

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์เส้นใยนำแสงเพื่อเตรียมอุปกรณ์ในการวัดความเข้มข้น
ของสารเคมี



นายบุญล ธีอพันธ์เศรษฐ์
นายสุธีร์ กิปทอง

๒/๗.
๗๖๖๖๗
๑๖๖๖
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน.เดือน.ปี.....



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา เคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2537 /

612548832

Application of Optical Fibre for Making Device to Measure Chemical Concentration

Mr. Nukul Euaphantasate

Mr. Suthee Keepthong

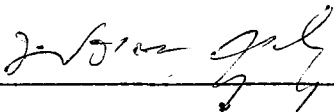
**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science**

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1994



(ดร. ประเสริฐ คุณคำชู)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การประยุกต์เส้นใยนำแสงเพื่อเตรียมอุปกรณ์ในการวัดความเข้มข้นของสารเคมี
นักศึกษา	นายอนุช เอื้อพันธเศรษฐ นายสุธีร์ กี่ปทอง
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. อนุชา เอื้อเพิ่มเกียรติ ดร. ประเสริฐ คุณคำชู Dr. Fu Kuo Hsu
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2537

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเส้นใยนำแสงมีบทบาทที่สำคัญต่อโลกยุคโลกาภิวัตน์เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านการสื่อสารโทรคมนาคม ด้านการแพทย์ ด้านการทหาร ด้านการประดับตกแต่ง และสำหรับเทคโนโลยีที่พิเศษในการค้นคว้าวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์

นักวิจัยทั้งหลายได้พัฒนาการใช้เส้นใยนำแสง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์มากมาย เช่น เครื่องวัด pH อินฟราเรด สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ และ รามานสเปคโตรมิเตอร์

การใช้เส้นใยนำแสงในเครื่องมือวัดทางไกล (remote measurement device) สำหรับ รามานสเปคโตรมิเตอร์นั้นให้ประโยชน์มากมาย เช่น การวัดปฏิกิริยาเคมีอย่างต่อเนื่อง (on-line measurment) และการตรวจสอบวัตถุต่าง ๆ ซึ่งโครงการพิเศษนี้จะสร้างอุปกรณ์ดังกล่าว สำหรับเครื่อง Perkin Elmer system 2000R FT-Raman spectrometer

สิ่งที่ประดิษฐ์คือ แท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์ออกจากแหล่งกำเนิดไปสู่หัววัดเส้นใยนำแสง (input) แท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงที่กระเจิงออกจากหัววัดเส้นใยนำแสง (output) ไปสู่ตัวตรวจรับสัญญาณของเครื่องรามานสเปคโตรมิเตอร์ และหัววัดเส้นใยนำแสงซึ่งจะใช้เทคนิคคอนโฟคอล และมีการใช้อุปกรณ์ทางแสงที่เหมาะสม เช่น ตัวกรองสัญญาณ (filter), ผลึกแยกลำแสง (beamsplitter), กระจกสะท้อนด้านหน้า (first surface mirror) และเส้นใยนำแสง ดังนั้น หัววัดเส้นใยนำแสงดังกล่าวจึงสามารถใช้เป็นต้นแบบสำหรับการค้นคว้าวิจัยในอนาคต

Special Project Title	Application of Optical Fibre to Making Device for Measure Chemical Concentration
Name	Mr. Nukul Euaphantasate Mr. Suthee Keepthong
Special Project Advisor	Dr. Anucha Euapermkiati Dr. Prasert Khunkhumchoo
Department	Chemistry
Academic Year	1994

abstract

At present, optical fibre plays an important role to the globalization period, particularly, in communication, medicine, military affairs, decoration and especially in science and technology research laboratory.

Several authors have proposed the development of using optical fibre to many scientific instruments, such as pH meter, infrared spectrophotometer and Raman spectrometer.

Utilization of optical fibre in the remote measurement device for Raman spectrometer provide a great benefit to the on-line measurement of chemical reaction and identification of materials. The current research works attempted to construct optical fibre compartments and devices for a Perkin Elmer system 2000 R FT-Raman spectrometer.

The constructed compartments are input and output optical fibre holders, for guides laser light from the laser source (input) to remote optical fibre head sensor and from the scattered light (output) to the built-in spectrometer detector, and remote optical fibre head sensor which used a confocal technique and employed a suitable light apparatus i.e. filter, beamsplitter, first surface mirror and optical fibre. Then the invented compartment of the head sensor could be used as a prototype for future investigation.

กิติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการพิเศษนี้ ได้สำเร็จลงเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือจากบุคคลที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ รวมทั้งองค์กรต่าง ๆ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ ดร. อนุชา เอื้อเพิ่มเกียรติ ดร. ประเสริฐ คุณคำชู ดร. ศรีนัย โปษยจินดา Dr. Fu Kao Hsu และ ผศ.ดร. ปรีชา ยุพาพิน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. ศักดา ไตรศักดิ์ และ อ. อนุรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ บริษัท อินเตอร์เนชั่นแนล (1987) จำกัด ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เส้นใยนำแสง ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ให้ความร่วมมือและช่วยอำนวยความสะดวกในการจัดทำโครงการพิเศษ ห้องปฏิบัติการสโตนแกรม ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ อนุญาตให้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ทางด้านแสง ห้องปฏิบัติการชั่วคราวของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ตึกเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ FT-Raman ห้องปฏิบัติการวิจัยออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สจล. ให้ความช่วยเหลือเครื่องมือในการทดสอบอุปกรณ์ทางด้านแสง อาคารฝึกงานซ่อมสร้างเครื่องมือวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สจล. อนุญาตให้ใช้เครื่องมือในการสร้างหัววัดเส้นใยนำแสง

นอกเหนือจากบุคคลและหน่วยงานที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีบุคคลอีกมากมายที่อยู่เบื้องหลังคอยให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษามาโดยตลอด ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทางผู้จัดขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นฤต เอื้อพันธเศรษฐ
สุธีร์ กีบทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ญ
คำย่อที่ใช้ในโครงงานพิเศษ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเส้นใยนำแสง	3
2.1.1 คุณสมบัติของแสง	3
2.1.2 ปรัชญาการณการสะท้อนกับหมด	5
2.1.3 โครงสร้างของเส้นใยนำแสง	6
2.1.4 การป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง	7
2.1.5 การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสง	9
2.1.6 การสูญเสียแสงในเส้นใยนำแสง	12
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี	15
2.2.1 แบบต่าง ๆ ของการสั่นและการหมุน	15
2.2.2 ทฤษฎีว่าด้วยรามานสเปกโตรสโกปี	15
2.2.3 การกระเจิงแบบรามาน	15
2.2.4 การกระเจิงแบบเรย์ลี	17
2.2.5 ฟลูออเรสเซนส์	18
2.2.6 การปรับตำแหน่งเลขคลื่นของรามานสเปกโตรม	19
2.3 เครื่องฟูรีเยอร์ทรานสฟอร์มสเปกโตรมิเตอร์	20
2.3.1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์	20
2.3.2 หลักการของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 หัววัดเส้นใยนำแสง	28
2.4.1 หัววัดเส้นใยนำแสงแบบเดี่ยว	28
2.4.2 หัววัดเส้นใยนำแสงแบบคู่	28
2.4.3 หัววัดเส้นใยนำแสงแบบหลายเส้น	29
2.4.4 หัววัดเส้นใยนำแสงแบบคอนไฟคอลล	33
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน	37
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	37
3.2 แผนงานการดำเนินการวิจัย	38
3.2.1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์หัววัดเส้นใยนำแสง และแท่นจับ เส้นใยนำแสง	38
3.2.2 การเลือกอุปกรณ์ทางแสงและเส้นใยนำแสง	44
3.2.3 การทดสอบด้วยเครื่อง FT-Raman	44
3.2.4 การทดสอบเชิงกายภาพ	46
3.2.5 การประกอบหัววัดเส้นใยนำแสงเข้ากับเครื่อง FT-Raman และ การจัดแนวทางเดินของแสง	50
3.2.6 การทดสอบหัววัดเส้นใยนำแสง	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	52
4.1 ผลการทดลองการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลอง	52
4.1.1 แท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์	52
4.1.2 แท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาน	55
4.1.3 หัววัดเส้นใยนำแสง	57
4.2 ผลการคัดเลือกอุปกรณ์ทางแสงและเส้นใยนำแสง	60
4.3 ผลการทดลองด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มรามานสเปกโตรสโกปี	63
4.4 ผลการทดสอบอุปกรณ์เชิงกายภาพ	64
4.5 ผลการจัดแนวทางเดินของแสง	67
4.6 ผลการทดสอบหัววัดเส้นใยนำแสง	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	68
ภาคผนวก	70
บรรณานุกรม	81

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 2-1	การสะท้อนและการหักเหของแสงหักเหบริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิด	4
รูปที่ 2-2	มุมวิกฤติและการสะท้อนกลับหมดของแสง	5
รูปที่ 2-3	แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง	6
รูปที่ 2-4	แสดงมุมรับแสงของเส้นใยนำแสง	7
รูปที่ 2-5	แสดงความหมายของค่ามุมเปิดรับแสงของเส้นใยนำแสง	8
รูปที่ 2-6	แสดงชนิดของเส้นใยนำแสงที่แบ่งตามจำนวนแบบการเคลื่อนที่ของแสง	9
รูปที่ 2-7	แสดงลักษณะการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงแบบขั้น	10
รูปที่ 2-8	แสดงลักษณะการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงแบบเกรด	12
รูปที่ 2-9	แสดงการสูญเสียแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ	13
รูปที่ 2-10	แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานที่เป็นต้นเหตุของการเกิดเส้นสโตคและเส้นแอนติ-สโตค	16
รูปที่ 2-11	แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานที่เป็นต้นเหตุของการเกิดเส้นเรย์ลีโดยเปรียบเทียบกับเส้นสโตคและเส้นแอนติ-สโตค	17
รูปที่ 2-12	แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานที่เป็นต้นเหตุของการเกิดฟลูออเรสเซนส์โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงเลเซอร์ในช่วงที่ตามองเห็นกับช่วงอินฟราเรดใกล้	18
รูปที่ 2-13	แสดงการปรับตำแหน่งเลขคลื่นของรามานสเปกตรัม	19
รูปที่ 2-14	แสดงส่วนประกอบของเครื่อง FT-Raman รุ่น 2000R บริษัท Perkin Elmer	20
รูปที่ 2-15	แสดงเส้นทางเดินของแสงภายในเครื่อง FT-Raman รุ่น 2000R บริษัท Perkin Elmer	21
รูปที่ 2-16	แสดงภาพภายในของส่วนที่เกี่ยวข้องกับสารตัวอย่าง	22
รูปที่ 2-17	แสดงตำแหน่งปั๊มและล้อที่ใช้สำหรับปรับตำแหน่งที่จับสารตัวอย่าง	23
รูปที่ 2-18	แสดงรามานที่ถูกกรองสัญญาณเข้าสู่ส่วนที่เกี่ยวข้องกับแสง	24
รูปที่ 2-19	แสดงหลักการทำงานของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์	25
รูปที่ 2-20	แสดงอินเตอร์เฟอโรแกรม	26

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2-21 แสดงการจัดเรียงอุปกรณ์ต่าง ๆ และการจัดเรียงตัวของเส้นใยนำแสง	29
รูปที่ 2-22 แสดงสเปกตรัมของเส้นใยนำแสงจากบริษัท Quartz et Selice	30
รูปที่ 2-23 แสดงสเปกตรัมของเส้นใยนำแสงจากบริษัท Corning	30
รูปที่ 2-24 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมของ indene เมื่อใช้หัววัดเส้นใยนำแสงและใช้ระบบรวมแสง	31
รูปที่ 2-25 แสดงสเปกตรัมของ indene เมื่อใช้หัววัดเส้นใยนำแสงแบบหลายเส้นของบริษัท Corning	32
รูปที่ 2-26 แสดงสเปกตรัมของการใช้หัววัดเส้นใยนำแสงแบบหลายเส้น	32
รูปที่ 2-27 แสดงกล้องจุลทรรศน์ที่มีการฉายแสงแบบวงกลม	33
รูปที่ 2-28 แสดงกล้องจุลทรรศน์ที่มีการฉายแสงแบบเส้น	34
รูปที่ 2-29 แสดงหลักการของกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลและความสามารถในการแยก	34
รูปที่ 2-30 แสดงกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล	35
รูปที่ 2-31 แสดงโครงสร้างของหัววัดเส้นใยนำแสง	35
รูปที่ 3-1 ภาพอุปกรณ์ชุดโพลาริเซชันของเครื่อง FT-Raman	39
รูปที่ 3-2 แสดงแบบภาพฉายของอุปกรณ์ชุดโพลาริเซชันของเครื่อง FT-Raman	40
รูปที่ 3-3 แสดงภาพแท่นจับสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งของเครื่อง FT-Raman	42
รูปที่ 3-4 แสดงภาพฉายของแท่นจับสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง	43
รูปที่ 3-5 แสดงการจัดชุดอุปกรณ์เพื่อทดสอบค่าการสะท้อนและค่าการส่งผ่านของผลึกแยกลำแสงชนิดกระจก	
รูปที่ 3-6 แสดงชุดเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงเข้ากับแหล่งกำเนิดแสง	48
รูปที่ 3-7 ภาพถ่ายการจัดชุดอุปกรณ์เพื่อทดสอบหาค่าการสูญเสียแสงของเส้นใยนำแสง	48
รูปที่ 3-8 แสดงการต่อหัววัดเส้นใยนำแสงเข้ากับเครื่อง FT-Raman	50
รูปที่ 3-9 แสดงทิศทางการเดินทางของแสงภายในหัววัดเส้นใยนำแสง	51
รูปที่ 4-1 แสดงภาพถ่ายของแท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์	53
รูปที่ 4-2 แสดงภาพฉายของแท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำเลเซอร์	54
รูปที่ 4-3 แสดงภาพของแท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาน	55

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4-4	แสดงภาพฉายของแท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาาน	56
รูปที่ 4-5	แสดงภาพถ่ายหัววัดเส้นใยนำแสง	58
รูปที่ 4-6	แสดงภาพถ่ายหัววัดเส้นใยนำแสง	59
รูปที่ 4-7	แสดงการรวมแสงของเลนส์นูน 1 ด้าน	61
รูปที่ 4-8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ที่แสงสามารถผ่านตัวกรองสัญญาณกับความยาวคลื่น	61
รูปที่ 4-9	แสดงทางเดินของแสงที่ตกกระทบลงบนกระจกสะท้อนด้านหน้า	62

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4-1 แสดงผลการทดสอบระยะโฟกัสของเลนส์	64
ตารางที่ 4-2 แสดงค่ากำลังของเลนเซอร์เมื่อทดสอบผลึกแยกลำแสง	64
ตารางที่ 4-3 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนและค่าการส่งผ่านของแสง	65
ตารางที่ 4-4 แสดงค่ากำลังของแสงที่ออกจากปลายอีกด้านหนึ่งของเส้นใยนำแสง	65
ตารางที่ 4-5 แสดงผลการทดสอบการหาค่าขนาดการเปิดรับแสง	66

คำย่อที่ใช้ในโครงการพิเศษ

%	เปอร์เซ็นต์
μm	ไมโครเมตร
λ	ความยาวคลื่น
dB/km	เดซิเบลต่อกิโลเมตร
cm^{-1}	หน่วยของเลขคลื่น
nm	นาโนเมตร
FT-Raman	เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มรามาน
K	เคลวิน
mW	มิลลิวัตต์
cm	เซนติเมตร

บทที่ 1

บทนำ

เทคนิครามานสเปกโตรสโกปี เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการชนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับตัวกลางโปร่งใส (transparent medium) ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเกิดการกระเจิงโดยมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และเปลี่ยนเฟส การกระเจิงของสารนี้ขึ้นกับโครงสร้างโมเลกุลของสาร จึงสามารถนำเทคนิคนี้มาใช้หาสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารนั้นได้ เทคนิคนี้มีความคล้ายคลึงกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี แต่มีคุณสมบัติที่เด่นกว่าอยู่หลายประการ เช่น สารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถเตรียมได้ง่าย และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเซลล์และหน้าต่าง (window) เปรียบเทียบกับเทคนิคอินฟราเรด เนื่องจากใช้หลักการการกระเจิงของแสง จึงไม่ทำลายสารตัวอย่าง สารตัวอย่างที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ก็จะมีไม่ถูกรบกวนสเปกตรัม ทำให้วิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีน้ำเป็นส่วนผสมได้สะดวกมากขึ้น

เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงของรามานสเปกโตรสโกปี เป็นแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มสูง จึงมีการนำเส้นใยนำแสงมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเป็นหัววัดเส้นใยนำแสง เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องรามานสเปกโตรสโกปีในหลาย ๆ ด้าน เช่น สามารถติดตามความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นหรือสารผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาในเวลาต่าง ๆ กัน สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ เช่น ภาพวาดทางศิลปะ อีกทั้งสามารถวิเคราะห์สารในสภาวะแวดล้อมที่เป็นอันตราย เช่น บริเวณที่มีความเป็นพิษ บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงและความดันสูงกว่าปกติมาก ๆ หรือในบริเวณที่มีการแผ่รังสีจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

วัตถุประสงค์การทำโครงการพิเศษ

1. เพื่อศึกษา รวบรวมข้อมูล และสรุปเป็นข้อมูลเกี่ยวกับพื้นฐานทางด้านแสง เส้นใยนำแสง และเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มมามานสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อใช้ในการสร้างหัววัดเส้นใยนำแสง และอุปกรณ์ส่วนประกอบต่าง ๆ
2. นำข้อมูลที่ได้ศึกษาไปทำการสร้างหัววัดเส้นใยนำแสง และส่วนประกอบต่าง ๆ
3. ทำการทดสอบหัววัดเส้นใยนำแสงร่วมกับเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มมามานสเปกโตรมิเตอร์ และส่วนประกอบอื่น ๆ

วิธีการดำเนินงานโดยย่อ

1. ศึกษาส่วนประกอบและการทำงานของเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มมามานสเปกโตรมิเตอร์ รวมถึงชนิดและอุปกรณ์ทางแสง (เลนส์ ตัวกรองสัญญาณ ผลึกแยกลำแสง และเส้นใยนำแสง) ที่จะนำมาใช้ในโครงการพิเศษนี้ และศึกษาถึงการจัดทิศทางการเดินทางของแสงแบบคอนไฟคอลล
2. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์
 - 2.1 แท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์
 - 2.2 แท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาน
 - 2.3 หัววัดเส้นใยนำแสง
3. คัดเลือกอุปกรณ์ทางแสงและเส้นใยนำแสง ที่เหมาะสมในการนำมาใช้สร้างหัววัดเส้นใยนำแสง
4. ทำการทดสอบอุปกรณ์ทางแสงและเส้นใยนำแสง โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มมามานสเปกโตรมิเตอร์
5. ทำการทดสอบอุปกรณ์ทางแสงและเส้นใยนำแสง ทางด้านกายภาพ
6. ทำการจัดแนวทางเดินของแสง (alignment) เริ่มตั้งแต่ตำแหน่งที่ป้อนแสงเลเซอร์เข้าไปในเส้นใยนำแสงผ่านไปยังหัววัดเส้นใยนำแสง และรับแสงที่กระเจิงแบบรามานเข้าสู่ตัวรับสัญญาณแสง (detector)
7. ทำการทดสอบหัววัดเส้นใยนำแสงและส่วนประกอบอื่น ๆ ที่สร้างขึ้น ร่วมกับเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มมามานสเปกโตรมิเตอร์

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเส้นใยนำแสง

เนื่องจากในโครงการพิเศษนี้ต้องใช้เส้นใยนำแสงเป็นอุปกรณ์หลักในการดำเนินงาน จึงจำเป็นต้องรู้ถึงทฤษฎีบางประการของแสงและเส้นใยนำแสง ดังนี้

2.1.1 คุณสมบัติของแสง

คุณสมบัติที่สำคัญมี 3 ข้อ คือ

1. แสงเดินทางเป็นเส้นตรง คือ ในตัวกลางชนิดเดียวกันแสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง
2. การสะท้อนกลับ คือ เมื่อมีแสงตกกระทบบริเวณรอยต่อของวัสดุที่ต่างชนิดกัน

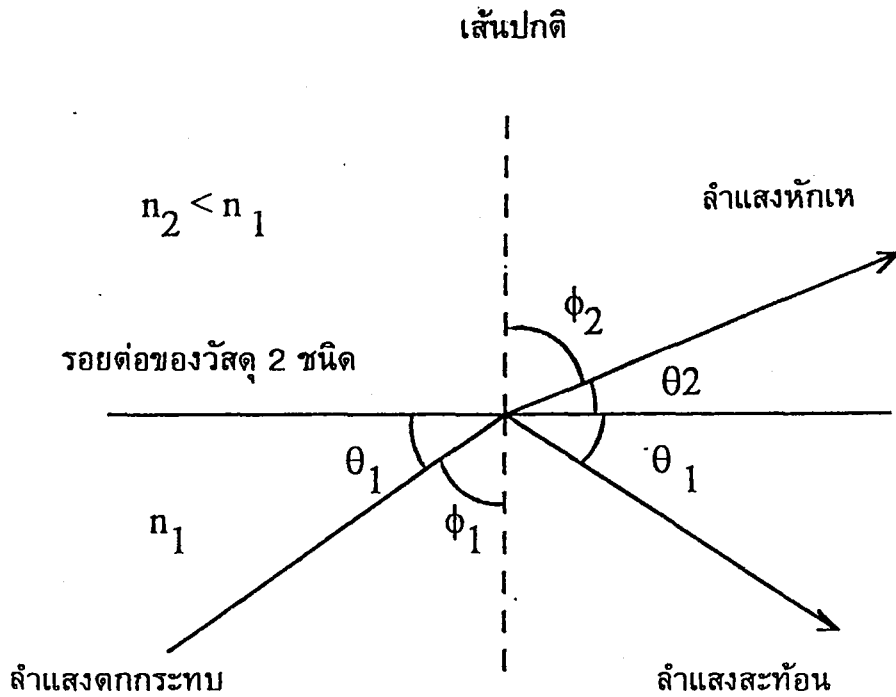
แสงบางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ

3. การหักเห คือ เมื่อแสงตกกระทบที่รอยต่อของวัสดุสองชนิดที่แตกต่างกัน แสงส่วนที่ไม่สะท้อนกลับจะเดินทางเข้าไปในตัวกลางอีกชนิดหนึ่ง แต่จะมีทิศทางเปลี่ยนไป

จากคุณสมบัติของแสงที่กล่าวข้างต้นเป็นไปตามกฎของสเนล (Snell's law) ซึ่งได้อธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิดดังสมการ

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$$

$$n_1 \cos \theta_1 = n_2 \cos \theta_2$$

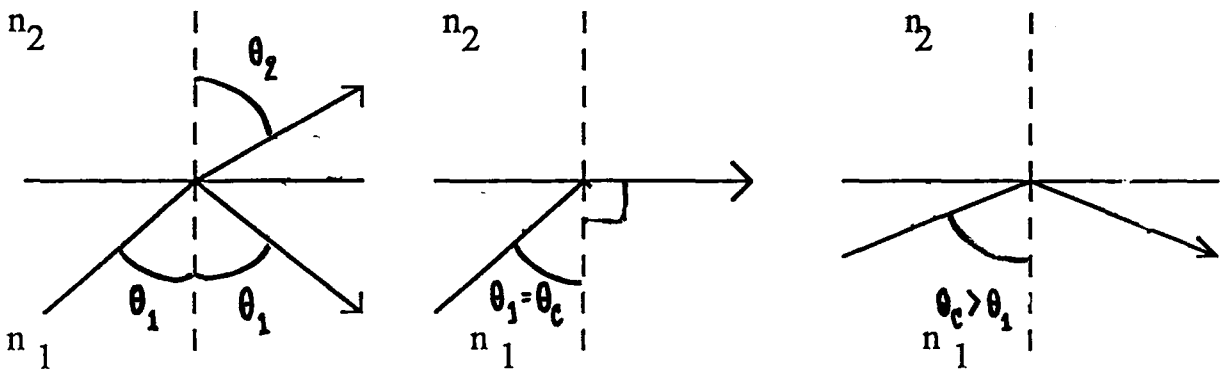


รูปที่ 2-1 การสะท้อนและการหักเหของแสงหักเหบริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิด

โดย n_1 และ n_2 คือ ดัชนีหักเหของวัสดุสองชนิด ϕ_1 และ θ_1 คือ มุมที่แสงตกกระทบทำกับเส้นปกติและผิวรอยต่อของวัสดุ ตามลำดับ ส่วน ϕ_2 และ θ_2 คือมุมที่แสงหักเหทำกับเส้นปกติและผิวของรอยต่อวัสดุทั้งสอง ดังรูปที่ 2-1

2.1.2 ปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมด

จากคุณสมบัติของแสงทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับเส้นโยนนำแสง คือ เมื่อแสงเดินทางจากวัสดุชนิดหนึ่งที่มีค่าดัชนีหักเหสูงไปยังวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่า แสงจะหักเหออกจากเส้นปกติ เมื่อมุมตกกระทบมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แสงจะหักเหเข้าสู่รอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิด และที่ค่ามุมตกกระทบค่าหนึ่ง แสงหักเหจะเดินทางขนานไปกับรอยต่อของวัสดุทั้งสอง โดยเรียกมุมนี้ว่า มุมวิกฤติ (Critical Angle) ใช้สัญลักษณ์ θ_c และในกรณีที่มุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤติ แสงจะไม่เดินทางเข้าไปในวัสดุที่สอง แต่แสงที่ตกกระทบจะเกิดการสะท้อนกลับหมด ดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 มุมวิกฤติและการสะท้อนกลับหมดของแสง

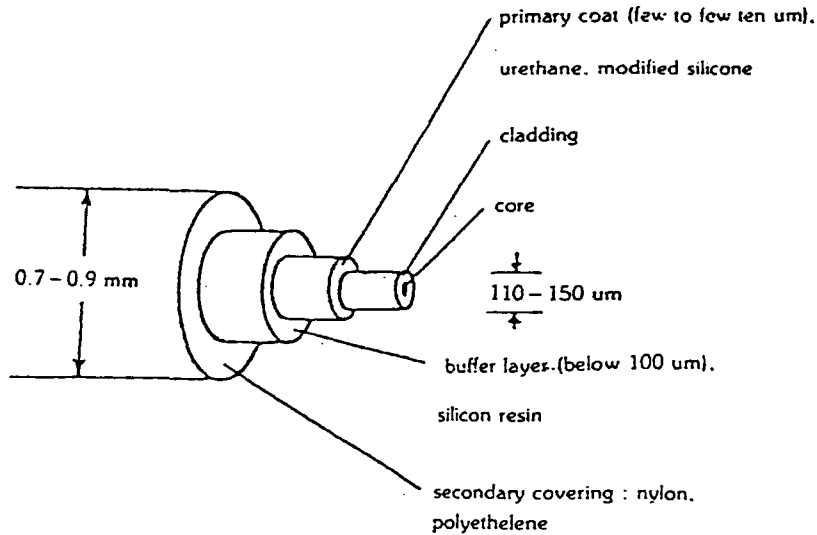
2.1.3 โครงสร้างของเส้นใยนำแสง

เส้นใยนำแสงมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. แกน (Core) คือ ส่วนที่แสงเดินทางผ่าน
2. ครอบ (Clad) คือส่วนที่ห่อหุ้มแกน

เส้นใยนำแสงจะถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันการเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับเส้นใยนำแสง ซึ่งจะมีวัสดุแตกต่างตามลักษณะการนำไปใช้ ดังรูปที่ 2-3

โดยปกติเส้นใยนำแสงทั่ว ๆ ไปจะมีค่าดัชนีหักเหของแกน มากกว่าครอบเล็กน้อย เพราะจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายในเส้นใยนำแสง ในกรณีที่มุมตกกระทบภายในแกนของเส้นใยนำแสงมีค่ามากกว่ามุมวิกฤติ

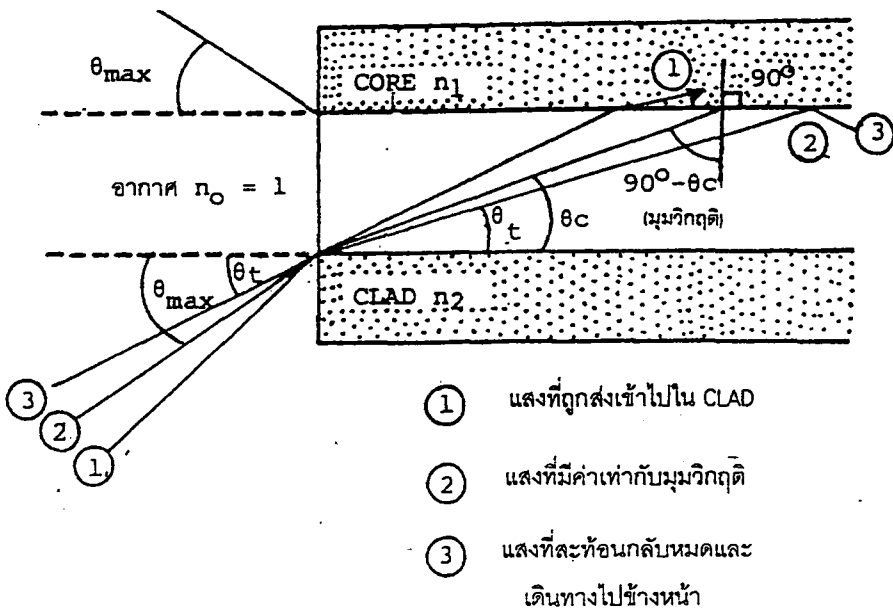


รูปที่ 2-3 แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง

2.1.4 การป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง

เนื่องจากแกนของเส้นใยนำแสงมีขนาดเล็กมาก จะต้องใช้เลนส์ช่วยในการป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง แสงที่มีมุมตกกระทบที่เหมาะสมเท่านั้นจึงสามารถผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ จะพบว่าที่จุดป้อนแสงของเส้นใยนำแสงจะเป็นจุดต่อของวัสดุสามชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน คือ อากาศ n_0 , แกน n_1 และครอบ n_2 ซึ่งจะเกิดการหักเหของแสงที่รอยต่อของอากาศกับแกน และแกนกับครอบ ดังรูปที่ 2-4 ถ้ากำหนดให้มุมรับแสงตรงรอยต่อของแกนและครอบมีค่าเป็นมุมวิกฤติ θ_c จะได้ว่า

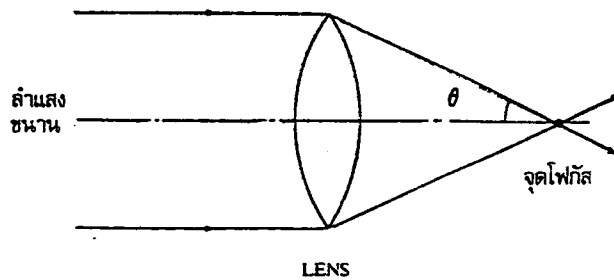
$$\sin \theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



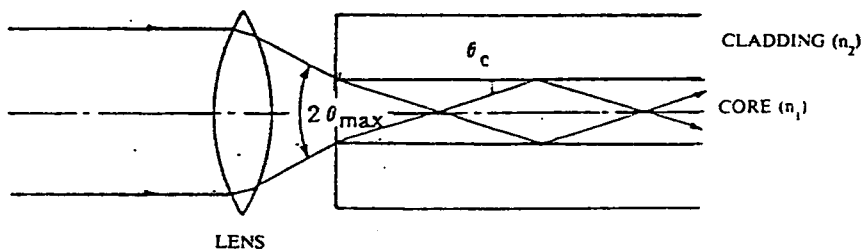
รูปที่ 2-4 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยนำแสง

$\sin \theta_{\max}$ เรียกว่า มุมเปิดรับแสง (numerical aperture, NA) หมายถึง มุมที่โตที่สุดที่สามารถยอมรับได้ในการเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับเส้นใยนำแสง ซึ่งแสงที่อยู่ในมุมนี้ จะให้พลังงานที่สามารถรวบรวมออกไปได้มากที่สุด ดังรูปที่ 2-5

สรุปได้ว่าเส้นใยนำแสงขนาดใหญ่จะมีค่า มุมเปิดรับแสง มากกว่าเส้นใยนำแสงขนาดเล็ก ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับเส้นใยนำแสงมีประสิทธิภาพสูงกว่า



ก) ค่ามุมเปิดรับแสงของเลนส์



ข) วิธีการป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยแสงอย่างมีประสิทธิภาพ

รูปที่ 2-5 แสดงความหมายของค่ามุมเปิดรับแสงของเส้นใยนำแสง

2.1.5 การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสง

เส้นใยนำแสงมีหลายชนิดสามารถแบ่งได้ตามเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ 3 ประเภท [1] ดังนี้

1) การแบ่งเส้นใยนำแสงตามชนิดของไดอิเล็กทริก (Dielectric)

สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1.1) เส้นใยแก้วซิลิกา (Silica Glass Optic Fibre)

1.2) เส้นใยแก้วผสม (Compound Glass Optic Fibre)

1.3) เส้นใยพลาสติก (Plastic Optic Fibre)

2) การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามจำนวนแบบการเคลื่อนที่ของแสง

(Propagation Mode)

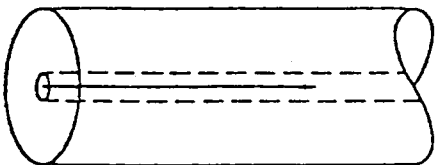
สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.1) เส้นใยนำแสงชนิดแบบเดี่ยว (Single Mode Optic Fibre)

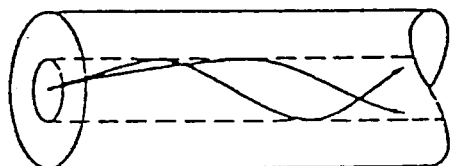
เส้นใยนำแสงชนิดนี้แกนเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาด 8-10 μm แสงเดินทางภายในเส้นใยนำแสงด้วยเส้นทางเดียว ดังรูปที่ 2-6 ก

2.2) เส้นใยนำแสงชนิดแบบสห (Multi Mode Optic Fibre)

เส้นใยนำแสงชนิดนี้แกนเส้นใยนำแสงมีขนาดใหญ่กว่าชนิดแบบเดี่ยว แสงสามารถเดินทางในเส้นใยนำแสงได้หลายเส้นทาง ดังรูปที่ 2-6 ข



ก



ข

ก เส้นใยนำแสงชนิดแบบเดี่ยว

ข เส้นใยนำแสงชนิดแบบสห

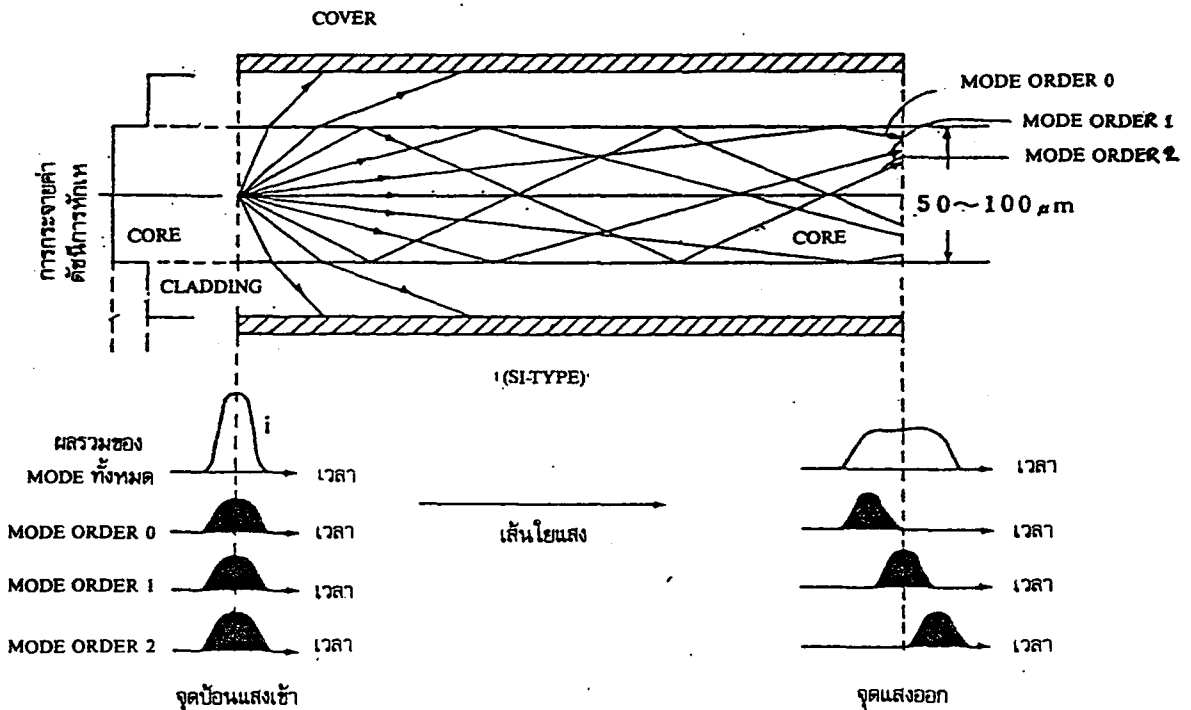
รูปที่ 2-6 แสดงชนิดของเส้นใยนำแสงที่แบ่งตามจำนวนแบบการเคลื่อนที่ของแสง

3) การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามชนิดของดัชนีหักเห

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

3.1) เส้นใยนำแสงชนิดดัชนีหักเหแบบขั้น (Step Index Optic Fibre)

เส้นใยนำแสงชนิดที่มีดัชนีหักเหแบบขั้นนี้ ทุก ๆ ส่วนของแกนมีดัชนีหักเหเท่ากันหมด ดังแสดงในรูปที่ 2-7 เส้นใยนำแสงชนิดนี้เมื่อป้อนแสงที่มีลักษณะเป็นช่วง (pulse) เข้าไปในเส้นใยแสง แสงที่เป็นช่วงจะแยกออกเป็นหลายทางเดิน (mode) ในเส้นใยนำแสงด้วยความเร็วแตกต่างกัน ทำให้เกิดผลต่างทางเวลาในการเดินทางมาถึงปลายอีกด้านหนึ่งของเส้นใยแสง กล่าวคือที่ปลายอีกด้านหนึ่งของเส้นใยแสงนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงแสงทางด้านที่ป้อนเข้ามาปรากฏว่าเกิดการขยายกว้างออกทางเวลาของช่วงแสงที่อยู่ใกล้เคียงขึ้นเป็นผลให้ไม่สามารถแยกช่วงแสงออกได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 2-7 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงแบบขั้น

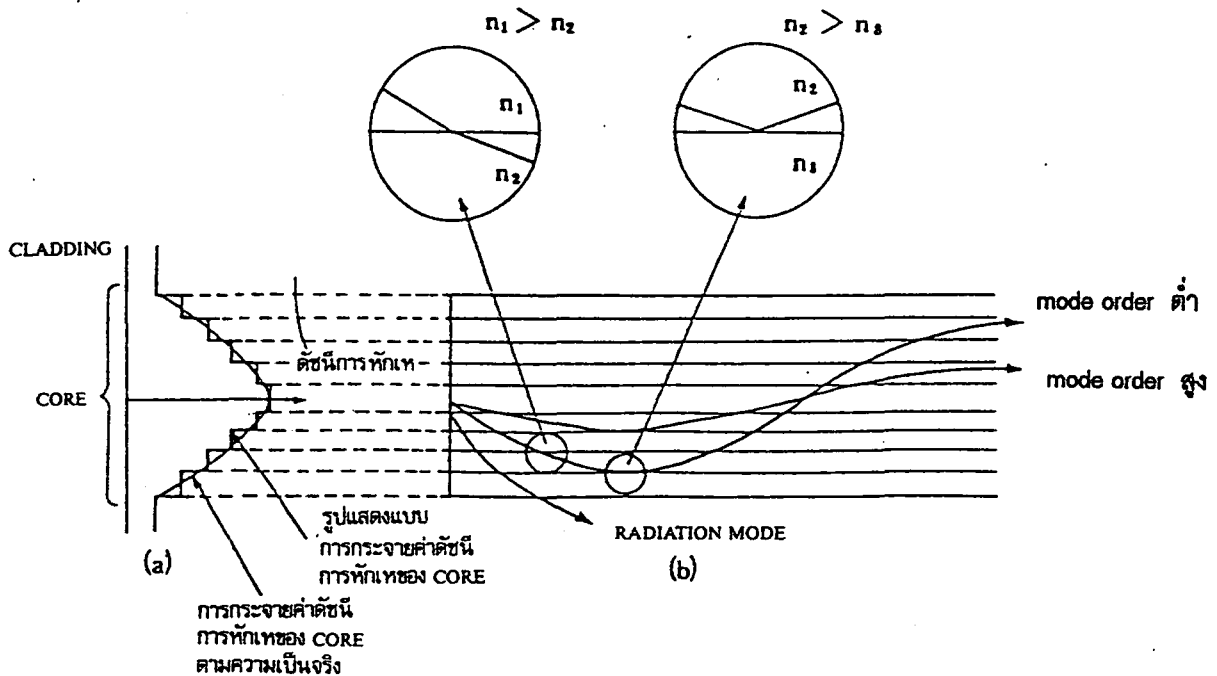
3.2) เส้นใยนำแสงชนิดดัชนีหักเหแบบเกรด (Grade Index Optic Fibre)

เส้นใยนำแสงชนิดนี้บริเวณศูนย์กลางแกนเส้นใยมีค่าดัชนีหักเหสูงที่สุด และจะลดลงเรื่อย ๆ ตามแนวรัศมีของแกน จากรูปสังเกตได้ว่าแสงแต่ละเส้นทางเดิน จะค่อยหักเหตรงรอยต่อของแต่ละชั้นตามกฎของสเนลและเคลื่อนที่ไปยังชั้น (layer) ที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำ ในลักษณะเช่นนี้จะทำให้มุม θ ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกนของเส้นใยแสงกับทิศทางเดินของแสงมีค่าน้อยลง และในระหว่างที่เกิดการหักเหไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งในที่สุดจะเกิดการสะท้อนกลับหมดที่ชั้น ๆ หนึ่งและสะท้อนกลับไปยังชั้นที่มีค่าดัชนีหักเหสูงตรงส่วนกลางของเส้นใยแสง ในกรณีนี้มุม θ ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกนของเส้นใยนำแสงกับทิศทางเดินของแสงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ๆ และเมื่อแสงเดินทางไปตรงศูนย์กลางก็จะเกิดปรากฏการณ์เหมือนตอนเริ่มต้นซ้ำอีก จากรูปจะเห็นว่าโหมดเส้นทางเดินที่ 0 จะเดินทางใกล้ ๆ จุดศูนย์กลาง ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหสูงและเมื่อเส้นทางเดินยิ่งสูงมากเท่าใด จะยิ่งเดินทางเข้าใกล้ส่วนที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำมากขึ้นเท่านั้น และเนื่องจากการเดินทางของแสงจะเปลี่ยนไปตามค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง มีค่าดังที่แสดงในสมการ

$$v = c/n$$

- เมื่อ c เป็นความเร็วแสงในอากาศ = 3×10^8 m/sec
 n เป็นค่าดัชนีหักเหของตัวกลางใด ๆ

จากสมการพบว่าเมื่อแสงเดินทางในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหมากขึ้นเท่าใด ความเร็วในการเดินทางจะค่อย ๆ ลดลง เพราะฉะนั้นแสงที่มีเส้นทางเดินต่ำ จะเดินทางในเส้นทางที่สั้นแต่เนื่องจากมันเดินทางในเส้นทางในส่วนใกล้ศูนย์กลางของเส้นใยแสงที่มีค่าดัชนีหักเหสูง ทำให้ใช้เวลาในการเดินทางมากกว่า ในทางตรงกันข้ามแสงที่มีเส้นทางเดินสูงนั้น เส้นทางเดินของมันจะยาว แต่ทว่าเนื่องจากเส้นทางของแสงที่มีเส้นทางเดินสูง ส่วนมากจะเป็นส่วนที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำ จึงทำให้ถึงปลายทางเร็วกว่า จากเหตุการณ์ทั้งสองทำให้ไม่เกิดการขยายกว้างออกทางเวลาของช่วง ดังรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงในเส้นใยแสงแบบเกรด

2.1.6 การสูญเสียแสงในเส้นใยนำแสง

เป็นตัวบอกให้ทราบว่ากำลังของแสงที่เดินทางไปในเส้นใยนำแสงนั้นลดลงไปจากเดิมเท่าไร ซึ่งถ้าการสูญเสียแสงมีค่าต่ำก็จะสามารถส่งสัญญาณแสงได้มาก การสูญเสียแสงสามารถแบ่งออกตามความแตกต่างของโครงสร้างที่เกิดขึ้นเป็นการสูญเสียที่มีอยู่ในเส้นใยนำแสงเอง (fix loss) และการสูญเสียแสงที่เพิ่มขึ้นมา (addition loss) [1]

1) การสูญเสียแสงที่มีอยู่ในตัวเส้นใยเอง

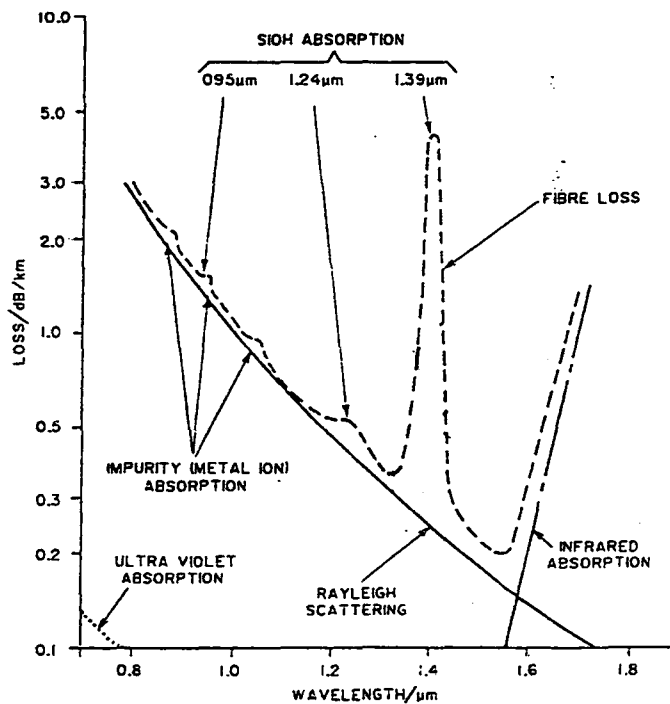
1.1) การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดกลืนแสง (absorption loss)

การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดกลืนแสงจะเกิดขึ้นเมื่อป้อนแสงที่มีความยาวคลื่นพอดีกับผลต่างของพลังงานของโมเลกุล สำหรับการดูดกลืนแสงในเส้นใยนำแสงนั้นเกิดจากการดูดกลืนแสงอันเนื่องมาจากซิลิกา ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของเส้นใยนำแสงชนิดแก้ว การดูดกลืนแสงชนิดนี้จะมีผลมากในช่วงอุลตราไวโอเล็ตและช่วงอินฟราเรดไกล สำหรับแสงในช่วง 0.8-1.6 μm ที่ใช้กับการสื่อสารแสงในปัจจุบันจะไม่ได้รับผลจากการดูดกลืนแสงของซิลิกา แต่สิ่งที่เป็นปัญหาในช่วงนี้ ก็คือสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ โดยเฉพาะ OH-base ของซิลิกา

1.2) การสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering loss)

เกิดขึ้นเมื่อป้อนแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งให้แก่อนุภาค ถ้าความถี่ของแสงมีค่าใกล้เคียงกับความถี่การสั่นของอนุภาคนั้นจะเกิดการกำทอน (resonance) ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอนุภาคนั้นเริ่มสั่นด้วยความถี่การสั่นเดียวกัน เป็นผลให้ความถี่อนุภาคนั้นปล่อยแสงออกมาทุกทิศทุกทาง ในกรณีนี้แสงที่ป้อนเข้าไปถูกดูดพลังงานแล้วหมดไป กล่าวคือสำหรับคนที่มองจากข้างนอกนั้นจะมองเห็นเหมือนกับว่าแสงไปกระทบอนุภาคแล้วแสงเกิดการกระเจิงออกทุกทิศทุกทาง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การกระเจิงของแสง หรือเรียกว่า การกระเจิงแบบเรย์ลี การสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระเจิงแบบนี้จะมีค่าเป็นส่วนกลับกับความยาวคลื่นยกกำลังสี่ ($1/\lambda^4$)

จากคุณสมบัติการสูญเสียแสงที่แปรผันตามความยาวคลื่นของการสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดกลืนแสง และการสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระเจิงแบบเรย์ลี รวมกันจะได้ค่าการสูญเสียแสงต่ำประมาณ 2-3 dB/km ที่ช่วงความยาวคลื่น 0.7-1.7 μm (ดังรูปที่ 2-9) การสูญเสียแสงสูงสุดแถวใกล้ ๆ 0.95 μm , 1.25 μm , 1.40 μm (กราฟเส้นประ) เป็นการสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของไฮดรอกซิล (OH-base silica) และสำหรับกราฟเส้นทึบซึ่งสามารถลดการสูญเสียแสงให้ต่ำที่สุด ประมาณ 0.2 dB/km ที่ 1.55 μm โดยการกำจัดการสูญเสียแสงของ OH-base silica ออกไป ดังนั้นความยาวคลื่นที่ 1.55 μm จึงนำมาใช้ในการสื่อสาร



รูปที่ 2-9 แสดงการสูญเสียแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

1.3) การสูญเสียแสงเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างเส้นใย (uniformity loss)

ในการสร้างเส้นใยจะไม่สามารถทำให้เส้นใยมีลักษณะกลมได้ 100 % โดยเฉพาะตรงบริเวณรอยต่อของแกนกับครอบนั้นจะไม่มีควมสม่ำเสมอตลอดทั้งเส้น ทำให้เกิดการกระจายของแสง แสงบางส่วนจึงไม่สามารถเดินทางไปตามเส้นใยได้แต่กลับกระจายออกนอกเส้นใย

2) การสูญเสียแสงที่เพิ่มขึ้นมา

2.1) การสูญเสียแสงเนื่องจากการโค้งงอของเส้นใยนำแสง (bending loss)

เป็นการสูญเสียแสงที่เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยนำแสงถูกทำให้โค้งงอ ถ้าแสงมีมุมโค้งงอมากกว่ามุมวิกฤติ แล้วแสงจะกระจายออกไปนอกแกน ทำให้การสูญเสียแสงเพิ่มขึ้น

2.2) การสูญเสียแสงเนื่องจากการโค้งงอแบบจุลภาค (micro bending loss)

เป็นการสูญเสียแสงที่เกิดจากการที่มีแรงกดที่ไม่สม่ำเสมอมากระทำต่อแกนของเส้นใยนำแสง ทำให้แกนของเส้นใยนำแสงบิดงอไปเล็กน้อย จึงเกิดการสูญเสียแสงเพิ่มขึ้น

2.3) การสูญเสียแสงเนื่องจากการต่อเส้นใยนำแสง (connection loss)

เกิดจากการที่แกนของเส้นใยนำแสงสองเส้นต่อกันอย่างไม่สมบูรณ์ หรือเกิดการคลาดเคลื่อนของแกน ทำให้แสงบางส่วนที่ออกจากแกนด้านหนึ่งไม่เข้าไปในแกนอีกด้านหนึ่ง แต่จะกระจายออกไปข้างนอก ทำให้เกิดการสูญเสียแสง

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี

2.2.1 แบบต่าง ๆ ของการสั่นและการหมุน

1) การยืด (stretching หรือ valency vibration) คือการเปลี่ยนแปลงความยาวระหว่างอะตอมที่เกิดพันธะกัน แบ่งออกเป็น แบบสมมาตร (symmetric stretching) และแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching)

2) การผิดรูป (deformation) คือการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างพันธะ 2 พันธะ คือแบบกรรไกร (scissoring) แบบโยก (rocking) แบบกระดิก (wagging) แบบบิด (twisting) และแบบงอ (bending)

2.2.2 ทฤษฎีว่าด้วยรามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy)

การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) หรือ ปรากฏการณ์รามาน (Raman effect) คือปรากฏการณ์ที่เกิดจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับตัวกลางโปร่งใส เป็นผลให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการกระเจิงโดยมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และเปลี่ยนเฟสไป

เมื่อแสงเลเซอร์ที่มีคลื่นต่อเนื่องผ่านไปยังสารตัวกลาง ลำแสงจะเกิดการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering หรือ Rayleigh scattering) และการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering หรือ Raman scattering) โดยตัวกลางนั้นมีบางส่วนอาจเกิดการสะท้อนหรือการดูดซับ

2.2.3 การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering)

สามารถแบ่งการกระเจิงแบบรามานได้ 2 แบบคือ

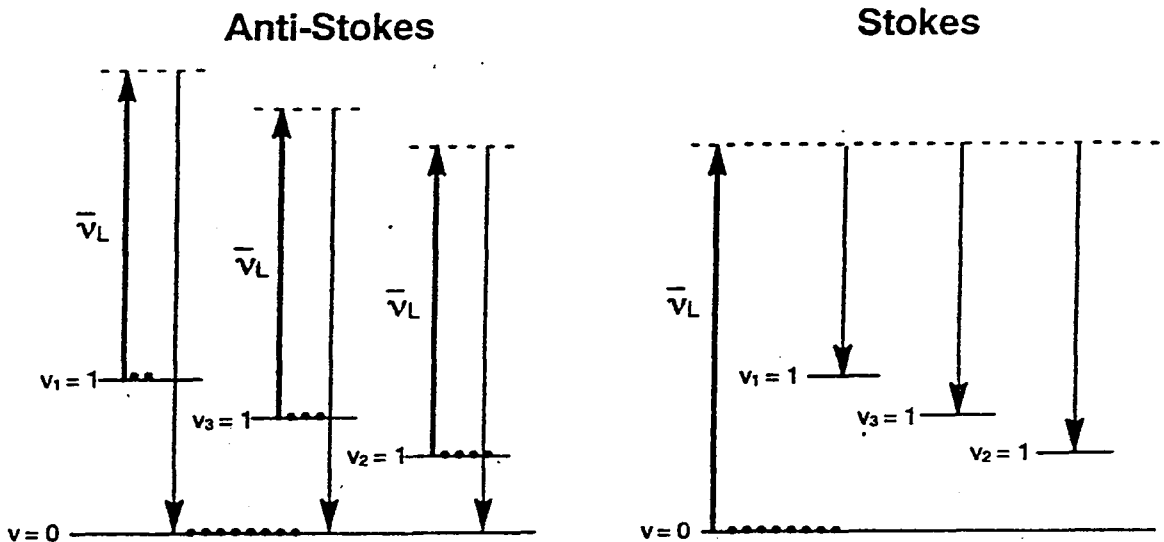
1) เส้นแอนติ-สโตค (anti-stoke lines)

โมเลกุลจะอยู่ที่สถานะกระตุ้นแรก (first vibrationally excited states) เมื่อลำแสงเลเซอร์ทำอันตรกิริยากับโมเลกุลที่สถานะกระตุ้นแรก จะทำให้โมเลกุลถูกกระตุ้นไปอยู่ที่สถานะเสมือน (virtual state) คือที่ 9394.7 cm^{-1} (ความยาวคลื่นคือ $1,064 \text{ nm}$) เหนือสถานะกระตุ้นแรก ซึ่งสถานะนี้โมเลกุลจะไม่เสถียร และจะสลายลงมาที่สถานะพื้น (ground vibrational state) ซึ่งรังสีที่กระเจิงจะมีเลขคลื่น (wavenumber) เท่ากับเลขคลื่นของเลเซอร์ (9394.7 cm^{-1}) รวมกับเลขคลื่นสถานะเริ่มแรก (original vibrational state)

2) เส้นสโตค (stoke lines)

โมเลกุลจะอยู่ที่สถานะพื้น เมื่อลำแสงเลเซอร์ทำอันตรกิริยากับโมเลกุลที่สถานะพื้น จะทำให้โมเลกุลถูกกระตุ้นไปอยู่ที่สถานะเสมือน แต่กรณีนี้โมเลกุลจะมาหยุด (relaxes) ที่สถานะกระตุ้นแรก เลขคลื่นจะเท่ากับเลขคลื่นของเลเซอร์ (9394.7 cm^{-1}) หักลบด้วยเลขคลื่นสถานะกระตุ้นแรก

ตามทฤษฎีการกระจายแบบโบลซ์มัน (Boltzmann distribution) ได้กล่าวไว้ว่า ณ ที่อุณหภูมิห้อง จะมีโมเลกุลอยู่ที่สถานะพื้นมากกว่าสถานะกระตุ้นอื่น ๆ ที่สูงกว่า (higher vibrational state) ซึ่งเป็นผลให้สเปกตรัมสโตคเด่นชัดกว่าสเปกตรัมแอนติ-สโตค

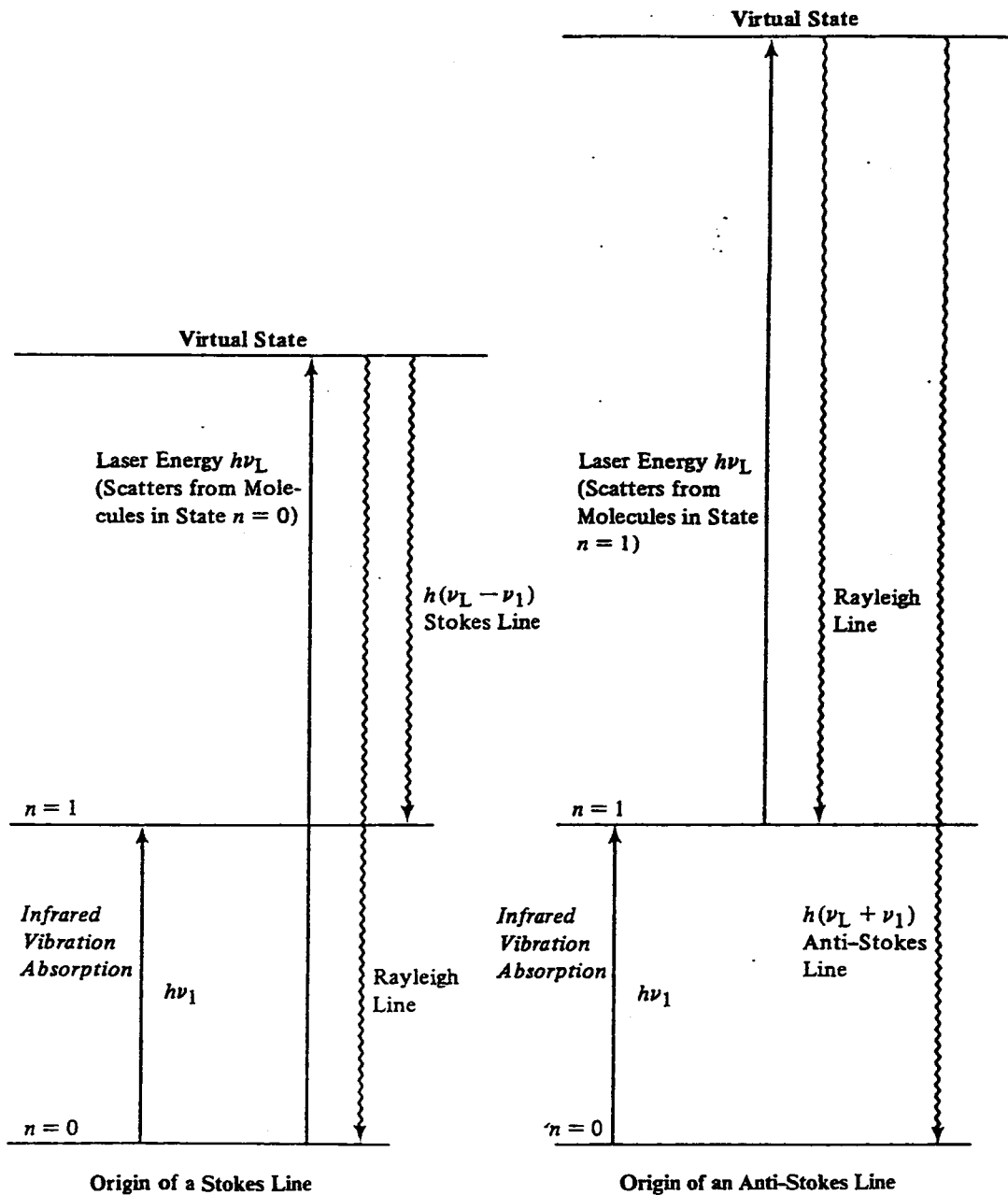


รูปที่ 2-10 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับของพลังงานที่เป็นสาเหตุของการเกิดเส้นสโตคและเส้นแอนติ-สโตค

2.2.4 การกระเจิงแบบเรย์ลี

เนื่องจากการชนแบบยืดหยุ่น ทำให้ไม่มีการสูญเสียพลังงาน ดังนั้นเลขคลื่นจึงเท่ากับเลขคลื่นของเลเซอร์ คือ 9394.7 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 1,064 nm)

การกระเจิงแบบเรย์ลีจะสะท้อนและให้รังสีที่มีความเข้ม สูงกว่าการกระเจิงแบบรามาน ประมาณ 10^{10} เท่า

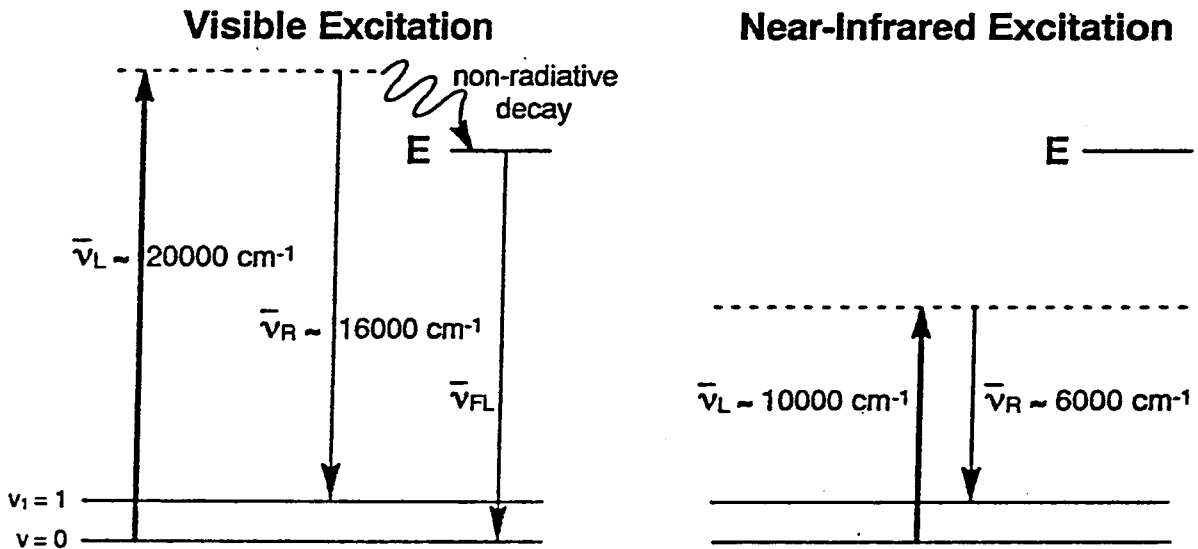


รูปที่ 2-11 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับของพลังงานที่เป็นต้นเหตุของการเกิดเส้นเรย์ลี โดยเปรียบเทียบกับเส้นสโตค และเส้นแอนติ-สโตค

2.2.5 ฟลูออเรสเซนส์ (fluorescence)

เกิดจากการที่เลเซอร์ (เช่น visible laser ที่มีเลขคลื่นประมาณ $20,000 \text{ cm}^{-1}$) มีพลังงานสูงพอที่จะทำให้โมเลกุลไปอยู่ที่สถานะเสมือน ซึ่งอยู่เหนือสถานะกระตุ้นอิเล็กโทรนิค (excited electronic state) จากนั้นโมเลกุลก็จะมาหยุดที่สถานะกระตุ้นอิเล็กโทรนิค และสุดท้ายก็จะตกลงมาที่สถานะพื้น โดยขบวนการฟลูออเรสเซนส์

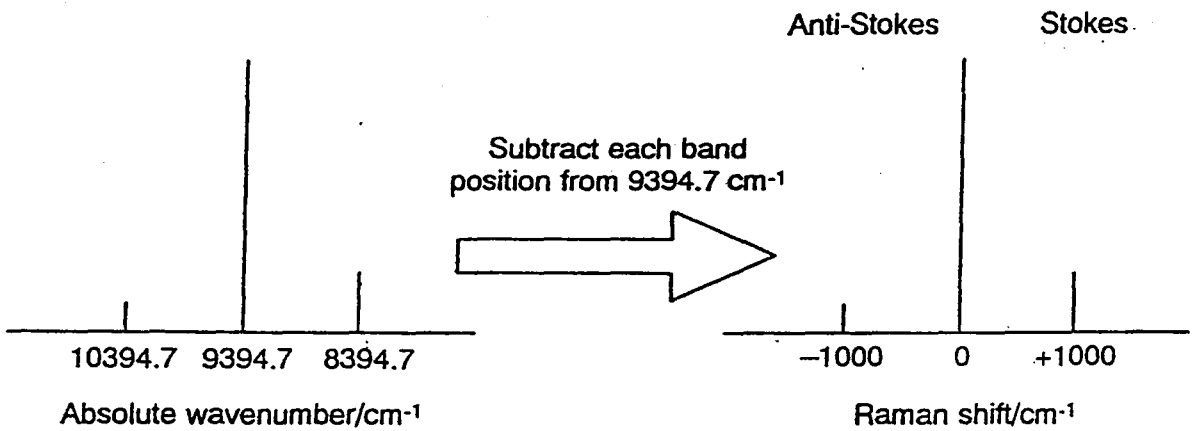
ปกติฟลูออเรสเซนส์ จะมีขนาดความเข้มมากกว่าการกระเจิงแบบรามาน ซึ่งจะไปบดบัง การกระเจิงแบบรามาน เพราะฉะนั้นการใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นสูงชนิดนีโอดีเนียมแย็ก (Nd: YAG) ที่มีเลขคลื่นประมาณ $10,000 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นย่านอินฟราเรดใกล้ (near- Infrared) สามารถลดการเกิดฟลูออเรสเซนส์ได้ แต่ถ้าตัวกลางนั้นมีสถานะกระตุ้นอิเล็กโทรนิคที่ต่ำ ก็ยังคงทำให้เกิดฟลูออเรสเซนส์ได้



รูปที่ 2-12 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับของพลังงานที่เป็นต้นเหตุของการเกิดฟลูออเรสเซนส์ โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ แสงเลเซอร์ในช่วงที่ตามองเห็นกับช่วงอินฟราเรดใกล้

2.2.6 การปรับตำแหน่งเลขคลื่นของรามานสเปกตรัม(Raman-shift spectra)

คือการหักเลขคลื่นของเลเซอร์ ออกจากทุก ๆ จุดของ สเปกตรัมแถบที่มีเลขคลื่น สูงกว่า เส้นที่ถูกกระตุ้น (excited line) เรียกว่า แอนติ-สโตค และแถบที่มีเลขคลื่นต่ำกว่าเรียกว่า สโตค



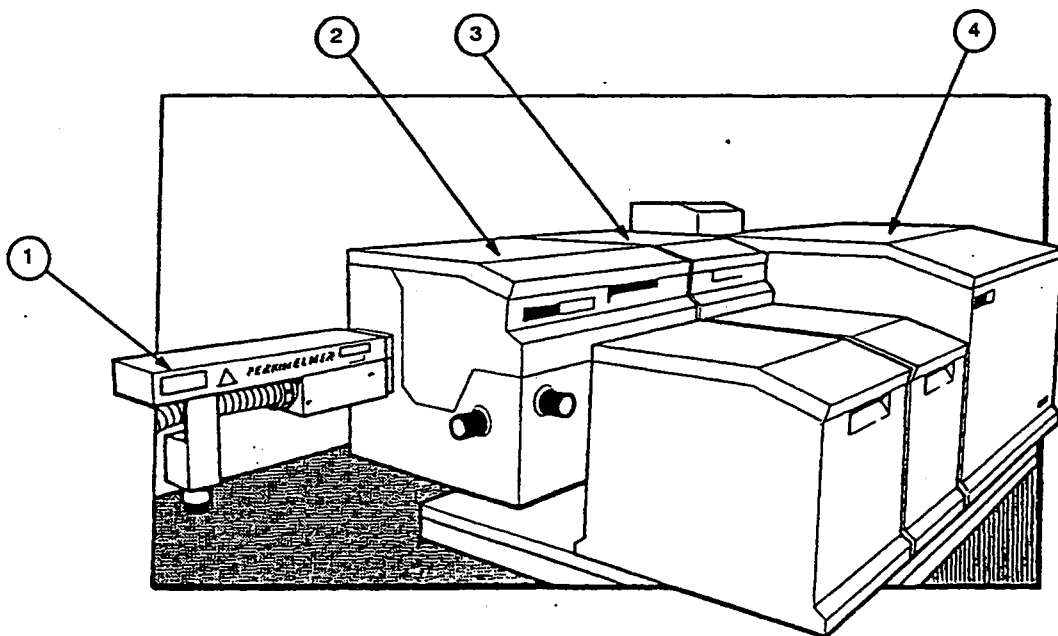
รูปที่ 2-13 แสดงการปรับตำแหน่งเลขคลื่นของรามานสเปกตรัม

2.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโตรมิเตอร์

เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์แบบปกติ (conventional Raman spectrometers) จะใช้หลักการกระจายแสง (dispersion) ของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่สนใจเป็นตัวกำหนด คือการบันทึกค่าความเข้มของแสงต่อความถี่ หรือความยาวคลื่น หรือเลขคลื่น (frequency-domain spectrum) ซึ่งเป็นสเปกตรัมที่ได้จากการวัดที่ความถี่ต่าง ๆ กันทีละครั้งในช่วงระยะเวลาหนึ่ง แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนามาเป็นการวัดความเข้มของแสงหรือกำลังของแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง เทียบกับเวลา (Time-Domain Spectrum) หรือเรียกว่าฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform spectroscopy) วิธีนี้จะเป็นการวัดที่ความถี่ต่าง ๆ กันพร้อมกันหมด

2.3.1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์

ในโครงการพิเศษนี้จะใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มรามานสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น 2000R บริษัท Perkin Elmer ส่วนประกอบหลักของเครื่องมีดังต่อไปนี้



หมายเลข 1 เลเซอร์ (laser)

หมายเลข 2 ส่วนที่เกี่ยวกับสารตัวอย่าง (sample compartment)

หมายเลข 3 บริเวณตรวจวัดการกระเจิงแบบรามาน (Raman detector area)

หมายเลข 4 ส่วนที่เกี่ยวกับแสง (optical module)

รูปที่ 2-14 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง FT-Raman รุ่น 2000R บริษัท Perkin Elmer

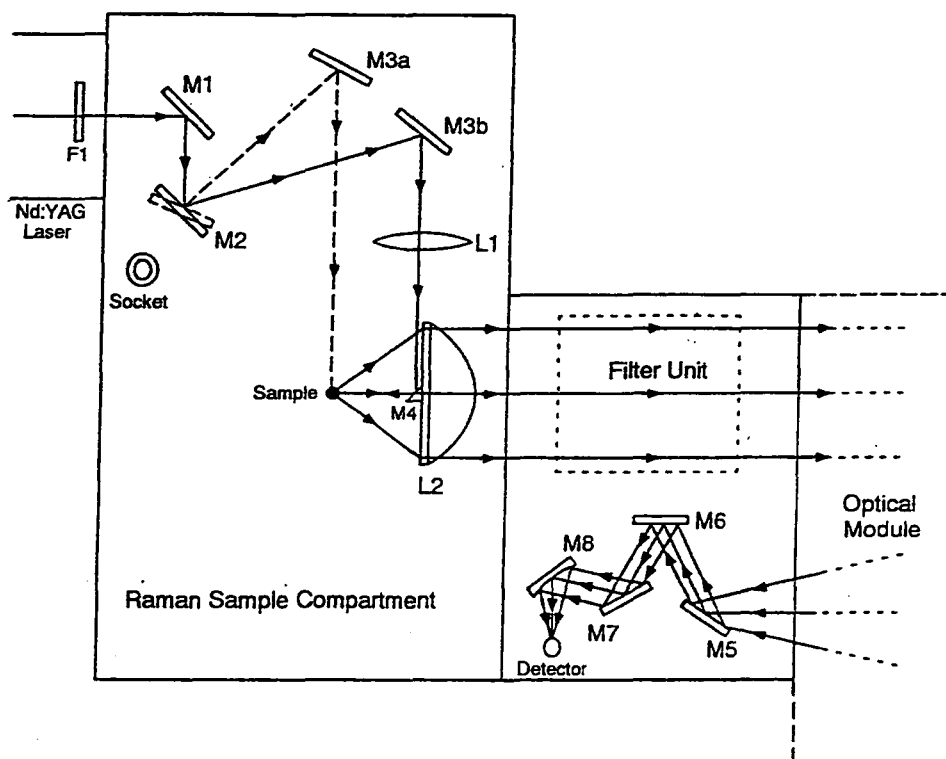
2.3.1.1 เลเซอร์

เลเซอร์หมายเลข 1 เป็นส่วนที่อยู่ติดกับส่วนที่ใส่สารตัวอย่าง ดังรูปที่ 2-14 และ 2-15 จะมีระบบควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์โดยอาศัยหลักการการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำ

ตัวกลางของเลเซอร์ (lasing medium) คือ ผลึกของอิตเรียมอลูมิเนียมเนียมการ์เนต (Yttrium Aluminium Garnet) ที่มีไอออนของนีโอดีเนียม (triple Neodymium, Nd^{3+}) เข้าแทนที่ แหล่งกำเนิดของการกระตุ้นคือหลอดคริปทอล (Krypton) ที่มีความดันสูง ความยาวคลื่นของเลเซอร์อยู่ในช่วงอินฟราเรดใกล้ คือ 1,064 nm

ลำแสงเลเซอร์จะผ่านตัวกรองสัญญาณพลาสมา F_1 (plasma filter) ก่อนที่จะเข้าสู่ส่วนที่เกี่ยวข้องกับสารตัวอย่าง (Raman sample compartment) ตัวกรองสัญญาณนี้จะกำจัดเส้นพลาสมา (plasma lines) ซึ่งแม้จะอ่อนกว่าเส้นเลเซอร์ (lasing line) แต่ก็อาจจะทำให้เกิดการแทรกสอดในสเปกตรัมของรามาน (Raman spectrum)

เส้นพลาสมาเกิดจากการปลดปล่อยด้วยตนเอง (spontaneous emissions) ของ Nd: YAG และจากหลอดคริปทอน (Krypton pumping lamp)

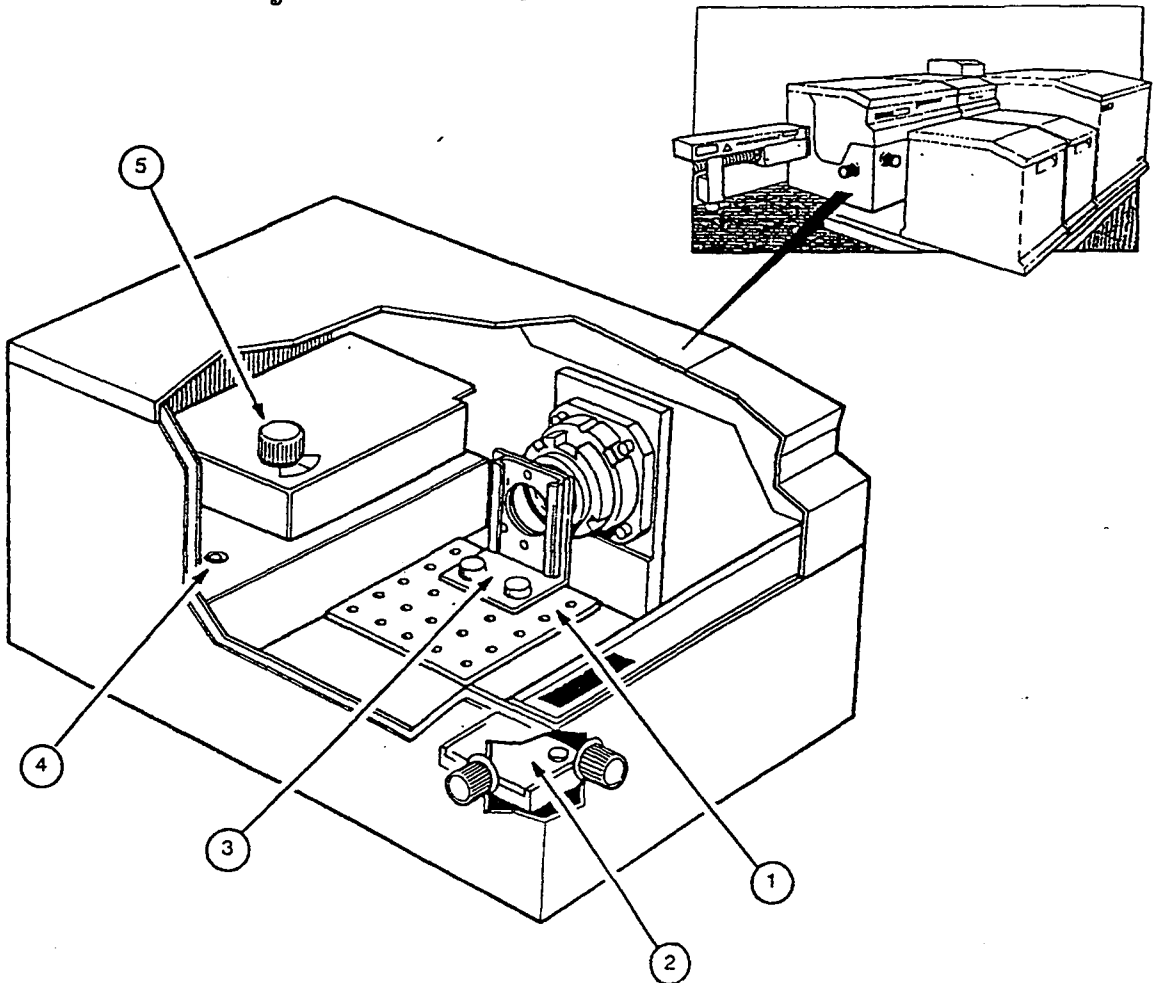


รูปที่ 2-15 แสดงทางเดินของแสงภายในเครื่อง FT-Raman รุ่น 2000 R บริษัท Perkin Elmer

2.3.1.2 ส่วนที่เกี่ยวข้องกับสารตัวอย่าง

กระจกเงา M_1 , M_2 , M_3 , เลนส์ L_1 (สำหรับการยิงแสงแบบ 180°) และกระจกปริซึม M_4 (prism mirror) จะทำหน้าที่จัดทางเดินของแสงและส่งผ่านแสงไปยังสารตัวอย่าง

กระจก M_2 สามารถปรับหมุนได้ ทำให้ได้การยิงแสงแบบ 90° และ 180° ในรูปที่ 2-15 ตำแหน่งของกระจก M_2 จะถูกควบคุมโดยปุ่มปรับหมายเลข 5 ดังรูปที่ 2-16 ในงานทดลองของโครงการงานพิเศษนี้จะใช้การยิงแสงแบบ 180° ส่งไปยังสารตัวอย่าง ซึ่งเหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ และง่ายต่อการปรับแนว



หมายเลข 1 แทนวางที่จับสารตัวอย่าง (sample stage)

หมายเลข 2 ช่องอรรถประโยชน์ (utility port)

หมายเลข 3 แทนวางที่จับสารตัวอย่าง (sample slide holder)

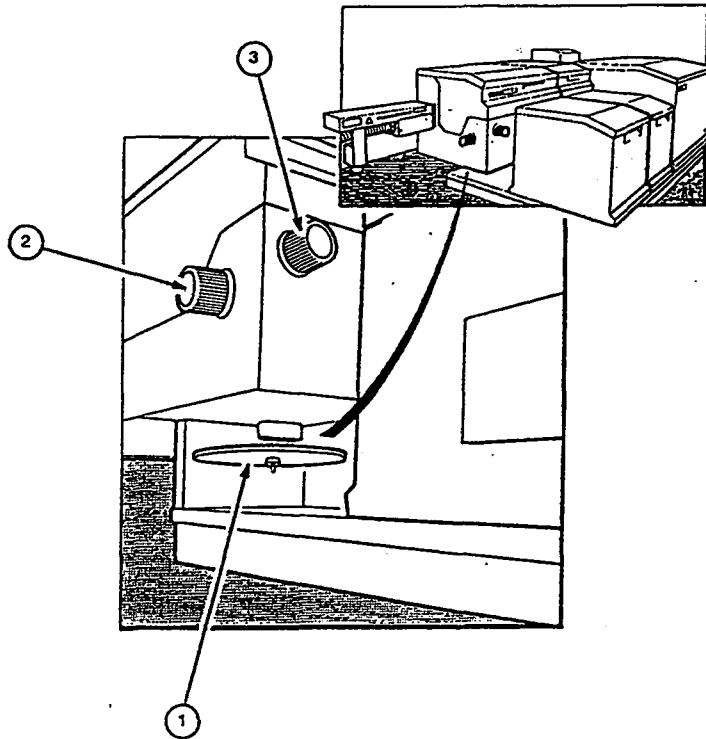
หมายเลข 4 ช่องสำหรับสายเคเบิลหรือแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง (socket for cable for reference source)

หมายเลข 5 ปุ่มสำหรับเลือกการยิงแสง (selection knob for excitation optics 90° และ 180°)

รูปที่ 2-16 แสดงภาพภายในของส่วนที่เกี่ยวข้องกับสารตัวอย่าง

1) แทนวางที่จับสารตัวอย่าง

แทนวางที่จับสารตัวอย่างหมายเลข 1 ลักษณะดังรูปที่ 2-16 มีขนาด $75 \times 75 \text{ mm}^2$ สามารถปรับตำแหน่งได้ทั้ง 3 ทิศทาง ตามแกน X, Y และ Z การปรับแต่ละทิศทางจะถูกควบคุมโดยปุ่มปรับหมายเลข 2 และ 3 และล้อหมายเลข 1 ดังรูปที่ 2-17



หมายเลข 1 ล้อสามารถปรับแนวตั้ง (height adjustment wheel)

หมายเลข 2 ปุ่มสำหรับปรับแนวนอน (lateral adjustment knob)

หมายเลข 3 ปุ่มสำหรับปรับโฟกัส (Focus adjustment knob)

รูปที่ 2-17 แสดงตำแหน่งปุ่มและล้อที่ใช้สำหรับปรับแทนวางที่จับสารตัวอย่าง

2) อุปกรณ์พิเศษสำหรับบรรจุสารตัวอย่าง (sampling accessories)

อุปกรณ์บรรจุสารตัวอย่างมีอยู่หลายแบบ เหมาะสำหรับวัสดุทดสอบในสถานะต่าง เช่น วัสดุที่เป็นผงแข็ง ของแข็ง ของเหลว หรือมีลักษณะเป็นฟิล์ม เป็นต้น

3) ระบบล็อก (interlock)

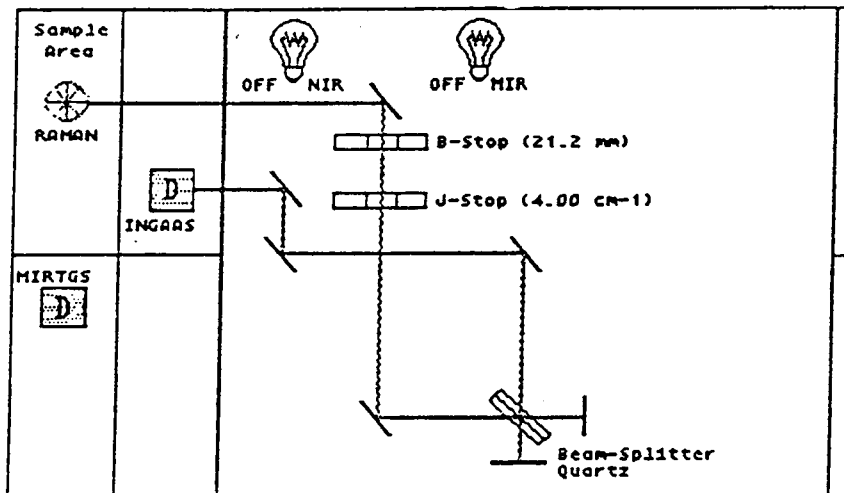
ระบบล็อกนี้ช่วยป้องกันอันตรายแก่ผู้ใช้ โดยจะทำหน้าที่ตัดแสงทันที ในกรณีที่ฝาของ ส่วนที่เกี่ยวข้องกับสารตัวอย่างถูกเปิดออก

2.3.1.3 หน่วยกรองสัญญาณ

รังสีของรามานที่กระเจิงออกมาจะถูกรวบรวมโดยเลนส์ L_2 ดังรูปที่ 2-15 และผ่านเข้าสู่หน่วยกรองสัญญาณ ซึ่งจะมีหน้าที่กำจัดการกระเจิงแบบเรย์ลีที่มีความเข้มสูง (รังสีที่มีความยาวคลื่น 1,064 nm เกิดจากรังสีที่เกิดจากการชนแบบยืดหยุ่น)

2.3.1.4 ส่วนที่เกี่ยวข้องแสง

แสงรามานที่ถูกกรองสัญญาณ จะผ่านเข้าไปในส่วนที่เกี่ยวข้องแสงทางหน้าต่าง จากนั้นจะถูกโฟกัสลงบน J-Stop โดยกระจกพาราโบลอยด์ (paraboloid mirror) และจะเข้าสู่ส่วนที่เป็นอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (interferometer) ดังรูปที่ 2-18



รูปที่ 2-18 แสงรามานที่ถูกกรองสัญญาณ เข้าสู่ส่วนที่เกี่ยวข้องแสง

2.3.1.5 ตัวตรวจวัดสัญญาณ

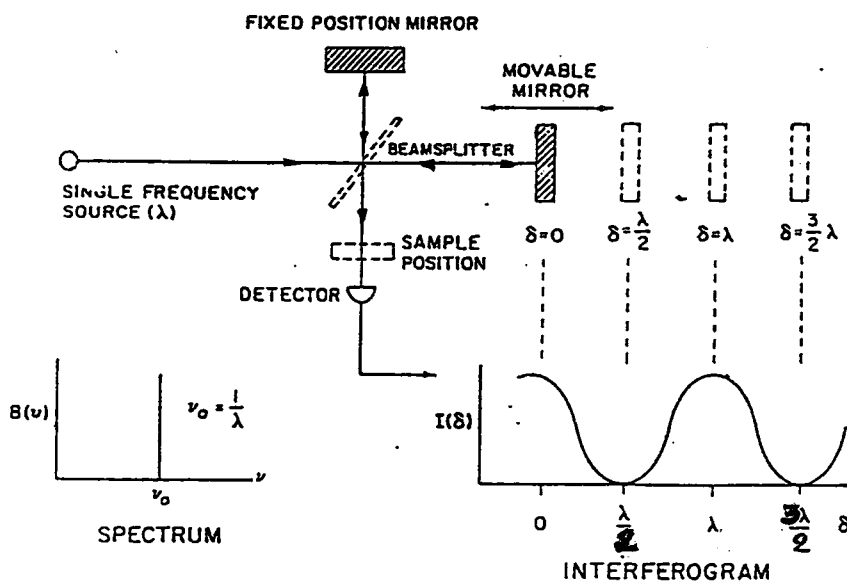
จากรูปที่ 2-15 แสงจะผ่านกระจกกระนาบ M_5 , M_6 , M_7 และกระจกวงรี M_8 เข้าสู่ตัวตรวจวัดสัญญาณชนิดอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) ซึ่งมีความไวในช่วงของอินฟราเรดใกล้ และสามารถใช้ได้ทั้งที่อุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (liquid nitrogen temperature) ทำให้ความไวของตัวตรวจวัดสัญญาณดีเทคเตอร์มากขึ้น และสิ่งรบกวน (noise) ของตัวตรวจวัดสัญญาณลดลง แต่ช่วงทำงาน (working range) จะลดลง 600 cm^{-1} ด้วย

อุณหภูมิห้อง	$3600\text{-}200\text{ cm}^{-1}$	Raman shift
77 K	$3000\text{-}200\text{ cm}^{-1}$	Raman shift

2.3.2 หลักการของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

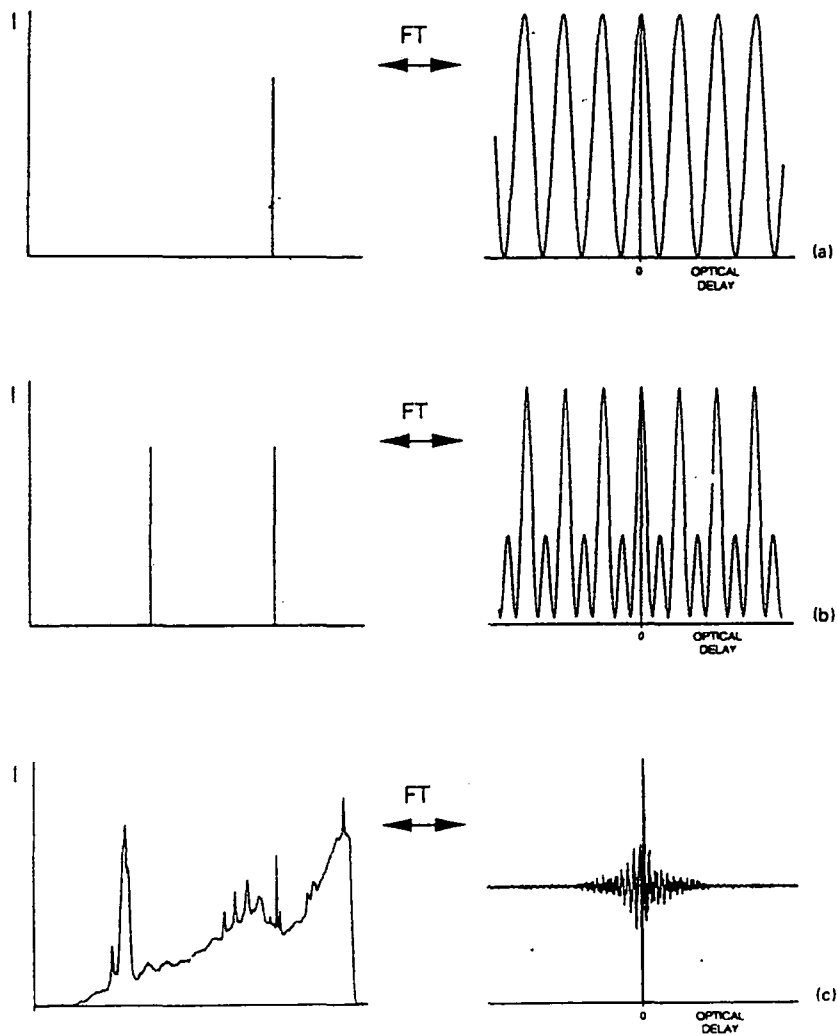
ลำแสงจากแหล่งกำเนิดจะเข้าสู่อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ และจะถูกแยกออกเป็นสองลำแสงที่มีความเข้มเท่า ๆ กัน (ในอุดมคติ) ด้วยผลึกแยกลำแสง โดยลำแสงหนึ่งจะเดินทางในระยะทางคงที่ ส่วนอีกลำแสงจะเดินทางในระยะทางที่เปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของกระจก (moving mirror) จากนั้นลำแสงทั้งสองจะมารวมกัน

ในกรณีที่ลำแสงทั้งสองนั้นเดินทางเป็นระยะทางเท่ากันจะเกิดการแทรกสอดที่เสริมกัน (constructive interference) คือความล่าช้า (delay) เท่ากับศูนย์ หรือเป็นจำนวนเต็มทีเท่ากัน ทำให้สัญญาณที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดสัญญาณมีค่าสูงสุด แต่ถ้าลำแสงทั้งสองนั้นเดินทางด้วยระยะที่ไม่เท่ากันจะเกิดการแทรกสอดที่หักล้างกัน (destructive interference) คือความล่าช้าเท่ากับ $n\lambda/2$ โดยที่ n เป็นจำนวนเต็ม ดังรูปที่ 2-19



รูปที่ 2-19 แสดงหลักการทำงานของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

เมื่อลำแสงความยาวคลื่นเดียวผ่านเข้าไปในอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ และความล่าช้าทางแสง (optical delay) นั้นเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ จะทำให้สัญญาณที่ตรวจวัดได้เป็นคลื่นโคไซน์ (cosine wave) ดังรูปที่ 2-20 ก และถ้าสัญญาณเกิดจากแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นเดียว 2 แหล่งกำเนิด ซึ่งมีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันผ่านเข้าไปในอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ เป็นผลให้เกิดการรวมกันของสัญญาณทั้งสอง ดังรูป 2-20 ข และถ้าเพิ่มขึ้นเป็นแหล่งกำเนิดแสงหลายความยาวคลื่น สัญญาณจะเป็นดังรูป 2-20 ค เส้นกราฟนี้เรียกว่าอินเตอร์เฟอโรแกรม (interferogram)



รูปที่ 2-20 แสดงอินเตอร์เฟอโรแกรม

อินเตอร์เฟอโรแกรมนั้นเป็นผลรวมของคลื่นโคไซน์ทุก ๆ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงหลายความยาวคลื่น โดยปัจจัยที่มีผลต่อความเข้ม คือสัญญาณที่เกิดจากการแปรเปลี่ยนความล่าช้าทางแสง เมื่อลำแสงความยาวคลื่นเดียวมีความยาวคลื่นเท่ากับ λ และความเข้ม I ผ่านเข้าไปยังอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ดังสมการ

$$I(x) \propto I\lambda \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

เมื่อ $I\lambda$ คือ ความเข้มแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ λ
 x คือ ความล่าช้าทางแสง

ดังนั้นอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแสงหลายความยาวคลื่น ก็คือ

$$I(x) \propto \sum_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} I\lambda \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

ดังนั้นสรุปได้ว่าอินเตอร์เฟอโรแกรมเป็นฟังก์ชันระหว่างความเข้มกับความล่าช้า โดยที่กระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (movable mirror) จะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่สม่ำเสมอ ดังนั้นอินเตอร์เฟอโรแกรม จึงสามารถแสดงฟังก์ชันของความเข้มกับเวลาได้ด้วย

จากนั้นจะมีการเปลี่ยนอินเตอร์เฟอโรแกรมซึ่งเทียบกับเวลา (time domain) ไปเป็นสเปกโตรแกรม (spectrogram) ซึ่งเทียบกับความถี่ (frequency domain) โดยใช้เทคนิคฟูรีเยร์ทรานสฟอร์ม (fourier transform) ดังนั้นอินเตอร์เฟอโรแกรม และสเปกตรัมแห่ง (sticle spectra) จึงเป็นฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มซึ่งกันและกัน

2.4 หัววัดเส้นใยนำแสง (remote optical fibre head sensor)

หัววัดเส้นใยนำแสงสำหรับเครื่อง FT-Raman (fibre-optic Raman sensors) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องดังกล่าวในหลาย ๆ ด้าน เช่น ใช้ติดตามปฏิกิริยาของสารเคมี ณ เวลาต่าง ๆ ใช้กับสารตัวอย่างที่ไม่สามารถยกหรือเคลื่อนย้ายได้ และในสภาวะแวดล้อมที่เป็นอันตราย

แต่จากการวิเคราะห์และทดลอง ยังพบข้อจำกัดจากการแทรกสอดของรามานสเปกตรัมที่สูงของเส้นใยนำแสง เนื่องจากการสะท้อนกลับหมดของลำแสงเลเซอร์ภายในเส้นทางเดิน ทำให้เกิดการกระเจิงแบบเรย์ลีที่มีความเข้ม (intense Rayleigh scattering) และเกิดการกระเจิงแบบรามานของเส้นใยนำแสง ซึ่งจะเป็นผลรบกวนต่อสเปกตรัม

การพัฒนาของหัววัดเส้นใยนำแสง (remote Raman analytical development)

2.4.1 หัววัดเส้นใยนำแสงแบบเดี่ยว (single fibre)

เป็นการใช้เส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียว ให้ทำหน้าที่ทั้งในการส่งลำแสงเลเซอร์ และรับแสงที่กระเจิงจากสารตัวอย่างในทิศทางที่สวนทางกัน วิธีนี้จะทำให้รามานสเปกตรัมของแก้วที่ใช้ทำเส้นใยนำแสงครอบคลุมเป็นบริเวณที่กว้างและมีความเข้มสูงในสเปกตรัมของสารที่ตรวจสอบได้ และยังประสบกับปัญหาการสูญเสียการส่งผ่านแสงที่สูง (ค้นคว้าเมื่อ ค.ศ. 1988 โดย E.N. Lewis, V.F. Kalasinsky และ I.W. Levin)

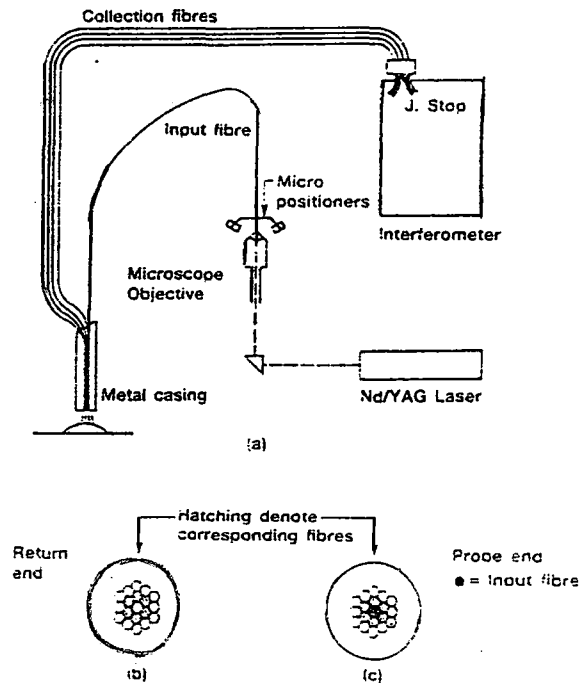
2.4.2 หัววัดเส้นใยนำแสงแบบคู่ (dual fibres)

เป็นการใช้เส้นใยนำแสง 2 เส้นแยกกัน โดยเส้นหนึ่งจะนำลำแสงเลเซอร์ไปยังสารตัวอย่าง และอีกเส้นหนึ่งจะรวบรวมแสงที่กระเจิงจากสารตัวอย่าง วิธีนี้ยังไม่สามารถกำจัดสเปกตรัมของเส้นใยนำแสงออกได้อย่างสมบูรณ์ คือ แสงรามานที่เกิดการกระเจิงภายในเส้นใยนำแสงเมื่อชนกับสารตัวอย่างแล้ว จะไปรวมกับข้อมูลที่วิเคราะห์ได้

ในทำนองเดียวกัน ในส่วนการกระเจิงแบบเรย์ลีก็จะเสริมโดยแพร่เข้าไปในแสงที่กระเจิง ทำให้มีความเข้มสูงพอที่จะเกิดผลกระทบต่อสเปกตรัมของรามาน (ค้นคว้าเมื่อ ค.ศ. 1988 โดย D.D. Archibald, L.T. Len และ D.E. Hanigs)

2.4.3 หัววัดเส้นใยนำแสงแบบหลายเส้น (fibre-optic probes)

การพัฒนาหัววัดเส้นใยนำแสงในขั้นนี้จะให้เส้นใยนำแสงจำนวน 19 เส้น โดยเส้นที่อยู่ตรงกลางจะนำแสงเลเซอร์ไปยังสารตัวอย่าง และอีก 18 เส้นที่อยู่ล้อมรอบจะทำหน้าที่รวมแสงที่กระเจิงแบบรามานจากสารตัวอย่าง ซึ่งจะมีการทดลองใช้กับสารตัวอย่างในอุตสาหกรรม โดยใช้เส้นใยนำแสงที่แตกต่างกันจาก 2 บริษัท คือบริษัท Quartz et Selice และบริษัท Corning เส้นใยนำแสงที่ใช้เป็นชนิดที่มีหมูไฮดรอกซีต่ำ [3]



รูปที่ 2-21 แสดงการจัดเรียงอุปกรณ์ต่าง ๆ และการจัดเรียงตัวของเส้นใยนำแสง

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- หัววัดเส้นใยนำแสงแบบหลายเส้น ยาว 4 เมตร จำนวน 19 เส้น แต่ละเส้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 μm มีขนาดการเปิดรับให้แสงผ่าน (Numerical Aperture, NA) = 0.21 จากบริษัท Quartz et Selice และบริษัท Corning ชนิดที่มีหมูไฮดรอกซีต่ำ

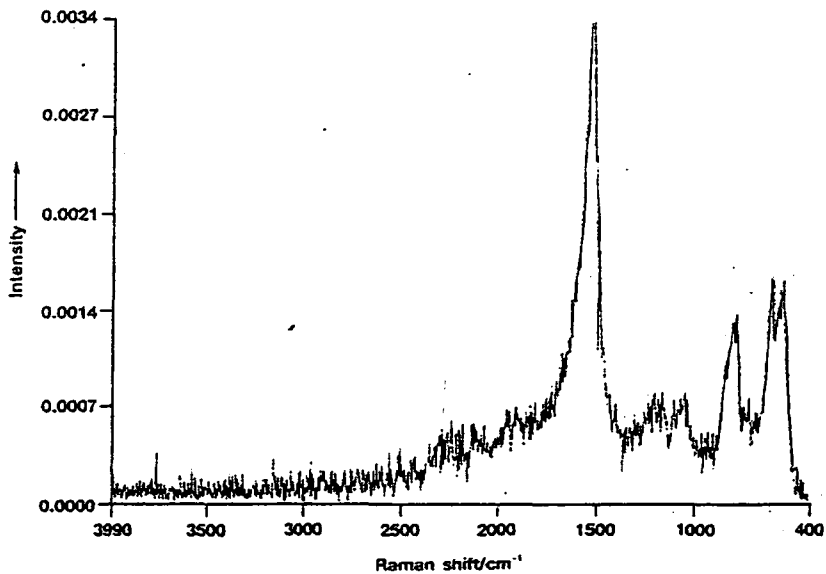
- เลเซอร์ Nd: YAG ของบริษัท Spectron สามารถใช้กำลังสูงถึง 5 วัตต์ แต่ในการทดลองใช้ไม่เกิน 1 วัตต์

- ตัวปรับตำแหน่งตามแนวแกน X,Y และ Z ทำหน้าที่ช่วยนำแสงเลเซอร์เข้าไปในเส้นใยนำแสง (launching) ทำให้นำแสงเข้าไปในได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า 90%

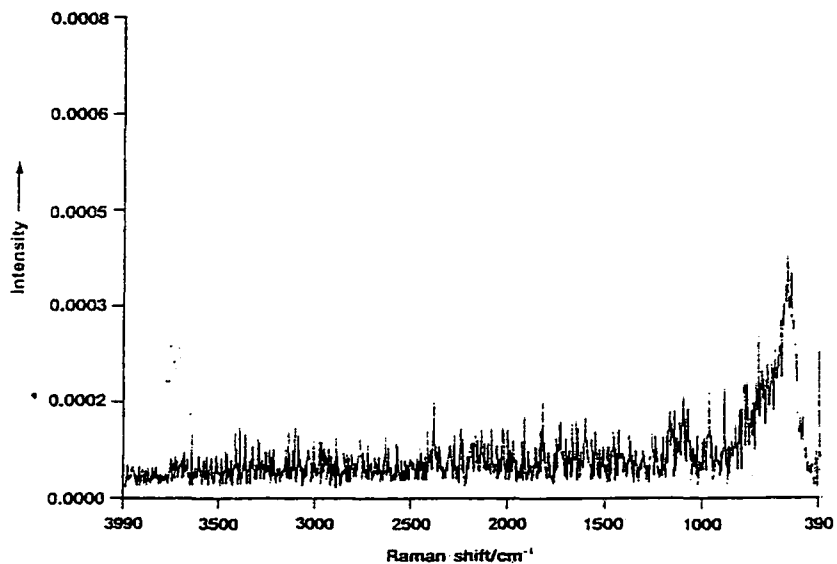
- เครื่อง FT-Raman รุ่น 1700 X บริษัท Perkin- Elmer

2. ผลการทดสอบและการวิจารณ์ผล

เมื่อนำเส้นใยนำแสงของทั้งสองบริษัทมาทดสอบกับเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ จะทำให้เกิดสเปกตรัม ดังรูปที่ 2-22 และ 2-23



รูปที่ 2-22 แสดงสเปกตรัมของเส้นใยนำแสงจากบริษัท Quartz et Selice โดยใช้ความเข้ม 200 mW ที่ความยาวคลื่น 1,064 nm



รูปที่ 2-23 แสดงสเปกตรัมของเส้นใยนำแสงจากบริษัท Coming (ที่สภาวะเดียวกัน)

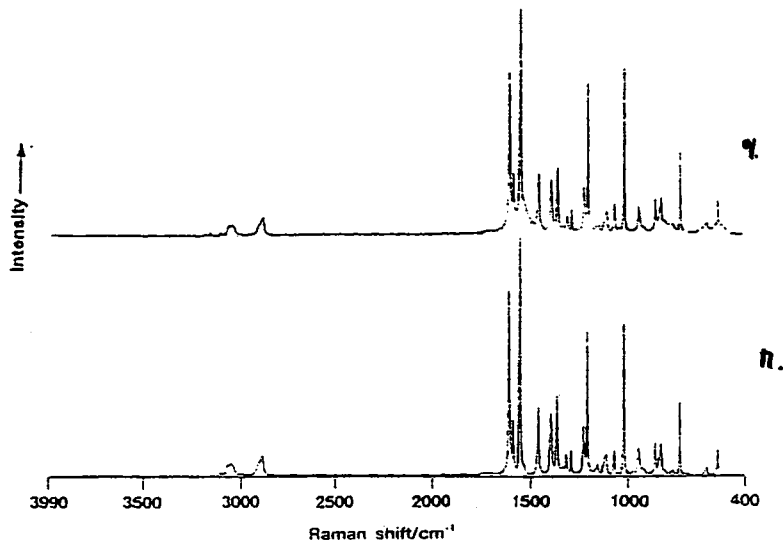
3. ผลสรุป

จากรูป 2-22 และ 2-23 พบว่า เส้นใยนำแสงจากบริษัท Corning จะมีความเข้มของสเปกตรัม (background spectrum) ต่ำกว่าของบริษัท Quartz et Selice คือจะมีพีค (peak) ที่ชัดเจนเพียงพีคเดียวคือที่ตำแหน่ง 557 cm^{-1} ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากควอทซ์บริสุทธิ์

สำหรับเส้นใยนำแสงจากบริษัท Quartz et Selice จะมีพีคที่เด่นชัดหลายจุด เช่น ที่ $537, 595, 797, 1047, 1191$ และ 1531 cm^{-1} และพีคที่มีความเข้มสูงสุดที่พบคือ 1531 cm^{-1} ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากหมู่ไฮดรอกซีที่หลงเหลืออยู่ในเส้นใยนำแสง

เพราะฉะนั้นเส้นใยนำแสงจากบริษัท Corning มีความเหมาะสมในการนำมาทำหัววัดเส้นใยนำแสงมากกว่า

การทดลองและทดสอบหัววัดเส้นใยนำแสงแบบหลายเส้นยังมีอยู่อย่างต่อเนื่อง โดยได้มีผู้ทดสอบใช้หัววัดเส้นใยนำแสงแบบหลายเส้นในสภาวะต่าง ๆ

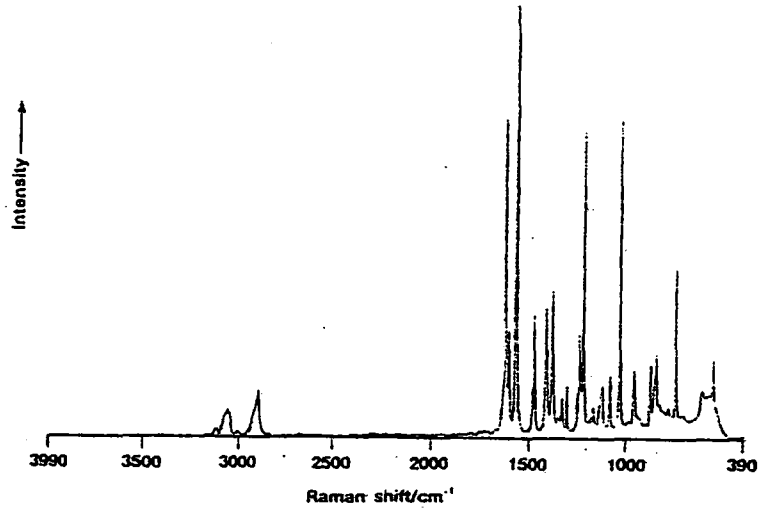


ก ใช้ระบบเลนส์รวมแสง ภายในเครื่องรามานสเปกโตรสโกปี

ข ใช้หัววัดเส้นใยนำแสงแบบหลายเส้น ของบริษัท Quartz et Selice

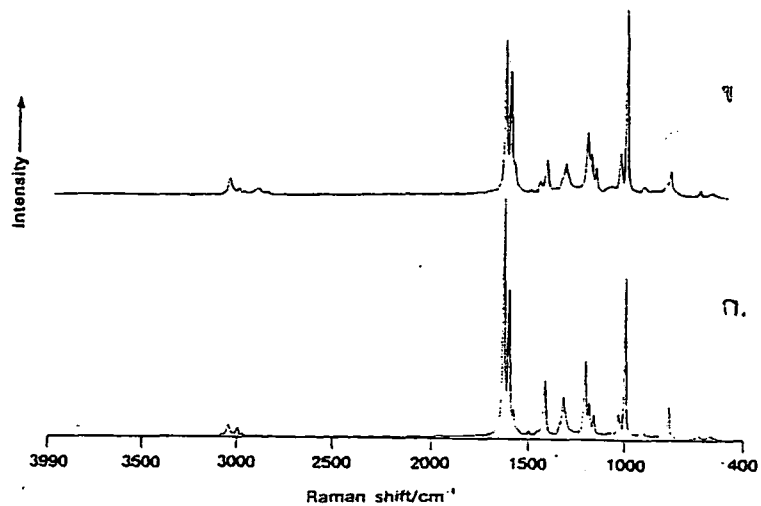
รูปที่ 2-24 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมของ indene เมื่อใช้หัววัดเส้นใยนำแสงและใช้ระบบรวมแสง

จากสเปกตรัมที่เกิดขึ้นพบว่า ในการวิเคราะห์สาร indene ด้วยเครื่อง FT-Raman โดยใช้หัววัดเส้นใยนำแสง จะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบที่ใช้เลนส์รวมแสงเล็กน้อย เนื่องจากสเปกตรัมของเส้นใยนำแสงมีผลกระทบต่อข้อมูล



รูปที่ 2-25 สเปกตรัมของ indene เมื่อใช้หัววัดเส้นใยนำแสงแบบหลายเส้นของบริษัท Corning (สภาวะเดียวกับการทดสอบก่อนหน้านี้)

เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 2-25 และรูปที่ 2-24 จะพบจุดที่แตกต่างกันคือพีคที่ตำแหน่ง 550 cm^{-1} จากสเปกตรัมรูป 2-24 และรูปที่ 2-25 สามารถสรุปได้ว่า การเลือกเส้นใยนำแสงให้เหมาะสมมีความสำคัญมาก



ก) สไตรีน

ข) ปฏิริยาพอลิเมอไรเซชันของสไตรีน

รูปที่ 2-26 แสดงสเปกตรัมของการใช้หัววัดเส้นใยนำแสงแบบหลายเส้น ในการตรวจสอบ (ให้สภาวะเช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น)

รามานสเปกตรัมของสไตรีน ดังรูปที่ 2-26ก และส่วนหนึ่งของตัวอย่างที่กำลังเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ดังรูปที่ 2-26ข พบว่ามีจุดแตกต่างของทั้งสองสเปกตรัมคือที่ตำแหน่ง $1,640\text{ cm}^{-1}$ แสดงให้เห็นว่า เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และสามารถตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ของพอลิเมอร์ในมอนอเมอร์ได้

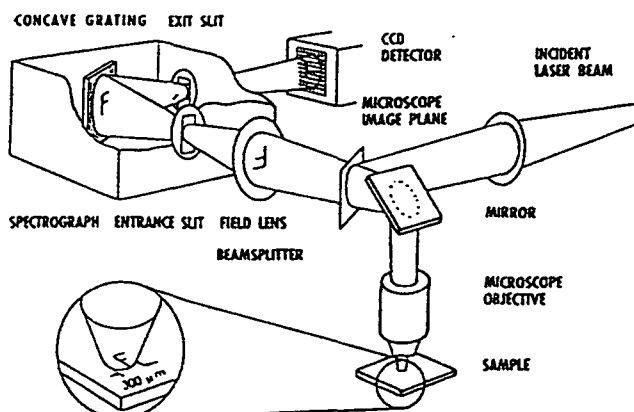
จากการทดลองทั้งหมดข้างต้น แสดงให้เห็นว่าหัววัดเส้นใยนำแสงแบบหลายเส้นสามารถใช้งานได้ดีพอสมควร แต่ยังมีหลายจุดที่ต้องคำนึงถึง และต้องได้รับการปรับปรุง เช่น ถ้าเส้นใยนำแสงที่ใช้มีความยาวมาก จะต้องเป็นชนิดที่มีคุณภาพสูง โดยเฉพาะจะต้องมีหมู่ไฮดรอกซิลบนซิลิกาที่ต่ำ เพราะจะดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดใกล้ และจุดเชื่อมต่อระหว่างแสงรามานที่กระเจิงกับอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ต้องมีประสิทธิภาพ

2.4.4 หัววัดเส้นใยนำแสงแบบคอนโฟคอล

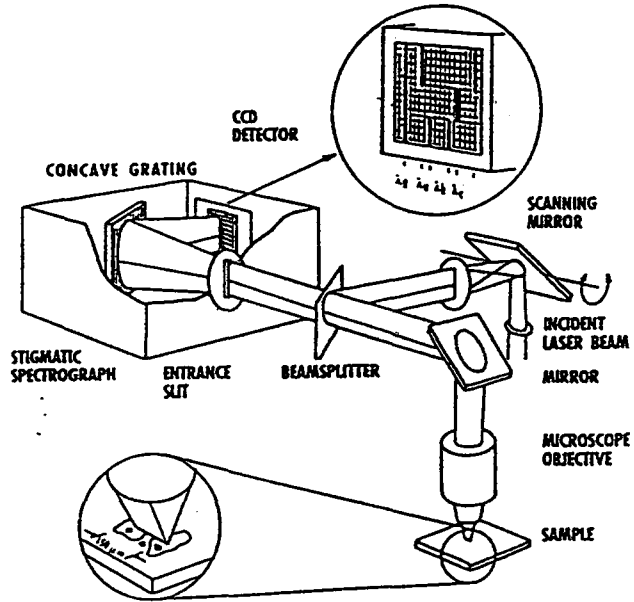
เป็นการพัฒนาขั้นล่าสุดของหัววัดเส้นใยนำแสง โดยจะอาศัยหลักการ confocal microscopy มาประยุกต์

2.4.4.1 หลักการกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล (confocal microscopy)

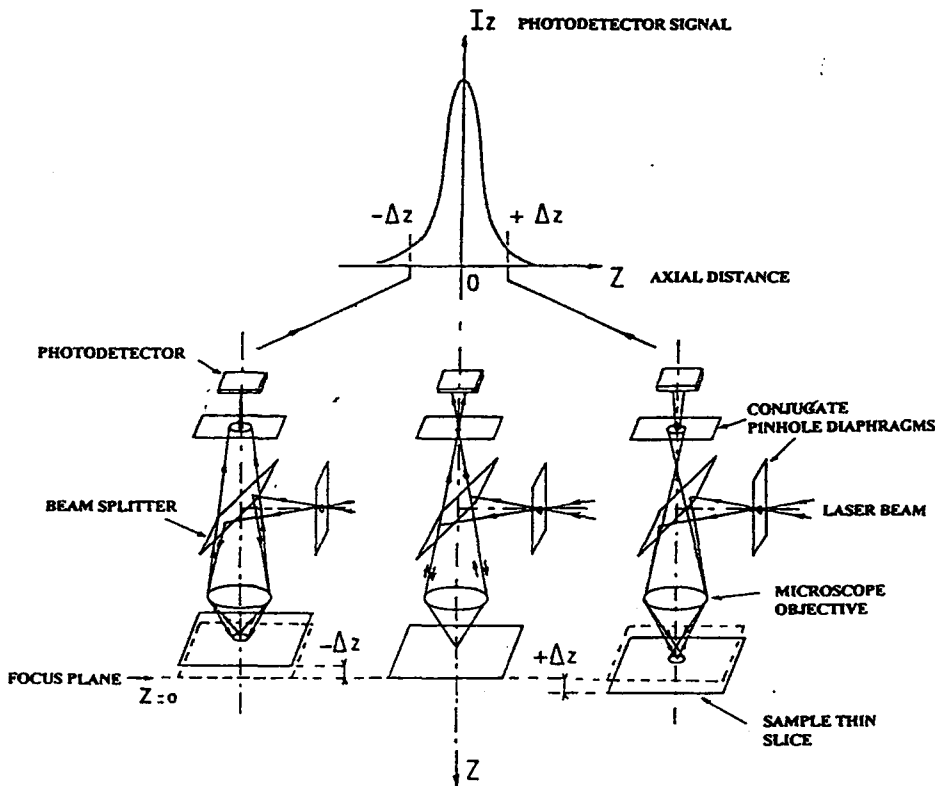
เทคนิคหลักการกล้องจุลทรรศน์แบบปกติ (conventional microscope) ดังรูปที่ 2-27 และ 2-28 จะมีลักษณะการฉายแสงและสังเกตผลที่ได้ในแนวเดียวกันแต่ทิศทางสวนทางกัน แต่เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล จะมีอุปกรณ์พิเศษเพิ่มเติมที่มีลักษณะเป็นแผ่นเปิดช่องรับแสงขนาดเล็ก (conjugate pinhole diaphragms) ซึ่งมีหน้าที่กำจัดช่วงที่อยู่นอกโฟกัส (out-of-focus zone) ดังภาพที่ 2-29 ทำให้กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลมีข้อดี คือมีความสามารถในการแยกได้ดีขึ้น (depth discrimination)



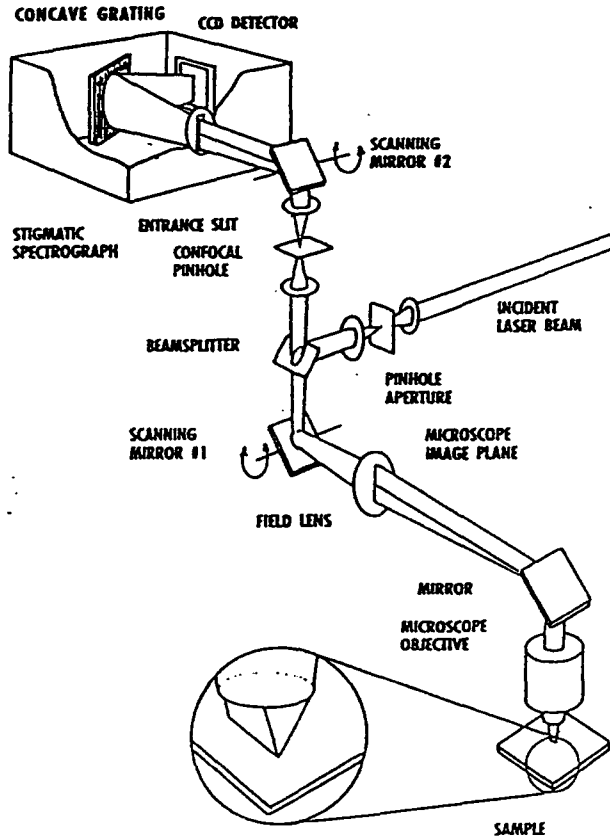
รูปที่ 2-27 แสดงกล้องจุลทรรศน์ที่มีการฉายแสงแบบวงกลม



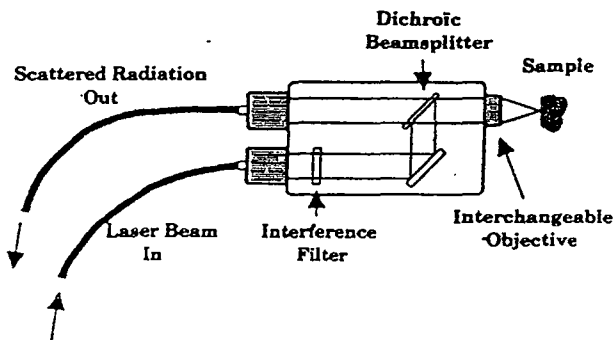
รูปที่ 2-28 แสดงกล้องจุลทรรศน์ที่มีการฉายแสงแบบเส้น



รูปที่ 2-29 แสดงหลักการของกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอลและความสามารถในการแยก



รูปที่ 2-30 แสดงกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล



รูปที่ 2-31 แสดงโครงสร้างของหัววัดเส้นใยนำแสง

2.4.4.2 ส่วนประกอบของหัววัดเส้นใยนำแสง

1) ตัวกรองสัญญาณที่แคบ (narrow band interference filter)

ทำหน้าที่กำจัดแสงรบกวนที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านเส้นใยนำแสง เพื่อให้ได้ลำแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic laser)

2) เลนส์

3) ผลักแยกลำแสง

2.5.4.3 ตัวแปรที่ต้องคำนึงถึง

ตัวแปรสำคัญที่จะต้องนำมาพิจารณามี 2 ตัวคือ

1) ระยะทางการทำงาน (working distance, W_d)

คือ จะต้องคำนึงถึงปริมาตรสารตัวอย่างที่จะวัดเส้นใยนำแสง และตำแหน่งของหัววัดเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นอันตราย เช่น มีการกักกร่อน มีความดันสูง หรือที่มีอุณหภูมิสูงมาก

2) มุมเปิดรับแสง (numerical aperture, NA)

เป็นตัวกำหนดความสามารถในการโฟกัสลำแสงเลเซอร์ไปยังสารตัวอย่างที่มีปริมาตรน้อย และกำหนดมุมที่สามารถจะรับแสงรบกวนที่กระเจิง

การออกแบบหัววัดเส้นใยนำแสงในโครงการพิเศษนี้ จะมีลักษณะเหมือนเทคนิคของกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล ทางออกของแสงเลเซอร์และทางเข้าของแสงรบกวนที่กระเจิง จะเปรียบเหมือนกับแผ่นเปิดช่องรับแสงขนาดเล็ก (confocal diaphragms) ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการแยกของสเปกตรัมได้ดีขึ้น

บทที่ 3

การวิจัยและการดำเนินงาน

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มรามานสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
รุ่น 2000 FT-Raman บริษัท Perkin Elmer จำกัด
2. แท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์
3. แท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาน
4. เส้นใยนำแสงของบริษัท AMP
5. หัววัดเส้นใยนำแสง (remote optical fibre head sensor)
 - เลนส์นูน 1 ด้าน (plano - convex)
stock # G 32,003, G 32,962
 - ตัวกรองสัญญาณที่แทรกสอด (interference filter)
stock # G 43,153
 - ผลึกแยกลำแสงชนิดกระจก (mirror type beam splitters)
stock # G 30,725, G 31,437
 - กระจกสะท้อนด้านหน้า (first surface mirrors)
stock # G 32,944บริษัท Edmund Scientific
- แผ่นพลาสติกอะคริลิก
- หัวจับเส้นใยนำแสง
6. แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิดฮีเลียม-แคดเมียม
7. ตัววัดสัญญาณแสง (photo detector)
8. มิเตอร์วัดกำลังแสง (Power meter)
9. ชุดตัดเส้นใยนำแสง
10. อุปกรณ์ปลอกเส้นใยนำแสง (stripper)

3.2 แผนการการดำเนินการวิจัย

3.2.1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์หัววัดเส้นใยนำแสงและแท่นจับเส้นใยนำแสง

ในการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆดังกล่าวข้างต้น ต้องคำนึงถึงหลักการสำคัญคือ อุปกรณ์ทุกชิ้นที่ใช้จับเส้นใยนำแสง ควรจะปรับได้ทั้ง 3 มิติ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการ นำแสงเข้าและออกจากเส้นใยนำแสง

3.2.1.1 แท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์

เป็นการดัดแปลงจากอุปกรณ์เสริมของเครื่อง FT-Raman ที่เรียกว่าอุปกรณ์ชุดโพลาไรเซชัน (Polarization kit) ดังรูปที่ 3-1

อุปกรณ์ชุดโพลาไรเซชัน แบ่งได้ 2 ส่วน ดังนี้

1) โครงสร้างหลัก มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กที่ตั้งฉาก ดังตำแหน่งหมายเลข 1 ของภาพ แสดงด้านข้าง ในรูปที่ 3-2 ซึ่งจะประกอบด้วย

- แผ่นเหล็กแนวนอน ทำหน้าที่เป็นฐานของอุปกรณ์โพลาไรเซชัน มีรู 4 รู สำหรับใส่สกรู เพื่อยึดติดกับเครื่อง FT-Raman

- แผ่นเหล็กที่ตั้งฉากกับฐาน มีช่องกลวงตรงกลางสำหรับสวมท่อที่มีกระจกโพลาไรเซชัน อยู่ที่ปลาย ซึ่งเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างรอง และมีรูสำหรับสกรู 3 ตัว สามารถใช้ปรับ ตำแหน่งของท่อได้ทั้ง 3 มิติ

2) โครงสร้างรอง มีลักษณะดังตำแหน่งหมายเลข 2 ของภาพแสดงด้านข้าง ในรูปที่ 3-2 ประกอบด้วยท่อกระจกโพลาไรเซชัน ยึดติดกับแผ่นเหล็กที่ทำหน้าที่รับแรงจากสกรูจากการปรับ ตำแหน่ง 3 มิติ โดยปลายอีกด้านหนึ่งจะมีสปริงสำหรับรับแรง

วิธีการทดลอง

1) ออกแบบ

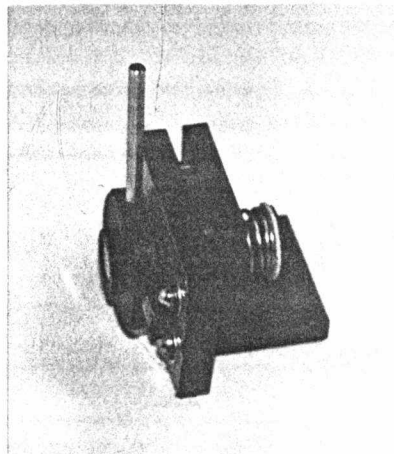
1.1) วัดตำแหน่งและขนาดที่แน่นอนของรูทั้ง 4 ที่ แผ่นฐานของโครงสร้างหลัก (เพื่อให้แท่น จับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์ สามารถวางได้ตำแหน่งเดียวกับชุดอุปกรณ์ โพลาไรเซชัน)

1.2) วัดความสูงที่แน่นอนของช่องกลวงตรงกลาง สำหรับสวมท่อกระจก โพลาไรเซชัน (เพื่อให้แสงเลเซอร์เข้าไปในเส้นใยนำแสง ในตำแหน่งเดียวกันกับท่อกระจกโพลาไรเซชัน)

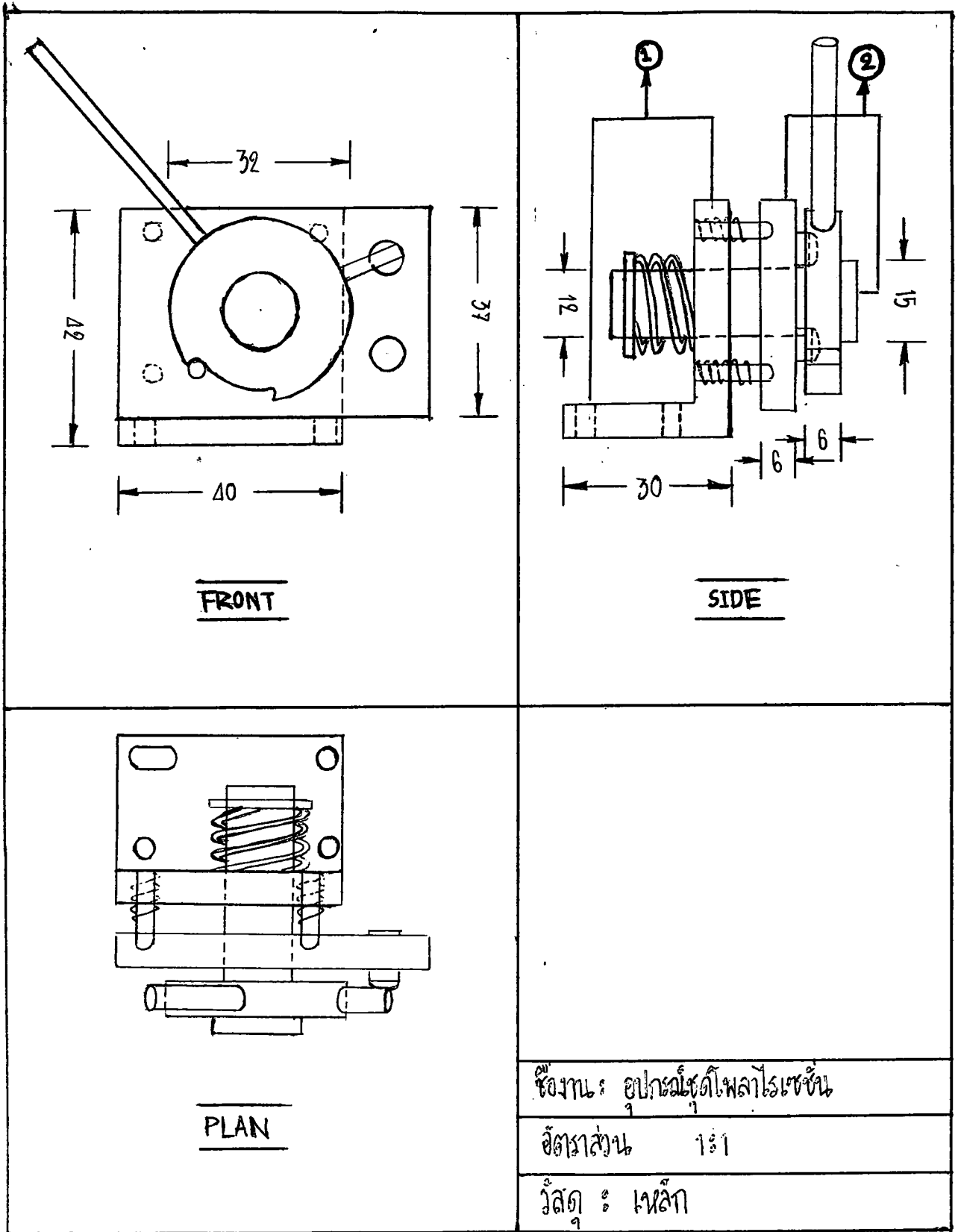
1.3) ดัดแปลงท่อกระจกโพลาไรเซชันให้เป็นหัวจับเส้นใยนำแสง ซึ่งทำจากดอกจับสว่าน

2) เขียนแบบ

3) นำแบบที่ทำการเขียนแบบเสร็จแล้วไปสร้างโดยเลือกวัสดุที่เหมาะสม



รูปที่ 3-1 ภาพอุปกรณ์ชุดโพลาไรเซชันของเครื่อง FT-Raman



รูปที่ 3-2 แสดงแบบภาพฉายของอุปกรณ์ไพโซโรเซชันของเครื่อง FT-Raman

3.2.1.2 แทนจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาน

เป็นการดัดแปลงจากแทนจับสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง (Continuous Solid and films Sampling Accessory) ของเครื่อง FT-Raman ซึ่งแทนจับสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1) โครงสร้างหลัก จะมีลักษณะดังหมายเลข 1 ภาพด้านข้าง ของรูปที่ 3-4 ซึ่งประกอบด้วยแผ่นเหล็กที่มีส่วนประกอบเพิ่มดังนี้

- ฝานูนขึ้นมา ซึ่งมีรูขนาดประมาณ 3 มิลลิเมตร อยู่ตรงกลาง (โดยที่ตำแหน่งของรูตรงกลางจะเป็นตำแหน่งที่นำแสงรามานที่กระเจิงเข้าสู่ตัวตรวจวัดสัญญาณแสงได้พอดี)

- แทนเหล็ก ซึ่งยาวประมาณ 40 มิลลิเมตร ทำหน้าที่เป็นหลักยึดสำหรับโครงสร้างรอง

2) โครงสร้างรอง จะมีลักษณะดังหมายเลข 2 ภาพด้านข้าง ของรูปที่ 3-4 ซึ่งสามารถเลื่อนตำแหน่งเข้าออก และล็อกได้โดยมีสกรูสำหรับยึดกับแทนเหล็กในโครงสร้างหลัก และด้านล่างจะมีก้อนเหล็กสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ซึ่งที่ผิวจะเว้าลึกลงไปสำหรับใส่สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง และมีสกรูด้านหลังก้อนเหล็ก สำหรับล็อกสารตัวอย่างอีกทีหนึ่ง

วิธีการทดลอง

1) ออกแบบ

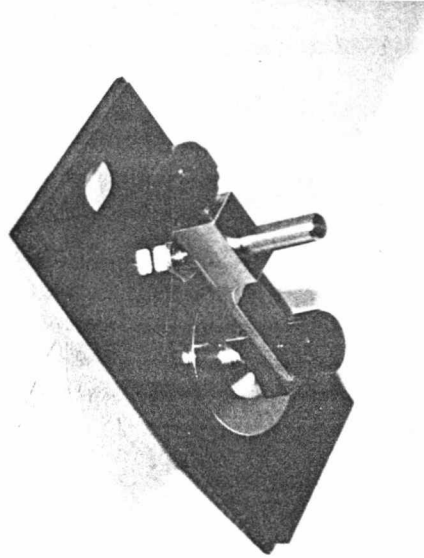
1.1) วัดขนาดที่แน่นอนของโครงสร้างหลัก

1.2) วัดความสูงที่แน่นอนของรูที่โครงสร้างหลัก (เพื่อให้แสงรามานที่กระเจิงออกจากเส้นใยนำแสง เข้าสู่ตัวตรวจวัดสัญญาณแสง ในตำแหน่งเดียวกันกับรูที่โครงสร้างหลักของแทนจับสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง)

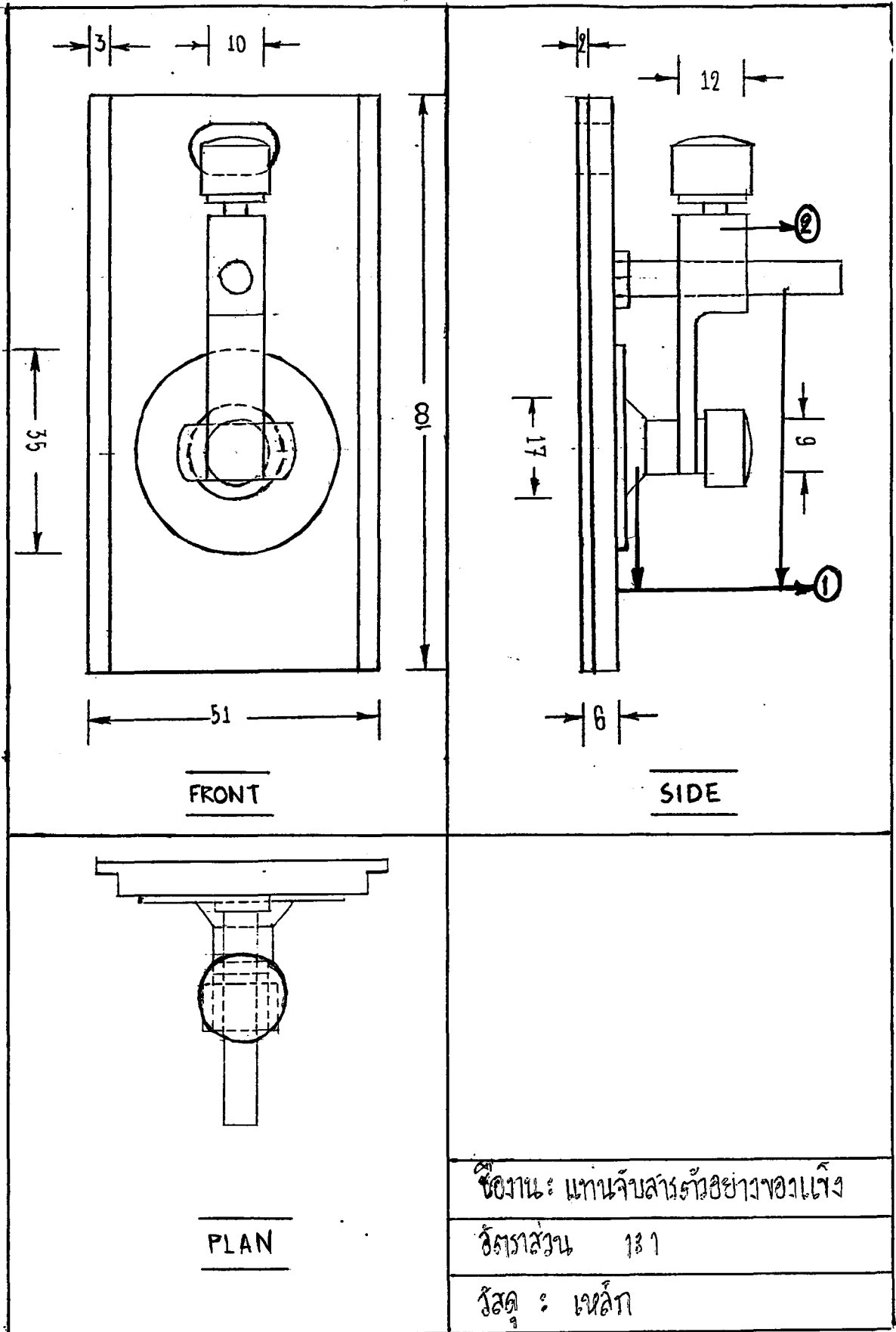
1.3) ดัดแปลงโดยจะไม่ใช่โครงสร้างรอง และตรงตำแหน่งของรูที่จะนำแสงรามานจะเปลี่ยนเป็นหัวจับเส้นใยนำแสงแทน สำหรับแท่งเหล็กที่เป็นหลักยึดจะคงอยู่ไว้เพื่อความสะดวกในการจับ

2) เขียนแบบ

3) นำแบบที่ทำการเขียนเสร็จแล้วไปสร้างโดยเลือกวัสดุที่เหมาะสม



รูปที่ 3-3 แสดงภาพแทนจับสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งของเครื่อง FT-Raman



ชื่องาน : แทนจับสารถ้อย่างของเตียง

อัตราส่วน 1:1

วัสดุ : เหล็ก

รูปที่ 3-4 แสดงภาพฉายของแทนจับสารถ้อย่างที่เป็นของแข็ง

3.2.1.3 หัววัดเส้นใยนำแสง

วิธีทดลอง

- 1) ทำการศึกษาหลักการต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการสร้างหัววัดเส้นใยนำแสง เช่น
 - เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล
 - ชนิดของอุปกรณ์ และการเดินทางของแสงภายในเครื่อง FT-Raman
- 2) ออกแบบ ให้มีลักษณะดังรูปที่ 2-31
- 3) เขียนแบบอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบ
- 4) นำแบบที่ทำการศึกษาเขียนแบบเสร็จแล้วไปสร้างโดยเลือกวัสดุที่เหมาะสม

3.2.2 การเลือกอุปกรณ์ทางแสงและเส้นใยนำแสง

วิธีการทดลอง

- 1) ศึกษาหน้าที่และความสำคัญของ เลนส์ ตัวกรองสัญญาณ ผลึกแยกลำแสงชนิดกระจก และเส้นใยนำแสง
- 2) เลือกอุปกรณ์ดังกล่าวให้สอดคล้อง และเหมาะสมกับอุปกรณ์ทางแสงภายในเครื่อง FT-Raman และเอกสารอ้างอิงที่ได้ศึกษาค้นคว้ามา
- 3) เลือกหาบริษัทที่มีการจัดจำหน่ายอุปกรณ์ทางแสงที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ จากนั้นทำการติดต่อและสั่งซื้อ

3.2.3 การทดสอบด้วยเครื่อง FT-Raman

เพื่อทดสอบว่าอุปกรณ์ทางแสงและเส้นใยนำแสงที่ใช้เป็นส่วนประกอบของหัววัดเส้นใยนำแสงจะมีสเปกตรัม (background spectrum) รบกวนสเปกตรัมของข้อมูลที่วิเคราะห์หรือไม่

3.2.3.1 อุปกรณ์ทางแสง

- 1) เลนส์ ชนิดนูน 1 ด้าน

วิธีทดสอบ

- 1.1) ใช้อุปกรณ์จับสารตัวอย่างชนิดของแข็งจับเลนส์และทดสอบด้วยเครื่อง FT-Raman
- 1.2) ทำเช่นเดียวกับข้อ 1.1 โดยใช้เลนส์อื่นที่ได้เตรียมไว้สำหรับการทดลอง

2) ตัวกรองสัญญาณแทรกสอด

วิธีทดสอบ

2.1) ทดสอบเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีน เทอระพทาเลต (polyethylene terephthalate, PET) ด้วยเครื่อง FT-Raman เพื่อให้เป็นข้อมูลอ้างอิง (reference sample)

2.2) นำตัวกรองสัญญาณที่แทรกสอด ใช้ด้านที่สะท้อนแสงมาวางขวางทางเดินของแสงเลเซอร์

2.3) ทดลองเดินเครื่องอีกครั้ง

2.4) ทำข้อ 2.2 และ 2.3 ซ้ำอีกครั้ง โดยเปลี่ยนมาใช้ด้านที่ทึบแสง

2.5) นำข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากการทดสอบจากข้อ 2.3 และ 2.4 มาเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง

3) ผลึกแยกลำแสงชนิดกระจก

วิธีทดสอบ

3.1) ทดสอบเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีน เทอระพทาเลต (PET) ด้วยเครื่อง FT-Raman เพื่อให้เป็นข้อมูลอ้างอิง (reference sample)

3.2) นำผลึกแยกลำแสง มาวางขวางทางเดินของแสงเลเซอร์

3.3) ทดลองเดินเครื่องอีกครั้ง

3.4) ทำซ้ำข้อ 3.2 และข้อ 3.3 โดยใช้ผลึกแยกลำแสงชนิดกระจกมาวางขวางทางเดินของแสงรามาน

3.5) นำข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากการทดสอบจากข้อ 3.3 และ 3.4 มาเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง

3.2.3.2 เส้นใยนำแสง

1) เส้นใยนำแสงที่ใช้ในย่านการสื่อสาร

วิธีทดสอบ

1.1) ปอกเส้นใยนำแสงให้เหลือแต่แกน และทำความสะอาดด้วยคลอโรฟอร์มบริสุทธิ์

1.2) นำเส้นใยที่เตรียมไว้มาจับด้วยแท่นจับสารตัวอย่างชนิดของแข็ง จากนั้นทดสอบด้วยเครื่อง FT-Raman

2) เส้นใยนำแสงชนิดที่มีหมู่ไฮดรอกซีต่ำ

วิธีทดสอบ

ทำเช่นเดียวกับการทดสอบเส้นใยนำแสงชนิดที่ใช้ในย่านการสื่อสาร

3.2.4 การทดสอบเชิงกายภาพ

เพื่อทดสอบว่า อุปกรณ์ทางแสงและเส้นใยนำแสงมีคุณสมบัติตรงตามที่สั่งซื้อจากทางบริษัทหรือไม่

3.2.4.1 อุปกรณ์ทางแสง

1) เลนส์นูน 1 ด้าน

วิธีทดสอบ

1.1 นำเลนส์นูน 1 ด้านมายึดด้วยแท่นจับอุปกรณ์ทางแสง

1.2 ฉายแสงฮีเลียม-แคดเมียมผ่านเลนส์นูน

1.3 วัดระยะโฟกัส โดยนำจากมารบ และเลื่อนฉากจนได้จุดแสงเลเซอร์ที่เล็กที่สุด

1.4 วัดระยะทางจากเลนส์ถึงฉาก

1.5 บันทึกผลการทดสอบ

2) ผลึกแยกลำแสงชนิดกระจก

วิธีทดสอบ

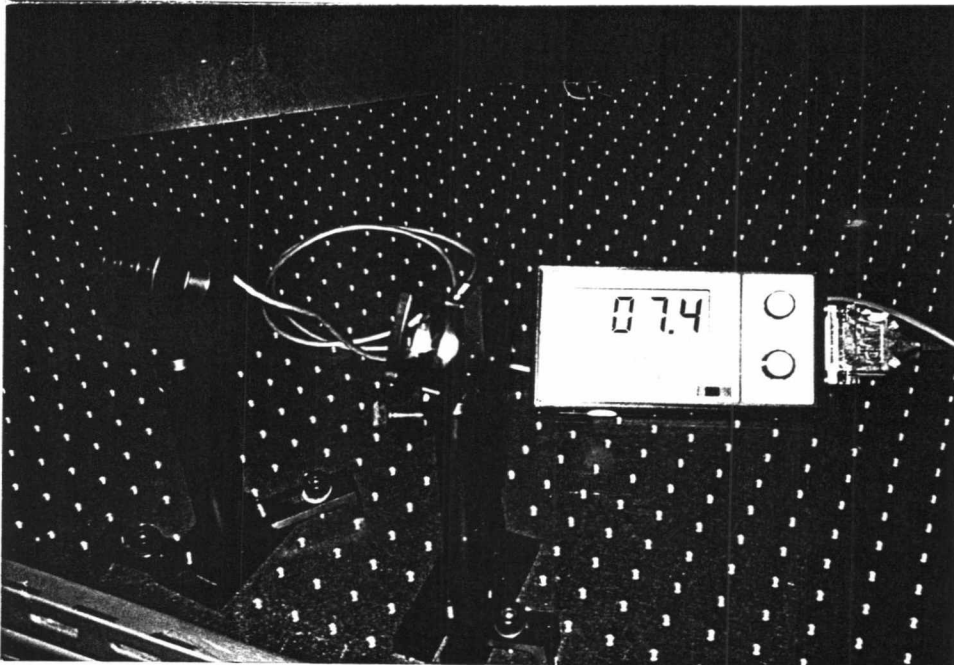
2.1 นำผลึกแยกลำแสงมายึดด้วยแท่นจับอุปกรณ์ทางแสง

2.2 ฉายแสงเลเซอร์ชนิดฮีเลียม-แคดเมียม ผ่านผลึกแยกลำแสง

2.3 นำตัวตรวจวัดสัญญาณของบริษัท Molecron รุ่น PM500D ไปวัดกำลังของแสงที่ผ่านจากผลึกแยกลำแสง

2.4 นำตัวตรวจวัดสัญญาณ ไปวัดกำลังของแสงที่สะท้อนจากผลึกแยกลำแสง

2.5 บันทึกผลที่ได้จากการทดสอบ จากนั้นนำมาคำนวณและเปรียบเทียบกันระหว่างค่าการส่งผ่าน และค่าการสะท้อน



รูปที่ 3-5 แสดงการจัดชุดอุปกรณ์เพื่อทดสอบค่าการสะท้อนและค่าการส่งผ่าน
ของผลึกแยกลำแสงชนิดกระจก

3.2.4.2 เส้นใยนำแสง

1) การหาค่าการสูญเสียการส่งผ่านของแสงของเส้นใยนำแสง

วิธีทดสอบ

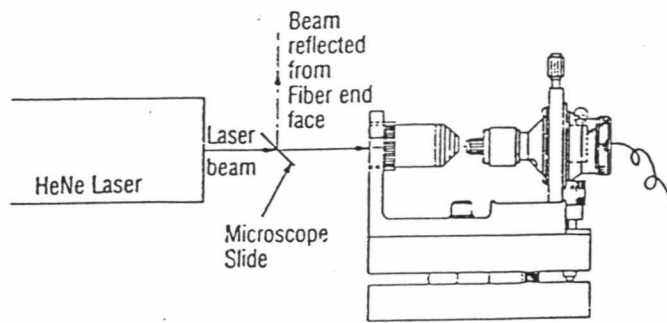
1.1) ปอกส่วนที่ห่อหุ้มเส้นใยนำแสงออกยาวประมาณ 20 mm ให้เหลือเพียงครอบและแกน

1.2) ใช้เครื่องตัดอย่างปราณีตตัดเส้นใยนำแสงบริเวณส่วนที่เหลือแต่เพียงครอบ

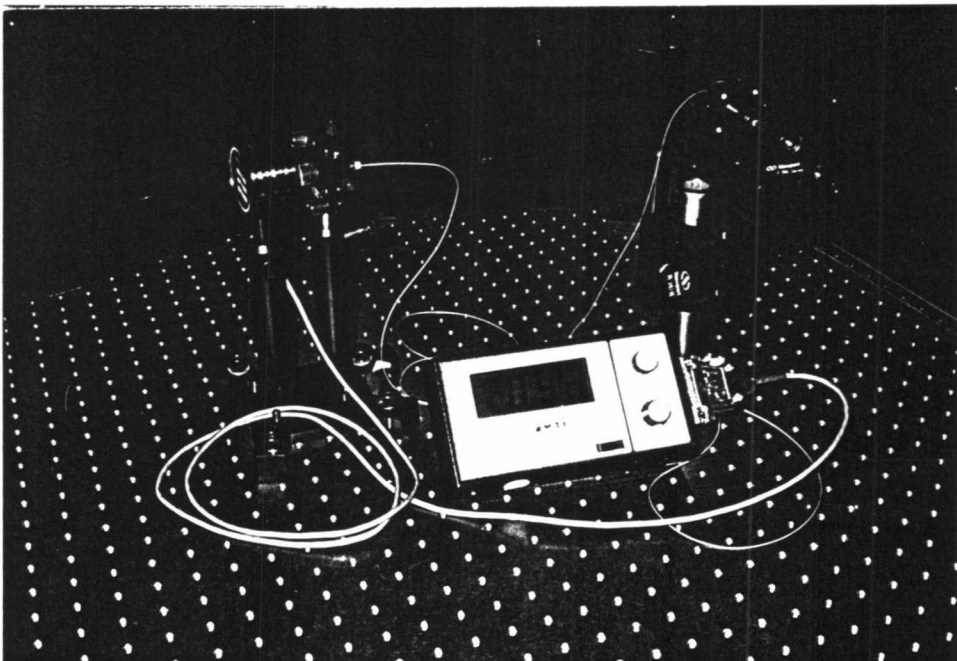
และแกน โดยพยายามให้ปลายเส้นใยนำแสงนั้นเรียบที่สุด

1.3) ต่อเส้นใยนำแสงเข้ากับชุดเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงเข้ากับแหล่งกำเนิดแสง

ชนิดฮีเลียม-แคดเมียม ดังรูปที่ 3-6 ซึ่งชุดเชื่อมต่อจะประกอบด้วย เลนส์ขนาด 20X และแท่นจับ
เส้นใยนำแสงที่สามารถปรับได้ 3 มิติตามแนวแกน X, Y และ Z



รูปที่ 3-6 แสดงชุดเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงเข้ากับแหล่งกำเนิดแสง



รูปที่ 3-7 ภาพถ่ายการจัดชุดอุปกรณ์ เพื่อทดสอบหาค่าการสูญเสียแสงของเส้นใยนำแสง

1.4) ต่อปลายอีกด้านหนึ่งของเส้นใยนำแสง เข้ากับตัวตรวจวัดสัญญาณ Moletron รุ่น PM500D

1.5) ทำการปรับแทนจับเส้นใยนำแสงทั้ง 3 แกน เพื่อให้แสงเลเซอร์เข้าสู่เส้นใยนำแสง ได้มากที่สุด (โดยอ่านค่าจากตัววัดสัญญาณแสง)

1.6) อ่านค่ากำลังของแสงที่ตัวตรวจวัดสัญญาณแสง จากนั้นบันทึกค่ากำลังของแสง และความยาวของเส้นใยนำแสง

1.7) ทำการตัดเส้นใยนำแสงออกให้มีความยาวลดลงจากเดิม บันทึกค่ากำลังของแสง และความยาวของเส้นใยนำแสง

1.8) คำนวณค่าการสูญเสียการส่งผ่านแสง (Loss) จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Loss (dB/km)} = (10/L) \log (P_2/P_1)$$

- เมื่อ L คือ ความยาวของเส้นใยส่วนที่ตัดออก (กิโลเมตร)
P₁ คือ ค่าศักดาไฟฟ้าที่ได้จากเส้นใยส่วนที่มีความยาวเริ่มต้น (W)
P₂ คือ ค่าศักดาไฟฟ้าที่วัดได้จากเส้นใยส่วนที่เหลือ (W)

วิธีวัดค่าการสูญเสียการส่งผ่านแสงด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นเรียกว่าวิธีคัทแบ็ค (Cutback method) โดยมีการนำแสงเลเซอร์เข้าสู่เส้นใยนำแสง และทำการวัดค่ากำลังของแสงที่ออกจากปลายของเส้นใยนำแสงที่มีความยาวที่แน่นอนทั้งสองความยาว เหตุผลที่ทำเช่นนี้เนื่องจากเพื่อให้มั่นใจได้ว่า การสูญเสียที่วัดได้นี้ขึ้นกับการสูญเสียของเส้นใยนำแสง ไม่ได้เกิดจากการสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง

2) การทดลองหาค่าขนาดการเปิดรับให้แสงผ่าน

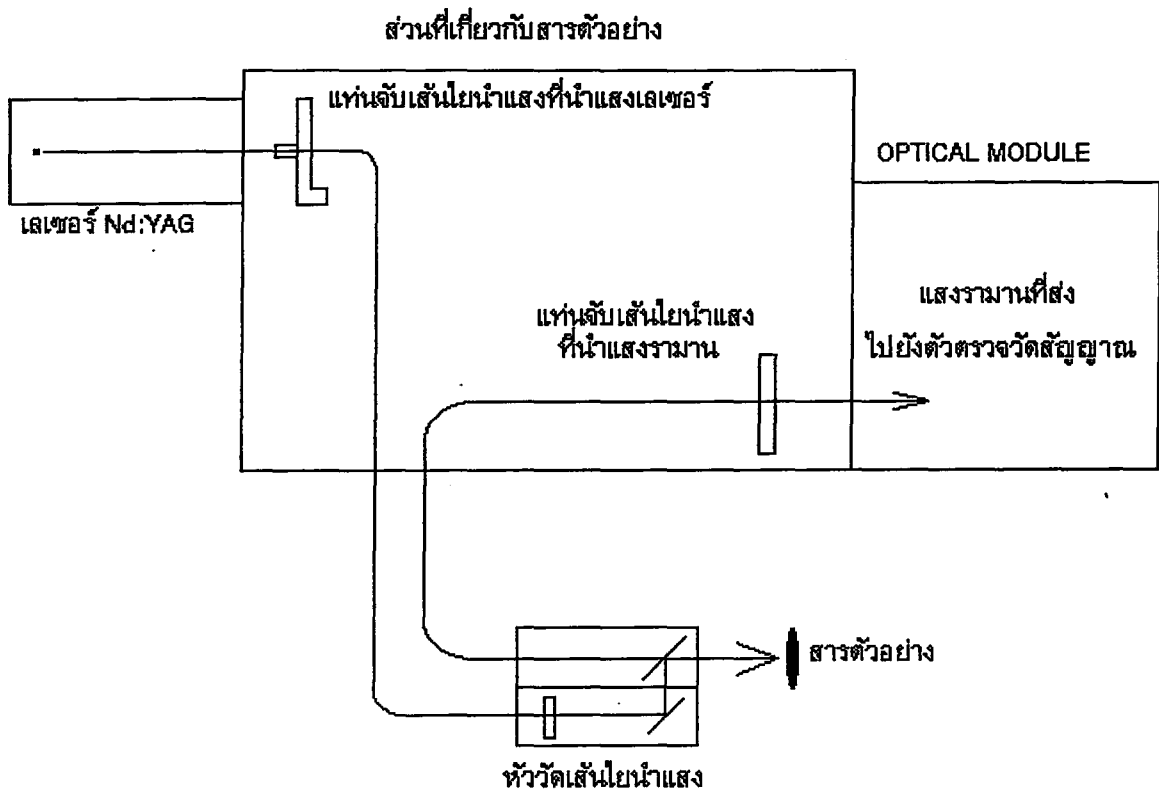
วิธีทดสอบ

- 2.1) ทำการเตรียมส่วนปลายทั้งสองด้านของเส้นใยนำแสง โดยพยายามให้เรียบที่สุด
- 2.2) ต่อกปลายด้านหนึ่งของเส้นใยนำแสง เข้ากับชุดเชื่อมต่อเส้นใยนำแสง และปรับให้ปลายของเส้นใยนำแสงอยู่ในแนวเดียวกันกับลำแสงจากแหล่งกำเนิด ซีเลียม-แคดเมียม
- 2.3) นำปลายอีกด้านของเส้นใยนำแสงใส่ในอุปกรณ์จับยึดเส้นใยนำแสง (shunk) และนำไปต่อเข้ากับแท่นจับอุปกรณ์
- 2.4) เมื่อทำการป้อนแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสงแล้ว ให้ฉากขนาด 3x5 นิ้ว เป็นตัวรับจุดของลำแสงที่ออกมา โดยวางฉากที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน แล้ววัดระยะทางจากปลายของเส้นใยนำแสง จนถึงฉากรับ (L) และวัดความกว้างของจุดลำแสงที่ปรากฏบนฉาก (W)
- 2.5) คำนวณหาค่าขนาดการเปิดรับให้แสงผ่าน (NA) ของเส้นใยนำแสงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$NA = \sin^{-1} (W/2L)$$

3.2.5 การประกอบหัววัดเส้นใยนำแสงเข้ากับเครื่อง FT-Raman และการจัดแนวทางเดินของแสง

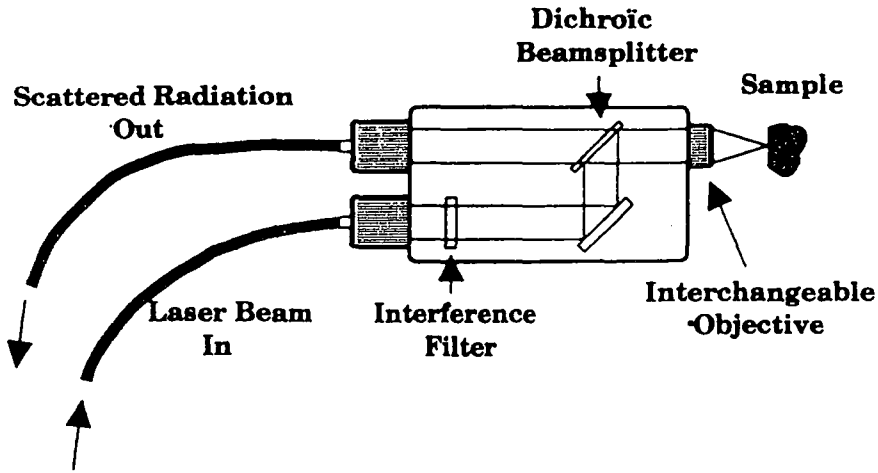
วิธีการทดลอง



รูปที่ 3-8 แสดงการต่อวัดเส้นใยนำแสงเข้ากับเครื่อง FT-Raman

- 1) นำเส้นใยนำแสงแบบเส้นเดี่ยว (single filament) ซึ่งทำหน้าที่นำแสงเลเซอร์ออกจากเครื่อง FT-Raman มายึดกับแท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์
- 2) ปรับแท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์ เพื่อให้แสงเลเซอร์เข้าสู่เส้นใยนำแสงมากที่สุด โดยหมุนปรับตำแหน่งที่สกรู 3 ตัว ที่อยู่ล้อมรอบหัวจับเส้นใยนำแสง ของแท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์
- 3) นำปลายอีกด้านหนึ่งของเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์ มายึดด้วยหัวจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์ของหัววัดเส้นใยนำแสง

4) ปรับตำแหน่งของกระจกสะท้อนและผลึกแยกลำแสงในหัววัดเส้นใยนำแสง เพื่อให้ได้เส้นทางเดินของแสงดังรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-9 แสดงทิศทางเดินของแสงภายในหัววัดเส้นใยนำแสง

5) นำเส้นใยนำแสงแบบหลายเส้น (bundle) ซึ่งทำหน้าที่รับแสงรามาน มายึดด้วยหัวจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์ของหัววัดเส้นใยนำแสง

6) ปรับหัวจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาน เพื่อให้แสงรามานเข้าเส้นใยนำแสงมากที่สุด โดยปรับสกรู 3 ตัว ในแต่ละท่อ

7) ต่อเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามานอีกด้าน เข้ากับหัวจับเส้นใยนำแสงของแท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาน

8) ปรับแท่นวางที่จับสารตัวอย่าง (รูปที่ 2-17) ด้วยปุ่มปรับและล้อ เพื่อให้แสงรามานเข้าสู่ตัวตรวจวัดสัญญาณมากที่สุด

3.2.6 การทดสอบหัววัดเส้นใยนำแสง

วิธีทดสอบ

- 1) วัดสารตัวอย่างอ้างอิง โดยใช้เครื่อง FT-Raman
- 2) ต่ออุปกรณ์หัววัดเส้นใยนำแสง และส่วนประกอบต่างๆเข้ากับเครื่อง FT-Raman ดังรูปที่

3-8

- 3) ทำการเดินเครื่อง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลอง

4.1.1 แทนจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์

จากข้อมูลที่ได้ศึกษา ทำให้สามารถสร้างอุปกรณ์และสร้างแทนจับเส้นใยนำแสง ซึ่งมีหลักการและโครงสร้างโดยดัดแปลงมาจากอุปกรณ์ชุดโพลาริเซชัน แต่ละส่วนจะมีความสำคัญ และมีหน้าที่แตกต่างกันไป ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1) สกรู 3 ตัว

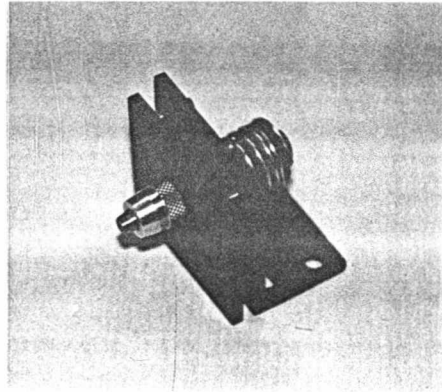
วางอยู่ล้อมรอบหัวจับเส้นใยนำแสง มีหน้าที่ช่วยในการปรับตำแหน่งของเส้นใยนำแสง แบบ 3 มิติคือทั้งในแนวแกน X, Y และ Z ทำให้แสงสามารถเดินทางเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2) หัวจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์

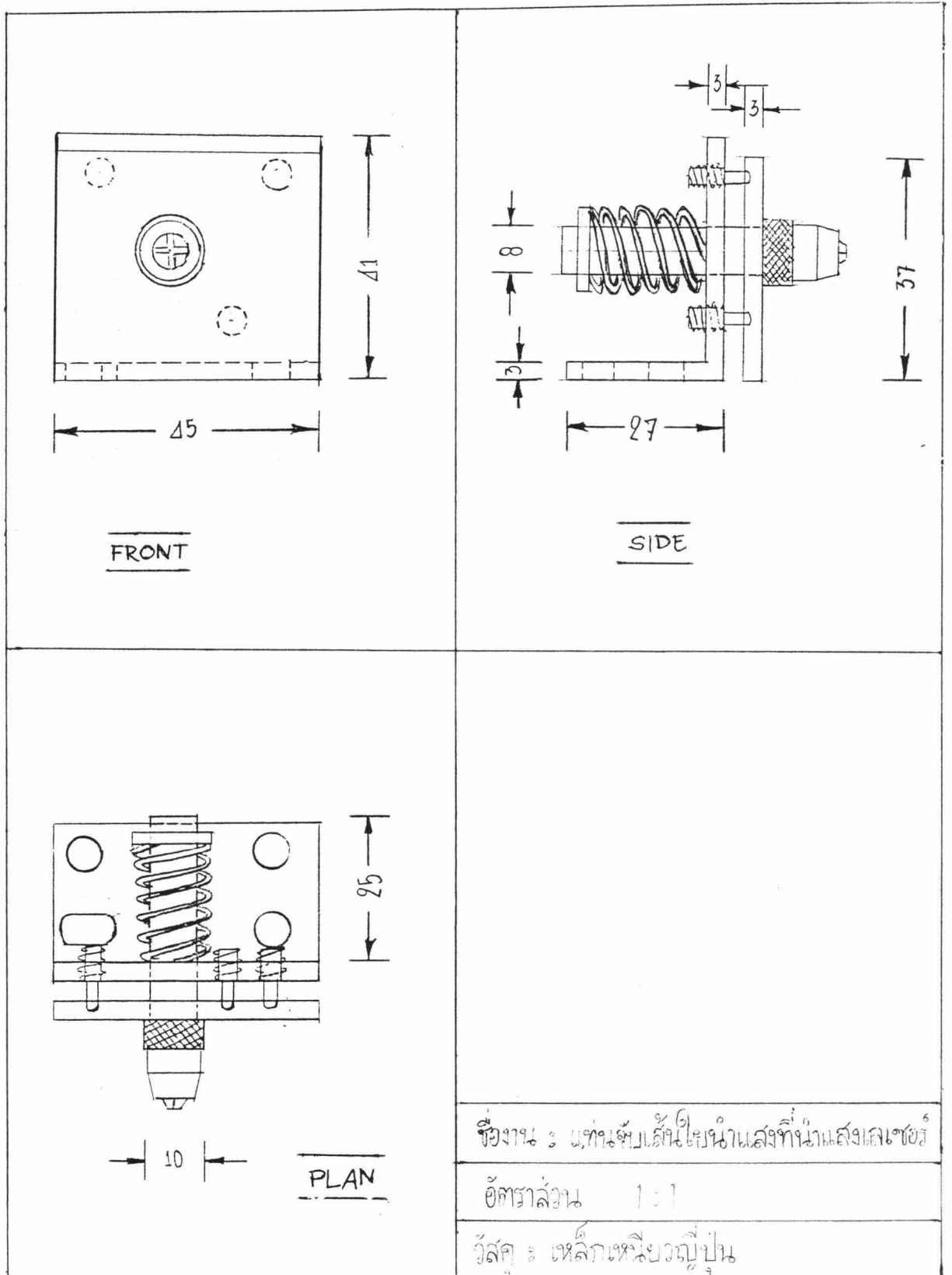
ทำการดัดแปลงมาจากที่จับดอกสว่านขนาดเล็ก ทำให้สามารถเลือกใช้เส้นใยนำแสง ได้หลายขนาด

3) สปริง

ทำหน้าที่รองรับแรงที่เกิดจากการปรับตำแหน่งของหัววัดเส้นใยนำแสง ช่วยทำให้มีความมั่นคงและมีความสมดุลมากขึ้น



รูปที่ 4-1 แสดงภาพถ่ายของแท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์



รูปที่ 4-2 แสดงภาพฉายของแทนจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์

4.1.2 แท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาาน

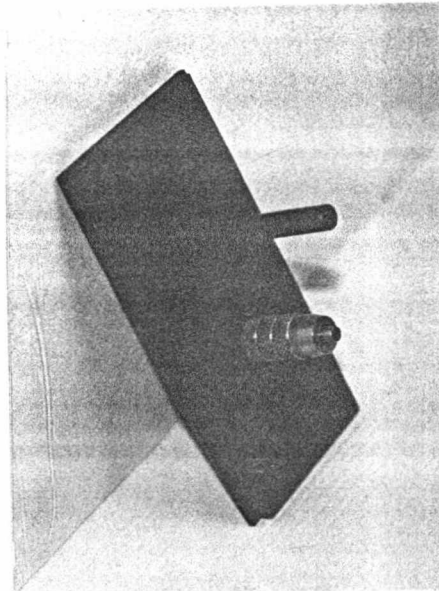
รูปร่างลักษณะของแท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาาน มีการดัดแปลงจากแท่นจับสารตัวอย่างชนิดของแข็ง ซึ่งมีลักษณะที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน มีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

1) หัวจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาาน

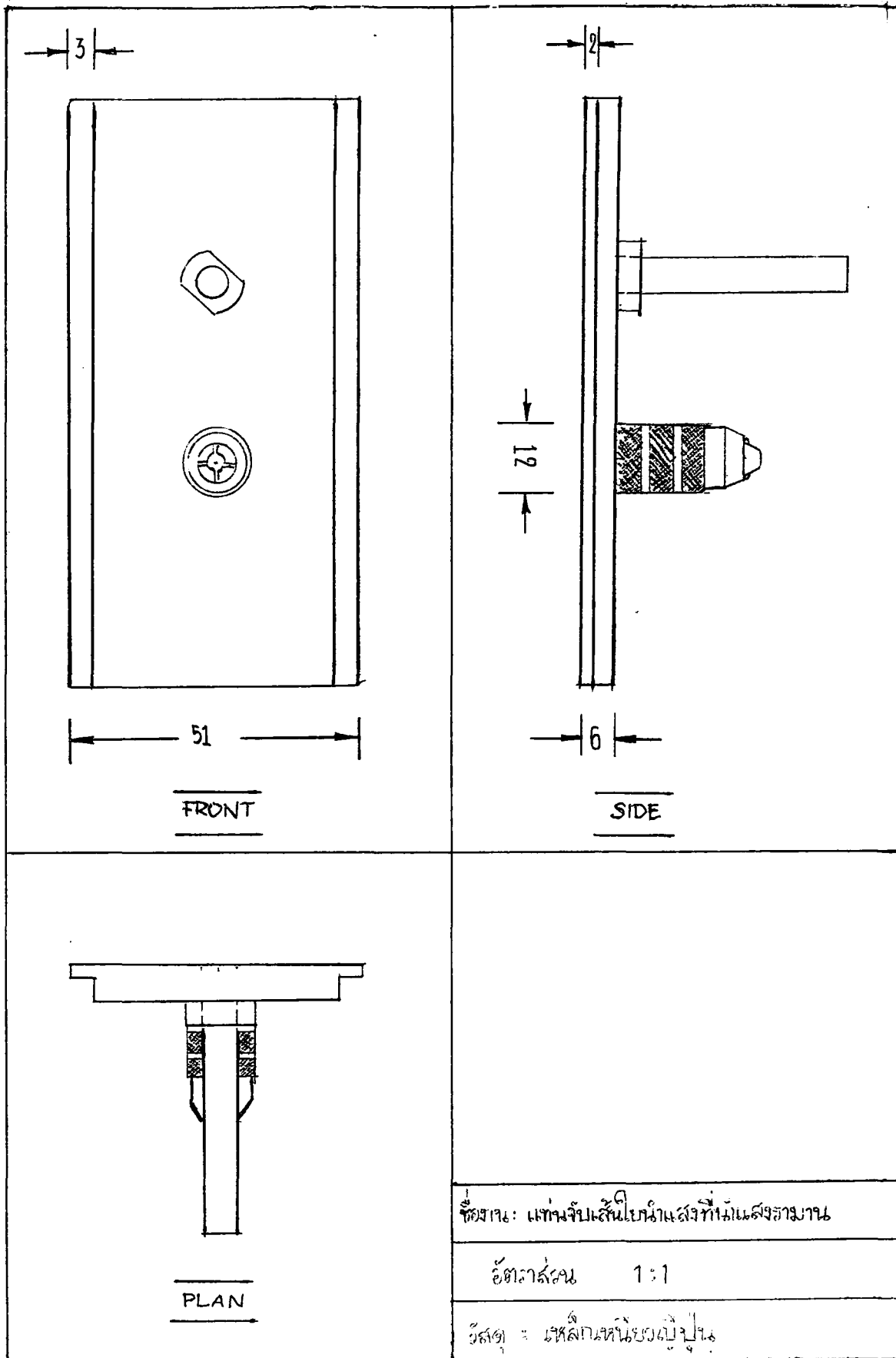
ได้ดัดแปลงจากที่จับดอกสว่านขนาดเล็ก โดยมีลักษณะคล้ายกับหัวจับเส้นใยนำแสงเลเซอร์แต่หัวจับที่นำแสงรามาานจะมีขนาดของรูที่ใหญ่กว่า จะสามารถใช้เส้นใยนำแสงที่มีขนาดใหญ่มากกว่า เนื่องจากเส้นใยนำแสงที่ใช้เป็นแบบมัดรวมกัน

2) ที่จับ

เป็นแท่งเหล็กกลมยื่นออกมาจากแท่นจับเส้นใยนำแสง เพื่อสะดวกในการจับหรือถือ



รูปที่ 4-3 แสดงภาพของแท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาาน



รูปที่ 4-4 แสดงภาพฉายของแท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาน

4.1.3 หัววัดเส้นใยนำแสง

จากการศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง สามารถนำข้อมูลที่ได้มาสรุปและสร้าง หัววัดเส้นใยนำแสง โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่เหมาะสมเป็นไปตามหลักการ ในหัววัดเส้นใยนำแสงนี้จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญดังต่อไปนี้

1) หัวจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์

มีลักษณะยึดอยู่กับผนังของหัววัดเส้นใยนำแสง มีลักษณะเช่นเดียวกับหัวจับเส้นใยนำแสงที่เป็นส่วนประกอบของแท่นจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์ การที่หัวจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์ยึดอยู่บนผนังจะช่วยทำให้เส้นใยนำแสงมีตำแหน่งที่แน่นอน

2) หัวจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาน

เป็นส่วนประกอบที่ออกแบบมาให้สามารถปรับตำแหน่งได้ 3 มิติทั้งในแนวแกน X, Y และ Z เพื่อรับแสงรามานให้เข้าไปเส้นใยให้มากที่สุด

ส่วนประกอบสำคัญที่ช่วยในการปรับตำแหน่งของหัวจับเส้นใยนำแสงได้ มีลักษณะเป็นท่อวงแหวนโลหะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 16 mm ความหนาของท่อประมาณ 3 mm ความยาวประมาณ 12 mm จำนวน 2 อัน วางอยู่ในแนวเดียวกันและรองรับอยู่ด้วยฐานที่ทำจากแผ่นพลาสติก บนท่อวงแหวนนี้มีสกรู 3 ตัว วางอยู่ในตำแหน่งที่ทำมุมกัน 120° พอดี (ใช้หลักการแบบ twin ring mount) มีหน้าที่คือปรับตำแหน่งของหัวจับเส้นใยนำแสงได้ 3 มิติและช่วยยึดหัวจับเส้นใยนำแสง

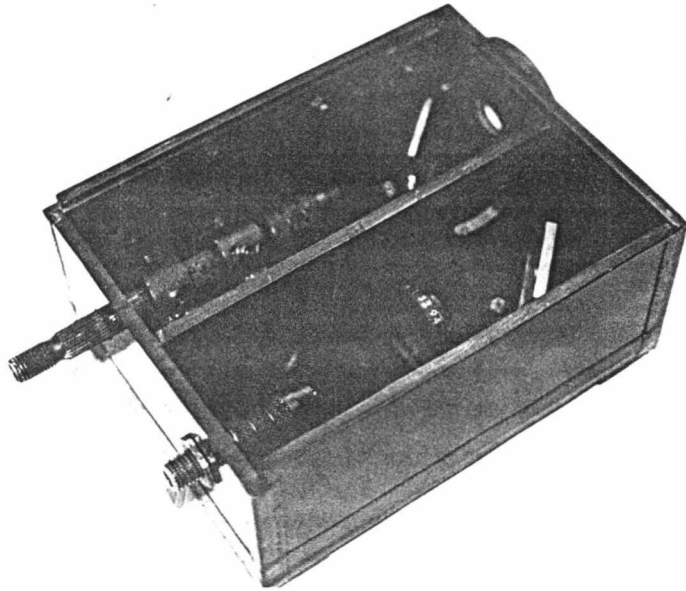
3) ฐานรองอุปกรณ์ทางแสง

มีทั้งหมด 3 ชั้น มีรูปร่างลักษณะและขนาดตามอุปกรณ์ทางแสงแต่ละชนิด

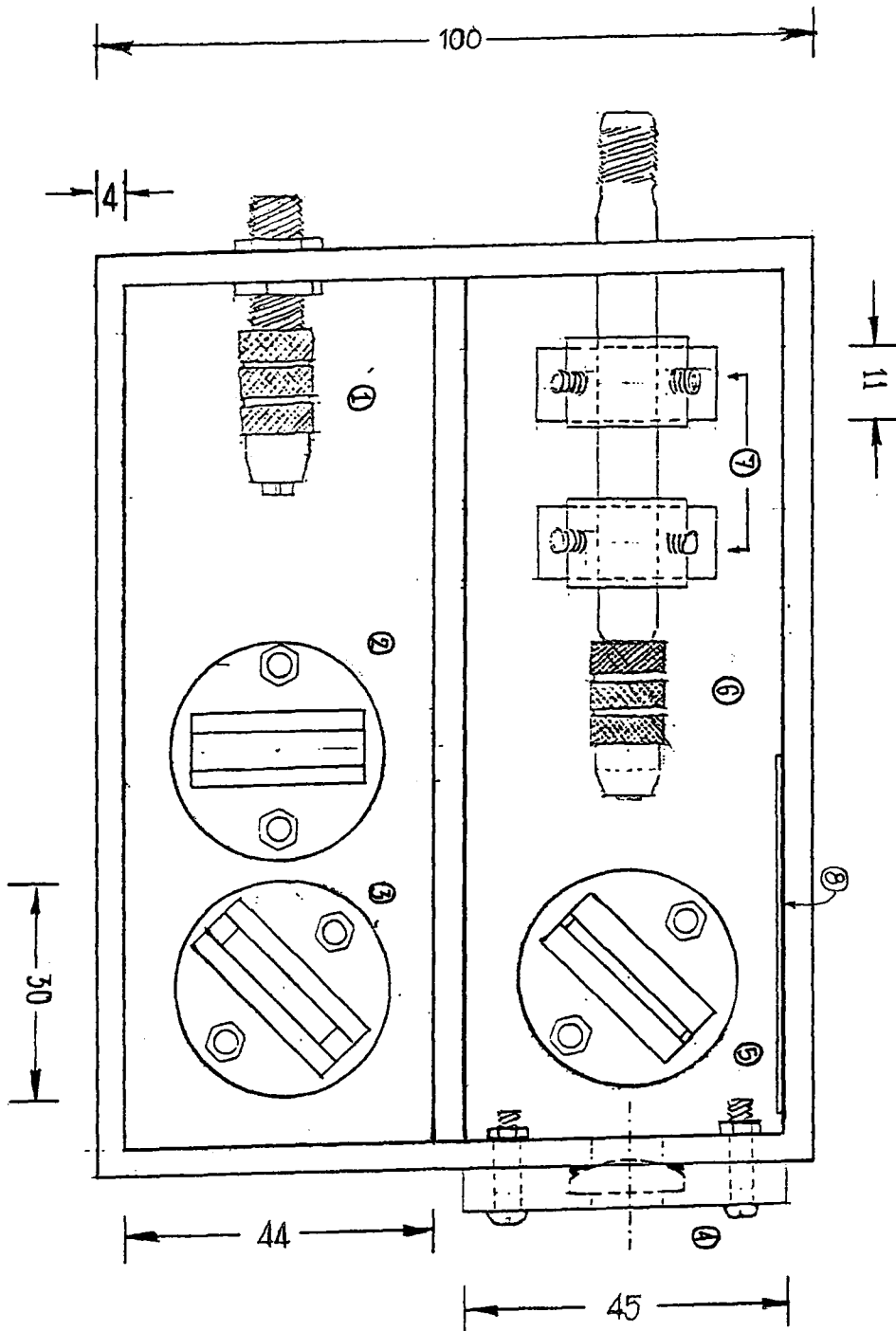
3.1) ฐานรองตัวกรองสัญญาณที่แทรกสอด

เป็นส่วนประกอบที่ทำขึ้นจากแผ่นพลาสติก มีขนาดพอเหมาะกับตัวกรองสัญญาณที่แทรกสอด คือ สามารถวางได้พอดี จะช่วยในการติดตั้งอุปกรณ์ให้มั่นคงมากขึ้น นอกจากนั้น ฐานรองอุปกรณ์จะช่วยปรับระดับความสูงของอุปกรณ์ทางแสง โดยพยายามให้อุปกรณ์ทางแสงอยู่ในแนวเดียวกันมากที่สุด

ฐานรองตัวกรองสัญญาณที่แทรกสอดที่สร้างขึ้นจะถูกยึดอยู่กับฐานของหัววัดเส้นใยนำแสงด้วยน็อต 2 ตัว



รูปที่ 4-5 แสดงภาพถ่ายของหัววัดเส้นใยนำแสง



- | | |
|--|--|
| หมายเลข 1 หัวจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงเลเซอร์ | หมายเลข 2 ฐานรองตัวกรองสัญญาณที่แทรกสอด |
| หมายเลข 3 ฐานรองกระจกสะท้อนด้านหน้า | หมายเลข 4 เลนส์นูน 1 ด้าน |
| หมายเลข 5 ฐานรองผลึกแยกลำแสง | หมายเลข 6 หัวจับเส้นใยนำแสงที่นำแสงรามาน |
| หมายเลข 7 twin ring mount | หมายเลข 8 แผ่นโลหะป้องกันความร้อน |

รูปที่ 4-6 แสดงภาพด้านบนของหัววัดเส้นใยนำแสง

3.2) ฐานรองกระจกสะท้อนด้านหน้า

มีลักษณะเช่นเดียวกับฐานรองตัวกรองสัญญาณที่แทรกสอด แต่ที่แตกต่างกันก็คือระดับของความสูงของฐานรอง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของอุปกรณ์ทางแสง และที่สำคัญอีกอันหนึ่งคือ ฐานรองกระจกสะท้อนด้านหน้าจะสามารถปรับหรือหมุนได้ แต่ในฐานรองตัวกรองสัญญาณที่แทรกสอดไม่สามารถปรับหรือหมุนได้

3.3) ฐานรองผลึกแยกลำแสง

มีลักษณะเหมือนกับฐานรองกระจกสะท้อนหน้าทุกประการ การที่ฐานรองอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นสามารถปรับหรือหมุนได้ ก็เพื่อช่วยปรับเส้นทางเดินของแสงภายในหัววัดเส้นใยนำแสงให้มีความแน่นอนยิ่งขึ้น

3.4) แผ่นโลหะป้องกันความร้อน

ทำจากโลหะสังกะสีพ่นสีดำ ยึดติดกับผนังด้านหลังของตำแหน่งผลึกแยกลำแสงด้วยน็อต เพื่อป้องกันความร้อนอันเนื่องมาจากรังสี ซึ่งอาจทำให้ผนังของหัววัดเส้นใยนำแสงหลอมตัวได้

ตัวโครงสร้างของหัววัดเส้นใยนำแสง ทำมาจากแผ่นอะคริลิกพลาสติกนำมาประกอบเป็นรูปร่างตามขนาดและตำแหน่งที่ได้ทำการออกแบบ สีที่ใช้จะควรเป็นสีดำด้านเนื่องจากมีการดูดกลืนแสงได้ดี ทำให้แสงเลเซอร์หรือแสงรามานไม่เกิดการกระเจิงภายในหัววัดเส้นใยนำแสง เป็นผลให้การวิเคราะห์ที่ได้จะมีข้อมูลที่มีความแม่นยำสูงขึ้น

4.2 ผลการคัดเลือกอุปกรณ์ทางแสงและเส้นใยนำแสง

จากข้อมูลที่ได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูล ทำให้สามารถคัดเลือกอุปกรณ์ทางแสงที่เหมาะสมกับการทดลองได้ดังต่อไปนี้

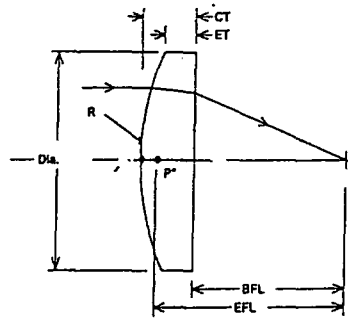
4.2.1 เลนส์นูน 1 ด้าน

ชนิด ขนาด คุณสมบัติและระยะโฟกัส ที่เหมาะสมเป็นดังนี้

stock # G 32,003 เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm ระยะโฟกัส 30 mm

stock # G 32,962 เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm ระยะโฟกัส 60 mm

ระยะโฟกัส ± 2 mm



รูปที่ 4-7 แสดงการรวมแสงของเลนส์นูน 1 ด้าน

ระยะโฟกัสที่เลือก เนื่องจากเป็นระยะที่เหมาะสมในการทดสอบในพื้นที่หรือบริเวณ ใกล้เคียง ๆ ในกรณีที่นำไปใช้ในพื้นที่โล่งกว้าง อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงระยะโฟกัส จนกระทั่งอาจ จะมีการพัฒนาขึ้นไปอีก คือ สามารถปรับระยะโฟกัสหรือเลือกระยะโฟกัสที่ต้องการได้

การเลือกเลนส์ชนิดที่ไม่ได้เคลือบ เนื่องจากแสงเลเซอร์ที่ผ่านเลนส์ อาจเกิดการกระเจิง หรือถูกดูดซับเนื่องจากผลของสารที่ใช้เคลือบ

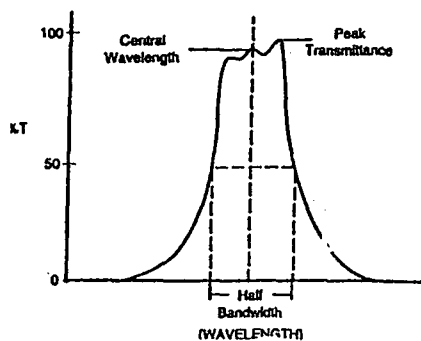
4.2.2 ตัวกรองสัญญาณที่แทรกสอด

ชนิดที่เลือก stock # G 43,153 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm

ความยาวคลื่นกลาง (central wavelength) คือ Nd: YAG laser 1,064 nm

ค่าความยาวคลื่นกลาง ± 2 nm

ครึ่งแถบความยาวคลื่น (half bandwidth) ± 2 nm



รูปที่ 4-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ที่แสงสามารถผ่านตัวกรองสัญญาณกับความยาวคลื่น

จากการศึกษาส่วนประกอบของเครื่อง FT-Raman จึงเลือกตัวกรองสัญญาณ ชนิดที่มีค่าความยาวคลื่นกลางเป็น 1,064 nm โดยตัวกรองสัญญาณที่แทรกสอดจะช่วยกำจัดแสงแบบรามานที่เกิดขึ้นภายในเส้นใยนำแสงขณะที่มีแสงเลเซอร์ผ่าน ทำให้ลำแสงเลเซอร์ที่ได้จะมี ความยาวคลื่นเดียว คือ 1,064 nm

4.2.3 ผลึกแยกลำแสงชนิดกระจก

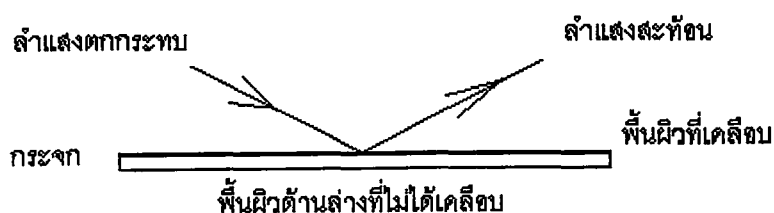
stock # G 30,725	ขนาด 22×30×2 mm	
	ค่าการสะท้อน (reflectivity)	30 %
	ค่าการส่งผ่าน (transmission)	70 %
stock # G 31,437	ขนาด 25×38×3 mm	
	ค่าการสะท้อน	25 %
	ค่าการส่งผ่าน	75 %

การเลือกค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าการสะท้อน และค่าการส่งผ่าน เป็น 30:70 และ 25:75 แสดงถึงค่าการส่งผ่านแสงที่สูงกว่าการสะท้อน เนื่องจากต้องการให้แสงรามาน ซึ่งมีความเข้มต่ำให้สามารถผ่านไปยังดีเทคเตอร์ในปริมาณที่มากพอ

4.2.4 กระจกสะท้อนด้านหน้า

เป็นชนิดเคลือบด้วยอลูมิเนียม

stock # G 32,944 เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm



รูปที่ 4-9 แสดงทางเดินของแสงที่ตกกระทบลงบนกระจกสะท้อนด้านหน้า

การเลือกกระจกชนิดนี้ เพื่อไม่ให้เกิดการกระเจิงแบบรามานของแสงเลเซอร์ที่ผ่านเข้าไปในเนื้อกระจก

4.2.5 เส้นใยนำแสง

จากการศึกษาถึงการดูดกลืนแสงที่แปรผันตามความยาวคลื่น จึงควรเลือกเส้นใยนำแสงชนิดที่มีหมู่ไฮดรอกซีต่ำ ใช้งานได้ในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน 180-2800 nm

การเลือกเส้นใยชนิดนี้ เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซีจะดูดกลืนแสงในย่านอินฟราเรดใกล้

4.3 ผลการทดลองด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มมรามาานสเปกโตรสโกปี

4.3.1 ผลการทดสอบอุปกรณ์ทางด้านแสง

1) เลนส์

ผลการทดลองที่ได้เป็นสเปกตรัม แสดงอยู่ในภาคผนวก

สรุปผลการทดลอง

จากสเปกตรัมของเลนส์นูนทั้งสองพบว่า จะเกิดการรบกวนสเปกตรัมของข้อมูลที่ตำแหน่ง 500 cm^{-1} ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากควอท์

2) ตัวกรองสัญญาณที่แทรกสอด

ผลการทดลองที่ได้เป็นสเปกตรัม แสดงอยู่ในภาคผนวก

สรุปผลการทดลอง

จากสเปกตรัมพบว่า ความเข้มของแสงรามานลดลงเนื่องจากเกิดการดูดกลืนของ คือ เมื่อนำตัวกรองสัญญาณมาวางขวางทางเดินของแสง จากการทดลองพบว่าตัวกรองสัญญาณด้านที่ทึบแสงจะทำให้ความเข้มของแสงรามานที่สูงกว่า

3) ผลึกแยกลำแสง

ผลการทดลองที่ได้ แสดงอยู่ในภาคผนวก

สรุปผลการทดลอง

เมื่อนำผลึกแยกลำแสงขวางทางเดินแสงเลเซอร์จะให้ความเข้มของพีคที่สูงกว่าเมื่อนำมาขวางทางเดินของแสงที่กระเจิงแบบรามาน

4.3.2 เส้นใยนำแสง

ผลการทดลองเป็นสเปกตรัม แสดงอยู่ในภาคผนวก

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า สเปกตรัมที่ได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎีและไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางรามานสเปกตรัมได้

4.4 ผลการทดสอบเชิงกายภาพ

4.4.1 ผลการทดสอบอุปกรณ์ทางแสง

1) เลนส์นูน 1 ด้าน

ตารางที่ 4-1 แสดงผลการทดสอบระยะโฟกัสของเลนส์

stock #	ระยะโฟกัส (mm)					เฉลี่ย (mm)
	1	2	3	4	5	
G 32,003	34	36	36	39	40	37
G 32,962	47	50	49	52	52	50

สรุปผลการทดสอบ

G 32,003 ระยะโฟกัส 30 mm แต่การทดสอบได้ระยะโฟกัส 37 mm

G 32,962 ระยะโฟกัส 60 mm แต่การทดสอบได้ระยะโฟกัส 50 mm

2) ผลึกแยกลำแสงชนิดกระจก

กำลังของแสงเลเซอร์ก่อนผ่านผลึกแยกลำแสง = 61 ± 1 mw

ตาราง 4-2 แสดงค่ากำลังของแสงเลเซอร์เมื่อทดสอบผลึกแยกลำแสง

stock #	ค่าการส่งผ่าน (mw)	ค่าการสะท้อน (mw)
G 31,437	38 ± 1	19 ± 1
G 30,725	55 ± 1	2 ± 1

สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบผลึกแยกลำแสงทางด้านกายภาพเชิงกายภาพได้เปอร์เซ็นต์การสะท้อนและการส่งผ่านดังตาราง

ตาราง 4-3 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนและค่าการส่งผ่านของแสง

stock #	ค่าจากทางบริษัท	การทดสอบ
G 31,437	25 : 75	31 : 62
G 30,725	30 : 70	3 : 90

4.4.2 ผลการทดสอบเส้นใยนำแสง

1) ค่าการสูญเสียการส่งผ่านแสงในเส้นใยนำแสง

กำลังของแสงเลเซอร์ก่อนผ่านเส้นใยนำแสง = 61 ± 1 mw

ตาราง 4-4 แสดงค่ากำลังของแสงที่ออกจากปลายอีกด้านหนึ่งของเส้นใยนำแสง ในการทดสอบหาค่าการสูญเสียการส่งผ่านแสงในเส้นใยนำแสง

ความยาว (cm)	ครั้งที่	ค่ากำลังของแสง (mW)					เฉลี่ย (mW)	เฉลี่ย ทั้งหมด
		1	2	3	4	5		
235	1	3.26	3.69	3.38	3.78	3.82	3.59	3.58
	2	3.72	3.37	3.41	3.63	3.54	3.53	
	3	3.51	3.49	3.36	4.00	3.67	3.61	
154	1	3.31	3.76	3.84	3.93	4.00	3.77	3.75
	2	3.92	3.57	3.63	3.87	3.97	3.79	
	3	3.49	3.68	4.02	3.54	3.78	3.70	

สรุปผลการทดลอง

ตัวอย่างการคำนวณค่าการสูญเสียการส่งผ่านแสงในเส้นใยนำแสง
เส้นใยนำแสงยาว 8.1×10^4 กม. ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกตัดไปจากเส้นใยนำแสงที่ยาว 235 cm ให้มี
ความยาวลดลงเหลือ 154 cm

$$\text{กำลังแสงที่ความยาวเส้นใย 235 cm} = 3.58 \text{ mw}$$

$$\text{กำลังแสงที่ความยาวเส้นใย 154 cm} = 3.75 \text{ mw}$$

$$\begin{aligned} \text{loss (dB/km)} &= (10/8.1 \times 10^4) \log (3.75/3.58) \\ &= 248.74 \text{ dB/km} \end{aligned}$$

2) การหาค่าขนาดการเปิดรับแสง

ตาราง 4-5 แสดงผลการทดสอบการหาค่าขนาดการเปิดรับแสง

ครั้งที่	ระยะห่างจากปลาย (cm)	ความกว้างของจุดแสง (cm)	NA (เรเดียน)
1	1.5	0.4	0.13
2	2.0	0.7	0.17
3	2.5	0.9	0.18
4	3.0	1.3	0.21
		เฉลี่ย	0.17

สรุปผลการทดลอง

เมื่อระยะทางจากปลายเส้นใยนำแสงถึงฉากรับแสง (L) = 1.5 cm จะวัดความกว้างของจุดบน
ฉากรับได้ 0.4 cm

$$\begin{aligned} \text{NA} &= \sin^{-1} [0.4/(2 \times 1.5)] \\ &= 0.13 \text{ เรเดียน} \end{aligned}$$

4.5 ผลการจัดแนวทางเดินของแสง

เนื่องจากโครงการพิเศษนี้จำเป็นต้องใช้เส้นใยนำแสงที่มีหมู่ไฮดรอกซีต่ำ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนประมาณ 200 μm (เพื่อช่วยให้การนำแสงเข้าเส้นใยนำแสงได้มากขึ้น) ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ในการสั่งซื้อสินค้าจำเป็นต้องใช้เวลาประมาณ 3-4 เดือน เป็นผลให้เส้นใยนำแสงมาไม่ทันตามกำหนดเวลา จึงไม่ได้ทำการทดลองในหัวข้อนี้

4.6 ผลการทดสอบหัวข้อวัดเส้นใยนำแสง

ไม่ได้มีการทดลอง เนื่องจากมีเหตุผลเช่นเดียวกับข้อ 4.5

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการสร้างหัววัดเส้นใยนำแสงและแทนจับเส้นใยนำแสง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่อง FT-Raman สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเพื่อให้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมีดังนี้

1. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์

จากการศึกษาและสร้างแทนจับเส้นใยนำแสง และหัววัดเส้นใยนำแสง ปรากฏว่าอุปกรณ์ในการจับเส้นใยนำแสงแต่ละชิ้นสามารถจับเส้นใยได้หลายขนาดและสามารถปรับทิศทางได้ 3 แกน (เพื่อช่วยในการปรับแนวทางเดินของแสง) บรรลุตามเป้าหมาย

2. การคัดเลือกอุปกรณ์ทางแสงและเส้นใยนำแสง

ในส่วนของอุปกรณ์ทางแสงทุกชิ้นสามารถหาซื้อได้ตามจุดประสงค์ที่ต้องการจากบริษัท Edmund Scientific โดยเส้นใยนำแสงชนิดแก้วที่ต้องการมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่และมีหมู่ไฮดรอกซีที่ต่ำ จำเป็นต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ และเสียเวลาในการขนส่งนานประมาณ 3-4 เดือน แต่ได้พยายามแก้ไขโดยการขอความอนุเคราะห์เส้นใยจาก บริษัท อินเตอร์เนชั่นแนล (1987) จำกัด ได้มาจำนวนหนึ่ง แต่ไม่ใช่ตามคุณสมบัติที่ต้องการ

3. การทดสอบด้วยเครื่อง FT-Raman

อุปกรณ์ทางแสง จากการทดสอบพบว่าอุปกรณ์ทุกชิ้นจะดูดกลืนแสงไปปริมาณหนึ่งแต่จะไม่เกิดสเปกตรัมที่รบกวนสเปกตรัมข้อมูล ยกเว้นเลนส์จะเกิดสเปกตรัมรบกวนที่ประมาณ 500 cm^{-1} (ควอทซ์)

เส้นใยนำแสง ที่ได้รับความอนุเคราะห์ได้ผลการทดสอบ ปรากฏว่าไม่เป็นไปตามทฤษฎีและไม่สามารถวิเคราะห์สเปกตรัมได้

4. การทดสอบทางด้านกายภาพ

อุปกรณ์ทางแสง จากการทดสอบพบว่าเลนส์มีค่าไม่ต่างจากค่าที่บริษัทระบุไว้มากนัก แต่ผลึกแยกลำแสงมีค่าต่างจากค่าที่ระบุมากพอสมควร

5. การจัดแนวทางเดินของแสงและการทดสอบหัววัดเส้นใยนำแสง

การทดลองไม่สามารถทำได้ เนื่องจากเส้นใยนำแสงที่ต้องการไม่สามารถส่งมาได้ทันตามกำหนด

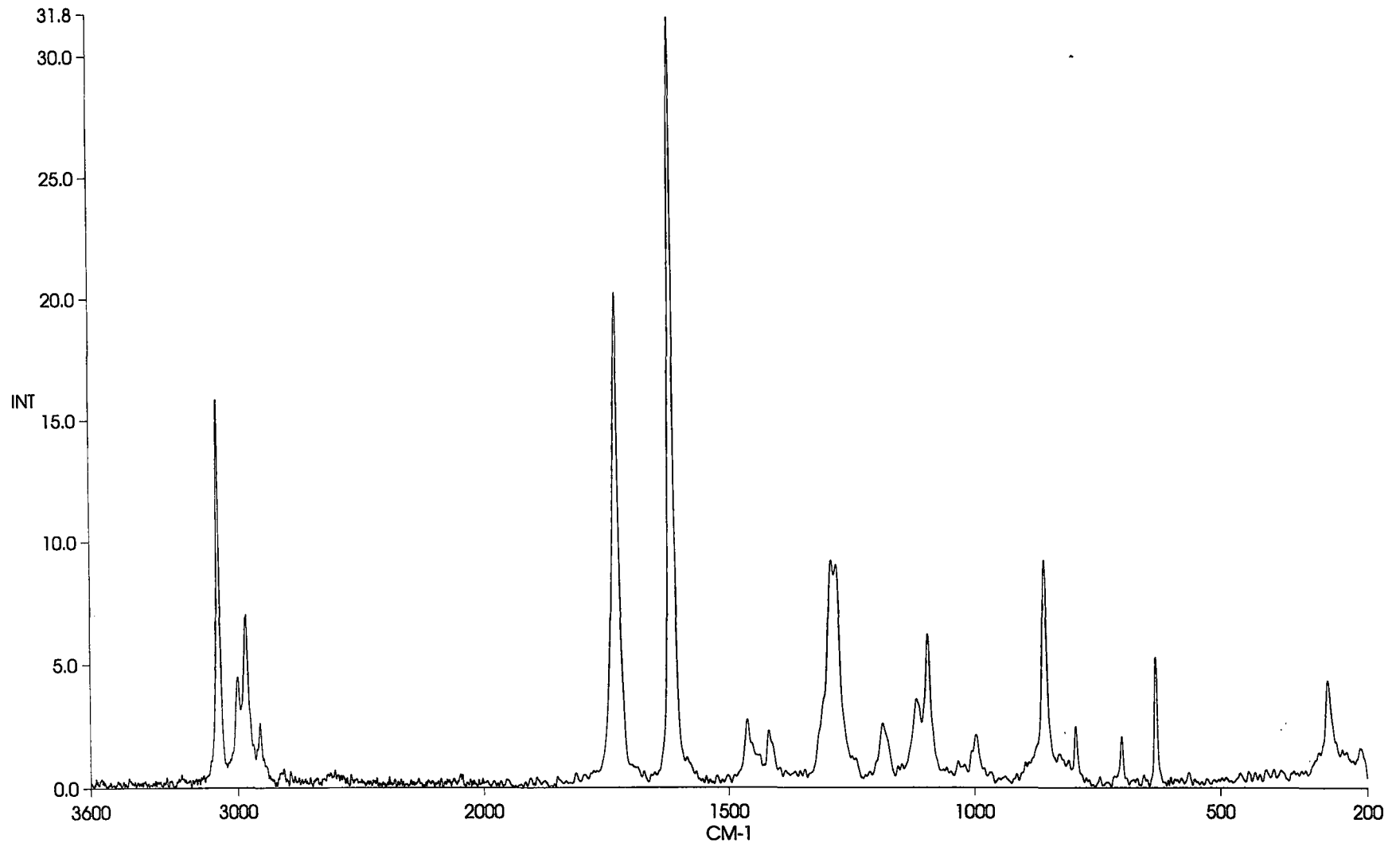
ข้อเสนอแนะ

1. ในการทำโครงการพิเศษนี้ ควรจะมีการวางแผนการดำเนินงานที่เหมาะสม เนื่องจากจะต้องใช้เวลาในการส่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นเวลานาน

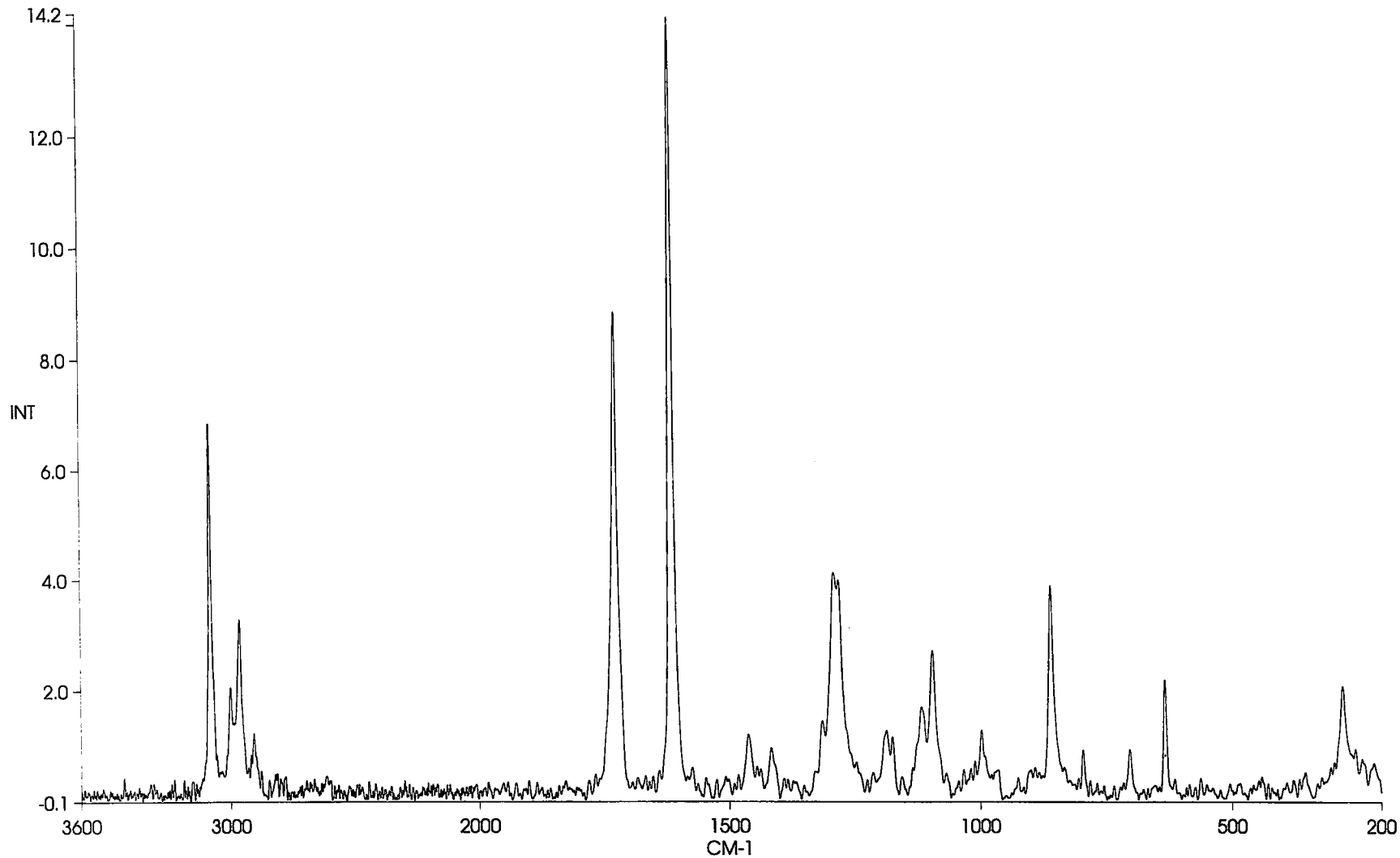
2. อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้ ยังมีการจัดวางส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ยังไม่ดีเท่าที่ควร ถ้าได้มีการทำการทดลองคาดว่าจะออกมาได้ไม่ดี ในกรณีที่จะมีการศึกษาต่อไปควรจะให้มีความสำคัญกับทฤษฎีทางด้านแสงให้มากที่สุด

3. การสร้างเครื่องมือหรืออุปกรณ์ขึ้นมา ควรจะพิจารณาถึงหลักการ ความเหมาะสม ความเป็นไปได้และปัจจัยต่างๆ เพื่อที่จะสร้างอุปกรณ์หรือเครื่องมือขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

ภาคผนวก

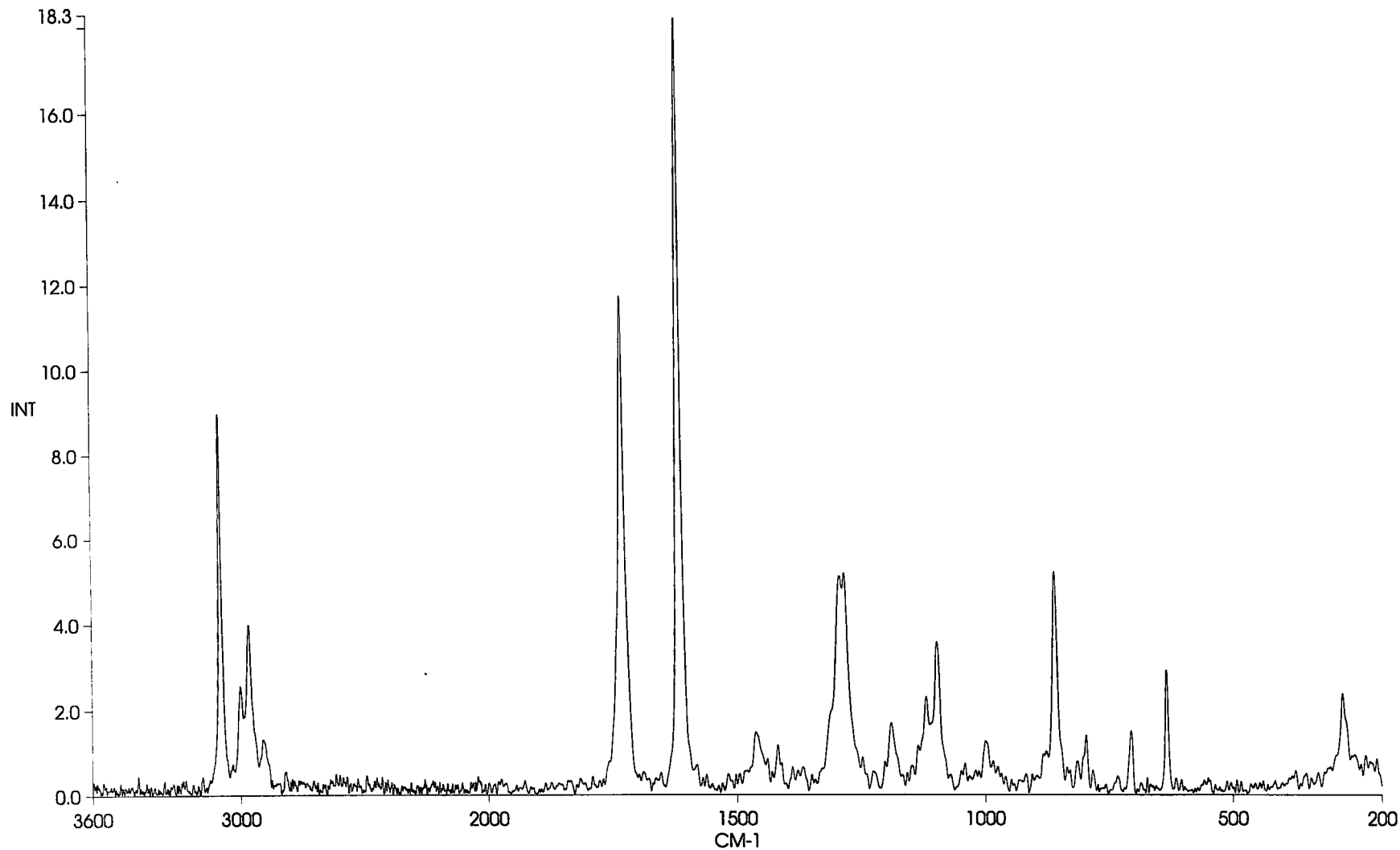


สเปกตรัมของ PET ที่ 400 mW สแกน 10 ครั้ง



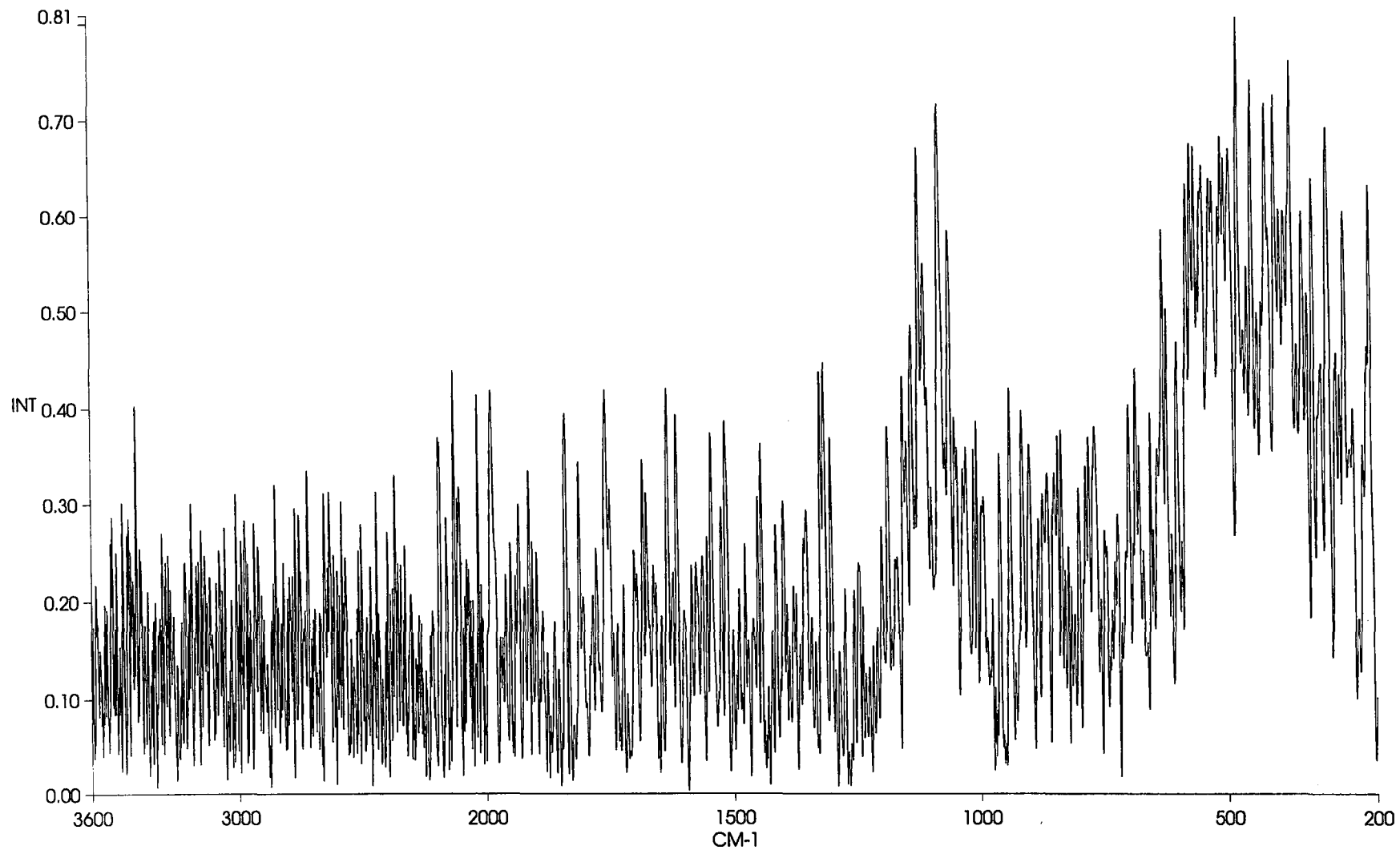
สเปกตรัมของ PET เมื่อผ่านตัวกรองสัญญาณที่แทรกสอด stock # G 43,153

(ด้านที่สะท้อนแสง) ที่ 400 mW สแกน 10 ครั้ง

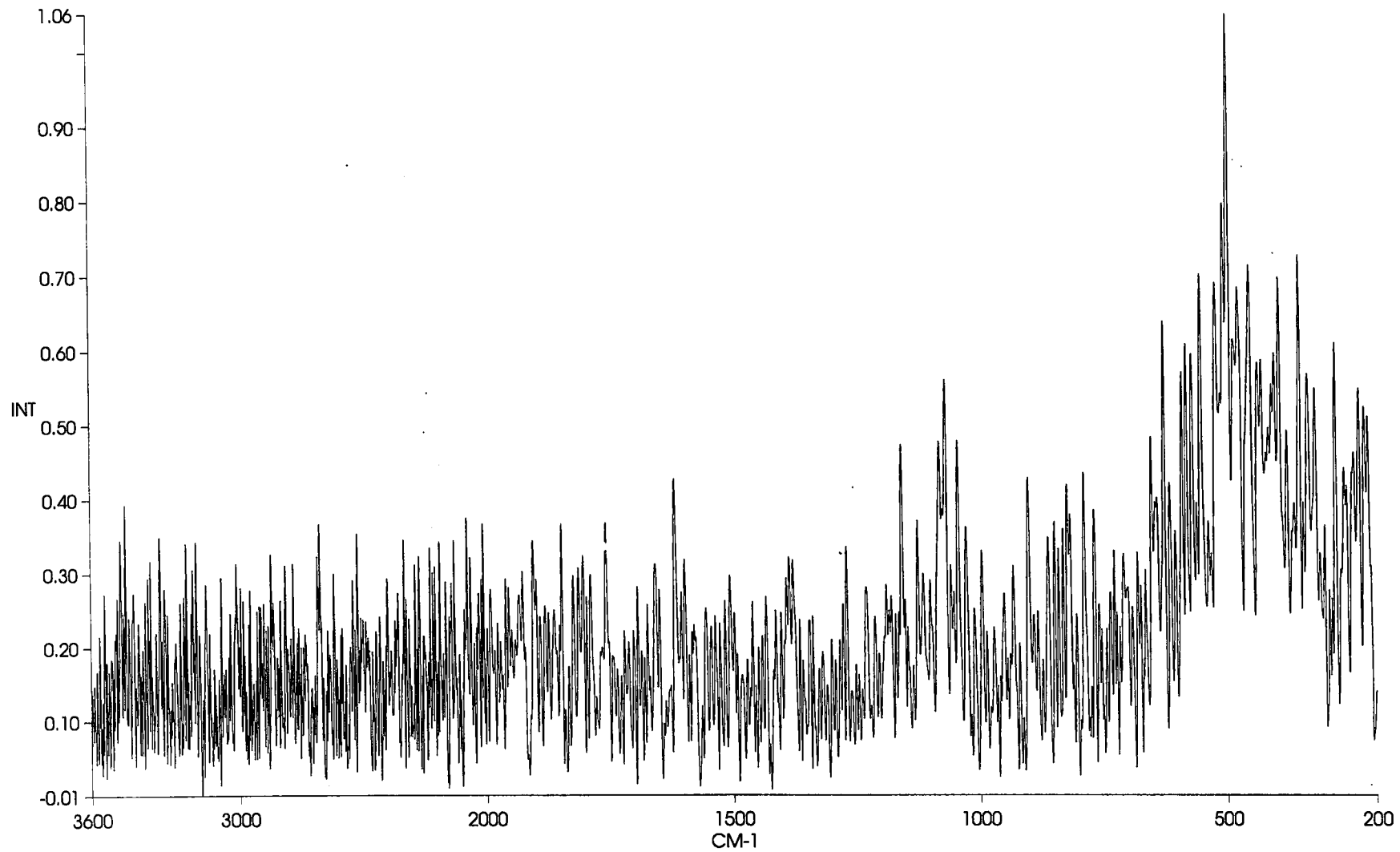


สเปกตรัมของ PET เมื่อผ่านตัวกรองสัญญาณที่แทรกสอด stock # G 43,153

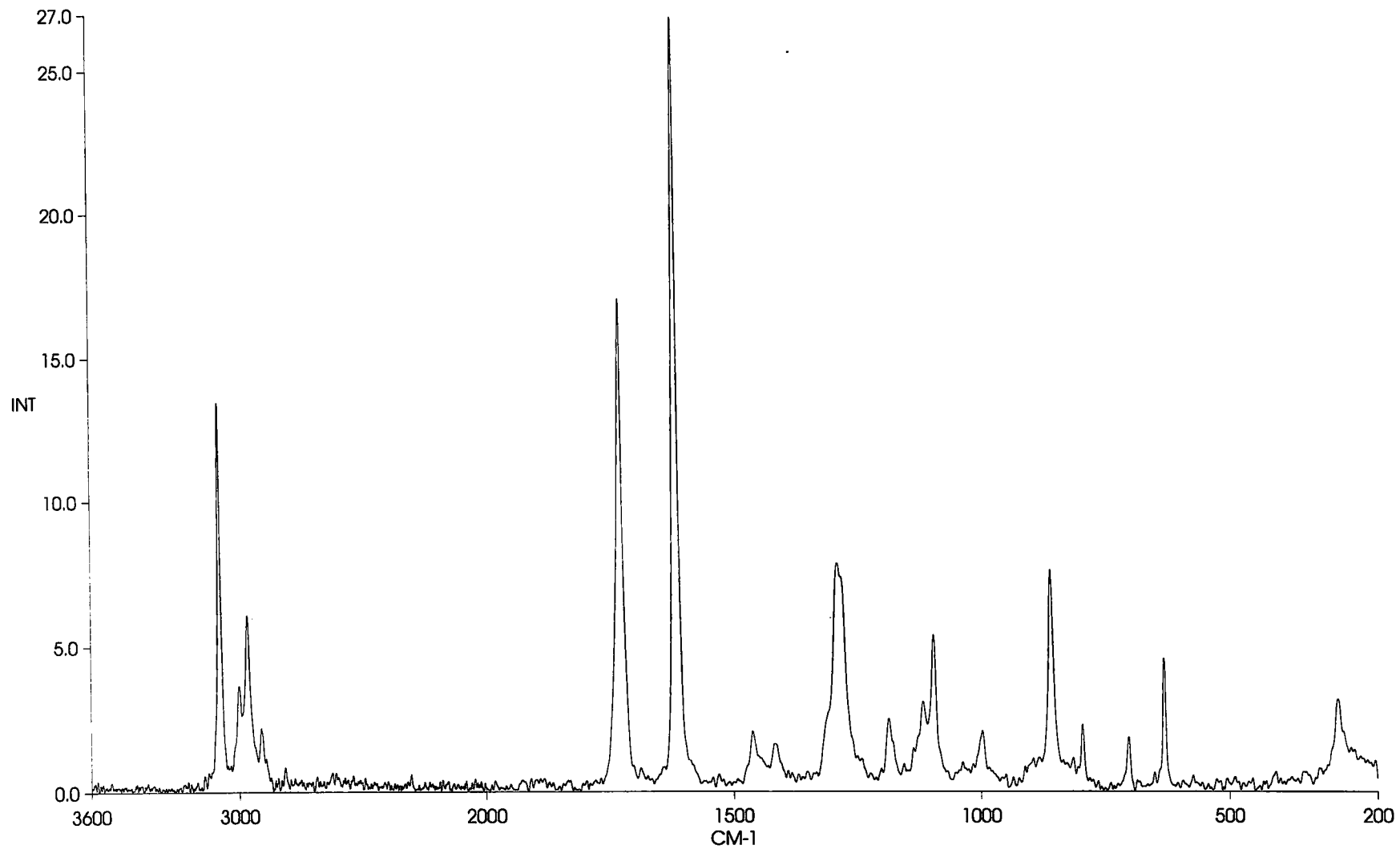
(ด้านที่ทึบแสง) ที่ 400 mW สแกน 10 ครั้ง



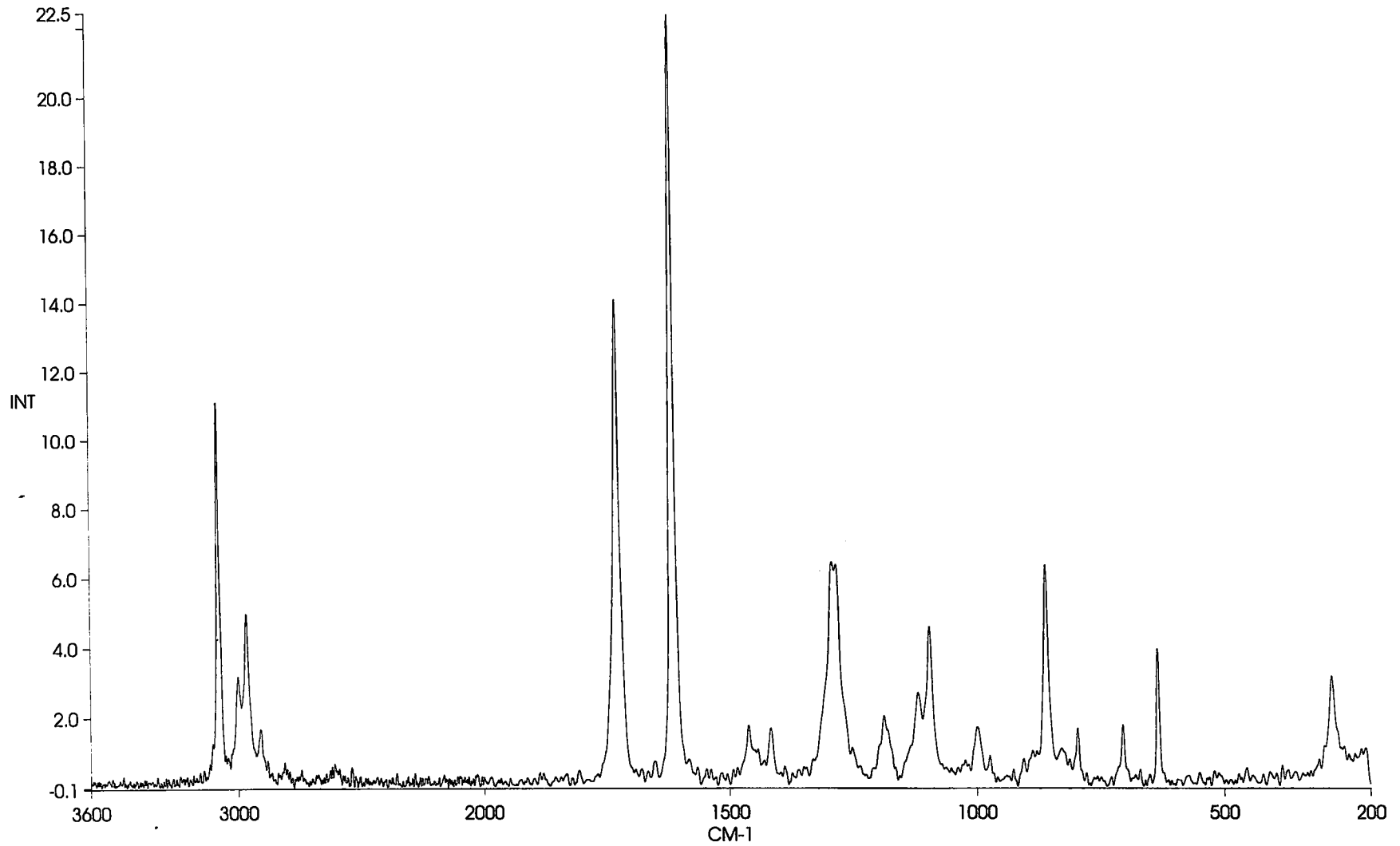
สเปกตรัมของเลนส์นูน stock # G 32,962 ที่ 400 mW สแกน 10 ครั้ง



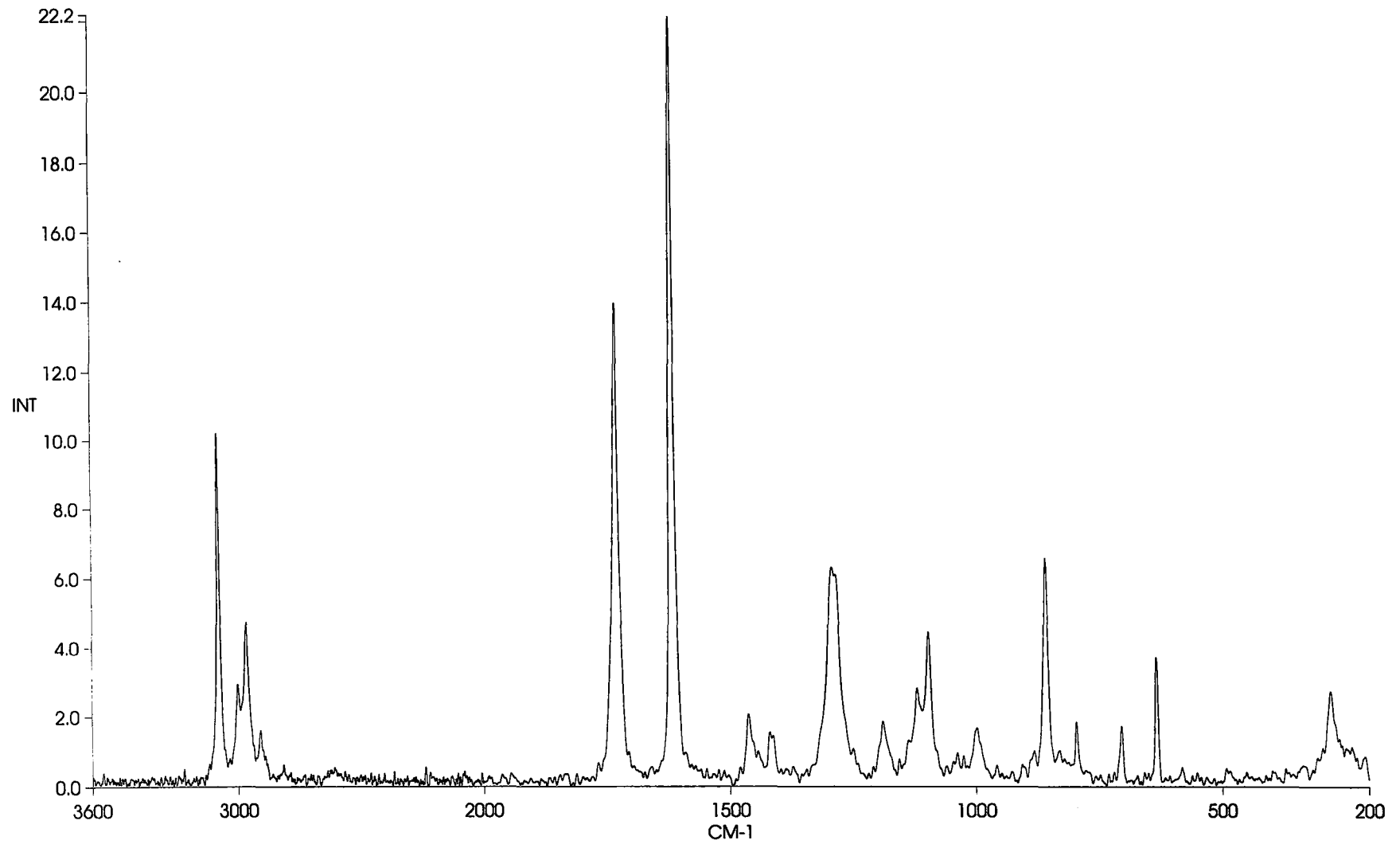
สเปกตรัมของเลนส์นูน stock # G 32,003 ที่ 400 mW สแกน 10 ครั้ง



สเปกตรัมของ PET เมื่อแสงเลเซอร์ผ่านผลึกแยกลำแสง stock # G 30,725
ที่ 400 mW สแกน 10 ครั้ง

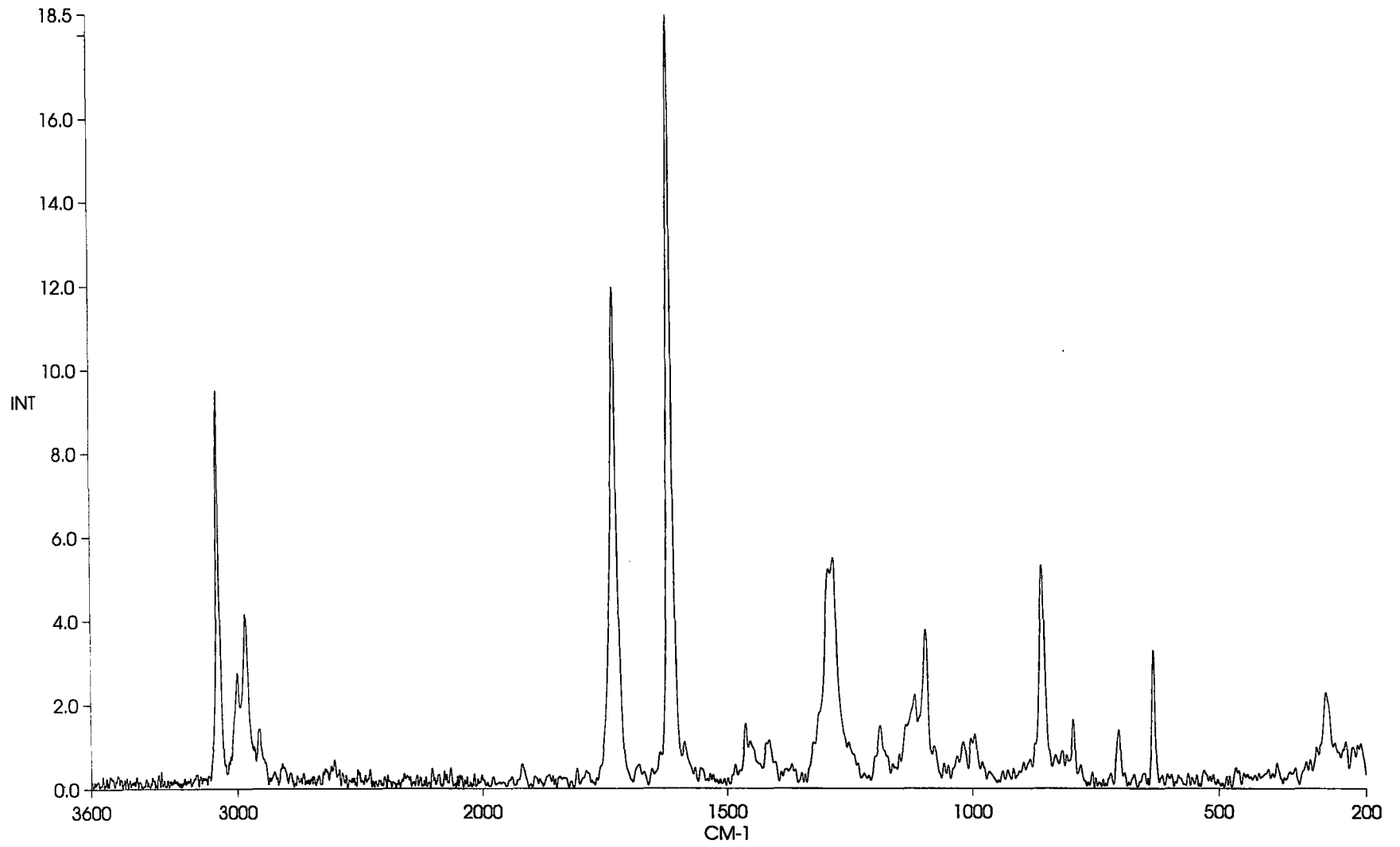


สเปกตรัมของ PET เมื่อแสงเลเซอร์ผ่านผลึกแยกลำแสง stock # G 31,437
ที่ 400 mW สแกน 10 ครั้ง



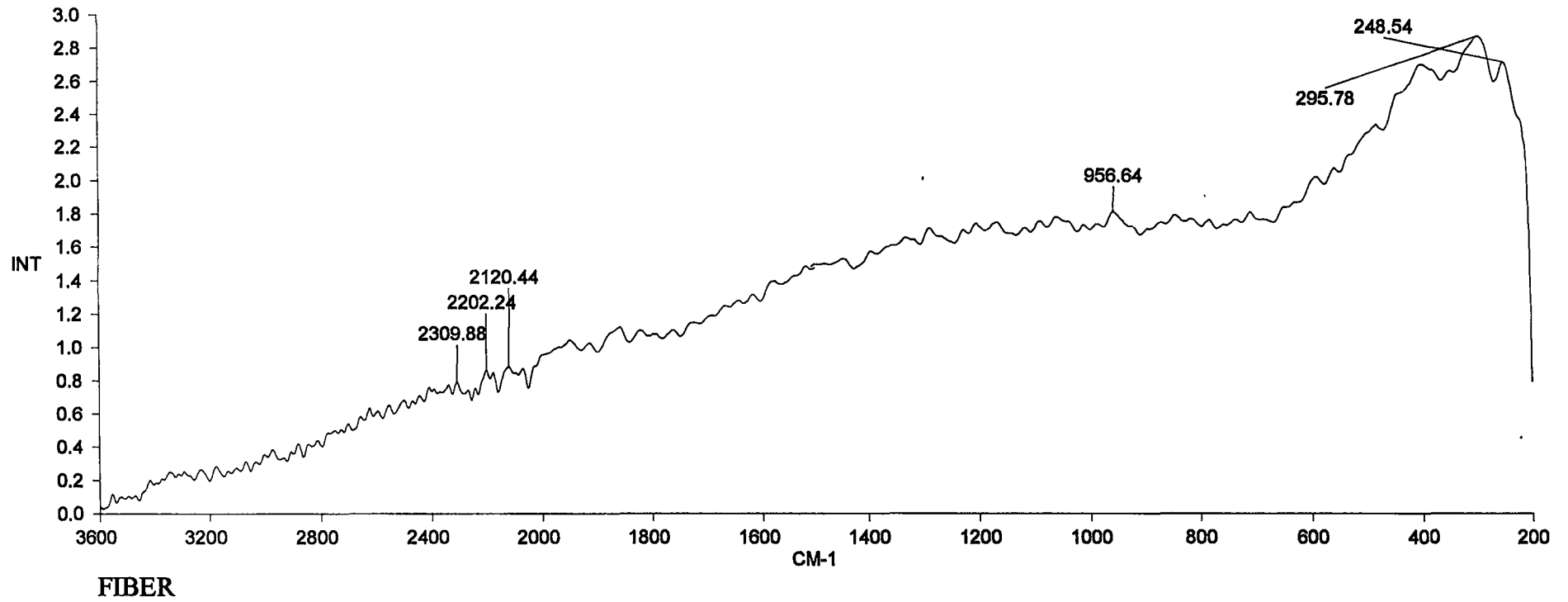
สเปกตรัมของ PET เมื่อแสงรามาผ่านผลึกแยกลำแสง stock # G 30,725

ที่ 400 mW สแกน 10 ครั้ง



สเปกตรัมของ PET เมื่อแสงรามาานผ่านผลึกแยกลำแสง stock # G 31,437

ที่ 400 mW สแกน 10 ครั้ง



สเปกตรัมของเส้นใยนำแสงชนิดแก้วของบริษัท AMP ที่ 400 mW สแกน 70 ครั้ง

บรรณานุกรม

1. อภินันท์ มัณยานนท์. การสื่อสารเส้นใยแสง. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. แม้น อมรสิทธิ์ ,อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 1 หน้า 193-205
3. Barbillat J.,Dhamelincourt P.,Delhaye M.,and Da Silva E. Da.,(Raman Confocal Microprobing, Imaging and Fibre-Optic Remote Sensing: a Further Step in Molecular Analysis) *Journal of Raman Spectroscopy*. 25 : 3-11, 1994
- 4.Williams K.P.J. (Remote Sampling Using a Fibre-Optic Probe in Fourier Transform Raman Spectroscopy) *Journal of Raman Spectroscopy*. 21 : 147-151, 1990
5. Perkin Elmer. *System 2000R NIR FT-Raman User's Manual*. Beaconsfield : Perkin Elmer, 1992
6. Edmund Scientific. *1994 Annual Reference Catalog For Optics, Science And Education*. Barrington : Edmund Scientific, 1994