

การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง

ปริญญานิพนธ์

ของ

ธนิกานต์ ศรีต้นวงศ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ตุลาคม 2553

การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง

ปริญญานิพนธ์

ของ

ธนิگانต์ ศรีต้นวงศ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ตุลาคม 2553

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง

บทคัดย่อ

ของ

ธนิกันต์ ศรีต้นวงศ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ตุลาคม 2553

ธนิกานต์ ศรีต้นวงศ์. (2553). การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง. ปริญญาานิพนธ์ กศ.ม.(ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: รองศาสตราจารย์อรุณีย์ อินทศร, ผู้ช่วยศาสตราจารย์บัญชา ศิลป์สกุลสุข.

ชุดอุปกรณ์นี้ประกอบด้วยเลนส์นูน 5 ชิ้น ที่มีความยาวโฟกัสแตกต่างกัน ตัวทำขนาน เกรตติงแบบสองผ่าน และอุปกรณ์ตรวจจับ CMOS ในกล่องดิจิตอลดีเอสแอลอาร์ โดยยึดติดอยู่ในท่อ PVC บนรางเลื่อนเชิงแสง ที่มีความสะดวกต่อการเคลื่อนย้ายและปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ได้โดยง่าย ทำการถ่ายโอนข้อมูลภาพที่ได้จากกล่องไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์ โดยจัดเก็บข้อมูลภาพเป็นชนิด .jpeg ในการเปรียบเทียบอุปกรณ์ได้ใช้ต้นกำเนิดแสงจากหลอดไฮโดรเจน หลอดฮีเลียม และหลอดไอปรอท พบว่าค่าความยาวคลื่นที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0.02%-0.19% อุปกรณ์ที่ผ่านการเปรียบเทียบแล้วนี้ได้นำมาศึกษาสเปกตรัมของต้นกำเนิดแสงจากหลอดคริปทอน หลอดไอ้หลอดโซเดียม และหลอดนีออน พบว่าค่าความยาวคลื่นที่ได้มีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง 0.07%-1.40% เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานทั่วไป ประโยชน์ของชุดอุปกรณ์ คือได้ภาพสเปกตรัมแสงที่สนับสนุนการสังเกตและการวิเคราะห์สเปกตรัมแสงในการทดลองเชิงแสง และยังสามารถนำไปใช้เป็นการสอนได้เป็นอย่างดี

THE INVENTION OF MOUNTABLE CAMERA DEVICE FOR PHOTO TAKING OF
LIGHT SPECTRA DIFFRACTED FROM GRATING

AN ABSTRACT
BY
THANIKAN SRITONWONG

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Education Degree in Physics
at Srinakharinwirot University

October 2010

Thanikan Sritonwong. (2010). *The Invention of Mountable Camera Device for Photo Taking of Light Spectra Diffracted from Grating*. Master thesis, M.Ed. (Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assoc.Prof. Arunee Intasorn, Assist.Prof. Buncha Silskulsuk.

The device is consisted of five simple convex lenses with various focal lengths, collimator system, transmission grating and CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) detector in DSLR (Digital Single Lens Reflex) camera. They are mounted on optical bench covered with PVC horizontal cylinder which can be portable conveniently. The obtained images stored as .jpeg file format are transferred from camera to PC for data acquisition and analysis. Hydrogen, Helium, and Mercury lamps were used are calibrated light sources. We found that the different value of wavelengths between obtained ones and the standard ones are the range of 0.02% to 0.19%. Finally the light color spectra using Krypton, Water vapor, Sodium, and Neon light sources were studied and the difference of the result from the general standard wavelength are in the range from 0.07% to 1.40%. The benefits of this device are the provision of light color spectral images from experiments to support the observations and analysis of diffraction color spectra in optical experiments, and it will be utilized as a teaching media as well.

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา ความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์อรุณีย์ อินทศร ประธานควบคุมปริญญานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ปัญญา ศิลป์สกุลสุข กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาของการทำงานวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.จตุรงค์ สุคนธชาติ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เชี่ยงกา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นประธาน และกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำแก้ไขเพิ่มเติม จนทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดระยะเวลาการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการดำเนินการทำปริญญานิพนธ์นี้ได้สำเร็จ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ขั้นสูง 1 และเจ้าหน้าที่ ธีญนพ นิลกำจร ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณะผู้บริหารและคณะครู โรงเรียนโนนสะอาดพิทยาสรรค์ อำเภอโนนสะอาด จังหวัดอุดรธานี ที่ให้โอกาสกับผู้วิจัยได้ศึกษาต่อจนสำเร็จ

ท้ายที่สุดขอโน้มรำลึกถึงพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ตลอดจนขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ นิสิตปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ ทุกคน ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาแก่ผู้วิจัย จนทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ธนิกันต์ ศรีต้นวงศ์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
ความสำคัญของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ธรรมชาติของแสง.....	4
การแทรกสอดของแสง.....	8
การเลี้ยวเบนของแสง.....	13
เลนส์และการเกิดภาพ.....	20
อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดความเข้มแสง.....	32
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	38
ศึกษาคุณสมบัติของกล้องถ่ายภาพและสำรวจหาเลนส์ที่สามารถ จัดหาได้ง่าย.....	38
ศึกษาทางเดินแสงและการเกิดภาพ.....	40
ออกแบบชุดการทดลอง.....	46
ประดิษฐ์และประกอบอุปกรณ์.....	50
ถ่ายภาพจากต้นกำเนิดแสงที่ทราบองค์ประกอบความยาวคลื่น	55
คำนวณค่าความยาวคลื่นจากภาพถ่าย.....	56
เขียนโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่นจาก ภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของแสง.....	58

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3 (ต่อ)	
วิเคราะห์และเปรียบเทียบชุดอุปกรณ์หรือโปรแกรมให้ได้ผลการวัดที่ใกล้เคียง กับค่าของต้นกำเนิดแสงที่ใช้ทดสอบ.....	60
สรุปผลการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสง...	60
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	61
การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่ เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง.....	61
การถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่ใช้เพื่อเป็นค่าสำหรับการปรับเทียบ (Calibration)...	64
การสร้างและทดสอบโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่า ความยาวคลื่น.....	71
5 สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ.....	79
สรุปและอภิปรายผลการทดลอง.....	79
ข้อเสนอแนะ.....	80
บรรณานุกรม.....	82
ภาคผนวก.....	85
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	108

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงสเปกตรัมแสงที่ตามองเห็นได้.....	6
2 แสดงจำนวนบิต จำนวนค่าของระดับสีเทา และค่าของระดับสีเทา.....	33
3 แสดงค่าตำแหน่งของเส้นสเปกตรัม ($\frac{P}{2}$) และค่า D	69
4 แสดงผลการคำนวณค่าความยาวคลื่นของสเปกตรัมจากต้นกำเนิดแสงที่ใช้เป็น ความยาวคลื่นในการเปรียบเทียบ.....	71
5 แสดงผลการคำนวณค่าความยาวคลื่นของสเปกตรัมแสงจากต้นกำเนิดแสง ที่ใช้เป็นความยาวคลื่นในการทดสอบอุปกรณ์.....	78

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ

หน้า

1	แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีสนามแม่เหล็ก ($\vec{B}$) และสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) ตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของแสง.....	4
2	แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่น และความถี่แตกต่างกัน...	5
3	แสดงการเกิดหน้าคลื่นใหม่ (BB') ณ เวลา Δt จากหน้าคลื่นเดิม (AA').....	7
4	แสดงการทดลองสลิตคู่ของยัง.....	8
5	แสดงรูปแบบการแทรกสอดจากสลิตคู่ S_1 และ S_2	9
6	แสดงค่าความเข้มแสงกับระยะ $d \sin \theta$ สำหรับรูปแบบการแทรกสอดจาก สลิตคู่เมื่อฉากอยู่ไกลจากสลิตทั้งคู่ ($L \gg d$).....	12
7	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของคลื่นผ่านสิ่งกีดขวาง.....	13
8	แสดงการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ของลำแสงขนานผ่านสลิตเดี่ยว.....	14
9	แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นแสงที่มีลักษณะเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ตกกระทบบน เกรตติง.....	16
10	แสดงความต่างระยะทาง (Path Difference " Δ ") ของเกรตติง.....	16
11	แสดงมุมเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงของแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน.....	18
12	แสดงลำดับการเลี้ยวเบนของสเปกตรัมแสง.....	20
13	แสดงลำแสงขนานที่ผ่านเลนส์นูน.....	20
14	แสดงตำแหน่งการเกิดภาพจากเลนส์นูนโดยวิธีการเขียนรูป.....	21
15	แสดงการเกิดภาพจากเลนส์เดี่ยว ด้วยวิธีการของศุภพิทยาภรณ์ และคณะ.....	22
16	แสดงการเกิดภาพจากเลนส์นูนมากกว่าเลนส์เดี่ยว.....	23
17	แสดงการเกิดภาพด้วยวิธีการของศุภพิทยาภรณ์และคณะ.....	23
18	แสดงภาพทางเดินแสงผ่านเลนส์ของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่ง รีจิสว่างบนฉากรับภาพ.....	24
19	แสดงตำแหน่งเกิดภาพการเลี้ยวเบนจากเลนส์ 1 ชิ้น.....	26
20	แสดงตำแหน่งเกิดภาพการเลี้ยวเบนจากเลนส์ 2 ชิ้น.....	26
21	แสดงตำแหน่งเกิดภาพการเลี้ยวเบนจากเลนส์ 3 ชิ้น.....	28
22	แสดงตำแหน่งเกิดภาพการเลี้ยวเบนจากเลนส์ 4 ชิ้น.....	29

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

23	แสดงความคลาดทรงกลมของเลนส์นูน.....	31
24	แสดงระดับสีเทาจาก 2 บิต 4 บิต 6 บิต 7 บิต 8 บิต และ 10 บิต.....	34
25	แสดงโครงสร้างการทำงานของกล้อง DSLR.....	35
26	แสดงส่วนประกอบของกล้องถ่ายภาพ.....	39
27	แสดงทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ 1 ชั้น ที่มีความยาวโฟกัส 45.46 มิลลิเมตร.....	41
28	แสดงทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ 2 ชั้น.....	42
29	แสดงทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ 3 ชั้น.....	43
30	แสดงทางเดินแสงและการเกิดภาพจากเลนส์ 4 ชั้น.....	45
31	แสดงส่วนประกอบของชุดอุปกรณ์ประกอบกล้องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสง...	46
32	แสดงลักษณะของกระบอกเลนส์.....	47
33	แสดงการออกแบบวงแหวนยึดจับเลนส์และอุปกรณ์.....	48
34	แสดงรางเลื่อนเชิงแสงชุดที่ 1.....	49
35	แสดงรางเลื่อนเชิงแสงชุดที่ 2.....	49
36	แสดงลักษณะของตัวทำขนาน.....	50
37	แสดงการประกอบเกรตติงเข้ากับวงแหวนยึดจับอุปกรณ์.....	51
38	แสดงการประกอบเลนส์นูนเข้ากับวงแหวนยึดจับเลนส์.....	51
39	แสดงการประดิษฐ์ฉากรับภาพ.....	52
40	แสดงการประดิษฐ์วงแหวนยึดอุปกรณ์กล้อง.....	52
41	แสดงวงแหวนยึดกระบอกเลนส์.....	53
42	แสดงการยึดกระบอกเลนส์ด้วยวงแหวนยึดกระบอกเลนส์.....	53
43	แสดงลักษณะทางเดินของแสงและตำแหน่งที่ระยะต่างๆของชุดอุปกรณ์.....	54
44	แสดงการทดสอบระยะของชุดอุปกรณ์บนรางเลื่อนเชิงแสง.....	55
45	แสดงการประกอบชุดอุปกรณ์เข้ากับกล้องถ่ายภาพ.....	56
46	แสดงระยะห่างระหว่างเส้นสเปกตรัมของภาพถ่าย.....	58

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

47	แสดงรูปแบบการทำงานของโปรแกรมวัดตำแหน่งวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสง และคำนวณค่าความยาวคลื่นจากภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของแสง.....	59
48	แสดงตำแหน่งการวางอุปกรณ์และเลนส์แต่ละชิ้นของชุดอุปกรณ์.....	62
49	แสดงลักษณะของชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่ เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง.....	63
50	การจัดวางและประกอบชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบน ผ่านเกรตติง.....	64
51	แสดงภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดไฮโดรเจน.....	65
52	แสดงตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดไฮโดรเจน.....	65
53	แสดงภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดฮีเลียม.....	66
54	แสดงตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดฮีเลียม.....	67
55	แสดงภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดไอปรอท.....	67
56	แสดงตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดไอปรอท.....	68
57	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{P}{2}$ และ D ของต้นกำเนิดแสงที่ใช้ สำหรับเปรียบเทียบ.....	70
58	แสดงภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดคริปทอน.....	72
59	แสดงตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดคริปทอน.....	73
60	แสดงภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดไอน้ำ.....	73
61	แสดงตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดไอน้ำ.....	74
62	แสดงภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดโซเดียม.....	75
63	แสดงตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดโซเดียม.....	75
64	แสดงภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดนีออน.....	76
65	แสดงตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดนีออน.....	77
66	แสดงชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสง.....	87
67	แสดงการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงด้วยชุดอุปกรณ์.....	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

ความรู้ทางด้านแสงในปัจจุบันมีความสำคัญต่อการประดิษฐ์และพัฒนาเทคโนโลยีในด้านต่างๆ จากอดีต ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว อาทิ การสื่อสารโทรคมนาคมโดยใช้แสง การผ่าตัด การรักษาโรคโดยเทคโนโลยีแสงเลเซอร์ การบันทึกข้อมูลโดยใช้สัญญาณแสง(Optical Signal)ลงบนแผ่นดิสก์แข็งแสง(Optical Diskette) อุตสาหกรรมการตัดเหล็กกล้า ระบบการรักษาความปลอดภัย เป็นต้น การประยุกต์ใช้ความรู้ทางด้านแสงดังกล่าวต้องใช้ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับปรากฏการณ์เชิงแสง คือ การสะท้อน(Reflection) การหักเห(Refraction) การเลี้ยวเบน(Diffraction) และการแทรกสอด(Interference) เป็นพื้นฐานสำคัญ

แสงประกอบขึ้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันในช่วงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า วิธีการวัดความยาวของคลื่นแสงนั้นส่วนใหญ่จะใช้วิธีการวัดสเปกตรัมแสง ซึ่งการวัดสเปกตรัมแสงจะแสดงถึงการวัดความเข้มแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ความยาวคลื่นแสงจะถูกแยกออกด้วยวิธีการที่หลากหลาย เช่น การหักเหด้วยปริซึม และการเลี้ยวเบนด้วยเกรตติง(Diffraction Grating) เป็นต้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่องานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาทิ การหาแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้โดยการวัดสเปกตรัมแสงที่สะท้อนจากผิวของสารกึ่งตัวนำ หรือการวัดสเปกตรัมแสงที่ส่องผ่านสารละลายทำให้ทราบองค์ประกอบทางเคมีของสารละลายได้เป็นต้น เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสเปกตรัมแสงนี้เรียกว่า สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer)

ปัจจุบันได้มีการวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมแสงด้วยรูปแบบและวิธีการต่างๆ ซึ่งแต่ละรูปแบบและวิธีการนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำผลของการวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมที่ได้ไปใช้ในแต่ละด้านที่แตกต่างกันไป เครื่องมือวัดสเปกตรัมแสงจะมีขนาดและความซับซ้อนแตกต่างกัน เครื่องมือในห้องปฏิบัติการส่วนมากจะมีขนาดใหญ่ มีความถูกต้องแม่นยำสูงแต่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก เครื่องมือวัดสเปกตรัมแสงขนาดเล็กมีทั้งแบบโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ใช้ในการตรวจสอบสเปกตรัมแสงด้วยตา และแบบโครงสร้างที่ซับซ้อนซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการตรวจวัด อย่างไรก็ตามอุปกรณ์เหล่านี้ได้ออกแบบโดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมแสง และมีราคาค่อนข้างสูง ผู้วิจัยเห็นว่าในปัจจุบันกล้องดิจิทัลได้มีการพัฒนาไปมาก ทำให้มีความไวสูงในการรับแสง สามารถเก็บบันทึกภาพโดยเก็บบันทึกเป็นความเข้มของแสงสีต่างๆ ที่ตกบนจากรับภาพของกล้องถ่ายภาพ เช่น เซนเซอร์ซีมอส(CMOS Sensor) กล้องที่สามารถถอดเปลี่ยน

เลนส์ได้ง่าย เช่น กล้องดิจิทัลสะท้อนภาพเลนส์เดียว หรือเรียกว่า กล้องDSLR (Digital Single Lens Reflex Camera) จึงมีความเป็นไปได้สูงในการออกแบบและประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบเข้ากับกล้องถ่ายภาพดังกล่าวที่รวมส่วนประกอบต่างๆ เช่น สลิต เกรตติง เลนส์ เป็นต้น ลงในกระบอกเลนส์เดียวกันโดยสามารถประกอบเข้ากับกล้องถ่ายภาพเหมือนการประกอบเลนส์ทั่วไป และใช้บันทึกภาพสเปกตรัมแสงจากต้นกำเนิดแสงต่างๆ ทำให้ได้ชุดอุปกรณ์ประกอบกล้องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่สามารถเคลื่อนย้าย ปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ และสะดวกต่อการถ่ายโอนข้อมูลที่เป็นรูปภาพ ซึ่งอาจนำไปปรับใช้ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ หรือใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนในชั้นเรียนได้ต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาและประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล้อง DSLR สำหรับถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง

1.2.2 ศึกษาการเขียนโปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์สเปกตรัมแสงจากภาพถ่าย

1.3 ความสำคัญของการวิจัย

1.3.1 ได้ชุดอุปกรณ์ประกอบกล้องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของแสง เมื่อเคลื่อนที่ผ่านเกรตติงที่สะดวกต่อการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ และการเคลื่อนย้าย

1.3.2 เป็นแนวทางในการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพ และการวิเคราะห์สเปกตรัมแสงจากการเลี้ยวเบนของแสงผ่านสิ่งกีดขวางแบบอื่นๆ เช่น สลิตเดี่ยว สลิตคู่ เป็นต้น ด้วยกล้องในลักษณะเดียวกัน

1.3.3 ได้ซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์สเปกตรัมแสงจากภาพถ่าย

1.3.4 สามารถถ่ายภาพสเปกตรัมแสงในรูปแบบของสื่อการสอนด้วยคอมพิวเตอร์ ได้โดยง่าย

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ออกแบบและประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล้องสำหรับถ่ายภาพการเลี้ยวเบนของแสงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเกรตติง โดยสามารถถ่ายภาพสเปกตรัมแสงบนฉากรับภาพของกล้องถ่ายภาพครอบคลุมความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

1.4.2 ชุดอุปกรณ์สามารถถอดประกอบบนกล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่สามารถถอดเปลี่ยนเลนส์ได้ โดยใช้ชุดอุปกรณ์ประกอบแทนที่ตำแหน่งสวมใส่เลนส์

1.4.3 เขียนโปรแกรมคำสั่งด้วยภาษาวิชวลเบสิก 6 (Visual Basic 6) เพื่ออ่านค่าระดับสีเทาที่เป็นผลจากความเข้มแสงบนภาพถ่าย หาตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงบนภาพถ่าย คำนวณความยาวคลื่นแสงจากตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงบนภาพถ่าย บันทึก และแสดงผลการวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงจากการเลี้ยวเบน และสามารถส่งผ่านข้อมูลค่าระดับสีเทาไปยังโปรแกรม Excel

1.4.4 ทดสอบการประมวลผล แสดงผลการวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมจากเครื่องมือ และโปรแกรมที่สร้างขึ้นกับสเปกตรัมแสงที่ทราบความยาวคลื่นที่เป็นองค์ประกอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถนำชุดอุปกรณ์มาทำการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง และวิเคราะห์ตำแหน่งการเลี้ยวเบนของความยาวคลื่นต่างๆของสเปกตรัมแสง

1.5.2 อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถใช้เป็นต้นแบบในการสร้างชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน เช่น การแทรกสอดของสลิตเดี่ยว สลิตคู่ และการเลี้ยวเบนผ่านสิ่งกีดขวางอื่นๆ โดยมีต้นทุนต่ำ

1.5.3 กล้องถ่ายภาพเก็บข้อมูลภาพเป็นข้อมูลดิจิทัลให้ความสะดวกในการจัดเก็บ และแสดงผลด้วยสื่อคอมพิวเตอร์ สามารถสนับสนุนการเรียนการสอนที่ใช้สื่ออิเล็กทรอนิกส์

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.6.1 เซนเซอร์ซีมอส (CMOS Sensor) หมายถึง อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สร้างภาพเหมือนกับฟิล์มที่อยู่ในกล้องถ่ายภาพ โดยโครงสร้างภายในถูกแบ่งออกเป็นพิกเซล(Pixel) จำนวนมากโดยแต่ละพิกเซลจะทำหน้าที่รับแสง และมีวงจรย่อยๆเปลี่ยนค่าแสงที่เข้ามาเป็นสัญญาณดิจิทัลทันที

1.6.2 กล้อง DSLR (Digital Single Lens Reflex Camera) หมายถึง กล้องถ่ายภาพแบบดิจิทัลซึ่งภาพที่ปรากฏในช่องมองภาพเป็นภาพที่เกิดจากแสงจากวัตถุผ่านเลนส์กล้องแล้วสะท้อนด้วยกระจกและปริซึมห้าเหลี่ยมผ่านช่องมองภาพ ขณะบันทึกภาพกล้องจะยกกระจกเงาสะท้อนภาพขึ้นทำให้แสงจากวัตถุไปตกบนฉากรซึ่งเป็นเซนเซอร์ซีมอส (CMOS Sensor) หรือเซนเซอร์ซีซีดี (CCD Sensor)

บทที่ 2

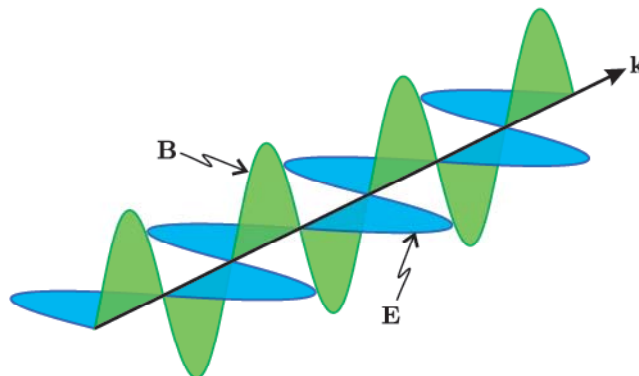
ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- 2.1 ธรรมชาติของแสง
- 2.2 การแทรกสอดของแสง
- 2.3 การเลี้ยวเบนของแสง
- 2.4 เลนส์และการเกิดภาพ
- 2.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดความเข้มแสง
- 2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธรรมชาติของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นสนามแม่เหล็ก ($\vec{B}$) และสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) ซึ่งมีทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตั้งฉากกัน และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของแสง ดังภาพประกอบ 1

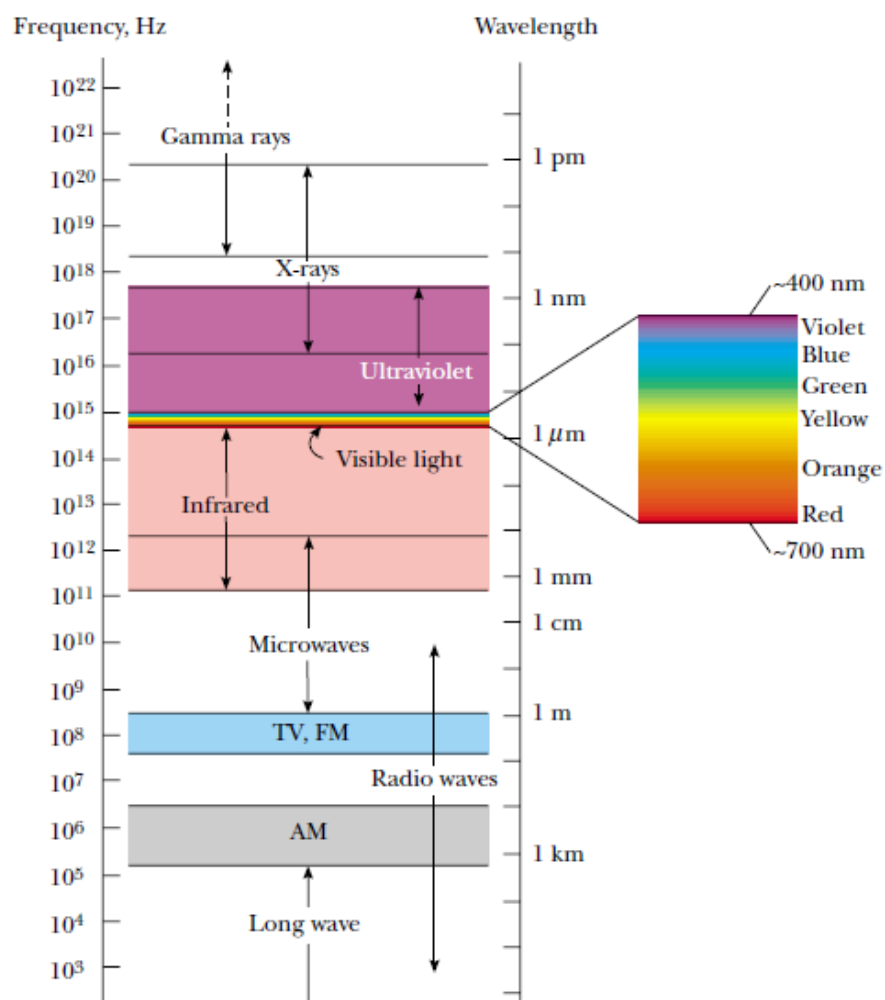


ภาพประกอบ 1 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีสนามแม่เหล็ก ($\vec{B}$) และสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) ตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของแสง

ที่มา : Justin Peatross; & Michael Ware. (2008). *Physics of light and Optics*. P.39.
(Online).

2.1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีหลายชนิดขึ้นกับความยาวคลื่นหรือความถี่ของคลื่น โดยหน่วยของความยาวคลื่นแสงคือ นาโนเมตร(Nanometer) และเรียกความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสงว่า สเปกตรัม (Spectrum) ของแสง ซึ่งสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะครอบคลุมความยาวคลื่นและความถี่ค่อนข้างกว้างตั้งแต่ คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรด แสง รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา แสดงดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่น และความถี่แตกต่างกัน

ที่มา : Raymond A. Serway; & John W. Jewett, Jr. (2004). *Physics for Scientists and Engineers 6th*. p. 1081.

2.1.2 ความยาวคลื่นแสง

คลื่นแสงจะมีความยาวคลื่นในช่วงที่แตกต่างกันออกไป โดยความยาวคลื่นแสงที่สั้นที่สุดที่ตาของมนุษย์สามารถมองเห็นได้ คือ ความยาวคลื่นประมาณ 400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรัมของแสงสีม่วง และความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดที่ตาของมนุษย์สามารถมองเห็นได้ คือ ความยาวคลื่นประมาณ 700 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรัมของแสงสีแดง โดยเรียก ช่วงคลื่นแสงซึ่งอยู่ในขอบเขตที่กล่าวมานี้ว่า สเปกตรัมที่ตามองเห็นได้ (Visible Spectrum) แสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 แสดงสเปกตรัมแสงที่ตามองเห็นได้

สเปกตรัมแสง	ความยาวคลื่นแสง (นาโนเมตร)
แสงสีม่วง	400 – 440 นาโนเมตร
แสงสีน้ำเงิน	440 – 480 นาโนเมตร
แสงสีเขียว	480 – 560 นาโนเมตร
แสงสีเหลือง	560 – 590 นาโนเมตร
แสงสีส้ม	590 – 630 นาโนเมตร
แสงสีแดง	630 – 700 นาโนเมตร

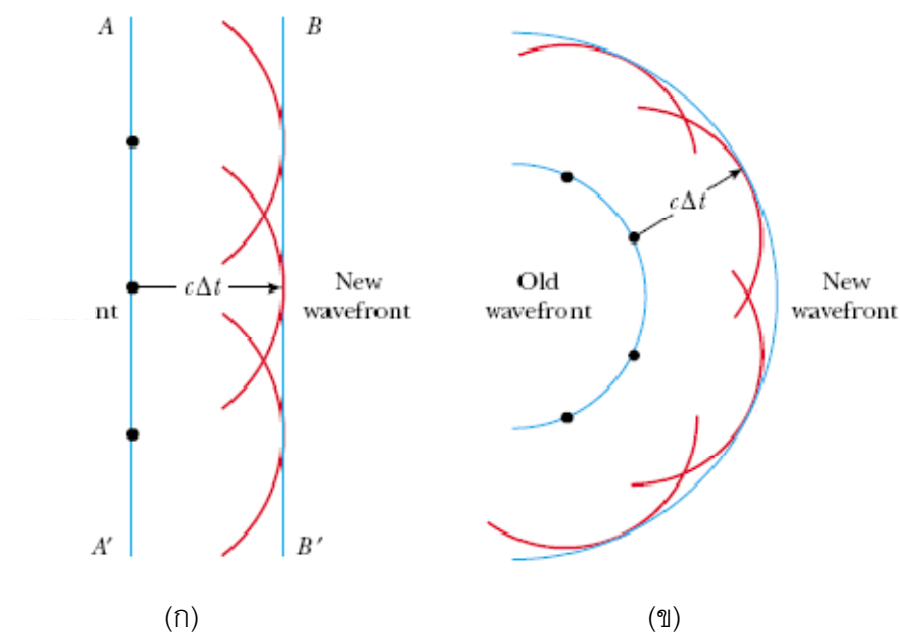
ที่มา : ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. (2543). ฟิสิกส์ 2 เล่ม 2. หน้า 6-6.

2.1.3 หลักการของฮอยเกนส์ (Huygens' Principle)

หลักการของฮอยเกนส์ มีหลักการโดยทั่วไปเกี่ยวกับการสร้างภาพทางเรขาคณิตเพื่ออธิบายถึงการเกิดหน้าคลื่นใหม่ อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากหน้าคลื่นที่เกิดขึ้นมาก่อนแล้ว จึงถือว่าเป็นกระบวนการเกิดหน้าคลื่นตามเวลา ขณะที่คลื่นแผ่ออกจากต้นกำเนิดของคลื่นแหล่งหนึ่งนั่นเอง

อาจกล่าวหลักการของฮอยเกนส์ได้ว่า “ทุกๆจุดบนหน้าคลื่นอาจถือว่าเป็นต้นกำเนิดของคลื่นทุติยภูมิ (Secondary Wave) ซึ่งแผ่ออกไปทุกทิศทางด้วยความเร็วเท่าเดิมเมื่ออยู่ในตัวกลางเดิม ตำแหน่งของหน้าคลื่นใหม่ภายหลังเวลา t จะเป็นผิวสัมผัสกับลูกคลื่นใหม่เหล่านี้”¹ แสดงหลักการของฮอยเกนส์ให้เห็นดังภาพประกอบ 3

¹ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2547). ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 2. หน้า 271-272.



ภาพประกอบ 3 แสดงการเกิดหน้าคลื่นใหม่ (BB') ณ เวลา Δt จากหน้าคลื่นเดิม (AA')
 (ก) คลื่นระนาบ (ข) คลื่นทรงกลม

ที่มา : Raymond A. Serway; & John W. Jewett, Jr. (2004). *op. cit.* p. 1108.

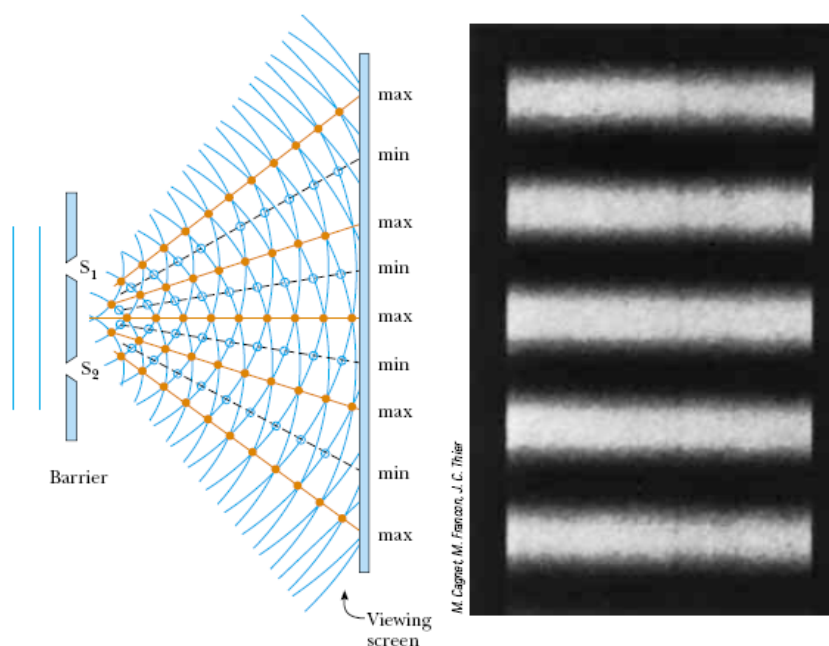
จากภาพประกอบ 3 (ก) และ (ข) พิจารณาหน้าคลื่นเดิม AA' ที่เคลื่อนที่ไปทางด้านขวา เมื่อเวลาผ่านไป Δt เราสามารถหาระยะทางที่หน้าคลื่นเดิม AA' เคลื่อนที่ได้เท่ากับ $c\Delta t$ เมื่อ c เป็นความเร็วของคลื่น เส้นสัมผัสกับหน้าคลื่นเหล่านี้จะเป็นหน้าคลื่นใหม่ BB'

2.2 การแทรกสอดของแสง (Interference of Light)

การแทรกสอดของแสง เป็นคุณสมบัติหนึ่งของแสงเกิดขึ้นเมื่อคลื่นแสงตั้งแต่สองขบวน หรือมากกว่าเคลื่อนที่ผ่านจุดเดียวกัน เกิดการแทรกสอดแบบเสริม(Constructive Interference) และการแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive Interference)

2.2.1 การทดลองสลิตคู่ของยัง (Young's Double-slit Experiment)

ในปี ค.ศ.1801 โทมัส ยัง (Thomas Young) ได้ทำการทดลองแสดงการแทรกสอดของแสงเพื่อพิสูจน์ว่าแสงเป็นคลื่น โดยใช้คลื่นแสงระนาบผ่านช่องสลิต S_1 และ S_2 ซึ่ง สลิต S_1 และ S_2 นี้จะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสงอาพันธ์ (Coherent Source) ดังนั้นแสงจากสลิตทั้งคู่จะไปตกกระทบบนที่ฉาก ทำให้เกิดริ้วมืด (Dark Fringe) และริ้วสว่าง (Bright Fringe) สลับกัน เมื่อแสงจาก สลิต S_1 และ S_2 ไปตกกระทบบนฉากจะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมเกิดขึ้นที่ริ้วสว่าง และคลื่นแสงแทรกสอดแบบหักล้างที่ตำแหน่งใดๆบนฉากจะปรากฏเป็นริ้วมืด แสดงดังภาพประกอบ 4

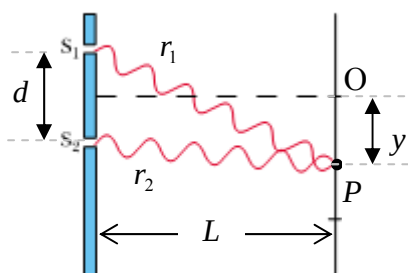


ภาพประกอบ 4 แสดงการทดลองสลิตคู่ของยัง

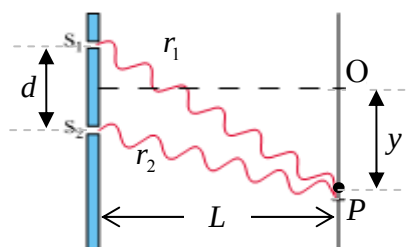
ที่มา: Raymond A. Serway; & John W. Jewett, Jr. (2004). *op. cit.* p. 1179.

2.2.2 การกระจายความเข้มแสงของรูปแบบการแทรกสอดจากสลิตคู่

การศึกษาการกระจายความเข้มแสงของริ้วสว่างที่เกิดจากการแทรกสอดจากสลิตคู่ โดยกำหนดให้ต้นกำเนิดแสงสองแหล่ง S_1 และ S_2 เป็นต้นกำเนิดแสงอาพันธ์ ที่มีความถี่เชิงมุม ω เท่ากัน และมีค่าความต่างเฟส (Phase Difference) เป็น ϕ โดยขนาดของสนามไฟฟ้า E ทั้งหมด ที่จุด P บนฉาก ในภาพประกอบ 5 ซึ่งเป็นผลมาจากการซ้อนทับของคลื่น ถ้าให้คลื่นทั้งสองมีแอมพลิจูด (Amplitude) E_0



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 5 แสดงรูปแบบการแทรกสอดจากสลิตคู่ S_1 และ S_2 (ก) การแทรกสอดแบบหักล้าง
(ข) การแทรกสอดแบบเสริม

ที่มา: Raymond A. Serway; & John W. Jewett, Jr. (2004). *op. cit.* p. 1182.

ขนาดของสนามไฟฟ้าจากคลื่นทั้งสองบนฉากที่จุด P คือ

$$E_1 = E_0 \sin \omega t \text{ และ } E_2 = E_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (2.1)$$

ความต่างเฟส ϕ ของคลื่นที่ผ่านสลิตทั้งสองที่จุด P จะขึ้นอยู่กับความต่างระยะทาง (Path Difference)¹ นั่นคือ

$$\Delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta \quad (2.2)$$

¹Raymond A. Serway; & John W. Jewett, Jr. (2004). *op. cit.* p. 1182.

ซึ่งค่าความต่างระยะทาง (Δ) นี้จะเป็นปริมาณที่ทำให้เราทราบว่าคลื่นมีเฟสตรงกันหรือไม่ เมื่อคลื่นตกกระทบบนที่จุด P ถ้า $\Delta = 0$ หรือเท่ากับจำนวนเต็มของความยาวคลื่น (λ) คลื่นแสงทั้งสองจะมีเฟสตรงกัน จึงเกิดการแทรกสอดแบบเสริม ดังนั้นเงื่อนไขของการเกิดริ้วสว่างที่จุด P คือ

$$\Delta = d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.3)$$

จำนวน m คือ เลขอันดับ (Order Number) ริ้วสว่างที่กึ่งกลางจะเกิดเมื่อ $\theta = 0$ ($m = 0$) เรียกว่าค่ามากที่สุดอันดับศูนย์ (Zeroth-order Maximum) ค่ามากที่สุดอันดับที่หนึ่งทั้งสองด้านจะเกิดขึ้นเมื่อ $m = \pm 1$ และอันดับอื่นๆจะเกิดขึ้นตามค่าของ m และค่าความต่างระยะทางเป็นจำนวนเลขคี่ของครึ่งความยาวคลื่น $\lambda/2$ คลื่นทั้งสองจะถึงจุด P โดยมีเฟสต่างกัน 180° องศา ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน จึงทำให้เกิดริ้วมืด ดังนั้น

$$\Delta = d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.4)$$

ความต่างเฟสที่จุด P จากภาพประกอบ 5 (ข) จะขึ้นอยู่กับค่าความต่างระยะทางที่เท่ากับ λ ซึ่งจะมีค่าตรงกับค่าความต่างเฟส 2π และจากภาพประกอบ 5 (ก) ค่าความต่างระยะทางเท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$ จะมีค่าตรงกับค่าความต่างเฟส π ดังนั้นจึงได้อัตราส่วนระหว่างความต่างระยะทางและความต่างเฟสเป็น

$$\frac{\Delta}{\phi} = \frac{\lambda}{2\pi}$$

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (2.5)$$

จากสมการ(2.1) ทำให้ได้ขนาดของสนามไฟฟ้ารวมที่จุด P เป็น

$$E_p = E_1 + E_2 = E_0 [\sin \omega t + \sin(\omega t + \phi)] \quad (2.6)$$

จาก $\sin A + \sin B = 2 \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \cos\left(\frac{A-B}{2}\right)$

กำหนดให้ $A = \omega t + \phi$ และ $B = \omega t$ ดังนั้นเขียนสมการ (2.6) ใหม่ได้เป็น

$$E_p = 2E_0 \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.7)$$

พิจารณาสมการ(2.7) ถ้าค่า $\phi = 0, 2\pi, 4\pi \dots$ ขนาดของสนามไฟฟ้าที่จุด P จะเท่ากับ $2E_0$ ซึ่งตรงกับค่าสูงสุดของการแทรกสอดกันแบบเสริมของคลื่น (Maximum Constructive Interference) และถ้าค่า $\phi = \pi, 3\pi, 5\pi \dots$ ขนาดของสนามไฟฟ้าที่จุด P จะเท่ากับศูนย์ ซึ่งตรงกับค่าหักล้างกันหมดของการแทรกสอดกันแบบหักล้าง (Total Destructive Interference) ของคลื่น

หาความเข้มแสง (Light Intensity) ที่จุด P โดยใช้ทฤษฎีคลื่นที่มีความเข้มเป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้ายกกำลังสองคือ

$$I \propto E_p^2 = 4E_0^2 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin^2\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.8)$$

เนื่องจากเครื่องมือวัดความเข้มแสงมักจะออกแบบไว้วัดค่าเฉลี่ยกับเวลาของความเข้มแสง¹ ค่าเฉลี่ยกับเวลาของ $\sin^2\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right)$ จะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}$ ดังนั้นจึงเขียนสมการ (2.8) ใหม่ได้ว่า

$$I = I_{\max} \cos^2 \frac{\phi}{2} \quad (2.9)$$

เมื่อ $I_{\max}$ คือค่าความเข้มสูงสุดบนฉากมีค่าเท่ากับ $2E_0^2$ แทนค่า ϕ ในสมการ(2.5) ลงในสมการ (2.9) จะได้

$$I = I_{\max} \cos^2\left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}\right) \quad (2.10)$$

¹Raymond A. Serway; & John W. Jewett, Jr. (2004). *op. cit.* p. 1183.

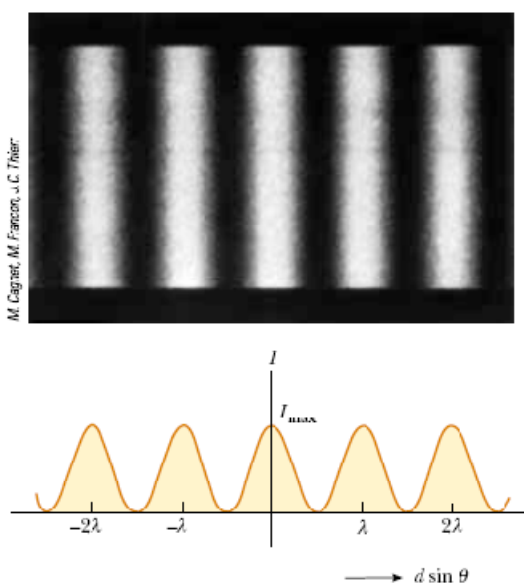
เนื่องจาก $\sin \theta \approx \theta = \frac{y}{L}$ สมการ(2.10) จึงกลายเป็น

$$I \approx I_{\max} \cos^2 \left(\frac{\pi d}{\lambda L} y \right) \quad (2.11)$$

ดังนั้นการแทรกสอดแบบเสริมกันจะมีค่าความเข้มแสงมากที่สุดก็ต่อเมื่อ $\frac{\pi d y}{\lambda L}$ เป็นเลขจำนวนเต็ม

ของ π ซึ่งหมายถึง $y = \frac{\lambda L m}{d}$

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความเข้มแสงกับระยะ $d \sin \theta$ แสดงดังภาพประกอบ 6



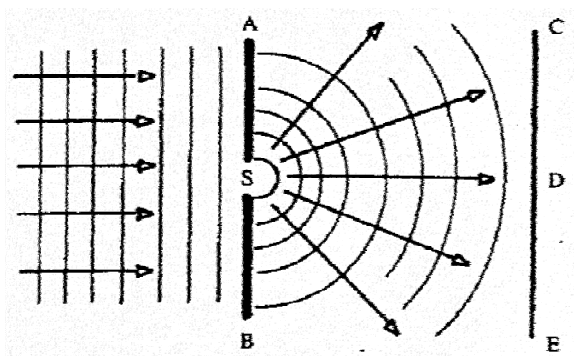
ภาพประกอบ 6 แสดงค่าความเข้มแสงกับระยะ $d \sin \theta$ สำหรับรูปแบบการแทรกสอดจากสลิตคู่เมื่อฉากอยู่ไกลจากสลิตทั้งคู่ ($L \gg d$)

ที่มา: Raymond A. Serway; & John W. Jewett, Jr. (2004). *op. cit.* p. 1183.

รูปแบบของการแทรกสอดจะประกอบด้วยริ้วสว่างที่สว่างเท่าๆกันห่างกันเป็นระยะเท่าๆกัน ซึ่งในกรณีนี้เป็นกรณีที่ว่า $L \gg d$ มากๆ

2.3 การเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction of Light)

การเลี้ยวเบนจะปรากฏให้เห็นเมื่อคลื่นถูกกีดขวาง สิ่งกีดขวางอาจเป็นฉาก(AB) ซึ่งมีรูเปิดเล็กๆ(S) ดังภาพประกอบ 7 หรือช่องแคบที่จะปล่อยให้คลื่นผ่านไปได้ หรือเป็นวัตถุขนาดเล็ก เช่น ลวด หรือ แผ่นกลม ซึ่งกั้นคลื่นบางส่วนไม่ให้ผ่านไปได้ การเลี้ยวเบนจะเกิดขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อขนาดของช่องแคบ(S)มีค่าเข้าใกล้ความยาวคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านช่องแคบนั้น



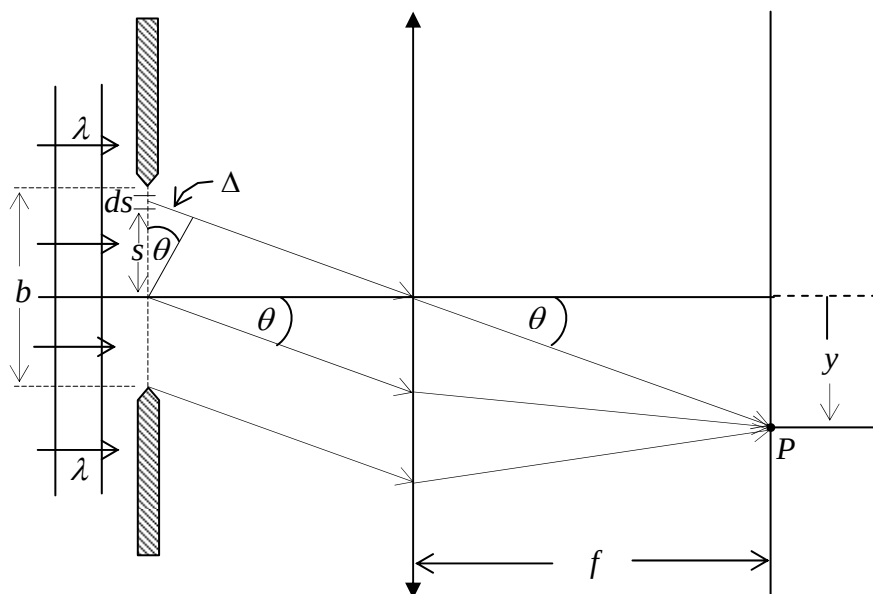
ภาพประกอบ 7 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของคลื่นผ่านสิ่งกีดขวาง

ที่มา : ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2547). ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 2.

หน้า 318.

2.3.1 การเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer Diffraction)

การเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ จะเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ฉากอยู่ห่างจากสลิตมากพอที่จะพิจารณาว่า แสงจากต้นกำเนิดที่เคลื่อนที่มายังสลิตเป็นลำขนานได้ และหน้าคลื่นเป็นคลื่นระนาบ ในทางปฏิบัติถ้าใช้ต้นกำเนิดแสงโดยทั่วไปซึ่งให้สเปกตรัมแบบเส้น เช่นหลอดโซเดียมหรือหลอดไอปรอท จะต้องใช้เลนส์ขนานวางหลังช่องแคบเพื่อโฟกัสให้ภาพตกบนฉากพอดี ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 แสดงการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ของลำแสงขนานผ่านสลิตเดี่ยว

ที่มา: Pedrotti, Frank L., S.J; Pedrotti, Leo S; & Pedrotti, Leo M. (2007). *Introduction to optics*.

3^d. p. 269.

เมื่อคลื่นแสงเคลื่อนที่มาถึงสลิตเดี่ยวซึ่งมีความกว้าง b จากหลักการของฮอยเกนส์ (Huygens' Principle) ถือได้ว่าทุกๆจุดบนหน้าคลื่นนั้นเป็นต้นกำเนิดของคลื่นชุดใหม่ที่มีเฟสตรงกัน คลื่นแสงจากต้นกำเนิดเหล่านี้เมื่อไปตกบนฉากก็จะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือหักล้างกัน ขึ้นอยู่กับความต่างระยะทางที่คลื่นแสงเคลื่อนที่ไปถึงฉาก ถ้าแบ่งสลิตเดี่ยวซึ่งมีความกว้าง b ออกเป็น 2 ส่วน จะได้ความกว้างส่วนละ $\frac{b}{2}$ ลำแสงขนานจากสลิตเดี่ยวจะมีความต่างระยะทางเป็น Δ โดยที่ θ คือมุมที่ลำแสงเบนออกจากแนวเดิมทำให้เกิดริ้วมืดบนฉากเมื่อ

$$\Delta = \frac{b}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2} \quad (2.12)$$

หรือ
$$\sin \theta = \frac{\lambda}{b} \quad (2.13)$$

ถ้าแบ่งสลิตออกเป็น 4 ส่วน 6 ส่วน 8 ส่วน และ 10 ส่วนตามลำดับรั้วมืดบนฉากจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\sin \theta = \frac{2\lambda}{b}, \frac{3\lambda}{b}, \frac{4\lambda}{b}, \frac{5\lambda}{b}, \dots \quad (2.14)$$

ดังนั้นเขียนสมการของการเกิดรั้วมืดได้เป็น

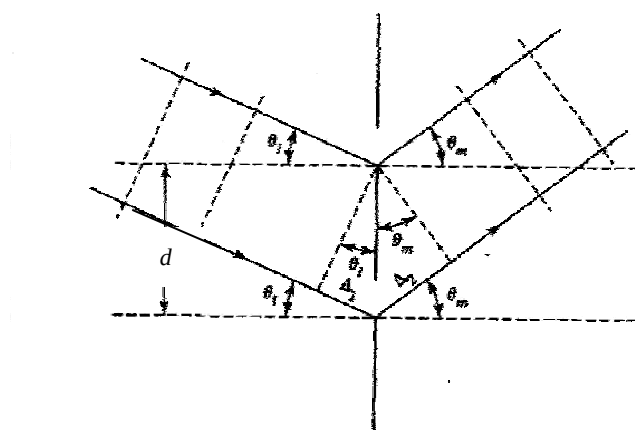
$$b \sin \theta = m\lambda \quad \text{เมื่อ } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (2.15)$$

ระหว่างรั้วมืดจะมีรั้วสว่าง และตรงตำแหน่งที่ $\sin \theta = 0$ จะเป็นรั้วสว่างกลาง (Central Bright Fringe) ที่มีความกว้างเป็นสองเท่าของรั้วสว่างลำดับอื่นๆ และมีความเข้มสูงสุด ซึ่งรั้วสว่างอันดับอื่นๆจะมีความเข้มลดลงเรื่อยๆตามลำดับ

2.3.2 เกรตติง (Grating)

เกรตติง เป็นอุปกรณ์ทางแสงที่มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์ต้นกำเนิดแสง เกรตติง ประกอบด้วยช่องเล็กยาวขนานกันจำนวนมากโดยแต่ละช่องมีระยะห่างเท่าๆกัน แสงที่ผ่านเกรตติงจะเกิดการเลี้ยวเบนซึ่งเป็นผลจากการเสริมและการหักล้างของแสงในทิศทางที่ขึ้นกับความยาวคลื่น ทำให้ได้สเปกตรัมแสงที่มีความยาวคลื่น (λ) แตกต่างกัน

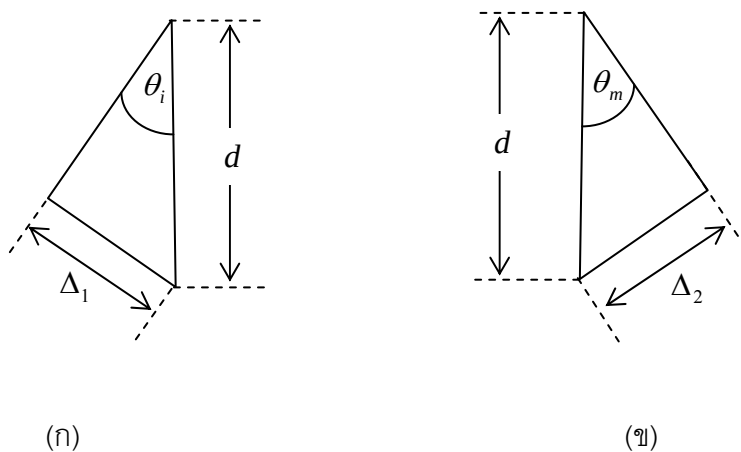
พิจารณาเกรตติงซึ่งมีระยะห่างของช่องสลิตห่างกันเป็น d และมีคลื่นแสงที่มีลักษณะเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ตกกระทบโดยทำมุม θ_i และเกิดการเลี้ยวเบนด้วยมุม θ_m และมีความต่างระยะทาง (Path Difference " Δ ") ของคลื่นแสง ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นแสงที่มีลักษณะเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ตกกระทบบนเกรตติง

ที่มา : Pedrotti, Frank L., S. J; Pedrotti, Leo S; & Pedrotti, Leo M. (2007). *op cit.* p 293.

ความต่างระยะทาง (Δ) ของคลื่นแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงจากภาพประกอบ 9 อาจเขียนได้ใหม่ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 แสดงความต่างระยะทาง (Path Difference " Δ ") ของเกรตติง

จากภาพประกอบ 10 (ก) และ (ข) สามารถหาความต่างระยะทางที่ 1 (Δ_1) และความต่างระยะทางที่ 2 (Δ_2) ได้เป็น $\Delta_1 = d \sin \theta_i$ และ $\Delta_2 = d \sin \theta_m$ ตามลำดับ ดังนั้นสามารถเขียนความต่างระยะทางของเกรตติงนี้ได้เป็น

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = d \sin \theta_i + d \sin \theta_m \quad (2.16)$$

กำหนดให้ $\Delta = m\lambda$ ทำให้เขียนสมการของเกรตติงจาก (2.16) ใหม่ได้เป็น

$$d(\sin \theta_i + \sin \theta_m) = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.17)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างช่องสลิตของเกรตติง
 m คือ อันดับการเลี้ยวเบน
 θ_i คือ มุมตกกระทบ
 θ_m คือ มุมเลี้ยวเบนอันดับที่ m
 λ คือ ความยาวคลื่นตกกระทบ

กรณีเป็นแสงที่มีความถี่เดียว (Monochromatic Light) ที่มีความยาวคลื่นเป็น λ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตั้งฉากกับเกรตติง มุมที่แสงตกกระทบจะมีค่าเป็นศูนย์ ($\theta_i = 0$) ดังนั้นเราสามารถบอกอันดับของเส้นสว่างต่างๆดังกล่าวจากค่าของ m ซึ่งเท่ากับ $\pm 1, \pm 2, \dots$ จากสมการ (2.17) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

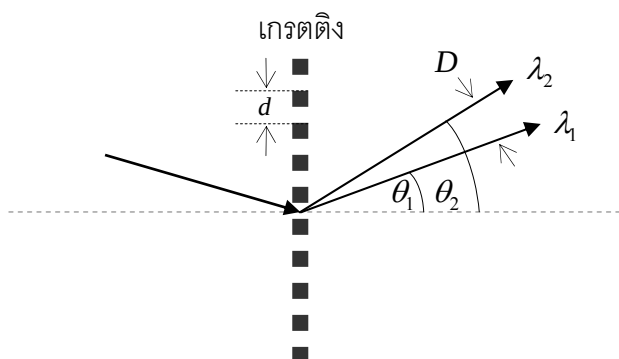
$$m = \frac{d \sin \theta_m}{\lambda} \quad (2.18)$$

และสามารถหามุมเลี้ยวเบน θ_m ของแสงที่มีความถี่เดียวที่ตกกระทบกับเกรตติงได้เป็น

$$\theta_m = \sin^{-1} \frac{m}{d} \lambda \quad (2.19)$$

2.3.2.1 การกระจาย (Dispersion, D)

ถ้ามีแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน ($\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$) เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง ก็จะทำให้มุมเลี้ยวเบนแตกต่างกัน ($\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$) ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 แสดงมุมเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงของแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน

การกระจายแสงของเกรตติงนิยามว่า

$$D = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \quad (2.20)$$

การใช้งานเกรตติงเพื่อแยกความยาวคลื่นที่แตกต่างกันเล็กน้อยนั้น เกรตติงจะต้องกระจายแสงที่เลี้ยวเบนออกเป็นเส้นที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่น

จากสมการ

$$m\lambda = d \sin \theta \quad (2.21)$$

ทำการหาอนุพันธ์สมการ(2.21) เทียบกับ θ

จะได้

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta} \quad (2.22)$$

ดังนั้น

$$D = \frac{m}{d \cos \theta} \quad (2.23)$$

เมื่อ D คือ การกระจายแสงของเกรตติง

และ d คือ ระยะห่างระหว่างช่องสลิตของเกรตติง

2.3.2.2 กำลังแยก (Resolving Power, R)

การแยกเส้นสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกัน ความกว้างของเส้นสเปกตรัมจะต้องแคบมากเท่าที่จะเป็นไปได้ ฉะนั้นเกรตติงจะต้องมีกำลังแยกมาก จึงจะสามารถแยกเส้นสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกันได้ ซึ่งสามารถหาลำดับกำลังแยกของเกรตติงได้จาก

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (2.24)$$

เมื่อ R คือ กำลังแยกของเกรตติง

λ คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นสเปกตรัม 2 เส้นที่แยกออกจากกัน

และ $\Delta\lambda$ คือ ความต่างของความยาวคลื่นค่าต่ำสุดที่สามารถสังเกตได้จากเกรตติง

พิจารณายอด (Peak) ของแถบการเลี้ยวเบนของเกรตติงที่มีจำนวนสลิต N ช่อง กำลังแยกของเกรตติงสามารถเขียนในรูปของ

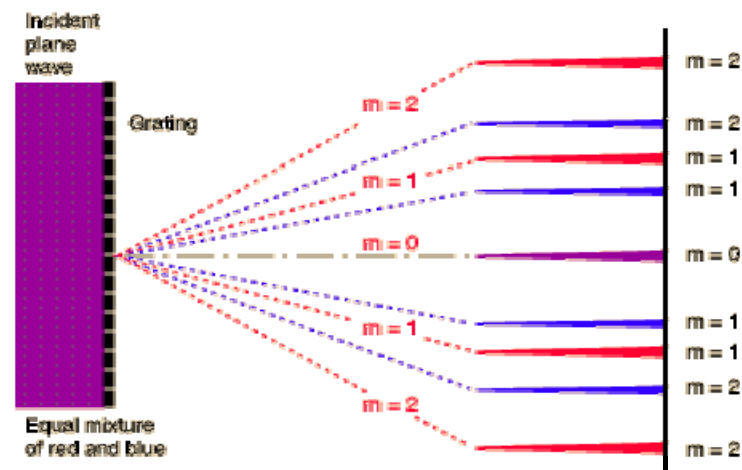
$$R = Nm \quad (2.25)$$

เมื่อ N คือ จำนวนเส้นหรือจำนวนช่องของเกรตติง

และ m คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน

2.3.2.3 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านเกรตติง

แสงที่ผ่านเกรตติงจะเกิดการเลี้ยวเบนคล้ายกับกรณีของสลิตคู่ แต่ริ้วสว่างจะแคบกว่าสลิตคู่ เมื่อมีแสงซึ่งประกอบไปด้วยความยาวคลื่นแสงหลายๆค่า มาตกกระทบบนเกรตติงแล้วผ่านช่องสลิต จะเกิดการเลี้ยวเบนจากแนวกลางออกไปเป็นมุมต่างๆกัน ซึ่งจะให้ตำแหน่งความเข้มสูงสุดที่แตกต่างกันขึ้นกับความยาวคลื่น เรียกว่าสเปกตรัมของแสงที่เลี้ยวเบนแต่ละความยาวคลื่นที่ลำดับต่างๆกัน ($m = 1, 2, 3, \dots$) ดังภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 แสดงลำดับการเลี้ยวเบนของสเปกตรัมแสง

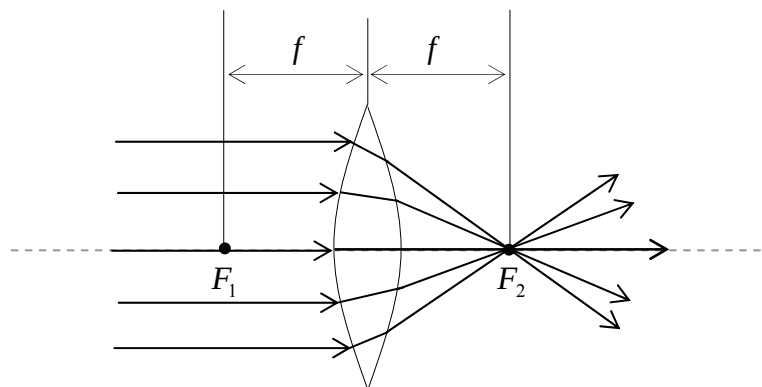
ที่มา: Richard Fitzpatrick. (2003). *Electromagnetism and Optics*. (Online).

2.4 เลนส์และการเกิดภาพ

2.4.1 เลนส์ (Lens)

เลนส์เป็นอุปกรณ์ทางแสงที่มีผิวหักเหสองผิว เลนส์ที่มีผิวทรงกลมสองผิวอยู่รวมกัน และอยู่ชิดกันมากจนไม่ต้องพิจารณาระยะห่างระหว่างผิวทั้งสองเรียกว่า เลนส์บาง (Thin Lens) ซึ่งเลนส์จะมีลักษณะแตกต่างกันตามรูปร่างของผิวหักเหของเลนส์

ถ้ามีลำแสงตกกระทบบเลนส์นูนสองหน้าอันหนึ่งตามแนวขนานกับแกนมุขสำคัญ ลำแสงที่ผ่านออกจากเลนส์นี้จะลู่เข้าไปตัดกันที่จุดโฟกัส F_2 ของเลนส์ และมีระยะห่างจากศูนย์กลางของเลนส์เท่ากับความยาวโฟกัส (f) ดังภาพประกอบ 13



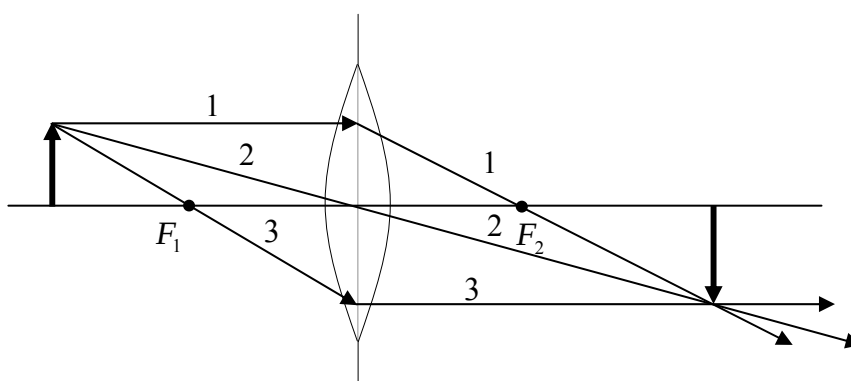
ภาพประกอบ 13 แสดงลำแสงขนานที่ผ่านเลนส์นูน

2.4.2 การเกิดภาพจากเลนส์นูน

สามารถหาตำแหน่งการเกิดภาพจากเลนส์นูนได้โดยวิธีการเขียนรูป ซึ่งมีหลักการเกี่ยวกับการเขียนแนวรังสีของแสงเพื่อหาตำแหน่งของการเกิดภาพ ดังนี้

1. รังสีที่ขนานกับแกนमुखสำคัญ(1) คือรังสีที่ตกกระทบกับเลนส์โดยจะขนานกับแกนमुखสำคัญ และเมื่อหักเหออกจากเลนส์จะผ่านจุด F_2 เสมอ
2. รังสีที่ผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์(2) คือรังสีที่ตกกระทบกับเลนส์โดยผ่านจุดกึ่งกลางของเลนส์โดยจะไม่เบี่ยงทิศทาง
3. รังสีที่ผ่านจุดโฟกัส F_1 (3) คือรังสีที่ตกกระทบแล้วหักเหผ่านเลนส์ออกไปจะขนานกับแกนमुखสำคัญ

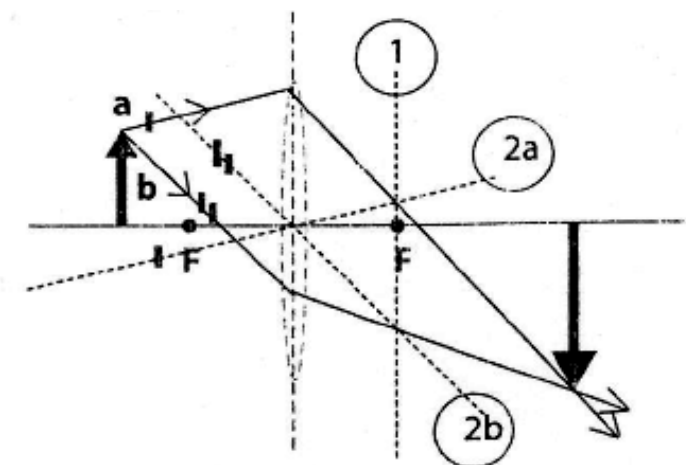
การเกิดภาพจากเลนส์นูน ใช้วิธีการตามหลักการ 2.4.2 โดยใช้รังสีของแสง (1) (2) และ (3) ตามลำดับ เมื่อรังสีทั้งสามหักเหผ่านเลนส์ออกไปตัดกันที่ตำแหน่งใดตำแหน่งนั้นถือได้ว่าเป็นตำแหน่งของการเกิดภาพ ดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 แสดงตำแหน่งการเกิดภาพจากเลนส์นูนโดยวิธีการเขียนรูป

การหาตำแหน่งของการเกิดภาพนอกจากใช้วิธีการตามข้อ 2.4.2 แล้วยังสามารถหาตำแหน่งของการเกิดภาพโดยวิธีการของศุภพิทยาภรณ์และคณะ¹ โดยการเขียนรังสีของแสงผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์และให้ขนานกับรังสีของแสงเริ่มต้นจากนั้นเขียนลำแสงที่หักเหจากเลนส์ไปตัดกันที่ระนาบโฟกัส ดังภาพประกอบ 15

¹Supattayaporn, D; Panijpan, B; & Emarat, N. (2010). Can We Trace Arbitrary Rays To locate an Image Formed by a Thin Lens?. *The Physics Teacher*. 48(4): p. 256-257.



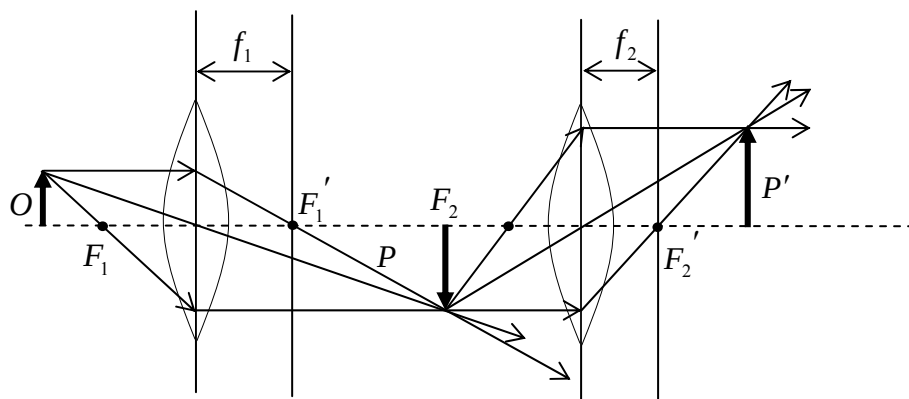
ภาพประกอบ 15 แสดงการเกิดภาพจากเลนส์เดี่ยว ด้วยวิธีการของศุภพิทยาภรณ์ และคณะ

ที่มา: Suppattayaporn, D; Panijipan, B; & Emarat, N. (2010). Can We Trace Arbitrary Rays To locate an Image Formed by a Thin Lens?. *The Physics Teacher*. 48(4): p. 256.

จากภาพประกอบ 15 มีรังสีของแสงจำนวน 2 รังสีคือรังสี a และรังสี b ตกกระทบบกับเลนส์เดี่ยว สามารถหาตำแหน่งภาพจากรังสี a และ b โดยเขียนรังสี 2a ให้ขนานกับรังสี a โดยเขียนให้ตัดผ่านกึ่งกลางเลนส์และระนาบโฟกัส จากนั้นให้เขียนรังสีหักเห a ตัดกับรังสี 2a ที่ระนาบโฟกัส ส่วนรังสี b ก็ให้ทำในลักษณะเดียวกันนี้ ซึ่งสุดท้ายแล้วรังสีหักเห b จะไปตัดกับรังสีหักเห a ซึ่งการตัดกันระหว่างรังสีหักเห a และ b ที่ตำแหน่งใดๆ ตำแหน่งดังกล่าวจะเป็นตำแหน่งของการเกิดภาพจากรังสีตกกระทบบ a และ b

2.4.2.1 การเกิดภาพจากเลนส์มากกว่าเลนส์เดี่ยว

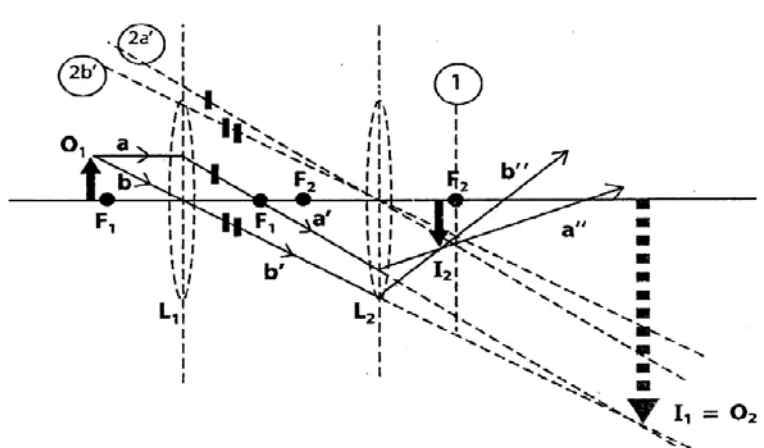
การศึกษาทางเดินแสงจากการทดลองใช้เลนส์นูนมากกว่าเลนส์เดี่ยวในการเกิดภาพโดยใช้หลักการ ตำแหน่งการเกิดภาพของเลนส์ชิ้นแรกจะเป็นตำแหน่งวัตถุสำหรับเลนส์ชิ้นที่ 2 ดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 แสดงการเกิดภาพจากเลนส์นูนมากกว่าเลนส์เดี่ยว

การเกิดภาพจากเลนส์นูนมากกว่าเลนส์เดียวนั้น ดังภาพประกอบ 16 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งภาพจากเลนส์ชิ้นที่ 1 ที่ตำแหน่ง P จะเป็นตำแหน่งวัตถุสำหรับเลนส์ชิ้นที่ 2 แล้วทำให้เกิดภาพจากเลนส์ชิ้นที่ 2 ที่ตำแหน่ง P' ซึ่งถ้ามีเลนส์เพิ่มเป็นชิ้นที่ 3 และ 4 หรือมากกว่าก็จะใช้หลักการเดียวกันนี้ในการพิจารณาการเกิดภาพจากเลนส์หลายชิ้น

การหาตำแหน่งของการเกิดภาพจากภาพประกอบ 16 ใช้หลักการเช่นเดียวกับหัวข้อ 2.4.2 แตกต่างกันเพียงมีจำนวนของเลนส์มากกว่า จึงต้องพิจารณาดำเนินการหาตำแหน่งวัตถุของเลนส์ชิ้นถัดไปจากเลนส์ชิ้นแรก แต่ก็ยังคงขั้นตอนการหาตำแหน่งภาพเช่นเดียวกัน นอกเหนือจากหลักการหาตำแหน่งภาพจากวิธีการดังกล่าวนี้แล้วยังสามารถใช้วิธีการของศุภพิทยาภรณ์ และคณะในการหาตำแหน่งการเกิดภาพจากเลนส์มากกว่าเลนส์เดี่ยว ดังภาพประกอบ 17



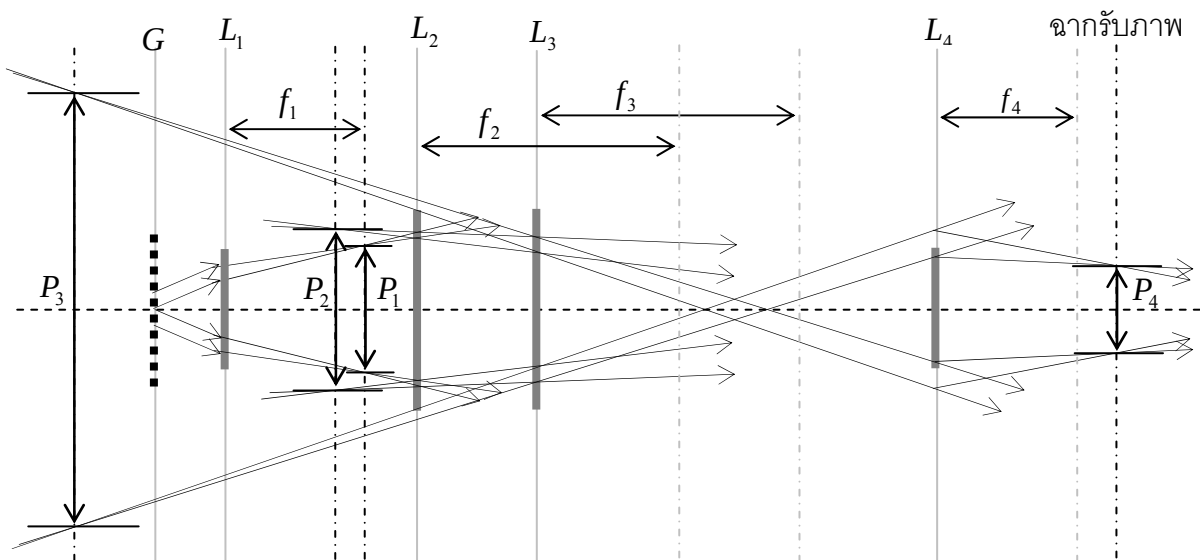
ภาพประกอบ 17 แสดงการเกิดภาพด้วยวิธีการของศุภพิทยาภรณ์และคณะ

ที่มา: Suppattayaporn, D; Panijipan, B; & Emarat, N. (2010). *op. cit.* p.257.

การเกิดภาพจากเลนส์มากกว่าเลนส์เดียวด้วยวิธีการของศุภพิทยาภรณ์ และคณะนั้นให้พิจารณาตามการเกิดภาพจากเลนส์ชั้นเดียวเพียงแต่เลนส์ชั้นถัดไปรังสีตกกระทบเลนส์เป็นรังสี a' และ b' โดยที่รังสี a'' และ b'' จะกลายเป็นรังสีหักเหผ่านเลนส์ชั้นที่ 2 ดังภาพประกอบ 17 ซึ่งรังสีหักเห a' และ b' ไปตัดกันที่ตำแหน่งใดตำแหน่งนั้นจะเป็นตำแหน่งเกิดภาพของเลนส์ชั้นที่ 2 นั้นเอง

2.4.2.2 การคำนวณตำแหน่งรั้วสว่างบนฉากที่เกิดจากแสงผ่านเกรตติงและเลนส์มากกว่า 1 ชั้น

ในการทำให้เกิดภาพรั้วแทรกสอดบนฉากที่มีขนาดจำกัด และมีระยะการเกิดภาพในตำแหน่งที่มีระยะห่างเฉพาะช่วงหนึ่งจากเลนส์ชั้นที่ใกล้กับฉากรับภาพ มีความจำเป็นต้องใช้เลนส์หลายชั้นประกอบกัน การคำนวณตำแหน่งการเกิดภาพรั้วสว่าง ที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงและเลนส์ที่ประกอบกันหลายชั้น แสงขนานที่เข้าสู่เกรตติงโดยทำมุมตั้งฉากกับเกรตติง จะเลี้ยวเบนเป็นลำขนานผ่านเลนส์ชั้นที่ 1 และภาพรั้วสว่างจากเลนส์ชั้นที่ 1 จะเป็นตำแหน่งของต้นกำเนิดแสงสำหรับการเกิดภาพจากเลนส์ชั้นต่อไป พิจารณากรณีการเกิดภาพรั้วสว่างจากการเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงและหักเหผ่านเลนส์จำนวน 4 ชั้น แล้วจึงตกบนฉากรับภาพ โดยแต่ละชั้นมีความยาวโฟกัสและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน การคำนวณและประมาณการตำแหน่งการเกิดภาพรั้วสว่างบนฉากสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการเลนส์บาง ภาพทางเดินแสงผ่านเลนส์ ดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 แสดงภาพทางเดินแสงผ่านเลนส์ของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งรั้วสว่างบนฉากรับภาพ

สมการของเลนส์บาง

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (2.26)$$

เมื่อ u คือ ตำแหน่งวัตถุ
 v คือ ตำแหน่งภาพ
 f คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์

คำนวณการเกิดภาพของเลนส์ทั้ง 4 ชั้น แบ่งการคำนวณออกเป็นขั้นตอนดังนี้

2.4.2.2.1 การเกิดภาพจากเลนส์ 1 ชั้น

แนวรังสีแสงจากการเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงแต่ละความยาวคลื่นจะอยู่ในแนวขนานทำมุม θ กับแกนมุมสำคัญของเลนส์ ลำแสงที่เข้าสู่เลนส์จึงเป็นเหมือนวัตถุอยู่ที่ระยะไกลมาก ดังนั้นจากสมการของเลนส์บาง (2.26) สามารถเขียนสมการของเลนส์ชั้นที่ 1 ได้เป็น

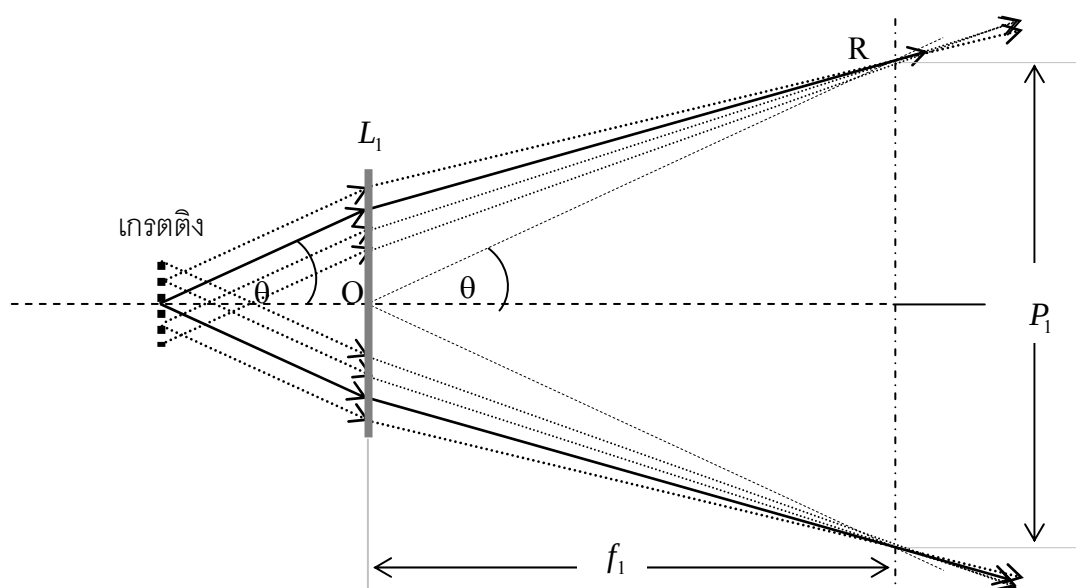
$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{u_1} + \frac{1}{v_1} \quad (2.27)$$

เมื่อ f_1 คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์ชั้นที่ 1
 u_1 คือ ตำแหน่งวัตถุสำหรับเลนส์ชั้นที่ 1
 v_1 คือ ตำแหน่งภาพสำหรับเลนส์ชั้นที่ 1

แทนตำแหน่ง $u_1 = \infty$ จะได้ตำแหน่งเกิดภาพการเลี้ยวเบนห่างจากเลนส์เป็นระยะเท่ากับระยะโฟกัส f และจากการที่ลำแสงเลี้ยวเบนเข้าสู่เลนส์เป็นลำแสงขนาน แนวรังสีแสงที่ผ่านกึ่งกลางเลนส์จะอยู่ในทิศทางเดิม (แนวเส้น OR) ดังภาพประกอบ 19 ดังนั้นตำแหน่งการเกิดภาพจึงอยู่บนแนวรังสีแสงนี้และอยู่บนระนาบโฟกัส ระยะห่างของตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงที่ห่างจากตำแหน่งการเลี้ยวเบนอันดับที่ศูนย์ด้วยเลนส์ชั้นที่ 1 (P_1) คำนวณได้จาก

$$P_1 = 2 f_1 \tan \theta \quad (2.28)$$

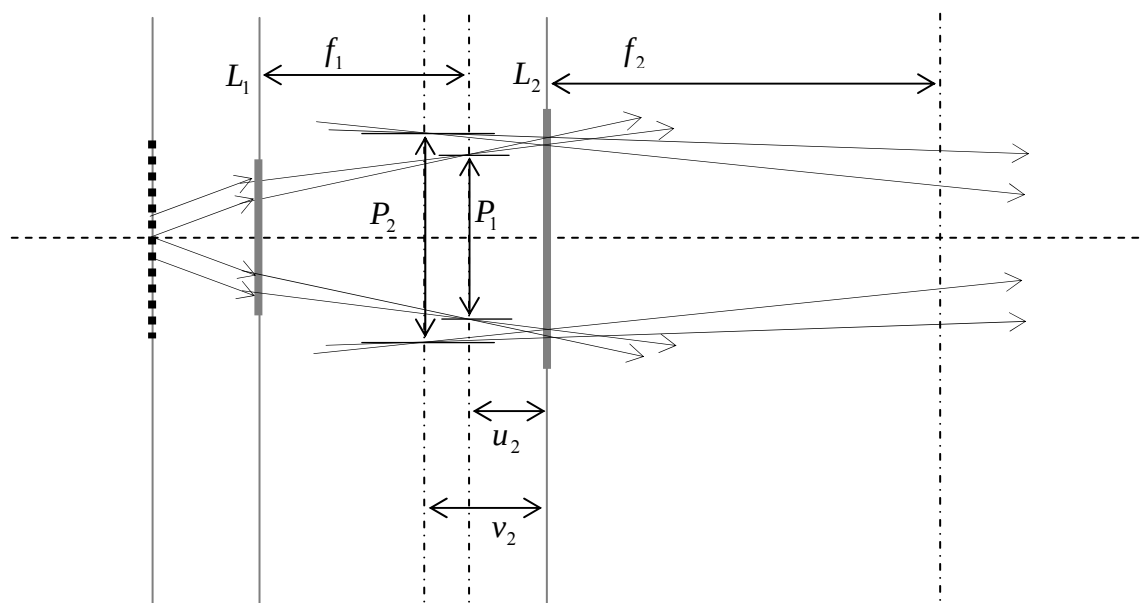
เมื่อ f_1 เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์ชั้นที่ 1



ภาพประกอบ 19 แสดงตำแหน่งเกิดภาพการเลี้ยวเบนจากเลนส์ 1 ขึ้น

2.4.2.2.2 การเกิดภาพจากเลนส์ 2 ขึ้น

การเกิดภาพจากเลนส์ชั้นที่ 2 จะใช้ตำแหน่งภาพที่เกิดจากเลนส์ชั้นที่ 1 เป็นตำแหน่งวัตถุของเลนส์ชั้นที่ 2 ดังภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 แสดงตำแหน่งเกิดภาพการเลี้ยวเบนจากเลนส์ 2 ขึ้น

การคำนวณการเกิดภาพจากเลนส์ 2 ชั้น สามารถคำนวณด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{u_2} + \frac{1}{v_2} \quad (2.29)$$

เมื่อ f_2 คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์ชั้นที่ 2
 u_2 คือ ตำแหน่งวัตถุสำหรับเลนส์ชั้นที่ 2
 v_2 คือ ตำแหน่งภาพสำหรับเลนส์ชั้นที่ 2

กำลังขยายจากเลนส์ชั้นที่ 2 (m_2) หาได้จาก

$$m_2 = \frac{v_2}{u_2} \quad (2.30)$$

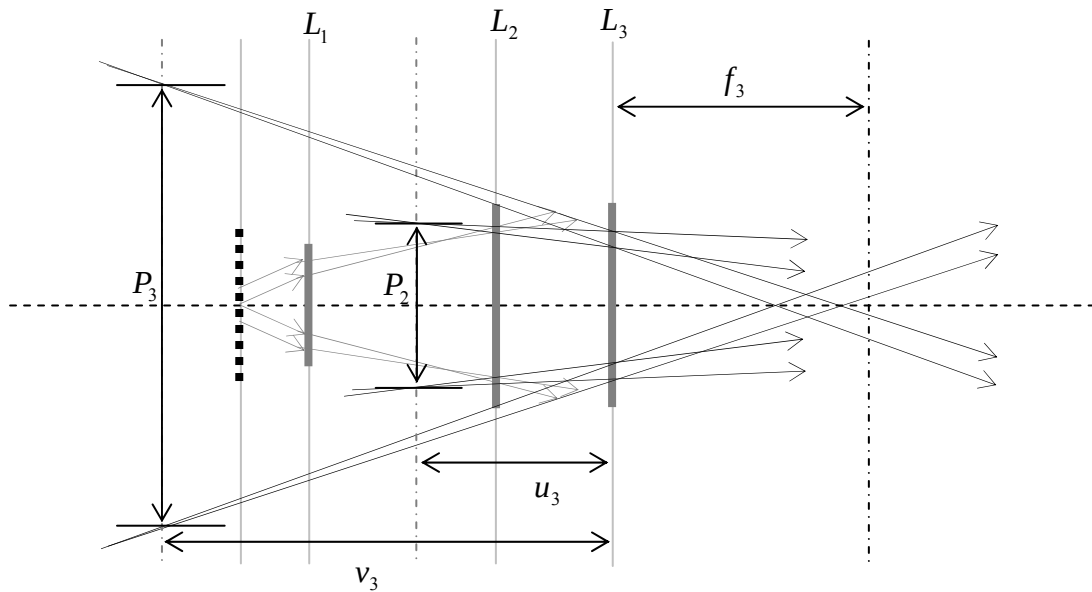
และ
$$m_2 = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.31)$$

หรือ
$$P_2 = m_2 P_1 \quad (2.32)$$

เมื่อ P_1 คือ ระยะห่างของตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงที่ห่างจากตำแหน่งการเลี้ยวเบน
 อันดับที่ศูนย์ด้วยเลนส์ชั้นที่ 1
 และ P_2 คือ ระยะห่างของตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงที่ห่างจากตำแหน่งการเลี้ยวเบน
 อันดับที่ศูนย์ด้วยเลนส์ชั้นที่ 2

2.4.2.2.3 การเกิดภาพจากเลนส์ 3 ชั้น

การเกิดภาพจากเลนส์ชั้นที่ 3 จะใช้ตำแหน่งภาพที่เกิดจากเลนส์ชั้นที่ 2 เป็น
 ตำแหน่งวัตถุของเลนส์ชั้นที่ 3 ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 แสดงตำแหน่งเกิดภาพการเลี้ยวเบนจากเลนส์ 3 ชั้น

การคำนวณตำแหน่งการเกิดภาพจากเลนส์ 3 ชั้น สามารถคำนวณด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{f_3} = \frac{1}{u_3} + \frac{1}{v_3} \quad (2.33)$$

เมื่อ f_3 คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์ชั้นที่ 3

u_3 คือ ตำแหน่งวัตถุสำหรับเลนส์ชั้นที่ 3

v_3 คือ ตำแหน่งภาพสำหรับเลนส์ชั้นที่ 3

กำลังขยายจากเลนส์ชั้นที่ 3 (m_3) หาได้จาก

$$m_3 = \frac{v_3}{u_3} \quad (2.34)$$

และ

$$m_3 = \frac{P_3}{P_2} \quad (2.35)$$

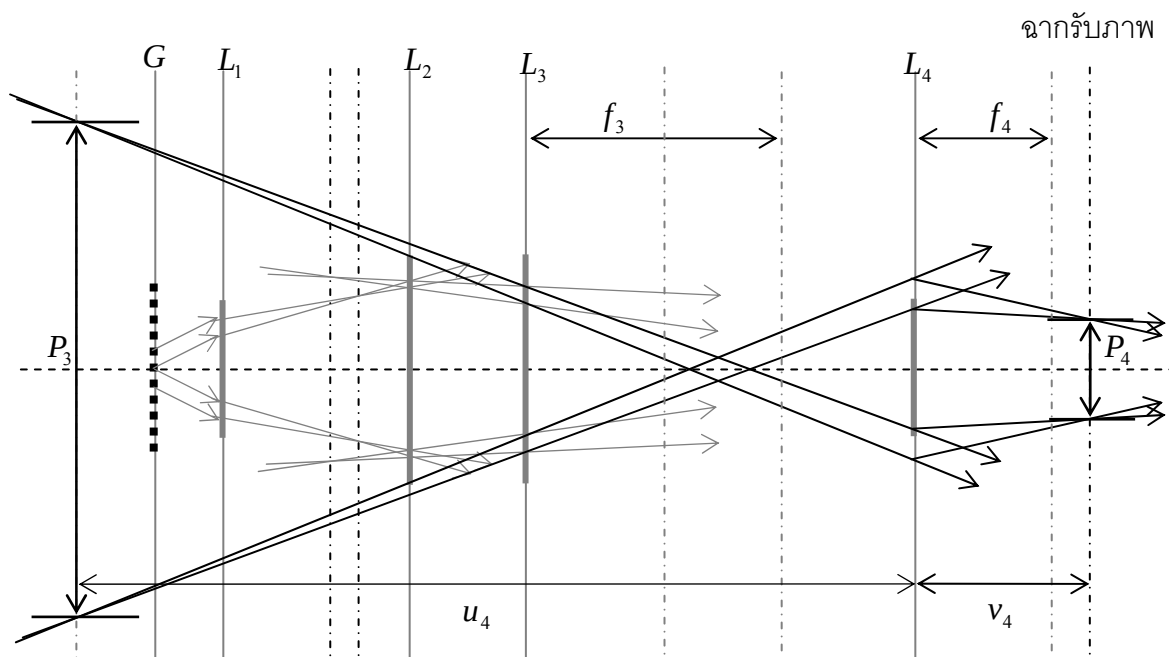
หรือ

$$P_3 = m_3 P_2 \quad (2.36)$$

เมื่อ P_3 คือ ระยะห่างของตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงที่ห่างจากตำแหน่งการเลี้ยวเบน
อันดับที่ศูนย์ด้วยเลนส์ชั้นที่ 3

2.4.2.2.4 การเกิดภาพจากเลนส์ 4 ชั้น

การเกิดภาพจากเลนส์ชั้นที่ 4 จะใช้ตำแหน่งภาพที่เกิดจากเลนส์ชั้นที่ 3 เป็นตำแหน่งของวัตถุของเลนส์ชั้นที่ 4 ดังภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 22 แสดงตำแหน่งเกิดภาพการเลี้ยวเบนจากเลนส์ 4 ชั้น

การคำนวณตำแหน่งการเกิดภาพจากเลนส์ 4 ชั้น สามารถคำนวณด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{f_4} = \frac{1}{u_4} + \frac{1}{v_4} \quad (2.37)$$

เมื่อ f_4 คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์ชั้นที่ 4
 u_4 คือ ตำแหน่งวัตถุสำหรับเลนส์ชั้นที่ 4
 v_4 คือ ตำแหน่งภาพสำหรับเลนส์ชั้นที่ 4

กำลังขยายจากเลนส์ชั้นที่ 4 (m_4) หาได้จาก

$$m_4 = \frac{v_4}{u_4} \quad (2.38)$$

และ
$$m_4 = \frac{P_4}{P_3} \quad (2.39)$$

หรือ
$$P_4 = m_4 P_3 \quad (2.40)$$

จากการ $P_2 = m_2 P_1$ และ $P_3 = m_3 P_2$

ทำให้ได้
$$P_3 = m_2 m_3 P_1 \quad (2.41)$$

แทนค่า P_3 ลงในสมการ(2.40)ได้เป็น

$$P_4 = m_2 m_3 m_4 P_1 \quad (2.42)$$

กำหนดให้ $M = m_2 m_3 m_4$ เขียนสามการ(2.42) ได้ใหม่เป็น

$$P_4 = M P_1 \quad (2.43)$$

เมื่อ M คือ กำลังขยายของเลนส์ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 3 และชั้นที่ 4

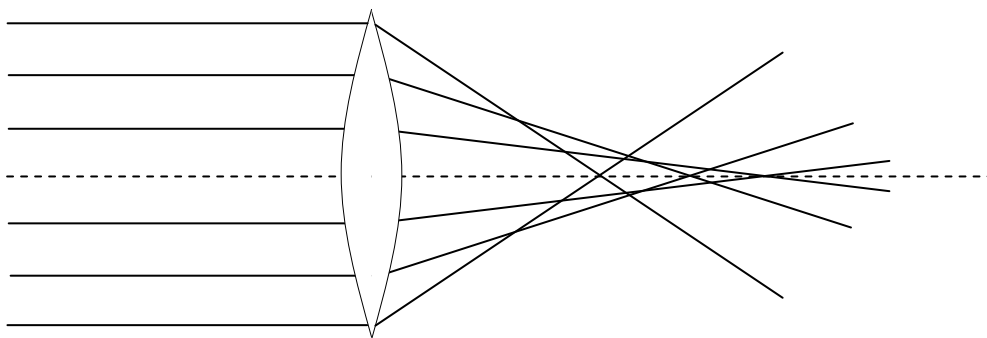
P_4 คือ ระยะห่างของตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงที่ห่างจากตำแหน่งการเลี้ยวเบน
อันดับที่ศูนย์ด้วยเลนส์ชั้นที่ 4

P_1 คือ ระยะห่างของตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงที่ห่างจากตำแหน่งการเลี้ยวเบน
อันดับที่ศูนย์ด้วยเลนส์ชั้นที่ 1

2.4.2.3 ความคลาดเลนส์ (Lens Aberration)

ความบกพร่องของทัศนอุปกรณ์ ที่ใช้งานมากก็มีเลนส์และกระจกซึ่งมีอยู่หลายชนิด เนื่องจากรูปร่างของมัน เลนส์ที่ใช้จริงมีขนาดโตขึ้น รังสีที่จะมาเกิดภาพก็มีมากขึ้น รังสีที่อยู่ห่างจากแกนและใกล้แกนก็จะไม่มาพบกันที่จุดเดียว ทำให้ภาพที่ได้ไม่ชัดเจนเท่าที่ควร ซึ่งเรียกว่า เกิดความคลาด (Aberration)¹ หรือเนื่องจากแนวลำแสงตกกระทบบอบเลนส์ทำให้ได้ภาพที่ผิดเพี้ยนจากการหักเห ในงานวิจัยนี้จะขอกล่าวถึงเพียงความคลาดทรงกลม (Spherical Aberration) ซึ่งเป็นผลจากตำแหน่งที่แนวรังสีตกกระทบบและหักเหบนผิวเลนส์

โดยทั่วไปเรากำหนดให้จุดโฟกัสของเลนส์บางอันหนึ่งเป็นตำแหน่งคงที่บนแกนमुखสำคัญโดยไม่สัมพันธ์กับแนวของรังสีตกกระทบบต่างๆที่ขนานกับแกนดังกล่าว แต่สำหรับเลนส์โดยทั่วไปที่มีผิวโค้งทรงกลมและหนา พบว่าถ้ามีแสงขนาน ณ ความยาวคลื่นหนึ่งตกกระทบบผิวของเลนส์ขนานตามแนวขนานกับแกนमुखสำคัญ รังสีตกกระทบบเส้นที่อยู่ห่างจากแกนมาก จะมีรังสีหักเหไปผ่านจุดโฟกัส ณ ตำแหน่งที่อยู่ใกล้เลนส์อันนั้นมากกว่า แสดงว่ารังสีตกกระทบบต่างๆบริเวณขอบของเลนส์ขนานอันหนึ่งย่อมทำให้เกิดภาพต่างๆ ที่อยู่ใกล้เลนส์กว่าภาพเนื่องจากรังสีตกกระทบบบริเวณด้านในของเลนส์ขนานอันนั้น ผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้เนื่องจาก ความคลาดทรงกลมของเลนส์ขนานนั่นเอง ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 แสดงความคลาดทรงกลมของเลนส์ขนาน

¹ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2547). เล่มเดิม. หน้า 287.

2.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดความเข้มแสง

2.5.1 เซนเซอร์ซีมอส (CMOS Sensor)

ซีมอส (CMOS ; Complementary Metal Oxide Semiconductor) ถูกสร้างขึ้นประมาณ ปี ค.ศ. 1960¹ เป็นเซนเซอร์รับแสงที่ทำหน้าที่รับแสงที่เข้ามาแล้วเปลี่ยนโฟตอนแสงนั้นๆ เป็นอิเล็กตรอนด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กตริก แล้วจึงแปลงศักย์ไฟฟ้าจากอิเล็กตรอนที่กักเก็บไว้ในช่วงคาบเวลาขณะเซนเซอร์รับแสงไปเป็นสัญญาณดิจิทัล จำนวนอิเล็กตรอนจากกระบวนการโฟโตอิเล็กตริกนี้จะเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นฟลักซ์และความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบเซนเซอร์ โดยแต่ละพิกเซลบนเซนเซอร์ซีมอสจะมีวงจรย่อยๆ สำหรับแปลงศักย์ไฟฟ้าเป็นสัญญาณดิจิทัล ภายในตัวสามารถแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณดิจิทัลในทันทีหลังคาบเวลาที่ใช้ในการรับแสง

2.5.2 การบันทึกค่าระดับสีเทาของเซนเซอร์ซีมอส

เมื่อแสงตกกระทบบนเซนเซอร์ซีมอส ซึ่งภายในซีมอสจะประกอบไปด้วยพิกเซลย่อยๆ และในแต่ละพิกเซลจะมีวงจรย่อยๆ เปลี่ยนค่าความเข้มแสงที่เข้ามาเป็นสัญญาณดิจิทัลในทันที ระดับตัวเลขดิจิทัลที่ใช้แสดงค่าความสว่างที่แปลงมาจากความเข้มแสง จะเป็น 2^n ระดับ โดย n คือจำนวน บิต เช่นกรณี n เท่ากับ 8 ระดับความสว่างจะเป็น 256 ระดับ คือ 0 ถึง 255 ที่ระดับความสว่างเป็น 0 (ความเข้มแสงต่ำ) จะเป็นสีดำ และที่ระดับความสว่างเป็น 255 (ความเข้มแสงมาก) จะเป็นสีขาว ค่าระหว่างนี้จะเป็นระดับสีเทา ดังนั้นค่าความสว่างจึงเป็นค่าระดับสีเทาแสดงด้วยตัวเลขดิจิทัล มีค่าเป็นขั้นๆ ค่าระหว่างขั้นขึ้นขึ้นอยู่กับจำนวนบิต (Bit) หรือความลึกบิต (Bit Depth) ของการแสดงค่าระดับสีเทาของพิกเซลของซีมอสนั้น แสดงดังตาราง 2 ซึ่งค่าระดับสีเทานี้จะแปรผันตามความเข้มแสงหมายความว่า ถ้าความเข้มแสงมากก็แสดงว่ามีปริมาณโฟตอนตกลงมามาก อิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นก็จะมีจำนวนมาก มีผลทำให้ค่าระดับสีเทามาก ในทางกลับกันถ้าแสงมีค่าความเข้มต่ำก็จะมีปริมาณโฟตอนตกลงมาน้อย อิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นก็จะมีจำนวนน้อย มีผลทำให้ได้ค่าระดับสีเทาน้อยตามไปด้วย

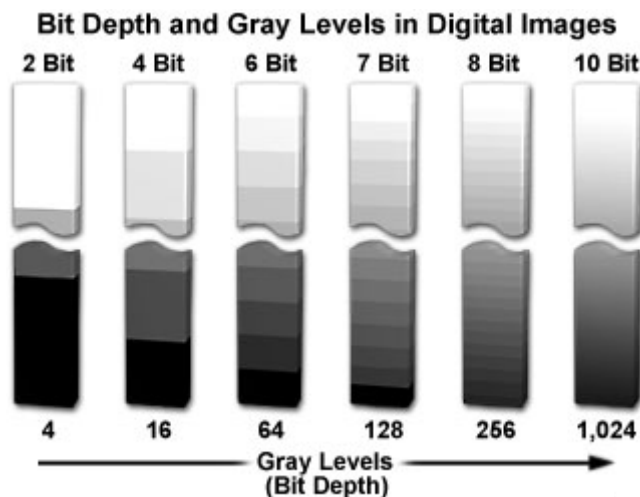
¹Bigas M; Cabruja E; Forest J. ; & Salvi J. (2006). *Review of CMOS image sensors*. p.433-451.

ตาราง 2 แสดงจำนวนบิต จำนวนค่าของระดับสีเทา และค่าของระดับสีเทา

จำนวนบิต	จำนวนค่าของระดับสีเทา	ค่าของระดับสีเทา
1	2^1	2 0 และ 1
2	2^2	4 0-3
3	2^3	8 0-7
4	2^4	16 0-15
5	2^5	32 0-31
6	2^6	64 0-63
7	2^7	128 0-127
8	2^8	256 0-255
9	2^9	512 0-511
10	2^{10}	1,024 0-1023

ที่มา : Spring, K.R.; Russ, J.C. & Davidson, M.W. (2005, Nov). “*Basic Properties of Digital Images*”. p. 7. (Online).

จากตาราง 2 สามารถแสดงค่าระดับสีเทาของพิกเซลบนซีมอสจาก 2 บิต 4 บิต 6 บิต 7 บิต 8 บิต และ 10 บิต ตามลำดับได้ดังภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 24 แสดงระดับสีเทาจาก 2 บิต 4 บิต 6 บิต 7 บิต 8 บิต และ 10 บิต

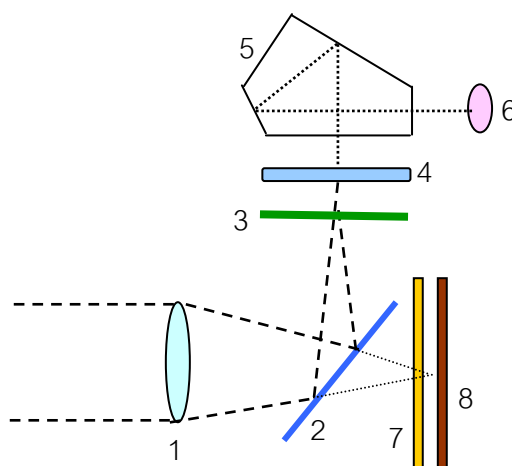
ที่มา : Spring, K.R; Russ, J.C; & Davidson, M.W. (2005, Nov). *op. cit.* p. 6. (Online).

2.5.3 การบันทึกภาพสีของเซนเซอร์ซีมอส

เซนเซอร์ซีมอสจะทำการบันทึกปริมาณของแสงที่ตกกระทบกับพื้นผิวของเซนเซอร์ เมื่อชัตเตอร์เปิดอยู่ โดยสีจะถูกเก็บผ่านตัวกรอง(Filter) ที่อยู่บนแต่ละพิกเซลและตัวกรองเรียกว่า Photosite ซึ่งแต่ละ Photosite บนเซนเซอร์จะถูกจัดเรียงเป็นแถวๆโดย Photosite แต่ละจุดจะประกอบด้วย ไดโอดแสง (Photodiode) ซึ่งจะรับแสงในรูปของโฟตอน เซลล์จะจัดเก็บแสงโดยเปลี่ยนแสงที่รับมาให้เป็นอิเล็กตรอน

2.5.4 กล้อง DSLR

กล้อง DSLR (Digital Single Lens Reflex Camera) คือกล้องถ่ายภาพแบบ ดิจิตอลซึ่งภาพที่ปรากฏในช่องมองภาพ เป็นภาพที่เกิดจากแสงจากวัตถุผ่านเลนส์กล้องแล้วสะท้อน ด้วยกระจกและปริซึมทำเหลี่ยมผ่านช่องมองภาพ โดยเมื่อกดปุ่มชัตเตอร์จะทำให้กระจกสะท้อน (2)ยกขึ้น ชัตเตอร์(7)เปิด และภาพฉายลงบนเซนเซอร์ (8) ซึ่งอยู่ตรงตำแหน่งเกิดภาพ ดังแสดงใน ภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 แสดงโครงสร้างการทำงานของกล้อง DSLR

- หมายเลข 1 เลนส์
- หมายเลข 2 กระจกสะท้อนภาพ
- หมายเลข 3 แผ่นปรับโฟกัส
- หมายเลข 4 เลนส์ลดขนาดภาพ
- หมายเลข 5 ปริซึมห้าเหลี่ยม
- หมายเลข 6 ช่องมองภาพ
- หมายเลข 7 ระบายโฟกัส
- หมายเลข 8 เซนเซอร์

2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พ.ศ.2537 ไชยารา และ เวลลี(C. de Izarra and O. Vallee) ได้ศึกษาการใช้เซนเซอร์รับภาพ ซีซีดี(CCD) เชิงเส้นในการทดลองทางด้านแสง โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียมนีออน(He-Ne laser) ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) เป็นต้นกำเนิดแสงยิงผ่านเลนส์สองชิ้นโดยชิ้นที่ 1 มีความยาวโฟกัส 5 มิลลิเมตร(focal: 5 mm) และเลนส์ชิ้นที่ 2 ความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร (focal: 50 mm) และใช้ซีซีดีโฟโตไดโอดอาร์เรย์(CCD Photodiode Arrays) เป็นฉากรับภาพซึ่งรูปแบบการทดลองนี้เป็นการอธิบายการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์(Fraunhofer Diffraction) และการทดลองทางด้านแสงอื่นๆ เช่นการศึกษาการเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว สลิตคู่ ฐเข้มเป็นต้น ทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นเมื่อใช้ซีซีดีโฟโตไดโอดอาร์เรย์ช่วยในงานวิเคราะห์เช่น สเปกโตรสโคปี และปรากฏการณ์ของ มิราจ(Mirage Effect)

พ.ศ.2545 สาโรช พูลเทพ ได้ศึกษาและสร้างต้นแบบของเครื่องวัดสเปกตรัมแสงด้วย โฟโตไดโอดแออร์เรย์ขนาด 1024 พิกเซล เกรตติงเลี้ยวเบนขนาด 1800 เส้นต่อมิลลิเมตร ทำหน้าที่แยกสเปกตรัมแสง และใช้โปรแกรมที่พัฒนาด้วยภาษาวิชวลเบสิก ทำหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูลและแสดงผลในรูปแบบสเปกตรัมแสง โดยใช้เส้นสเปกตรัมที่ 365.00 403.00 435.00 546.00 577.96 และ 579.07 นาโนเมตร ของแสงจากหลอด HgAr เป็นความยาวคลื่นอ้างอิงมาตรฐานในการเปรียบเทียบ และผลการวัดที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดร้อยละ 0.20 จากนั้นได้ทดสอบการทำงานโดยการวัดสเปกตรัมจากต้นกำเนิดแสงที่ทราบค่าได้แก่ การวัดเส้นสเปกตรัม 5 เส้นของหลอดไฮปรอท (Mercury Lamp) และหลอดโซเดียม (Sodium Lamp) พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงสุดร้อยละ 0.41 และ 0.40 ตามลำดับ การวัดความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน และฮาร์โมนิกที่สองของเลเซอร์ (Nd:YAG) มีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.39 และ 0.02 ตามลำดับ จากนั้นได้ทดลองวัดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของกระจกเลเซอร์ชนิดร้อยละ 96 และ 99 เทียบกับเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น UV-VIS6405 ของบริษัท Jenway พบว่ามีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.1 และ 0.5 ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ทดสอบการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านของสารละลายโปแตสเซียมเปอร์มังกาเนตและสารละลายโรดามีน 6 จีโดยทำการวัดเทียบกับเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Lambda2 ของบริษัท Perkin-Elmer พบว่าได้ผลที่สอดคล้องกัน

พ.ศ.2546 อรุณศิริ อัฐสุวรรณศิลป์ ได้ศึกษาการใช้หัววัดซีดีดีสำหรับปฏิบัติการทางแสง โดยการนำซีดีดีจากกล้องคอมพิวเตอรืมาใช้ในการวัดความเข้มแสง และได้พัฒนาโปรแกรมเพื่ออ่านค่าความเข้มแสงจากภาพที่บันทึกได้จากกล้อง ทำการสาธิตการใช้กล้องคอมพิวเตอรืในการทดลองเกี่ยวกับการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสงผ่านสลิตเดี่ยวและสลิตคู่ ผลการทดลองพบว่าตำแหน่งของความเข้มสูงสุดและต่ำสุดมีความสอดคล้องกันระหว่างผลการทดลองกับทฤษฎี แต่ค่าความเข้มแสงที่จุดอื่น ๆ มีความแตกต่างกันระหว่างค่าที่วัดได้กับทฤษฎี

พ.ศ.2548 เอกไชยสวัสดิ์, เลอพงษ์ พิศนุญ, และอมรินทร์ ปรีชาวุฒิ ได้ศึกษาการวัดการดูดกลืนแสงผ่านสารละลายทางเคมีคลินิกด้วยเซอร์เซอร์ CCD แบบเส้น โดยใช้หลอดฮาโลเจนเป็น ต้นกำเนิดแสง ผ่านสารละลายทางเคมีคลินิก ผ่านตัวทำขนาน(Collimator) ได้ลำแสงขนานไปผ่านเกรตติง เกิดการเลี้ยวเบนของแสงผ่านเลนส์นูน ไปตกกระทบบนตัวเซนเซอร์ เพื่อวัดค่าความเข้มของแสงที่ได้ และนำมาคำนวณหาค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งเป็นการวัดครั้งละสเปกตรัมแสง(ความยาวคลื่นแสง 400 ถึง 800 นาโนเมตร) แทนการวัดการดูดกลืนแสงแบบระบบแสงสีเดียวผลการทดลองที่ได้สามารถวัดการดูดกลืนแสงโดยใช้ตัวเซนเซอร์แบบสแกนแนวเส้นขนาด 3,000 พิกเซล และได้แสดงให้เห็นค่าผิดพลาดของความยาวคลื่นเมื่อเทียบกับหลอดไฮปรอท มีค่าผิดพลาดร้อยละ 0.049 และค่าการดูดกลืนแสง

โดยอาศัยกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต ซึ่งจะได้ค่าการดูดกลืนแสงที่มีความเข้มของสารละลายในอัตราส่วนที่เท่าๆกัน เป็นเส้นตรง

พ.ศ.2549 กิล; เรยชิน; และโรดริกุซ(S. Gil;H.D.Reisin;&E.E.Rodringuez) ได้ศึกษาการใช้กล้องดิจิตอลสำหรับเป็นอุปกรณ์การวัด โดยใช้กล้องดิจิตอลหรือกล้องวิดีโอ ในการศึกษารูปร่างของเงา เส้นโคจรของการพุ่งออกของน้ำ และรูปแบบของเส้นโค้งหรือผิวหน้าที่สัมผัสกับรังสีขนาน พบว่าเกิดจากแสงที่สะท้อนบนกระจกในรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณที่วัดได้จากการทดลองกับปริมาณทางทฤษฎี

พ.ศ.2550 รามิล; โลเปซ; และ วินซิโตริโอ(A. Ramil;A.J. Lopez& F. Vincitorio) ได้ปรับปรุงการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของแสง โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน (He-Ne laser) เป็นต้นกำเนิดแสงเพื่อศึกษาการเลี้ยวเบนจากสลิตเดี่ยว สลิตคู่ และช่องวงกลม ซึ่งได้ออกแบบการทดลองโดยยิงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนผ่านเลนส์ สลิต และตัวกรอง แล้วตกลงบนซีดีดีของกล้องดิจิตอล Nikon D100 สามารถนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของขนาดของช่องโดยการเพิ่มช่วงเวลาของการบันทึกความเข้ม ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพจากการรวมกันของพิกเซล และทำการวัดค่าความเข้มแสงโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พบว่าวิธีดังกล่าวมีความเหมาะสมกับห้องปฏิบัติการสำหรับนักเรียน

พ.ศ.2553 เดชา ศุภพิทยาภรณ์;ภิญโญ พานิชพันธ์;และนฤมล เอมะรัตน์(Decha Suppapittayaporn; Bhinyo Panijpan; & Narumon Emarat) ได้ศึกษาการระบุตำแหน่งการเกิดภาพจากการตัดกันของลำแสงใดๆที่ผ่านเลนส์บาง โดยแนวรังสีแสงใดๆสามารถหาได้โดยใช้แนวรังสีขนานกับลำแสงที่ต้องการทราบทางเดินแสง เขียนผ่านศูนย์กลางเลนส์ร่วมกับระนาบตั้งฉากกับแกนमुखสำคัญที่ผ่านจุดโฟกัส และในกรณีมีเลนส์มากกว่าเลนส์เดี่ยว การหาตำแหน่งภาพจะพิจารณาจากตำแหน่งการเกิดภาพจากเลนส์ชิ้นแรกเป็นตำแหน่งวัตถุของเลนส์ชิ้นถัดไป และหาตำแหน่งการเกิดภาพโดยการเขียนทางเดินแสงเช่นเดียวกับกรณีเลนส์เดี่ยว

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามลำดับขั้นตอนดังนี้

- 3.1 ศึกษาคุณสมบัติของกล้องถ่ายภาพและสำรวจหาเลนส์ที่สามารถจัดหาได้ง่าย
- 3.2 ศึกษาทางเดินแสงและการเกิดภาพ
- 3.3 ออกแบบชุดการทดลอง
- 3.4 ประดิษฐ์และประกอบอุปกรณ์
- 3.5 ถ่ายภาพจากต้นกำเนิดแสงที่ทราบองค์ประกอบความยาวคลื่น
- 3.6 คำนวณค่าความยาวคลื่นจากภาพถ่าย
- 3.7 เขียนโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่นจากภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของแสง
- 3.8 วิเคราะห์และเปรียบเทียบชุดอุปกรณ์หรือโปรแกรมให้ได้ผลการวัดที่ใกล้เคียงกับค่าของต้นกำเนิดแสงที่ใช้ทดสอบ
- 3.9 สรุปผลการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล้องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสง

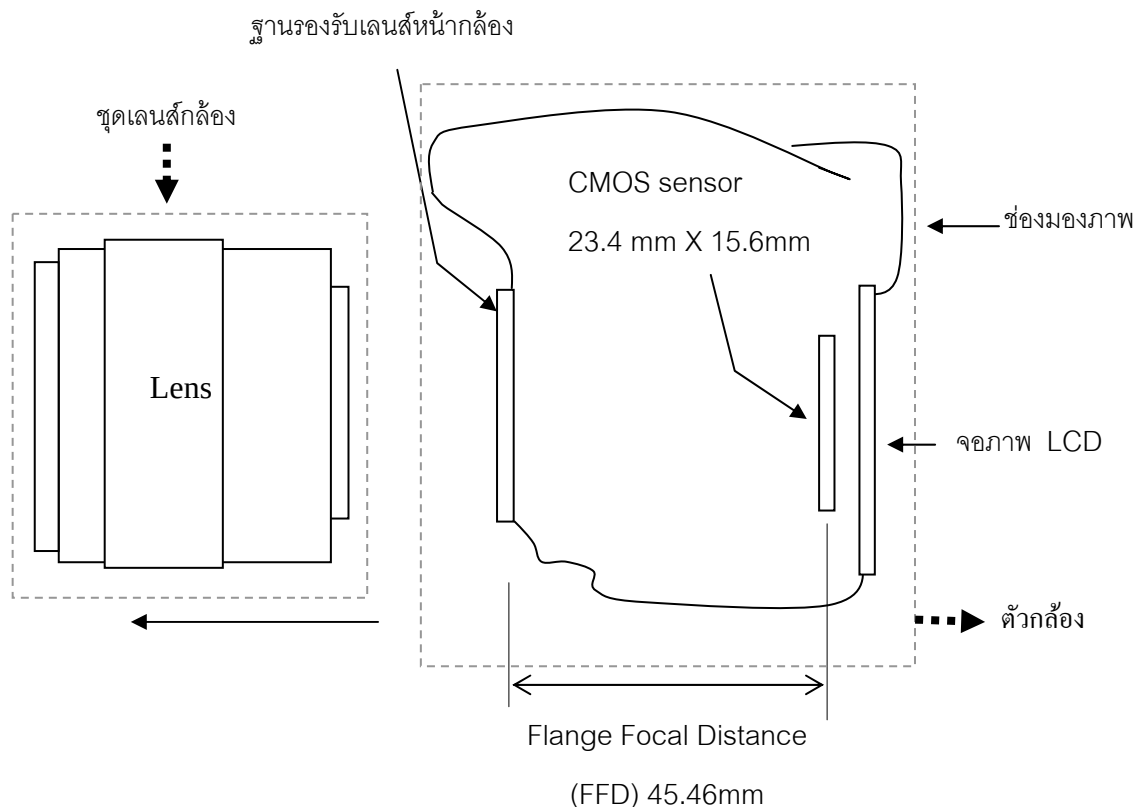
3.1 ศึกษาคุณสมบัติของกล้องถ่ายภาพและสำรวจหาเลนส์ที่สามารถจัดหาได้ง่าย

3.1.1 ศึกษาคุณสมบัติของกล้องถ่ายภาพ

ศึกษาคุณสมบัติของกล้องถ่ายภาพชนิดกล้องดิจิทัลสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยว (DSLR Camera: Digital Single Lens Reflex Camera) สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กล้องยี่ห้อ PENTAX รุ่น K 20D ที่สามารถถอดเปลี่ยนชุดเลนส์ได้ โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- 3.1.1.1 ภากรับภาพหรือ เซนเซอร์แบบ CMOS ขนาด 23.4 มิลลิเมตร x 15.6 มิลลิเมตร
- 3.1.1.2 ถ่ายภาพความละเอียดสูงสุด 14.6 ล้านพิกเซล
- 3.1.1.3 หน่วยประมวลผลภาพใช้หน่วยความจำ DDR2
- 3.1.1.4 สามารถมองเห็นภาพที่ต้องการถ่ายบนจอ LCD ได้
- 3.1.1.5 ความไวแสง ISO100 – ISO3200
- 3.1.1.6 ระยะห่างระหว่างฐานรองรับเลนส์หน้ากล้องถึงภากรับภาพ(Flange Focal Distance, FFD) เท่ากับ 45.46 มิลลิเมตร
- 3.1.1.7 ความเร็วชัตเตอร์ (Exposure Time) 1/4000 วินาที ถึง 30 วินาที

ส่วนประกอบของกล้องถ่ายภาพที่มีความสำคัญต้องนำมาพิจารณาประกอบการวิจัย คือ ขนาดของเซนเซอร์ และระยะระหว่างฐานรองรับเลนส์หน้ากล้องถึงเซนเซอร์(FFD) แสดงดังภาพประกอบ 26



ภาพประกอบ 26 แสดงส่วนประกอบของกล้องถ่ายภาพ

การทดลองครั้งนี้ จะถอดชุดเลนส์กล้องออกจากตัวกล้องเพื่อจะนำชุดอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาประกอบเข้ากับตัวกล้องเพื่อถ่ายภาพสเปกตรัมแสง

ขนาดของเซนเซอร์มีความสำคัญต่องานวิจัยนี้ เนื่องจากภาพลำดับการเลี้ยวเบนของสเปกตรัมที่ต้องการถ่าย จะต้องตกบนฉากความยาวไม่เกิน 23.4 มิลลิเมตร เพราะถ้าภาพของอันดับการเลี้ยวเบนของสเปกตรัมมีเส้นสเปกตรัมห่างกันเกินกว่า 23.4 มิลลิเมตร จะทำให้ได้ภาพของอันดับการเลี้ยวเบนของสเปกตรัมแสงไม่สมบูรณ์

ระยะ FFD เป็นอีกส่วนประกอบหนึ่งที่ได้นำมาพิจารณาในการออกแบบชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพ โดยชุดอุปกรณ์ที่ออกแบบและประดิษฐ์ขึ้นจะต้องมีระยะระหว่างเลนส์ตัวที่อยู่ใกล้ฉากรับภาพ ซึ่งในที่นี้คือเซนเซอร์รับภาพซีมอส เป็นระยะไม่น้อยกว่าระยะ FFD

3.1.2 การสำรวจหาเลนส์ที่สามารถจัดหาได้ง่าย

จากข้อจำกัดในด้านขนาดของจากรับภาพ คือ 23.4 มิลลิเมตร และระยะจากเลนส์ถึงจากรับภาพต้องมีระยะมากกว่าระยะ FFD จึงไม่สามารถใช้เลนส์ชิ้นเดียวในการโฟกัสภาพไปบนจากรับภาพได้อย่างสมบูรณ์ แต่จะต้องใช้เลนส์ประกอบกันหลายชิ้น ดังจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้สำรวจหาเลนส์ที่สามารถจัดหาได้ง่าย ซึ่งเป็นเลนส์ทั่วไปที่ใช้ในการศึกษาทางเดินแสงในโรงเรียนและสถานศึกษา โดยพบว่าเลนส์ที่สามารถหาได้มีขนาดความยาวโฟกัสและเส้นผ่านศูนย์กลางดังนี้

3.1.2.1 ความยาวโฟกัส 25 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

3.1.2.2 ความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร

3.1.2.3 ความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

3.2 ศึกษาทางเดินแสงและการเกิดภาพ

การถ่ายภาพสเปกตรัมแสงเพื่อให้ได้ภาพตามที่ต้องการมีความจำเป็นต้องทดลองหารูปแบบการประกอบเลนส์ โดยศึกษาจากการเขียนทางเดินแสงและการเกิดภาพด้วยวิธีการของศุภพิทยาภรณ์ และคณะ¹ โดยทำการศึกษาดังกรณีต่อไปนี้

3.2.1 ทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ 1 ชิ้น

3.2.2 ทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ 2 ชิ้น

3.2.3 ทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ 3 ชิ้น

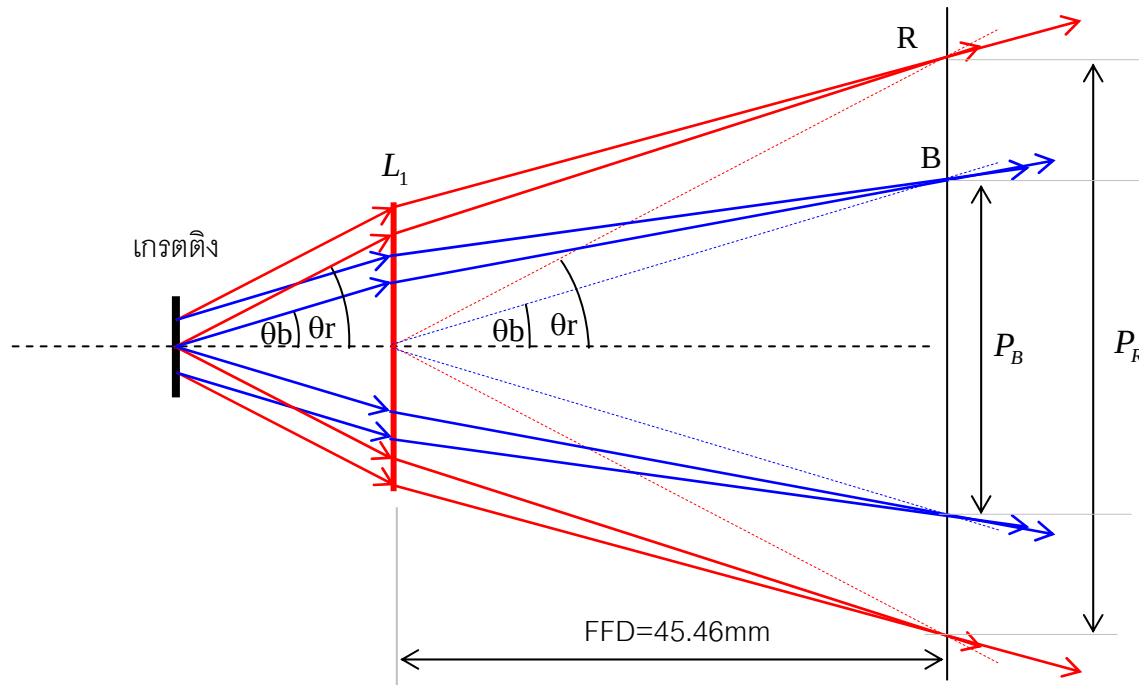
3.2.4 ทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ 4 ชิ้น

3.2.1 ทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ 1 ชิ้น

ภาพที่เกิดจากทางเดินแสงที่เลี้ยวเบนโดยเกรตติงไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อผ่านเลนส์ 1 ชิ้น จะตกบนจากรับภาพที่อยู่ตรงระยะนาบที่ห่างจากเลนส์เท่ากับระยะโฟกัส สำหรับสเปกตรัมแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่น 656.3 นาโนเมตร จะมีมุมเลี้ยวเบนที่ทำให้เกิดแนวแทรกสอดแบบเสริมกันอยู่ในทิศทาง θ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 19.16 องศา สำหรับเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 45.46 มิลลิเมตร จะให้ภาพสเปกตรัมของแสงสีแดงห่างกัน (P_R) เป็นระยะเท่ากับ 31.57 มิลลิเมตร

¹ Suppattayaporn, D; Panijpan, B; & Emarat, N. (2010, April). *op. cit.* p.256-257.

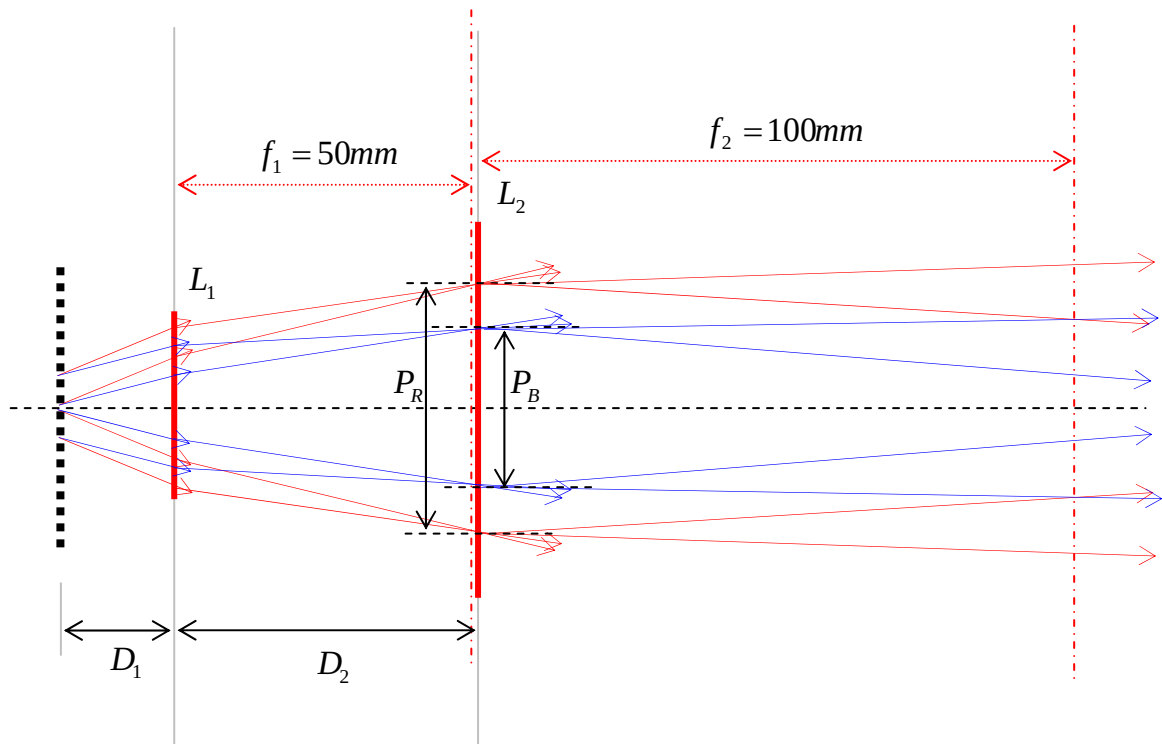
ภาพสเปกตรัมของแสงสีน้ำเงินห่างกัน(P_B)เป็นระยะเท่ากับ 20.2 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในกรอบของเซนเซอร์ CMOS ดังนั้นการใช้เลนส์ 1 ชั้น จะไม่สามารถถ่ายภาพของแสงสีแดงได้ ดังภาพประกอบ 27



ภาพประกอบ 27 แสดงทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ 1 ชั้น ที่มีความยาวโฟกัส 45.46 มิลลิเมตร

3.2.2 ทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ 2 ชั้น

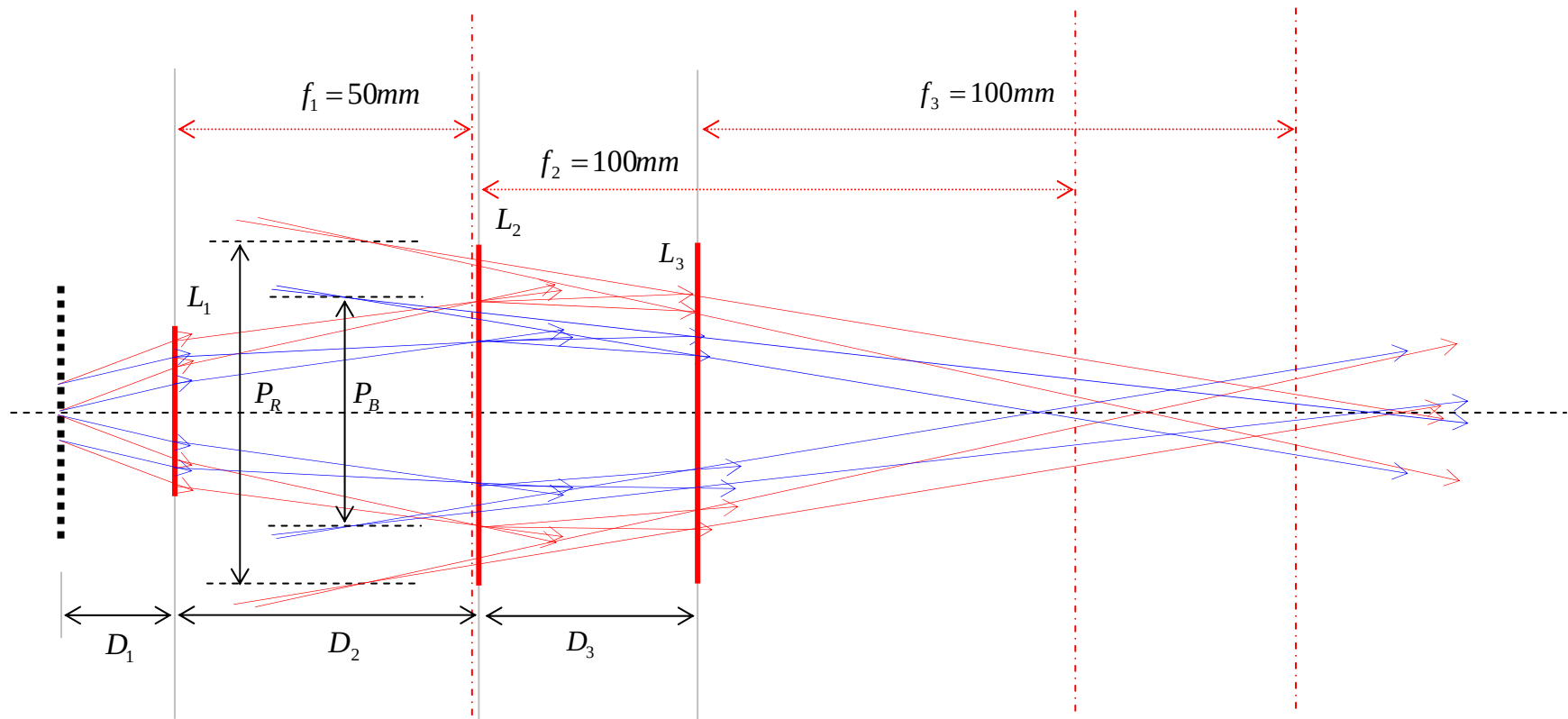
การใช้เลนส์เพียง 1 ชั้นในการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงนั้นไม่สามารถทำได้เนื่องจากขนาดภาพของแสงสีแดงมีขนาดใหญ่เกินกว่าขนาดของเซนเซอร์ และระยะโฟกัสที่ให้ขนาดภาพเล็กกว่านี้ก็จะมีระยะใกล้เกินกว่าที่ระยะ FFD จะสามารถรับได้ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มเลนส์ในการถ่ายภาพ โดยเลนส์ชั้นที่ 1 เป็นเลนส์ที่ใช้เพื่อทำให้ลำแสงหักเหเข้าสู่หาแกนมุขสำคัญมากขึ้น จึงเลือกใช้เลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร เป็นเลนส์ชั้นที่ 1 และใช้เลนส์นูนความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร เป็นเลนส์ชั้นที่ 2 เนื่องจากลำแสงที่หักเหผ่านมาจากเลนส์ชั้นที่ 1 ยังมีลักษณะบานออกจากแนวแกนมุขสำคัญ จึงต้องใช้เลนส์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่เพื่อรับแสง ซึ่งการวางเลนส์ชั้นที่ 2 นี้ ไม่สามารถวางห่างออกจากเลนส์ชั้นที่ 1 ได้มากนัก เนื่องจากแสงที่บานออกจะตกขอบเลนส์ทำให้สูญเสียข้อมูลทางแสง อย่างไรก็ตามการวาง



ภาพประกอบ 28 แสดงทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ 2 ชิ้น

3.2.3 ทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ 3 ชิ้น

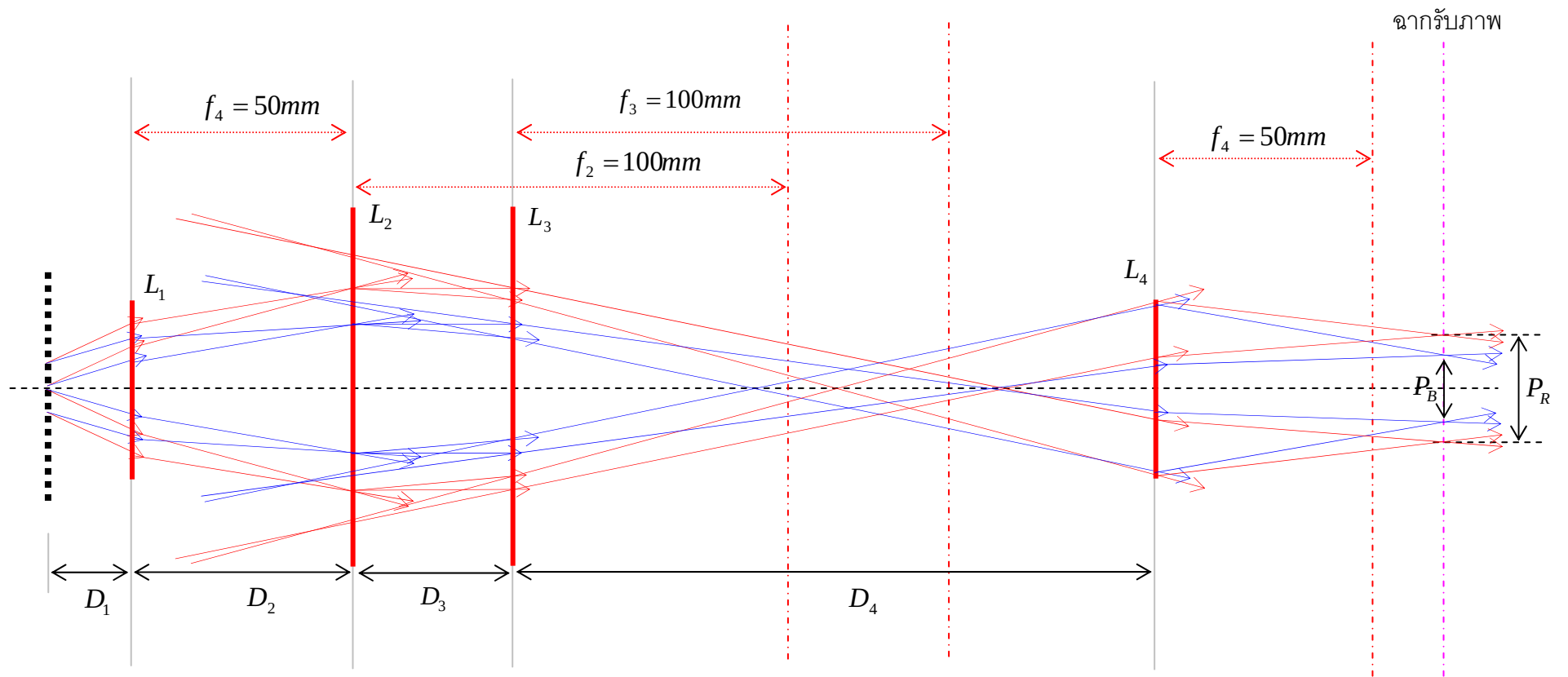
การวางเลนส์ 3 ชิ้นโดยชิ้นที่ 3 ที่เพิ่มเข้ามาได้เลือกใช้เลนส์นูนความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่เพียงพอที่ลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 ยังคงผ่านเลนส์ได้ ซึ่งการวางเลนส์ชิ้นที่ 3 นี้ทำให้เกิดภาพเสมือนขนาดใหญ่จึงไม่สามารถใช้ฉากรับภาพได้ ดังภาพประกอบ 29 แต่การวางเลนส์ชิ้นที่ 3 นี้สามารถทำให้ลำแสงลู่เข้าหาแนวแกนमुखสำคัญมากยิ่งขึ้น ทำให้สามารถวางเลนส์ชิ้นที่ 4 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงได้



ภาพประกอบ 29 แสดงทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ 3 ชิ้น

3.2.4 ทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ 4 ชั้น

การเพิ่มเลนส์ชั้นที่ 4 ความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ทำให้ได้ขนาดและตำแหน่งภาพจากเลนส์ชั้นที่ 4 อยู่ในขอบเขตข้อจำกัดของขนาดเซนเซอร์ และระยะ FFD จึงเลือกใช้เลนส์ 4 ชั้นประกอบเป็นชุดเลนส์ เพื่อใช้ในการถ่ายภาพสเปกตรัมต่อไป โดยเลนส์ชั้น 1 (L_1) มีความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร เลนส์ชั้นที่ 2 (L_2) มีความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร เลนส์ชั้นที่ 3 (L_3) มีความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และเลนส์ชั้นที่ 4 (L_4) มีความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ตามลำดับ ลักษณะทางเดินแสงและการเกิดภาพของเลนส์ทั้ง 4 ชั้น แสดงดังภาพประกอบ 30

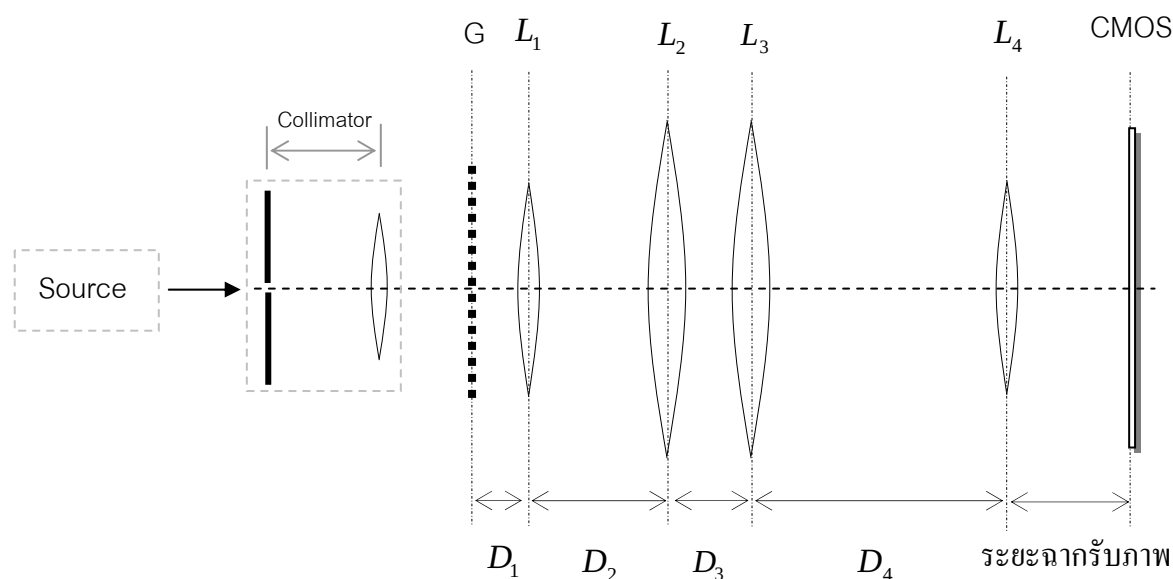


ภาพประกอบ 30 แสดงทางเดินแสงและการเกิดภาพจากเลนส์ 4 ชิ้น

3.3 ออกแบบชุดการทดลอง

3.3.1 การจัดวางชุดอุปกรณ์

การวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดรูปแบบการวางอุปกรณ์ของชุดอุปกรณ์กล้องประกอบเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงโดยได้เลือกทางเดินแสงและการเกิดภาพจากเลนส์ 4 ชิ้น จากภาพประกอบ 30 ขนาดและระยะภาพจากเลนส์ทั้ง 4 ชิ้น อยู่ในขอบเขตข้อจำกัดของขนาดเซนเซอร์ CMOS และระยะ FFD ของกล้องถ่ายภาพ จึงเลือกใช้เลนส์ 4 ชิ้นในการประกอบชุดอุปกรณ์ ดังภาพประกอบ 31



ภาพประกอบ 31 แสดงส่วนประกอบของชุดอุปกรณ์ประกอบกล้องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสง

ชุดอุปกรณ์ประกอบกล้องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงประกอบไปด้วยอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

1. ต้นกำเนิดแสง (Source)

ต้นกำเนิดแสงที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ มี 7 ชนิด ดังนี้

1.1 ต้นกำเนิดแสงที่ใช้ในการปรับเทียบ (Calibration) ได้แก่ หลอดไฮโดรเจน (Hydrogen Tube) หลอดฮีเลียม (Helium Tube) และหลอดไฮปรอท (Mercury Tube)

1.2 ต้นกำเนิดแสงที่ใช้สำหรับทดสอบอุปกรณ์ ได้แก่ หลอดคริปทอน (Krypton Tube) หลอดไอน้ำ (Water vapor Tube) หลอดโซเดียม (Sodium Tube) และหลอดนีออน (Neon Tube)

2. ตัวทำขนาน (Collimator)

3. เลนส์นูน (Convex Lens) ที่ใช้ในการศึกษาการเลี้ยวเบนของแสงผ่านเกรตติงมีทั้งหมด 4 ชิ้น ดังนี้

- 3.2 เลนส์นูนชิ้นที่ 1 (L_1) ความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร
- 3.3 เลนส์นูนชิ้นที่ 2 (L_2) ความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร
- 3.4 เลนส์นูนชิ้นที่ 3 (L_3) ความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร
- 3.5 เลนส์นูนชิ้นที่ 4 (L_4) ความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร

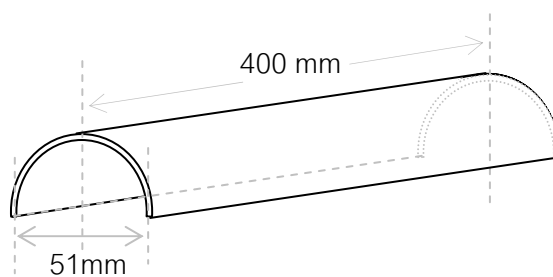
4. เกรตติง (Grating) ขนาด 500 เส้นต่อมิลลิเมตร

5. ฉากรับภาพพลาสติกโปร่งแสง

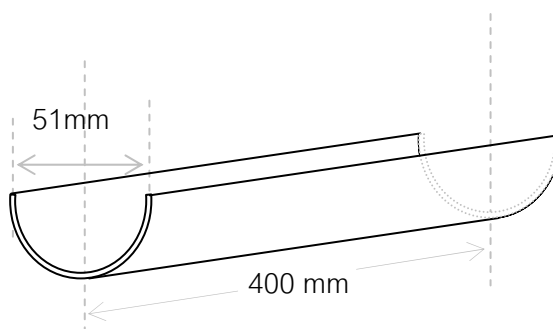
6. กล้องถ่ายภาพดิจิทัล PENTAX K20D

3.3.2 ครอบเลนส์

ครอบเลนส์ใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 51 มิลลิเมตร ความยาว 400 มิลลิเมตร จำนวน 1 ชิ้น โดยผ่าครึ่งออกเป็น 2 ชิ้น ตามแนวยาว ดังภาพประกอบ 32



(ก)

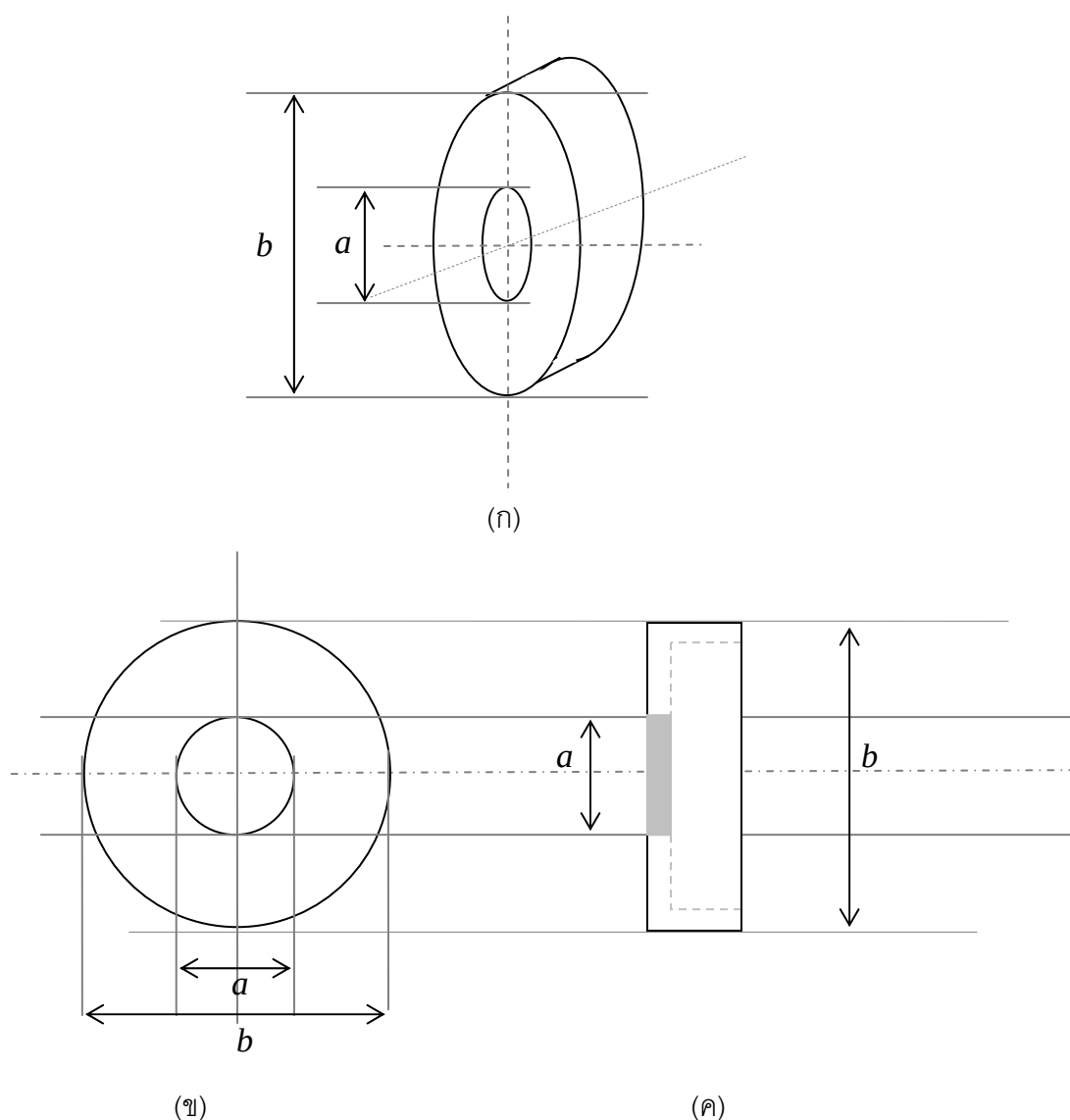


(ข)

ภาพประกอบ 32 แสดงลักษณะของครอบเลนส์ (ก) ครอบเลนส์ชิ้นบนสำหรับครอบปิดอุปกรณ์ และ (ข) ครอบเลนส์ชิ้นล่างสำหรับวางเลนส์และอุปกรณ์

3.3.3 วงแหวนยึดจับเลนส์และอุปกรณ์

วงแหวนยึดจับเลนส์และอุปกรณ์ประดิษฐ์ขึ้นจากท่อพีวีซีเพื่อใช้สำหรับยึดจับเลนส์และอุปกรณ์ โดยเลนส์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการประดิษฐ์มีขนาดที่แตกต่างกันดังนั้นก็จะต้องกึ่งท่อพีวีซีให้มีขนาดเหมาะสมในการยึดจับเลนส์และอุปกรณ์แต่ละชิ้น โดยกึ่งท่อพีวีซีให้ขนาดของ b สามารถสวมเข้าไปในกระบอกเลนส์ได้พอดี และขนาดของ a นั้นขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเลนส์และอุปกรณ์แต่ละชิ้น ลักษณะของวงแหวนยึดจับเลนส์และอุปกรณ์แสดงดังภาพประกอบ 33



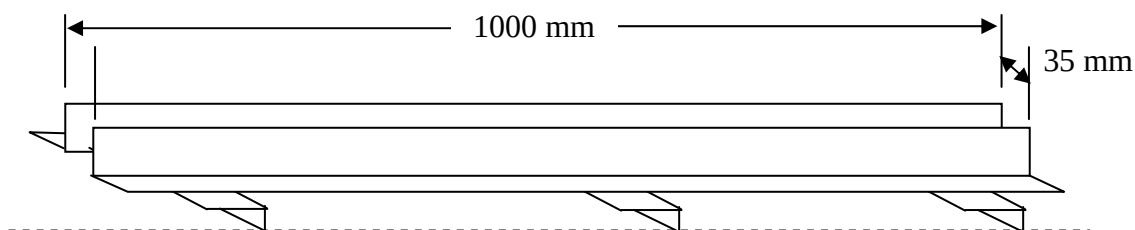
ภาพประกอบ 33 แสดงการออกแบบวงแหวนยึดจับเลนส์และอุปกรณ์ (ก) ลักษณะของวงแหวนยึดจับเลนส์และอุปกรณ์ (ข) ลักษณะด้านหน้าวงแหวนยึดจับเลนส์และอุปกรณ์ และ(ค) ลักษณะด้านข้างวงแหวนยึดจับเลนส์และอุปกรณ์

3.3.4 ชุดรางเลื่อนเชิงแสง (Optical Bench)

สำหรับการวิจัยนี้ได้ออกแบบชุดรางเลื่อนเชิงแสง โดยประกอบขึ้นด้วยเหล็กฉากตามการออกแบบ จำนวน 2 ชุด คือชุดที่ 1 มีขนาดความยาว 1000 มิลลิเมตร และชุดที่ 2 มีขนาดความยาว 300 มิลลิเมตร ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.3.4.1 รางเลื่อนเชิงแสงชุดที่ 1

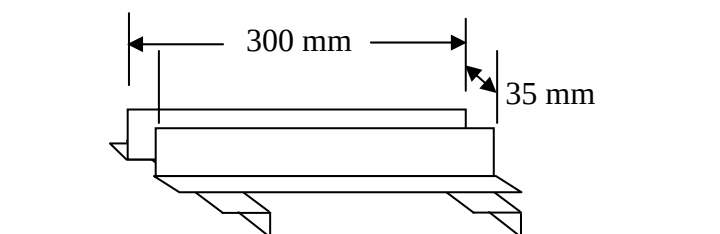
รางเลื่อนเชิงแสงชุดที่ 1 ได้ออกแบบให้มีขนาดความยาว 1000 มิลลิเมตร และความกว้าง 35 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 34 ใช้สำหรับวางอุปกรณ์เพื่อทดลองปรับระยะห่างของอุปกรณ์แต่ละชิ้นก่อนการประกอบชุดอุปกรณ์เข้ากับกระบอกลens



ภาพประกอบ 34 แสดงรางเลื่อนเชิงแสงชุดที่ 1

3.3.4.2 รางเลื่อนเชิงแสงชุดที่ 2

รางเลื่อนเชิงแสงชุดที่ 2 ได้ออกแบบให้มีขนาดความยาว 300 มิลลิเมตร และความกว้าง 35 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 35 ใช้สำหรับวางกระบอกลens ที่ประกอบชุดเลนส์แล้ว เพื่อทำการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงจากต้นกำเนิดแสงชนิดต่างๆ



ภาพประกอบ 35 แสดงรางเลื่อนเชิงแสงชุดที่ 2

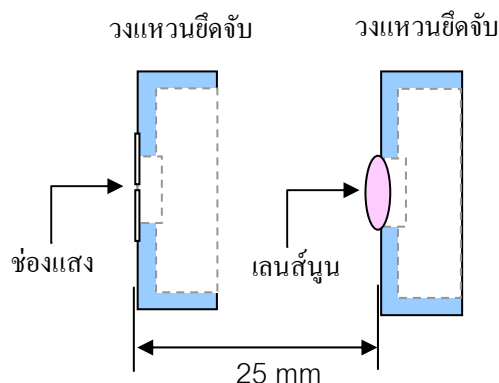
3.4 ประดิษฐ์และประกอบอุปกรณ์

การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยอุปกรณ์ตามการออกแบบในภาพประกอบ 31 ประกอบไปด้วย ตัวทำขนาน (Collimator) เกรตติง (Grating) และเลนส์นูน 4 ชิ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 การประดิษฐ์และประกอบอุปกรณ์

3.4.1.1 ตัวทำขนาน (Collimator)

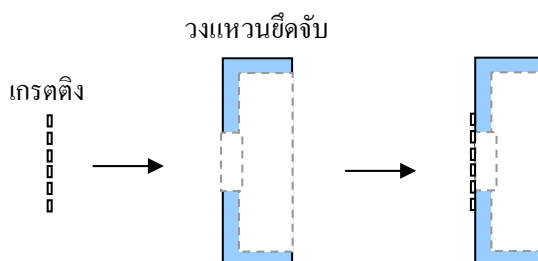
ตัวทำขนานประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 ชิ้น คือ ช่องแสงและเลนส์นูนความยาวโฟกัส 25 มิลลิเมตร โดยเลนส์นูนและช่องแสงมีระยะห่างกัน 25 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 36 ช่องแสงทำจากใบมีดโกน 2 ชิ้นติดบนวงแหวนยึดจับอุปกรณ์ เช่นเดียวกับเลนส์นูนซึ่งติดบนวงแหวนยึดจับเลนส์ที่กลึงช่องสำหรับวางเลนส์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร เมื่อลำแสงจากต้นกำเนิดผ่านช่องแสงและเลนส์นูนนี้ออกไปจะเป็นลำแสงขนาน



ภาพประกอบ 36 แสดงลักษณะของตัวทำขนาน

3.4.1.2 เกรตติง (Grating)

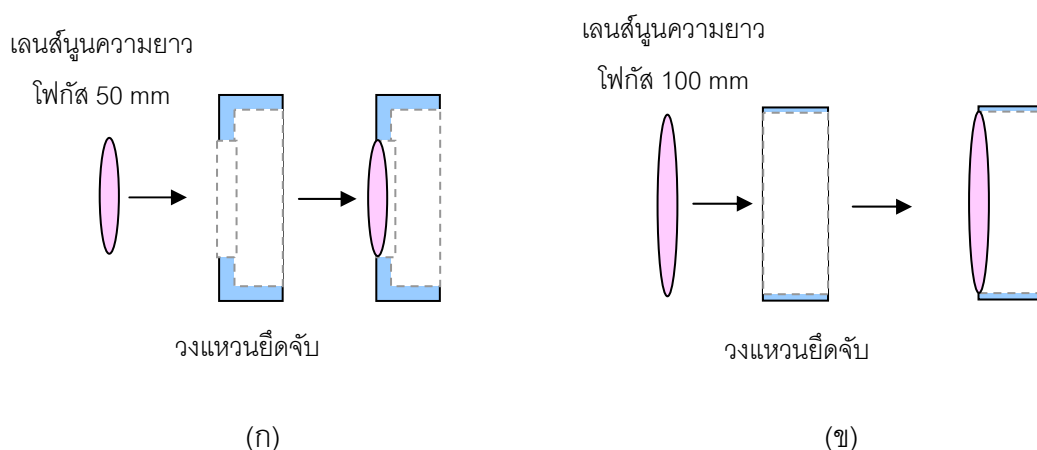
นำเกรตติงประกอบเข้ากับวงแหวนยึดจับอุปกรณ์ ดังภาพประกอบ 37 (ก) และ (ข) โดยเกรตติงจะทำหน้าที่ในการแยกสเปกตรัมของแสงที่ผ่านมาจากตัวทำขนาน เกรตติงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้เกรตติงแบบส่องผ่าน (Transmission Grating) ซึ่งมีจำนวนของช่องสลิตเท่ากับ 500 เส้นต่อมิลลิเมตร



ภาพประกอบ 37 แสดงการประกอบเกรตติงเข้ากับวงแหวนยึดจับอุปกรณ์

3.4.1.3 ชุดเลนส์

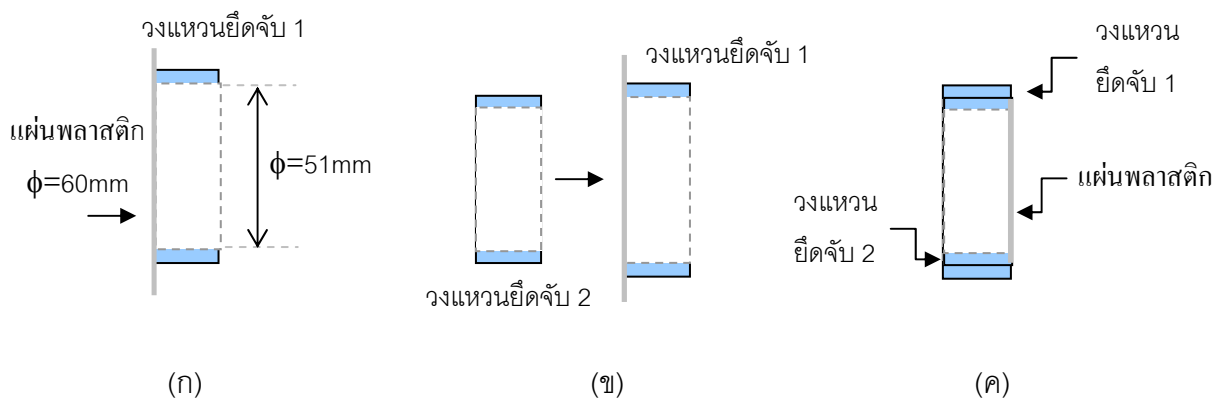
ชุดเลนส์ประกอบด้วยเลนส์นูนจำนวน 4 ชิ้น ดังนี้ เลนส์นูนความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น และเลนส์นูนความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น การประดิษฐ์ชุดเลนส์โดยประกอบเลนส์แต่ละชิ้นเข้ากับวงแหวนยึดจับเลนส์ดังภาพประกอบ 38



ภาพประกอบ 38 แสดงการประกอบเลนส์นูนเข้ากับวงแหวนยึดจับเลนส์ (ก) เลนส์นูนความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร และ (ข) เลนส์นูนความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร

3.4.1.4 ฉากรับภาพ

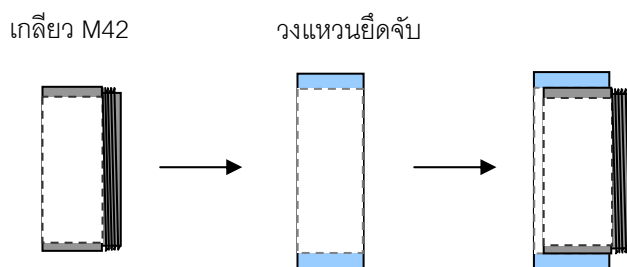
ฉากรับภาพประดิษฐ์ขึ้นจากพลาสติกชนิดโปร่งแสง ใช้รับภาพจากการเลี้ยวเบนของแสงผ่านชุดอุปกรณ์ การประดิษฐ์ฉากรับภาพโดยตัดพลาสติกโปร่งแสงให้มีลักษณะเป็นวงกลมและมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวางบนวงแหวนยึดจับ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 39 (ก) แล้วใช้วงแหวนยึดจับ 2 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง



ภาพประกอบ 39 แสดงการประดิษฐ์ฉากรับภาพ (ก) การวางแผ่นพลาสติกบนวงแหวนยึดจับ 1
(ข) การนำวงแหวนยึดจับ 2 สวมเข้าไปในวงแหวนยึดจับเลนส์ 1 (ค) ฉากรับภาพ

3.4.1.5 วงแหวนยึดอุปกรณ์กล้อง

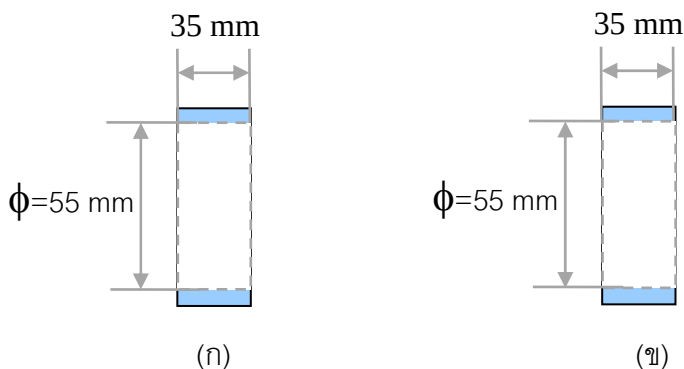
ชุดอุปกรณ์จะยึดติดกับกล้องด้วยท่อเกลียว M42 ซึ่งเป็นท่อเกลียวขนาดเดียวกับเลนส์ทั่วไปของกล้อง PENTAX รุ่น K 20D ใช้เพื่อเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์เข้ากับกล้อง ประดิษฐ์วงแหวนยึดอุปกรณ์กล้อง โดยกลึงท่อพีวีซีให้สามารถสวมเข้ากับท่อเกลียว M42 ได้พอดี จากนั้นสวมท่อเกลียว M42 เข้ากับท่อพีวีซี แสดงดังภาพประกอบ 40



ภาพประกอบ 40 แสดงการประดิษฐ์วงแหวนยึดอุปกรณ์กล้อง

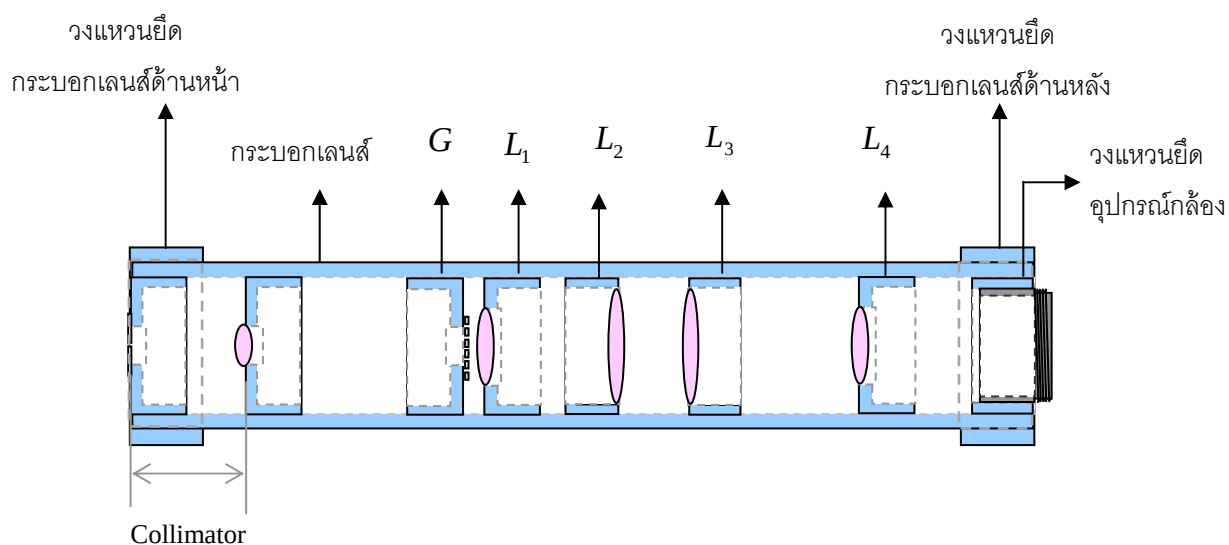
3.4.1.6 วงแหวนยึดกระบอกลens

วงแหวนยึดกระบอกลensประดิษฐ์ขึ้นจากท่อต่อตรง PVC สำหรับท่อขนาด 2 นิ้ว ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 55 มิลลิเมตร ตัดท่อต่อตรง PVC ดังกล่าวตามแนวขวาง ออกเป็น 2 ชิ้น ขนาดความยาว 35 มิลลิเมตร แสดงดังภาพประกอบ 41



ภาพประกอบ 41 แสดงวงแหวนยึดกระบอกลens (ก) วงแหวนยึดกระบอกลensด้านหน้าของชุดอุปกรณ์ (ข) วงแหวนยึดกระบอกลensด้านหลังของชุดอุปกรณ์

วงแหวนยึดกระบอกลensใช้ยึดกระบอกลensเมื่อประกอบอุปกรณ์แต่ละชิ้นลงในกระบอกลensครบทุกชิ้นแล้ว จากนั้นสวมวงแหวนยึดกระบอกลensเข้ากับกระบอกลensด้านปลายทั้งสองด้านของกระบอกลens แสดงดังภาพประกอบ 42

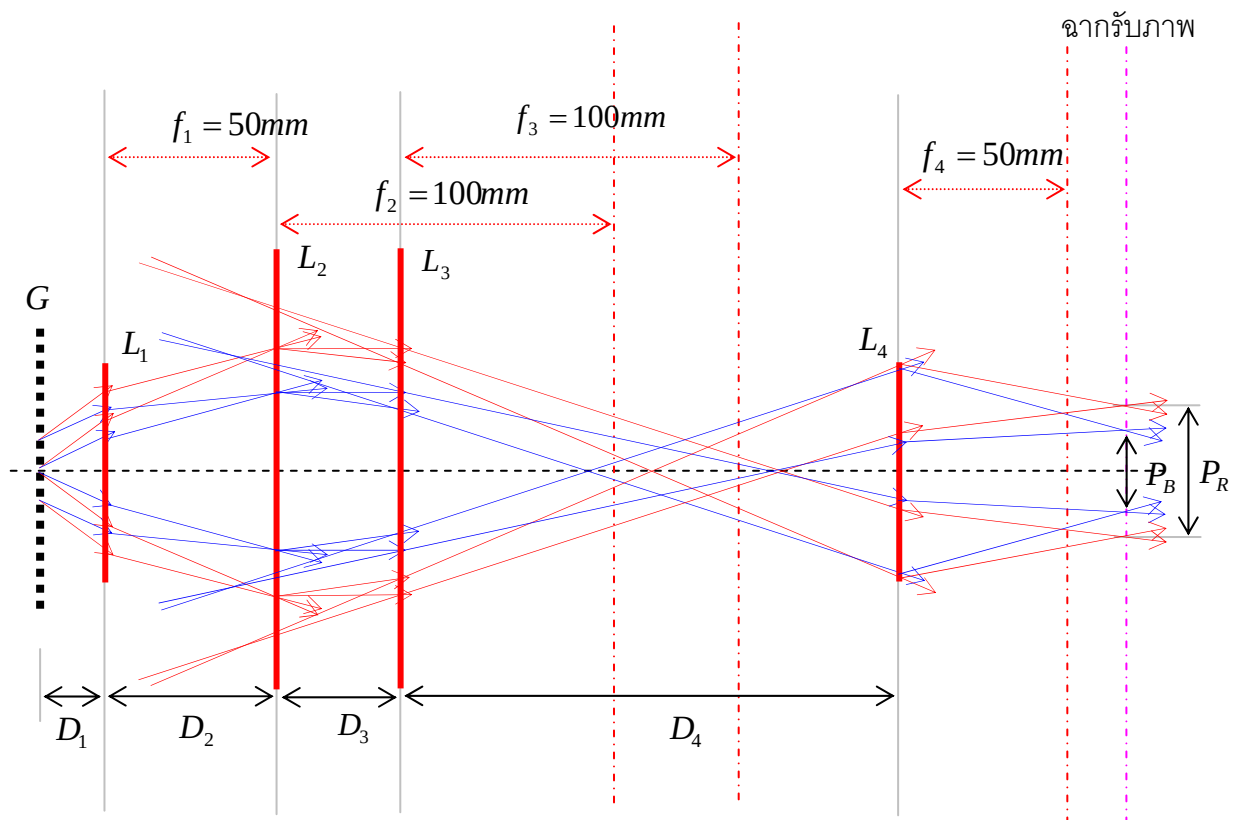


ภาพประกอบ 42 แสดงการยึดกระบอกลensด้วยวงแหวนยึดกระบอกลens

3.4.2 การหาตำแหน่งการจัดวางเลนส์

ทดลองวางตัวทำขนาน เลนส์ 4 ชิ้น และฉากรับภาพ ตามการวิเคราะห์ทางเดินแสงและการเกิดภาพในข้อ 3.2 บนรางเลื่อนเชิงแสงขนาดความยาว 1000 มิลลิเมตร โดยใช้หลอดไฮโดรเจนเป็นต้นกำเนิดแสง ทำการทดลองปรับตำแหน่งเลนส์ และสังเกตการเกิดภาพที่ให้ภาพมีความคมชัดที่สุดและมีระยะห่างระหว่างตำแหน่งสเปกตรัมแสงสีแดงบนฉาก (ระยะ P) ประมาณ 18 มิลลิเมตร หรือประมาณ 3 ส่วน 4 ของความยาวตามแนวนอนของ เซนเซอร์ซีมอส

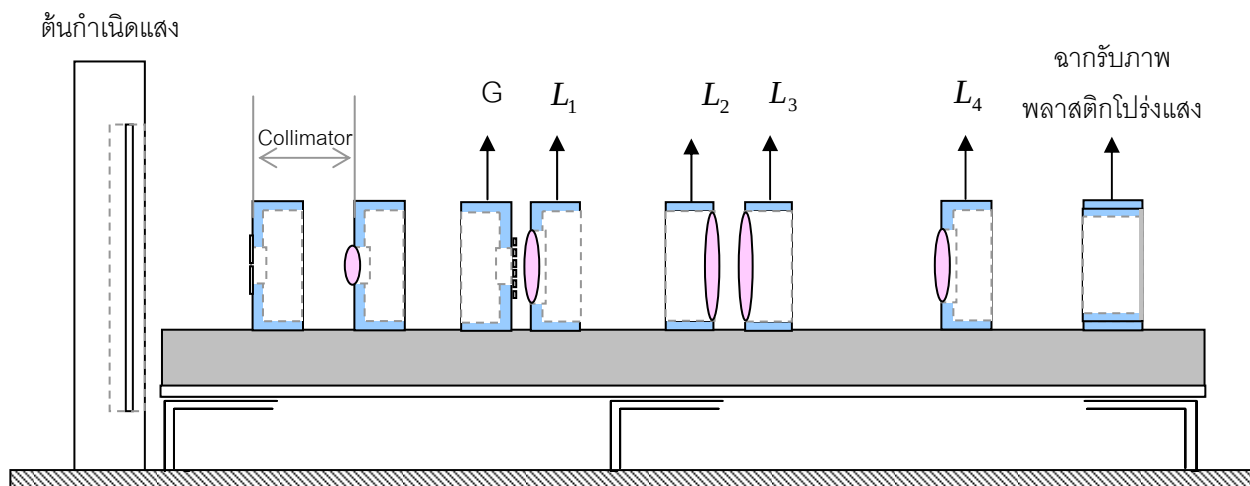
การหาตำแหน่งการจัดวางเลนส์โดยศึกษาทางเดินแสงและการเกิดภาพภาพโดยเขียนทางเดินแสงที่ระยะต่างๆเพื่อให้ได้ระยะที่เหมาะสมคือภาพที่ได้ต้องมีขนาดไม่เกิน 23.4 มิลลิเมตรและระยะ FFD ต้องมีขนาดมากกว่า 45.46 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงทำการจัดวางอุปกรณ์ที่ระยะต่างๆแสดงดังภาพประกอบ 43



ภาพประกอบ 43 แสดงลักษณะทางเดินของแสงและตำแหน่งที่ระยะต่างๆของชุดอุปกรณ์

3.4.3 การประกอบเลนส์และอุปกรณ์ตามการออกแบบ

ประกอบเลนส์และอุปกรณ์ตามการออกแบบโดยจัดวางลำดับของอุปกรณ์ตามระยะในภาพประกอบ 43 บนรางเลื่อนเชิงแสงขนาดความยาว 1000 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 44



ภาพประกอบ 44 แสดงการทดสอบระยะของชุดอุปกรณ์บนรางเลื่อนเชิงแสง

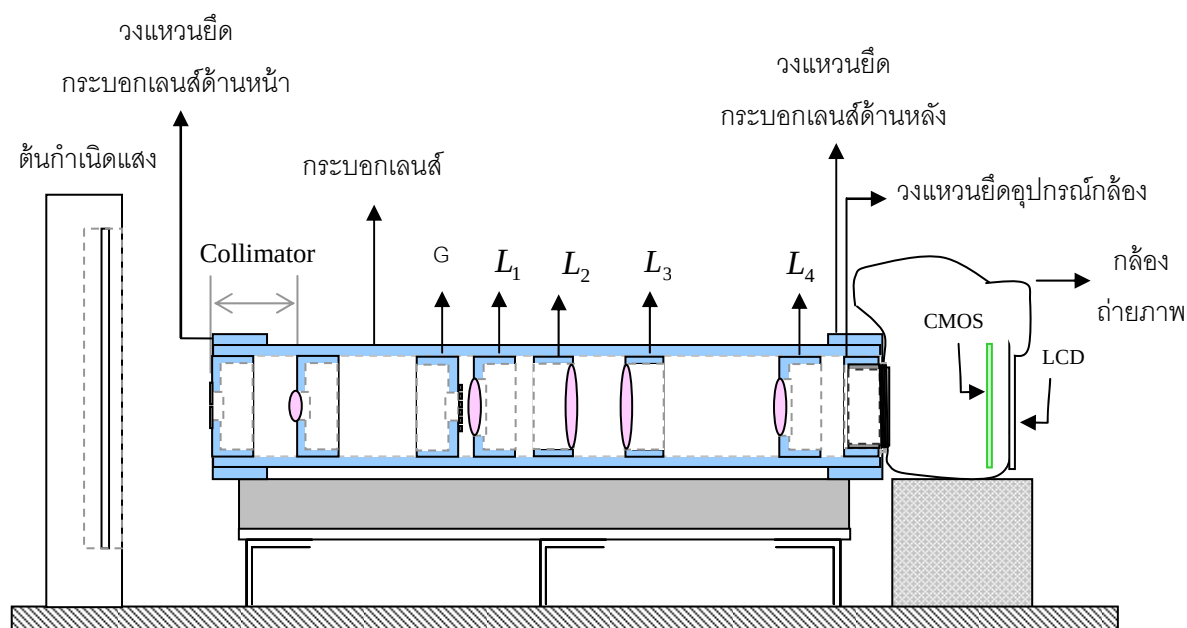
3.4.3.1 เปิดต้นกำเนิดแสงเพื่อให้แสงผ่านชุดอุปกรณ์ ทดสอบระยะของอุปกรณ์ด้วยตาเปล่าจากภาพสเปกตรัมที่ปรากฏบนฉากพลาสติกโปร่งแสง

3.4.3.2 ทำการเลื่อนตำแหน่งเกรตติง เลนส์ ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 4 และฉากรับภาพพลาสติกโปร่งแสง โดยสังเกตผลของการเลื่อนอุปกรณ์แต่ละชั้นที่มีต่อความสว่าง ขนาดของภาพ และความตรงของเส้นสเปกตรัม ด้วยตาเปล่า

3.4.3.3 บันทึกตำแหน่งที่ให้ภาพคมชัด มีความเข้มสูงและขนาดภาพประมาณ 18 มิลลิเมตร

3.5 ถ่ายภาพจากต้นกำเนิดแสงที่ทราบองค์ประกอบความยาวคลื่น

3.5.1 ประกอบชุดอุปกรณ์ตามหัวข้อ 3.4.3 โดยนำเอาฉากพลาสติกโปร่งแสงออกและนำชุดอุปกรณ์สวมเข้ากับวงแหวนยึดอุปกรณ์กล้อง และนำชุดอุปกรณ์ประกอบเข้ากับกล้องดิจิทัล แอสแอลอาร์ (DSLR) ยี่ห้อ PENTAX รุ่น K 20D จากนั้นนำไปวางบนรางเลื่อนเชิงแสงขนาดความยาว 300 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 45



ภาพประกอบ 45 แสดงการประกอบชุดอุปกรณ์เข้ากับกล้องถ่ายภาพ

3.5.2 ทำการถ่ายภาพจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งในการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกหลอดไฮโดรเจน (Hydrogen Tube) หลอดไอปรอท (Mercury Tube) และหลอดฮีเลียม (Helium Tube) เป็นต้นกำเนิดแสงสำหรับการปรับเทียบ (Calibration)

3.5.3 นำภาพที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อทำการแก้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ตำแหน่งต่างๆของชุดอุปกรณ์

3.5.4 ทำการทดสอบชุดอุปกรณ์ โดยนำไปถ่ายภาพสเปกตรัมแสงจาก หลอดคริปทอน (Krypton Tube) หลอดไอน้ำ (Water vapor Tube) หลอดโซเดียม (Sodium Tube) และหลอดนีออน (Neon Tube)

3.6 คำนวณค่าความยาวคลื่นจากภาพถ่าย

3.6.1 คำนวณค่าความยาวคลื่นของภาพถ่ายจากเลนส์ชั้นที่ 1

จากสมการเกรตติงสามารถหาความยาวคลื่นจากการเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 ได้จาก

$$\lambda = d \sin \theta \quad (m = 1) \quad (3.1)$$

พิจารณาการเกิดภาพจากเลนส์ชั้นที่ 1 ได้ จากภาพประกอบ 19 จะได้ค่า

$\sin \theta$ จาก

$$\sin \theta = \frac{P_1}{2\sqrt{f_1^2 + \left(\frac{P_1}{2}\right)^2}}$$

เมื่อ P_1 คือ ระยะห่างของตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงที่ห่างจากตำแหน่งการเลี้ยวเบน
อันดับที่ศูนย์ด้วยเลนส์ชั้นที่ 1

และ คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์ชั้นที่ 1

แทนค่า $\sin \theta$ ลงในสมการ 3.1

$$\lambda = d \frac{P_1}{2\sqrt{f_1^2 + \left(\frac{P_1}{2}\right)^2}} \quad (3.2)$$

3.6.2 คำนวณความยาวคลื่นจากภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของแสงผ่านชุดอุปกรณ์

คำนวณความยาวคลื่นจากภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของแสงผ่านชุดอุปกรณ์ โดย
วิเคราะห์จากทางเดินของแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเลนส์ 4 ชั้น ที่มีความยาวโฟกัสแตกต่างกันเกิดภาพที่
เซนเซอร์ซีมอส (CMOS Sensor) ได้ภาพของสเปกตรัมที่มีระยะห่างกัน P_4 ดังภาพประกอบ 22
คำนวณหาความยาวคลื่นของสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านชุดอุปกรณ์ได้ดังนี้

จากสมการ(2.43) $P_4 = MP_1$ และสมการ (2.28) $P_1 = 2f_1 \tan \theta$ เขียนสมการ (2.43) ใหม่ได้เป็น

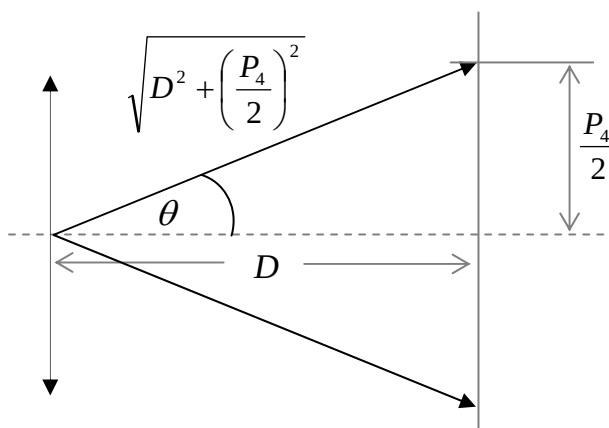
$$P_4 = M 2 f_1 \tan \theta \quad (3.3)$$

กำหนดให้ $Mf_1 = D$

$$\text{จะได้} \quad P_4 = 2D \tan \theta \quad (3.4)$$

สมการ (3.4) ถ้า P_4 เป็นระยะห่างระหว่างเส้นสเปกตรัมของภาพถ่าย ค่า $\tan \theta$ จะสัมพันธ์กับรูป
สามเหลี่ยมมุมฉากตามภาพประกอบ 46 ซึ่งจะได้ค่า $\sin \theta$ เป็น

$$\sin \theta = \frac{P_4}{2\sqrt{D^2 + \left(\frac{P_4}{2}\right)^2}} \quad (3.5)$$



ภาพประกอบ 46 แสดงระยะห่างระหว่างเส้นสเปกตรัมของภาพถ่าย

แทนค่า $\sin \theta$ จากสมการ (3.5) ลงในสมการที่ (3.1) จะได้ความยาวคลื่น เป็น

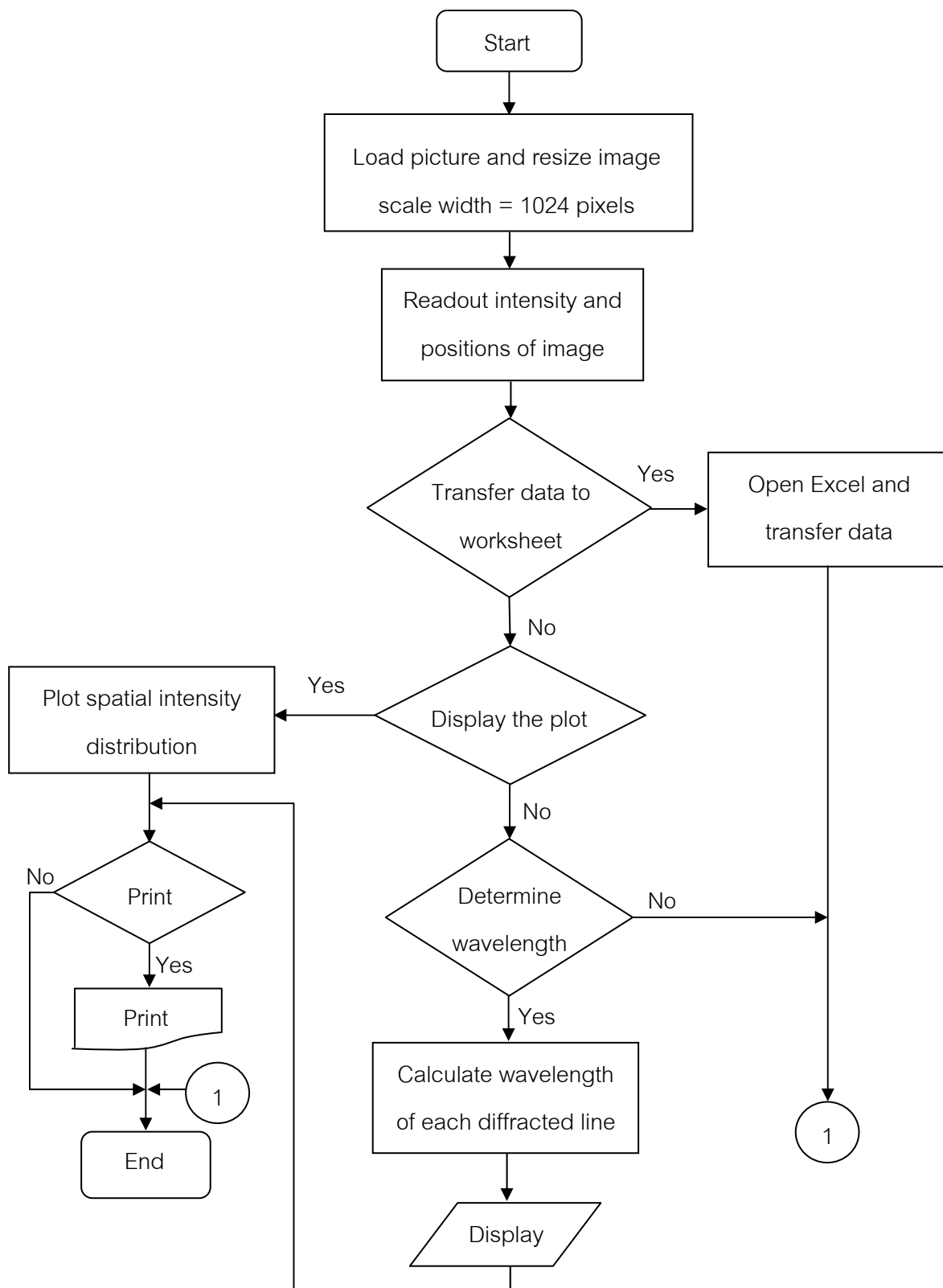
$$\lambda = d \frac{P_4}{2\sqrt{D^2 + \left(\frac{P_4}{2}\right)^2}} \quad (3.6)$$

โดย $Mf_1 = D$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น
 f_1 คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์ชั้นที่ 1
 M คือ กำลังขยายของเลนส์ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 3 และชั้นที่ 4
 P_4 คือ ระยะห่างของตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงที่ห่างจากตำแหน่งการเลี้ยวเบน
 อันดับที่สูงด้วยเลนส์ชั้นที่ 4

3.7 เขียนโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่นจากภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของแสง

เขียนโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่นจากภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของแสง ด้วยภาษา วิวอลเบสิก 6 (Visual Basic 6) ซึ่งใช้เป็นส่วนเก็บข้อมูลและส่วนแสดงผลของการตรวจวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงจากภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของแสง ในรูปแบบของกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงกับเลขที่คอร์ดัมน์ของฟิสิกเซลบนภาพถ่าย เพื่อเปรียบเทียบผลของการตรวจวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณความยาวคลื่น ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าความยาวคลื่นมาตรฐานทั่วไป โดยรูปแบบการทำงานของโปรแกรมแสดงดังภาพประกอบ 47



ภาพประกอบ 47 แสดงรูปแบบการทำงานของโปรแกรมวัดตำแหน่งวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและ
คำนวณค่าความยาวคลื่นจากภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของแสง

3.8 วิเคราะห์และปรับเทียบชุดอุปกรณ์หรือโปรแกรมให้ได้ผลการวัดที่ใกล้เคียงกับค่าของต้นกำเนิดแสงที่ใช้ทดสอบ

เพื่อให้ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงสามารถถ่ายภาพสเปกตรัมแสง ที่ให้ผลการวัดใกล้เคียงกับค่าความยาวคลื่นที่ทราบ ของต้นกำเนิดแสงที่ใช้ทดสอบ จึงทำการวิเคราะห์และปรับเทียบชุดอุปกรณ์หรือโปรแกรม โดยดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

3.8.1 ทำการถ่ายภาพสเปกตรัมแสง ที่ทราบความยาวคลื่นแน่นอนได้แก่

3.8.1.1 ถ่ายภาพสเปกตรัมแสงของหลอดไฮโดรเจน(Hydrogen Tube)

3.8.1.2 ถ่ายภาพสเปกตรัมแสงของหลอดฮีเลียม(Helium Tube)

3.8.1.3 ถ่ายภาพสเปกตรัมแสงของหลอดไอปรอท(Mercury Tube)

3.8.2 วัดระยะห่างของเส้นสเปกตรัมแสงที่มีสีต่างๆกันจากภาพถ่ายในหัวข้อ 3.8.1

3.8.3 คำนวณค่า D ตามสมการ (3.6) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

3.8.4 หาค่าเฉลี่ยของ D และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.8.5 นำค่า D จากหัวข้อ 3.8.4 ไปใช้เป็นค่าในการปรับเทียบชุดอุปกรณ์และเขียนโปรแกรมแปลงค่าตำแหน่งเส้นสเปกตรัมเป็นความยาวคลื่น

3.9 สรุปผลการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสง

นำผลการทดลองที่ได้จากชุดอุปกรณ์ ไปทำการวิเคราะห์จากโปรแกรมที่เขียนขึ้น เปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลจริงของต้นกำเนิดแสงที่ทราบค่าความยาวคลื่นแน่นอน สำหรับใช้ทดสอบ เพื่อสรุปผลของการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่ประดิษฐ์ขึ้น

บทที่ 4

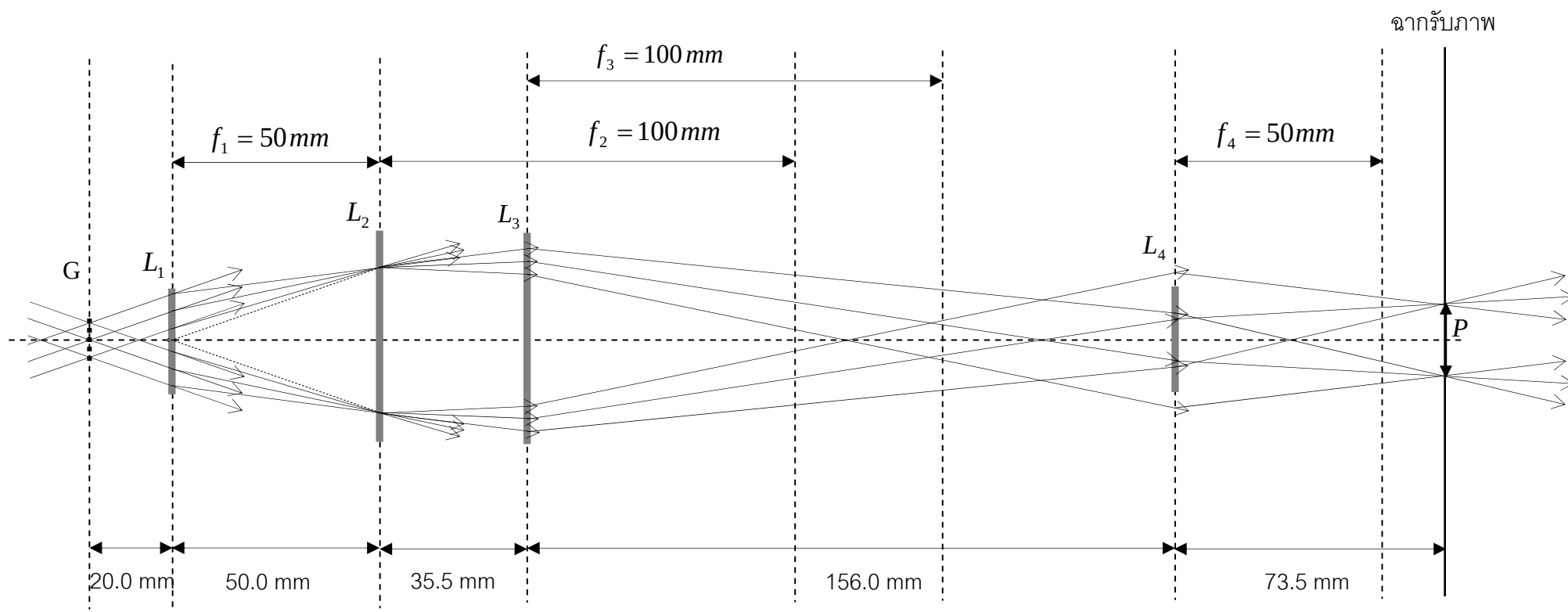
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง ประกอบขึ้นจากตัวทำขนาน เกรตติง และเลนส์นูน 4 ชิ้น ดันกำเนิดแสงที่ใช้เป็นความยาวคลื่นสำหรับการปรับเทียบ(Calibration) ได้แก่ หลอดไฮโดรเจน(Hydrogen Tube) หลอดฮีเลียม(Helium Tube) และหลอดปรอท(Mercury Tube) การทดสอบชุดอุปกรณ์ทำโดยถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่ทราบค่าความยาวคลื่นแน่นอนได้แก่ หลอดคริปทอน(Krypton Tube) หลอดไอน้ำ(Water Vapor Tube) หลอดโซเดียม(Sodium Tube) และหลอดนีออน (Neon Tube) ผลการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์และทดสอบชุดอุปกรณ์ มีรายละเอียดดังนี้

- 4.1 การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง
- 4.2 การถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่ใช้เพื่อเป็นค่าสำหรับการปรับเทียบ (Calibration)
- 4.3 การสร้างและทดสอบโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่น

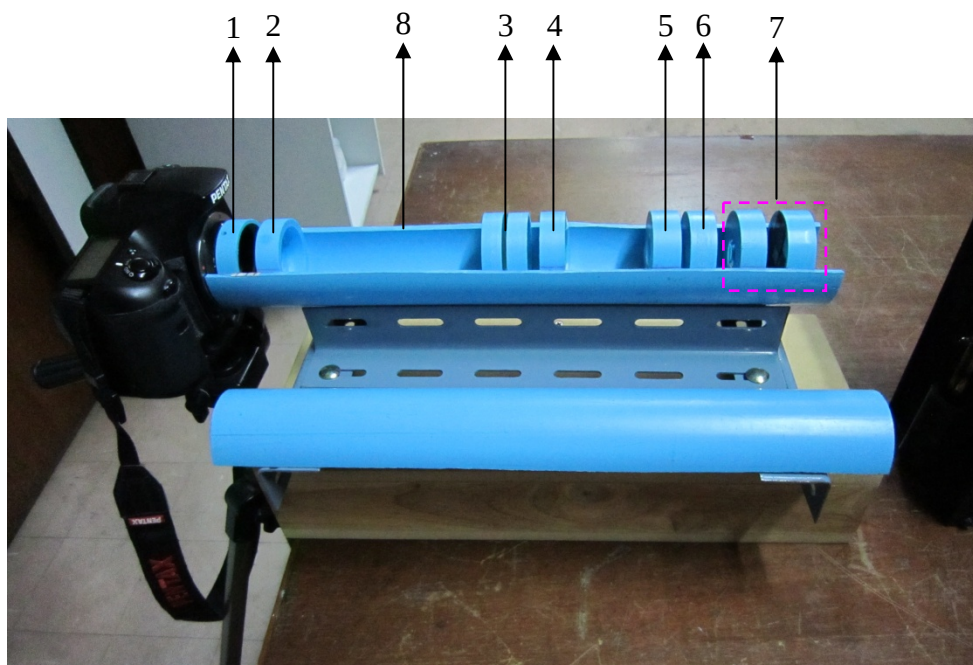
4.1 การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง

จากการเขียนทางเดินแสงและการเกิดภาพ และปรับระยะของอุปกรณ์แต่ละชิ้น พบว่าระยะการวางอุปกรณ์แต่ละชิ้นที่ให้ขนาดของภาพสเปกตรัมเป็นเส้นตรงและคมชัดมากที่สุด คือ ระยะห่างระหว่างเกรตติง(G)และเลนส์นูนชิ้นที่ 1(L_1) ห่างกัน 20.0 มิลลิเมตร เลนส์นูนชิ้นที่ 1(L_1) และเลนส์นูนชิ้นที่ 2 (L_2) ห่างกัน 50.0 มิลลิเมตร เลนส์นูนชิ้นที่ 2 (L_2) และเลนส์นูนชิ้นที่ 3 (L_3) ห่างกัน 35.5 มิลลิเมตร เลนส์นูนชิ้นที่ 3 (L_3) และเลนส์นูนชิ้นที่ 4 (L_4) ห่างกัน 156.0 มิลลิเมตร โดยเกิดภาพสเปกตรัมที่ตำแหน่ง 73.5 มิลลิเมตร ห่างจากเลนส์นูนชิ้นที่ 4 (L_4) แสดงดังภาพประกอบ 48 ซึ่งภาพสเปกตรัมที่ได้มีความเหมาะสมกับขนาดของเซนเซอร์ซีมอสและระยะ FFD ของกล่อง PENTAX K20D



ภาพประกอบ 48 แสดงตำแหน่งการวางอุปกรณ์และเลนส์แต่ละชิ้นของชุดอุปกรณ์

การประกอบชุดอุปกรณ์ที่ระยะต่างๆตามภาพประกอบ 48 เข้ากับกระบอบอกเลนส์ แสดงดัง
ภาพประกอบ 49



ภาพประกอบ 49 แสดงลักษณะของชุดอุปกรณ์ประกอบกล้องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่
เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง

จากภาพประกอบ 49	หมายเลข	1	วงแหวนยึดอุปกรณ์กล้อง
	หมายเลข	2	เลนส์นูนชั้นที่ 4 (L_4) ความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร
	หมายเลข	3	เลนส์นูนชั้นที่ 3 (L_3) ความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร
	หมายเลข	4	เลนส์นูนชั้นที่ 2 (L_2) ความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร
	หมายเลข	5	เลนส์นูนชั้นที่ 1 (L_1) ความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร
	หมายเลข	6	เกรตติงขนาด 500 เส้นต่อมิลลิเมตร
	หมายเลข	7	ตัวทำขนาน
	หมายเลข	8	กระบอบอกเลนส์

งานวิจัยนี้ได้ถ่ายภาพสเปกตรัมแสงโดยใช้ค่าความไวแสง ISO1600 ค่าความเร็วชัตเตอร์ (Exposure Time) ระหว่าง 1/4000 วินาที ถึง 30 วินาที พบว่าค่าความเร็วชัตเตอร์ที่เหมาะสมกับความคมชัดของภาพสเปกตรัมแสงของต้นกำเนิดแสงทั้ง 7 ชนิด คือ หลอดไฮโดรเจน หลอดคริปทอน ใช้ความเร็วชัตเตอร์ที่ 2 วินาที และหลอดฮีเลียม หลอดไอปรอท หลอดไอน้ำ หลอดโซเดียม และหลอดนีออน ใช้ความเร็วชัตเตอร์ที่ 6 วินาที ทำการบันทึกค่าระดับสีเทา (Gray Scale) ของจุดต่างๆบนภาพที่ได้จากเซนเซอร์ซีมอส ที่มีระดับความสว่างสูงสุดเป็น 256 ระดับ คือ 0 ถึง 255

4.2 การถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่ใช้เพื่อเป็นค่าสำหรับการปรับเทียบ (Calibration)

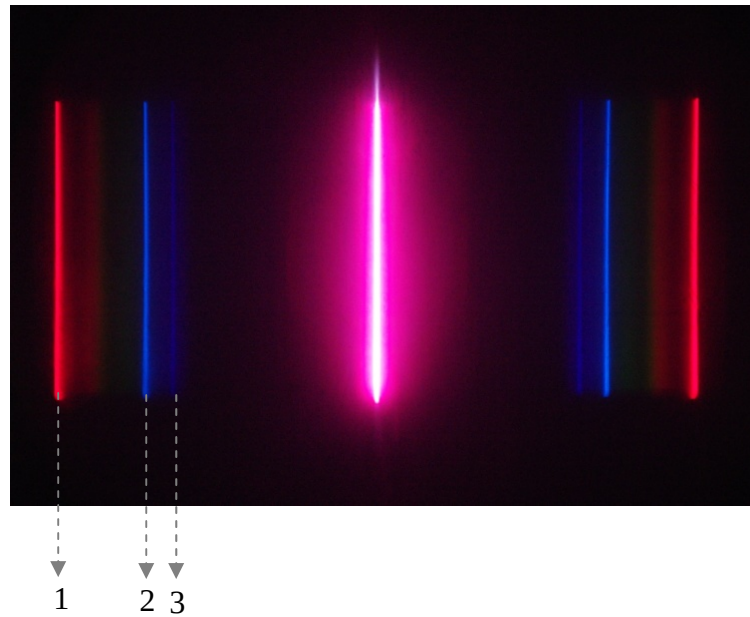
4.2.1 การถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่ใช้สำหรับการปรับเทียบ

ในการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงของต้นกำเนิดแสงเพื่อใช้ในการปรับเทียบ ได้ใช้ต้นกำเนิดแสง 3 ชนิด ได้แก่ หลอดไฮโดรเจน (Hydrogen Tube) หลอดฮีเลียม (Helium Tube) และหลอดไอปรอท (Mercury Tube) การจัดวางชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพแสดงดังภาพประกอบ 50



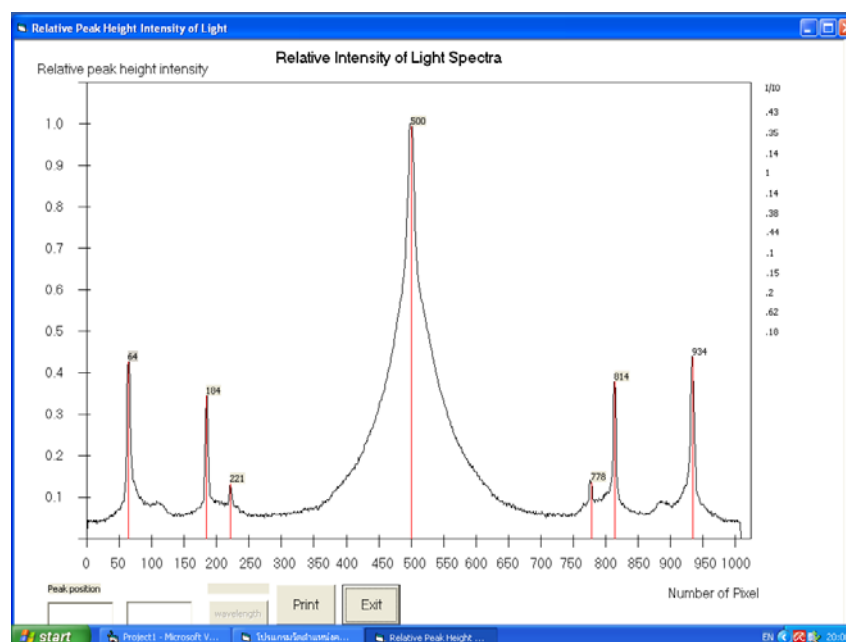
ภาพประกอบ 50 การจัดวางและประกอบชุดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง

ผลการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงจากต้นกำเนิดแสงทั้ง 3 ชนิด พบว่าเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดไฮโดรเจนที่มีความคมชัดมีจำนวน 3 เส้นได้แก่ (1) เส้นสเปกตรัมแสงสีแดง (2) เส้นสเปกตรัมแสงสีฟ้า และ (3) เส้นสเปกตรัมแสงสีม่วง ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 51



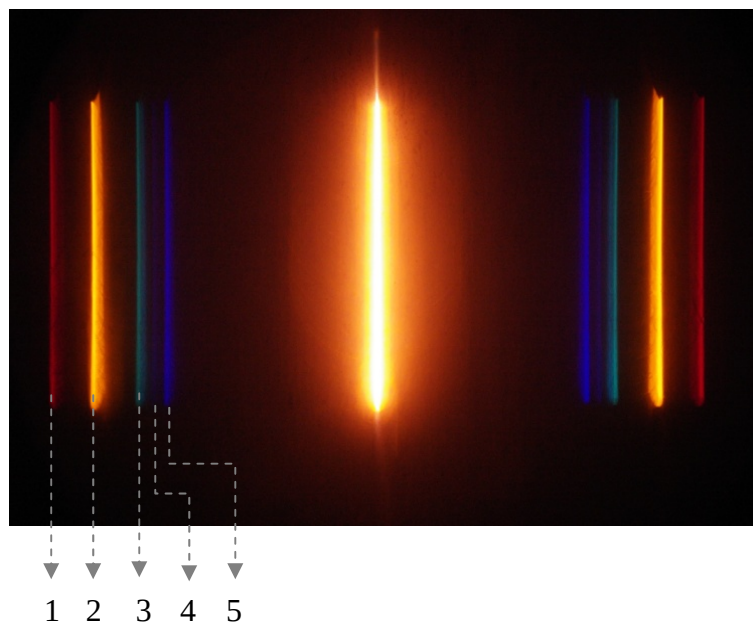
ภาพประกอบ 51 แสดงภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดไฮโดรเจน

ผลการนำภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดไฮโดรเจน มาทำการวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่นด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้น พบว่ามีตำแหน่งยอด(Peak) ของเส้นสเปกตรัมที่คมชัดจำนวน 3 ยอด แสดงดังภาพประกอบ 52



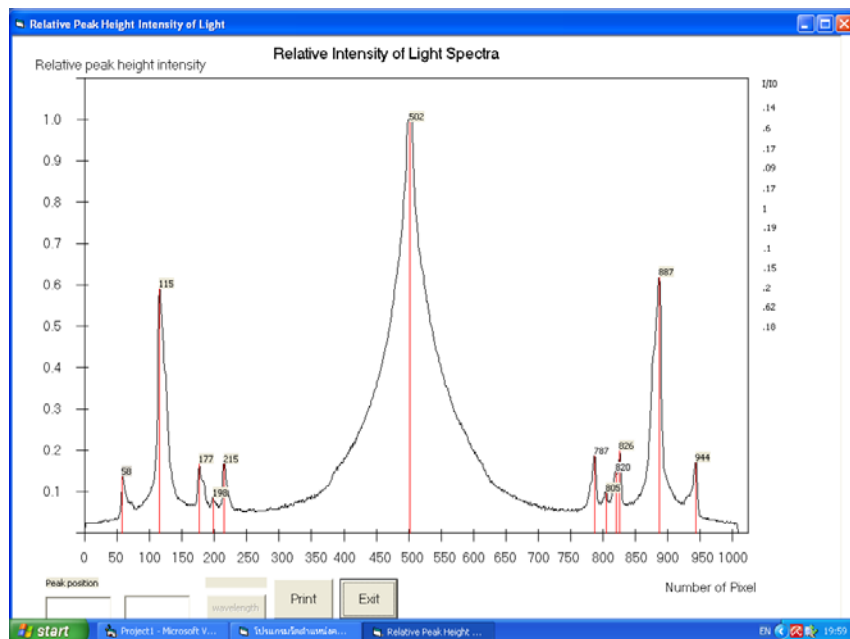
ภาพประกอบ 52 แสดงตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดไฮโดรเจน

ภาพถ่ายจากหลอดฮีเลียม ให้ภาพที่มีเส้นสเปกตรัมแสงคมชัดจำนวน 5 เส้นได้แก่ (1) เส้นสเปกตรัมแสงสีแดง (2) เส้นสเปกตรัมแสงเหลือง (3) เส้นสเปกตรัมแสงสีเขียว (4) เส้นสเปกตรัมแสงสีฟ้า และ (5) เส้นสเปกตรัมแสงสีน้ำเงิน แสดงดังภาพประกอบ 53



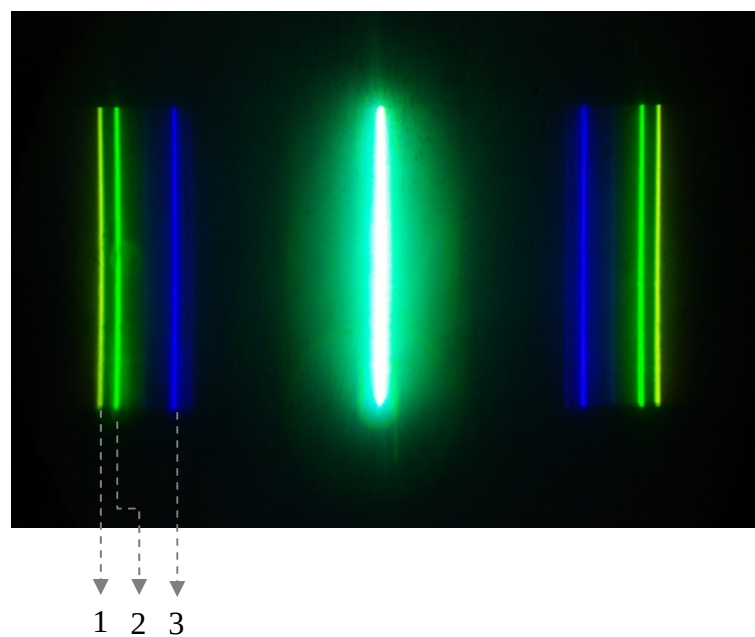
ภาพประกอบ 53 แสดงภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดฮีเลียม

ผลการนำภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดฮีเลียม มาทำการวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่นด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้น พบว่ามีตำแหน่งยอด(Peak) ของเส้นสเปกตรัมที่คมชัดจำนวน 5 ยอด แสดงดังภาพประกอบ 54



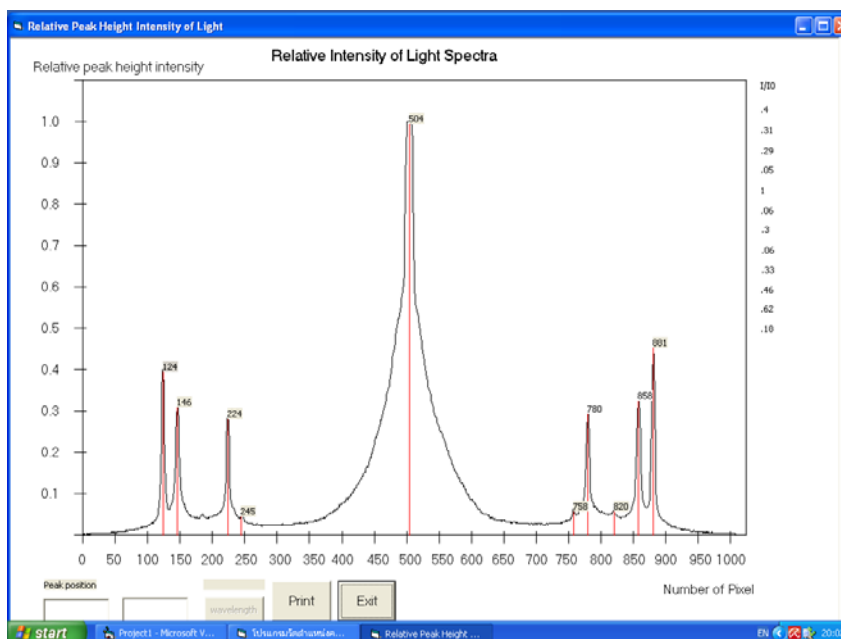
ภาพประกอบ 54 แสดงตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดฮีเลียม

ภาพถ่ายจากหลอดไอปรอท ให้ภาพที่มีเส้นสเปกตรัมแสงคมชัดจำนวน 3 เส้นได้แก่ (1) เส้นสเปกตรัมแสงสีเหลือง (2) เส้นสเปกตรัมแสงสีเขียว และ (3) เส้นสเปกตรัมแสงสีฟ้า ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 55



ภาพประกอบ 55 แสดงภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดไอปรอท

ผลการนำภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดไฮปรอท มาทำการวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่นด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้น พบว่ามีตำแหน่งยอด(Peak) ของเส้นสเปกตรัมที่คมชัดจำนวน 3 ยอด แสดงดังภาพประกอบ 56



ภาพประกอบ 56 แสดงตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดไฮปรอท

4.2.2 การคำนวณค่าคงตัว D ของชุดอุปกรณ์

การคำนวณค่าคงตัว D ของชุดอุปกรณ์ ได้ทำการวัดตำแหน่งของเส้นสเปกตรัมที่ทราบความยาวคลื่น($\frac{P}{2}$) โดยทำการวัดจากภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของแสงจากหลอดไฮโดรเจน หลอดฮีเลียม และหลอดไฮปรอท ผ่านเกรตติง ด้วยโปรแกรม Excel และทำการคำนวณหาค่า D ตามสมการ (3.6) ผลการคำนวณแสดงดังตาราง 3

ตาราง 3 แสดงค่าตำแหน่งของเส้นสเปกตรัม ($\frac{P}{2}$) และค่า D

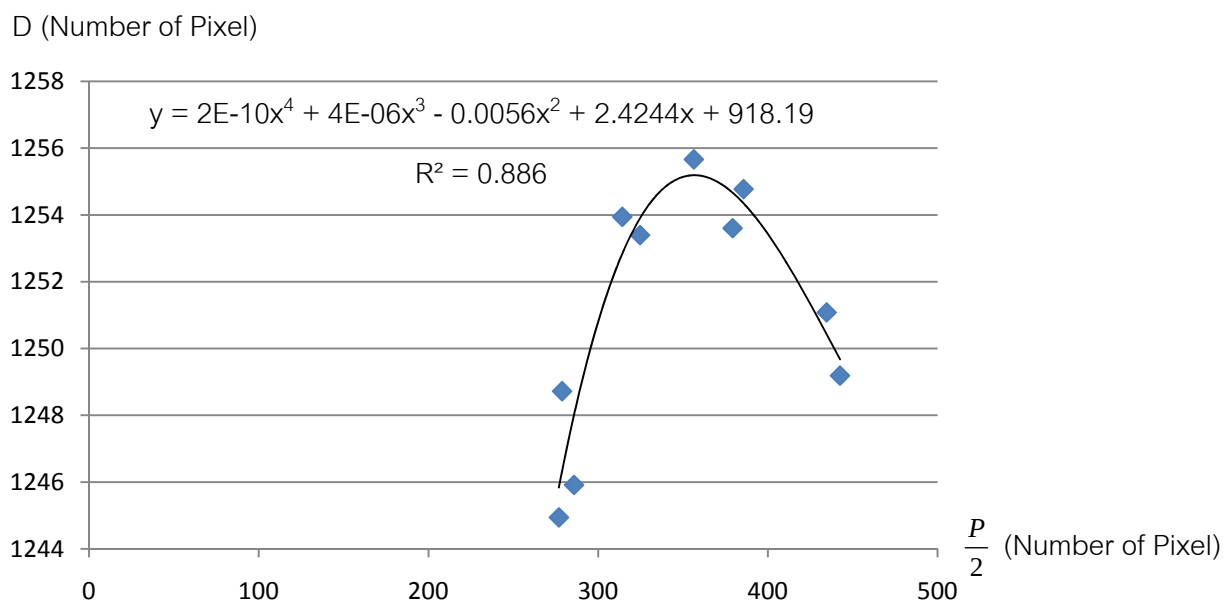
สเปกตรัมแสง	ค่า $\frac{P}{2}$ (Number of Pixel)	ค่า D (Number of Pixel)
แสงสีแดง(He)	443	1249
แสงสีแดง(H)	435	1251
แสงสีเหลือง(He)	386	1255
แสงสีเหลือง(Hg)	379	1254
แสงสีเขียว(Hg)	356	1256
แสงสีเขียว(He)	325	1253
แสงสีฟ้า(H)	314	1254
แสงสีฟ้า(Hg)	279	1249
แสงสีน้ำเงิน(He)	286	1246
แสงสีม่วง(H)	277	1245

การหาค่า D จากการหาค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมแสงจากหลอดไฮโดรเจน หลอดฮีเลียม และหลอดไอปรอท ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยรวมของตำแหน่งของค่า D เพื่อใช้ในการปรับเทียบเท่ากับ 1251.121 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.772

จากการหาความสัมพันธ์ของ $\frac{P}{2}$ และ D พบว่าค่า $\frac{P}{2}$ และ D มีความสัมพันธ์กันตามสมการ (4.1)

$$D = 2 \times 10^{-10} \times \left(\frac{P}{2}\right)^4 + 4 \times 10^{-6} \times \left(\frac{P}{2}\right)^3 - 0.0056 \times \left(\frac{P}{2}\right)^2 + 2.4244 \times \frac{P}{2} + 918.19 \quad (4.1)$$

กราฟภาพประกอบ 57 แสดงค่าของ $\frac{P}{2}$ และ D ที่ได้จากการวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมและความยาวคลื่นที่ทราบค่าแน่นอน ของต้นกำเนิดแสงสำหรับปรับเทียบ และเส้นกราฟตามสมการ (4.1)



ภาพประกอบ 57 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{P}{2}$ และ D ของต้นกำเนิดแสงที่ใช้สำหรับปรับเทียบ

4.2.3 การทดสอบผลการคำนวณค่าความยาวคลื่นโดยใช้ค่า D จากสมการ (4.1)

การทดสอบผลการคำนวณค่าความยาวคลื่น (λ) โดยใช้ค่า D จากสมการ(4.1)นี้ได้ทำการทดสอบกับต้นกำเนิดแสงที่ใช้ปรับเทียบ โดยนำภาพถ่ายสเปกตรัมแสงของ หลอดไฮโดรเจน (Hydrogen Tube) หลอดฮีเลียม (Helium Tube) และหลอดไอปรอท (Mercury Tube) มาทำวัดระยะห่างระหว่างสเปกตรัม (P) ของแสงสีเดียวกัน แทนค่า $\frac{P}{2}$ ลงในสมการ (4.1) เพื่อหาค่า D

นำค่า D แทนในสมการ(3.6) คำนวณค่าความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับเส้นสเปกตรัมแสง ผลการคำนวณความยาวคลื่นของสเปกตรัมแสงจากภาพถ่ายของต้นกำเนิดแสงที่ใช้สำหรับปรับเทียบ แสดงในตาราง 4

ตาราง 4 แสดงผลการคำนวณค่าความยาวคลื่นของสเปกตรัมจากต้นกำเนิดแสงที่ใช้เป็นความยาวคลื่นในการเปรียบเทียบ

ต้นกำเนิดแสง		ความยาวคลื่น(nm)	ความยาวคลื่น(nm)	เปอร์เซ็นต์(%)
		มาตรฐานทั่วไป	จากการทดลอง	ความคลาดเคลื่อน
ไฮโดเจน ¹	แสงสีแดง	656.3	657.0	0.11
	แสงสีน้ำเงิน	486.1	486.3	0.06
	แสงสีม่วง	434.1	433.6	0.09
ฮีเลียม ²	แสงสีแดง	667.8	668.0	0.03
	แสงสีเหลือง	587.6	587.8	0.04
	แสงสีเขียว	501.5	501.2	0.05
	แสงสีฟ้า	471.3	470.6	0.15
	แสงสีน้ำเงิน	447.1	446.2	0.19
ไฮปรอท ³	แสงสีเหลือง	579.1	578.6	0.07
	แสงสีเขียว	546.1	546.2	0.02
	แสงสีฟ้า	435.8	436.3	0.13

4.3 การสร้างและทดสอบโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่น

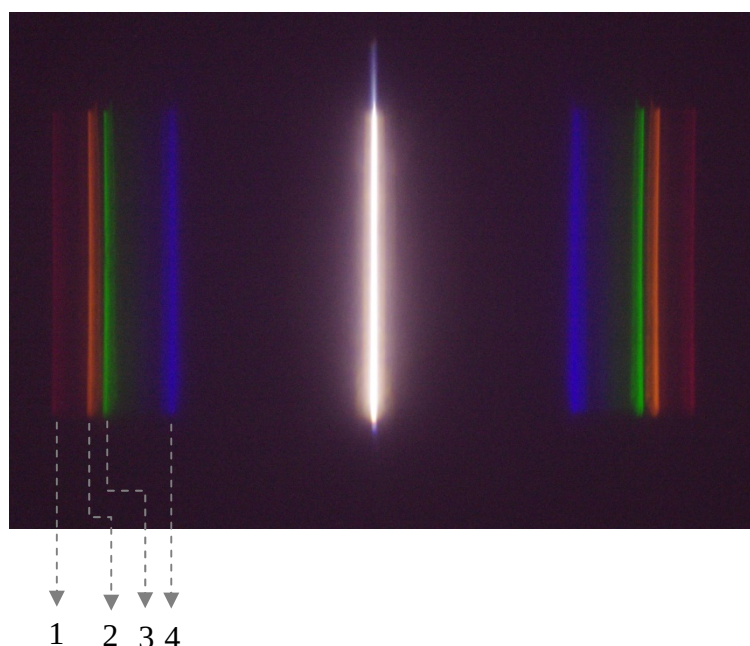
การสร้างโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมและคำนวณค่าความยาวคลื่น ได้ใช้สมการที่ (4.1) สำหรับคำนวณค่า D เพื่อคำนวณหาความยาวคลื่น และดำเนินการตามแผนภาพ (Flow Chart) การทำงานของโปรแกรม ดังภาพประกอบ 47 โดยมีรายละเอียดของชุดคำสั่งโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ข

¹ Nave, C.R. (2005). *Hyper Physics*. (Online).

² Black, Timothy C. (2006). *Physics 102 Lab9: Using the spectrometer to measure the spectrum of He*, Spring.(Online).

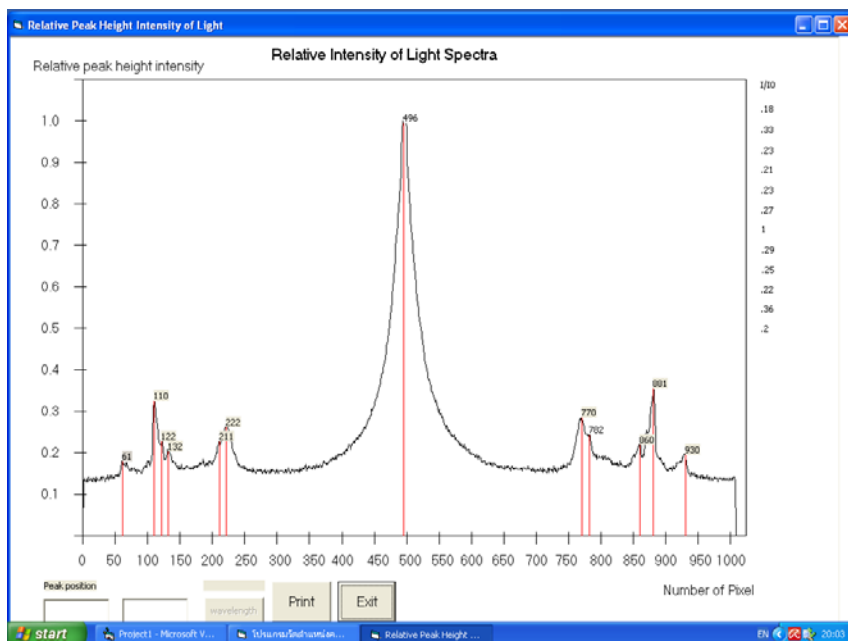
³ Jenkins, F A; & White, H E. (1976). *Fundamentals of Optics*, 4th ed, Singapore: McGraw-Hill, (Online).

การถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่ใช้เป็นความยาวคลื่นสำหรับทดสอบอุปกรณ์ ได้ใช้ต้นกำเนิดแสง 4 ชนิด ได้แก่ หลอดคริปทอน (Krypton Tube) หลอดไอน้ำ (Water Vapor Tube) หลอดโซเดียม (Sodium Tube) และหลอดนีออน (Neon Tube) พบว่าภาพถ่ายจากหลอดคริปทอน มีเส้นสเปกตรัมแสงที่คมชัดจำนวน 4 เส้นได้แก่ (1) เส้นสเปกตรัมแสงสีแดง (2) เส้นสเปกตรัมแสงสีเหลือง เส้นสเปกตรัมแสงสีเขียว และ (4) เส้นสเปกตรัมแสงสีม่วง ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 58



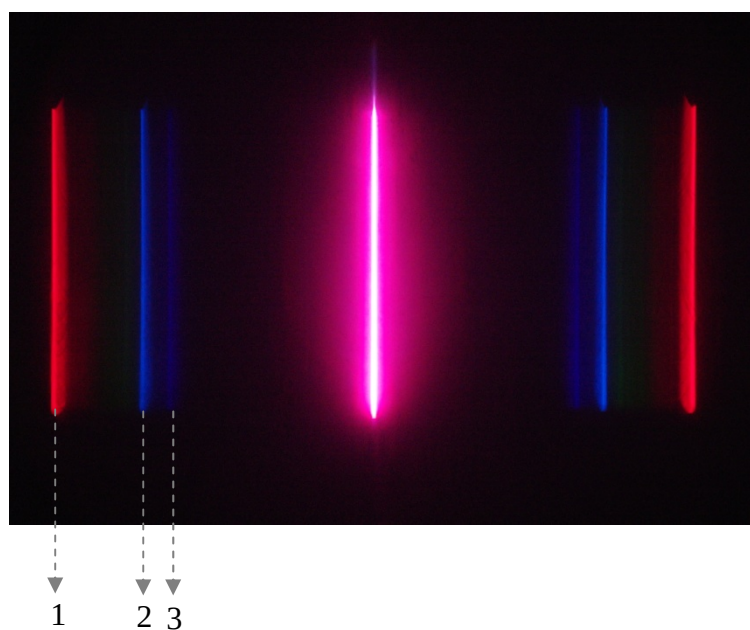
ภาพประกอบ 58 แสดงภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดคริปทอน

ผลการนำภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดคริปทอน มาทำการวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่นด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้น พบว่ามีตำแหน่งยอด(Peak) ของเส้นสเปกตรัมที่คมชัดจำนวน 4 ยอด แสดงดังภาพประกอบ 59



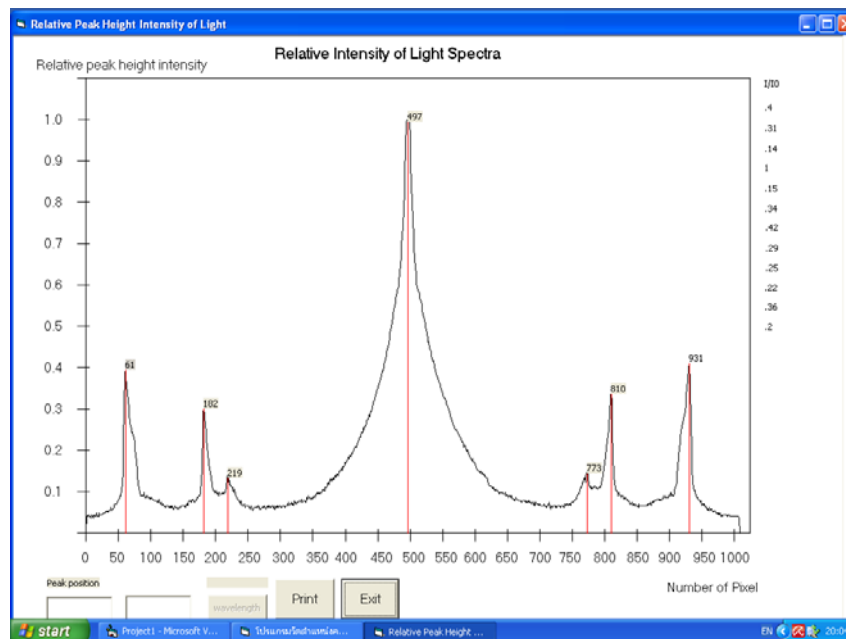
ภาพประกอบ 59 แสดงตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดคริปทอน

ภาพถ่ายจากหลอดไอน้ำ ให้ภาพที่มีเส้นสเปกตรัมแสงคมชัดมีจำนวน 3 เส้นได้แก่ (1) เส้นสเปกตรัมแสงสีแดง (2) เส้นสเปกตรัมแสงสีน้ำเงิน และ (3) เส้นสเปกตรัมแสงสีฟ้า ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 60



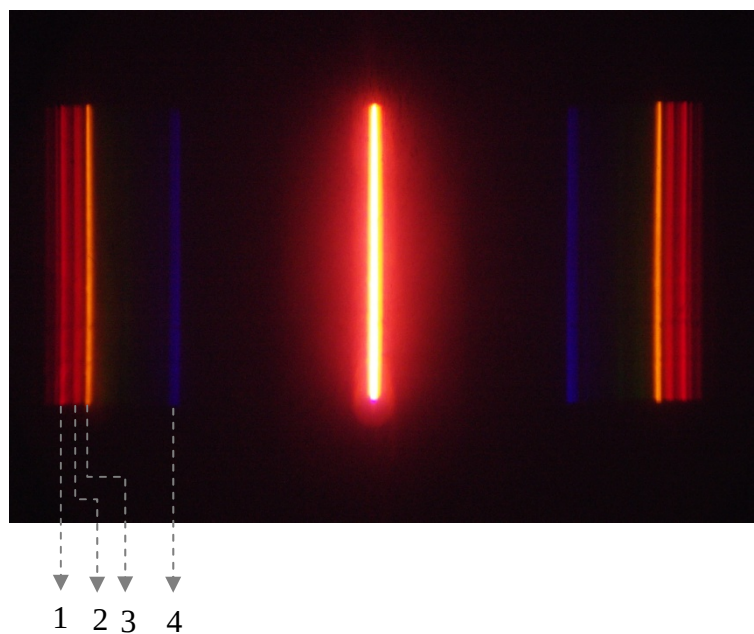
ภาพประกอบ 60 แสดงภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดไอน้ำ

ผลการนำภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดไอน้ำ มาทำการวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่นด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้น พบว่ามีตำแหน่งยอด(Peak) ของเส้นสเปกตรัมที่คมชัดจำนวน 3 ยอด แสดงดังภาพประกอบ 61



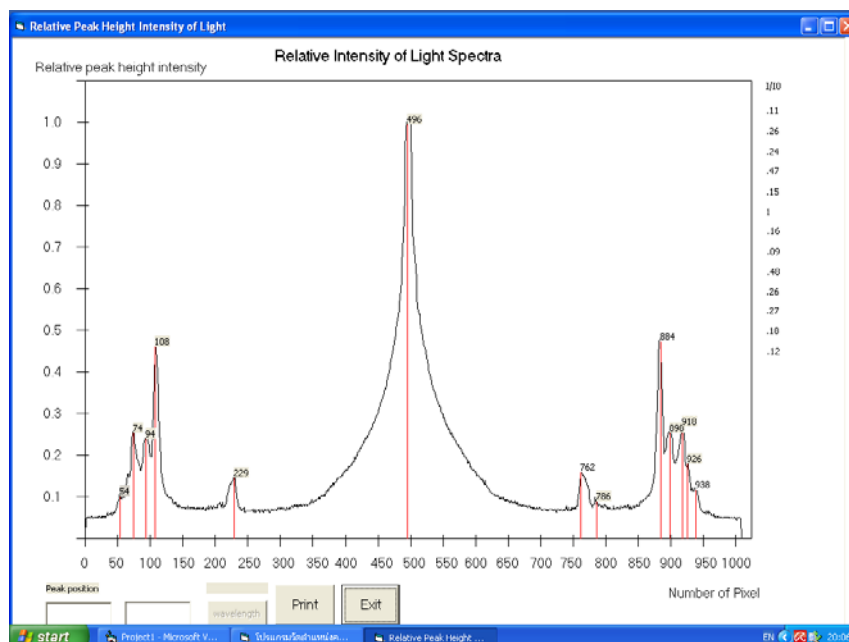
ภาพประกอบ 61 แสดงตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดไอน้ำ

ภาพถ่ายจากหลอดโซเดียม ให้ภาพที่มีเส้นสเปกตรัมแสงคมชัดมีจำนวน 4 เส้นได้แก่ (1) เส้นสเปกตรัมแสงสีแดง (2) เส้นสเปกตรัมแสงสีส้ม (3) เส้นสเปกตรัมแสงสีเหลือง และ (4) เส้นสเปกตรัมแสงสีม่วง ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 62



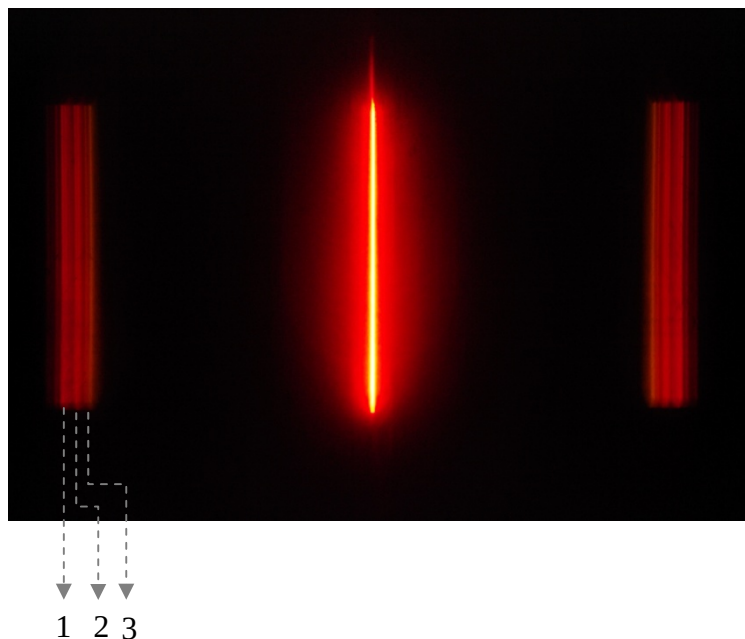
ภาพประกอบ 62 แสดงภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดโซเดียม

ผลการนำภาพสเปกตรัมแสงจากหลอดโซเดียม มาทำการวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่นด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้น พบว่ามีตำแหน่งยอด(Peak) ของเส้นสเปกตรัมที่คมชัดจำนวน 4 ยอด แสดงดังภาพประกอบ 63



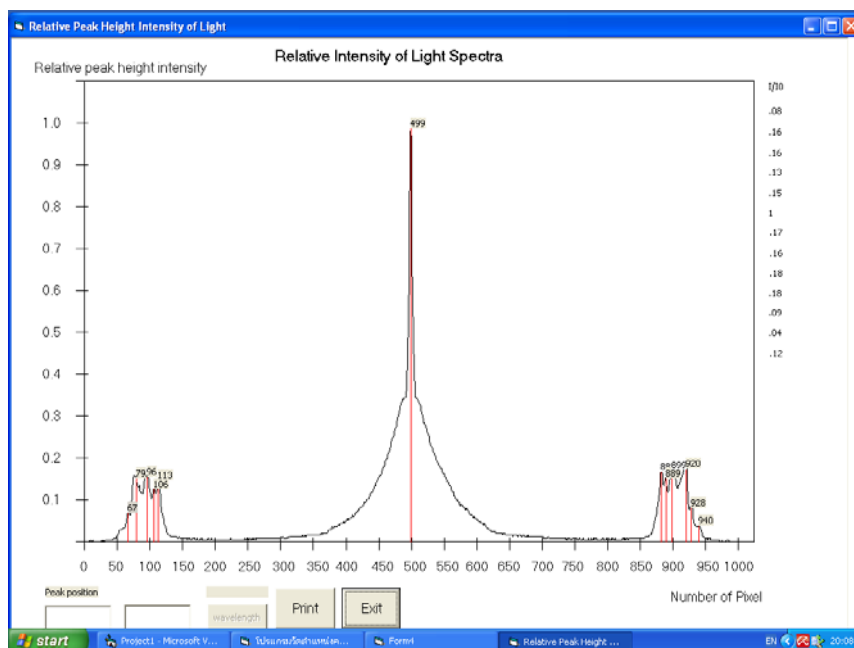
ภาพประกอบ 63 แสดงตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดโซเดียม

ภาพถ่ายจากหลอดนีออน ให้ภาพที่มีเส้นสเปกตรัมแสงคมชัดมีจำนวน 3 เส้นได้แก่ (1) เส้นสเปกตรัมแสงสีแดง (2) เส้นสเปกตรัมแสงสีส้ม และ (3) เส้นสเปกตรัมแสงสีเหลือง ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 64



ภาพประกอบ 64 แสดงภาพถ่ายสเปกตรัมแสงจากหลอดนีออน

ผลการนำภาพสเปกตรัมแสงจากหลอดนีออน มาทำการวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่นด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้น พบว่ามีตำแหน่งยอด(Peak) ของเส้นสเปกตรัมที่คมชัดจำนวน 3 ยอด แสดงดังภาพประกอบ 65



ภาพประกอบ 65 แสดงตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสงจากหลอดนีออน

การคำนวณความยาวคลื่นของสเปกตรัมแสงจากต้นกำเนิดแสงที่ใช้เป็นความยาวคลื่นสำหรับทดสอบอุปกรณ์ ได้ทำการคำนวณค่า $\frac{P}{2}$ จากภาพถ่ายสเปกตรัมแสงของ หลอดคริปทอน (Krypton Tube) หลอดไอน้ำ (Water Vapor Tube) หลอดโซเดียม (Sodium Tube) และหลอดนีออน (Neon Tube) ด้วยโปรแกรมที่สร้างขึ้น ให้ผลดังตาราง 5

ตาราง 5 แสดงผลการคำนวณค่าความยาวคลื่นของสเปกตรัมแสงจากต้นกำเนิดแสงที่ใช้เป็นความยาวคลื่นสำหรับทดสอบอุปกรณ์

ต้นกำเนิดแสง		ความยาวคลื่น(nm) มาตรฐานทั่วไป	ความยาวคลื่น(nm) จากการทดลอง	เปอร์เซ็นต์(%) ความแตกต่าง
คริปทอน ¹	แสงสีแดง	650.0	656.8	1.05
	แสงสีเหลือง	590.0	587.6	0.41
	แสงสีเขียว	565.0	557.1	1.40
	แสงสีม่วง	430.0	429.7	0.07
ไอน้ำ ²	แสงสีแดง	665.0	657.5	1.13
	แสงสีน้ำเงิน	490.0	486.1	0.80
	แสงสีฟ้า	430.0	433.9	0.91
โซเดียม ³	แสงสีแดง	Unknown	639.3	-
	แสงสีส้ม	Unknown	609.6	-
	แสงสีเหลือง	589.6	591.2	0.27
	แสงสีม่วง	Unknown	419.2	-
นีออน ⁴	แสงสีแดง	638.3	637.1	0.19
	แสงสีส้ม	616.4	613.1	0.54
	แสงสีเหลือง	585.2	586.9	0.29

^{1,2}Electro-Technic Products Inc. (n. d). *Spectrum Tube*. (Online).

^{3,4} Nave, C.R. (2005). *Hyper Physics*. (Online).

บทที่ 5

สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

จากการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง โดยทำการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงจากต้นกำเนิดแสง 7 ชนิดได้แก่ หลอดไฮโดรเจน (Hydrogen Tube) หลอดฮีเลียม (Helium Tube) หลอดไอปรอท (Mercury Tube) หลอดคริปทอน (Krypton Tube) หลอดไอน้ำ (Water Vapor Tube) หลอดโซเดียม (Sodium Tube) และหลอดนีออน (Neon Tube) จากนั้นทำการวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่นด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นจากภาษาซีพลัส 6 สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง

การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง ประกอบด้วย ตัวทำขนาน (Collimator) เกรตติง (Grating) และเลนส์นูน (Convex lens) จำนวน 4 ชิ้น ประกอบในท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 มิลลิเมตร ความยาว 400 มิลลิเมตร โดยวางชิ้นเกรตติงและชิ้นเลนส์ดังนี้ เกรตติงวางห่างเลนส์ L_1 เป็นระยะ 20 มิลลิเมตร เลนส์ L_1 วางห่างเลนส์ L_2 เป็นระยะ 50 มิลลิเมตร เลนส์ L_2 วางห่างจากเลนส์ L_3 เป็นระยะ 35.5 มิลลิเมตร เลนส์ L_3 วางห่างจากเลนส์ L_4 เป็นระยะ 156.0 มิลลิเมตร และเลนส์ L_4 วางห่างจากเซนเซอร์ซีมอสเป็นระยะ 73.5 มิลลิเมตร

5.1.2 การถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่ใช้เพื่อเป็นค่าสำหรับการปรับเทียบ (Calibration)

การถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่ใช้เพื่อเป็นค่าสำหรับการปรับเทียบ ใช้ต้นกำเนิดแสง 3 ชนิด คือ หลอดไฮโดรเจน หลอดฮีเลียม และหลอดไอปรอท ตามลำดับ ทำให้ได้ผลการคำนวณค่า D เป็นสมการยกกำลัง 4 ของระยะห่างของเส้นสเปกตรัมจากกึ่งกลางตามสมการที่ 4.1 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) เท่ากับ 0.886 และทดสอบสมการนี้ด้วยการคำนวณความยาวคลื่นจากต้นกำเนิดแสงที่ใช้ปรับเทียบ พบว่าให้ค่าความยาวคลื่นใกล้เคียงกับค่าความยาวคลื่นมาตรฐานทั่วไป โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0.02-0.19 %

5.1.3 การสร้างและทดสอบโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่น

การคำนวณค่าความยาวคลื่นจากต้นกำเนิดแสงที่ใช้ทดสอบอุปกรณ์ ใช้ต้นกำเนิดแสง 4 ชนิด คือ หลอดคริปทอน (Krypton Tube) หลอดไอน้ำ (Water Vapor Tube)

หลอดโซเดียม (Sodium Tube) และหลอดนีออน (Neon Tube) ตามลำดับพบว่าให้ค่าความยาวคลื่นใกล้เคียงกับค่าความยาวคลื่นมาตรฐานทั่วไป โดยสเปกตรัมที่มีความแตกต่างของความยาวคลื่นสูงสุดคือสเปกตรัมแสงสีเขียวจากหลอดคริปทอนโดยมีค่าความแตกต่างเท่ากับ 1.40% และสเปกตรัมที่มีความแตกต่างน้อยที่สุดคือสเปกตรัมแสงสีม่วงจากหลอดคริปทอนเท่ากับ 0.07%

จากผลการวัดสเปกตรัมแสงที่ใช้เพื่อเป็นค่าสำหรับการปรับเทียบ (Calibration) โดยใช้ต้นกำเนิดแสงจาก หลอดไฮโดรเจน หลอดฮีเลียม และหลอดไฮปรอท พบว่าค่าความยาวคลื่นมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.19% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดสเปกตรัมแสงด้วยโฟโตไดโอดแออร์เรย์ของสาโรช พูลเทพ¹ ซึ่งทำการวัดสเปกตรัมแสงจากหลอดปรับเทียบ (HgAr) เป็นความยาวคลื่นอ้างอิงมาตรฐาน ได้ค่าความยาวคลื่นมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.20%

สำหรับการเขียนทางเดินแสงและการเกิดภาพ เพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งการจัดวางเลนส์และอุปกรณ์ เป็นการเขียนทางเดินแสงโดยใช้ทฤษฎีของเลนส์บาง ซึ่งไม่ได้นำผลเกี่ยวกับความหนาและลักษณะความโค้งแบบผิวทรงกลมของเลนส์มาประกอบการพิจารณา มีผลทำให้ตำแหน่งที่ได้จากการเขียนทางเดินแสงแตกต่างจากการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับการปรับเทียบหาค่าคงตัว D ที่ปรากฏอยู่ในรูปแบบสมการยกกำลัง 4 ของระยะห่างของเส้นสเปกตรัมจากกึ่งกลาง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การถ่ายภาพสเปกตรัมเพื่อให้ได้สเปกตรัมแสงที่ให้เส้นสเปกตรัมเป็นเส้นตรงและคมชัดมากที่สุดขึ้นอยู่กับการจัดวาง กล้องถ่ายภาพที่ประกอบเข้ากับชุดอุปกรณ์ และต้นกำเนิดแสง โดยจัดให้อยู่ในแนวระดับเส้นตรงเดียวกันมากที่สุด เนื่องจากต้นกำเนิดแสงแต่ละชนิดมีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน

¹สาโรช พูลเทพ. (2545). การวัดสเปกตรัมของแสงด้วยโฟโตไดโอดแออร์เรย์. วิทยานิพนธ์ วศ.ม.(วิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 94

5.2.2 เนื่องจากข้อมูลภาพถ่ายสเปกตรัมแสงที่ใช้ เป็นข้อมูลความเข้มแสงที่ตำแหน่งต่างๆ ของภาพถ่าย ทำให้โปรแกรมสามารถคำนวณและแสดงผลอัตราส่วนของค่าความสูงของยอดความเข้มของสเปกตรัมแสงต่อค่าความสูงของยอดความเข้มลำดับศูนย์ หรือค่าความสูงของยอดความเข้มสัมพัทธ์ (Relative Peak Height Intensity) ได้ อย่างไรก็ตามผลจากการถ่ายภาพเพื่อวัดตำแหน่งสเปกตรัมแสง พบว่าค่าความเข้มที่ตำแหน่งกลางจะมีค่ามากจนถึงค่าอิ่มตัวคือเท่ากับ 255 ทำให้การวัดค่าความสูงของยอดความเข้มสัมพัทธ์ ไม่เป็นสัดส่วนตามทฤษฎี ดังนั้นในการวิจัยที่มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดค่าความสูงของยอดความเข้มสัมพัทธ์จะต้องเลือกภาพถ่าย ที่ความเข้มลำดับศูนย์น้อยกว่า 255

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิทยาศาสตร์. (2547). *ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 2*. พิมพ์ครั้งที่ 13.
กรุงเทพฯ : ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยฯ.
- จันทวุฒิ พิษผล; พิชิต สันติกุลานนท์; และพร้อมเลิศ หล่อวิจิตร.(2550). *คู่มือเรียน Visual Basic 6*.
กรุงเทพฯ: โปรวิชั่น.
- มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะวิทยาศาสตร์. (2543). *ฟิสิกส์ 2 เล่ม 2*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ:
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยฯ.
- สาโรช พูลเทพ. (2545). *การวัดสเปกตรัมของแสงด้วยโฟโตไดโอดแอร์เรย์*. วิทยานิพนธ์ วศ.ม.
(ระบบควบคุมและเครื่องมือวัด). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- สมเสมอ ทักษิณ.(2551). *การสร้างเกรตติงระนาบแบบส่องผ่านโดยการแทรกสอดของลำแสงเลเซอร์*.
ปริญญาณิพนธ์ กศ.ม.(ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
ถ่ายเอกสาร.
- อรุณศิริ อัฐสุวรรณศิลป์.(2546). *การใช้หัววัดซีดีดีสำหรับปฏิบัติการทางแสง*. ปริญญาณิพนธ์
กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- เอก ไชยรัตน์; เลอพงษ์ พิศนุย; และอมรินทร์ ปรีชาวุฒิ. (2548, ตุลาคม-ธันวาคม). การวัดการดูด
แสงผ่านสารละลายทางเคมีคลินิกด้วยตัวเซนเซอร์ CCD แบบเส้น. *วารสารวิจัยและพัฒนา
มจร*. 28(4): 477-496
- อำนาจ นุตะมาน. (2550). *เขียนโปรแกรมและพัฒนาแอปพลิเคชันด้วย VBA บน Excel ฉบับ
โปรแกรมเมอร์*. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- Bigas M. ; Cabruja E.; Forest J. ; & Salvi J. (2006). Review of CMOS image sensors.
Microelectronics Journal. 37: 433-451. Retrieved December 19, 2009,
from <http://www.elsevier.com/locate/mejo>
- Black, Timothy C. (2006, Spring). *Physics 102 Lab9: Using the spectrometer to measure
the spectrum of He*. Retrieved September 29, 2010, from http://people.uncw.edu/gan/fizix102labs/lab09dispersion1_s2006_102.pdf
- Electro-Technic Products Inc. (n.d). *Spectrum Tube*. Retrieved September 9, 2010,
from <http://www.schaffrath.net/Spectra/Spectral%20Tubes.pdf>

- Fitzpatrick, Richard. (2003). *Electromagnetism and Optics*. New York: Thomson-Brooks Cole. Retrieved December 20, 2009, from <http://www.thomsonedu.com>
- Gil, Salvador. ; Reisin, Hernan D.;& Rodriguez, Eduardo E. (2006, September). Using a digital camera as a measuring device. *American Journal of Physics*. 74(9): 768-775.
- Izarra De C. ; & Vallee O. (1994, April). On the use of linear CCD image sensors in optics Experiments. *American Journal of Physics*. 62(4): 357-361.
- Justin Peatross.; & Michael Ware.(2008). *Physics of light and Optics*. Retrieved December 20, 2009, from <http://hlab.ee.tut.fi/video/bme/evicab/astore/07saleru/book/byoptics>
- Jenkins, F A.; & White, H E. (1976) .*Fundamentals of Optics*, 4th ed. Singapore : McGraw-Hill. Retrieved September 29, 2010, from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/atspect.html>
- Nave, C.R. (2005). *Hyper Physics*. Retrieved September 1, 2010, from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hyde.html>
- Pedrotti, Frank L. ; Pedrotti Leo , M.; & Pedrotti, Leo S. (2007). *Introduction to optics*. 3rd ed. U.S.A : Prentice-Hall, Inc.
- Ramil A.; Lopez A.J.; & Vincitorio F. (2007, July 14). Improvements in the analysis of diffraction phenomena by means of digital image. *American Journal of Physics*. 77(11): 999-1002.
- Raymond A. Serway.; & John W.Jewett,Jr. (2004). *Physics for Scientists and Engineers*. 6th ed . Philadelphia: Saunders College Pub.
- Spring, K.R.; Russ,J.C.; & Davidson, M.W. (2005, Nov). "Basic Properties of Digital Images". Retrieved December 20, 2009, from <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/digitalimagebasics.html>
- Suppattayaporn, D.; Panijpan, B.; & Emarat, N. (2010, April). Can We Trace Arbitrary Rays To locate an Image Formed by a Thin Lens?. *The Physics Teacher*. 48 (4): 256-257.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ชุดอุปกรณ์ประกอบกล่องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง



ภาพประกอบ 66 แสดงชุดอุปกรณ์ประกอบกล้องเพื่อการถ่ายภาพสเปกตรัมแสง



ภาพประกอบ 67 แสดงการถ่ายภาพสเปกตรัมแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงด้วยชุดอุปกรณ์

ภาคผนวก ข

ชุดคำสั่งโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมและคำนวณค่าความยาวคลื่น
จากภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของแสง

ชุดคำสั่งโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมและคำนวณค่าความยาวคลื่น จากภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของแสง

โปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมและคำนวณค่าความยาวคลื่นจากภาพถ่ายการเลี้ยวเบนของแสงมีทั้งหมด 4 ฟอรัม ดังนี้

1. ฟอรัมโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมและคำนวณค่าความยาวคลื่น
2. ฟอรัมแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับสีเทาและตำแหน่งพิกเซลในแนวนอนของภาพถ่าย
3. ฟอรัมการแสดงกราฟเทียบค่าสูงสุดเท่ากับ 1 และหาตำแหน่งยอดสเปกตรัมและแสดงกราฟที่ระบุตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสง
4. ฟอรัมแสดงค่าความยาวคลื่นของสเปกตรัม

1. ฟอรัมโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมและคำนวณค่าความยาวคลื่น (Form 1)

ฟอรัมโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมและคำนวณค่าความยาวคลื่นบนภาพถ่ายจากการเลี้ยวเบนของแสง ประกอบด้วยชุดคำสั่งดังนี้

Option Explicit

‘-----

‘ประกาศตัวแปรสำหรับโปรแกรมวัดตำแหน่งเส้นสเปกตรัมแสงและคำนวณค่าความยาวคลื่น

‘-----

Dim intensity(5000) As Integer

Dim PeakPosAft_removeSmp(1000) As Integer

Dim corrected_D(2350) As Single

Dim NormalizeIntensity (5000) As Single

Dim W As Integer

Dim H As Integer

Dim i As Integer

Dim x As Integer

Dim y As Integer

Dim n As Integer

Dim MyPictureScale As Integer

Dim imagewidth As Integer

Dim imagehigh As Integer

Dim Roundofscale As Variant, result As Variant,

Oldresult As Variant, result2 As Variant

Dim Oldintensity As Integer

Dim pcount3 As Integer

Dim Lastpeak(100) As Single

 'ชุดคำสั่งใน Command1 สำหรับย่อภาพให้เหลือขนาดความกว้าง 1024 พิกเซล และสูง 800 พิกเซล

Private Sub Command1_Click()

Image1.Width = 1024

Image1.Height = 800

imagewidth = Image1.Width

imagehigh = Image1.Height

 'คำสั่งสำหรับการโหลด (Load) ภาพจากไฟล์ข้อมูล

CommonDialog1.ShowOpen

Image1.Picture = LoadPicture (CommonDialog1.FileName)

Image1.Visible = True

Form1.Text1.Text = "กดปุ่มบันทึกค่าระดับสีเทา"

End Sub

ชุดคำสั่งสำหรับเก็บข้อมูลสี RGB ของภาพถ่าย

```
Private Sub Command2_Click()
    Dim Sum          As Long
    Dim xPixels  As Integer
    Dim yPixels  As Integer
    Dim x As Double, y As Double
    Dim GetRGBcolor  As Long
    Dim R            As Integer
    Dim G            As Integer
    Dim B            As Integer
    Dim Grayscale    As Integer
    Dim lower_y      As Integer
    Dim upper_y      As Integer
    W = Image1.Width
    n = 50
    H = Image1.Height
    lower_y = (H / 2) - n + 50
    upper_y = (H / 2) + n + 50
    For x = 1 To W
        Sum = 0
        For y = lower_y To upper_y - 1
            GetRGBcolor = Form1.Point(x, y)
            R = GetRGBcolor Mod 256
            G = (GetRGBcolor \ 256) Mod 256
            B = GetRGBcolor \ 65536
            Grayscale = (R + G + B) / 3
            Sum = Sum + Grayscale
        Next y
    Next x
End Sub
```



```

Intensity(x) = Sum / (upper_y - lower_y)
Next x
Form1.Text1.Text = "เก็บค่าระดับสีเทาแล้ว"
End Sub

'-----
'ชุดคำสั่งสำหรับแสดง Form2 เพื่อเป็นพื้นที่สำหรับแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าระดับสีเทา
'และตำแหน่งพิกเซลในแนวนอนของภาพถ่าย
'-----

Private Sub Command3_Click()
n = 0
Form2.Show
Form2.ScaleWidth = 1024
Form2.ScaleHeight = 800
Form2.Picture1.Width = 1024
Form2.Picture1.Height = 800
Form2.Picture1.Line (100, 50)-(900, 50)
Form2.Picture1.Line (100, 600)-(900, 600)
Form2.Picture1.Line (100, 50)-(100, 600)
Form2.Picture1.Line (900, 50)-(900, 600)
For y = 0 To 11
Form2.Picture1.Line (90, 600 - (n * 50))-(105, 600 - (n * 50))
n = n + 1
Next y
n = 0
For x = 0 To 20
Form2.Picture1.Line (100 + (n * 39.0625), 610)-(100 + (n * 39.0625), 595)
n = n + 1
Next x
Oldresult = 100

```

```

Oldintensity = 600
For i = 1 To 1024
Roundofscale = 100 + (i * (800 / 1024))
result = Round(Roundofscale, 0)
Form2.Picture1.Line (result, (600 - intensity(i) * 2))-(Oldresult, Oldintensity)
Oldintensity = (600 - intensity(i) * 2)
Oldresult = result
Next i
End Sub

```

‘ชุดคำสั่งสำหรับแสดง Form3 เพื่อเป็นพื้นที่สำหรับแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าระดับสีเทา โดยเทียบค่าสูงสุดเท่ากับ 1 และตำแหน่งพิกเซลในแนวนอนของภาพถ่าย

```

Private Sub Command4_Click()
Dim maxintensity As Integer
Dim RoundNintense As Integer
n = 0
Form3.Show
Form3.Picture1.Width = 1024
Form3.Picture1.Height = 800
Form3.Picture1.Line (100, 50)-(900, 50)
Form3.Picture1.Line (100, 600)-(900, 600)
Form3.Picture1.Line (100, 50)-(100, 600)
Form3.Picture1.Line (900, 50)-(900, 600)
Form3.ScaleWidth = 1024
Form3.ScaleHeight = 800
For y = 0 To 11
Form3.Picture1.Line (90, 600 - (n * 50))-(105, 600 - (n * 50))
n = n + 1

```

```

Next y
n = 0
For x = 0 To 20
Form3.Picture1.Line (100 + (n * 39.0625), 610)-(100 + (n * 39.0625), 595)
n = n + 1
Next x
Oldresult = 100
Oldintensity = 600
maxintensity = 0
For i = 1 To 1024
If intensity(i) > maxintensity Then maxintensity = intensity(i)
Next i
For i = 1 To 1024
NormalizeIntensity(i) = intensity(i) / maxintensity
Next i
For i = 1 To 1024
Roundofscale = 100 + (i * (800 / 1024))
result = Round(Roundofscale, 0)
RoundNintense = (600 - NormalizeIntensity(i) * 500)
result2 = Round(RoundNintense, 0)
Form3.Picture1.Line (result, result2)-(Oldresult, Oldintensity)
Oldintensity = result2
Oldresult = result
Next i
End Sub

```

Private Sub Command5_Click ()

‘-----

‘ประกาศตัวแปรสำหรับคำนวณตำแหน่งของยอด (Peak) ความเข้มแสง

‘-----

Dim Minimumposition(1024) As Integer

Dim Pcount As Integer, i As Integer, Direction As Integer, j As Integer, _
tempminposition As Integer, tempminintensity As Integer

Dim Maximumposition(1024) As Integer

Dim Prevdirection As Integer, start As Integer, stopna As Integer, peak As Integer,
Peakintens As Integer

Dim Index(10) As Integer, Sumindex As Integer

Dim peakinten(100) As Integer

Dim peakposition(100) As Integer

Dim Peakintensity(100) As Integer

Dim sameintens As Integer, k As Integer, m As Integer, mcount As Integer

Dim minimumintensity(1024) As Integer

Dim maxintensity As Integer

Dim RoundNintense As Integer

Dim centralmaximum As Single

Dim pcount2 As Integer

Dim averagehigh As Integer

‘-----

‘เก็บค่าความเข้มที่ตำแหน่งพิกเซลไว้ในตัวแปร intensity(i)

‘-----

Pcount = 1

mcount = 0

Prevdirection = 0

intensity(0) = intensity(1)

Sumindex = 0

tempminintensity = intensity(1)

tempminposition = 1

‘-----

‘หาค่าตำแหน่งยอดความเข้มแสง

‘-----

For i = 1 To 1024

If (intensity(i) - intensity(i - 1) > 0) Then

Direction = 1

Elseif (intensity(i) - intensity(i - 1) < 0) Then

Direction = -1

Else: Direction = 0

End If

If Direction = 1 Then

Peakintens = intensity(i)

peak = i

If (intensity(i) - tempminintensity) > 2 Then

If (Minimumposition(mcount) <> tempminposition) Then

mcount = mcount + 1

Minimumposition(mcount) = tempminposition

minimumintensity(mcount) = tempminintensity

End If

End If

End If

If Direction = -1 Then

tempminintensity = intensity(i)

tempminposition = i

If (Peakintens - intensity(i)) > 2 Then

If (peakposition(Pcount) <> peak) Then

Pcount = Pcount + 1

```

Peakintensity(Pcount) = Peakintens
peakposition(Pcount) = peak
Maximumposition(Pcount) = i
End If
End If
End If
Next i
For k = 1 To Pcount
sameintens = 0
For m = 1 To (Maximumposition(k) - peakposition(k) + 1)
If intensity(peakposition(k)) = intensity(peakposition(k) + m) Then
sameintens = sameintens + 1
End If
Next m
Lastpeak(k) = peakposition(k) + ((sameintens) / 2)
Lastpeak(k) = Round(Lastpeak(k), 0)
Next k

```

```

'-----
'ตัดยอดคลื่นที่มีขนาดเล็ก
'-----

```

```

pcount2 = 1
For i = 1 To Pcount
averagehigh = intensity(Lastpeak(i))
For j = 1 To 6
If (Lastpeak(i) < 13) Then
averagehigh = averagehigh + 2 * intensity(Lastpeak(i) + j)
ElseIf (Lastpeak(i) > 1000) Then
averagehigh = averagehigh + 2 * intensity(Lastpeak(i) - j)
Else

```

```

averagehigh = averagehigh + intensity(Lastpeak(i) - j) +_
intensity(Lastpeak(i) + j)
End If
Next j
averagehigh = averagehigh / 13
If (intensity(Lastpeak(i)) - averagehigh) > 2 Then
PeakPosAft_removeSmp(pcount2) = Lastpeak(i)
pcount2 = pcount2 + 1
Elseif averagehigh > 250 Then
PeakPosAft_removeSmp(pcount2) = Lastpeak(i)
pcount2 = pcount2 + 1
Else
End If
Next i

```

```

'-----
'เขียนกราฟความเข้มสัมพัทธ์
'-----

```

```

pcount3 = pcount2
n = 0
Form3.Picture1.Width = 1024
Form3.Picture1.Height = 800
Form3.Picture1.Line (100, 50)-(900, 50)
Form3.Picture1.Line (100, 600)-(900, 600)
Form3.Picture1.Line (100, 50)-(100, 600)
Form3.Picture1.Line (900, 50)-(900, 600)
Form3.Show
Form3.ScaleWidth = 1024
Form3.ScaleHeight = 800
For y = 0 To 11

```

```

Form3.Picture1.Line (90, 600 - (n * 50))-(105, 600 - (n * 50))
n = n + 1
Next y
n = 0
For x = 0 To 20
Form3.Picture1.Line (100 + (n * 39.0625), 610)-(100 + _
(n * 39.0625), 595)
n = n + 1
Next x
Oldresult = 100
Oldintensity = 600
maxintensity = 0
For i = 1 To 1024
If intensity(i) > maxintensity Then maxintensity = intensity(i)
Next i
For i = 1 To 1024
NormalizeIntensity(i) = intensity(i) / maxintensity
Next i
For i = 1 To 1024
Roundofscale = 100 + (i * (800 / 1024))
result = Round(Roundofscale, 0)
RoundNintense = (600 - NormalizeIntensity(i) * 500)
result2 = Round(RoundNintense, 0)
Form3.Picture1.Line (result, result2)-(Oldresult, Oldintensity)
Oldintensity = (result2)
Oldresult = result
Next i

```



```

'-----
'พิมพ์ค่าความเข้มสัมพัทธ์
'-----

Form3.Label3(17) = "Peak position"
Form3.Label4(17) = "I/I0"
For i = 1 To pcount2 - 1
If i <= 15 Then
Form3.Label3(i).Visible = True
Form3.Label3 (i) = PeakPosAft_removeSmp(i)
Form3.Label4(i) = intensity(PeakPosAft_removeSmp(i)) / maxintensity
End If
Next i

'-----
'ลากเส้นสีแดงตรงตำแหน่ง Peak และวางเลเบลตรงตำแหน่งPeak
'-----

pcount3 = pcount2
For i = 1 To pcount2 - 1
If i <= 15 Then
Form3.Picture1.Line ((100 + (800 / 1024) * PeakPosAft_removeSmp(i)), 600)-((100 + (800 /
1024) * PeakPosAft_removeSmp(i)), 40 + 550 -( 500 / 255) *
intensity(PeakPosAft_removeSmp(i))), 255
Form3.Label3(i).Top = 40 + 550 - 500 / 255 * intensity(PeakPosAft_removeSmp(i))
Form3.Label3(i).Left = (100 + (800 / 1024) * PeakPosAft_removeSmp(i)
End If
Next i
End Sub

```

```

'-----
'ประกาศตัวแปรสำหรับคำนวณค่าความยาวคลื่น
'-----

Private Sub Command6_Click()
Dim i As Integer, k As Integer, j As Integer
Dim centralmaximum As Integer, Rtempcount As Integer,
    Ltempcount As Integer, mindifference As Integer, rightpeakat As Integer
Dim leftpeakat As Integer
Dim LeftHalfP(100) As Integer
Dim RightHalfP(100) As Integer
Dim averageD(100) As Single
Dim wavelength(100) As Single
'-----

คำนวณค่า D จากสมการปรับเทียบและเก็บค่าไว้ใน Array
'-----

For i = 1 To 600 (i=P/2=ตำแหน่งพิกเซลห่างจากกึ่งกลาง)
corrected_D(i) = (2 * 10 ^ (-10) * i ^ 4) + (4 * 10 ^ (-6) * i ^ 3) - (0.0056 * i ^ 2) + _
    (2.4244 * i) + 918.19      'สมการคำนวณค่า D
Next i

For i = 1 To pcount3 - 1
If PeakPosAft_removeSmp(i) < 600 Then
If PeakPosAft_removeSmp(i) > 400 Then
If intensity(PeakPosAft_removeSmp(i)) > 200 Then
centralmaximum = PeakPosAft_removeSmp(i)
End If
End If
End If
Next i

Rtempcount = 1
Ltempcount = 1

```

```

For i = 1 To pcount3 - 1
    If (PeakPosAft_removeSmp(i) - centralmaximum) > 0 Then
        LeftHalfP(Ltempcount) = (PeakPosAft_removeSmp(i) - centralmaximum)
        Ltempcount = Ltempcount + 1
    ElseIf (PeakPosAft_removeSmp(i) - centralmaximum) < 0 Then
        RightHalfP(Rtempcount) = (PeakPosAft_removeSmp(i) - centralmaximum) )
        Rtempcount = Rtempcount + 1
    Else
        End If
    Next i
    For k = 1 To Rtempcount - 1
        mindifference = 255
        For j = 1 To Ltempcount - 1
            If Abs(RightHalfP(k) + LeftHalfP(j)) < mindifference Then
                mindifference = Abs(RightHalfP(k) + LeftHalfP(j))
                rightpeakat = RightHalfP(k)
                leftpeakat = LeftHalfP(j)
            End If
        Next j
        averageD(k) = (leftpeakat - rightpeakat) / 2
        wavelength(k) = 2000 * Sin(Atn(averageD(k) / corrected_D(averageD(k))))
    Next k
    Form4.Show
    For i = 1 To 10
        Form4.Label2(i) = wavelength(i)
    Next i
End Sub

Private Sub Cmdexit_Click()
End

End Sub

```

2. ฟอรัมแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับสีเทาและตำแหน่งพิกเซลใน แนวนอนของภาพถ่าย (Form2)

ฟอรัมแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับสีเทาและตำแหน่งพิกเซลในแนวนอนของ
ภาพถ่ายประกอบด้วยชุดคำสั่งดังนี้

Option Explicit

‘-----

‘ประกาศตัวแปรสำหรับแสดงค่าระดับสีเทาและตำแหน่งพิกเซลแนวนอนใน Form2

‘-----

Dim RecivedIntensity(5000) As Integer

Dim NormalizedIntensity(5000) As Integer

‘-----

Const vbPRPSA4 = 9 ‘กำหนดขนาดของกระดาษเท่ากับ A4

Const vbPRORPortrait = 1 ‘กำหนดขนาดของกระดาษแนวตั้ง

Const vbPRORLandscape = 2 ‘กำหนดขนาดของกระดาษแนวนอน

‘-----

‘คำสั่งล้างข้อมูลเก่าใน Form2 เมื่อทำการโหลด (Load) ภาพใหม่

‘-----

Private Sub Command1_Click()

Form2.Visible = False

Form2.PictureBox1.Cls

End Sub

‘-----

‘คำสั่งพิมพ์ข้อมูลใน Form2 โดยจัดกระดาษให้มีขนาดเท่ากับ A4 และรูปแบบกระดาษเป็นแนวนอน

‘-----

Private Sub Command2_Click()

Printer.Orientation = 2

Printer.PrintQuality = vbPRPQHigh

Printer.PaperSize = vbPRPSA4

Form2.PrintForm

End Sub

3. ฟอรัมการแสดงกราฟเทียบค่าสูงสุดเท่ากับ 1 และหาตำแหน่งยอดสเปกตรัมและแสดงกราฟที่ระบุตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสง (Form3)

ฟอรัมการแสดงกราฟเทียบค่าสูงสุดเท่ากับ 1 และหาตำแหน่งยอดสเปกตรัมและแสดงกราฟที่ระบุตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสง ประกอบด้วยชุดคำสั่งดังนี้

‘-----

‘ประกาศตัวแปรสำหรับแสดงกราฟเทียบค่าสูงสุดเท่ากับ 1 และหาตำแหน่งยอดสเปกตรัมและ
‘แสดงกราฟที่ระบุตำแหน่งยอด (Peak) ของเส้นสเปกตรัมแสง

‘-----

Dim flagr As Integer, flagl As Integer

Dim D As Single, wavelength As Single

Dim corrected_D(1025) As Single

Dim peak As Integer

Dim leftpeak As Integer

Dim rightpeak As Integer

‘-----

Const vbPRPSA4 = 9 ‘กำหนดขนาดของกระดาษเท่ากับ A4

Const vbPRORPortrait = 1 ‘กำหนดขนาดของกระดาษแนวตั้ง

Const vbPRORLandscape = 2 ‘กำหนดขนาดของกระดาษแนวนอน

‘-----

‘คำสั่งล้างข้อมูลเก่าใน Form3 เมื่อทำการโหลด (Load) ภาพใหม่

‘-----

Private Sub Command1_Click(Index As Integer)

Form3.Visible = False

Form3.Picture1.Cls

For i = 1 To 15

Form3.Label3 (i).Visible = False

Next i

End Sub

```
'-----
'คำสั่งพิมพ์ข้อมูลใน Form3 โดยจัดกระดาษให้มีขนาดเท่ากับ A4 และรูปแบบกระดาษเป็นแนวนอน
'-----
```

```
Private Sub Command2_Click()
Printer.Orientation = 2
Printer.PrintQuality = vbPRPQHigh
Printer.PaperSize = vbPRPSA4
Form3.PrintForm
End Sub
```

```
'-----
'คำสั่งแสดงค่า P/2 และแสดงค่าความยาวคลื่น
'-----
```

```
Private Sub Command3_Click ()
For i = 1 To 600
corrected_D(i) = (2 * 10 ^ (-10) * i ^ 4) +
(4 * 10 ^ (-6) * i ^ 3) - (0.0056 * i ^ 2) +
(2.4244 * i) + 918.19
Next i
Half_P = (Form3.Text2.Text - Form3.Text1.Text) / 2
D = corrected_D(Half_P)
wavelength = 2000 * Sin(Atn(Half_P / D))
Form3.Label3 (18) = wavelength
flagl = 0
flagr = 0
Form3.Command3.CausesValidation = False
Form3.Command3.Enabled = False
End Sub
```

```

'-----
'คำสั่งแสดงค่าตำแหน่ง Peak ใน Label3 เมื่อคลิกเลือก
'-----

Private Sub Label3_Click(Index As Integer)
    peak = Form3.Label3(Index)
    Form3.Label3 (18) = peak
    If flagl = 0 Then
        Form3.Text1.Text = peak
    ElseIf flagr = 0 Then
        Form3.Text2.Text = peak
    Else
    End If
End Sub

'-----
'คำสั่งให้ Form3.Tex2 สามารถเติมค่าได้
'-----

Private Sub Text1_Change()
    flagl = 1
    Form3.Text2.Locked = False
End Sub

'-----
'คำสั่งการเปลี่ยนแปลงข้อมูลใน Form3.Tex2
'-----

Private Sub Text2_Change()
    flagr = 1
    If flagl = 1 Then
        Form3.Command3.CausesValidation = True
        Form3.Command3.Enabled = True
    End If
    flagr = 0

```

```
flag1 = 0
```

```
End Sub
```

4. ฟอรั่มแสดงค่าความยาวคลื่นของสเปกตรัม (Form 4)

ฟอรั่มแสดงค่าความยาวคลื่นของสเปกตรัม ประกอบด้วยชุดคำสั่งดังนี้

```
'-----
```

```
'คำสั่งออกจาก Form 4
```

```
'-----
```

```
Private Sub Command1_Click ()
```

```
    Form4.Visible = False
```

```
End Sub
```


ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาวธนิกานต์ ศรีต้นวงศ์
วันเดือนปี เกิด	12 กุมภาพันธ์ 2526
สถานที่เกิด	อำเภอท่าบ่อ จังหวัดหนองคาย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	142 หมู่ 10 ตำบลน้ำโมง อำเภอท่าบ่อ จังหวัดหนองคาย
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ครู
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	โรงเรียนโนนสะอาดพิทยาสรรค์ อำเภอโนนสะอาด จังหวัดอุดรธานี
ประวัติการศึกษา	
2544	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนโคกคอนวิทยาคม อำเภอท่าบ่อ จังหวัดหนองคาย
2548	ค.บ. (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
2553	กศ.ม. (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ