บทที่ 4

การสร้างเลนส์

การที่จะสร้างเลนส์เพื่อใช้งานด้านทัศนศาสตร์นั้น ต้องคำนวณก่อนว่าเลนส์จะมีรูปร่างอย่างไร จึงปราศจากความคลาด หรือเหลือความคลาดอยู่น้อยที่สุด การคำนวณนี้จะทำได้ต่อเมื่อทราบค่าดรรชนีหักเหและค่าวีของแก้วที่จะนำมาใช้ทำเลนส์เสียก่อน

ดังนั้น ในบทนี้ก่อนอื่นจะได้กล่าวถึงการทดลองหาค่าดรรชนีหักเหและค่าวีของแผ่นแก้ว จากนั้นจะได้คำนวณหารูปร่างของเลนส์ที่มีโคมาเป็นศูนย์ และมีความคลาดทรงกลมน้อยที่สุดที่จะทำได้ แล้วจึงกล่าวถึงการฝนแผ่นแก้วให้เป็นเลนส์มีรูปร่างตามที่คำนวณได้ และการขัดใสเพื่อให้เป็นเลนส์นำมาใช้ต่อไป

1. การทดลองหาค่าคงที่ของแก้ว

1.1 การหาดรรชนีหักเหของแก้วโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดเลื่อนได้

ดังที่กล่าวในหัวข้อ 1.1.1 ของบทที่ 3 ส่วนลึกจริงและส่วนลึกปรากฏของวัตถุเมื่อมองผ่านแก้วที่ต้องการหาค่าดรรชนีหักเหจะวัดได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดเลื่อนได้ ซึ่งจะคำนวณหาค่าดรรชนีหักเหได้จากสูตร

$$\text{ดรรชนีหักเหของแก้ว} = \frac{\text{ส่วนลึกจริง}}{\text{ส่วนลึกปรากฏ}} \qquad (4.1)$$

ผลการทดลองวัดส่วนลึกจริงและส่วนลึกปรากฏของวัตถุ และการคำนวณหาค่าดรรชนีหักเหของแก้ว ได้บันทึกผลไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นการหาค่าดรรชนีหักเหของแก้วโดยใช้แสงขาว

ส่วนลึกจริง (เซนติเมตร)	ส่วนลึกปรากฏ (เซนติเมตร)	ดรรชนีหักเหของแก้ว
1.332	0.878	1.517
1.326	0.876	1.514
1.294	0.854	1.515
1.280	0.844	1.517
1.304	0.858	1.519
1.304	0.860	1.516
1.280	0.844	1.517
1.304	0.858	1.519
1.304	0.860	1.516
1.302	0.859	1.516

ตารางที่ 4.1 ผลการหาค่าดรรชนีหักเหของแก้วโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดเลื่อนได้

จากตารางที่ 4.1 ได้ค่าดรรชนีหักเหของแก้ว = 1.517±0.001 ซึ่งเป็นค่าดรรชนีหักเหของแก้วในแสงสีขาว

1.2 <u>การหาค่าดรรชนีหักเหของแก้วโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์</u>

จากที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 1.1.2 บทที่ 3 ว่า วิธีนี้ใช้กับแก้วที่มีรูปเป็นปริซึม ดังนั้นจึงนำเอาส่วนหนึ่งของแก้วที่จะใช้ทำเลนส์หน้ากล้องมาฝนให้เป็นรูปปริซึม จากนั้นจึงนำปริซึมมาวางบนแท่นของสเปกโตรมิเตอร์ วัดหาค่ามุมยอดและค่ามุมเบี่ยงเบนน้อยที่สุด โดยใช้แสงสีเหลืองจากหลอดโซเดียมเป็นแหล่งกำเนิดแสง จากนั้นนำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาค่าดรรชนีหักเหได้จากสูตร

$$n = \frac{\sin \frac{A + D}{2}}{\sin \frac{A}{2}} \qquad (4.2)$$

โดยที่ n เป็น ค่าดรรชนีหักเหของแก้ว

A เป็น มุมยอดของปริซึม

D เป็น มุมเบี่ยงเบนน้อยที่สุด

ครั้งที่	มุมยอดของปริซึม (A) (องศา)	มุมเบี่ยงเบนน้อยที่สุด (D) (องศา)
1	60.65	39.20
2	60.70	39.30
3	60.65	39.30
เฉลี่ย	60.67 ± 0.02	39.27 ± 0.05

ตารางที่ 4.2 ผลการหาค่าดรรชนีหักเหของแก้วโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์ มีแสงเหลืองจากหลอดโซเดียมเป็นต้นกำเนิด

จากตารางที่ 4.2 ได้ค่าดรรชนีหักเหของแก้ว (n_D) = 1.516 ± 0.002 ซึ่งเป็นค่าดรรชนีหักเหของแก้วเมื่อใช้แสงสีเหลืองจากหลอดโซเดียมเป็นต้นกำเนิดแสง

1.3 <u>การหาค่าวีของแก้ว</u>

ใช้สเปกโตรมิเตอร์หาค่าดรรชนีหักเหของแก้ว โดยใช้แสงสีต่างกัน ดังนี้

1. ใช้แสงสีน้ำเงินจากหลอดไฮโดรเจน มีความยาวคลื่น 486.1 นาโนเมตร เป็นต้นกำเนิดแสง ได้ผลดังตารางที่ 4.3

ครั้งที่	มุมยอดของปริซึม (A) (องศา)	มุมเบี่ยงเบนน้อยที่สุด (D) (องศา)
1	60.65	39.70
2	60.70	39.90
3	60.70	39.80
เฉลี่ย	60.68 ± 0.02	39.80 ± 0.08

ตารางที่ 4.3 ผลการหาค่าดรรชนีหักเหของแก้วโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์ มีแสงสีน้ำเงินจากหลอดไฮโดรเจนเป็นต้นกำเนิด

จากตารางที่ 4.3 ได้ค่าดรรชนีหักเหของแก้ว $(n_F) = 1.522 \pm 0.003$

2. ใช้แสงสีแดงจากหลอดไฮโดรเจนมีความยาวคลื่น 656.3 นาโนเมตร เป็นต้นกำเนิดแสง ได้ผลดังตารางที่ 4.4

ครั้งที่	มุมยอดของปริซึม (A) (องศา)	มุมเบี่ยงเบนน้อยที่สุด (D) (องศา)
1	60.60	39.00
2	60.70	38.90
3	60.70	39.00
เฉลี่ย	60.67 ± 0.05	38.97 ± 0.05

ตารางที่ 4.4 ผลการหาค่าดรรชนีหักเหของแก้วโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์ มีแสงสีแดงจากหลอดไฮโดรเจนเป็นต้นกำเนิด

จากตารางที่ 4.4 ได้ค่าดรรชนีหักเหของแก้ว (n_C) = 1.513 ± 0.001 และจากหัวข้อที่ 1.2 ของบทที่ 4 ได้ค่าดรรชนีหักเหของแก้วเมื่อใช้แสงสีเหลืองจากหลอดโซเดียมเป็นต้นกำเนิด (n_D) = 1.516 ± 0.002

จาก ค่าวี = $$\frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \qquad (4.3)$$

ในที่นี้ $n_D = 1.516$, $n_F = 1.522$, $n_C = 1.513$

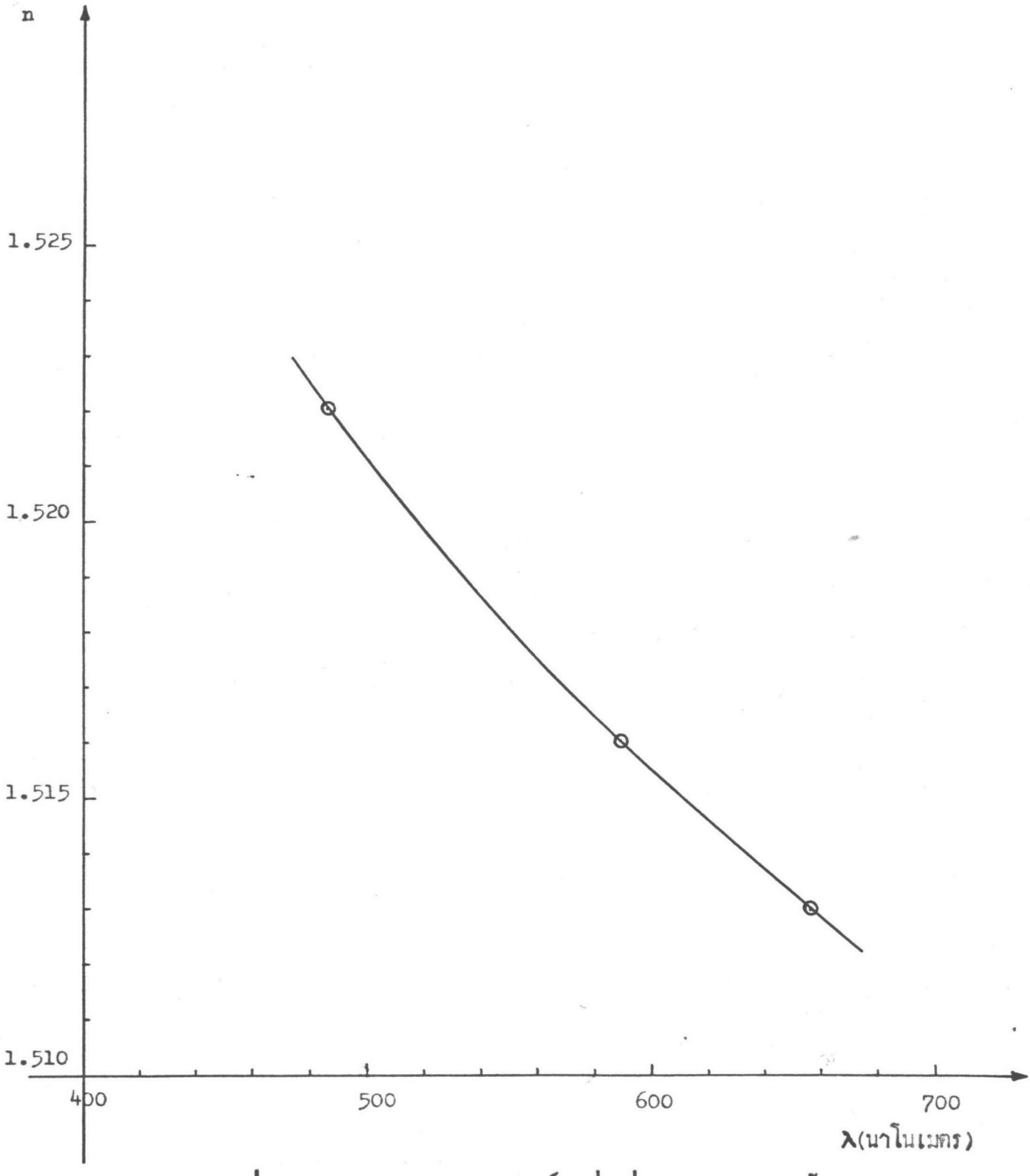
จากสมการ (4.3) ค่าวีของแก้ว = $$\frac{1.516 - 1}{1.522 - 1.513}$$

= 57.3

จากการทดลองหาค่าวีของแก้วนี้ ทำให้สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดรรชนีหักเหของแก้วกับความยาวคลื่นของคลื่นแสงจากข้อมูลตามตารางที่ 4.5 ได้กราฟดังรูปที่ 4.1

ความยาวคลื่นของคลื่นแสง (นาโนเมตร)	ค่าดรรชนีหักเหของแก้ว
486	1.522
589	1.516
656	1.513

ตารางที่ 4.5 ผลการหาค่าดรรชนีหักเหของแก้วเมื่อใช้แสงสีต่าง ๆ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดรรชนีหักเหของแก้ว
กับความยาวคลื่นของคลื่นแสง

2. การคำนวณหารูปร่างของเลนส์

นำแผ่นแก้วที่หาดัชนีหักเหไว้แล้วนี้มาสร้างเลนส์เพื่อจะใช้เป็นเลนส์หน้ากล้อง ของกล้องโทรทรรศน์ โดยต้องการให้ทางยาวโฟกัสของเลนส์เป็น 200 เซนติเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และเลนส์นี้จะเป็นเลนส์เดี่ยวที่มีความคลาดทรงกลมน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และมีโคมาเป็นศูนย์

ในการออกแบบเลนส์จะต้องสมมติค่ารัศมีความโค้งของผิวหนึ่งของเลนส์ขึ้น รัศมีความโค้งของอีกผิวหนึ่งจะคำนวณได้จากสมการ (2.8) โดยที่ทราบว่าทางยาวโฟกัสของเลนส์เป็น 200 เซนติเมตร แล้วอาศัยวิธีการติดตามรังสี 2 รังสีดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2 ของบทที่ 3 จะทำให้ทราบค่าความคลาดทรงกลมและค่าโคมาได้ ต่อมาเปลี่ยนแปลงเลนส์ให้มีรูปร่างต่าง ๆ กัน โดยยังคงมีทางยาวโฟกัสเท่ากับ 200 เซนติเมตรอยู่ตลอดเวลา คำนวณหาความคลาดของเลนส์รูปร่างต่าง ๆ กันเหล่านี้ เพื่อหารูปร่างที่จะให้ผลตามที่ต้องการ ดังตัวอย่างที่แสดงข้างล่าง

เริ่มโดยการสมมติให้ผิวโค้งที่ 2 ของเลนส์เดี่ยวเป็นผิวเรียบ คือ $c_2 = o$

จากสูตรของเลนส์บางในอากาศ $\frac{1}{f} = (n-1)(c_1 - c_2)$ (4.4)

f เป็น ทางยาวโฟกัสของเลนส์เดี่ยว = 200 เซนติเมตร

n เป็น ดรรชนีหักเหของแก้วในแสงสีเหลือง = 1.516

แทนค่า f, n, c_2 ลงในสมการที่ (4.4)

$$\frac{1}{200} = (1.516 - 1)(c_1 - o)$$

$$c_1 = 0.00968992 \text{ ซม.}^{-1}$$

ในที่นี้จะคำนวณโดยใช้ทศนิยม 8 ตำแหน่ง โดยไม่คำนึงถึงเลขนัยสำคัญแต่อย่างใด และจะปัดตัวเลขตามหลักการเขียนเลขนัยสำคัญ เมื่อถึงคำตอบแล้วเท่านั้น

เมื่อทราบค่า c_1, c_2 แล้ว ก็นำไปคำนวณหาค่าความคลาดของเลนส์เดี่ยวได้โดยวิธีการติดตามรังสี รังสีแรกที่ติดตาม ก็คือ รังสีใกล้แกนมุขสำคัญ เนื่องจากกล้องโทรทรรศน์ใช้กับวัตถุไกลซึ่งให้แสงขนานเข้าทางซ้ายของเลนส์

นั่นคือ $u_1 = 0$ เรเดียน

และ $h_1 = 5$ ซม.

จาก $\alpha_1 = h_1 c_1$ (4.5)

$= 5 \times 0.00968992$ เรเดียน

$\alpha_1 = 0.04844960$ เรเดียน

จาก $A_1 = n_1 (\alpha_1 - u_1)$ (4.6)

n_1 ในที่นี้คือ ดรรชนีหักเหของอากาศ $= 1$

$A_1 = 1 \times (0.04844960 - 0)$ เรเดียน

$= 0.04844960$ เรเดียน

จาก $u_1' = \alpha_1 - \frac{A_1}{n_1'}$ (4.7)

n_1' ในที่นี้คือ ดรรชนีหักเหของแก้ว $= 1.516$

$u_1' = 0.04844960 - \frac{0.04844960}{1.516}$ เรเดียน

$= 0.01649076$ เรเดียน

จาก $h_2 = h_1 - du_1'$ (4.8)

d คือ ระยะระหว่างผิวโค้งที่ 1 กับผิวโค้งที่ 2 $= 1$ เซนติเมตร

$h_2 = 5 - 1 \times 0.01649076$ เซนติเมตร

$= 4.98350924$ เซนติเมตร

จาก $\alpha_2 = h_2 c_2$ (4.9)

$= 4.98350924 \times 0$ เรเดียน

$= 0$ เรเดียน

จาก $A_2 = n_2 (\alpha_2 - u_2)$ (4.10)

$= 1.516 \times (0. - 0.01649076)$ เรเดียน

$= - 0.02499999$ เรเดียน

จาก $u'_2 = \alpha_2 - \frac{A_2}{n'_2}$ (4.11)

n'_2 ในที่นี้คือ ดรรชนีหักเหของอากาศ $= 1$

$u'_2 = 0 - \frac{(-0.02499999)}{1}$ เรเดียน

$= 0.02499999$ เรเดียน

จาก $\Delta_1(\frac{u}{n}) = \frac{u'_1}{n'_1} - \frac{u_1}{n_1}$ (4.12)

$= \frac{0.01649076}{1.516} - 0$ เรเดียน

$= 0.01087781$ เรเดียน

จาก $\Delta_2(\frac{u}{n}) = \frac{u'_2}{n'_2} - \frac{u_2}{n_2}$ (4.13)

$= \frac{0.02499999}{1} - \frac{0.01649076}{1.516}$ เรเดียน

$= 0.01412218$ เรเดียน

จาก $S_I = \sum_1^k A^2 h \Delta(\frac{u}{n})$ (4.14)

ในที่นี้ เป็นเลนส์เดี่ยวมี 2 ผิว $k = 2$

$$S_{I_1} = A_1^2 h_1 \Delta_1 \left(\frac{u}{n}\right)$$

$$= (0.04844960)^2 (5) (0.01087781) \text{ เซนติเมตร}$$

$$= 0.00012767 \text{ เซนติเมตร}$$

$$S_{I_2} = A_2^2 h_2 \Delta_2 \left(\frac{u}{n}\right)$$

$$= (-0.02499999)^2 (4.98350924) (0.01412218)$$

$$= 0.00004398 \text{ เซนติเมตร}$$

จากสมการที่ (4.14) ได้ว่า

$$S_I = S_{I_1} + S_{I_2}$$

$$= 0.00012767 + 0.00004398 \text{ เซนติเมตร}$$

$$= 0.00017165 \text{ เซนติเมตร}$$

จาก $O^W_{40} = \frac{1}{8} S_1$ (4.15)

$$= \frac{1}{8} \times 0.00017165 \text{ เซนติเมตร}$$

เพราะฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลม = 0.00002146 เซนติเมตร

จากการติดตามรังสีใกล้แกนมุขสำคัญ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลม ต่อไปจะติดตามรังสีมุขสำคัญ เพื่อหาค่าโคมาของเลนส์

ให้ตัวจำกัดแสงแบบสนาม (field stop) มีเส้นผ่าศูนย์กลาง = 2 เซนติเมตร

ดังนั้น รังสีมุขสำคัญจะทำมุมชัน, $\bar{u}_1 = \frac{\text{รัศมีของตัวจำกัดแสงแบบสนาม}}{\text{ทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้ากล้อง}}$

$$= \frac{1}{200} \text{ เรเดียน}$$

$= 0.005$ เรเดียน

ให้รังสีมาจากวัตถุที่อยู่ใต้แกนมุขสำคัญ นั่นคือ

$$\bar{u}_1 = -0.005 \text{ เรเดียน}$$

จาก $$\bar{\alpha}_1 = \bar{h}_1 c_1 \qquad (4.16)$$

รังสีมุขสำคัญเป็นรังสีที่ผ่านจุดกลางเลนส์ นั่นคือ $\bar{h}_1 = 0$ เซนติเมตร

เพราะฉะนั้น $\bar{\alpha}_1 = 0$ เรเดียน

จาก $$B_1 = n_1 (\bar{\alpha}_1 - \bar{u}_1) \qquad (4.17)$$

$$= 1 \times (0 + 0.005) \text{ เรเดียน}$$

$$= 0.005 \text{ เรเดียน}$$

จาก $$\bar{u}'_1 = \bar{\alpha}_1 - \frac{B_1}{n'_1} \qquad (4.18)$$

$$= 0 - \frac{0.005}{1.516} \text{ เรเดียน}$$

$$= -0.00329815 \text{ เรเดียน}$$

จาก $$\bar{h}_2 = \bar{h}_1 - d\bar{u}'_1 \qquad (4.19)$$

$$= 0 - 1 \times (-0.00329815) \text{ เซนติเมตร}$$

$$= 0.00329815 \text{ เซนติเมตร}$$

จาก $$\bar{\alpha}_2 = \bar{h}_2 c_2 \qquad (4.20)$$

$= 0.00329815 \times 0$ เรเดียน

$= 0$ เรเดียน

จาก $B_2 = n_2 (\bar{\alpha}_2 - \bar{u}_2)$ (4.21)

$= 1.516(0 + 0.00329815)$ เรเดียน

$= 0.00499999$ เรเดียน

จาก $\bar{u}'_2 = \bar{\alpha}_2 - \frac{B_2}{n_2}$ (4.22)

$= 0 - \frac{0.00499999}{1}$ เรเดียน

$= -0.00499999$ เรเดียน

จาก $S_{II} = \sum_{1}^{k} A\ B\ h\ \Delta(\frac{u}{n})$ (4.23)

ในที่นี้ เป็นเลนส์เดี่ยวมี 2 ผิว $k = 2$

$S_{II_1} = A_1\ B_1\ h_1\ \Delta_1(\frac{u}{n})$

$= (0.04844960)(0.005)(5)(0.01087781)$

$= 0.00001318$ เซนติเมตร

$S_{II_2} = A_2\ B_2\ h_2\ \Delta_2\ (\frac{u}{n})$

$= (-0.0.2499999)(0.00499999)(4.98350924)$

(0.01412218) เซนติเมตร

$= -0.0000088$ เซนติเมตร

จากสมการ (4.23) ได้ว่า $S_{II} = S_{II_1} + S_{II_2}$

$= 0.00001318 - 0.00000880$ เซนติเมตร

$= 0.0000043$ เซนติเมตร

$$_1W_{31} = \frac{1}{2} S_{II} \qquad (4.24)$$

$$= \frac{1}{2} \times 0.00000438 \quad \text{เซนติเมตร}$$

เพราะฉะนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ของโคมา = 0.00000219 เซนติเมตร

ในการคำนวณความคลาดนี้ เพื่อความสะดวกและทำให้ง่ายยิ่งขึ้น นิยมทำเป็นตารางที่บันทึกค่าต่าง ๆ เป็นขั้น ๆ ไป ดังตารางที่ 4.6

ค่าที่ได้นี้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลม และโคมาของเลนส์ที่มีรูปร่างหนึ่งเท่านั้น เมื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเลนส์ไป ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มหรือลดค่า α ด้วยปริมาณเท่า ๆ กัน จะมีผลทำให้รูปร่างของเลนส์เปลี่ยนไป โดยยังคงให้ทางยาวโฟกัสเป็น 200 เซนติเมตร แต่ละครั้งที่เปลี่ยนรูปร่างของเลนส์คำนวณหาความคลาดตามแบบที่แสดงในตารางที่ 4.6 จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.7 ค่า q ในตารางคือ ค่าตัวประกอบของรูปร่างของเลนส์เดี่ยวที่คำนวณจากสมการที่ (3.46)

d_{12}	n_1 $n_1' = n_2$ n_2'	c_1 c_2	α_1 α_2	A_1 A_2	u_1 $u_1' = u_2$ u_2'	h_1 h_2
	1.000	0.00968992	0.04844960	0.04844960	0	5
1	1.516				0.01649076	
	1.000	0	0	-0.02499999	0.02499999	4.98350924

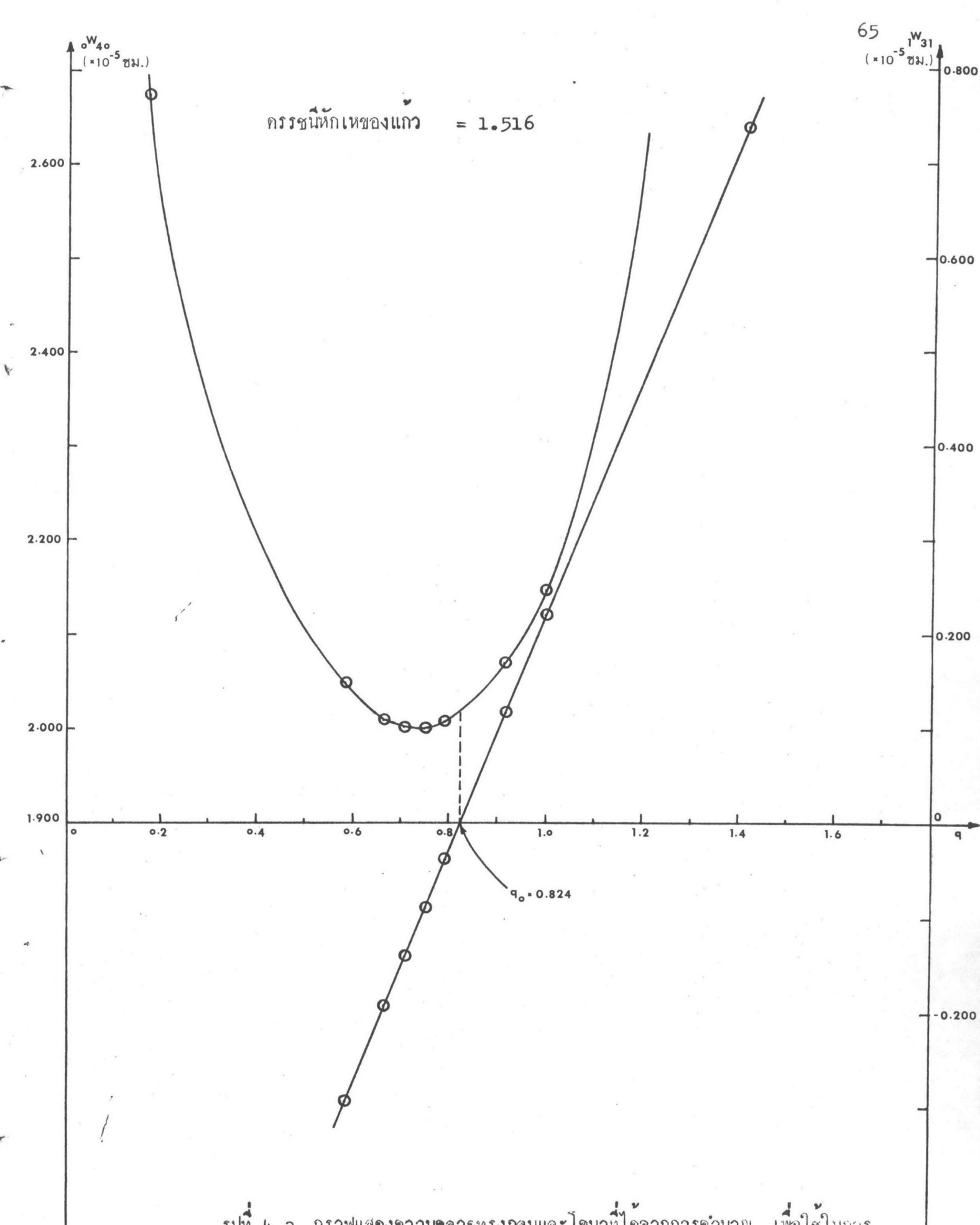
Δ_1 $\frac{u_1'}{n_1'}$ Δ_2	$\bar{\alpha}_1$ $\bar{\alpha}_2$	B_1 B_2	$\bar{u}_1$ $\bar{u}_1' = \bar{u}_2$ $\bar{u}_2'$	$\bar{h}_1$ $\bar{h}_2$	S_{I_1} S_{I_2}	S_{II_1} S_{II_2}
0.01087781	0	0.005	-0.005	0	0.00012767	0.00001318
0.01087781			-0.00329815			
0.01412218	0	0.00499999	-0.00499999	0.00329815	0.00004398	-0.00000880
					0.00017165	0.00000438

ตารางที่ 4.6 การคำนวณหาค่าความคลาดทรงกลมและโคมาของเลนส์เดี่ยว

r_1 (เซนติเมตร)	r_2 (เซนติเมตร)	$q = \frac{r_2+r_1}{r_2-r_1}$	${}_0W_{40}$ (เซนติเมตร)	${}_1W_{31}$ (เซนติเมตร)
175.7	-249.5	0.174	2.674×10^{-5}	-0.814×10^{-5}
130.0	-498.7	0.586	2.047×10^{-5}	-0.298×10^{-5}
123.6	-623.3	0.669	2.009×10^{-5}	-0.195×10^{-5}
120.6	-712.3	0.710	2.001×10^{-5}	-0.143×10^{-5}
117.8	-830.9	0.752	2.000×10^{-5}	-0.092×10^{-5}
115.1	-997.0	0.793	2.006×10^{-5}	-0.040×10^{-5}
113.5	-1133.	0.818	2.013×10^{-5}	-0.009×10^{-5}
113.3	-1159.	0.822	2.015×10^{-5}	-0.004×10^{-5}
113.0	-1187.	0.826	2.016×10^{-5}	0.002×10^{-5}
112.7	-1216.	0.830	2.018×10^{-5}	0.007×10^{-5}
112.5	-1246.	0.834	2.020×10^{-5}	0.012×10^{-5}
107.6	-2492.	0.917	2.068×10^{-5}	0.116×10^{-5}
103.2	∞	1.000	2.146×10^{-5}	0.220×10^{-5}
85.54	498.0	1.415	2.968×10^{-5}	0.737×10^{-5}
73.05	248.8	1.831	4.515×10^{-5}	1.255×10^{-5}
63.74	165.8	2.249	6.786×10^{-5}	1.773×10^{-5}

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณค่าความคลาดทรงกลมและโคมาของเลนส์เดี่ยวที่สร้างจากแก้วที่มีดรรชนีหัก เห = 1.516

นำผลจากตารางที่ 4.7 นี้ มาเขียนกราฟระหว่างค่า q กับค่า ${}_0W_{40}$ และ ${}_1W_{31}$ ได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความคลาดทรงกลมและโคมาที่ได้จากการคำนวณ เพื่อใช้ในการ

จากกราฟรูปที่ 4.2 ได้ค่า $q_o = 0.824$ ที่ตำแหน่งนี้ ค่าโคมาเท่ากับศูนย์ และความคลาดทรงกลมมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นตำแหน่งนี้จึงเป็นตำแหน่งที่จะให้รูปร่างของเลนส์ที่น่าพอใจที่สุด นำค่า q_o มาคำนวณหารัศมีความโค้งแต่ละผิวของเลนส์ได้

จาก
$$r_1 = \frac{2f(n_2 - 1)}{q_o + 1} \qquad (4.25)$$
$$= \frac{2 \times 200 \times (1.516 - 1)}{0.824 + 1} \text{ เซนติเมตร}$$
$$= 113.2. \text{ เซนติเมตร}$$

จาก
$$r_2 = \frac{2f(n_2 - 1)}{q_o - 1} \qquad (4.26)$$
$$= \frac{2 \times 200 \times (1.516-1)}{0.824 - 1} \text{ เซนติเมตร}$$
$$= -1173. \text{ เซนติเมตร}$$

ค่า r_1 และ r_2 ที่คำนวณได้นี้เป็นรัศมีความโค้งของผิวโค้งทั้ง 2 ของเลนส์ที่ต้องการสร้าง

3. <u>การฝนและขัดใสเลนส์</u>[1],[8]

ขณะนี้เราทราบรูปร่างของเลนส์ที่ต้องการแล้ว เลนส์นี้จะต้องเป็นเลนส์เกี่ยวที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ทางยาวโฟกัส 200 เซนติเมตร แผ่นแก้วที่จะนำมาใช้ทำเลนส์นี้ มีความหนาประมาณ 1.5 เซนติเมตร ตัดแผ่นแก้วให้เป็นแผ่นวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร 2 แผ่น โดยใช้แผ่นเหล็กบาง ๆ ทำเป็นทรงกระบอกให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 10 เซนติเมตร ตัดปลายหนึ่งของเหล็กทรงกระบอกนี้ให้เป็นร่องแบบฟันเลื่อย แล้วติดอีกปลายหนึ่งไว้กับเครื่องหมุนในระหว่างที่หมุนแท่งทรงกระบอกนี้ ค่อย ๆ เติมกากเพชรอย่างหยาบกับน้ำไปในระหว่างแผ่นแก้วกับปลายฟันเลื่อยของแท่งทรงกระบอก ฟันเลื่อยนี้ จะค่อย ๆ ตัดลงไปในเนื้อแก้ว จนกระทั่งได้แผ่นแก้ววงกลมหลุดออกจากแผ่นแก้ว

เมื่อได้แผ่นแก้ววงกลม 2 แผ่นแล้ว นำแผ่นแก้วแผ่นหนึ่งวางบนแท่นสำหรับฝนเลนส์ ยึดให้ติดแน่นกับแท่น โดยใช้แผ่นไม้ 3 แผ่นวางประกบแผ่นแก้วนั้น วางแผ่นแก้วอีกแผ่นหนึ่งไว้ข้างบน แล้วเริ่มฝนแผ่นแก้วทั้งสองด้วยกันโดยมือ แผ่นแก้วแผ่นบนเท่านั้นที่มีการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่นี้มีอยู่ 3 ทิศทางคือ

1. ฝนไปข้างหน้าและถอยมาข้างหลัง ในแนวเส้นตรงเดียวกัน 1 ครั้ง เรียกว่า 1 สโตรก (stroke)
2. หมุนแผ่นแก้วแผ่นบน
3. ผู้ฝนเดินวนรอบแท่นสำหรับฝน

ขณะที่เคลื่อนแผ่นแก้วแผ่นบนนี้ จะต้องคอยใส่กากเพชรและน้ำไว้ระหว่างแผ่นแก้วทั้งสองด้วย กากเพชรที่ใช้ในการฝนมีทั้งหมด 6 ขนาดคือ ขนาดเบอร์ 70, 120, 220, 320, 400, 1000 (ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.6 มิลลิเมตร จนถึง 0.02 มิลลิเมตร) เบอร์ 70 เป็นกากเพชรที่มีขนาดหยาบที่สุด เบอร์ 1000 เป็นเบอร์ที่มีขนาดละเอียดที่สุดในหกเบอร์นี้ เริ่มใช้จากเบอร์ 70 ก่อน ฝนในทิศทางเดียวกัน 10 สโตรก และเพื่อให้ผิวที่ได้มีความโค้งสม่ำเสมอกัน นิยมใช้สโตรกสั้น ๆ ขนาด $\frac{1}{3}$ สโตรก เช่น แผ่นแก้วมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ก็จะฝนให้ขอบของแก้วแผ่นบนพ้นจากขอบของแก้วแผ่นล่างออกไป 1 นิ้ว ในการฝนแบบนี้จะทำให้กากเพชรกลิ้งไปมาในระหว่างแผ่นแก้วทั้งสอง กากเพชรจะเจาะเนื้อแก้วทั้งสองแผ่นให้หลุดออกมาเนื่องจากแรงที่ผู้ฝนกดลงบนแก้วแผ่นบน ทำให้เกิดหลุมขึ้นบนผิวแก้วทั้งสองมากมาย และความลึกของหลุมขึ้นอยู่กับขนาดของกากเพชร เมื่อฝนไป 10 สโตรกแล้ว ก็หมุนแก้วแผ่นบนไปประมาณ 10-20 องศา และในขณะเดียวกันผู้ฝนจะต้องขยับเปลี่ยนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามกับที่หมุนแผ่นแก้วไปประมาณ 20-30 องศา คือ ถ้าหมุนแผ่นแก้วไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ผู้ฝนจะเดินไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา แล้วก็ฝนในตำแหน่งนั้น 10 สโตรก จากนั้นก็หมุนแผ่นแก้วไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาประมาณ 10-20 องศา และผู้ฝนก็เปลี่ยนที่ไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ประมาณ 20-30 องศา แล้วฝนแผ่นแก้ว 10 สโตรก ทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ซึ่งจากการฝนใน 3 ทิศทางแบบนี้ จะทำ

ให้ได้เลนส์ที่มีความโค้งสม่ำเสมอเท่ากันทุกทิศทุกทาง ผิวทั้งสองที่ขัดสีกันนั้น ผิวของแผ่นบนจะเป็นผิวเว้า ผิวของแผ่นล่างจะเป็นผิวนูน ต้องคอยตรวจสอบรัศมีความโค้งของผิวโค้งที่ได้โดยใช้สเฟียโรมิเตอร์ ใช้กากเพชรเบอร์ 70 จนกระทั่งได้ผิวที่โค้งเกือบเท่ากับที่ต้องการ จึงเปลี่ยนกากเพชรเป็นเบอร์ 120 ก่อนที่จะเปลี่ยนจะต้องล้างแท่นฝน และแผ่นแก้วทั้งสองให้สะอาด ไม่ให้มีกากเพชรเบอร์ 70 หลงเหลืออยู่เลย เพราะว่าการเปลี่ยนกากเพชรเป็นเบอร์ที่มีขนาดละเอียดขึ้นนี้ ก็เพื่อที่จะลดขนาดความลึกของหลุมที่เกิดขึ้นบนผิวแก้ว ถ้ามีกากเพชรเบอร์ 70 หลงเหลืออยู่ จะทำให้เกิดหลุมที่ลึกและใหญ่เท่าขนาดของกากเพชรเบอร์ 70 ปนอยู่กับหลุมที่เล็กลง เมื่อถึงตอนขัดใส จะได้ผิวแก้วที่ไม่เรียบ มีรอยขีดข่วน หรือเป็นหลุมเกิดขึ้นในเนื้อแก้ว ทำให้คุณภาพของเลนส์เสื่อมไป ในการใช้กากเพชรเบอร์อื่น ๆ ก็ทำเช่นเดียวกับที่ใช้เบอร์ 70 และการใช้กากเพชรแต่ละเบอร์นั้น ต้องฝนจนกระทั่งหลุมที่เกิดขึ้นบนผิวแก้วมีขนาดเท่ากัน ซึ่งจะเห็นได้โดยใช้แว่นขยาย การเปลี่ยนกากเพชรก็เปลี่ยนตามลำดับจนถึงเบอร์สูงสุดโดยไม่ลืมที่จะทำความสะอาดแท่นฝนและแผ่นแก้วทั้งสองทุกครั้ง และไม่ควรจะไปแตะต้องผิวแก้วด้วย เพราะมือจะสกปรก ซึ่งมีผลทำให้ผิวแก้วเป็นรอยขีดข่วนขึ้นได้

ในระหว่างการฝนด้วยกากเพชรขนาดต่าง ๆ กันนี้ ถ้าพบว่าแผ่นล่างมีความโค้งนูนมากกว่าที่ต้องการ จะต้องแก้ไขโดยการสลับที่กัน โดยเอาแผ่นบนมาวางข้างล่าง และเอาแผ่นล่างไปวางประกบข้างบนแทน เมื่อฝนผิวแรกได้รัศมีความโค้งเท่ากับที่ต้องการแล้ว ก็จะต้องฝนผิวที่สอง แต่ก่อนที่จะฝนผิวที่สองจะต้องนำแก้วด้านที่ฝนแล้วนี้ไปเคลือบด้วยเทียน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรอยขีดข่วนขึ้นในระหว่างการฝนอีกหน้าหนึ่ง ในการเคลือบด้วยเทียนนี้จะหลอมเทียนให้ละลาย แล้วเอากระดาษแข็งขดรอบแผ่นแก้ว นำเทียนที่หลอมเหลวแล้วมาเทลงบนผิวแก้วด้านที่ฝนไว้นั้น ปล่อยทิ้งไว้ให้เทียนแข็ง เอากระดาษออก แล้วนำแผ่นแก้วนั้นมาวางบนแท่นโดยเอาด้านที่เคลือบเทียนไว้วางติดกับแท่นฝน จากนั้นก็เริ่มต้นฝนแบบเดียวกันกับผิวแรกโดยให้มีรัศมีความโค้งเท่าที่คำนวณไว้

เมื่อฝนเลนส์ได้ตามต้องการแล้ว ผิวทั้งสองจะมีลักษณะขุ่นมัวคล้าย ๆ กระจกฝ้า จึงต้องนำเลนส์ที่ฝนได้แล้วนี้มาขัดใส การขัดใสเป็นการทำให้แผ่นแก้วเกิดความร้อน เพื่อ

ที่จะหลอมผิวแก้วส่วนที่เกินออกมาให้ละลายลงไปปิดหลุมที่เกิดขึ้นบนผิวแก้ว อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการขัดใสก็คือ พิช (pitch) ซึ่งเป็นยางมะตอยบริสุทธิ์ผสมกับน้ำมันสนด้วยปริมาณที่พอเหมาะ เพื่อให้มีความหนืดและความอ่อนนุ่ม ที่เหมาะสม กับมีการไหลได้เล็กน้อยภายใต้อุณหภูมิห้อง ในการทำแผ่นพิช (pitch lap) จะต้องหาฐานวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 10 เซนติเมตร นำกระดาษชุบน้ำให้เปียกขดรอบฐานวงกลม แล้วนำพิชที่หลอมเหลวอยู่มาเทลงบนฐานวงกลม ปล่อยทิ้งไว้จนเกือบแข็ง เอากระดาษออก แล้วนำมาเจาะร่องเป็นรูปแบบรังผึ้ง เพื่อที่จะได้ช่วยกักน้ำและผงขัดไว้ในระหว่างการขัดใส ก่อนที่จะลงมือขัดใส จะต้องทำให้ผิวแก้วและผิวของแผ่นพิชสัมผัสกันตลอด เพื่อที่ผิวแก้วจะได้ใสพร้อม ๆ กันทั่วทั้งแผ่น โดยการเอาแผ่นพิชไปแช่น้ำอุ่น ทำให้พิชมีการหลอมตัวได้เล็กน้อย แล้วเอาแผ่นแก้ววางประกบทับแผ่นพิช กดให้ผิวแก้วและผิวของพิชสัมผัสกันตลอดทั่วทั้งแผ่น นั่นคือ จะได้แผ่นพิชเป็นผิวเว้าที่มีร่องเจาะเป็นรูปรังผึ้ง

ในการขัดใส จะใช้ผงขัดที่เรียกว่า รูจ (rouge) ซึ่งเป็นออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.005 มิลลิเมตร นำเลนส์ที่จะขัดใสมาวางบนแท่น โดยให้ด้านที่เคลือบเทียนไว้อยู่ติดกับแท่น หงายด้านผิวแก้วที่ขัดใสขึ้น ใส่รูจและน้ำลงบนผิวแก้ว แล้ววางแผ่นพิชประกบบนแผ่นแก้วโดยที่ผิวแก้วและผิวของพิชจะต้องสัมผัสกันพอดี แล้วใช้วิธีขัดแบบ 3 ทิศทาง เช่นเดียวกับวิธีฝน ขัดจนกระทั่งหลุมถูกปิดด้วยผิวแก้วส่วนเกินหมดทุกหลุม ก็จะได้ผิวแก้วที่ใส จากนั้นเคลือบผิวแก้วด้านใสด้วยเทียน แล้วขัดผิวที่สองด้วยวิธีการเดียวกับผิวแรก ก็จะได้เลนส์หน้ากล้องแบบเลนส์เดี่ยวตามที่ต้องการ

4. สรุป

จากการทดลองในบทนี้ ถ้าการฝนและการขัดใสเป็นไปอย่างถูกต้อง เลนส์ที่ได้ออกมาจะมีสมบัติดังนี้

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง	=	10	เซนติเมตร
ทางยาวโฟกัส	=	200	เซนติเมตร
รัศมีความโค้งของผิวแรก	=	+113.2	เซนติเมตร

รัศมีความโค้งของผิวหลัง = -117 3 เซนติเมตร

ค่าสัมประสิทธิ์ของโคมา = 0 เซนติเมตร

ค่าสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมที่พิจารณาแบบความคลาดเชิงหน้าคลื่น

= 2.62×10^{-5} เซนติเมตร