมมติว่ามีดาวสองดวงอยู่ห่างกันเชิงมุม  $\theta$  ที่เลนส์ ให้ภาพศูนย์กลางจานสว่างของดวงหนึ่งอยู่ที่วงแหวนมืดวงที่หนึ่งของอีกจานแอร์ เราถือว่ากำลังแยกของเลนส์มีค่าเท่ากับ  $\theta$  (Strong, 1958) ดังแสดงในรูปที่ 2.27 กำลังแยกของเลนส์หาได้จากสมการ 2.10 (Jenkins & White, 1957) ซึ่งเป็นค่าทางทฤษฎี

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad 2.10$$

$\theta$	เป็นกำลังแยกเชิงมุม	หน่วยเป็นเรเดียน
$\lambda$	เป็นความยาวคลื่นแสงที่เข้ามา	หน่วยเซนติเมตร
$D$	คือขนาดช่องรับแสง	หน่วยเซนติเมตร





รูปที่ 2.27 การแยกจากกันของดาวสองดวง

ก. แยกมาก                      ข. พอดีแยก

ในการทดลองเราใช้แสงโซเดียมซึ่งมีความยาวคลื่น 5893 อังสตรอมจากจุดวัตถุที่อยู่ห่างกัน 0.73 มิลลิเมตร ผ่านเลนส์มาเกิดเป็นรูปที่พอดีแยก โดยการเปลี่ยนระยะระหว่างวัตถุจุดและเลนส์ แล้วถ่ายรูปทุกระยะพบว่าภาพพอดีแยกที่ระยะวัตถุเป็น 7.33 เมตร สำหรับเลนส์เดี่ยวโดยใช้เวลาถ่ายรูป 1/4 วินาที และสำหรับเลนส์คู่ ระยะวัตถุเป็น 9.71 เมตร ใช้เวลาถ่ายรูป 1/2 วินาที ดังแสดงภาพการแยกในรูปที่ 2.28 โดยทั้งเลนส์เดี่ยวและเลนส์คู่มีช่องเปิด (aperture) 104 มิลลิเมตร

ดังนั้นกำลังแยกเชิงทฤษฎีของเลนส์คู่และเลนส์เดี่ยวตามสมการ 2.10 จึงมีค่าเท่ากันเป็น

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1.22 \times 5893 \times 10^{-8}}{10.4} \\
 &= 6.91 \times 10^{-6} \quad \text{เรเดียน} \\
 &= 1.42 \quad \text{ฟิลิปดา}
 \end{aligned}$$

ในการหาค่าสังแยก เราใช้ความสัมพันธ์ที่ว่า  $\theta$  มีขนาดเล็ก

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \theta & \approx \tan \theta \\ & = \frac{a}{b} \end{aligned} \quad 2.11$$

- เมื่อ  $\theta$  เป็นก่าสังแยกเชิงมุม  
 $a$  เป็นระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงทั้งสอง  
 $b$  เป็นระยะจากแหล่งกำเนิดแสงถึงเลนส์ที่พอดีให้ภาพแหล่งกำเนิดแสง  
 ทั้งสองแยกจากกัน

จากการทดลองพบว่าเลนส์นูนได้ภาพแหล่งกำเนิด แสงแยกจากกันเมื่อ  $b = 7.33$  เมตร ส่วน  
 เลนส์คู่เมื่อ  $b = 9.71$  เมตร เมื่อแหล่งกำเนิดแสงทั้งสองอยู่ห่างกัน  $0.73 \times 10^{-3}$  เมตร

จากสมการ 2.11 จะได้ก่าสังแยกของเลนส์จากการทดลอง ดังนี้

$$\text{ก่าสังแยกของเลนส์นูน} = \frac{0.73 \times 10^{-3}}{7.33}$$

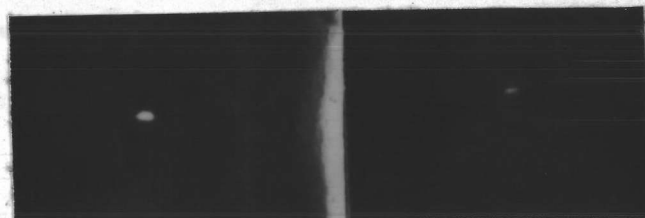
$$= 9.96 \times 10^{-5} \quad \text{เรเดียน}$$

$$= 20.5 \quad \text{ฟิลิปดา}$$

$$\text{ก่าสังแยกของเลนส์คู่} = \frac{0.73 \times 10^{-3}}{9.71}$$

$$= 7.51 \times 10^{-5} \quad \text{เรเดียน}$$

$$= 15.48 \quad \text{ฟิลิปดา}$$



รูปที่ 2.28 ภาพจากการทดลองก่าสังแยก ก. เลนส์นูน ข. เลนส์คู่

#### 2.4.7 การทดสอบความคลาดตรงค์

เป็นการทดสอบเพื่อหาทางยาวโฟกัสของแสงแต่ละสี ในการทดสอบเปลี่ยนเป็นใช้หลอด  
ไอปรอทแทนหลอดโซเดียม ทั้งนี้โดยใช้โฟกัสของแสงสีน้ำเงินซึ่งมีความยาวคลื่น 4861 อังสตรอม  
และแสงสีแดงซึ่งมีความยาวคลื่น 6563 อังสตรอม การทดสอบตั้งเครื่องมือแบบการทดสอบด้วยมิต  
เปลี่ยนหลอดไอปรอทแทนที่หลอดโซเดียม และใช้ตัวกรองแสง สีแดง, เหลือง และน้ำเงิน บังแสง  
จากกรูเอ็ิมทีละแผ่น จากนั้นหาค่าทางยาวโฟกัสโดยใช้ใบมีดตัดลำแสงเช่นเดียวกับการทดสอบด้วยคม  
มิต พบว่า เลนส์คู่ ไม่ได้แก้ความคลาดตรงค์ เพราะโฟกัสของแสงสีแดงและของแสงสีน้ำเงินมีค่า  
แตกต่างกับโฟกัสของแสงสีเหลืองอยู่ในอันดับเดียวกันกับผลจากการทดสอบของเลนส์ชิ้นตัวเดียว รายละเอียด  
ละเอียดดังตาราง 2.9

ตารางที่ 2.9 ผลการทดสอบความคลาดตรงค์

ทางยาวโฟกัสของแสง	เลนส์นูน (เช่นดีเมตร) ต่างจากสีเหลือง (%)	เลนส์คู่ (เช่นดีเมตร) ต่างจากสีเหลือง (%)
สีแดง	56.9 + 1.06 %	95.6 + 1.27 %
สีเหลือง	56.3 -	94.4 -
สีน้ำเงิน	55.6 - 1.24 %	92.6 - 1.91 %