

การส่งประกายแสงจากผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (แททเลียม) ผ่านเส้นใยแสง



นายธีรพงษ์ ประทุมศิริ

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-589-718-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**TRANSMISSION OF SCINTILLATING LIGHT FROM NaI (TI) CRYSTAL VIA
FIBER OPTICS**



MR. TEERAPONG PRATUMSIRI

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Nuclear Technology
Department of Nuclear Technology**

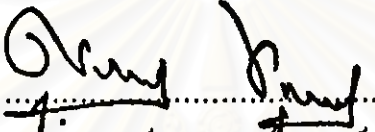
**Graduate School
Chulalongkorn University**

Academic Year 1997

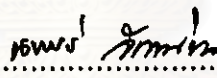
ISBN 974-589-718-3


หัวข้อวิทยานิพนธ์	การส่งประกายแสงจากผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (แท่งเหลี่ยม)
	ผ่านเส้นใยแสง
โดย	นายธีรพงษ์ ประทุมศิริ
ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

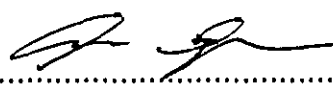

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์สุวิวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทร์ขาว)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)


..... กรรมการ
(อาจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

ธีรพงษ์ ประทุมศิริ : การส่งประกายแสงจากผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) ผ่านเส้นใยแสง
(TRANSMISSION OF SCINTILLATING LIGHT FROM NaI(Tl) CRYSTAL VIA FIBER OPTICS)

อ.ที่ปรึกษา : ผศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.ทับทิม อ่างแก้ว 111 หน้า
ISBN 974-589-718-3

การใช้หัววัดซินทิลเลชันวัดรังสีในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กความเข้มสูง อุณหภูมิสูง และมีการสั่นสะเทือนค่อนข้างมาก มีความจำเป็นต้องป้องกันหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ให้พ้นจากสิ่งรบกวนเหล่านี้ซึ่งมีผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของสัญญาณพัลส์อย่างรุนแรง วิธีหนึ่งที่ช่วยแก้ปัญหานี้ได้ คือ การแยกหัววัดรังสีให้อยู่ในบริเวณวัดรังสี และส่งเฉพาะประกายแสงจากการวัดรังสีของผลึกผ่านอุปกรณ์นำแสงมายังโฟโตแคโทดของหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ที่ตั้งในบริเวณเหมาะสม อย่างไรก็ตาม เนื่องจากประกายแสงของผลึกวัดรังสีในกลุ่มอัลคาไลฮาไลด์ (Alkalide halide) ได้แก่ NaI(Tl) และ CsI(Na) เป็นต้น มีความยาวคลื่นสั้นมากในช่วงรังสีเหนือม่วง (350-480 nm) และมีความเข้มแสงต่ำมาก การส่งประกายแสงระยะไกลจึงต้องออกแบบระบบนำแสงที่มีการสูญเสียความเข้มแสงในช่วงคลื่นนี้ให้น้อยมาก

งานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองส่งประกายแสงจากผลึกวัด NaI(Tl) ขนาด 1x1 นิ้ว ไปยังหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว โดยจัดรูปแบบระบบไว้ 4 แบบ แต่ให้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ 2 รูปแบบคือ 1.) การส่งประกายแสงผ่านเส้นใยแสงชนิดของเหลวเส้นเดียวที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแกนนำแสง 5 มิลลิเมตรแบบเชื่อมต่อตรงด้านปลายทั้งสองด้าน ให้ความสามารถในการส่งประกายแสงได้ไกลกว่า 3 เมตร สำหรับการวัดรังสีแบบนับรวม 2.) การส่งประกายแสงผ่านเส้นใยแสงชนิดของเหลวแบบมัดรวมกัน 5 เส้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ส่งประกายแสงที่ความยาว 1.5 เมตร พบว่าเริ่มให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงานของระบบวัดที่ 662 keV ของ Cs-137 โดยมีประสิทธิภาพการนับรังสีที่พิคพลังงาน 35 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ การส่งประกายแสงตรงระหว่างผลึกวัดรังสีและหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีพื้นที่ส่งประกายแสงเท่ากับพื้นที่แกนนำแสงของเส้นใยแสงและใช้อัตราขยายสัญญาณต่างกัน 5.5 เท่า ระบบส่งประกายแสงที่พัฒนาขึ้นนี้จะช่วยให้มีความยืดหยุ่นในการเคลื่อนไหวของผลึกวัดรังสีขณะใช้งานรวมทั้งป้องกันหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์จากสิ่งรบกวนที่รุนแรงและส่งประกายแสงได้ระยะไกล

ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....
สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....
ปีการศึกษา.....2540.....

ลายมือชื่อนิติ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

C718896 MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY
KEY WORDS:

TRANSMISSION OF SCINTILLATING / NaI(Tl) CRYSTAL / SCINTILLATION DETECTOR / UV
LIGHT / FIBER OPTICS.

TEERAPONG PRATUMSIRI : TRANSMISSION OF SCINTILLATING LIGHT FROM NaI(Tl) CRYSTAL
VIA FIBER OPTICS. THESIS ADVISOR: ASSIST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, THESIS CO-
ADVISOR : ASSIST. PROF. TAPTIM ANGKAEW, Ph.D. 111 pp. ISBN 974-589-718-3

The use of scintillation detector in the vicinity of intense magnetic field, high temperature and moderately high vibration, requires that the photomultiplier tube be protected and isolated from these disturbances which can greatly affect its pulse signals. One method of solving this problem is to separate the detector in the radiation area and only transmit scintillating light through light medium to photocathode of the photomultiplier tube located away from the radiation detection area. However, the wavelength of scintillating light originated within the alkali halide scintillation crystal (NaI(Tl), Cs(Na)) is in the ultraviolet range (350-480 nm) with extremely low intensity. Thus, the transmission of scintillation light via light guide must be designed with minimal loss in its intensity.

This research tested different set up configurations of the transmission of scintillating light from a 1" x1" NaI(Tl) crystal to a photomultiplier tube with a 2" diameter photocathode. A total of 4 arrangements were tested and only 2 configurations were found to provide us with satisfactorily result. 1.) The transmission of scintillating light through a 5 mm core single liquid light guide directly coupled at both ends using an integral counting mode was capable of transmitting scintillating light greater than 3 m. 2.) A direct transmission of scintillating light via a 1.5 m long bundle of 5 liquid light guides to increase its cross-sectional area, was capable of differentiating energy spectrum at 662 keV of Cs-137 with 35% peak efficiency when compared with direct transmission from scintillation crystal to photomultiplier tube collimated to an area equivalent to that of the liquid light guide with 5.5 times difference in gain setting. The developed transmission system for scintillating light will help add the flexibility into the use of detector, protecting photomultiplier tube from source disturbances capability of transmitting scintillating light at a greater distance.

ภาควิชา.....
สาขาวิชา.....
ปีการศึกษา..... 2540

ลายมือชื่อ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ที่กรุณาสละเวลาให้ความรู้คำแนะนำ และทำการแก้ไขจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี และขอขอบพระคุณ อาจารย์ เคโซ ทองอร่ามและอาจารย์ ดร. วิศิษฐ ทวีปริงมีพร ที่ช่วยให้คำแนะนำด้านเทคนิคอันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัย วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือ แนะนำจากเพื่อน น้องๆ ที่ภาควิชานิเทศศาสตร์เทคโนโลยี และยังได้รับการเอื้อเฟื้อในด้านสถานที่ และเครื่องมือจากห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ของภาควิชา - นิเทศศาสตร์เทคโนโลยี ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้าสื่อสาร ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่มีส่วนสำคัญอย่างมากในการทำวิจัยครั้งนี้

อีกทั้งขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ คุณจรินทร์ ศรีมาก ที่เป็นผู้พิมพ์วิทยานิพนธ์ จนสำเร็จสุดวงศ์ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ทฤษฎี	4
2.1 หัววัดรังสีซินทิลเลชัน	4
2.2 หลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์	14
2.3 การส่งประกายแสงย่านรังสีเหนือม่วง	25
2.4 อุปกรณ์ในการส่งผ่านแสง	28
3. การพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	44
3.1 แนวทางในการส่งประกายแสงจากผลึกวัดรังสีผ่านเส้นใยแสง	44
3.2 อุปกรณ์ทดลองผลการสูญเสียความเข้มประกายแสงในอากาศ.....	48
3.3 อุปกรณ์ทดลองผลการสูญเสียความเข้มแสงในวัสดุ	49
3.4 อุปกรณ์วัดการสูญเสียความเข้มแสงในเส้นใยแสง	51
3.5 การออกแบบระบบส่งประกายแสงจากผลึกวัดรังสี-NaI(Tl)ระยะไกล	52
4. ผลการทดลอง	56
4.1 การทดลองผลการสูญเสียความเข้มประกายแสงในอากาศ	56
4.2 การทดลองผลการสูญเสียความเข้มประกายแสงในตัวกลางบางชนิด....	61
4.3 การทดลองผลการสูญเสียความเข้มแสงย่าน UV ในเส้นใยแสง	66
4.4 การทดลองระบบส่งประกายแสงจากผลึกวัด NaI(Tl) ระยะไกล	74

สารบัญ (ต่อ)

บทที่
หน้า

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	81
5.1 สรุปผลการวิจัย	81
5.2 ข้อเสนอแนะ	86
รายการอ้างอิง	87
ภาคผนวก	88
ก. Reference guide of light	89
ข. Optical fibers and cables	91
ค. Light guide lenses	98
ง. Fused silica lenses	100
จ. Fiber optic plate	107
ประวัติผู้เขียน	111

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติของซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอินทรีย์	13
2.2	คุณลักษณะของหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์	19
2.3	การแบ่งย่านช่วงคลื่นรังสีเหมือม่วง	26
2.4	แสดงชนิดของสารที่ทำ core, cladding และค่า N.A.	32
4.1	ผลการสูญเสียความเข้มประกายแสง เมื่อระยะผลึก NaI(Tl) ห่างจาก หลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์และเมื่อแทนที่ด้วยก๊าซฮีเลียม	58
4.2	ผลการสูญเสียความเข้มประกายแสง เมื่อความหนาของแผ่นแก้วกระจก เพิ่มขึ้น	62
4.3	ผลการสูญเสียความเข้มประกายแสง เมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นอะคริลิก.....	64
4.4	ผลการทดลองอัตราสูญเสียความเข้มแสง เมื่อเพิ่มความยาวเส้นใยแสง ชนิดของเหลวที่ความยาวต่างๆ และ glass single fiber bundle ที่ระยะ 1 เมตร.....	68
4.5	ผลการวัดการส่งประกายแสงของเส้นใยแสงชนิดของเหลว	72
4.6	การเพิ่มความเข้มประกายแสง liquid light guide มัดรวมกัน 5 เส้น	78

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน	4
2.2	แสดงแถบพลังงานของสารซินทิลเลเตอร์กับการรวมแสง	6
2.3	การเกิดสัญญาณพัลส์ของหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน	7
2.4	แสดงสัญญาณพัลส์ของหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน	7
2.5	แผนภาพแถบพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ในผลึกอินทรีรี่	10
2.6	ผลึกวัด โซเดียม ไอโอไดด์ (แทลเลียม) แบบต่างๆ	12
2.7	เส้นกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และความเข้มแสงของผลึกวัดรังสี..	14
2.8	โครงสร้างของหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์	15
2.9	รูปแบบของการจัดชุด ไดโนดในหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์	16
2.10	เส้นกราฟการตอบสนองช่วงคลื่นของ PMT และช่วงคลื่นของประกายแสง จากผลึกซินทิลเลเตอร์	17
2.11	การจัดวงจรฐานหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งให้สัญญาณรูปพัลส์	20
2.12	การจัดวงจรฐานหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการวัดสัญญาณต่อเนื่อง.....	21
2.13	เส้นกราฟแสดงผลการรบกวนของสนามแม่เหล็กต่อการทำงานของ PMT.....	24
2.14	แผนภาพสเปกตรัมแสงย่านรังสีเหนือม่วง	25
2.15	แผนภาพการส่งผ่านประกายแสง	26
2.16	ท่อนำแสงชนิดต่างๆ	27
2.17	โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยดัชนีหักเหของแสง	28
2.18	การสะท้อนและการหักเหของแสงที่พื้นผิวตามกฎของสเนลล์	29
2.19	แผนภาพการแสดงผลการสะท้อนของแสง เมื่อรังสีที่ตกกระทบ $\geq \theta_c$	30
2.20	ภาพตัดขวางของลำแสงในท่อนำแสงและการบีบลำแสงเข้าท่อนำแสง ตามกฎของสเนลล์	31
2.21	ลักษณะ “mode” ของเส้นใยแสง	33
2.22	โครงสร้างของเส้นใยแสงดัชนีหลายโหมด	34
2.23	แสดงการส่งคลื่นแสงผ่านเส้นใยแสงแบบมัด	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.24	แสดงภาพและเส้นกราฟการตอบสนองคลื่นแสงของเส้นใยแสงชนิด Random หรือ Incoherent fiber bundles	37
2.25	โครงสร้างของ liquid light guide	38
2.26	เส้นกราฟการส่งผ่านประกายแสงชนิด liquid light guide	39
2.27	โครงสร้างของเส้นใยแสงชนิดสายเดี่ยว (single fiber)	39
2.28	ระบบโฟกัสของเลนส์นูน และเลนส์เว้า	40
2.29	เลนส์นูนแบบหน้าเดียว และสองหน้า ชนิดพิวส์ซิลิกา	42
2.30	เลนส์เว้าแบบหน้าเดียว และสองหน้า ชนิดพิวส์ซิลิกา	42
2.31	เลนส์ทรงกลม	43
3.1	แผนภาพการจัดอุปกรณ์ส่งประกายแสง	44
3.2	อุปกรณ์หลักในการพัฒนาระบบส่งประกายแสงระยะไกล	46
3.3	เส้นใยแสงที่ใช้ในการทดลอง	47
3.4	อุปกรณ์สำหรับการทดลองผลการสูญเสียความเข้มประกายแสง ในอากาศ	48
3.5	อุปกรณ์สำหรับทดลองผลการสูญเสียความเข้มแสงในวัสดุ	49
3.6	อุปกรณ์ประกอบการทดลองผลการสูญเสียความเข้มแสง	50
3.7	แผนภาพการจัดอุปกรณ์วัดการสูญเสียความเข้มแสง	51
3.8	อุปกรณ์การวัดการสูญเสียความเข้มแสงในเส้นใยแสง	51
3.9	แผนภาพระบบส่งประกายแสงระยะไกลด้วยเลนส์	52
3.10	แผนภาพระบบส่งประกายแสงระยะไกลด้วยเส้นใยแสงโดยตรง	53
3.11	แผนภาพระบบส่งประกายแสงระยะไกลด้วยเส้นใยแสงร่วมกับท่อนำแสง...	53
3.12	แผนภาพระบบส่งประกายแสง ผ่านมัลติเส้นใยแสง	54
3.13	ภาพถ่ายของมัลติเส้นใยแสงชนิดของเหลวนำแสง	54
3.14	ชุดอุปกรณ์ทดลองการสูญเสียความเข้มประกายแสง	55
3.15	ชุดอุปกรณ์ทดลองการส่งประกายแสงระยะไกลด้วยเส้นใยแสง.....	55
4.1	แผนภาพอุปกรณ์ทดลองผลการสูญเสียความเข้มประกายแสงในอากาศ.....	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ก. เส้นกราฟแสดงผลการสูญเสียความเข้มประกายแสงเมื่อระยะผลึก NaI(Tl) ห่างจาก PMT	58
4.2 ข. เส้นกราฟแสดงการสูญเสียประสิทธิภาพการวัดรังสีที่ตำแหน่งฟิคพลังงาน	58
4.3 สเปกตรัมของ Cs-137 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มประกายแสง เมื่อระยะผลึก NaI(Tl) และ PMT แปรเปลี่ยนไป พิจารณาจากช่องวิเคราะห์ พลังงาน	59
4.4 สเปกตรัมของ Cs-137 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มประกายแสง เมื่อผลึก NaI(Tl) ห่างจาก PMT ที่ 1 cm. และ 5 cm. ขณะใส่อากาศ ออกด้วยก๊าซฮีเลียม และปล่อยให้มียูเรเนียมอยู่ พิจารณาจากฟิคที่ ตำแหน่งช่องวิเคราะห์พลังงาน	60
4.5 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบผลการสูญเสียความเข้มประกายแสง และในตัวกลาง	61
4.6 ก. เส้นกราฟแสดงการสูญเสียความเข้มประกายแสง เมื่อความหนาของแก้ว กระจกเพิ่มขึ้น	62
4.6 ข. เส้นกราฟแสดงการสูญเสียประสิทธิภาพการวัดรังสีที่ตำแหน่งฟิคพลังงาน	62
4.7 สเปกตรัมของ Cs-137 แสดงความสัมพันธ์การสูญเสียความเข้มประกายแสง และความหนาแก้วกระจก พิจารณาจากตำแหน่งฟิคที่ช่องวิเคราะห์ พลังงาน.....	63
4.8 ก. เส้นกราฟแสดงการสูญเสียความเข้มประกายแสงเมื่อความหนาของแผ่น อะคริลิกเพิ่มขึ้น	64
4.8 ข. เส้นกราฟแสดงการสูญเสียประสิทธิภาพการวัดรังสีที่ตำแหน่งฟิคพลังงาน	64
4.9 สเปกตรัมของ Cs-137 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มประกายแสง และความหนาของแผ่นอะคริลิก พิจารณาจากตำแหน่งช่วงวิเคราะห์ พลังงาน	65
4.10 การทดลองเพื่อหาอัตราการสูญเสียความเข้มแสงช่วงคลื่นอุตราไวโอเล็ต ...	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11	กราฟแสดงอัตราการสูญเสียความเข้มแสงของเส้นใยแสงชนิดของเหลว... 68
4.12	แผนภาพการจัดอุปกรณ์วัดการสูญเสียความเข้มประกายแสงในเส้นใยแสง... 69
4.13	สเปกตรัมของ Cs-137 เมื่อส่งประกายแสงตรงและผ่านเส้นใยแสงชนิด glass single fiber bundle 71
4.14	เส้นกราฟแสดงการสูญเสียความเข้มในเส้นใยแสงชนิดของเหลวที่ความยาว ต่างๆ 72
4.15	สเปกตรัม Cs-137 เมื่อส่งประกายแสงตรงและผ่านเส้นใยแสงชนิด ของเหลว..... 73
4.16	แผนภาพระบบส่งประกายแสงระยะไกลผ่านเส้นใยแสงด้วยวิธีใช้อุปกรณ์ นำแสงช่วย 75
4.17	สเปกตรัมของ Cs-137 เปรียบเทียบระหว่างการส่งประกายแสงผ่าน และไม่ผ่านอุปกรณ์ช่วยนำแสง 76
4.18	แผนภาพระบบส่งประกายแสงระยะไกลผ่านเส้นใยแสงชนิดของเหลว โดยการเพิ่มพื้นที่รับแสงด้วยการมัดเส้นใยแสงรวมกัน 77
4.19	เส้นกราฟแสดงการเพิ่มความเข้มแสงจากระบบส่งประกายแสงจากผลึกควัด รังสีระยะไกลผ่านเส้นใยแสงชนิดของเหลวด้วยการเพิ่มพื้นที่รับแสง 78
4.20	สเปกตรัมของ Cs-137 จากระบบส่งประกายแสงจากผลึกควัดรังสีระยะไกล ผ่านเส้นใยแสงชนิดของเหลวแบบมัดรวมกัน 5 เส้น..... 79
4.21	สเปกตรัมของ Cs-137 จากระบบส่งประกายแสง จากผลึกควัดระยะไกลผ่าน เส้นใยแสงชนิดผลึกเหลว 1 เส้น และ 5 เส้น เปรียบเทียบการส่ง ประกายแสง 81
5.1	แผนภาพการสูญเสียประกายแสงผ่านตัวกลาง 83
5.2	กราฟเปรียบเทียบสเปกตรัมของการส่งประกายแสงผ่านเส้นใยแสง ชนิดต่างๆ 86
5.3	เส้นใยนำแสงแบบ multimode 86