บทที่ 1

บทนำ

1. <u>เลนส์หนา</u>

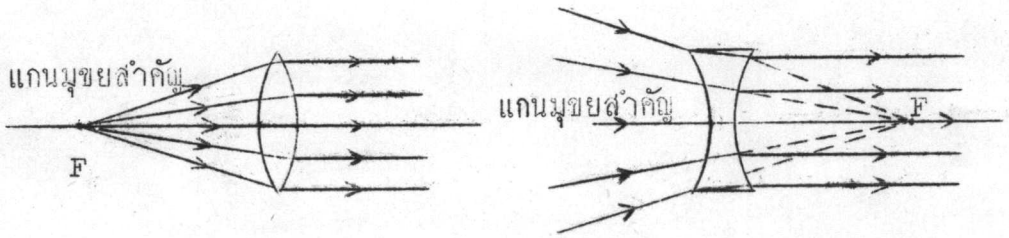
เลนส์เป็นทัศนอุปกรณ์ชนิดหนึ่งซึ่งมีสมบัติในการหักเหแสงและก่อให้เกิดภาพ มีลักษณะเป็นตัวกลางโปร่งใส และผิวทั้งสองเป็นส่วนหนึ่งของผิวทรงกลมที่มีแกนร่วมกัน โดยทั่วไปแบ่งเลนส์ออกเป็นสองประเภทด้วยกัน ได้แก่ เลนส์บาง (thin lens) และเลนส์หนา (thick lens) เลนส์บางคือ เลนส์ที่มีระยะระหว่างขั้วน้อยเมื่อเทียบกับระยะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมบัติในทางทัศนศาสตร์ของเลนส์ ซึ่งได้แก่รัศมีความโค้งของผิวทั้งสอง ทางยาวโฟกัส ระยะวัตถุและระยะภาพ แต่เมื่อระยะระหว่างขั้วของเลนส์มีค่ามากขึ้น ต้องคิดเป็นเลนส์หนา

เมื่อกล่าวถึงเลนส์หนาไม่ได้หมายถึงเฉพาะเลนส์เดี่ยวที่ผิวทั้งสองของเลนส์แยกห่างจากกันมาก แต่จะรวมถึงระบบของเลนส์ที่มีแกนร่วมกันเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน เช่น ระบบเลนส์หน้าของกล้องถ่ายรูป เป็นต้น

เลนส์หนาอันหนึ่ง ๆ มีจุดสำคัญอยู่ด้วยกัน 6 จุด ซึ่งเรียกว่าจุดคาร์ดินัล (cardinal points) ทั้ง 6 จุดนี้อยู่บนแกนมุขยสำคัญ (principal axis) ของเลนส์

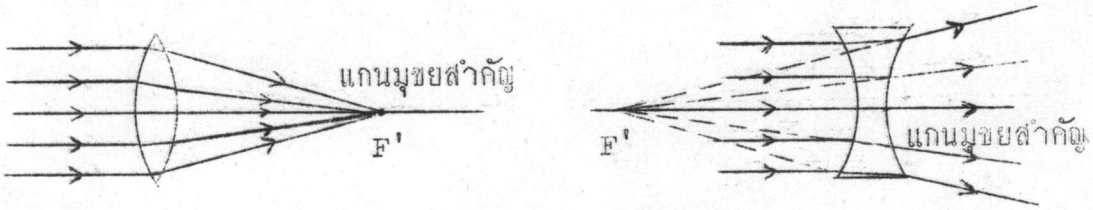
1.1 <u>จุดโฟกัส</u> (1) (focal points) เลนส์แต่ละอันมีจุดโฟกัส 2 จุด คือ จุดโฟกัสปฐมภูมิ (primary focal point) และจุดโฟกัสทุติยภูมิ (secondary focal point)

1.1.1 <u>จุดโฟกัสปฐมภูมิ</u> เป็นจุดที่เมื่อรังสีใด ๆ ที่ออกจากหรือเสมือนว่าพุ่งเข้าสู่จุดนี้ หลังจากหักเหผ่านเลนส์จะเป็นรังสีที่ขนานกับแกนมุขยสำคัญ ดังรูปที่ 1.1 จุด F คือ จุดโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์



รูปที่ 1.1 จุดโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์นูนและเลนส์เว้า (F)

1.1.2 <u>จุดโฟกัสทุติยภูมิ</u> เป็นจุดที่เมื่อรังสีใด ๆ ที่ขนานกับแกนมุขยสำคัญตกกระทบผ่านเลนส์แล้วจะหักเหเข้าสู่จุดนี้ หรือเสมือนหนึ่งว่าได้หักเหออกจากจุดนี้ ดังรูปที่ 1.2 จุด F' ก็คือ จุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์



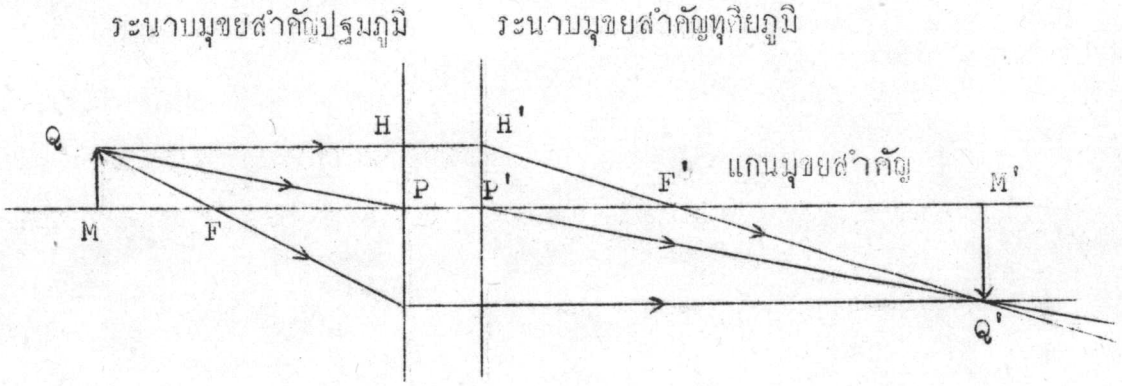
รูปที่ 1.2 จุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์นูนและเลนส์เว้า (F')

1.2 <u>จุดมุขยสำคัญ</u> [1] (principal points) มี 2 จุดคือ จุดมุขยสำคัญปฐมภูมิ (primary principal point) และจุดมุขยสำคัญทุติยภูมิ (secondary principal point)

1.2.1 <u>จุดมุขยสำคัญปฐมภูมิ</u> เป็นจุดที่เกิดจากการตัดของระนาบมุขยสำคัญปฐมภูมิ (primary principal plane) กับแกนมุขยสำคัญ ดังรูปที่ 1.3 จุด P คือ จุดมุขยสำคัญปฐมภูมิ

1.2.2 <u>จุดมุขยสำคัญทุติยภูมิ</u> เป็นจุดที่เกิดจากการตัดของระนาบมุขยสำคัญทุติยภูมิ (secondary principal plane) กับแกนมุขยสำคัญ ดังรูปที่ 1.3 จุด P' คือจุดมุขยสำคัญทุติยภูมิ

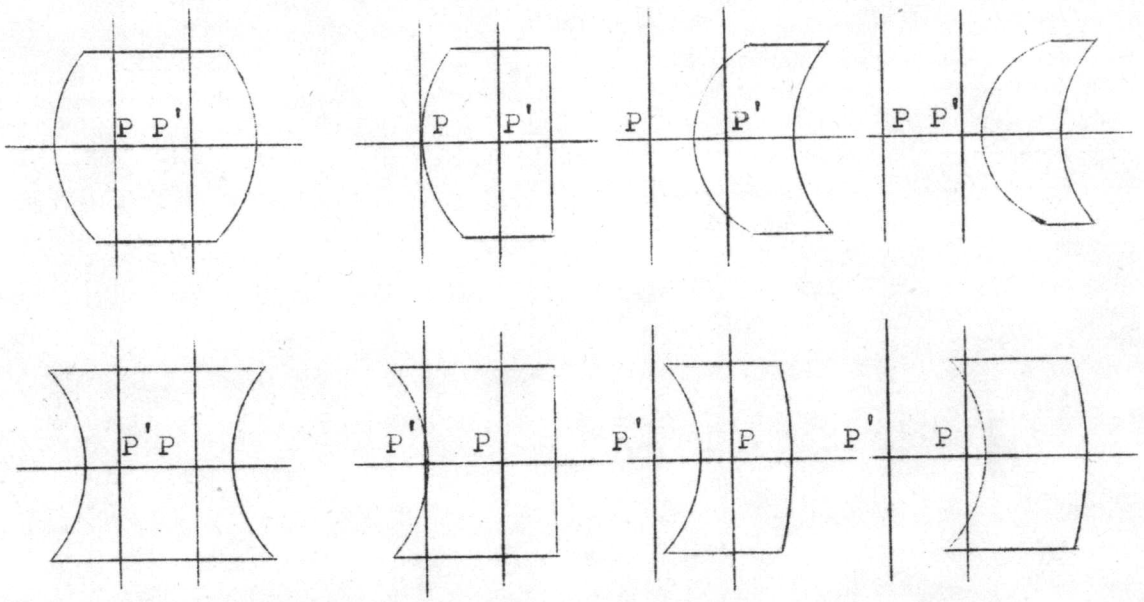
ระนาบมุขยสำคัญปฐมภูมิ และระนาบมุขยสำคัญทุติยภูมิ มักเรียกสั้น ๆ ว่า ระนาบมุขยสำคัญ (principal planes) ซึ่งเป็นระนาบที่ตั้งได้ฉากกับแกนมุขยสำคัญ



รูปที่ 1.3 ระนาบมุขยสำคัญปฐมภูมิและระนาบมุขยสำคัญทุติยภูมิ (HP และ H'P')

และมีกำลังขยายเชิงเส้นแนวตั้ง (transverse magnification) เท่ากับ 1 หน่วย หมายความว่า เมื่อมีรังสีมาตกกระทบกับระนาบมุขยสำคัญปฐมภูมิ จะผ่านขนานกับแกนมุขยสำคัญไปยังระนาบมุขยสำคัญทุติยภูมิเสมอ ระนาบมุขยสำคัญของเลนส์หนาไม่จำเป็

ต้องอยู่ภายในเลนส์อาจจะอยู่ภายนอกเลนส์ก็ได้ ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเลนส์ (2) ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 ตำแหน่งของระนาบมุขยสำคัญขึ้นกับรูปร่างของเลนส์หนา

ทางยาวโฟกัสของเลนส์เป็นระยะระหว่างจุดมุขยสำคัญ กับจุดโฟกัสที่สอดคล้องกัน ดังนั้น สำหรับเลนส์หนา ระยะระหว่างจุดมุขยสำคัญปฐมภูมิกับจุดโฟกัสปฐมภูมิ เรียกว่า ทางยาวโฟกัสยังผลปฐมภูมิ (primary effective focal length) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า ทางยาวโฟกัสปฐมภูมิ และระยะระหว่างจุดมุขยสำคัญทุติยภูมิกับจุดโฟกัสทุติยภูมิ เรียกว่าทางยาวโฟกัสยังผลทุติยภูมิ (secondary effective focal length) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า ทางยาวโฟกัสทุติยภูมิ สำหรับระยะระหว่างขั้วของผิวหน้าของเลนส์กับจุดโฟกัสปฐมภูมิ เรียกว่า ทางยาวโฟกัสหน้า (front focal length) และระยะระหว่างขั้วของผิวหลังของเลนส์กับจุดโฟกัสทุติยภูมิ เรียกว่า ทางยาวโฟกัสหลัง (back focal length)

ในกรณีที่ตัวกลางซึ่งอยู่ทั้งสองด้านของเลนส์มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน ทางยาวโฟกัสทั้งสองของเลนส์อันนั้นจะไม่เท่ากันด้วย (2) ดังความสัมพันธ์ดังนี้

$$-\frac{f}{f'} = +\frac{n}{n'} \qquad (1.1)$$

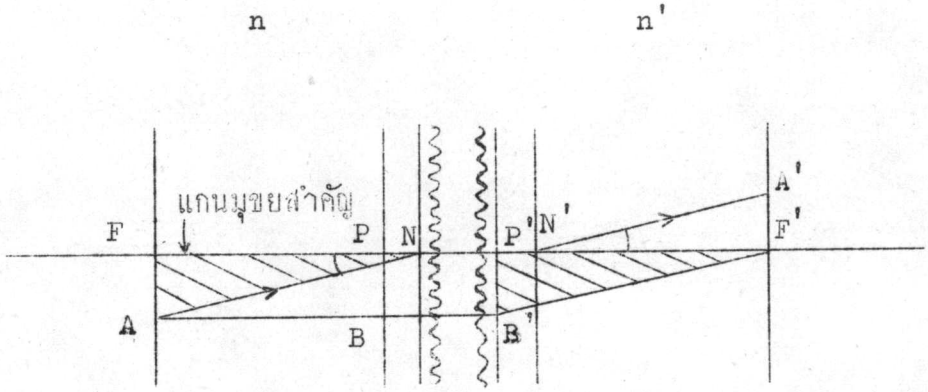
เมื่อ f = ทางยาวโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์

f' = ทางยาวโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์

n = ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางทางด้านหน้าของเลนส์

n' = ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางทางด้านหลังของเลนส์

1.3 จุดโนดัล [2] (nodal points) เป็นจุดสังยุค 2 จุด ที่อยู่บนแกนมุขยสำคัญ ถ้ามีรังสีตกกระทบ หรือส่วนต่อของรังสีตกกระทบผ่านจุดโนดัลปฐมภูมิ (primary nodal point) รังสีหักเหหรือส่วนต่อของรังสีหักเหจะออกจากจุดโนดัลทุติยภูมิ (secondary nodal point) ในลักษณะที่ขนานกับแนวรังสีเดิม ดังรูปที่ 1.5 จุด N และ N' เป็นจุดโนดัลปฐมภูมิ และจุดโนดัลทุติยภูมิของเลนส์หนา เห็นได้ว่า รังสีหักเห



รูปที่ 1.5 แนวของรังสีตกกระทบและรังสีหักเหจะขนานกัน เมื่อแสงตกมีแนวผ่านจุดโนดัลปฐมภูมิ

ที่ออกจากจุด N' ขนานกับรังสีตกกระทบที่ผ่านจุด N เนื่องจากรังสีตกกระทบผ่านจุด N และรังสีหักเหออกจากจุด N' นั้น ทำมุมกับแกนมุขยสำคัญเป็นค่ามุมเดียวกัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ด้วยว่า จุด N และจุด N' คือจุดที่มีกำลังขยายเชิงมุม (angular magnification) เป็น 1 หน่วย ระนาบที่ตั้งได้ฉากกับแกนมุขยสำคัญ และผ่านจุดทั้งสองนี้ เรียกว่า ระนาบโนดัล (nodal planes)

ถ้าดัชนีหักเหของตัวกลางที่อยู่ทั้งสองด้านของเลนส์หนามีค่าเท่ากัน ระนาบโนดัลและระนาบมุขยสำคัญจะอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันซึ่งจะได้พิสูจน์ต่อไปในหัวข้อที่ 1.5 ของบทนี้ ในทางปฏิบัติเลนส์มักอยู่ในอากาศ ดังนั้นถ้าทราบตำแหน่งจุดโนดัลของเลนส์ ทางยาวโฟกัสของเลนส์นั้นจะเป็นระยะทางจากจุดโนดัลถึงจุดโฟกัส

กรณีของเลนส์บางซึ่งระยะระหว่างขั้วของผิวทั้งสองของเลนส์มีค่าน้อย ให้ถือว่าจุดมุขยสำคัญทั้งสองและจุดโนดัลทั้งสองจะอยู่ที่เลนส์ ดังนั้น ทางยาวโฟกัสของเลนส์จะเป็นระยะจากเลนส์จนถึงจุดโฟกัส ทางยาวโฟกัสของเลนส์จะหาได้ง่าย ๆ โดยใช้เลนส์รับแสงจากวัตถุ แล้วหาตำแหน่งของภาพที่เกิดขึ้น คำนวณโดยใช้สูตร (2)

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{l'} - \frac{1}{l} \qquad (1.2)$$

ในเมื่อ l, l' เป็นระยะวัตถุและระยะภาพตามลำดับ ซึ่งมีค่าเป็นลบเมื่อวัตถุหรือภาพอยู่ทางซ้ายของเลนส์ และเป็นบวกเมื่ออยู่ทางขวาของเลนส์

f' เป็นทางยาวโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์ ถ้า f' เป็นลบแสดงว่าเลนส์นั้นเป็นเลนส์เว้า และถ้า f' เป็นบวก จะเป็นเลนส์นูน

อีกสูตรหนึ่งของเลนส์บาง (1,2) มีว่า

$$\frac{1}{f'} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \qquad (1.3)$$

โดยที่ f' เป็นทางยาวโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์บาง

n เป็นดัชนีหักเหของแก้วที่ใช้ทำเลนส์

R_1, R_2 เป็นรัศมีความโค้งของผิวทั้งสองของเลนส์ ซึ่งมีค่าเป็นลบเมื่อจุด

ศูนย์กลางความโค้งอยู่ทางซ้ายของผิว และเป็นบวกเมื่อจุดศูนย์กลางความโค้งอยู่ทางขวาของผิว

เมื่อให้แสงผ่านเลนส์ เลนส์บูนจะรวมแสงเข้าจากแนวแสงเดิมและเลนส์เว้าจะเบนแสงออกจากแนวแสงเดิม ความสามารถในการรวมเข้าหรือเบนออกนี้ เรียกว่ากำลังของเลนส์ (power of lens) K

$$K = \frac{1}{f'}$$

แทนค่าลงในสมการ (1.3) ได้ว่า

$$K = \frac{1}{f'} = (n - 1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \qquad (1.4)$$

เลนส์บูนมีทางยาวโฟกัส (f') เป็นบวก กำลังของเลนส์จึงเป็นบวก ดังนั้น กำลังบวกจึงหมายถึงกำลังในการรวมแสงทำนองเดียวกันเลนส์เว้ามีทางยาวโฟกัสเป็นลบ กำลังของเลนส์จึงเป็นลบด้วย กำลังลบจึงหมายถึงกำลังในการเบนแสงออกจากแนวแสงเดิม

เลนส์แต่ละอันมีการกระจาย (dispersion) แตกต่างกันขึ้นกับกำลังของเลนส์และค่าคงที่ของแก้วที่ใช้ทำเลนส์ การกระจายของเลนส์บางอันหนึ่ง ๆ จะเขียนได้ว่า

$$\text{การกระจาย} = \frac{K}{V}$$

โดยที่ K เป็นกำลังของเลนส์บาง

V เป็น ค่าวี (V-value) ของแก้วที่ใช้ทำเลนส์ และมีค่าเป็น

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \qquad (1.5)$$

เมื่อ n_D เป็นดัชนีหักเหของแก้วสำหรับแสงเหลืองจากธาตุโซเดียม (D-line)

n_F เป็นดัชนีหักเหของแก้วสำหรับแสงน้ำเงินจากธาตุไฮโดรเจน (F-line)

n_C เป็นดัชนีหักเหของแก้วสำหรับแสงแดง จากธาตุไฮโดรเจน (C-line)

สมการ (1.4) และสมการ (1.5) มีประโยชน์ในการคำนวณออกแบบเลนส์อรงค์ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 2

1.4 สัญญนิยมทางเครื่องหมายของการหักเหผ่านผิวทรงกลมเดี่ยว (2,3)

เมื่อให้แสงจากวัตถุซึ่งอยู่ในตัวกลางหนึ่งตกบนอีกตัวกลางหนึ่ง โดยที่ผิวคั่นระหว่างตัวกลางทั้งสองเป็นผิวทรงกลม แสงจะมีการหักเหทำให้เกิดภาพ การคำนวณหาทางยาวโฟกัสของผิว หรือระยะภาพ หรือระยะวัตถุก็ตาม ระยะทางต่าง ๆ ที่ทราบค่าต้องใช้ควบกับสัญญนิยมทางเครื่องหมาย (sign convention) ดังต่อไปนี้

1. ระยะทางทั้งหลายที่วัดจากผิวไปทางขวาจะมีเครื่องหมายเป็นบวก ส่วนระยะที่วัดไปทางซ้ายจะมีเครื่องหมายเป็นลบ

2. รัศมีความโค้งของผิวทรงกลม (R) มีเครื่องหมายเป็นบวก เมื่อจุดศูนย์กลางความโค้งอยู่ทางด้านขวาของผิว และเป็นลบเมื่อจุดศูนย์กลางความโค้งอยู่ทางด้านซ้ายของผิว

3. ความสูงให้วัดจากแกนมุขยสำคัญ ถ้าอยู่เหนือแกนมุขยสำคัญจะมีค่าเป็นบวก และจะเป็นลบเมื่ออยู่ใต้แกนมุขยสำคัญ

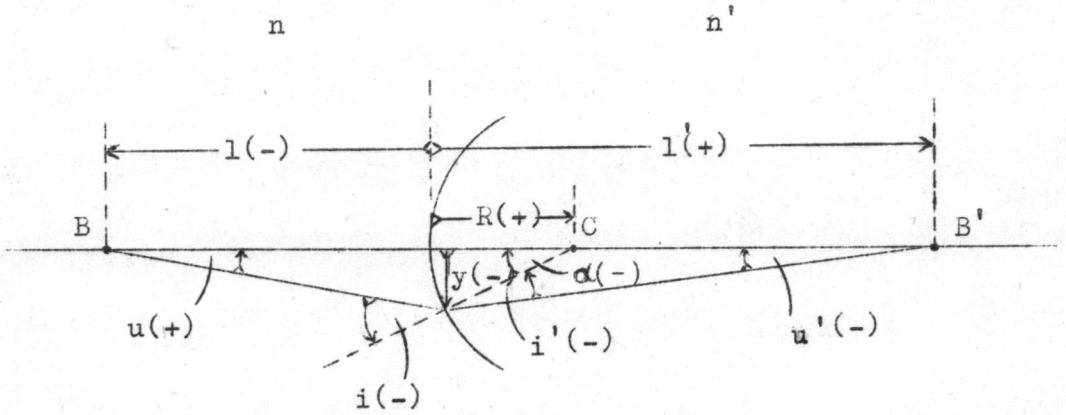
4. มุมชัน (slope angle) ของรังสีตกกระทบ (u) และมุมชันของรังสีหักเห (u') ให้วัดจากแนวรังสีไปยังแกนมุขยสำคัญ เมื่อวัดในทิศทวนเข็มนาฬิกาจะมีค่าเป็นบวก และเป็นลบเมื่อวัดในทิศตามเข็มนาฬิกา

5. มุมชันของเส้นปกติของผิวทรงกลม (α) ให้วัดจากเส้นปกติของผิวทรงกลมไปยังแกนมุขยสำคัญ เมื่อวัดในทิศทวนเข็มนาฬิกาจะมีค่าเป็นบวก และเป็นลบเมื่อวัดในทิศตามเข็มนาฬิกา

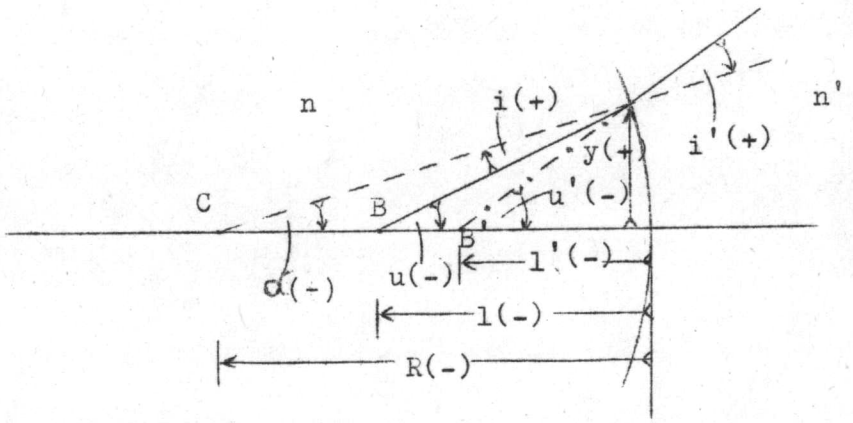
6. มุมตกกระทบ (i) และมุมหักเห (i') ให้วัดจากแนวของรังสีไปยังเส้นปกติของผิวทรงกลม เมื่อวัดในทิศตามเข็มนาฬิกาจะมีค่าเป็นบวก และเป็นลบเมื่อวัดในทิศทวนเข็มนาฬิกา

7. ข้อกำหนดข้างบนใช้กับรังสีที่มีทิศทางจากซ้ายไปขวา และค่าต่าง ๆ ในข้อที่ 4 ข้อที่ 5 และข้อที่ 6 วัดเป็นมุมแหลม

ตามสัญญนิยมทางเครื่องหมายดังกล่าว รูปที่ 1.6ก. และรูปที่ 1.6ข. เป็นตัวอย่างแสดงเครื่องหมายของค่าต่าง ๆ



(ก)

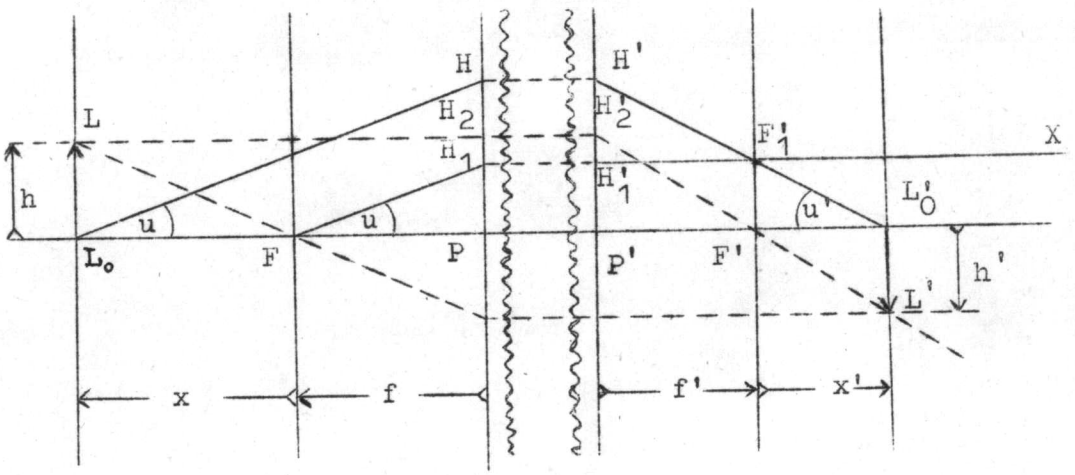


(ข)

รูปที่ 1.6 ก. การหักเหของรังสีเมื่อผ่านผิวบูน พร้อมทั้งเครื่องหมายของค่าต่าง ๆ

ข. การหักเหของรังสีเมื่อผ่านผิวเว้า และเครื่องหมายของค่าต่าง ๆ ในรูป

1.5 <u>กำลังขยายเชิงมุม และเชิงเส้นแนวตั้ง</u>(2) ในรูปที่ 1.7 HP และ H'P' เป็นระนาบมุขยสำคัญของเลนส์หนา L_0L เป็นความสูงของวัตถุซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งห่างจากจุดโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์หนาเป็นระยะ x $L_0'L'$ เป็นความสูงของภาพที่เกิดขึ้นและอยู่ที่ตำแหน่งห่างจากจุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์หนาเป็นระยะ x' ให้ตัวกลางทางด้านหน้าเลนส์มีค่าดัชนีหักเหเป็น n และตัวกลางทางด้านหลังเลนส์มีค่าดัชนีหักเหเป็น n' ถ้าให้รังสีตกกระทบที่ออกจาก L_0 มีมุมชันเป็น u หักเหผ่านเลนส์ และตัดกับแกนมุขยสำคัญที่ L_0' ซึ่งมุมชันของรังสีหักเหมีค่าเป็น u' จากรูปที่ 1.7 จะได้ว่าอัตราส่วนของ tan u' ต่อ tan u เป็นกำลังขยายเชิงมุมสำหรับระนาบภาพ และระนาบวัตถุนี้



รูปที่ 1.7 กำลังขยายเชิงมุมและกำลังขยายเชิงเส้นแนวตั้ง

พิจารณาจากรูปที่ 1.7 จะเห็นว่า สามเหลี่ยม $H_2'P'F'$ และสามเหลี่ยม $F'L'L_0'$ เป็นสามเหลี่ยมคล้าย ซึ่งจะให้

$$\frac{h'}{h} = \frac{x'}{f'}$$

เนื่องจากว่า h' มีเครื่องหมายเป็นลบ ตามสัญญูนิยมทางเครื่องหมายในหัวข้อที่ 1.4 ดังนั้นจะได้

$$\frac{h'}{h} = -\frac{x'}{f'} \qquad (1.6)$$

รังสี FH_1 เป็นรังสีที่ขนานกับรังสี L_OH ดังนั้น รังสี FH_1 จะหักเห ผ่านเลนส์ไปในแนว $H_1F'_1X$ ซึ่งจะขนานกับแกนมุขยสำคัญตามสมบัติของจุดโฟกัสปฐมภูมิ และตัดกับระนาบโฟกัสทุติยภูมิที่จุด F' จากรูปที่ 1.7 จะได้ว่า

$$PH_1 = f \tan u$$

และ $$P'H'_1 = F'F'_1 = x' \tan u'$$

เนื่องจากว่า $PH_1 = P'H'_1$ ตามสมบัติของระนาบมุขยสำคัญ ค่าของ f และ u มีเครื่องหมายเป็นลบ จะได้ว่า

$$f \tan u = x' \tan u' \qquad (1.7)$$

เพราะฉะนั้น $$\frac{\tan u'}{\tan u} = \frac{f}{x'} \qquad (1.8)$$

จากสมการ (1.6) และสมการ (1.8) จะได้ว่า

$$\left(\frac{h'}{h}\right)\left(\frac{\tan u'}{\tan u}\right) = -\frac{f}{f'}$$

และจากสมการ (1.1)

$$-\frac{f}{f'} = +\frac{n}{n'}$$

เพราะฉะนั้น $$\left(\frac{h'}{h}\right)\left(\frac{\tan u'}{\tan u}\right) = -\frac{f}{f'} = +\frac{n}{n'} \qquad (1.9)$$

ซึ่งเป็นสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขยายเชิงมุมกับกำลังขยายเชิงเส้นแนวตั้ง สำหรับระนาบภาพและระนาบวัตถุคู่หนึ่ง ๆ สมการ(1.9) นิยมเขียนอยู่ในรูปดังนี้

$$nh \tan u = n'h' \tan u' \qquad (1.10)$$

ซึ่งเรียกว่าสมการของเฮล์มฮอลท์ซ (Helmholtz's equation) และถ้ามุมชันของรังสีตกกระทบ และมุมชันของรังสีหักเหเป็นมุมเล็กจะเขียนได้เป็น

$$nhu = n'h'u' \qquad (1.11)$$

จะเห็นได้ว่า ในระบบทัศนศาสตร์หนึ่ง ๆ ซึ่งมีระบบย่อยนั้น ค่า nhu ของแต่ละระบบย่อยจะเท่ากัน ค่า nhu นี้เรียกว่า ค่านิจของลากรองก์ (Lagrange invariant) เขียนได้ว่า

$$H = nhu = n'h'u' = n'' h''u'' = \cdots \qquad (1.12)$$

ถ้าดัชนีหักเหของตัวกลางที่อยู่ทั้งสองด้านของเลนส์หนามีค่าเท่ากัน ระนาบโนดัลและระนาบมุขสำคัญจะซ้อนกันพอดี แสดงได้โดยการแทนค่า $n = n'$ ลงในสมการ(1.9) และให้ $u'=u$ เนื่องจากเป็นมุมชันของรังสีหักเห และรังสีตกกระทบที่จุดโนดัล จะได้ผลว่า อัตราส่วนของ h' ต่อ h มีค่าเป็น 1 หน่วย ซึ่งหมายความว่า ระนาบโนดัลจะกลายเป็นระนาบที่มีกำลังขยายเชิงเส้นแนวตั้งเป็น 1 หน่วย ซึ่งก็คือระนาบมุขสำคัญนั่นเอง

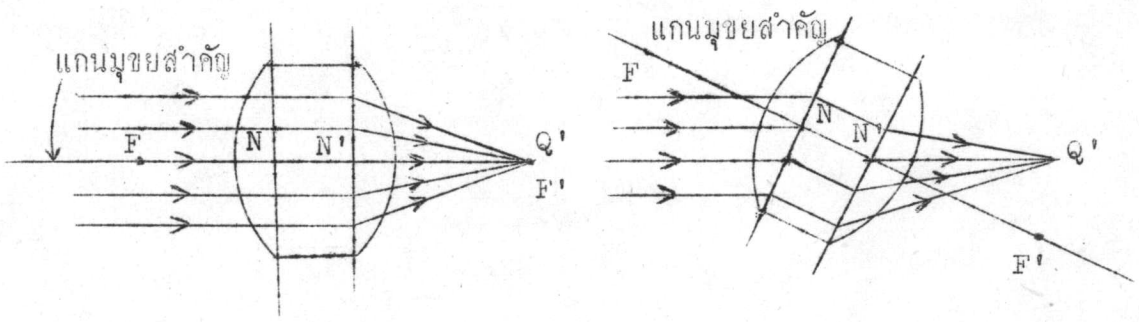
ในกรณีที่ดัชนีหักเหของตัวกลางที่อยู่ทั้งสองด้านของเลนส์หนามีค่าไม่เท่ากันนั้น ระนาบมุขสำคัญ และระนาบโนดัลจะเลื่อนออกจากกัน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 1.2 ว่า ทางยาวโฟกัสของเลนส์หนาไม่ใช่ระยะที่วัดจากยั้วของผิวเลนส์ไปยังจุดโฟกัส แต่เป็นระยะที่วัดจากจุดมุขสำคัญไปยังจุดโฟกัสที่สอดคล้องกัน ในทางปฏิบัติ เราไม่สามารถที่จะหาจุดมุขสำคัญของเลนส์หนาได้ แต่สามารถหาจุดโนดัลของเลนส์หนาได้โดยอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า โนดัลสไลดเบนช

จุดโนดัลที่หาได้นี้คือ จุดมุขยสำคัญของเลนส์ ทั้งนี้เนื่องจากว่าตัวกลางที่อยู่ทั้งสองด้านของเลนส์หนา คืออากาศ จากโนดัลสไลดเบนช จะทราบตำแหน่งของจุดโฟกัสด้วย ระยะระหว่างจุดโนดัลกับจุดโฟกัสคือ ทางยาวโฟกัสของเลนส์หนานั่นเอง

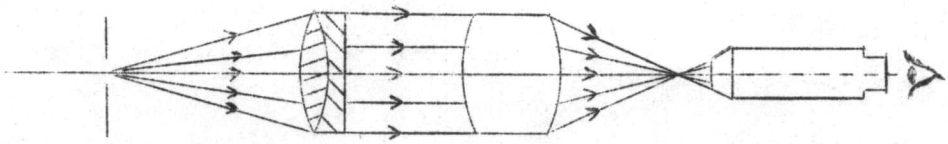
2. โนดัลสไลดเบนช (4,5,6)

เป็นทัศนอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับหาจุดโนดัลของเลนส์หนา โดยอาศัยหลักที่ว่า เมื่อรังสีตกกระทบหรือส่วนต่อของรังสีตกกระทบผ่านจุดโนดัลปฐมภูมิแล้ว รังสีหักเหหรือส่วนต่อของรังสีหักเหจะออกจากจุดโนดัลทุติยภูมิในลักษณะที่ขนานกับแนวรังสีตกกระทบเดิม จากหลักนี้เมื่อตั้งแกนผ่านจุดโนดัลทุติยภูมิของเลนส์หนา และตั้งได้ฉากกับแกนมุขยสำคัญให้แกนนี้เป็นแกนหมุน ถ้าเลนส์หนานั้นไม่มีความคลาด (aberration) ใด ๆ แสงขนานกับแกนมุขยสำคัญตกกระทบกับเลนส์หนา ภาพที่ได้จะเป็นจุดอยู่ที่ตำแหน่งจุดโฟกัสของเลนส์ ถ้าหมุนเลนส์รอบแกนหมุนนั้นจะพบว่าภาพยังอยู่ตำแหน่งเดิม ดังรูปที่ 1.8 เมื่อตัวกลางที่อยู่ทั้งสองด้านของเลนส์เป็นอากาศ จุดโนดัลทุติยภูมิก็จะเป็นจุดมุขยสำคัญทุติยภูมิของเลนส์นั้นด้วย ดังนั้นระยะระหว่างจุดโนดัลทุติยภูมิของเลนส์กับตำแหน่งภาพ คือ ทางยาวโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์หนานั่นเอง



รูปที่ 1.8 การหมุนของเลนส์รอบจุดโนดัลทุติยภูมิ ทำให้รังสีหักเหเปลี่ยนไป แต่ภาพยังคงอยู่ที่ตำแหน่งเดิม

ส่วนประกอบของโนดัลสไลดเบนช ประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกัน ได้แก่ คอลลิเมเตอร์ (collimator) แท่นวางเลนส์ทดสอบ (lens holder) และกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน (compound microscope) ดังรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 ส่วนประกอบหลักของโนดัลสไลดเบนช

2.1 <u>คอลลิเมเตอร์</u> (7) เป็นทัศนอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยท่อโลหะมีเลนส์นูนอยู่ที่ปลายด้านหนึ่ง ปลายอีกด้านหนึ่งเป็นตำแหน่งของระนาบโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์นูน และเป็นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแบบช่องแคบ (slit source) ด้วย คอลลิเมเตอร์นี้ ทำหน้าที่ให้กำเนิดลำแสงขนาน ลำแสงขนานที่ออกจากคอลลิเมเตอร์จะตกบนเลนส์ที่ต้องการทดสอบ

2.2 <u>แท่นวางเลนส์ทดสอบ</u> ประกอบด้วยตัวเลื่อน (slide) สองตัว ซึ่งตั้งอยู่บนฐานรูปกรวยที่สามารถหมุนได้ในแนวราบ ตัวเลื่อนตัวหนึ่งเป็นโลหะรูป T ใช้สำหรับเลื่อนหาตำแหน่งของระนาบโฟกัสของเลนส์ทดสอบ ส่วนตัวเลื่อนอีกตัวหนึ่งใช้สำหรับเลื่อนหาจุดโนดัลทุติยภูมิของเลนส์ทดสอบ ซึ่งจะต้องมาตรงกับตำแหน่งของแกนหมุนของแท่นวางเลนส์นี้

2.3 <u>กล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน</u> ใช้สำหรับสังเกตภาพที่เกิดขึ้นจากเลนส์ทดสอบ

ตั้งอยู่บนแผ่นโลหะที่เคลื่อนได้ตามความยาวของเบนช์ ด้านหน้าของแท่นของกล้องจุลทัศน์นี้มีตลับลูกปืนทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างตัวเลื่อนรูป T ของแท่นวางเลนส์ทดสอบกับแท่นของกล้องจุลทัศน์ โดยมีตุ้มน้ำหนักถ่วงที่ด้านหลังแท่นของกล้องจุลทัศน์ เพื่อที่จะดึงแท่นของกล้องจุลทัศน์ และตลับลูกปืนให้ติดกับตัวเลื่อนรูป T อยู่ตลอดเวลา

3. <u>วัตถุประสงค์</u>

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบและสร้างเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ และสำหรับกล้องจุลทัศน์ แล้วนำเอาเลนส์ที่สร้างได้ไปประกอบเป็นโนดัลสไลดเบนช โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อให้ทราบถึงหลักการในการออกแบบและสร้างเลนส์
2. เพื่อให้ทราบถึงวิธีการทดสอบเลนส์
3. เพื่อให้ได้เครื่องมือสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ

001581

4. <u>วิธีดำเนินงาน</u>

4.1 <u>การออกแบบและการสร้างคอลลิเมเตอร์</u> ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1 ว่า คอลลิเมเตอร์เป็นทัศนอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยเลนส์นูนอยู่ที่ปลายเปิดด้านหนึ่งของท่อโลหะ สำหรับงานวิจัยนี้จะสร้างเลนส์นูนที่มีทางยาวโฟกัสเป็น 200 มิลลิเมตร เป็นเลนส์รงค์ (achromatic lens) แบบเลนส์คู่ประกบ (cemented doublet) เพื่อที่จะลดความคลาดรงค์ (chromatic aberration) อีกทั้งได้ออกแบบเลนส์เพื่อลดความคลาดทรงกลม (spherical aberration) และโคมา (coma) โดยวิธีการโค้งเลนส์ (bending)

4.2 <u>การออกแบบและการสร้างกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน</u> ทำการออกแบบและสร้างกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อนที่มีกำลังขยายเป็น 20 เท่า โดยให้กำลังขยายของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ (objective) เป็น 2 เท่า กำลังขยายของเลนส์ใกล้ตา

(eyepiece) เป็น 10 เท่า และความยาวกล้องเชิงทัศนศาสตร์ (optical tube length) เป็น 50 มิลลิเมตร สำหรับเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ และเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์นี้ ได้ทำการออกแบบและสร้างเป็นเลนส์รงค์แบบคู่ประกบ และได้ใช้วิธีการโค้งเลนส์เพื่อลดความคลาดทรงกลมและโคมาด้วย

4.3 <u>การทดสอบเลนส์รงค์ที่สร้างขึ้น</u> ทั้งเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์และสำหรับกล้องจุลทัศน์ จะต้องนำมาทดสอบโดยวิธีต่อไปนี้

1. การวัดรัศมีความโค้งของผิวเลนส์โดยวิธีวงแหวนนิวตัน (Newton's ring test) เพื่อนำไปคำนวณหาทางยาวโฟกัสของเลนส์โดยใช้สมการเกาส์เซียน (Gaussian equation)

2. การหาทางยาวโฟกัสของเลนส์โดยการแกะรอยรังสี (ray tracing)

3. การหาทางยาวโฟกัสของเลนส์ด้วยวิธีทดสอบกำลังขยาย (magnification method)

4. การหาทางยาวโฟกัสของเลนส์ด้วยวิธีทดสอบของฮาร์ตแมนน์ (Hartmann test)

5. การทดสอบคุณภาพของเลนส์โดยวิธีทดสอบด้วยคมมีดของโฟคอลท์ (Foucault knife-edge test)

6. การทดสอบคุณภาพของเลนส์ด้วยวิธีทดสอบดาว (star test)

7. การหากำลังแยก (resolving power) ของเลนส์

4.4 <u>การออกแบบและการสร้างโนดัลสไลดเบนช</u> ได้ทำการออกแบบและสร้างโนดัลสไลดเบนชเพื่อใช้สำหรับวัดทางยาวของเลนส์หนา ซึ่งมีทางยาวโฟกัสตั้งแต่ 50 มิลลิเมตร ถึง 200 มิลลิเมตร และมีสนามของการเห็น (field of view) คิดเป็นมุมที่รองรับ ณ จุดกึ่งกลางของหน้าเลนส์ได้ถึง 60 องศา