

การพัฒนาหัวข้อวิจัยไว้ต่อตำแหน่งแบบที่อ่อน  
โดยใช้สารเรืองรังสีชนิดเหลว

นายธิตี เรืองสีสำราญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DEVELOPMENT OF A FLEXIBLE POSITION SENSITIVE DETECTOR  
USING LIQUID SCINTILLATOR

Mr. Thiti Rungseesumran

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาหัวข้อวิจัยที่สอดคล้องกับตำแหน่งแบบที่อ่อนโยนโดยใช้สาร เรืองรังสีชนิดเหลว
โดย	นายฉัตร เรืองสีสำราญ
สาขาวิชา	นิเวศวิทยาระบบนิเวศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ เดโช ทองอร่าม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศฤทธิ์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ เดโช ทองอร่าม)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.วิฑิต ฝั่งกัน)

ฉติ เรื่องสีสำราญ : การพัฒนาหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบทออ่อนนโดยใช้สารเรืองรังสีชนิดเหลว. (DEVELOPMENT OF A FLEXIBLE POSITION SENSITIVE DETECTOR USING LIQUID SCINTILLATOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.เดโช ทองอร่าม, 84 หน้า.

ได้พัฒนาหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบทออ่อนนบรรจุสารอินทรีย์เรืองรังสีเหลวที่สามารถโค้งงอได้สำหรับวัดรังสีแกมมา โดยนำทออ่อนนนำแสงชนิดตัวกลางของเหลวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแกน 5 มม. ยาว 550 มม. บรรจุสารอินทรีย์เรืองรังสีเหลวชนิด OptiPhase HiSafe-2 เพื่อประยุกต์เป็นทอสารเรืองรังสี ปลายทอบรรจุสารเรืองรังสีแต่ละด้านจะเชื่อมต่อกับไฟโตแคโทดของหลอดทวิคูณแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้วที่มีคุณลักษณะเหมือนกัน แสงจากปลายทอสารเรืองรังสีจะส่งผ่านอุปกรณ์นำแสงที่ออกแบบขึ้นเพื่อกระจายแสงผ่านของเหลวนำแสงครอบคลุมพื้นที่ไวแสงของหลอดทวิคูณแสง นอกจากนี้ยังได้พัฒนาระบบวัดสัดส่วนขนาดสัญญาณจากวงจรแอมโพลิตูด์ของหัววัดรังสีเพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งที่รังสีตกกระทบตามแนวยาวของทอสารเรืองรังสี

ผลทดสอบสมรรถนะของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบทออ่อนนบรรจุสารเรืองรังสีเหลวร่วมกับระบบวัดสัดส่วนสัญญาณที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีบีตา Sr-90/Y-90 (0.55 MeV/2.28 MeV) และต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 (0.662 MeV) พบว่าหัววัดรังสีสามารถตอบสนองต่อการวัดได้ทั้งรังสีบีตาและแกมมา การหุ้มผนังด้านนอกทอบรรจุสารเรืองรังสีด้วยอลูมิเนียมฟอยล์หนา 48 ไมครอน ช่วยให้ประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาเพิ่มขึ้น 31.03% โดยมีประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาเท่ากับ  $5.98 \times 10^{-3}$ % และผลการตรวจวัดตำแหน่งตกกระทบของลำรังสีบีตาขนาด 5 มม. และรังสีแกมมาขนาด 3 มม. บนแนวทอสารเรืองรังสีในสภาพโค้งงอ พบว่าหัววัดรังสีมีความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งได้ 13.50 ซม. และ 26.60 ซม. (ที่ FWHM) ตามลำดับ จะเห็นว่าหัววัดรังสีสามารถแจกแจงตำแหน่งของรังสีบีตาได้ดีกว่ารังสีแกมมา

ภาควิชา.....วิศวกรรมนิวเคลียร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2555.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# 5270335321 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : POSITION SENSITIVE DETECTOR / SCINTILLATION DETECTOR / FLEXIBLE SCINTILLATION DETECTOR / LIQUID SCINTILLATOR / OPTICAL LIGHT GUIDE

THITI RUNGSEESUMRAN : DEVELOPMENT OF A FLEXIBLE POSITION SENSITIVE DETECTOR USING LIQUID SCINTILLATOR. ADVISOR : ASST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, CO-ADVISOR : DECHO TONG-ARAM, 84 pp.

A flexible liquid organic scintillating filled position sensitive detector for gamma ray detection was developed. The 5 mm diameter and 550 mm length liquid optical light guide filled with OptiPhase Hisafe-2 cocktail was applied as a flexible liquid scintillator tube. Each end of the scintillator tube was coupled with 2 inches diameter photocathode of the 2 equivalent characteristic Photomultiplier tubes (PMTs). The scintillated light from both ends of scintillator tube were transmitted via the designed liquid light guide coupler for light dispersion on coverage photosensitive area of the PMTs. Beside, the signal-division system was also developed to analyze the position of incidence radiation along the scintillation tube.

The performance test of the developed flexible liquid organic scintillating filled position sensitive detector in operation with the signal-division system using Sr-90/Y-90 beta source (0.55 MeV/2.28 MeV) and Cs-137 gamma source (0.662 MeV) showed that the detector could response both beta and gamma radiations. Cladding the outside wall of scintillator tube with 48  $\mu\text{m}$  thickness aluminum foil could 31.03% increase the gamma detection efficiency. The measured gamma counting efficiency was  $5.98 \times 10^{-3}\%$ . The testing of position detection using 5 mm diameter collimated beam of beta and 3 mm diameter collimated beam of gamma sources incidented along the curve shape of scintillation tube gave the position resolution of 13.50 cm and 26.60 cm (FWHM), respectively. The results revealed that the beta position resolution was better than gamma.

Department : Nuclear Engineering ..... Student's Signature .....

Field of Study : Nuclear Technology ..... Advisor's Signature .....

Academic Year : 2012 ..... Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์เดโช ทองอร่าม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้คอยให้คำปรึกษา และให้การสนับสนุนด้านต่างๆ ในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์นิวเคลียร์ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและทุนวิจัยบางส่วนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณมณฑา ปุณณชัยยะ คุณอำไพ สุขบำเพ็ญ คุณธนวรรณ แสงจันทร์ คุณปาพจน์ พรวนต้นไทร และคุณอำนาจ แก้วแสง จากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ผู้ให้คำปรึกษา และให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์การทดลองบางส่วนในงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจ และช่วยเหลือในงานวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ที่คอยให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนทางการเงิน รวมถึงสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ มาโดยตลอด



บทที่	หน้า
2.3.1 เส้นใยเรืองรังสีแบบแกนพลาสติกและแกนของเหลว.....	16
2.3.2 เส้นใยแก้วเรืองรังสี.....	17
2.3.3 สัดส่วนการจับแสง (Light capture fraction).....	18
2.3.4 ผลได้การเกิดแสงเรืองและการกระจายแสง.....	18
2.4 หัววัดเรืองรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อน.....	21
2.4.1 พื้นฐานของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งและระบบวัดตำแหน่งรังสี.....	21
2.4.2 หลักการวัดตำแหน่งรังสีด้วยวิธีวัดสัดส่วนสัญญาณ.....	22
2.4.3 ความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง.....	24
3. การพัฒนาหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนโดยใช้สารเรืองรังสีชนิดเหลว.....	25
3.1 การออกแบบโครงสร้างของระบบวัดรังสีไวต่อตำแหน่ง.....	25
3.2 การออกแบบและสร้างหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อน.....	26
3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างท่ออ่อนเรืองรังสี.....	27
3.2.2 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์เชื่อมต่อปลายท่อเรืองรังสี กับหลอดทวิคูณแสง.....	29
3.3 การออกแบบระบบวัดสัดส่วนสัญญาณ.....	31
3.3.1 วงจรตรวจจับสัญญาณพีลส์ (Peak sample & hold Circuit).....	31
3.3.2 วงจรหารสัญญาณ (Signal Division Circuit).....	35
3.3.3 วงจรเฝ้าตรวจการอิมิตัวของสัญญาณ (Signal watchdog).....	37
3.4 การประกอบระบบวัดรังสีไวต่อตำแหน่ง.....	40
4. การทดลองและผลการทดลอง.....	41
4.1 การทดสอบหัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อนเรืองรังสี.....	41
4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง.....	41
4.1.2 การทดลองและผลการทดลอง.....	42
4.2 การทดสอบระบบวัดสัดส่วนสัญญาณจากหัววัดรังสี.....	47
4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง.....	47
4.2.2 การทดลองและผลการทดลอง.....	48
4.3 การทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ.....	51
4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง.....	51
4.3.2 การทดลองและผลการทดลอง.....	52

บทที่	หน้า
4.4 การทดสอบระบบวัดรังสีไวต่อตำแหน่ง.....	54
4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง.....	54
4.4.2 การทดลองและผลการทดลอง.....	54
4.5 การทดสอบการวัดตำแหน่งรังสีตามแนวโค้ง.....	60
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	62
5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย.....	63
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	64
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	71
ภาคผนวก ค.....	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	84

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ผลได้ของแสงเรืองจากเส้นใยเรืองรังสีเทียบกับ NaI(Tl).....	19
4.1	ผลการทดสอบสัญญาณเอทพุตของวงจรถ่วงจับสัญญาณพัลส์.....	49
4.2	ผลการทดสอบการหารสัญญาณอนาลอกของวงจรถ่วงจับสัญญาณ.....	51
4.3	ผลทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ.....	53

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของหัววัดเรืองรังสีชนิดสารอินทรีย์	4
2.2	รูปแบบระดับพลังงานของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างแบบ $\pi$ -electron	5
2.3	โครงสร้างของหลอดทวิคูณแสง	9
2.4	แผนภาพการทำงานของหลอดทวิคูณแสง	10
2.5	หลอดทวิคูณแสงแบบแสงเข้าด้านหน้า (ก) และด้านข้าง (ข)	10
2.6	แผนภาพการไปป์สวจนหลอดทวิคูณแสงแบบกราวด์แอโนด	11
2.7	แผนภาพการไปป์สวจนหลอดทวิคูณแสงแบบกราวด์แคโทด	11
2.8	ย่านตอบสนองของความยาวคลื่นแสงของไฟโตแคโทดแต่ละชนิด	11
2.9	โครงสร้างของส่วนทวีปริมาณอิเล็กทรอนิกส์แบบต่างๆ ของหลอดทวิคูณแสง	12
2.10	แสดงการหักเหและการสะท้อนกลับหมดของแสง	13
2.11	การเดินทางของแสงในท่อนำแสง	14
2.12	โครงสร้างของท่อนำแสงชนิดของเหลว	14
2.13	เปอร์เซ็นต์ส่งผ่านแสงของท่อนำแสงแต่ละชนิดในย่านความยาวคลื่นต่างๆ	15
2.14	ภาพตัดขวางแสดงการเคลื่อนที่ของแสงเรืองในท่อเส้นใยนำแสง	15
2.15	ลักษณะของเส้นใยเรืองรังสีแกนเดี่ยว ที่ประกอปกันแบบ double-layer ribbon	17
2.16	ลักษณะของเส้นใยเรืองรังสีชนิดท่อแก้วหลายแกนที่นำมามัดรวมกัน	17
2.17	ลักษณะการเคลื่อนที่ของแสงแบบ “Meridional rays” และแบบ “Skew rays”	18
2.18	สเปกตรัมของแสงเรืองที่ส่งผ่านเส้นใยเรืองรังสีที่มีความยาวต่างกัน	20
2.19	หัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อน (ก) ชนิดมัดไฟเบอร์เรืองรังสี (ข) ชนิดเติมสารเรืองรังสีเหลว	20
2.20	เส้นกราฟเปรียบเทียบผลการวัดปริมาณรังสีของหัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อน	21
2.21	แผนภาพระบบวัดรังสีของเครื่อง LSC	22
2.22	แผนภาพระบบวัดรังสีของหัววัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อน บรรจุสารเรืองรังสีเหลว	22
2.23	แผนภาพหลักการแจกแจงโดยวิธีวัดสัดส่วนของปริมาณประจุ	23
2.24	การวัดความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งของหัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่ง	24
3.1	แผนภาพโครงสร้างของระบบวัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อน	25

ภาพที่	หน้า
3.2	ลักษณะและส่วนประกอบของท่อนำแสง..... 28
3.3	การดัดแปลงท่อนำแสง (ก) การปิดปลายท่อนำแสง (ข) ท่อนำแสงที่ปิดปลาย เรียบร้อยแล้ว (ค) ท่อนำแสงที่พันทับด้วยเทปทึบแสง..... 28
3.4	(ก) หลอดทวิคูณแสงและ (ข) ฐานหลอดทวิคูณแสงที่ใช้..... 28
3.5	แผนภาพแสดงวงจรไบอัสหลอดทวิคูณแสงแบบกราวด์แคโทด..... 29
3.6	ภาพเขียนแบบอุปกรณ์เชื่อมต่อกับปลายท่อเรืองรังสีกับหลอดทวิคูณแสงออกแบบขึ้น..... 29
3.7	การประกอบอุปกรณ์เชื่อมต่อด้านหลอดทวิคูณแสง..... 30
3.8	การประกอบอุปกรณ์เชื่อมต่อด้านปลายท่อเรืองรังสี..... 31
3.9	แผนภาพวงจรภายในของไอซี PKD01..... 32
3.10	แผนภาพการต่อวงจรแบบ Non-Inverting ที่มีอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 1..... 32
3.11	เปรียบเทียบสัญญาณ (ก) สัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตจากวงจรขนาดสัญญาณ (ข) สัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตลอจิกจากวงจรตรวจพบยอดสัญญาณ..... 33
3.12	ลักษณะสัญญาณพัลส์ขาหลังที่ได้จากเอาต์พุต (ขา12)..... 33
3.13	แผนภาพTiming Diagram ของระบบวัดสัดส่วนสัญญาณที่ออกแบบขึ้น..... 34
3.14	แผนภาพวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ที่ออกแบบขึ้น..... 35
3.15	แผนภาพโครงสร้างและการจัดวงจรแบบหารสัญญาณของไอซี AD633..... 36
3.16	แผนภาพวงจรหารสัญญาณที่ออกแบบขึ้น..... 37
3.17	แผนภาพวงจรเฝ้าตรวจการล้มตัวของสัญญาณ (Signal watchdog) ที่ออกแบบขึ้น..... 37
3.18	ระบบวัดสัดส่วนสัญญาณที่ได้แบบและสร้างขึ้น..... 38
3.19	แผนภาพวงจรวัดสัดส่วนสัญญาณที่ได้แบบและสร้างขึ้น..... 39
3.20	ระบบวัดสัดส่วนสัญญาณเต็มระบบที่พัฒนาขึ้น..... 40
4.1	แผนภาพระบบวัดรังสีเพื่อทดสอบหัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อนแกนเดี่ยว..... 42
4.2	การจัดระบบวัดรังสีเพื่อทดสอบหัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อนแกนเดี่ยว..... 42
4.3	กราฟเปรียบเทียบโปรไฟล์ค่านับรังสีแกมมาและบีตาของหัววัดเรืองรังสี..... 43
4.4	ผลการทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อรังสีแกมมาและรังสีบีตา..... 44
4.5	เปรียบเทียบโปรไฟล์ค่านับรังสีตามระยะทางของต้นกำเนิดรังสี Cs-137..... 45
4.6	เปรียบเทียบโปรไฟล์ค่านับรังสีตามระยะทางของต้นกำเนิดรังสี Sr-90..... 45
4.7	แผนภาพการจัดตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเพื่อหาประสิทธิภาพของท่ออ่อนเรืองรังสี..... 46
4.8	การจัดตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเพื่อหาประสิทธิภาพของท่ออ่อนเรืองรังสี..... 46
4.9	เปรียบเทียบโปรไฟล์ค่านับรังสีแกมมาที่ได้จากปลายท่ออ่อนเรืองรังสีสองด้าน..... 47

ภาพที่	หน้า	
4.10	แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์.....	48
4.11	การจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์.....	48
4.12	รูปสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์.....	49
4.13	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรตรวจจับสัญญาณทั้งสองด้าน.....	49
4.14	แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบการทำงานของวงจรหารสัญญาณ.....	50
4.15	การจัดอุปกรณ์ทดสอบการทำงานของวงจรหารสัญญาณ.....	50
4.16	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรหารสัญญาณ.....	51
4.17	แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ.....	52
4.18	การจัดอุปกรณ์ทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ.....	52
4.19	ผลการทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ.....	53
4.20	กราฟความเป็นเชิงเส้นของการวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ.....	53
4.21	แผนภาพการจัดระบบวัดรังสีเพื่อทำการทดสอบหัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่ง.....	55
4.22	การจัดระบบวัดรังสีเพื่อทำการทดสอบหัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่ง.....	55
4.23	โปรไฟล์วัดตำแหน่งรังสีปีตาจาก Sr-90/Y-90 พร้อมกัน 2 จุด.....	56
4.24	ความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งของหัววัดรังสีสำหรับต้นกำเนิดรังสี Sr-90.....	56
4.25	โปรไฟล์วัดตำแหน่งรังสีปีตาแต่ละตำแหน่งตามระยะทาง.....	57
4.26	กราฟความเป็นเชิงเส้นจากการวัดตำแหน่งรังสีปีตาตามระยะทาง.....	57
4.27	ความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งของหัววัดรังสีสำหรับต้นกำเนิดรังสี Cs-137.....	58
4.28	โปรไฟล์วัดตำแหน่งรังสีแกมมาแต่ละตำแหน่งตามระยะทาง.....	59
4.29	กราฟความเป็นเชิงเส้นจากการวัดตำแหน่งรังสีแกมมาตามระยะทาง.....	59
4.30	การจัดระบบวัดรังสีเพื่อทำการทดสอบหัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่งในแนวโค้ง.....	60
4.31	การจัดระบบวัดรังสีเพื่อทำการทดสอบหัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่ง ในแนวโค้งรูปตัวยู.....	61
4.32	โปรไฟล์วัดตำแหน่งรังสีปีตาแต่ละตำแหน่งตามแนวโค้ง 90 องศา.....	61
4.33	โปรไฟล์วัดตำแหน่งรังสีปีตาแต่ละตำแหน่งตามแนวโค้งรูปตัวยู.....	61

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หัววัดเรืองรังสีที่ส่วนไวรังสีมีสถานะเป็นผลึกของแข็งและของเหลว นั้น ได้มีการนำมาใช้ในงานวัดรังสีที่ต้องการความไวสูงจนเป็นที่คุ้นเคยมานาน เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่าหัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซ แต่ในกรณีที่ต้องการความอ่อนตัวของส่วนวัดรังสีในบริเวณตรวจวัดที่มีรูปทรงเรขาคณิตแบบโค้งงอและมีระยะแนวลำรังสีกว้าง โครงสร้างของหัววัดเรืองรังสีและเทคนิคการวัดรังสีจากสารเรืองรังสีแบบผลึกดั้งเดิมไม่สามารถตอบสนองได้ จึงได้มีการพัฒนาหัววัดเรืองรังสีที่ส่วนไวรังสีเป็นสารอินทรีย์ทั้งสถานะของแข็งและของเหลว ให้มีลักษณะเป็นท่อยาวและมีความอ่อนตัวเพื่อการโค้งงอได้ โดยมีชื่อทางการค้าว่า “หัววัดเรืองรังสีแบบอ่อนตัว (Flexible detector)” ได้แก่ หัววัดเรืองรังสีแบบอ่อนตัวชนิดมัดไฟเบอร์ (Scintillating fiber bundle detector) และหัววัดเรืองรังสีแบบอ่อนตัวชนิดบรรจุสารเรืองรังสีเหลวในท่อ (Scintillating fill fluid detector) [1] ซึ่งสามารถเลือกสารเรืองรังสีให้เหมาะกับการวัดรังสีชนิดต่างๆ เช่น บีตา แกมมา เอกซ์ และนิวตรอน เป็นต้น หัววัดเรืองรังสีแบบอ่อนตัวชนิดมัดไฟเบอร์ดังกล่าวมักจะพบการใช้วัดระดับของเหลวในงานอุตสาหกรรมและงานวัดรังสีบริเวณที่มีความลึกหรือมีแนวกว้างมาก

ปัจจุบันหัววัดเรืองรังสีแบบอ่อนตัวชนิดบรรจุสารอินทรีย์เรืองรังสีเหลวในท่ออ่อน เริ่มเข้ามามีบทบาทในงานวัดรังสีมากขึ้นเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการวัดรังสีสูงกว่าหัววัดเรืองรังสีแบบอ่อนตัวชนิดมัดไฟเบอร์ แต่ยังมีราคาสูงมากและออกแบบเพื่อใช้เฉพาะงาน อีกทั้งยังไม่มีข้อมูลทางเทคนิคมากนัก จึงมีความสนใจในการพัฒนาหัววัดเรืองรังสีแบบอ่อนตัวชนิดบรรจุสารอินทรีย์เรืองรังสีเหลวในท่ออ่อนที่มีราคาประหยัด โดยปรับปรุงโครงสร้างจากวัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ง่ายสามารถถ่ายเปลี่ยนสารเรืองรังสีเหลวและจัดระบบนำแสงที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อศึกษาข้อมูลทางเทคนิคและพัฒนาให้เป็นหัววัดเรืองรังสีแบบอ่อนตัวชนิดไวต่อตำแหน่งแบบ 1 มิติ (One dimensional detector) ซึ่งสามารถบอกตำแหน่งที่รังสีตกกระทบบนแนวท่อสารเรืองรังสีชนิดเหลวซึ่งโค้งงอได้ สำหรับประยุกต์ในการวัดการกระจายตัวของสารกัมมันตรังสีรังสีบริเวณกว้างและการวัดความสม่ำเสมอของบริเวณพื้นที่ครอบคลุมของลำรังสี เป็นต้น

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อน โดยใช้สารเรืองรังสีชนิดเหลวที่สามารถโค้งงอได้ สำหรับวัดรังสีแกมมา

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบที่อ่อนนโดยใช้สารเรืองรังสีเหลวชนิด Optiphase Hisafe บรรจุในท่อนำแสง
2. ออกแบบระบบวัดตำแหน่งรังสีจากหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น พร้อมทั้งปรับปรุงประสิทธิภาพการวัดรังสี
3. ทดสอบความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง และเก็บข้อมูลตำแหน่งวัดรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ออกแบบโครงสร้างหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบที่อ่อนนโดยใช้สารเรืองรังสีเหลว ชนิด Optiphase Hisafe
3. ทดสอบลักษณะสัญญาณในการวัดรังสีแกมมา พร้อมทั้งปรับปรุงประสิทธิภาพในการนำแสงสู่หลอดทวีคูณแสง
4. ออกแบบระบบวัดที่เหมาะสมในการวัดตำแหน่งรังสีของหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น พร้อมทั้งปรับปรุงประสิทธิภาพการวัดรังสี
5. ทดสอบความไวต่อตำแหน่ง และทดสอบการเก็บข้อมูลตำแหน่งวัดรังสีจากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา
6. ประเมินความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งของหัววัดรังสีและระบบที่พัฒนาขึ้น
7. สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้หัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบที่อ่อนนบรรจุเรืองรังสีชนิดเหลวที่สามารถโค้งงอได้ สำหรับวัดรังสีแกมมา และมีความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งที่รังสีแกมมาตกกระทบ

### 1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. อีรพงษ์ ประทุมศิริ (2540) [2] ทำวิจัยเรื่อง “การส่งประกายแสงจากผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) ผ่านเส้นใยนำแสง” งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาการส่งประกายแสงจากผลึกซินทิลเลชันชนิด โซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) ผ่านเส้นใยนำแสง เพื่อเลี่ยงผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่จะรบกวนการทำงานของหลอดทวีคูณแสง สำหรับ

กรณีที่ต้องการวัดรังสีในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กสูง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการวัดรังสี ที่ไม่ต้องการแจกแจงพลังงาน

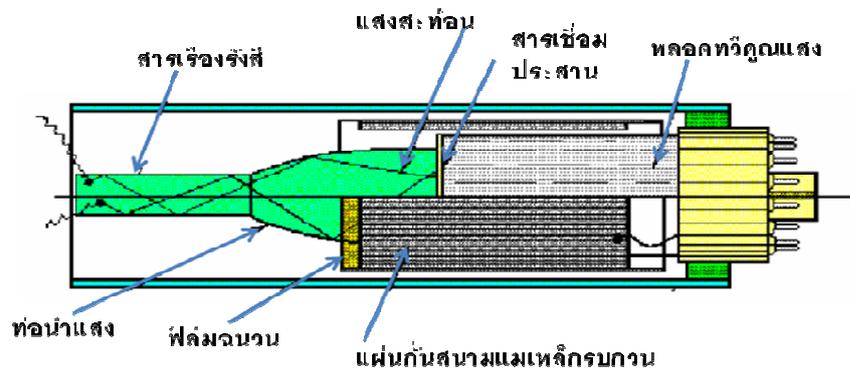
2. อติศักดิ์ ปัญญาบุษ (2541) [3] ทำวิจัยเรื่อง “การพัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ชนิดพรอพอร์ชันแนลก๊าซไหลที่ไวต่อตำแหน่งราคาประหยัด” งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ชนิดพรอพอร์ชันแนลก๊าซไหลที่ไวต่อตำแหน่ง สำหรับใช้วัดตำแหน่งการไอออไนซ์ของรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ง่าย แคโทดของหัววัดรังสีเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิม 304 ทรงกระบอกกลม ใช้แผ่นไมลาร์ เป็นหน้าต่างรับรังสี ส่วนแอโนดความดันทานสูงซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของหัววัดรังสีที่ไวต่อตำแหน่งทำจากสายไนลอน เคลือบด้วยผงคาร์บอนละเอียด หัววัดรังสีมีความยาว 30 cm ผลทดสอบการใช้ลำรังสีจากต้นกำเนิดรังสี Fe-55 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร สามารถแจกแจงตำแหน่งได้ 1 mm (FWHM)
3. Jun Kawarabayashi, Ryoji Mizuno, Daisuke Inui, Kenichi Watanabe and Tetsuo Iguchi, *Member, IEEE* (2004) [4] ทำการวิจัยเรื่อง “Potential on Liquid Light Guide as Distributed Radiation Sensor” งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบวัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่งโดยการนำท่อนำแสงชนิดสารเหลวมาประยุกต์ใช้เป็นโครงสร้างหัววัดรังสีความยาว 2 เมตร เพื่อลดข้อจำกัดของหัววัดรังสีที่ทำจากไฟเบอร์นำแสง ผลทดสอบการใช้ลำรังสีจากต้นกำเนิดรังสี Co-60 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สามารถแจกแจงตำแหน่งได้ 9.6 เซนติเมตร จากยอดพีคถึงยอดพีค
4. Mitsunobu Hayashi, Jun Kawarabayashi, Keisuke Asai, Haruki Iwai, Yuri Akagawa and Tetsuo Iguchi (2007) [5] ทำการวิจัยเรื่อง “Position-Sensitive Radiation Detector With Flexible Light Guide and Liquid Organic Scintillator to Monitor Distributions of Radioactive Isotopes” งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบวัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่ง โดยหัววัดรังสีทำจากการบรรจุสารเรืองรังสีเหลวชนิด BC-517S เข้าไปในท่อนำแสงชนิดสารเหลวเพื่อใช้สำหรับวัดรังสีในบริเวณที่มีปริมาณรังสีสูง ระบบวัดตำแหน่งใช้เทคนิควัดโรสส์ไทม์ โดยได้ทดลองวัดอนุภาคนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย YAYOI หัววัดรังสีมีความยาว 10 เมตร สามารถแจกแจงตำแหน่ง 50 เซนติเมตร จากยอดพีคถึงยอดพีค

## บทที่ 2

### หัววัดเรืองรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อน

#### 2.1 หัววัดเรืองรังสีชนิดสารอินทรีย์ (Organic Scintillation Detector)

โครงสร้างของหัววัดเรืองรังสีชนิดสารอินทรีย์ประกอบด้วยส่วนสำคัญหลัก คือ ตัวกลางวัดเรืองรังสีชนิดสารอินทรีย์เรืองรังสีเชื่อมต่อกับหลอดทวิคูณแสงดังแสดงในแผนภาพที่ 2.1 โดยสารเรืองรังสีจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานของรังสีที่ดูดกลืนในตัวกลางเป็นแสงที่มีความเข้มแสงเป็นสัดส่วนกับพลังงานและหลอดทวิคูณแสงทำหน้าที่เปลี่ยนแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ขนาดความสูงของพัลส์เป็นสัดส่วนกับความเข้มแสง จากแผนภาพแสดงให้เห็นการส่งแสงเรืองจะส่งผ่านท่อนำแสงเพื่อช่วยกระจายแสงให้เต็มพื้นที่ไวแสงของหลอดทวิคูณแสงตามหลักการสะท้อนของแสงโดยการเชื่อมต่อกันด้วยสารเหลวส่งผ่านแสง (Fluid coupling) บริเวณหลอดทวิคูณแสงต้องห่อหุ้มด้วยวัสดุกันสนามแม่เหล็กบริเวณก่อนที่จะหุ้มเปลือกครอบผนึกสนิทเพื่อป้องกันแสงและความชื้นจากสภาพแวดล้อมภายนอก



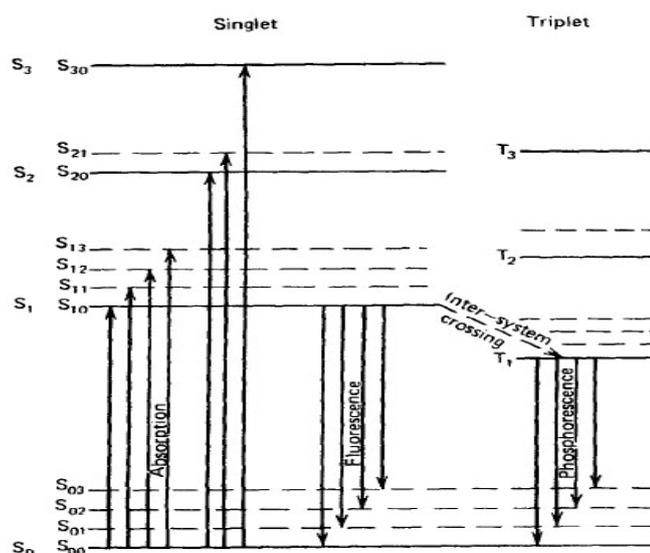
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของหัววัดเรืองรังสีชนิดสารอินทรีย์

##### 2.1.1 กลไกการเรืองแสงของสารอินทรีย์ (Scintillation mechanism in organic) [6]

โมเลกุลของสารอินทรีย์เรืองรังสีจะมีโครงสร้างของชั้นพลังงานเป็นแบบ  $\pi$ -electron ดังแผนภาพในภาพที่ 2.2 โดย  $S_0, S_1, S_2, \dots$  เป็นระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนที่มีสปิน (spin) = 0 และ  $T_1, T_2, T_3, \dots$  เป็นระดับชั้นพลังงานที่มีสปิน = 1 ซึ่งระดับพลังงานระหว่าง  $S_0$  และ  $S_1$  จะมีพลังงานห่างกันประมาณ 3 - 4 eV และแต่ละระดับพลังงาน เรียกว่า "Vibrational level" จะประกอบด้วยระดับชั้นพลังงานย่อยที่มีช่วงห่างกันประมาณ 0.15 eV และระดับ  $S_{00}$  จะแทนระดับ Vibrational level ต่ำสุดที่สถานะพื้น (Ground state)

เมื่อสารเรืองรังสีชนิดสารอินทรีย์ได้รับการดูดกลืนพลังงานจากรังสี จะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนระดับพลังงานในโมเลกุลเดี่ยวของสารอินทรีย์และเปล่งแสงเรืองออกมา โดยการเรืองแสงจะไม่ขึ้นกับสถานะของสารอินทรีย์นั้นๆ เช่น แอนทราซีน (Anthracene) จะเรืองแสงไม่ว่าจะอยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง (Solid polycrystalline material) ไอรอะเหยหรืออยู่ในสภาพของของเหลว คุณสมบัตินี้แตกต่างไปจากสารเรืองรังสีชนิดผลึกสารอนินทรีย์ (Inorganic scintillator) ซึ่งต้องอยู่ในสภาพที่เป็นผลึกเฉพาะเท่านั้นจึงจะเรืองแสงได้

ในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้อง โมเลกุลเกือบทั้งหมดของสารเรืองรังสีชนิดสารอินทรีย์จะมีพลังงานอยู่ในระดับ  $S_{00}$  เมื่อได้รับการถ่ายเทพลังงานจลน์จากรังสี อิเล็กตรอนจะถูกยกกระดับพลังงานให้สูงขึ้น (แสดงโดยเส้นตรงที่ทิศทางลูกศรขึ้น) การเปลี่ยนระดับพลังงานให้สูงขึ้นจากระดับ  $S_0$  ไปยังระดับ  $S_1, S_2$  และ  $S_3$  สถานะนี้จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ( $10^{-12}$  วินาที) จากนั้นอิเล็กตรอนที่ยกระดับพลังงานสูงขึ้นจะลดระดับมารวมกันอยู่ที่  $S_{10}$  และลดพลังงานจากระดับ  $S_{10}$  ลงมาสู่สภาวะพื้นพร้อมทั้งปล่อยแสงเรือง (แสดงโดยเส้นตรงที่ทิศทางลูกศรลง) ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 รูปแบบระดับพลังงานของโมเลกุลสารอินทรีย์มีโครงสร้างแบบ  $\pi$ -electron [6]

ซึ่งสารเรืองรังสีชนิดสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะมีเวลาของการสลายตัวให้แสงเรือง ในช่วงสั้นๆ (Prompt fluorescence) ระดับนาโนวินาที ( $10^{-9}$  วินาที) โดยให้ความยาวคลื่นแสงในย่านประมาณ 300-400 nm หรือในย่านแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) แต่จะมีอิเล็กตรอนบางส่วนที่ข้ามไปที่ระดับของสปิน 3 และก่อให้เกิดแสงเรืองนานออกไป (Phosphorescence) ถ้าให้  $\tau$  เป็นเวลาในการสลายแสง ดังนั้นความเข้มแสงเรือง (I) ที่เวลา (t) ใดๆ จะมีสมการเป็น [6]

$$I = I_0 e^{-t/\tau} \dots\dots\dots (2.1)$$

ประสิทธิภาพของการแปลงผันพลังงานของรังสีเป็นแสงเรืองขึ้นกับกลไกภายในของการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนลงสู่ระดับพื้นและการสูญเสียความเข้มแสงจากผลการยับยั้งการเกิดแสงเรือง (Quenching) โดยเฉพาะสารอินทรีย์ชนิดของเหลวที่มีสารละลายเจือปนกันอยู่

## 2.1.2 ชนิดของสารอินทรีย์เรืองรังสี (Type of organic scintillators) [6]

สารอินทรีย์เรืองรังสีที่ดีจะต้องมีประสิทธิภาพในการเรืองแสงและแสงที่เปล่งออกมาจะต้องมีสเปกตรัมของความยาวคลื่นที่ตรงกับความไวของโฟโตแคโทดของหลอดทวีคูณแสง มีเวลาของการสลายตัวของแสงเรืองสั้น แบ่งออกเป็น

### 2.1.2.1 สารอินทรีย์บริสุทธิ์ในรูปผลึก (Pure organic crystal)

สารเรืองรังสีชนิดสารอินทรีย์บริสุทธิ์ในรูปผลึก เป็นสารประกอบอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic hydrocarbon) โครงสร้างห่วงเบนซีน (Benzene) มีการสลายแสงในช่วงเวลาไม่กี่นาโนวินาที พบว่ามี 2 ชนิด คือ แอนทราซีน (Anthracene) ( $C_{14}H_{10}$ , decay time ประมาณ 30 ns) และ สติลเบิน (Stilbene) ( $C_{14}H_{12}$ , decay time ประมาณ 4.5 ns) วัสดุทั้ง 2 ชนิดแต่กวางไม่สามารถทำให้มีขนาดใหญ่ได้ สำหรับแอนทราซีนจะให้ประสิทธิภาพแสงเรืองต่อหน่วยพลังงานสูงสุดในบรรดาสารอินทรีย์ด้วยกันจึงใช้เป็นฐานเปรียบเทียบความเข้มแสงเรือง

### 2.1.2.2 สารอินทรีย์ในรูปของเหลว (Liquid organic solution)

สารเรืองรังสีชนิดสารอินทรีย์ในรูปของเหลวทนต่อความเสียหายจากปริมาณรังสีสูง (ระดับ  $10^5$  Gy) มีส่วนผสมที่สำคัญ คือ สารเรืองรังสี (Solute, Fluor) หรือตัวถูกละลายและสารทำละลาย (Solvent) หรือตัวทำละลาย ซึ่งส่วนผสมอาจจะเป็นตัวถูกละลายและตัวทำละลายอย่างละ 1 หรือ 2 ชนิด โดยชนิดที่ 1 จะเรียกว่าสารปฐมภูมิและชนิดที่ 2 เรียกว่าสารทุติยภูมิ ปัจจุบันมีการผลิตสารละลายเรืองรังสีสำเร็จรูปพร้อมใช้งาน เรียกว่า ซินทิลเลชันค็อกเทล (Scintillation cocktail) โดยส่วนผสมของสารอินทรีย์เรืองรังสีในรูปของเหลวดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

ก) ตัวถูกละลายปฐมภูมิ (Primary solute) เป็นสารเรืองรังสีปริมาณเล็กน้อยที่ละลายอยู่ในตัวทำละลาย ทำหน้าที่รับการถ่ายเทพลังงานจากตัวทำละลาย ก่อภาวะกระตุ้นและเปล่งแสงเรือง ตัวถูกละลายปฐมภูมิที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ PPO (2,5-diphenyloxazole) ซึ่งให้พีค (Peak) แสงเรืองที่ความยาวคลื่น 380 นาโนเมตร ใกล้กับย่านตอบสนองของความยาวคลื่นของโฟโตแคโทดของหลอดทวีคูณแสง ส่วน PMP (1-phenyl-3-mesityl-2-pyrazoline) มีประสิทธิภาพการเรืองแสงดี ให้พีคของความยาวคลื่นมากกว่า 400 nm เวลาของการสลายตัวของแสงเรืองสั้นและละลายในโทลูอีน (Toluene) ได้ดี

ข) ตัวถูกละลายทุติยภูมิ (Secondary solute) เป็นสารเรืองรังสีที่นำมาใช้เมื่อตัวถูกละลายปฐมภูมิดูดกลืนโฟตอนและให้แสงเรืองที่มีความยาวคลื่นไม่เหมาะสม หากใช้เฉพาะตัวถูกละลายปฐมภูมิแล้วจะเกิดการดูดกลืนแสงในตัว (Self quenching) ตัวถูกละลายทุติยภูมิจะทำหน้าที่เปลี่ยนความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกจากตัวถูกละลายปฐมภูมิ ให้อยู่ในช่วงความไวของโฟโตแคโทดเพื่อให้ประสิทธิภาพวัดเพิ่มขึ้น ตัวถูกละลายทุติยภูมิที่นิยมใช้กันทั่วไปมีอยู่หลายชนิด เช่น POPOP (1,4-bis-2(4-methyl-5-phenyloxazole)-benzene) และ bis-MSB (p-bis(o-methylstryl)-benzene)

ค) ตัวทำละลาย (Solvent) ตัวทำละลายจะทำหน้าที่ละลายสารเรืองรังสีและรับพลังงานที่ถ่ายเทจากรังสี ดังนั้นตัวทำละลายที่ดีจะมีคุณสมบัติดูดกลืนพลังงานจากรังสีได้ดี และสามารถที่จะถ่ายเทพลังงานนี้ไปยังสารเรืองรังสีหรือตัวถูกละลายปฐมภูมิ ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ โทลูอีน ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงและราคาถูก แต่ก็มีข้อเสียที่เป็นสารอันตราย ติดไฟได้ง่าย และละลายกับตัวอย่างที่มีน้ำได้น้อย สำหรับตัวทำละลายที่ผสมเข้ากับน้ำดี คือ ซูดอคูมิน (pseudocumene, (1,2,4-trimethylbenzene)) และไดออกซิน (dioxane) ซึ่งมีความสามารถในการถ่ายเทพลังงานได้น้อยกว่าโทลูอีน สำหรับพาราไดออกซิน (paradioxane) ก็สามารถผสมเข้ากับน้ำได้ดี แต่เป็นสารพิษและติดไฟง่าย

#### 2.1.2.3 สารอินทรีย์เรืองรังสีในรูปพลาสติก (Plastic scintillator)

สารเรืองรังสีชนิดสารอินทรีย์ที่เป็นสารละลายในส่วนผสมพอลิเมอร์ที่แข็งตัวได้สามารถทนต่อปริมาณรังสีได้ค่อนข้างสูง (ระดับ  $10^3$ - $10^4$  Gy) ได้แก่ สารละลายเรืองรังสีในโมโนเมอร์สไตรีน (Styrene monomer) เมื่อก่อพอลิเมอร์จะกลายเป็นพลาสติกแข็ง และสารในรูปอื่น เช่น แมทริกซ์ของ Polyvinyl-toluene หรือ Polymethyl methacrylate เป็นต้น เนื่องจากสารอินทรีย์ในรูปพลาสติกสามารถขึ้นรูปและปรับแต่งรูปทรงได้ง่าย จึงสามารถผลิตในรูปแท่งและมัดไฟเบอร์ที่อ่อนตัวได้ และสามารถทำให้เป็นแผ่นขนาดขนาดใหญ่ได้ จึงมีการนำมาใช้งานมากแต่ต้องคำนึงถึงการลดทอนแสงเรืองที่ส่งผ่านตามระยะทางไปยังหลอดทวีคูณแสง

#### 2.1.2.4 สารอินทรีย์ในรูปฟิล์มบาง (Thin film scintillator)

สารเรืองรังสีชนิดสารอินทรีย์ที่เป็นฟิล์มบางขนาด  $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  หรือบางถึง  $10 \mu\text{m}$  จากไอระเหยของสารเรืองรังสีเคลือบบนผิวหน้าโฟโตแคโทดของหลอดทวีคูณแสง สำหรับวัดอนุภาคหนักที่ไม่สามารถทะลุลงชั้นลึกของตัวกลางวัดรังสีได้ ความเข้มแสงเรืองจะขึ้นกับขนาดของไอออน

### 2.1.2.5 สารอินทรีย์ในรูปเติมสารเพิ่ม (Loaded organic scintillator)

สารเรืองรังสีชนิดสารอินทรีย์มีเลขอะตอมต่ำ จึงเหมาะกับการวัดรังสีที่มีมวลและมีประจุไฟฟ้าในตัว เช่น แอลฟา บีตาและอิเล็กตรอนพลังงานสูง แต่ส่วนผสมในโครงสร้างที่เป็นไฮโดรคาร์บอนและออกซิเจนมีคุณสมบัติในการวัดนิวตรอนพลังงานสูง จากกระบวนการโปรตอนรีคอยล์ (Proton recoil) อย่างไรก็ตามการเพิ่มประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมา ด้วยการเติมสารที่มีเลขอะตอมสูงเพื่อเพิ่มโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของโฟตอน เช่น ตะกั่วหรือดีบุก (10% โดยน้ำหนัก) ในสารอินทรีย์เรืองรังสีในรูปพลาสติก หรือเติม โบรอน ลิเทียมลงในสารเรืองรังสีในรูปแก้ว (Glass scintillator) สำหรับวัดนิวตรอนพลังงานต่ำ

### 2.1.3 การยับยั้งการเกิดแสงเรือง (Quenching)

การยับยั้งการเกิดแสงเรืองส่งผลให้สูญเสียความเข้มแสงระหว่างกระบวนการเรืองแสงของสารเรืองรังสีส่งผลต่อปริมาณโฟตอนจากแสงเรืองเดินทางไปถึงโฟโตแคโทดของหลอดทวีคูณแสงน้อยลง ทำให้ขนาดของสัญญาณพัลส์ที่เอาต์ดอลดลงจนไม่สามารถข้ามระดับคัดเลือกสัญญาณ (Threshold) ได้และมีผลให้ปริมาณนับรังสีน้อยลง การยับยั้งการเกิดแสงเรืองเกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆ ได้แก่

#### ก) คัลเลอร์ควนซิง (Color quenching)

การยับยั้งจากการเกิดสีในสารละลายของสารอินทรีย์เรืองรังสีจากปฏิกิริยาทางเคมีของตัวอย่างเป็นผลให้เกิดการดูดกลืนแสงในระดับความรุนแรงแตกต่างกัน ที่ระดับการดูดกลืนสูงมีความยาวคลื่นในช่วง 380-480 nm ระดับปานกลางจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 480-520 nm และระดับต่ำจะดูดกลืนแสงที่ 520-560 nm ดังนั้นจึงต้องหลีกเลี่ยงการใช้สารละลายที่ก่อสี

#### ข) เคมีคัลควนซิง (Chemical quenching)

การยับยั้งที่เกิดระหว่างการถ่ายเทพลังงานจากตัวทำละลายไปยังสารเรืองรังสี โดยสารเคมีที่เป็นตัวอย่างอาจจะรับพลังงานจากตัวทำละลายไป ทำให้การเรืองแสงลดลงหรืออาจรวมกับตัวถูกละลายหรือสารเรืองรังสีทำให้เกิดสารประกอบใหม่ที่ให้แสงเรืองในช่วงแสงที่ไม่เหมาะสม สารประกอบที่อาจจะเกิดเคมีคัลควนซิง ได้แก่ สารอินทรีย์ฮาไลด์ สารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ สารประกอบที่มี C=O เช่น อะเซโตน (Acetone) แม้กระทั่งออกซิเจนที่ละลายอยู่ ก็สามารถทำให้เกิดการยับยั้งได้

#### ค) ไดลูชันควนซิง (Dilution quenching)

การยับยั้งที่เกิดขึ้นจากการเจือจางของสารเรืองรังสี โดยสารตัวอย่างที่ต้องการวัดหรือสารอื่นๆ ที่ไม่มีส่วนทำให้เกิดแสงเรือง ทำให้การถ่ายเทพลังงานลดลง เนื่องจากระยะทางของโมเลกุลของตัวทำละลายเพิ่มมากขึ้น

### ง) ออปติคัลควนชิ่ง (Optical quenching)

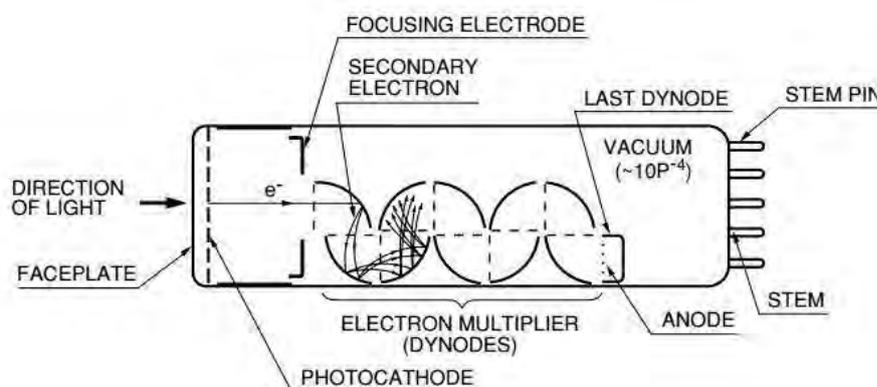
การยับยั้งที่เกิดจากดูดกลืนแสงเรือง เช่น ในกรณีที่สารเรืองรังสีแข็งตัว ความสกปรกบนผิวท่อนำแสงหรือไวอัล (Vial) หรือท่อนำแสงเป็นฝ้า สิ่งเหล่านี้จะมีผลให้การส่งผ่านแสงลดน้อยลง

### จ) เซลฟ์ควนชิ่ง (Self quenching)

การยับยั้งเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายหรือสารเรืองรังสี จะทำให้เกิดอุปสรรคในการถ่ายเทพลังงานในตัวเองหรือเมื่อสารเรืองรังสีได้รับการกระตุ้น แล้วไปรวมตัวกับโมเลกุลที่ไม่ก่อการกระตุ้น ทำให้ไม่เกิดการเรืองแสง

## 2.1.4 หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tube) [6]

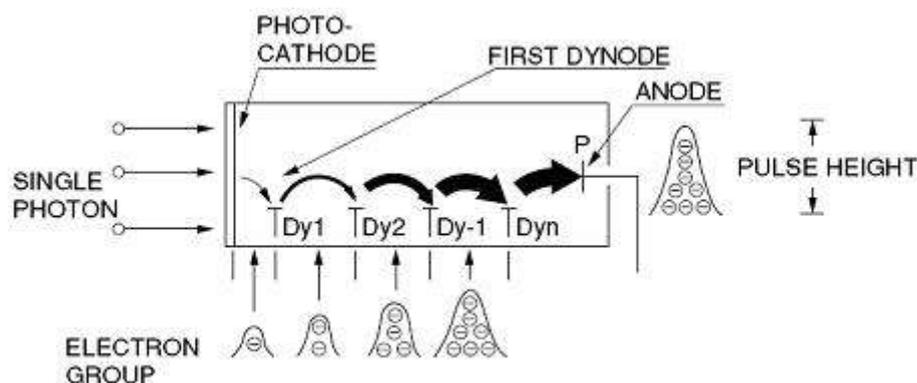
หลอดทวีคูณแสงเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแสงจากสารเรืองรังสีที่มีความเข้มต่ำมากให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยหลอดทวีคูณแสงทั่วไปจะมีลักษณะเป็นหลอดสุญญากาศที่ภายในแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนไวแสงและส่วนทวีคูณปริมาณอิเล็กตรอน (Electron multiplier) ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าต่างๆ ได้แก่ โฟโตแคโทด (Photo cathode) ไดโนด (Dynode) โฟกัส (Focus) และ แอโนด (Anode) ดังโครงสร้างในภาพที่ 2.3



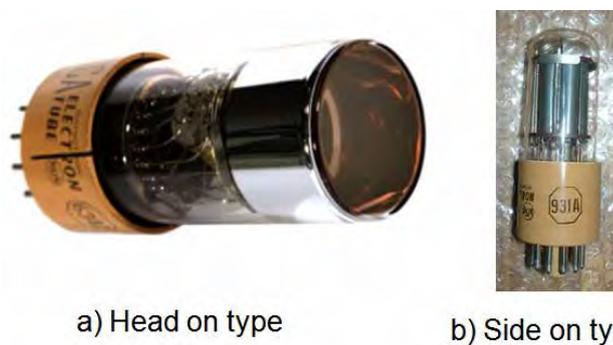
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของหลอดทวีคูณแสง [7]

การทำงานเริ่มเมื่อมีโฟตอนแสงตกกระทบบนโฟโตแคโทด (Photo cathode) ซึ่งจะเกิดการปลดปล่อยโฟโตอิเล็กตรอนออกมาจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกโฟกัสและเร่งด้วยสนามไฟฟ้าเข้าสู่ไดโนดตัวแรกผ่านกระบวนการทวีคูณปริมาณอิเล็กตรอนตามลำดับจากไดโนดตัวแรกจนถึงไดโนดสุดท้ายและถูกรวบรวมบนแอโนด (Anode) ตามปกติหลอดทวีคูณแสงจะมีอัตราขยายประมาณล้านเท่า ดังนั้นโฟโตอิเล็กตรอนหนึ่งตัวจากโฟโตแคโทด เมื่อถูกเร่งผ่านชุดไดโนดจะได้รับการทวีคูณปริมาณอิเล็กตรอน ได้มากถึงหนึ่งล้านตัว ดังแผนภาพการทำงานในภาพที่ 2.4 หลอดทวีคูณแสงนั้นเหมาะสำหรับที่จะใช้กับแหล่งกำเนิดแสงเรืองที่มีความเข้มแสงต่ำมากๆ มีประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum efficiency) ประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ หลอดทวีคูณ

แสงจะตอบสนองของความเข้มแสงเป็นเชิงเส้น (Linear response) อย่างไรก็ตามในการใช้งานหลอดทวีคูณแสง ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อการเบี่ยงเบนกลุ่มอิเล็กตรอนให้หลุดจากไดโนดซึ่งจะเกิดการสูญเสียสัญญาณ หลอดทวีคูณแสงจะมีการผลิตใน 2 รูปแบบ คือ แบบแสงเข้าด้านหน้า (Head on type) และแสงเข้าด้านข้าง (Side on type) ดังในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.4 แผนภาพการทำงานของหลอดทวีคูณแสง [7]

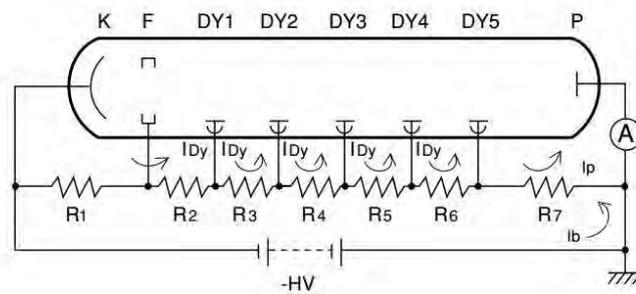


a) Head on type

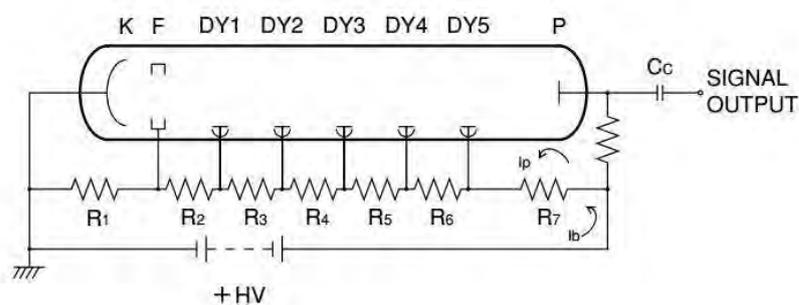
b) Side on type

ภาพที่ 2.5 หลอดทวีคูณแสงแบบแสงเข้าด้านหน้า (ก) และด้านข้าง (ข)

การจ่ายไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าต่างๆ ของหลอดทวีคูณแสงให้พร้อมทำงาน เรียกว่า การไบอัส โดยทั่วไปวงจรไบอัสจัดได้ 2 รูปแบบ คือ แบบกราวด์แอโนดจัดให้หลอดทวีคูณแสงทำงานในโหมดวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าแสดงดังในภาพที่ 2.6 และแบบกราวด์แคโทดจัดให้หลอดทวีคูณแสงทำงานในโหมดวัดสัญญาณพัลส์แรงดันไฟฟ้าแสดงดังในภาพที่ 2.7 ในทางปฏิบัติความต้านทาน (R) ระหว่างไดโนดอาจจะอยู่ในช่วง  $0.1 - 3 \text{ M}\Omega$  ขึ้นกับการใช้งาน

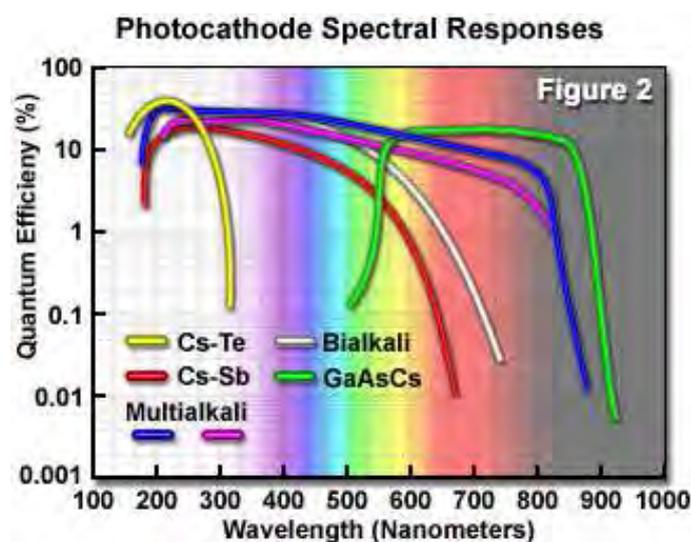


ภาพที่ 2.6 แผนภาพการไบอัสวงจรหลอดทวีคูณแสงแบบกราวด์แอโนด [7]



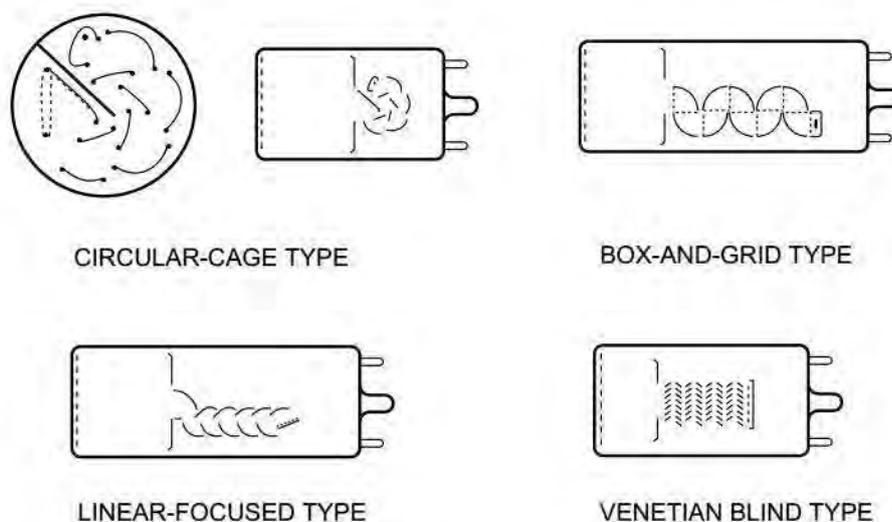
ภาพที่ 2.7 แผนภาพการไบอัสวงจรหลอดทวีคูณแสงแบบกราวด์แคโทด [7]

การเลือกย่านการตอบสนองความยาวคลื่นแสง (Spectral response) ของหลอดทวีคูณแสงพิจารณาได้จากชนิดของสารประกอบที่ใช้เป็นโฟโตแคโทด ได้แก่ Cs-Te, Cs-Sb, GaAsCs, Bialkali และ Multialkali ซึ่งมีประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum efficiency) ในย่านความยาวคลื่นแสงต่างกันไป ดังเส้นกราฟแสดงย่านตอบสนองความยาวคลื่นแสงของโฟโตแคโทดในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ย่านตอบสนองความยาวคลื่นแสงของโฟโตแคโทดแต่ละชนิด [8]

โครงสร้างของส่วนทวีปริมาณอิเล็กตรอนของหลอดทวิคูณแสง มีการออกแบบในรูปแบบต่างๆ กัน 4 แบบ ได้แก่ แบบ venetian blind, box & grid, focused linear และ circular grid ดังโครงสร้างในภาพที่ 2.9 ความแตกต่างของโครงสร้างในส่วนทวีปริมาณอิเล็กตรอนมีผลต่อการลดผลการรบกวนของสนามแม่เหล็ก และเวลาในการรวบรวมปริมาณอิเล็กตรอนซึ่งเกี่ยวข้องกับเวลาขาขึ้น (Rise time) ของสัญญาณ ในกรณีของหลอดทวิคูณแสงแบบ focused linear นั้น ถูกออกแบบให้เวลาการรวบรวมอิเล็กตรอนต่ำเพียง 2 – 3 ns



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของส่วนทวีปริมาณอิเล็กตรอนแบบต่างๆ ของหลอดทวิคูณแสง [7]

อัตราขยายของหลอดทวิคูณแสงขึ้นกับการทวีคูณอิเล็กตรอน พิจารณาจากความสัมพันธ์ของจำนวนไดโนด แรงดันไฟฟ้าไบอัสและประสิทธิภาพของโครงสร้าง อาจจะสามารถได้ในทอมค่าอัตราขยายอิเล็กตรอน (Electron gain, G) [7] ดังในสมการที่ 2.2

$$G = f(g \delta)^n \dots\dots\dots(2.2)$$

เมื่อ G = อัตราขยายอิเล็กตรอน

f = ประสิทธิภาพการรวบรวม (Collection coefficient) โดยทั่วไปมีค่าน้อยกว่า 100%

g = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างไดโนดโดยทั่วไปมีค่าเกือบ 100%

$\delta$  = สัมประสิทธิ์การปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

n = จำนวนไดโนด

ค่าของสัมประสิทธิ์การปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ( $\delta$ ) เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุที่ทำไดโนด เช่น กรณีที่ไดโนดทำจาก CsSb ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างไดโนด (V) มีค่า

$$\delta = 0.2V^{0.7} = 0.025V$$

จำนวนไดโอดและขั้วไฟฟ้าของหลอดที่อุณหภูมิแสงจะสอดคล้องกับมาตรฐานของขาหลอด และฐานหลอดที่ใช้ ได้แก่ ขาหลอดชนิด 12 ขา, 14 ขา (นิยมใช้มากที่สุด), และ 20 ขา, 21ขา

## 2.2 ท่อนำแสงชนิดของเหลว

ท่อนำแสงชนิดของเหลว เป็นอุปกรณ์ส่งผ่านแสงแบบแกนเดี่ยว ที่ตอบสนองความเข้มแสงได้สูง ภายในบรรจุด้วยของเหลวที่มีคุณสมบัติในการส่งผ่านแสงดี และมีการลดทอนความเข้มแสงที่มีความยาวคลื่นย่าน UV น้อยมาก การส่งผ่านแสงอาศัยหลักการสะท้อนกลับหมดของแสงจากต้นทางสู่ปลายทาง

### 2.2.1 การสะท้อนกลับหมดของแสง

จากกฎของสเนลล์ (Snell's law) ได้อธิบายทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางสองชนิดที่มีดัชนีหักเหต่างกันบริเวณแนวสัมผัสกัน โดยความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมหักเหของแสงกับดัชนีหักเหของตัวกลางทั้งสองชนิดเป็นไปตามสมการที่ 2.3 [9]

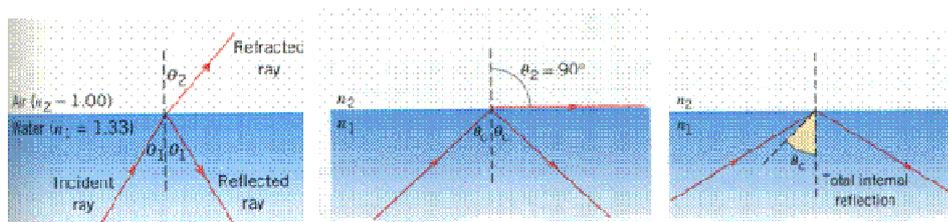
$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2 \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

เมื่อ  $n_1 =$  ดัชนีหักเหของตัวกลางที่แสงตกกระทบ

$n_2 =$  ดัชนีหักเหของตัวกลางที่แสงหักเหผ่าน

$\theta_1 =$  มุมตกกระทบ (Incident angle)

$\theta_2 =$  มุมหักเห (Refracted angle)



ก. การหักเหแสง

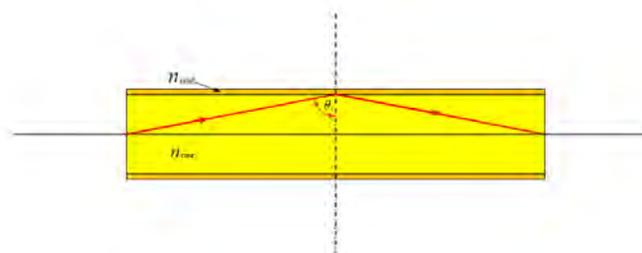
ข. มุมวิกฤติแสง

ค. การสะท้อนกลับหมด

ภาพที่ 2.10 แสดงการหักเหและการสะท้อนกลับหมดของแสง

ในภาพที่ 2.10 เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหมาก ( $n_1$ ) ไปสู่ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหน้อย ( $n_2$ ) ถ้าให้แสงตกกระทบทำมุมกับเส้นปกติจะทำให้เกิดมุมหักเหของแสงเบนออกจากเส้นปกติ (ดังรูป ก) แต่ถ้าแปรเปลี่ยนมุมแสงตกกระทบจนทำให้มุมหักเหมีค่าเท่ากับมุม 90 องศา จะเกิดมุมวิกฤต (Critical Angle,  $\theta_c$ ) (ดังรูป ข) และ ถ้ามุมตกกระทบโตกว่ามุมวิกฤต จะเกิดการสะท้อนภายในเพียงอย่างเดียว เรียกว่า การสะท้อนกลับหมด (Total internal reflection) (ดังรูป ค) โดยการหาค่ามุมวิกฤตสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.3 ปรัชญาการณ์สะท้อนกลับ

หมุดนี้ถูกนำมาใช้ในการส่งผ่านแสงในท่อนำแสงและเส้นใยออปติก (Optical fiber) ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การเดินทางของแสงในท่อนำแสง [1]

### 2.2.2 โครงสร้างของท่อนำแสงชนิดของเหลว [10]

ท่อนำแสงชนิดของเหลวเป็นท่อนำแสงที่มีราคาสูง ออกแบบให้ตอบสนองความยาวคลื่นแสงย่านกว้างครอบคลุมจากแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) จนถึงแสงที่ตามองเห็น (VIS) จึงมีประสิทธิภาพสูงในการส่งแสงที่กำเนิดจากสารเรืองรังสี ท่อนำแสงชนิดของเหลวมีโครงสร้างดังในภาพที่ 2.12 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

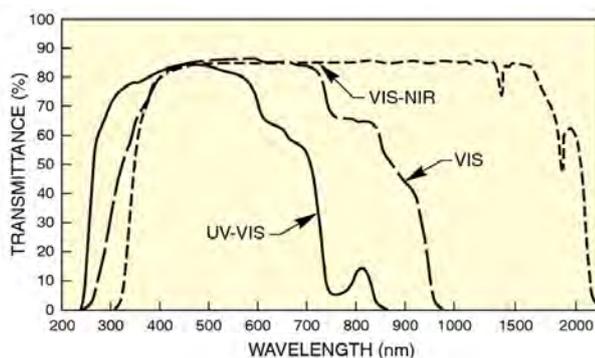
- 1) แท่งแก้วซิลิกา (Fused silica) ทำหน้าที่ปิดปลายทั้ง 2 ด้านของท่อเพื่อป้องกันไม่ให้ของเหลวภายในท่อรั่วไหลออกมา และทำหน้าที่นำแสงเข้าและออกจากท่อนำแสง
- 2) ท่อ PVC บรรจุของเหลวนำแสง ทำหน้าที่ส่งผ่านแสงด้วยหลักการสะท้อนแสงภายใน
- 3) ของเหลวตัวกลางนำแสง ทำหน้าที่ส่งผ่านแสงจากปลายด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง
- 4) ท่ออลูมิเนียมแบบยืดหยุ่น ทำหน้าที่หุ้มท่อโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) ด้านในเพื่อป้องกันการหักงอ และเพิ่มความแข็งแรงของท่อนำแสง

#### Liquid Light Guide Anatomy



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของท่อนำแสงชนิดของเหลว

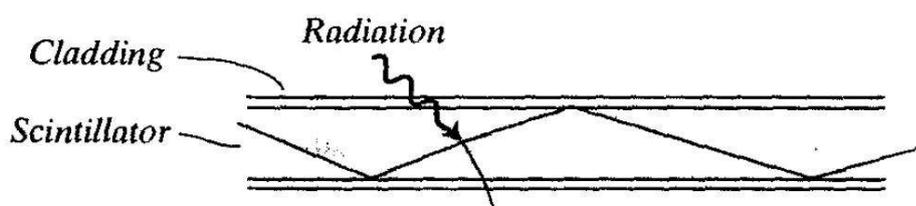
ท่อนำแสงชนิดของเหลว สามารถตอบสนองแสงที่ส่งผ่านในย่านความยาวคลื่นช่วง UV ตั้งแต่ 250 นาโนเมตร (nm) ไปจนถึงย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น ดังแสดงสเปกตรัมตอบสนองแหล่งกำเนิดแสงในภาพที่ 2.13 ซึ่งเหมาะกับการส่งผ่านแสงเรืองจากสารเรืองรังสี อย่างไรก็ตามท่อนำแสงของเหลวนี้จะมีอายุใช้งานประมาณ 3 ปี เนื่องจากการดูดซึมออกซิเจนจากบรรยากาศสู่ภายในตัวกลางของเหลวเกิดการลดทอนความเข้มแสงย่านอัลตราไวโอเล็ต



ภาพที่ 2.13 เปอร์เซ็นต์ส่งผ่านแสงของท่อนำแสงแต่ละชนิดในย่านความยาวคลื่นต่างๆ [11]

### 2.3 หัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อน [6]

สารอินทรีย์เรืองรังสีชนิดพลาสติกหรือแก้วที่กล่าวไว้ในข้อ 2.1.2 สามารถนำมาทำเป็นเส้นใยเรืองรังสี (Scintillation fiber) มีความยาวและมีขนาดเล็ก สามารถส่งผ่านประกายแสงไปได้ไกล ด้วยหลักการสะท้อนกลับหมดของแสงภายในแกนกลาง องค์ประกอบทั่วไปของเส้นใยเรืองรังสีชนิดนี้จะประกอบด้วยแกนกลาง ซึ่งเป็นส่วนที่ทำอันตรกิริยากับรังสีที่ตกกระทบก่อให้เกิดแสงเรืองขึ้น และส่วนของเปลือกหุ้มแกน ทำจากวัสดุที่มีความบาง ดังในภาพที่ 2.14 ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะทำจากวัสดุที่โปร่งแสง โดยที่แกนกลางจะมีดัชนีการหักเหของแสงสูงกว่าที่เปลือกหุ้ม แสงเรืองที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางจะเคลื่อนที่ไปยังผิวด้านในของเปลือกหุ้มด้วยมุมที่มากกว่ามุมวิกฤต เมื่อนำเส้นใยมาเชื่อมต่อกับหลอดที่อุณหภูมิสูงจะมีโครงสร้างเป็นหัววัดรังสีแบบท่ออ่อน



ภาพที่ 2.14 ภาพตัดขวางแสดงการเคลื่อนที่ของแสงเรืองในท่อเส้นใยนำแสง [6]

### 2.3.1 เส้นใยเรืองรังสีแบบแกนพลาสติกและแกนของเหลว

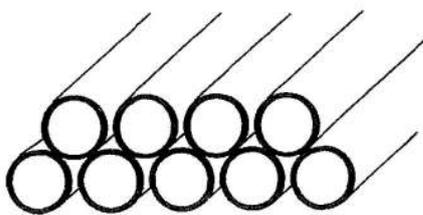
เส้นใยแบบแกนที่ผลิตจากสารเรืองรังสีชนิดพลาสติกนั้น มีการผลิตเป็นรูปทรงต่างๆ เช่น ทรงกระบอกและทรงสี่เหลี่ยม เป็นต้น ส่วนมากจะมีแกนกลางที่ทำจากวัสดุโพลีเอสเตอร์ (ดัชนีหักเหแสง,  $n = 1.58$ ) ผสมกับสารอินทรีย์เรืองรังสี ส่วนเปลือกหุ้มมักจะทำจาก Polymethylmethacrylate ( $n = 1.49$ ) หรือ Fluorinated polymethacrylate ( $n = 1.42$ )

โดยทั่วไปเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยเรืองรังสีแบบแกนพลาสติกจะมีขนาดตั้งแต่ 1/10 มิลลิเมตรไปจนถึงไม่กี่มิลลิเมตร สำหรับเส้นใยเรืองรังสีแบบแกนพลาสติกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก อัตราการเกิดแสงเรืองจะลดลงจากผลการยับยั้งการถ่ายโอนพลังงาน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของพลาสติกกับโมเลกุลของสารอินทรีย์เรืองรังสี เส้นใยเรืองรังสีชนิดพลาสติกจะให้แสงเรืองที่อยู่ในย่านแสงสีน้ำเงิน และมีค่าการสลายตัวของแสงเรืองอยู่ในย่าน 2 – 4 นาโนวินาที

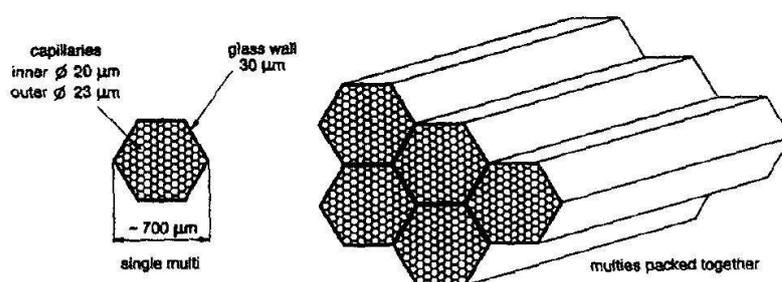
เส้นใยเรืองรังสีแบบแกนพลาสติกที่ผลิตจากส่วนผสม 2 ชนิด จะมีสารอินทรีย์เรืองรังสีกระจายตัวแบบเมทริกซ์ ในรูปของแข็ง และในกรณีที่ต้องการให้ผลได้ (Yield) การเกิดแสงเรืองสูงสุดจะมีการเติมสารอินทรีย์เรืองรังสีที่มีความเข้มข้นสูงเพิ่มเข้าไป ส่วนเส้นใยเรืองรังสีแบบแกนพลาสติกที่ผลิตจากส่วนผสม 3 ชนิดนั้น จะมีการเติมสารปรับความยาวคลื่นแสงเรืองเข้าไป ซึ่งสารปรับความยาวคลื่นแสงนี้จะเป็นโมเลกุลของสารอินทรีย์เรืองรังสี ที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงเรืองปฐมภูมิ แล้วจะปลดปล่อยแสงเรืองทุติยภูมิที่มีความยาวคลื่นแสงที่มากกว่าเดิมออกมา ซึ่งการปรับความยาวคลื่นแสงนี้จะช่วยลดปัญหาการยับยั้งแสงเรืองในตัวเองของเส้นใยเรืองรังสี

เส้นใยท่อแก้วบรรจุสารเรืองรังสีชนิดสารอินทรีย์เหลวเป็นแกนนั้น จะมีหลักการทำงานเช่นเดียวกันกับเส้นใยเรืองรังสีแบบแกนพลาสติก แต่จะมีอัตราการเกิดแสงเรืองสูงกว่า มีระยะเวลาในการสลายตัวของแสงเรืองเร็ว และมีผลกระทบจากความเสียหายเนื่องจากรังสีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยเรืองรังสีแบบพลาสติก อีกทั้งยังมีอัตราการสูญเสียแสงที่ต่ำ ( $10^{-6}$  เท่าต่อการหักเห 1 ครั้ง) และสามารถผลิตให้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีขนาดเล็กลงได้ถึง 20 ไมโครเมตร โดยที่มีความยาวถึง 3 เมตร

ในบางครั้งเส้นใยเรืองรังสีทั้งสองชนิด ยังสามารถนำมาจัดรูปร่างได้หลายลักษณะเพื่อประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ดังภาพที่ 2.15 และภาพที่ 2.16 โดยเส้นใยแบบท่อแก้วสามารถหลอมผนังติดกันเป็นมัดได้ง่ายกว่า



ภาพที่ 2.15 ลักษณะของเส้นใยเรืองรังสีแกนเดี่ยว ที่ประกอบกันแบบ double-layer ribbon [6]



ภาพที่ 2.16 ลักษณะของเส้นใยเรืองรังสีชนิดท่อแก้วหลายแกนที่นำมามัดรวมกัน [6]

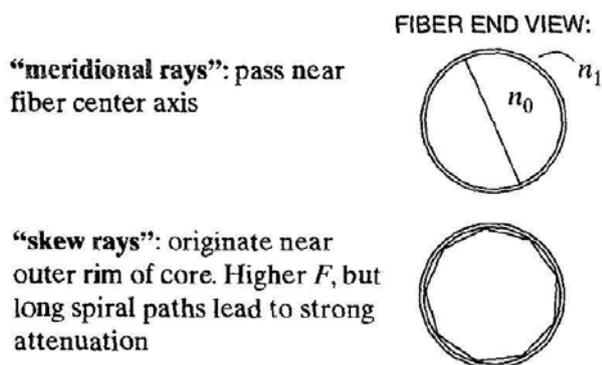
### 2.3.2 เส้นใยแก้วเรืองรังสี

เส้นใยแก้วเรืองรังสีนั้นเป็นการผสมสารเรืองรังสีพร้อมเติมสารก่อกำเนิดรังสี ลงในเนื้อแก้ว สามารถทำให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กลงได้ถึง 10 ไมโครเมตร โดยปราศจากการสูญเสียประสิทธิภาพในการให้แสงเรือง แต่เมื่อเทียบกับเส้นใยเรืองแสงแบบพลาสติกแล้ว เส้นใยแก้วเรืองรังสีจะมีประสิทธิภาพในการให้แสงเรือง และมีอัตราการเกิดแสงเรืองต่ำกว่า อีกทั้งยังมีระยะเวลาในการสลายตัวของแสงเรืองที่ยาวประมาณ 50 – 80 นาโนวินาที ในส่วนของเส้นใยแก้วชนิดที่ผสมสาร  $^6\text{Li}$  นั้น จะประยุกต์ใช้ในงานตรวจวัดอนุภาคนิวตรอน ส่วนถ้าเติมสารตะกั่วหรือดีบุกจะใช้ในการวัดรังสีเอกซ์หรือแกมมา

เส้นใยแก้วเรืองรังสีนั้นสามารถนำมาหลอมให้มีลักษณะเป็นแท่ง หรือแผ่นขนาดใหญ่ได้ แต่จะทำให้คุณสมบัติในการนำแสงแตกต่างกันไป เมื่อเทียบกับการนำเส้นใยเรืองรังสีขนาดเล็กมามัดรวมกันเป็นแผ่นสำหรับงานด้านถ่ายภาพด้วยรังสี ถึงแม้ว่าจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรวมเท่ากันก็ตาม

### 2.3.3 สัดส่วนการจับแสง (Light capture fraction) [6]

เส้นใยเรืองรังสีโดยทั่วไป จะมีลักษณะของพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม จากภาพที่ 2.17 เปรียบเทียบลักษณะการเคลื่อนที่ของแสงเรือง ภายในเส้นใยสองแบบ โดยแบบแรกเป็นการเคลื่อนที่ของแสงแบบ “Meridional rays” กล่าวคือเมื่อเกิดแสงเรืองขึ้นที่บริเวณแกนของเส้นใย แสงเรืองจะเคลื่อนที่ผ่านศูนย์กลางของแกน แม้ว่าจะผ่านการสะท้อนมาหลายครั้งแล้วก็ตาม



ภาพที่ 2.17 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแสงแบบ “Meridional rays” และแบบ “Skew rays” [6]

จากกฎการเคลื่อนที่ของแสง สามารถเขียนสมการสำหรับหาสัดส่วนของแสงที่ถูกจับตามแนวทิศทางเดียวกันกับการสะท้อนภายในเส้นใย ( $F$ ) ในแบบ Meridional rays ได้เป็น [6]

$$F = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{n_1}{n_0} \right) \dots\dots\dots (2.4)$$

โดยที่  $n_1$  และ  $n_0$  เป็นดัชนีหักเหแสงของแกนกลางและเปลือกหุ้มตามลำดับ สำหรับแบบที่สองแบบ “Skew rays” แสงเรืองขึ้นที่เกิดขึ้นจะไม่เคลื่อนที่ผ่านแนวศูนย์กลางแต่เคลื่อนที่ใกล้ขอบท่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวทแยงรอบทิศทางเป็นเกลียวขนานขอบผนังที่นำแสง ซึ่งจะถูกรับได้ทั้งสองทิศทางเท่ากัน ดังนั้นแสงเรืองที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้กับขอบแกนจะเคลื่อนที่ในรูปแบบเกลียวตามความยาวของเส้นใยนำแสง ตามทฤษฎีแล้วจะมีสัดส่วนแสงเรืองที่ถูกจับในตัวอย่างสูงมาก และมีแนวโน้มที่ความเข้มแสงส่งผ่านจะถูกลดทอนลงเป็นอย่างมาก

### 2.3.4 ผลได้การเกิดแสงเรืองและการกระจายแสง

ปัจจัยที่มีผลต่อผลได้การเกิดแสงเรือง (Light yield) จากเส้นใยเรืองรังสีชนิดพลาสติกของเหลว และแก้วนั้นได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ตารางที่ 2.1 แสดงผลได้ของวัสดุบางชนิดที่ใช้เป็นแกนเส้นใยเรืองรังสี ซึ่งผลได้แสงเรืองนี้เป็นของอนุภาคที่มีอัตราส่วน  $dE/dx$  ต่ำ เช่น อิเล็กตรอน แต่ถ้าเป็นอนุภาคหนัก เช่น recoil nuclei ผลได้แสงเรืองจะต่ำกว่านี้ สำหรับสารเรืองรังสีทั่วไปแสง

ที่เกิดขึ้นจะถูกปล่อยออกมาในทุกทิศทางแต่จะมีเพียงบางส่วนที่ถูกจับไว้ในตัวกลางจากการสะท้อนภายในเส้นใย

ตารางที่ 2.1 ผลได้ของแสงเรืองจากเส้นใยเรืองรังสีเทียบกับ NaI(Tl) [6]

Core material	Photon/keV	$\lambda_{\text{peak}}$ (nm)
Glass scintillator	3-5	400
Plasstic scintillator	8-10	420
Liquid scintillator	11-13	420
<i>For comparison:</i>		
NaI(Tl)	38	415

Typical light yield for fiber scintillators (for low dE/dx particles, in all directions, will be reduced by light capture fraction).

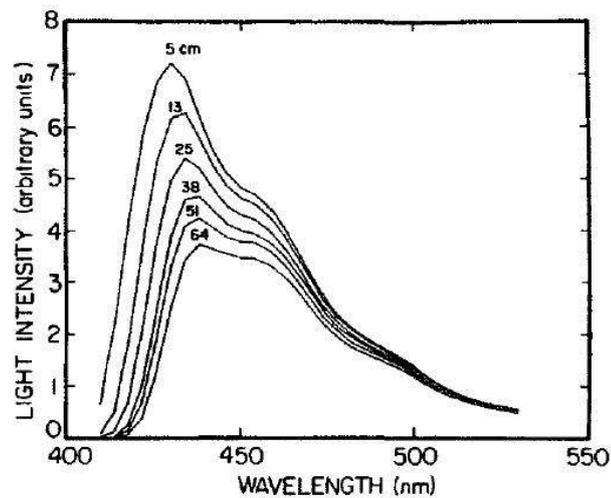
ความเข้มของแสงเรืองที่กระจายไปตามความยาวของเส้นใย จะถูกลดทอนจากผลกระทบหลายประการ เช่น

- 1) ความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อระหว่างแกนกับเปลือกหุ้มซึ่งอาจรบกวนการสะท้อนภายในใยแสง
- 2) แสงเรืองบางส่วนอาจถูกดูดกลืนซ้ำ เนื่องจากการซ้อนทับกันที่ความยาวคลื่นแสงของแถบแสงปลดปล่อยและแถบการดูดกลืนแสงภายในเนื้อเส้นใย
- 3) ความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นภายในแกนอาจทำให้เกิดการกระเจิงของแสงเรือง ผลกระทบจากกระบวนการลดทอนแสงในเส้นใยดังกล่าว ก่อให้เกิดค่าการลดทอนตามความยาว (Attenuation length, L) ถ้าโอกาสในการลดทอนแสงตามความยาวเป็นค่าคงที่และ I เป็นความเข้มของแสงที่ระยะทาง x จากจุดกำเนิดแสงเรืองในตัวกลาง ความเข้มของแสงตามความยาว จะมีลักษณะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังสมการที่ 2.5 [6]

$$\frac{I}{I_0} = e^{-x/L} \dots\dots\dots (2.5)$$

เมื่อ  $I_0$  คือความเข้มแสงที่จุดเริ่มต้นและ L คือ ค่าการลดทอนแสงตามความยาว โดยทั่วไปค่า L ของเส้นใยเรืองแสงจะอยู่ในช่วงสิบลบเซนติเมตรจนถึงหลายเมตร

จะเห็นว่าพฤติกรรมการลดทอนของแสงเรืองภายในเส้นใยแสง จะมีการลดลงในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล แต่จะมีสาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่จะมีผลให้การลดทอนของแสงเรืองเบี่ยงเบนจากความเป็นจริง คือ ผลของความยาวคลื่นแสงเรืองย่านสั้นๆที่จะมีแนวโน้มในการถูกดูดกลืนซ้ำมากกว่าแสงเรืองความยาวคลื่นย่านคลื่นยาว ดังแสดงในภาพที่ 2.18



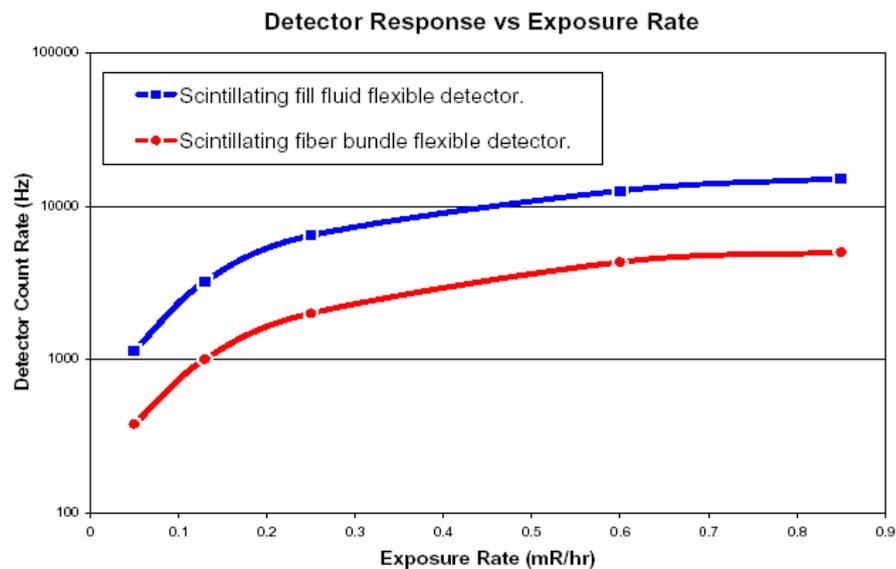
ภาพที่ 2.18 สเปกตรัมของแสงเรืองที่ส่งผ่านเส้นใยเรืองรังสีที่มีความยาวต่างกัน [6]



ภาพที่ 2.19 หัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อน (ก) ชนิดมัดไฟเบอร์เรืองรังสี [12]

(ข) ชนิดเติมสารเรืองรังสีเหลว [13]

ในภาพที่ 2.19 แสดงรูปร่างของหัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อนที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ ส่วนมากจะใช้กับระบบวัดนิวคลีออนิกในงานควบคุมกระบวนการผลิตภาคอุตสาหกรรม มีทั้งหัววัดเรืองรังสีชนิดมัดไฟเบอร์เรืองรังสี ( Scintillating fiber bundle detector) และชนิดเติมสารเรืองรังสีเหลว (Scintillating fill liquid detector) จากรายงานทางเทคนิคของผู้ผลิต [13] จากการวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัดเรืองรังสีทั้ง 2 ชนิด เปรียบเทียบกัน พบว่าการตอบสนองต่อการวัดปริมาณรังสีของหัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อนชนิดเติมสารเรืองรังสีเหลว ดีกว่าหัววัดรังสีชนิดมัดไฟเบอร์เรืองรังสี ดังแสดงในเส้นกราฟเปรียบเทียบในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 เส้นกราฟเปรียบเทียบผลการวัดปริมาณรังสีของหัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อน [13]

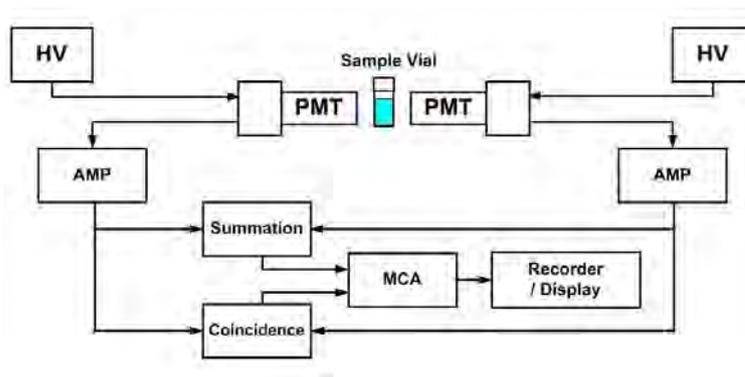
## 2.4 หัววัดเรืองรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อน

หัววัดเรืองรังสีชนิดเส้นใยเรืองรังสีแบบที่มีเปลือกหุ้มหลายชั้นนั้น เปลือกหุ้มจะทำหน้าที่ป้องกันพื้นผิวด้านในที่ทำหน้าที่สะท้อนแสง และยังสามารถกักแสงไว้ได้มากกว่าเส้นใยแบบเปลือกหุ้มชั้นเดียวถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ที่ปลายทั้ง 2 ด้านของเส้นใยเรืองแสงสามารถนำหลอดทวีคูณแสงมาเชื่อมต่อเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ที่เกิดจากอันตรกิริยาจากอนุภาคหรือโฟตอนได้ [6] และเมื่อนำสัญญาณจากปลายหัววัดเรืองรังสีทั้งสองเข้าระบบวัดสัดส่วนความเข้มแสงเรือง หรือเวลาในการกระจายแสงเรืองจะสามารถวิเคราะห์ตำแหน่งที่รังสีตกกระทบตามแนวยาวของเส้นใยเรืองรังสีได้

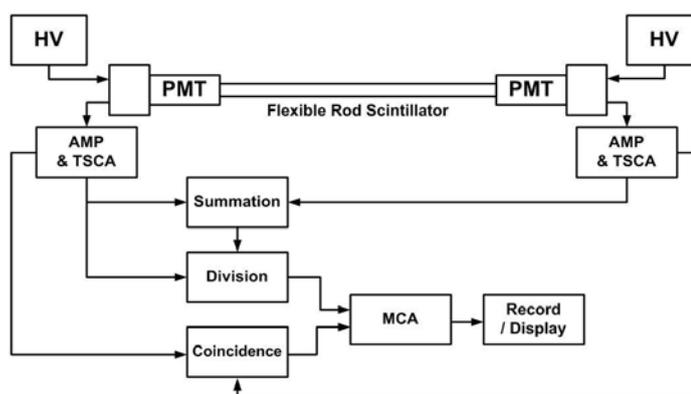
### 2.4.1 พื้นฐานของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งและระบบวัดตำแหน่งรังสี

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนชนิดบรรจุสารเรืองรังสีเหลว จะเห็นว่ามีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับส่วนหน้าของระบบวัดรังสีแบบ Liquid Scintillation Counter (LSC) ในเชิงเปรียบเทียบ กล่าวคือ ระบบวัดรังสีแบบ LSC สารเรืองรังสีเหลวจะถูกบรรจุอยู่ในขวด vial พร้อมกับต้นกำเนิดรังสีที่ต้องการวัดวางอยู่ระหว่างหลอดทวีคูณแสง ดังแผนภาพในภาพที่ 2.21 ในขณะที่หัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนบรรจุสารเรืองรังสีเหลวนั้น สารเรืองรังสีเหลวจะถูกบรรจุอยู่ในท่ออ่อนนำแสงที่ปลายทั้งสองด้านของท่อจะถูกประกบด้วยหลอดทวีคูณแสง ส่วนต้นกำเนิดรังสีที่ต้องการวัดนั้นจะอยู่ภายนอก ดังแผนภาพในภาพที่ 2.22 และในส่วนของระบบวัดรังสีส่วนที่แตกต่างกัน คือ ส่วนของระบบประมวลสัญญาณในระบบวัดรังสีแบบ LSC นั้นสัญญาณจากวงจรรขยายสัญญาณหลักแต่ละด้านจะถูกนำมาบวกกันด้วย summing amplifier

ก่อน จากนั้นจึงส่งสัญญาณไปยัง MCA เพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีและแสดงผล แต่สำหรับระบบวัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่ง สัญญาณจากวงจรรขยายสัญญาณหลักที่ถูกนำมาบวกกันด้วย summing amplifier จะถูกนำไปหารกับสัญญาณจากวงจรรขยายสัญญาณหลักด้านใดด้านหนึ่ง เพื่อหาสัดส่วนสัญญาณในแต่ละด้านของหัววัดรังสีก่อน แล้วจึงจะส่งสัญญาณไปยัง MCA เพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งรังสีและแสดงผล



ภาพที่ 2.21 แผนภาพระบบวัดรังสีของเครื่อง LSC



ภาพที่ 2.22 แผนภาพระบบวัดรังสีของหัววัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่ง  
แบบท่ออ่อนบรรจุนิวตรอนเรืองรังสีเหลว

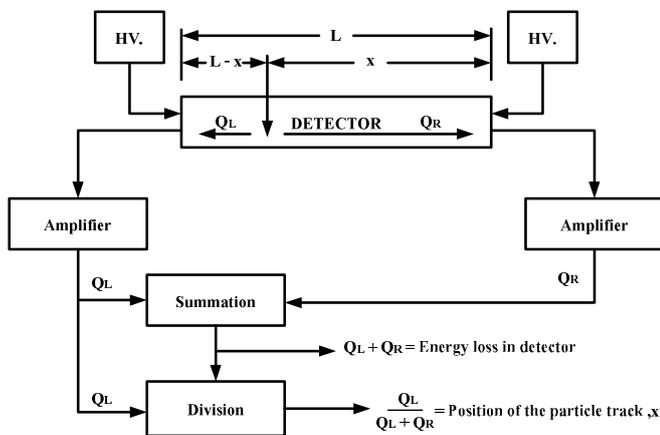
#### 2.4.2 หลักการวัดตำแหน่งรังสีด้วยวิธีวัดสัดส่วนสัญญาณ

ระบบวัดรังสีสำหรับการวัดตำแหน่งรังสี สามารถจำแนกได้ตามกระบวนการวัดสัญญาณ จากหัววัดไวต่อตำแหน่งรังสี 2 ระบบ คือ ระบบวัดรังสีด้วยวิธีไรส์ไทม์ (Rise time method) และระบบวัดรังสีด้วยวิธีวัดสัดส่วนประจุ (Charge division method) ในระบบวัดรังสีด้วยวิธีไรส์ไทม์ นั้นเป็นการวัดเวลาการกระจายแสงเรือง การจับคู่ปรมาณูเล็กทรอนิกส์จึงค่อนข้างซับซ้อนและตอบสนองต่อเวลาในการเดินทางของสัญญาณ ระหว่างปลายของหัววัดรังสีที่สั้นมากระดับนาโนวินาที จึงมีราคาสูง ส่วนระบบวัดรังสีด้วยวิธีวัดสัดส่วนปริมาณประจุนั้นเป็นระบบที่ค่อนข้างง่าย

เหมาะกับการวัดเพื่อแจกแจงตำแหน่งสัญญาณ ระหว่างปลายของหัววัดรังสีที่มีความแตกต่างในเชิงขนาดสัญญาณ เช่น สัญญาณประจุจากหัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซหรือปริมาณประจุในหัววัดรังสีกึ่งตัวนำ ในภาพที่ 2.23 เป็นแผนภาพระบบวัดด้วยวิธีวัดสัดส่วนประจุ ซึ่งประจุ (Q) ที่เกิดขึ้นในหัววัดรังสีจะเป็นปริมาณโดยตรงกับค่าพลังงาน (E) ที่สูญเสียในหัววัดรังสี ตามสมการที่ 2.6 [6]

$$Q = \frac{E}{W} q \dots\dots\dots (2.6)$$

โดยที่ค่า W คือ ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ทำให้เกิดประจุ 1 คู่ ของตัวกลางแต่ละชนิด และค่า q คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน (เป็นค่าคงที่) ดังนั้น ปริมาณประจุที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับพลังงาน (E) ที่สูญเสียในหัววัดรังสี



ภาพที่ 2.23 แผนภาพหลักการแจกแจงโดยวิธีวัดสัดส่วนของปริมาณประจุ [6]

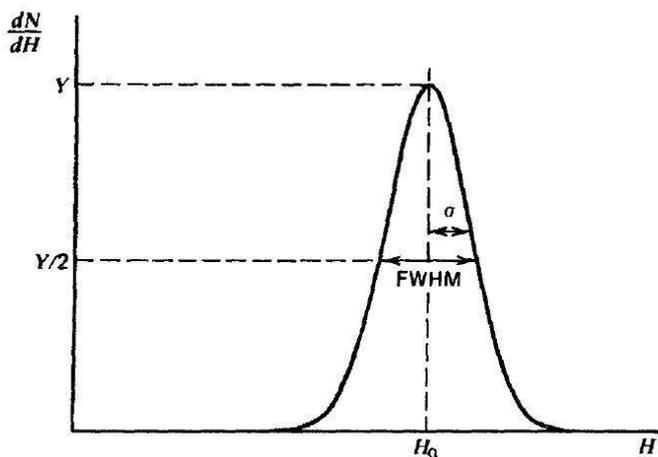
จากระบบวัดรังสีในภาพที่ 2.23 เมื่อรังสีตกกระทบบหัววัดรังสีมีความยาว L ห่างจากปลายหัววัดรังสีทางขวามือระยะทาง x ปริมาณประจุจะกระจายบนเส้นลวดแอโนด โดยที่ QR (ประจุทางด้านขวามือ) เป็นปริมาณประจุที่กระจายเป็นส่วนบนระยะทางของเส้นลวดแอโนดเท่ากับ x และ QL (ประจุทางด้านซ้ายมือ) เป็นปริมาณประจุที่กระจายเป็นส่วนบนระยะทางเท่ากับ L - x ส่วนผลรวมประจุ QL + QR จะเป็นปริมาณประจุทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากพลังงานที่สูญเสียในหัววัดรังสีที่กระจายบนความยาวของเส้นลวดแอโนดทั้งหมด ดังนั้นเมื่อทำการหารปริมาณประจุ QL ด้วยปริมาณประจุที่เกิดขึ้นตลอดตามความยาวเส้นลวดแอโนดจะได้ QL / QL + QR ผลหารของประจุจะเป็นสัดส่วนกับระยะทางที่รังสีตกกระทบบ x/L ตามสมการ 2.7 [6] และสามารถคำนวณค่าระยะตกกระทบบของรังสีได้จากสมการที่ 2.8 [6]

$$\frac{x}{L} = \frac{Q_L}{Q_L + Q_R} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$x = \frac{Q_L L}{Q_L + Q_R} \dots\dots\dots (2.8)$$

2.4.3 ความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง

สำหรับการประเมินความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง (Position resolution) ของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งนั้น สามารถใช้หลักการเดียวกันกับการบ่งบอกความสามารถในการแจกแจงพลังงาน (energy resolution) ของหัววัดรังสีได้ เนื่องจากระบบวัดตำแหน่งรังสีใช้ระบบวิเคราะห์ขนาดสัญญาณพัลส์ที่แปรเปลี่ยนตามสัดส่วนตำแหน่งรังสีตกกระทบบ ดังนั้นการอ่านค่าจึงทำได้โดยการแปลงช่องวิเคราะห์ของเครื่องวิเคราะห์พลังงาน ให้สัมพันธ์กับระยะของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแล้วอ่านค่า FWHM (Full Width at Half Maximum) ในตำแหน่งที่รังสีตกกระทบบลงบนหัววัดรังสีตามแนวท่อเรื่องรังสี ดังภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 การวัดความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งของหัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่ง [6]

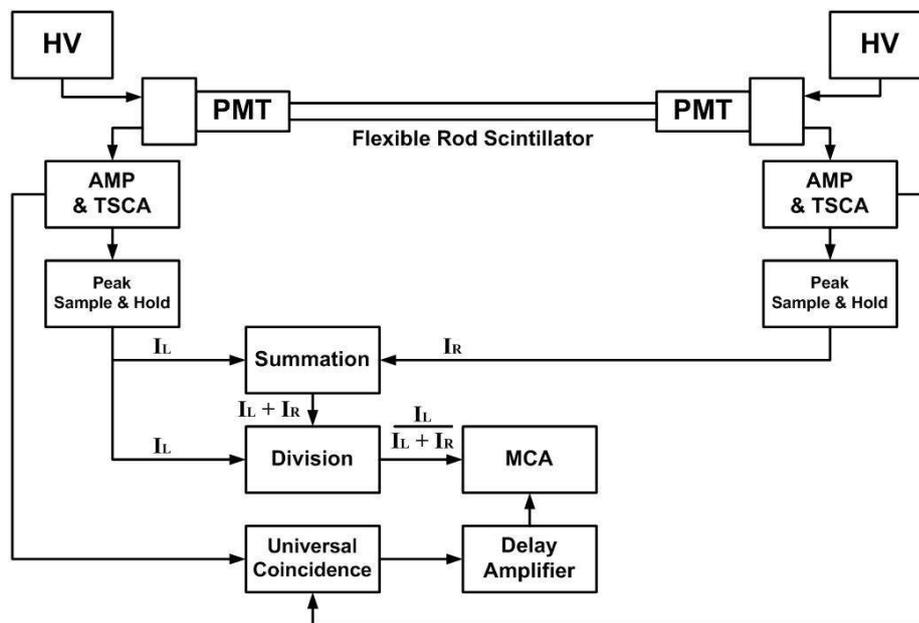
### บทที่ 3

#### การพัฒนาหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนโดยใช้สารเรืองรังสีชนิดเหลว

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนแกนเดี่ยวบรรจุสารเรืองอินทรีย์รังสีชนิดเหลวสำหรับวัดรังสีแกมมา รวมทั้งระบบวัดตำแหน่งตกกระทบของรังสีด้วยวิธีวัดสัดส่วนขนาดสัญญาณจากผลของความเข้มแสงเรืองที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งนั้นๆ ตามความยาวท่อเรืองรังสี โดยเลือกใช้และดัดแปลงวัสดุที่หาได้ง่ายมาออกแบบเพื่อสร้างชิ้นส่วนประกอบหัววัดรังสีและวงจรถอดสัญญาณสำหรับวิเคราะห์ตำแหน่งรังสีแบบประหยัด สำหรับใช้ประโยชน์ในการวัดตำแหน่งการกระจายรังสีแกมมาที่มีระดับรังสีสูงรอบภาชนะที่มีรูปทรงโค้งเว้า มีขั้นตอนการวิจัยดังนี้

#### 3.1 การออกแบบโครงสร้างของระบบวัดรังสีไวต่อตำแหน่ง

จากหลักการวัดตำแหน่งรังสีด้วยวิธีวัดสัดส่วนสัญญาณและการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถออกแบบโครงสร้าง ของระบบวัดรังสีไวต่อตำแหน่งรังสีจากแสงเรืองภายในท่ออ่อนบรรจุสารเรืองรังสีเหลวได้ดังแผนภาพในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพโครงสร้างของระบบวัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อน

จากแผนภาพโครงสร้าง ของระบบวัดรังสีไวต่อตำแหน่งรังสีจากแสงเรืองภายในท่ออ่อนบรรจุสารเรืองรังสีเหลวประกอบด้วยอุปกรณ์หลักดังนี้

1) หัววัดเรืองรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนแกนเดี่ยว บรรจุสารเรืองอินทรียรังสีชนิดเหลว สำหรับวัดรังสีแกมมา ได้แก่ ท่ออ่อนเรืองรังสีที่ปลายสองด้านต่อเชื่อมกับหลอดทวิคูณแสงที่มีคุณลักษณะเหมือนกัน

2) ระบบขยายสัญญาณพัลส์จากหลอดทวิคูณแสงที่ปลายท่อนำแสงทั้งสองด้านเพื่อสร้างสัญญาณที่เป็นสัดส่วนกับความเข้มแสงเรือง (สัญญาณอนาล็อก) และคัดเลือกสัญญาณพัลส์ควบคุมสัญญาณที่เกิดในเวลาเดียวกัน (สัญญาณลอจิก) ได้แก่ แหล่งจ่ายไบอัส (HV) อุปกรณ์ขยายสัญญาณและคัดเลือกสัญญาณ (Amp & TSCA)

3) ระบบวัดสัดส่วนสัญญาณจากระบบขยายสัญญาณพัลส์ ได้แก่ วงจรตรววจับยอดสัญญาณ (Peak sample & hold) วงจรรวมสัญญาณ (Signal summing) และวงจรหารสัญญาณ (Signal divider)

4) ระบบประมวลตำแหน่งรังสีด้วยการวิเคราะห์ขนาดสัญญาณที่เป็นสัดส่วนกับความเข้มแสง ณ ตำแหน่งใดๆ เพื่อแปลผลในรูปของข้อมูลที่สามารถระบุตำแหน่งที่รังสีตกกระทบตามความยาวของท่อเรืองรังสีของหัววัดรังสี ได้แก่ อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง (MCA) และอุปกรณ์จัดการเชิงเวลา (Coincidence & delay amplifier)

หลักการการทำงานของระบบวัดรังสีไวต่อตำแหน่ง เริ่มต้นเมื่อเกิดแสงเรืองจากตำแหน่งที่รังสีตกกระทบในท่อเรืองรังสีของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งและกระจายผ่านแกนท่อนำรังสีไปยังหลอดทวิคูณแสงซึ่งไบอัสไว้อย่างเหมาะสม อุปกรณ์ขยายสัญญาณจะขยายสัญญาณจากหลอดทวิคูณแสงด้านซ้าย ( $I_L$ ) และด้านขวา ( $I_R$ ) ตามสัดส่วนความเข้มแสงส่งให้วงจรตรววจับยอดสัญญาณและระดับสัญญาณที่ตรววจับได้ทั้งสองด้านป้อนเข้าวงจรรวมสัญญาณเพื่อสร้างสัญญาณผลรวม ( $I_L + I_R$ ) ในส่วนของวงจรหารจะรับสัญญาณด้านซ้ายหารด้วยสัญญาณผลรวมได้ขนาดสัญญาณที่เป็นสัดส่วนกับตำแหน่งส่งเข้าอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่องวิเคราะห์ขนาดสัญญาณเฉพาะส่วนที่คัดเลือกผ่านระดับเทรชโฮลด์ (Threshold) ของ TSCA ในช่วงเวลาที่เกิดแสงเรืองพร้อมกัน (Coincidence) จากนั้นข้อมูลทีวิเคราะห์ได้จะนำมาแปลผลตำแหน่งที่รังสีตกกระทบตามความยาวของท่อเรืองรังสี

### 3.2 การออกแบบและสร้างหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อน

โครงสร้างของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนแกนเดี่ยวที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยส่วนประกอบ ดังนี้

1) ท่ออ่อนเรืองรังสี (Flexible rod scintillator) ซึ่งเป็นท่ออ่อนแกนเดี่ยวนำแสงชนิดของเหลวที่สามารถโค้งงอได้ โดยภายในท่อจะบรรจุสารอินทรีย์เรืองรังสีชนิดของเหลว ดังภาพที่ 3.2

2) หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier Tube: PMT) เลือกใช้หลอดทวีคูณแสงซึ่งมีโฟโตแคโทดชนิดที่ตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของแสงเรือง จากสารอินทรีย์เรืองรังสีชนิดของเหลวที่บรรจุในท่อเรืองรังสี และฐานหลอดทวีคูณแสง (PMT tube base) จะเลือกชนิดที่มีภาคขยายส่วนหน้าในตัว ดังภาพที่ 3.4

3) อุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างปลายท่อเรืองรังสีและหลอดทวีคูณแสง (Light pipe coupler) ทำจากวัสดุทึบแสงที่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และไม่ทำปฏิกิริยากับของเหลวนำแสง (Fluid light guide) ซึ่งทำหน้าที่ส่งผ่านแสงจากปลายท่ออ่อนเรืองรังสี ไปยังผิวหน้าโฟโตแคโทดของหลอดทวีคูณแสง โดยของเหลวนำแสงที่ใช้มีคุณสมบัติในการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นของแสงเรือง

4) วัสดุที่ใช้เป็นเปลือกท่ออ่อนเรืองรังสีแบ่งออกเป็นสองชั้น คือ ชั้นแรกต้องช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมา และชั้นนอกต้องป้องกันเปลือกชั้นแรก พร้อมทั้งแสงจากภายนอกรบกวน

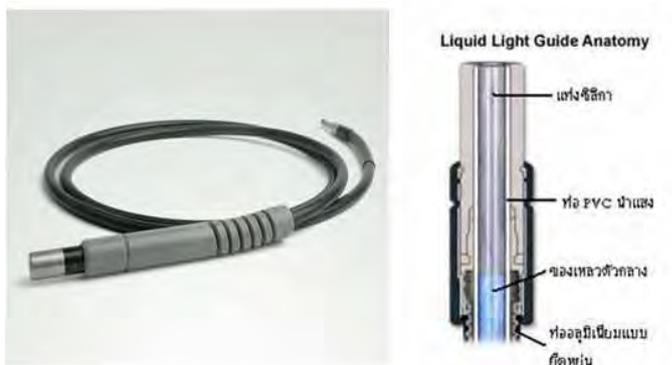
### 3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างท่ออ่อนเรืองรังสี

ก) สารเรืองรังสีเหลว เลือกใช้สารอินทรีย์เรืองรังสีชนิดของเหลวในรูปคอกเทลของบริษัท Perkin Elmer รุ่น OptiPhase HiSafe-2 ซึ่งมีคุณสมบัติตอบสนองต่อการตรวจวัดรังสีบีตาและแกมมา มีค่าความหนาแน่น 0.960 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{g/cm}^3$ ) ให้ความยาวคลื่นแสงเรืองที่ 461 นาโนเมตร (nm) และไม่มีค่าความเป็นกรด จึงไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับวัสดุต่างๆ นอกจากนี้ยังนิยมใช้ในระบบวัด LSC ทำให้หาได้ง่าย

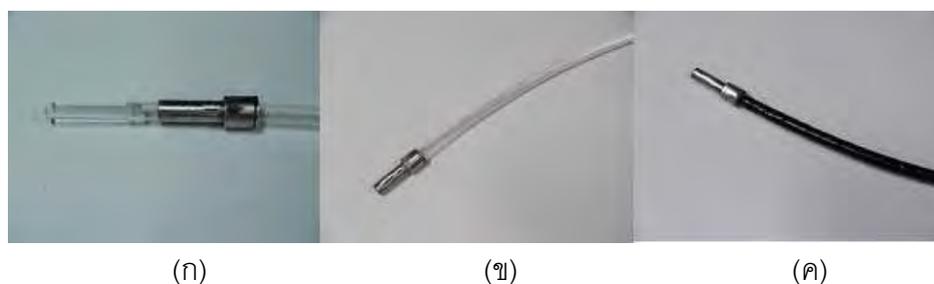
ข) ท่อนำแสง Lumatec Series 300 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 5 มิลลิเมตร ยาว 550 มิลลิเมตร เนื่องจากท่อนำแสงเป็นพลาสติกโค้งงอได้ง่ายและมีหน้าต่งนำแสงเข้าและออกที่ทำจากแท่งแก้วซิลิกาตามความต้องการทางเทคนิค ดังในภาพที่ 3.2

ขั้นตอนในการประยุกต์ท่อนำแสงมาใช้เป็นท่ออ่อนเรืองรังสี เริ่มด้วยการตัดปลายท่อด้านที่มีขนาดใหญ่ออกพร้อมทั้งของเหลวนำแสงที่บรรจุอยู่ภายในท่อออกและนำเปลือกอลูมิเนียมที่หุ้มท่อด้านนอกออกก่อนทำความสะอาดภายในท่อแล้วปล่อยให้แห้ง จากนั้นบรรจุสารอินทรีย์เรืองรังสีเหลวที่เตรียมไว้เข้าไปในแกนกลางของท่อ โดยไม่ให้มีฟองอากาศอยู่ภายในท่อ การปิดปลายเปิดของท่อด้านบรรจุสารเรืองรังสี ทำได้โดยสวมปลอกเหล็กกล้าไร้สนิมที่แน่นพอดีกับขนาด

ท่อและนำแท่งแก้วซิลิกาอัดเข้าไปในท่อนำแสงให้เสมอกับปลายท่อ ดังภาพที่ 3.3 ขั้นสุดท้ายนำ เทปฉนวนพันสายไฟหุ้มรอบท่ออ่อนเรืองรังสีเพื่อป้องกันแสงจากภายนอก



ภาพที่ 3.2 ลักษณะและส่วนประกอบของท่อนำแสง



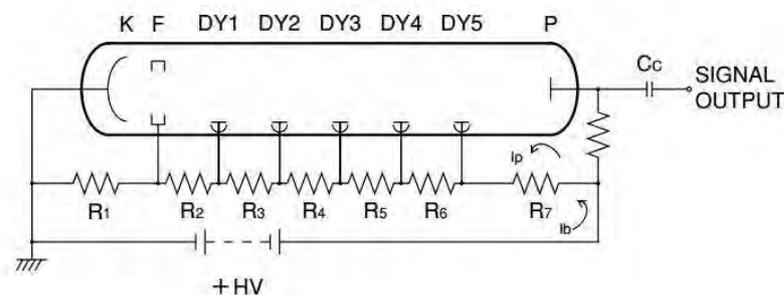
ภาพที่ 3.3 การดัดแปลงท่ออ่อนนำแสง (ก) การปิดปลายท่อนำแสง (ข) ท่อนำแสงที่ปิดปลาย เรียบร้อยแล้ว (ค) ท่อนำแสงที่พันทับด้วยเทปที่บดแสง

ค) หลอดทวีคูณแสงและฐานหลอดทวีคูณแสง เลือกใช้หลอดทวีคูณแสงของบริษัท RCA TUBE รุ่น 6655 มีโพโตแคโทดชนิด S-11 (Cesium-Antimony) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ซึ่งสามารถตอบสนองความยาวคลื่นแสงที่ 200 - 650 นาโนเมตร เหมาะกับความยาวคลื่นแสงที่เกิดจากสารอินทรีย์เหลวเรืองรังสีที่เลือกใช้ จำนวน 2 หลอด ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 (ก) หลอดทวีคูณแสงและ (ข) ฐานหลอดทวีคูณแสงที่ใช้

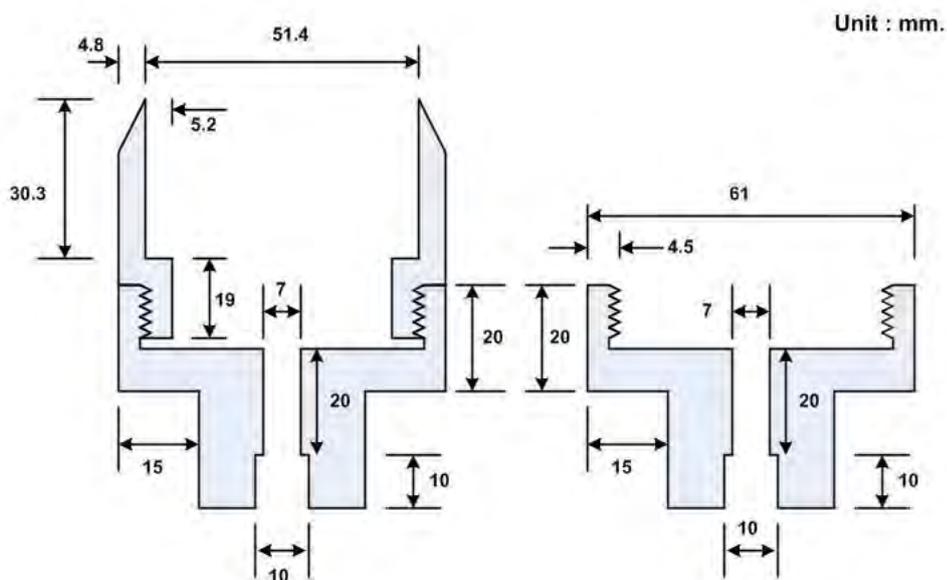
ในส่วนของวงจรไบอัสหลอดทวีคูณแสงเป็นแบบกราวด์แคโทดดังในภาพ 3.5 เลือกใช้ฐานหลอดทวีคูณแสงของบริษัท ORTEC Model 276 ซึ่งเป็นฐานหลอดแบบมาตรฐาน 14 ขา ชนิดที่มีวงจรขยายส่วนหน้าในตัว



ภาพที่ 3.5 แผนภาพวงจรไบอัสหลอดทวีคูณแสงแบบกราวด์แคโทด [7]

3.2.2 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์เชื่อมต่อปลายท่อเรืองรังสีกับหลอดทวีคูณแสง

ก) อุปกรณ์เชื่อมต่อปลายท่อเรืองรังสีกับหลอดทวีคูณแสง ทำหน้าที่จับยึดหลอดทวีคูณแสงเชื่อมต่อเข้ากับปลายท่อเรืองรังสีซึ่งมีขนาดต่างกันและจัดระยะห่างระหว่างผิวหน้าท่อเรืองรังสีกับผิวหน้าหลอดทวีคูณแสง 19 ซม. หรือคิดเป็นปริมาตรบรรจุของหลอดนำแสงสำหรับกระจายแสงเรืองจากปลายท่อเรืองรังสีให้ครอบคลุมพื้นที่ผิวหน้าพื้นที่โฟโตแคโทด โดยแบบรายละเอียดขนาดของอุปกรณ์แสดงในภาพที่ 3.6 วัสดุที่ใช้ทำเลือกใช้พลาสติกชนิด Superlene (Polyamide) สีดำ เนื่องจากต้องการคุณสมบัติที่บดแสง ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี แข็งแรงและกลิ้งขึ้นรูปง่าย



ภาพที่ 3.6 ภาพเขียนแบบอุปกรณ์เชื่อมต่อปลายท่อเรืองรังสีกับหลอดทวีคูณแสงออกแบบขึ้น

### ข) ของเหลวนำแสง (Fluid Light Guide)

ของเหลวนำแสง ทำหน้าที่ส่งผ่านและกระจายแสงจากปลายท่อเรืองแสงไปยังส่วนหน้าของหลอดทวิคูณแสง เนื่องจากของเหลวนำแสงนี้มีความสามารถในการส่งผ่านแสงเรืองที่มีความยาวคลื่นในช่วง 200 – 500 นาโนเมตร และไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุที่เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อปลายท่อกับหลอดทวิคูณแสง ในงานวิจัยนี้ของเหลวนำแสงที่ใช้เป็นของเหลวนำแสงที่ถ่ายออกมาจากท่ออ่อนนำแสง ในขั้นตอนประยุกต์ใช้ที่นำแสงมาเป็นท่ออ่อนเรืองรังสี

การประกอบอุปกรณ์เชื่อมต่อปลายท่อเรืองรังสีกับหลอดทวิคูณแสง เริ่มด้วยการนำหลอดทวิคูณแสงมาประกบเข้ากับอุปกรณ์จับยึดแล้วใช้กาวซิลิโคนเชื่อมผนึกผิวแก้วรอบหลอดทวิคูณ ดังแสดงในภาพที่ 3.7 จากนั้นเมื่อกาวซิลิโคนแห้ง จึงนำส่วนฝาครอบอุปกรณ์เชื่อมต่อด้านปลายท่อหมุนเกลียวปิดและค่อยๆ เติมของเหลวนำแสงลงไปจนเต็ม ระหว่างเติมต้องคอยไล่ฟองอากาศที่อยู่ภายในออกให้หมด แล้วจึงนำท่ออ่อนเรืองรังสีมาใส่เข้าช่องอุปกรณ์เชื่อมต่อละผนึกรอยต่อด้วยกาวซิลิโคน ดังแสดงในภาพที่ 3.8

หลังจากกาวซิลิโคนแห้งจึงนำแผ่นป้องกันสนามแม่เหล็ก มาหุ้มรอบข้างหลอดทวิคูณแสง และหุ้มอลูมิเนียมฟอยล์ทับอีกชั้นหนึ่งพร้อมทั้งต่อลงกราวด์ที่ขาฐานหลอด เพื่อป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้ามารบกวน นำเทปดำที่บดแสงสำหรับพันสายไฟมาพันทับ เพื่อป้องกันแสงจากภายนอกเข้ามาทำความเสียหายต่อหลอดทวิคูณแสง



ภาพที่ 3.7 การประกอบอุปกรณ์เชื่อมต่อด้านหลอดทวิคูณแสง



ภาพที่ 3.8 การประกอบอุปกรณ์เชื่อมต่อด้านปลายท่อเรื่องรังสี

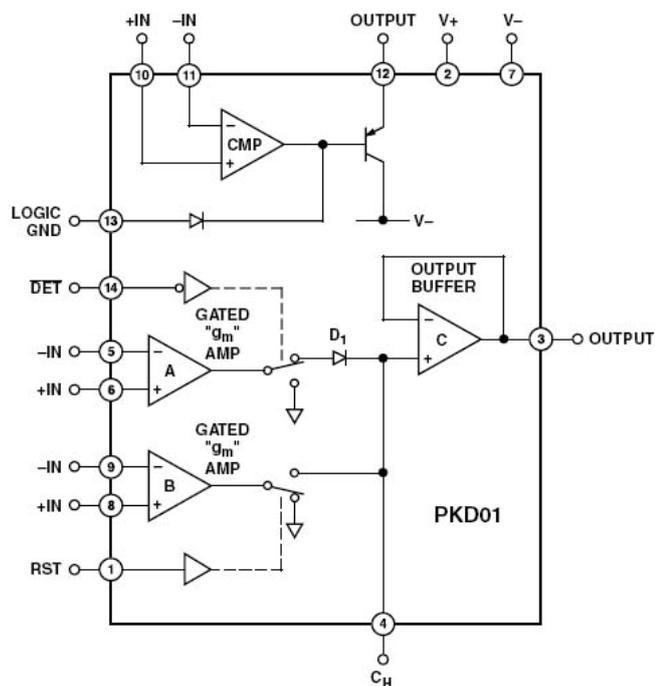
### 3.3. การออกแบบระบบวัดสัดส่วนสัญญาณ

กระบวนการวัดสัดส่วนสัญญาณ จะต้องจัดระบบวัดสัญญาณที่ประกอบด้วย วงจรตรวจจับยอดสัญญาณ (Peak sample & hold) วงจรรวมสัญญาณ (Signal summing) วงจรหารสัญญาณ (Signal divider) และวงจรเฝ้าตรวจการอิมพัลส์ของระดับสัญญาณ (Signal watch dog) การออกแบบในส่วนของวงจรวัดสัดส่วนสัญญาณ มีรายละเอียดดังนี้

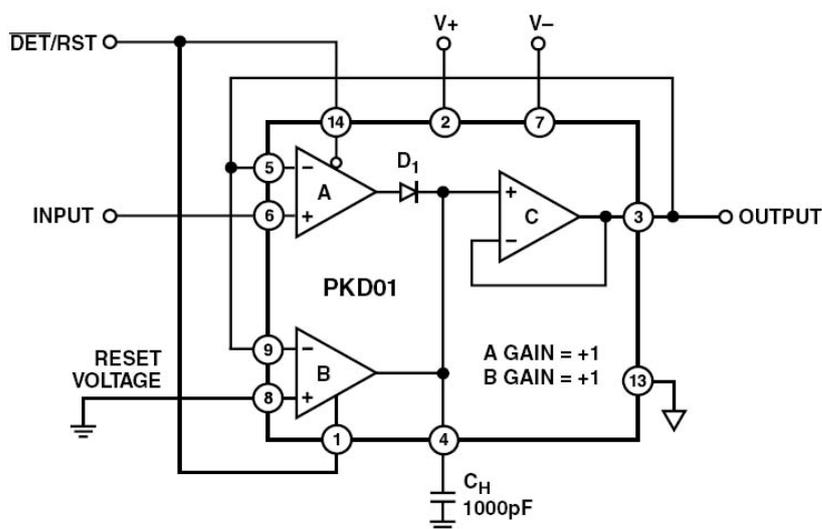
#### 3.3.1 วงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ (Peak sample & hold Circuit)

วงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ เป็นวงจรสำคัญที่ทำหน้าที่ตรวจจับยอดคลื่นของสัญญาณพัลส์ที่มาจากหัววัดรังสีและคงขนาดสัญญาณไว้เพื่อเข้ากระบวนการวัดสัดส่วนสัญญาณ ในการออกแบบวงจรเลือกใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ PKD01 ซึ่งเป็นไอซีที่ใช้สำหรับตรวจจับและคงขนาดสัญญาณพัลส์ โดยมีข้อมูลด้านเทคนิคในภาคผนวก ค และมีโครงสร้างดังภาพที่ 3.9 ภายในไอซีมีออปแอมป์ A และ B เป็นส่วนของอินพุตที่สามารถเลือกการทำงานในแบบ Inverting หรือแบบ Non-Inverting ได้ ในงานวิจัยนี้ต้องการขยายสัญญาณที่ให้สัญญาณด้านบวกจึงได้เลือกจัดวงจรแบบ Non-Inverting ดังวงจรในภาพที่ 3.10 เมื่อมีสัญญาณพัลส์จากแอมป์ของหลอดทวีคูณแสงผ่านวงจรขยายสัญญาณ (Pulse amplifier) เข้ามาที่อินพุต (ขาที่6) ของไอซีจะได้รับสัญญาณขับทางออกมีขนาดสัญญาณเท่ากับความสูงของพัลส์ทางเข้าที่เอาท์พุต (ขา 3) และคงขนาดแรงดัน

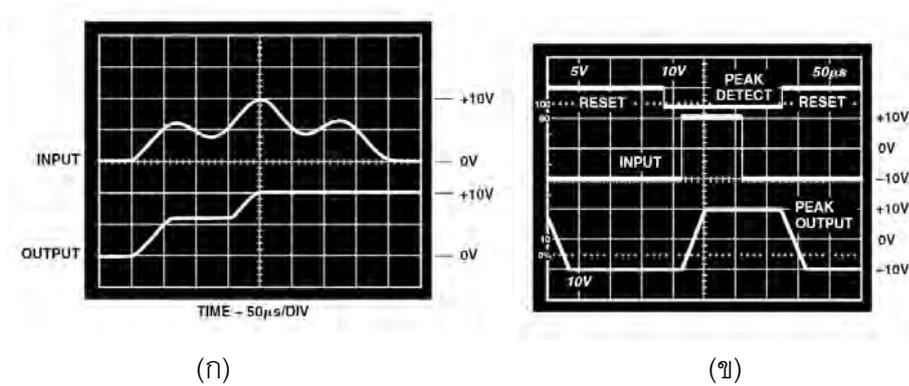
สัญญาณ (Hold) ไว้ด้วยตัวเก็บประจุ  $C_H$  เมื่อมีสัญญาณพัลส์ลูกใหม่ที่มีความสูงพัลส์มากกว่าลูกเดิมเข้ามา แรงดันสัญญาณเอาต์พุตก็จะเปลี่ยนไปเท่ากับความสูงของพัลส์ลูกใหม่ แต่ในกรณีที่สัญญาณพัลส์ลูกใหม่ที่เข้ามามีความสูงพัลส์ต่ำกว่าลูกแรก เอาต์พุตจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงดังสัญญาณในภาพที่ 3.11 ก. จนกว่าจะมีสัญญาณรีเซ็ต (Reset) การทำงานที่ขา 1 และขา 14 (DET/RST) ดังในภาพที่ 3.11 ข.



ภาพที่ 3.9 แผนภาพวงจรภายในของไอซี PKD01



รูปที่ 3.10 แผนภาพการต่อวงจรแบบ Non-Inverting ที่มีอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 1



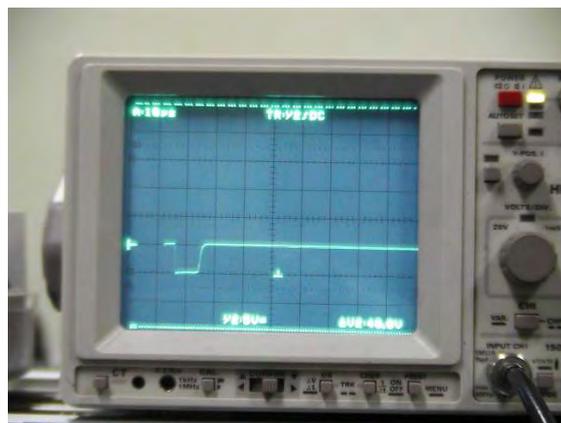
(ก)

(ข)

ภาพที่ 3.11 เปรียบเทียบสัญญาณ (ก) สัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตจากวงจรขนาดสัญญาณ

(ข) สัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตลอจิกจากวงจรตรวจจับยอดสัญญาณ

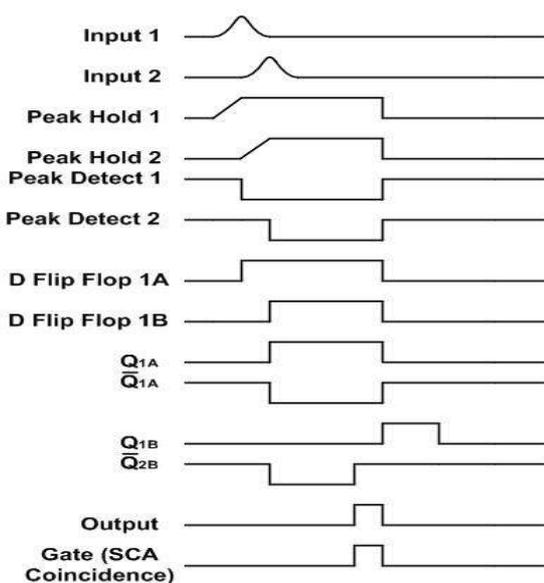
วงจรภายในของไอซี PKD01 ยังมีออปแอมป์ CMP ในรูปวงจรเปรียบเทียบขนาดแรงดันสัญญาณเพื่อกำหนดสัญญาณตรวจจับยอดสัญญาณ (Peak detect) โดยการนำสัญญาณอินพุตจากวงจรมายาสัญญาณป้อนเข้าไปที่อินพุตลบ (ขา11) เปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตวงจรที่คงขนาดสัญญาณ (Peak Hold) (ขา 3) ป้อนเข้าที่อินพุตบวก (ขา10) ของออปแอมป์ CMP ในการเปรียบเทียบสัญญาณดังกล่าว เมื่อพบขนาดแรงดันสัญญาณเท่ากันที่ภาวะการเปลี่ยนระดับสัญญาณที่ยอดพีก ไอซีจะกำหนดสัญญาณพัลส์ขาลงออกมาที่เอาต์พุต (ขา12) ดังการทดสอบสัญญาณในภาพที่ 3.12 ซึ่งสัญญาณนี้จะนำไปใช้ในการกระตุ้นและสร้างสัญญาณรีเซ็ต (Reset) ป้อนให้วงจรคงขนาดสัญญาณที่ (ขา 1,14) เพื่อรับสัญญาณลูกใหม่สำหรับวงจรถ่ายทอดการทำงานใหม่



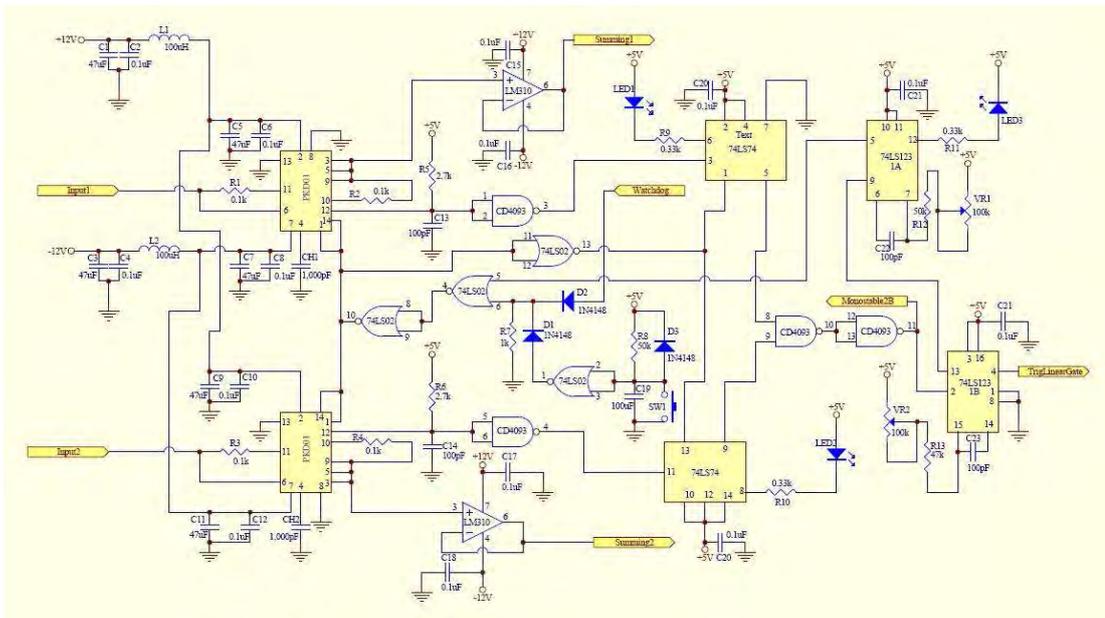
ภาพที่ 3.12 ลักษณะสัญญาณพัลส์ขาลงที่ได้จากเอาต์พุต (ขา12)

เนื่องจากหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนเรืองรังสีที่พัฒนาขึ้นนั้น ประกอบด้วยหลอดทวิคูณแสงสองชุดเพื่อตรวจจับความเข้มแสงที่กระจายไปในแต่ละข้างของท่ออ่อนเรืองรังสี ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ไอซีสำเร็จรูป PKD01 จำนวน 2 ตัว ในการตรวจจับและคงขนาดสัญญาณพัลส์จากหลอดทวิคูณแสงแต่ละชุด คือสัญญาณด้านซ้าย ( $I_L$ ) และสัญญาณด้านขวา ( $I_R$ ) ตามสัดส่วนความ

เข้มแสงส่งให้วงจรหารสัญญาณผ่านไอซีขับสัญญาณ (Buffer amplifier) ซึ่งใช้ไอซีเบอร์ LM310 แต่เนื่องจากการเกิดแสงเรืองในแกนเรืองรังสีที่ระยะห่างจากหลอดทวิคูณแสงไม่เท่ากัน จะมีเวลาการเคลื่อนที่ของแสงเรืองที่แตกต่างกัน จึงต้องเพิ่มวงจรสำหรับตรวจสอบการเกิดสัญญาณแสงเรืองที่เกิดจากตำแหน่งเดียวกัน ให้ทำงานตาม Timing diagram ของสัญญาณในภาพที่ 3.13 เริ่มจากการส่งสัญญาณตรวจพบยอดพัลส์ทั้งด้านซ้ายและขวา (Peak Detect1 และ Peak Detect2) ผ่านเกต NOT เพื่อกลับสัญญาณให้เป็นสัญญาณขาขึ้น ก่อนไปกระตุ้นไอซีฟลิปฟลอป (D Flip-Flop) A และ B เบอร์ 74LS74 กำหนดสัญญาณลอคจิก  $Q_A$  และ  $Q_B$  เพื่อรอการตรวจสอบสภาวะพร้อมกันด้วยเกต AND ก่อนที่จะกำหนดสัญญาณกระตุ้นไอซีโมโนสเตเบิล 1A และ 2B เบอร์ 74LS123 ที่รับการกระตุ้นแบบขอบขาขึ้นกำหนดสัญญาณ  $Q_{1A}$  ที่เป็นสัญญาณขาขึ้น และ  $\bar{Q}_{1A}$  ที่เป็นสัญญาณขาลง ที่มีคาบเวลา  $6.8 \mu s$  จากนั้นสัญญาณ  $\bar{Q}_{1A}$  จะถูกส่งผ่านเกต NOT เพื่อกลับสัญญาณให้เป็นสัญญาณขาขึ้น และส่งต่อไปยังเกต AND เพื่อสร้างสัญญาณเหลือมเวลาจาก  $\bar{Q}_{2B}$  ที่มีคาบเวลา  $2.4 \mu s$  โดยในคาบเวลาที่สัญญาณจาก  $\bar{Q}_{1A}$  ที่ผ่านเกต NOT และสัญญาณ  $\bar{Q}_{2B}$  เป็นลอคจิก 1 เหมือนกัน จะได้สัญญาณขาขึ้นไปควบคุมวงจรถ่ายสัญญาณเพื่อเลือกสัญญาณจากวงจรสัดส่วนสัญญาณในช่วงเวลานั้นส่งเข้าวิเคราะห์ตำแหน่งสัญญาณ ส่วนโมโนสเตเบิล 1B จะรับการกระตุ้นแบบขอบขาลงจากสัญญาณ  $Q_{1A}$  ทำให้ได้สัญญาณ  $Q_{1B}$  ที่มีคาบเวลา  $6.4 \mu s$  ซึ่งจะใช้เป็นสัญญาณสำหรับรีเซ็ตการทำงานของไอซีตรวจจับและคงขนาดสัญญาณพัลส์ และไอซีฟลิปฟลอปต่างๆ เพื่อรอรับสัญญาณพัลส์ถูกถัดไป



ภาพที่ 3.13 แผนภาพ Timing Diagram ของระบบวัดสัดส่วนสัญญาณที่ออกแบบขึ้น



ภาพที่ 3.14 แผนภาพวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ที่ออกแบบขึ้น

3.3.2 วงจรหารสัญญาณ (Signal Division Circuit)

วงจรหารสัญญาณที่ออกแบบขึ้นแสดงในภาพที่ 3.16 วงจรหารจะทำหน้าที่คำนวณสัดส่วนสัญญาณแบบอนาลอก มีส่วนประกอบหลักสองส่วน คือ ส่วนของวงจรรวมสัญญาณ และ ส่วนของวงจรหารสัญญาณ ในส่วนของวงจรรวมสัญญาณนั้น เลือกใช้ไอซีเบอร์ TL082 ซึ่งภายในจะมีออปแอมป์ 2 ตัว (Dual Op-Amp) ออปแอมป์ตัวแรกจัดวงจรแบบรวมสัญญาณความเข้มแสงด้านซ้าย ( $I_L, V_{in1}$ ) และสัญญาณด้านขวา ( $I_R, V_{in2}$ ) โดยจัดรูปแบบวงจรให้มีอัตราขยายแต่ละช่องเท่ากับ 1 เมื่อกำหนดให้  $R_1 = R_{20}, R_2 = R_{19}$  และ  $R_{f1} = R_{f2} = R_{18}$  จะได้สมการสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out1}$  ดังสมการ 3.1

$$V_{out1} = -\left(\frac{R_{f1}}{R_1} V_{in1} + \frac{R_{f2}}{R_2} V_{in2}\right)$$

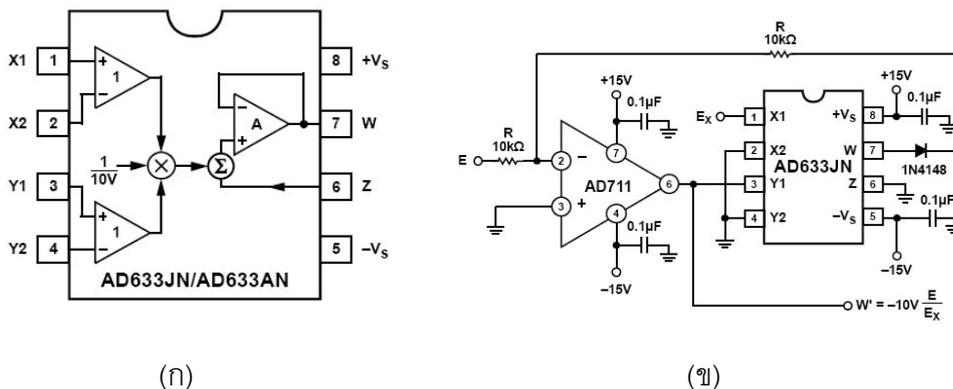
$$V_{out1} = -(V_{in1} + V_{in2}) \dots\dots\dots 3.1$$

ส่วนออปแอมป์ตัวที่สองจัดวงจรแบบกลับสัญญาณ มีอัตราขยายเท่ากับ 1 เช่นกัน เมื่อกำหนดให้  $R_2 = R_{25}, R_{f2} = R_{16}$  จะได้สมการสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out2}$  ดังสมการ 3.2

$$V_{out2} = -\frac{R_{f2}}{R_2} (-V_{out1})$$

$$V_{out2} = V_{out1} \dots\dots\dots 3.2$$

ในส่วนนของวงจรถหารสัญญาณ เลือกใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD633 Four-Quadrant Analog Multiplier มีข้อมูลทางเทคนิคในภาคผนวก ค และมีโครงสร้างภายในดังในภาพที่ 3.14 ก. ร่วมกับไอซีออปแอมป์เบอร์ TL082 นำมาจัดวงจรแบบหารสัญญาณ ดังในภาพที่ 3.15 ข. เพื่อวัดสัดส่วนสัญญาณด้านซ้ายกับผลรวมสัญญาณ  $I_L / (I_L + I_R)$  หรือ  $V_{in1} / (V_{in1} + V_{in2})$  จะได้สัญญาณเอาต์พุต W ดังสมการที่ 3.3 [ภาคผนวก ค]



ภาพที่ 3.15 แผนภาพโครงสร้างและการจัดวงจรแบบหารสัญญาณของไอซี AD633

เมื่อกำหนดให้

$$W = -10 \times \left( \frac{E}{E_x} \right) \dots\dots\dots 3.3$$

และ

$$E_x = V_{out2} = V_{in1} + V_{in2}$$

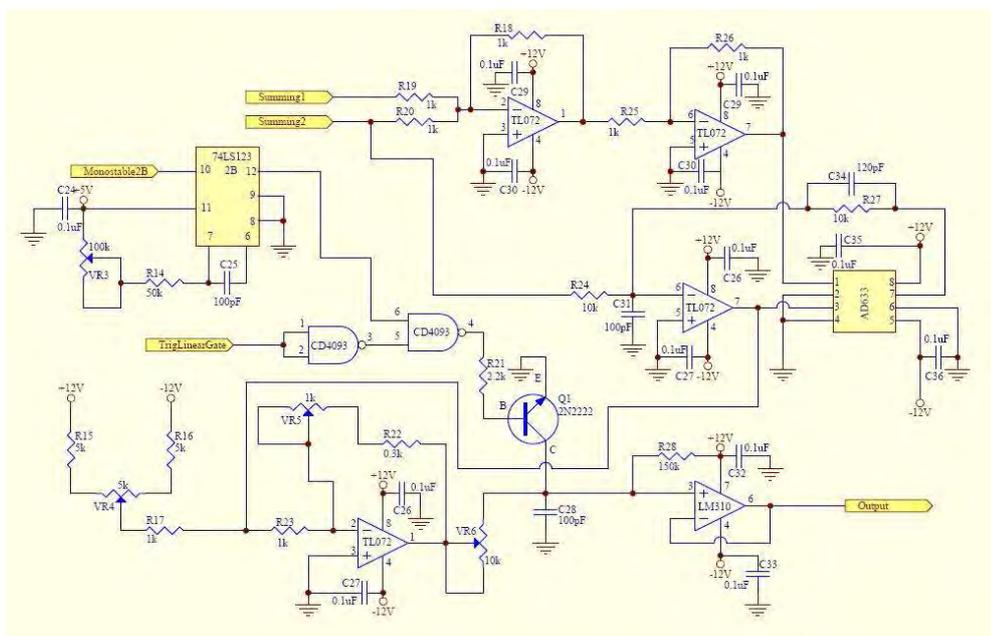
ดังนั้น

$$W = -10 \times \left( \frac{V_{in1}}{V_{in1} + V_{in2}} \right)$$

จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุต W ที่ได้มีค่าเป็นลบ ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณด้วย MCA ได้ เนื่องจาก MCA จะวิเคราะห์เฉพาะสัญญาณด้านบวกเท่านั้น จึงต้องเพิ่มวงจรกลับสัญญาณด้วยออปแอมป์ TL082 ที่จัดวงจรให้สามารถปรับอัตราขยายได้ที่  $VR_5$  โดยอัตราขยายเท่ากับ  $(R_{22} + VR_5) / R_{23}$  หรือ  $R_f / R$  ซึ่งจะได้สัญญาณเอาต์พุต W เป็นบวก ดังสมการ 3.4 สัญญาณจะถูกคัดเลือกด้วยเกตเชิงเส้น (Linear gate) ผ่านวงจรขับสัญญาณที่ใช้ไอซี LM310 โดยช่วงคาบเวลาสัญญาณที่เกตเชิงเส้นกำหนดด้วยโมโนสเตเบิล

$$W = \left( -\frac{R_f}{R} \right) \times \left[ -10 \times \left( \frac{V_{in1}}{V_{in1} + V_{in2}} \right) \right]$$

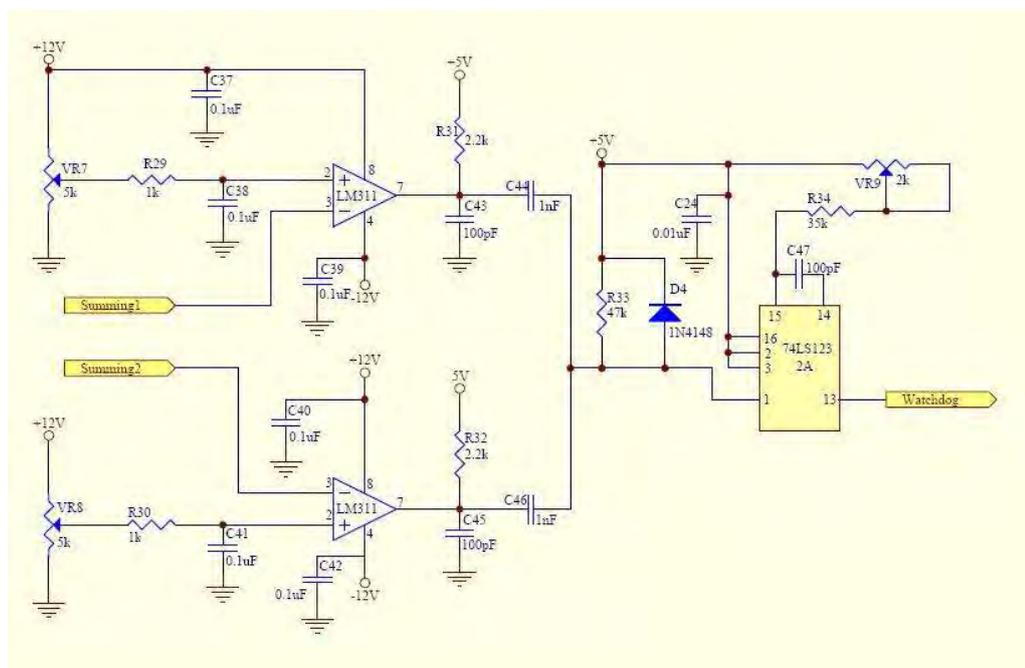
$$W = 10 \times \left( \frac{V_{in1}}{V_{in1} + V_{in2}} \right) \dots\dots\dots 3.4$$



ภาพที่ 3.16 แผนภาพวงจรหารสัญญาณที่ออกแบบขึ้น

### 3.3.3 วงจรเฝ้าตรวจการอิมิตัวของสัญญาณ (Signal watchdog)

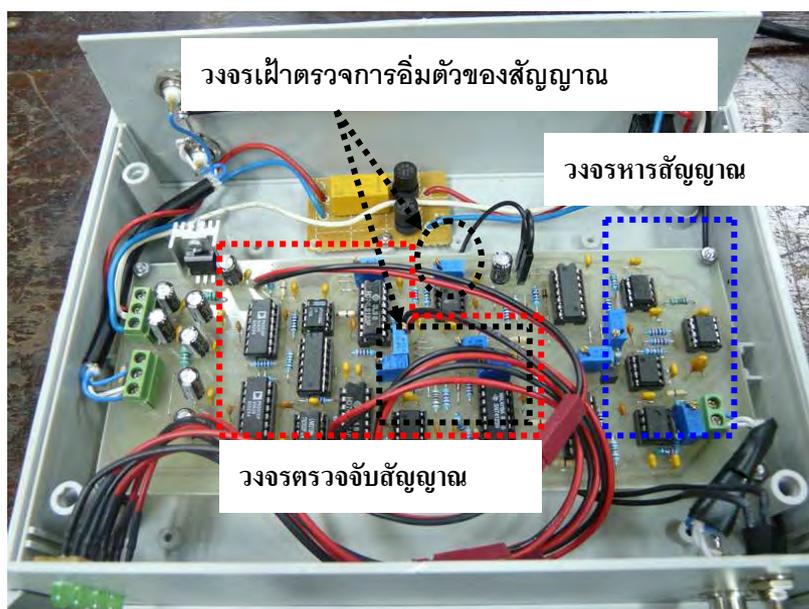
จากการใช้งานไอซี PKD01 พบว่าในกรณีสัญญาณพัลส์สูงถึงระดับแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายจะเกิดการอิมิตัวของสัญญาณที่คงระดับไว้และไม่สามารถตรวจจับยอดสัญญาณพัลส์ ถูกตัดไปได้ จะต้องรีเซ็ต (Reset) ทันที จึงได้ออกแบบวงจรเฝ้าตรวจการอิมิตัวของสัญญาณขึ้นดังในภาพที่ 3.17



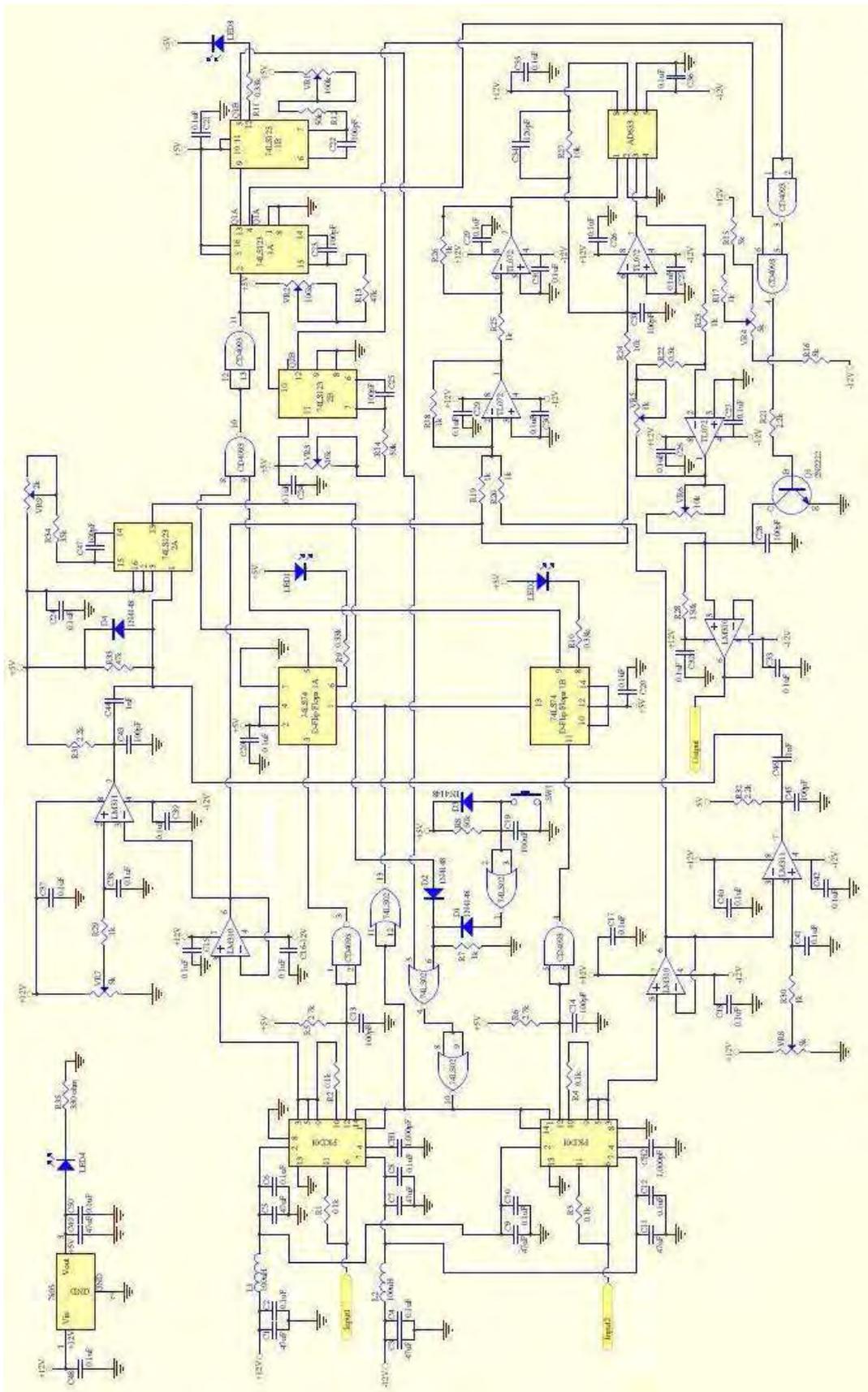
ภาพที่ 3.17 แผนภาพวงจรเฝ้าตรวจการอิมิตัวของสัญญาณ (Signal watchdog) ที่ออกแบบขึ้น

จากวงจรในภาพที่ 3.17 แบ่งวงจรย่อยได้เป็นสองส่วน ได้แก่วงจรเปรียบเทียบแรงดันสัญญาณ (Voltage Comparator) และวงจรถ้าเนิดสัญญาณรีเซ็ต ส่วนของวงจรเปรียบเทียบแรงดันสัญญาณเลือกใช้ไอซี LM311 จำนวน 2 ตัว รับสัญญาณพีคของความเข้มแสงด้านซ้ายและด้านขวาที่ขา Inverting Input เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงปรับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงได้ด้วย  $VR_7$  และ  $VR_8$  จาก 0-12 V (ปรับไว้ที่ 10 V) ที่ขา Non-Inverting Input ในกรณีที่สัญญาณพีคของความเข้มแสงจากวงจรตรวจจับพัลส์ มีระดับแรงดันสัญญาณอิมพัลส์มากกว่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเอาต์พุตของออปแอมป์จะเปลี่ยนสถานะลอคจิกจาก 1 เป็น 0 ก่อสัญญาณกระตุ้นผ่านคาปาซิเตอร์  $C_{43}$  และ  $C_{45}$  ซึ่งต่อร่วมกันเข้ากับอินพุตของวงจรโมโนสเตเบิลที่ใช้ไอซี 74LS123 ก่อเกิดสัญญาณเอาต์พุต Q เป็นพัลส์ลอคจิกส่งไปรีเซ็ตไอซี PKD01 เพื่อรับสัญญาณจากหัววัดรังสีลูกใหม่เข้ามาแทนที่ระบบจะค้างสถานะและต้องรีเซ็ตด้วยสวิตช์ภายนอก

วงจรประกอบที่ออกแบบขึ้นทั้งหมดได้นำมารวมกันเป็นระบบวัดสัดส่วนสัญญาณดังในภาพที่ 3.19 และนำไปออกแบบแผ่นพิมพ์วงจรประกอบเป็นอุปกรณ์พร้อมใช้งาน ดังแสดงในรูปถ่ายภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 ระบบวัดสัดส่วนสัญญาณที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น



ภาพที่ 3.19 แผนภาพวงจรวัดสัดส่วนสัญญาณที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น

### 3.4 การประกอบระบบวัดรังสีไวต่อตำแหน่ง

ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวัดสัดส่วนสัญญาณออกแบบให้ทำงานร่วมกับอุปกรณ์วัดมาตรฐาน NIM ตามแผนภาพโครงสร้างระบบวัดที่ออกแบบขึ้นในภาพที่ 3.1

ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบ่งออกเป็นระบบย่อย ดังนี้

- 1) ระบบวัดรังสีส่วนหน้า ประกอบด้วย หัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งที่พัฒนาขึ้น แหล่งจ่ายไบอัส (HV bias) อุปกรณ์ขยายสัญญาณและคัดเลือกสัญญาณ (Amp & TSCA)
- 2) ระบบวัดสัดส่วนสัญญาณ ประกอบด้วย วงจรตรวจจับยอดสัญญาณ (Peak sample & hold) วงจรรวมสัญญาณ (Signal summing) วงจรหารสัญญาณ (Signal divider) และวงจรเฝ้าตรวจการอิมิตัวของระดับสัญญาณ (Signal watch dog)
- 3) ระบบประมวลตำแหน่งรังสี ประกอบด้วย อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง (MCA) และอุปกรณ์โคอซิเดนซ์ (Coincidence unit) และอุปกรณ์ขยายแบบหน่วงเวลา (delay amplifier)

ระบบวัดสัดส่วนสัญญาณที่พัฒนาขึ้นนำมาจัดระบบร่วมกับระบบวัดรังสีส่วนหน้าระบบประมวลตำแหน่งรังสีทำงานร่วมกันเป็นระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวัดสัดส่วนสัญญาณ ดังแสดงระบบทั้งหมดในภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 ระบบวัดสัดส่วนสัญญาณเต็มระบบที่พัฒนาขึ้น

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

การพัฒนาหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบที่อ่อนโดยใช้สารเรืองรังสีเหล่านี้ ได้มีการออกแบบและสร้างส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ พัฒนาหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบที่อ่อนแกนเดี่ยวบรรจุสารเรืองอินทรีย์รังสีชนิดเหลวสำหรับวัดรังสีแกมมา และ ระบบวัดสัดส่วนสัญญาณจากหัววัดรังสี จากนั้นได้ออกแบบระบบวัดตำแหน่งตกกระทบของรังสีด้วยวิธีวัดสัดส่วนขนาดสัญญาณจากผลของความเข้มแสงเรืองที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งนั้นๆ ตามความยาวท่อเรืองรังสี พร้อมทั้งได้มีการทดสอบ การตอบสนองต่อการวัดรังสี การเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดการรังสีแกมมา ทดสอบการทำงานของระบบวัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่งและความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง รวมถึงความเป็นเชิงเส้นของการวัดตำแหน่งตกกระทบของรังสี โดยมีลำดับขั้นการทดสอบดังนี้

- ก. ทดสอบหัววัดรังสีแบบที่อ่อนเรืองรังสี
- ข. ทดสอบระบบวัดสัดส่วนสัญญาณจากหัววัดรังสี
- ค. ทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ
- ง. ทดสอบระบบวัดรังสีไวต่อตำแหน่ง
- จ. ทดสอบการวัดตำแหน่งรังสีตามแนวโค้ง

#### 4.1. การทดสอบหัววัดเรืองรังสีแบบที่อ่อนเรืองรังสี

ได้ศึกษาคุณลักษณะของหัววัดเรืองรังสีแบบที่อ่อนแกนเดี่ยวที่พัฒนาขึ้น ในด้านการตอบสนองรังสีบีตาและแกมมา ผลของความยาวท่อเรืองรังสีและการเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมา โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดการทดสอบดังนี้

##### 4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

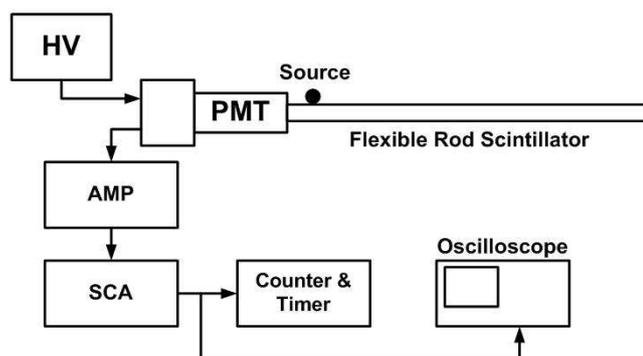
เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบสำหรับศึกษาข้อมูลทางเทคนิคของหัววัดเรืองรังสีแบบที่อ่อนแกนเดี่ยวก่อนปรับโครงสร้างเป็นหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบที่อ่อนเรืองรังสี ประกอบด้วย

- 1) หัววัดแบบที่อ่อนเรืองรังสีที่พัฒนาขึ้น
- 2) สฐานหลอดทวิคูณแสงพร้อมอุปกรณ์ขยายสัญญาณส่วนหน้าของ ORTEC Model 276 จำนวน 1 ชุด
- 3) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงของ ORTEC Model 478 จำนวน 1 โมดูล
- 4) อุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์ของ CANBERRA Model 2022 จำนวน 1 โมดูล

- 5) อุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดียวของ CANBERRA Model 2022 จำนวน 1 โมดูล
- 6) อุปกรณ์นับรังสีและตั้งเวลาของ ORTEC Model 871 จำนวน 1 โมดูล
- 7) NIM BIN และแหล่งจ่ายไฟฟ้า จำนวน 1 ชุด
- 8) ต้นกำเนิดรังสี Cs-137 ความแรงรังสี 10  $\mu\text{Ci}$  และ 93.9  $\mu\text{Ci}$  อย่างละ 1 ตัว
- 9) ต้นกำเนิดรังสี Sr-90/Y-90 ความแรงรังสี 0.6  $\mu\text{Ci}$  จำนวน 1 ตัว
- 10) เครื่องอ่านรูปสัญญาณ (Oscilloscope) ของ HAMEG Model HM1507-3

#### 4.1.2 การทดลองและผลการทดลอง

ในการศึกษาคุณลักษณะของหัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อนแกนเดี่ยว ได้จัดระบบวัดรังสีเพื่อการทดสอบข้อมูลต่างๆ ดังแผนภาพระบบวัดในภาพที่ 4.1 และรูปถ่ายระบบวัดในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.1 แผนภาพระบบวัดรังสีเพื่อทดสอบหัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อนแกนเดี่ยว

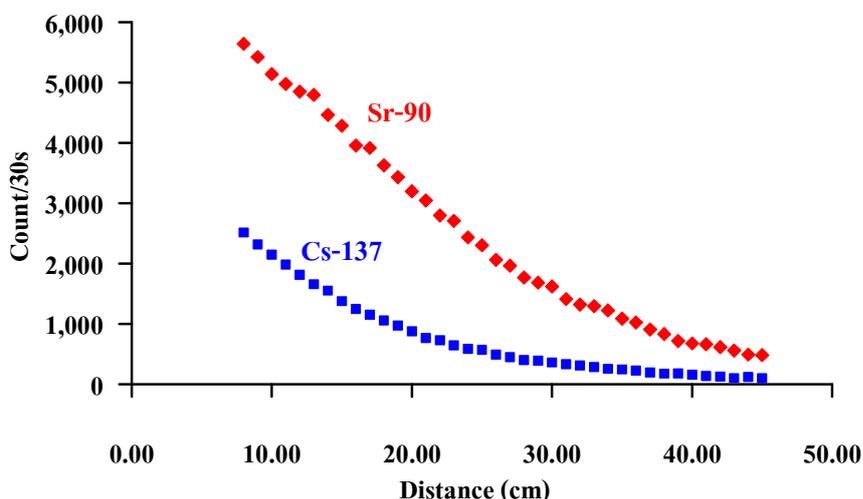


ภาพที่ 4.2 การจัดระบบวัดรังสีเพื่อทดสอบหัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อนแกนเดี่ยว

ก) การศึกษาผลตอบสนองการวัดรังสีบีตาและแกมมา

ก่อนการทดสอบได้ทดลองปรับตั้งค่าอุปกรณ์วัดเพื่อให้ได้สัญญาณที่เหมาะสม โดยใช้ไบอัสหัววัดรังสีที่ 900 โวลต์ สัญญาณจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณเลือกใช้แบบ Uni-polar ตั้งค่า Shaping time ที่ 1  $\mu$ s อัตราขยายที่ 130 เท่า และตั้งระดับคัตเลือกสัญญาณที่ 0.3 โวลต์

การทดสอบผลตอบสนองการวัดรังสีแกมมาและบีตา ได้ใช้ต้นกำเนิดรังสี Cs-137 (พลังงาน 0.662 MeV) ความแรงแรังสี 10  $\mu$ Ci และต้นกำเนิดรังสี Sr-90/Y-90 (พลังงาน 0.55 MeV/2.28 MeV) ความแรงแรังสี 0.6  $\mu$ Ci ซึ่งบังคับลำรังสีขนาด 5 มิลลิเมตร วางบนผิวท่ออ่อนเรืองรังสีที่ระยะห่างจากด้านหน้าของหลอดทวิคูณแสง 8 เซนติเมตร และเลื่อนตำแหน่งไปตามแนวยาวท่ออ่อนเรืองรังสีครั้งละ 1 เซนติเมตร แต่ครั้งนั้บรังสีเป็นเวลา 30 วินาที จนถึงระยะ 45 เซนติเมตร ผลทดลองเป็นไปตามโปรไฟล์ค่านับรังสีตามระยะทางเปรียบเทียบกันดังภาพที่ 4.3



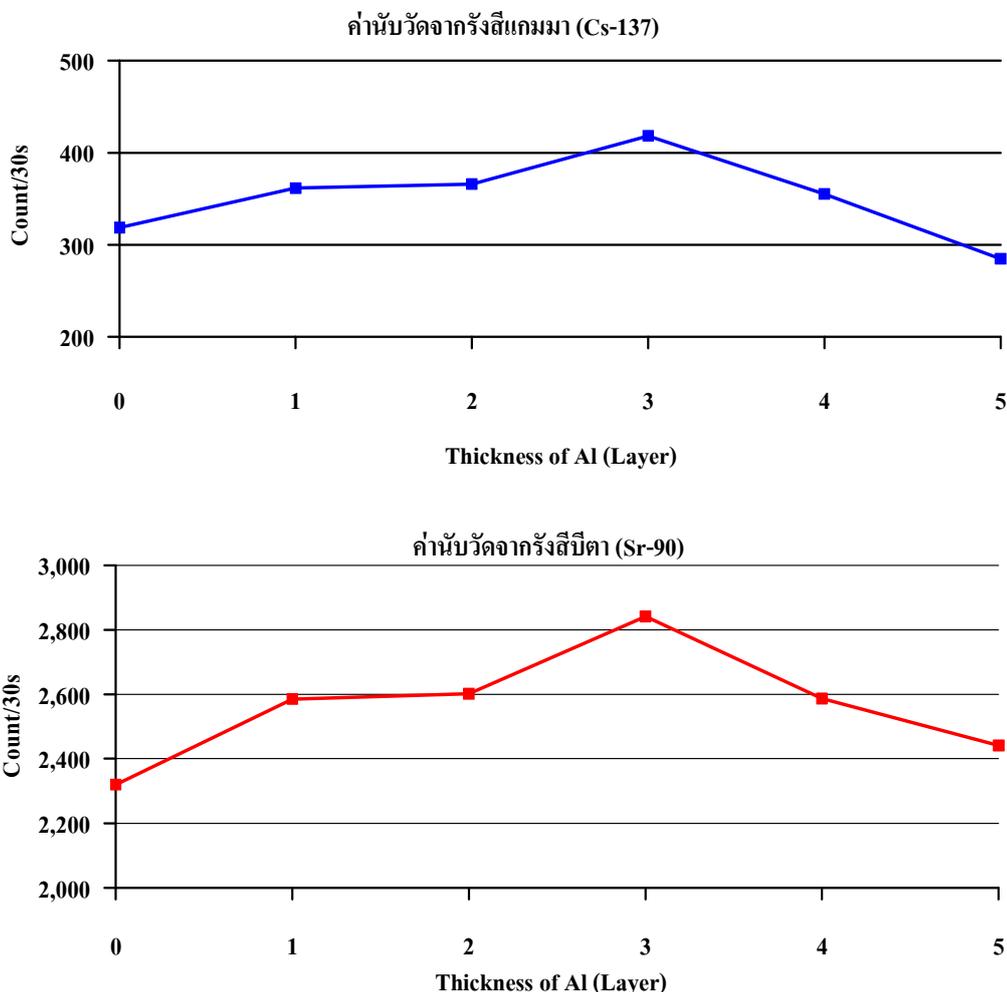
ภาพที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบโปรไฟล์ค่านับรังสีแกมมาและบีตาของหัววัดเรืองรังสี

ผลทดสอบพบว่าหัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อนแกนเดี่ยวที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดรังสีได้ทั้งรังสีแกมมาและบีตาโดยตอบสนองต่อรังสีบีตาได้ดีกว่ารังสีแกมมา โปรไฟล์การวัดรังสีแสดงให้เห็นถึงจำนวนนับรังสีจะแปรผันตามแนวยาวของท่อเรืองรังสีโดยลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งสอดคล้องกับผลการลดทอนความเข้มแสงเรืองในแกนของท่ออ่อนเรืองรังสี

ข) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมา

การทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อรังสีแกมมา ด้วยการเพิ่มโอกาสจากอันตรกิริยาของโฟตอนที่ผนังด้านนอกท่อเรืองรังสี โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์หุ้มรอบท่อเรืองรังสี และทดลองเพิ่มความหนาอลูมิเนียมฟอยล์ ขนาดความหนา 16 ไมโครเมตร พันรอบท่อเรืองรังสีครั้งละ 1 ชั้น จำนวน 5 ชั้น ในแต่ละชั้นได้ทดลองวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 และ

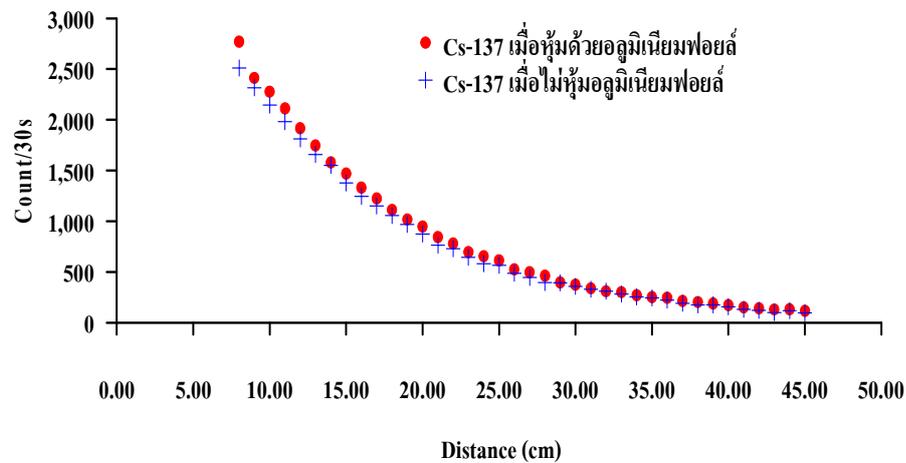
รังสีบีตาจากต้นกำเนิดรังสี Sr-90/Y-90 ที่ตำแหน่งห่างจากด้านหน้าของหลอดทวิคูณแสง 8 เซนติเมตร ได้ผลเปรียบเทียบกันดังกราฟภาพที่ 4.4



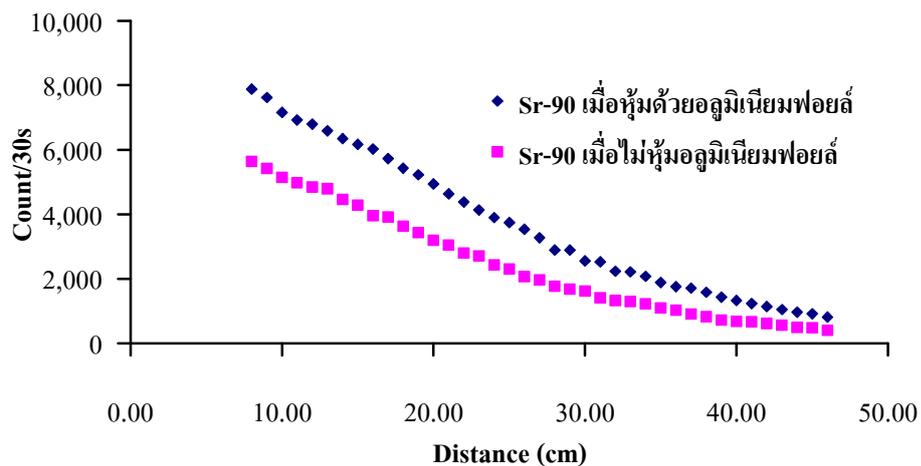
ภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อรังสีแกมมาและรังสีบีตา

จะเห็นว่าค่านับรังสีจะเพิ่มสูงสุดที่ความหนาของอลูมิเนียมฟอยล์ 48 ไมโครเมตร (3 ชั้น) ช่วยให้ประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาเพิ่มขึ้น 31.03% และพบว่าประสิทธิภาพการวัดรังสีบีตาเพิ่มขึ้นเป็น 22.46 % เนื่องจากผลของการเพิ่มโอกาสการเกิดเบรมส์ชตราลุงของรังสีบีตา

หลังจากนำอลูมิเนียมฟอยล์หนา 48 ไมโครเมตร หุ้มผนังด้านนอกท่ออ่อนเรื่องรังสีตลอดความยาวและพันทับด้วยเทปพันสายไฟเพื่อป้องกันแสงจากภายนอกรบกวน แล้วพบว่าท่อนำรังสียังมีความอ่อนตัวที่จะโค้งงอได้ จากนั้นได้ทดสอบการตอบสนองต่อรังสีแกมมาต้นกำเนิดรังสี Cs-137 และรังสีบีตาจากต้นกำเนิดรังสี Sr-90/Y-90 ตามแนวท่อเรื่องรังสี เพื่อเปรียบเทียบผลการวัดรังสีของหัววัดรังสีระหว่างการหุ้มผนังด้านนอกท่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์และไม่หุ้ม ซึ่งได้ผลการทดลองดังโปรไฟล์ในภาพที่ 4.5 และภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบโปรไฟล์ค่านับรังสีตามระยะทางของต้นกำเนิดรังสี Cs-137

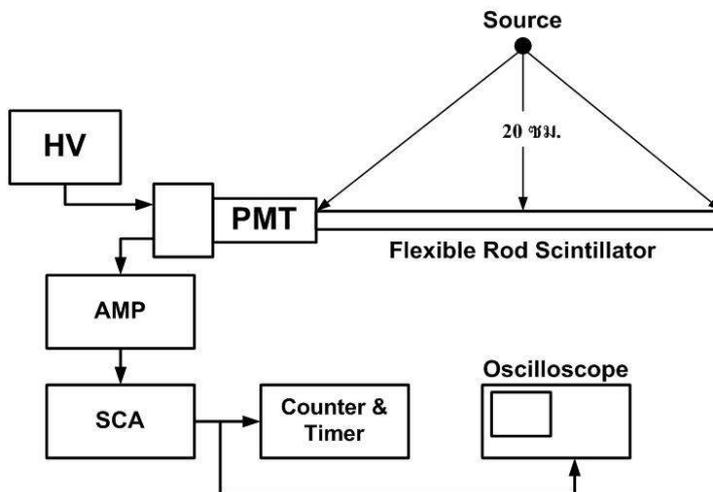


ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบโปรไฟล์ค่านับรังสีตามระยะทางของต้นกำเนิดรังสี Sr-90

จากโปรไฟล์ค่านับรังสีตามระยะทางของหัววัดเรืองรังสีสามารถคำนวณ Attenuation length (L) [แสดงการคำนวณในภาคผนวก ก] เมื่อใช้วัดรังสีแกมมาจาก Cs-137 ได้เท่ากับ 11.75 เซนติเมตร และเมื่อใช้วัดรังสีบีตาจาก Sr-90/Y-90 ได้เท่ากับ 16.28 เซนติเมตร

ค) ทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมา

ในการหาประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 ของหัววัดเรืองรังสีที่พัฒนาขึ้น โดยจัดระบบวัดรังสีดังแผนภาพในภาพที่ 4.7 และรูปถ่ายภาพที่ 4.8 ใช้ต้นกำเนิดรังสี Cs-137 (พลังงาน 662 keV) ความแรงรังสี 93.9  $\mu\text{Ci}$  วางอยู่เหนือจุดกึ่งกลางท่ออ่อนเรืองรังสีที่ระยะห่าง 20 เซนติเมตร และวัดค่านับรังสีเฉลี่ยจำนวน 5 ครั้ง นำผลไปคำนวณค่าประสิทธิภาพ



ภาพที่ 4.7 แผนภาพการจัดตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเพื่อหาประสิทธิภาพของท่ออ่อนเรืองรังสี



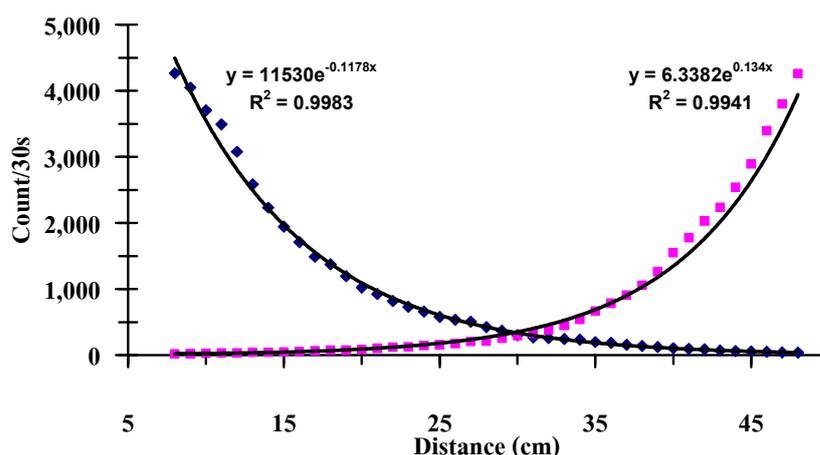
ภาพที่ 4.8 การจัดตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีเพื่อหาประสิทธิภาพของท่ออ่อนเรืองรังสี

ผลการวัดรังสีสามารถเก็บค่านับรังสีสุทธิได้เท่ากับ 2,705 cpm ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพสมบูรณ์ ( $\epsilon_{abs}$ ) ได้เท่ากับ  $1.102 \times 10^{-3} \%$  และค่าประสิทธิภาพที่หัววัดรังสีได้จริง ( $\epsilon_{int}$ ) เท่ากับ  $5.98 \times 10^{-3} \%$  [การคำนวณในภาคผนวก ก]

ง) ทดสอบหัววัดเรืองรังสีไวต่อตำแหน่ง

จากผลทดสอบข้างต้นได้นำมาพัฒนาโครงสร้างของหัววัดเรืองรังสีไวต่อตำแหน่ง โดยการคัดเลือกหลอดทวิคูณแสง ที่จะนำมาใช้เชื่อมต่อกับปลายท่อเรืองรังสีทั้งสองด้านในการวัดสัดส่วนสัญญาณ ซึ่งต้องมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน สำหรับการคัดเลือกทำได้โดยนำหลอดทวิคูณแสงมา

เชื่อมต่อกับปลายอีกด้านหนึ่งและวัดโปรไฟล์ค่านับรังสีตามแนวยาวท่อเครื่องรังสี ด้วยต้นกำเนิดรังสีชนิดเดียวกัน และเงื่อนไขเดียวกัน จากนั้นจึงคัดเลือกหลอดทวิคูณแสงที่มีโปรไฟล์ค่านับรังสีใกล้เคียงกันที่สุดมาประกอบเป็นหัววัดเครื่องรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนที่ใช้สารอินทรีย์เรืองรังสีชนิดเหลว ผลการคัดเลือกหลอดทวิคูณแสงได้โปรไฟล์ค่านับรังสีเปรียบเทียบกันดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบโปรไฟล์ค่านับรังสีแกมมาที่ได้จากปลายท่ออ่อนเครื่องรังสีสองด้าน

#### 4.2 การทดสอบระบบวัดสัดส่วนสัญญาณจากหัววัดรังสี

การทดสอบระบบวัดสัดส่วนสัญญาณที่พัฒนาขึ้นเป็นการทดสอบการทำงานของวงจรมีอยู่ในระบบได้แก่ วงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ และวงจรหาสัญญาณ เพื่อตรวจสอบความแม่นยำเชิงเส้นและการปรับแต่งสัญญาณ ซึ่งมีขั้นตอนและรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

##### 4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดข้อมูลทางเทคนิคของระบบวัดสัดส่วนสัญญาณก่อนนำไปทำงานร่วมกับระบบวัดรังสีมาตรฐาน NIM และอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่องประกอบด้วย

- 1) ระบบวัดสัดส่วนสัญญาณที่พัฒนาขึ้น
- 2) เครื่องอ่านรูปสัญญาณ (Oscilloscope) ของ Tektronix Model 2245A
- 3) อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulser) ของ CANBERRA Model 807 จำนวน 1 ตัว
- 4) วงจรสร้างสัญญาณสัดส่วนพัลส์ (Pulse height ratio circuit) จำนวน 1 ชุด
- 5) อุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์ (Amplifier) ของ CANBERRA Model 2022 จำนวน 2 โมดูล

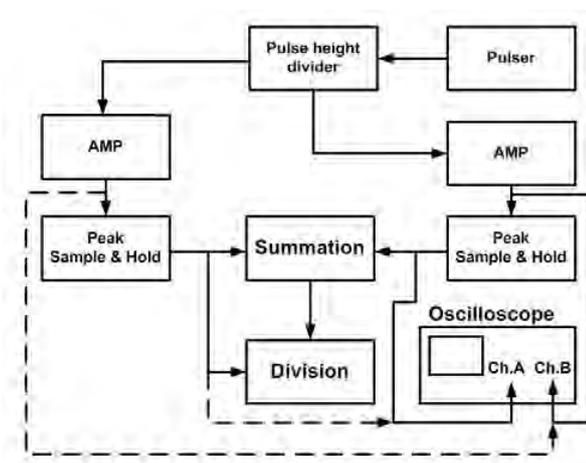
6) NIM BIN และแหล่งจ่ายไฟฟ้า จำนวน 1 ชุด

4.2.2 การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองเพื่อทดสอบระบบวัดสัดส่วนสัญญาณที่พัฒนาขึ้นแบ่งออกเป็น การทดสอบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์และวงจรหารสัญญาณ มีรายละเอียดและผลทดสอบดังนี้

ก) ทดสอบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์

การทดสอบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ ด้วยสัญญาณจากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณพัลส์ ได้จัดระบบเพื่อการทดสอบผลการทำงานดังแผนภาพระบบทดสอบในภาพที่ 4.10 และรูปถ่ายระบบในภาพที่ 4.11



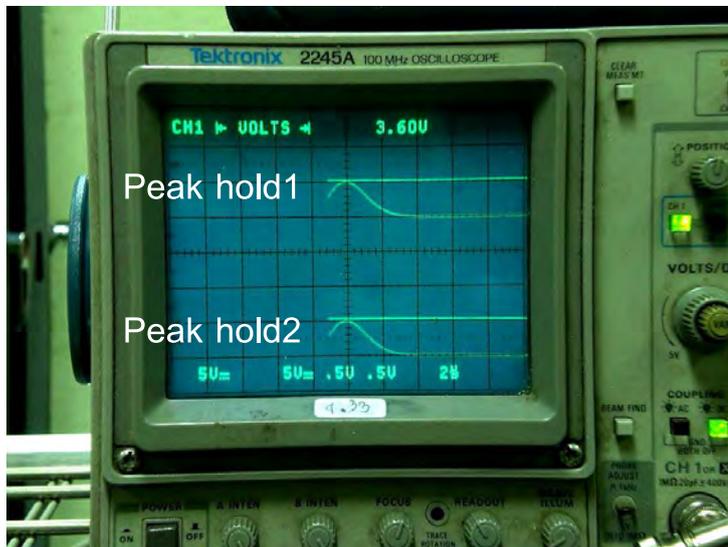
ภาพที่ 4.10 แผนภาพการจับอุปกรณ์ทดสอบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์



ภาพที่ 4.11 การจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์

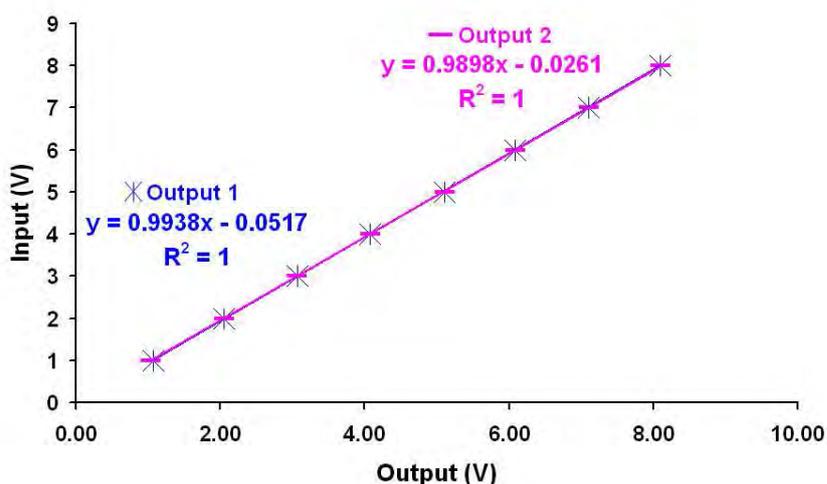
การทดสอบด้วยการแปรเปลี่ยนขนาดสัญญาณพัลส์ (Input 1) บ่อนให้กับอินพุตของระบบวัดสัดส่วนสัญญาณ และตรวจวัดขนาดสัญญาณเอาท์พุต ของวงจรตรวจจับสัญญาณ (Output 1 และ Output 2) ด้วยเครื่องอ่านรูปสัญญาณแต่ละด้าน ดังแสดงในภาพที่ 4.12 ได้ผล

ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ดังตารางที่ 4.1 และเส้นกราฟในภาพที่ 4.13 พบว่ามีความเป็นเชิงเส้นของช่องด้านซ้าย (Output 1) และด้านขวา (Output 2) เป็น  $R^2 = 1$  ทั้งสองด้าน



ภาพที่ 4.12 รูปสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์

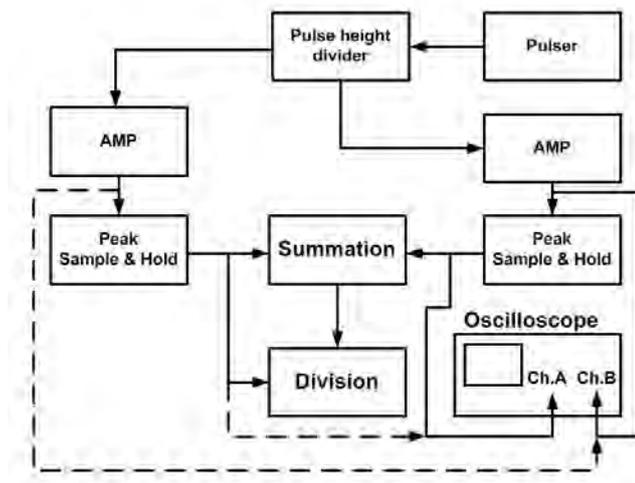
Input ( $V_p$ )	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
Output 1 (V)	1.07	2.05	3.07	4.07	5.10	6.08	7.10	8.10
Output 2 (V)	1.03	2.05	3.05	4.07	5.10	6.08	7.10	8.10



ภาพที่ 4.13 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรตรวจจับสัญญาณทั้งสองด้าน

### ก) การทดสอบวงจรหารสัญญาณ

การทดสอบวงจรหารสัญญาณค้ำระดับยอด (Peak hold) ด้วยสัญญาณจากวงจรสร้างสัญญาณสัดส่วนพัลส์ที่รับสัญญาณจากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณพัลส์ ได้จัดระบบเพื่อการทดสอบการทำงานดังแผนภาพระบบทดสอบในภาพที่ 4.14 และรูปถ่ายระบบในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.14 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบการทำงานของวงจรหารสัญญาณ



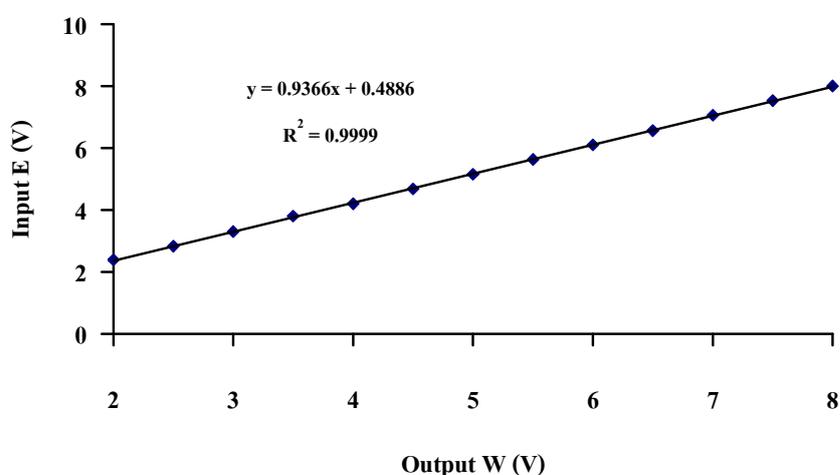
ภาพที่ 4.15 การจัดอุปกรณ์ทดสอบการทำงานของวงจรหารสัญญาณ

จากการทดสอบวงจรหารสัญญาณด้วยการแปรเปลี่ยนสัดส่วนสัญญาณจากวงจรสร้างสัญญาณสัดส่วนพัลส์ป้อนให้กับอินพุตของวงจรหารสัญญาณ E และ Ex และอ่านค่าขนาดสัญญาณผลหารของวงจรทางเอาท์พุต (W) ด้วยเครื่องอ่านรูปสัญญาณ ได้ผลความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสัดส่วนอินพุตและเอาท์พุตของวงจรหารสัญญาณดังตารางที่ 4.2 และเส้นกราฟ

ในภาพที่ 4.16 พบว่ามีความเป็นเชิงเส้น  $R^2 = 0.9999$  แต่เส้นกราฟมี y-intercept ที่ 2.4 โวลต์ จะต้องปรับแก้สัญญาณให้ y-intercept เป็นศูนย์ โดยปรับ DC offset ที่ออกแบบไว้ในระบบ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการหารสัญญาณขนาดอกของวงจรหารสัญญาณ

E (V)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
Ex (V)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
W (V)	2.39	2.83	3.30	3.80	4.20	4.68	5.15	5.63	6.10	6.56	7.06	7.53	8.00



ภาพที่ 4.16 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรหารสัญญาณ

### 4.3 การทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ

การทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณที่ออกแบบขึ้นเป็นการทดสอบทำงานของร่วมกันระหว่างระบบวัดสัดส่วนสัญญาณกับระบบประมวลตำแหน่งรังสี ซึ่งมีขั้นตอนและรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

#### 4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

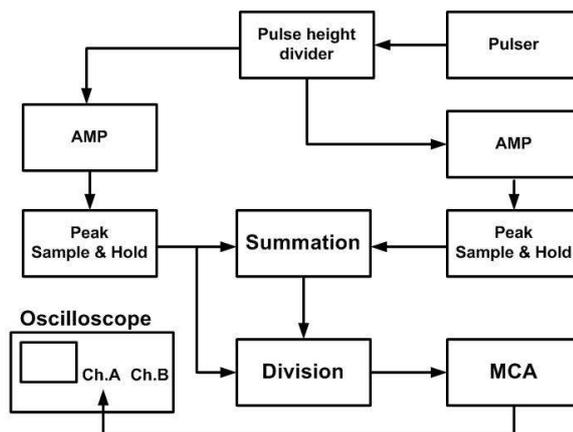
เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับทดสอบการทำงานและตรวจวัดความเป็นเชิงเส้นในการวัดตำแหน่งของระบบ ประกอบด้วย

- 1) ระบบวัดสัดส่วนสัญญาณที่พัฒนาขึ้น
- 2) เครื่องอ่านรูปสัญญาณ (Oscilloscope) ของ HAMEG Model HM1507-3
- 3) อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulser) ของ Canberra Model 807 จำนวน 1 ตัว
- 4) วงจรสร้างสัญญาณสัดส่วนพัลส์ (Pulse height ratio circuit) จำนวน 1 ชุด

- 5) อุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA) ของ Tracor Northern Model TN-1706 จำนวน 1 ชุด
- 6) อุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์ (Amplifier) ของ CANBERRA Model 2022 จำนวน 2 โมดูล
- 7) NIM BIN และแหล่งจ่ายไฟฟ้า จำนวน 1 ชุด

#### 4.3.2 การทดลองและผลการทดลอง

การทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ ด้วยสัญญาณจากวงจรสร้างสัญญาณสัดส่วนพัลส์ที่รับสัญญาณจากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณพัลส์ ได้จัดระบบวัดเพื่อทดสอบการทำงาน ดังแผนภาพในภาพที่ 4.17 และรูปถ่ายระบบวัดดังในภาพที่ 4.18 ก่อนการทดลองได้ปรับคาบเวลาลำดับการทำงานตาม Timing diagram เพื่อให้ได้สัญญาณตามคาบเวลาที่สมบูรณ์



ภาพที่ 4.17 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ

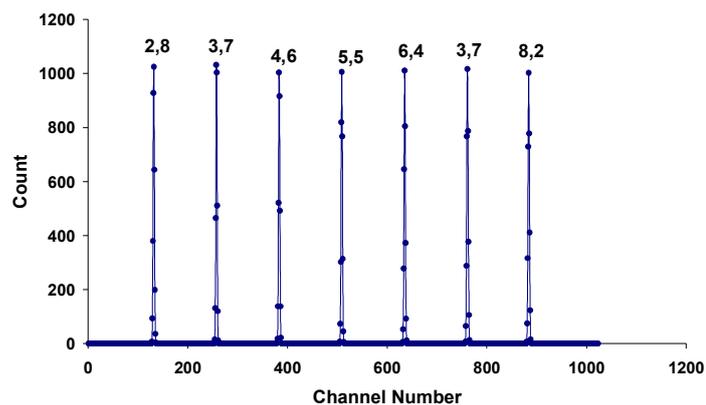


ภาพที่ 4.18 การจัดอุปกรณ์ทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ

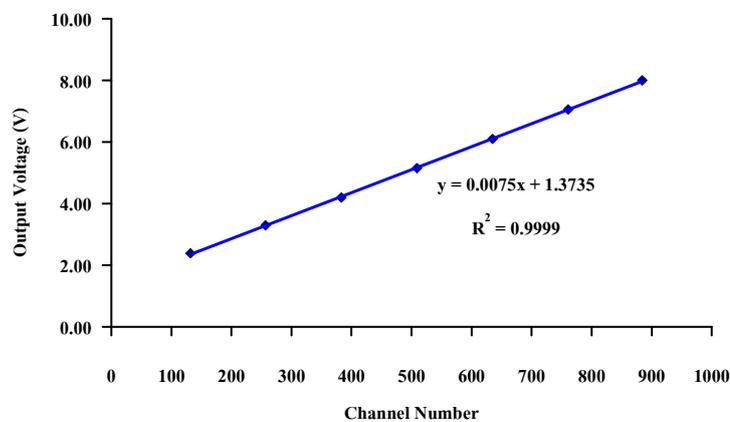
ในการทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ ทดสอบด้วยการแปรเปลี่ยนสัดส่วนสัญญาณจากวงจรสร้างสัญญาณสัดส่วนพัลส์ป้อนให้กับอินพุตด้านซ้าย (Input 1) และด้านขวา (Input 2) ของระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ แต่ละสัดส่วนสัญญาณ ส่งเข้าวิเคราะห์ตำแหน่งด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA) พร้อมบันทึกช่องวิเคราะห์ (ch) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3 จากนั้นถ่ายโอนข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อใช้โปรแกรมสร้างผลวิเคราะห์ตำแหน่งดังภาพที่ 4.19 และเส้นกราฟตอบสนองตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณดังในภาพที่ 4.20 พบว่าการวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณมีความเป็นเชิงเส้น  $R^2 = 0.9999$

ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ

Input 1 (V)	2	3	4	5	6	7	8
Input 2 (V)	8	7	6	5	4	3	2
Output (V)	2.39	3.30	4.20	5.15	6.10	7.06	8.00
Position (ch)	132	257	383	509	635	761	884



ภาพที่ 4.19 ผลการทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ



ภาพที่ 4.20 กราฟความเป็นเชิงเส้นของการวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณ

#### 4.4 การทดสอบระบบวัดรังสีไวต่อตำแหน่ง

การทดสอบระบบวัดรังสีไวต่อตำแหน่งที่ออกแบบขึ้น เป็นการทดสอบทำงานเต็มระบบร่วมกันระหว่างหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนเรืองรังสี และระบบวัดที่ไวต่อตำแหน่งการตกกระทบของรังสีในการวิเคราะห์ตำแหน่งรังสีตามแนวยาวของหัววัดรังสี ซึ่งมีขั้นตอนและรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

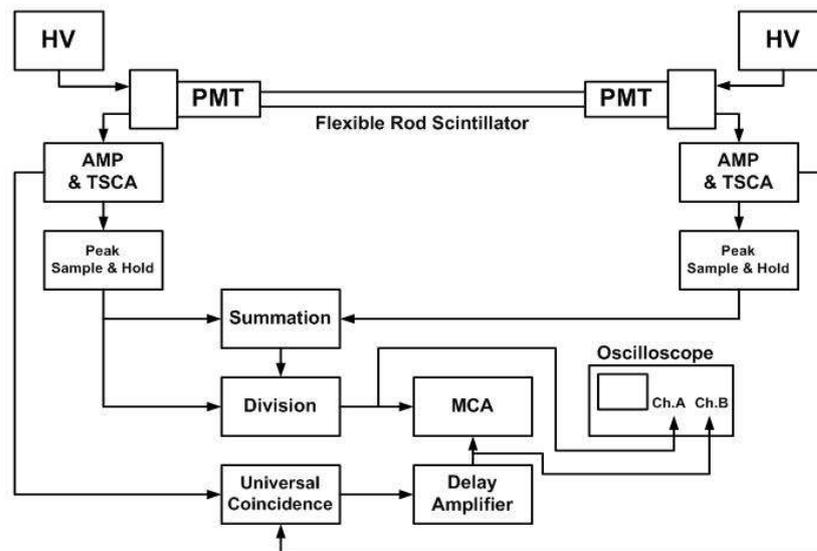
##### 4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบสำหรับตรวจวัดความสามารถในการวัดตำแหน่งตกกระทบของรังสีและความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง ประกอบด้วย

- 1) หัววัดแบบท่ออ่อนเรืองรังสีชนิดไวต่อตำแหน่งที่พัฒนาขึ้น
- 2) ระบบวัดสัดส่วนสัญญาณที่พัฒนาขึ้น
- 3) ฐานหลอดทวิคูณแสงพร้อมอุปกรณ์ขยายสัญญาณส่วนหน้า (PMT Tube Base with Pre-Amplifier) ของ ORTEC Model 276 จำนวน 2 ชุด
- 4) แหล่งจ่ายไฟฟ้าคิกตาสูง (High Voltage Power Supply) ของ ORTEC Model 478 จำนวน 2 โมดูล
- 5) อุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดียวเชิงเวลา พร้อมวงจรขยายสัญญาณ (TSCA & AMP) ของ ORTEC Model 590A จำนวน 2 โมดูล
- 6) อุปกรณ์หน่วงเวลา (Delay Amplifier) ของ ORTEC Model 427A จำนวน 1 โมดูล
- 7) Universal Coincidence Gate ของ ORTEC Model 418A จำนวน 1 โมดูล
- 8) NIM BIN และแหล่งจ่ายไฟฟ้า จำนวน 2 ชุด
- 9) อุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA) ของ Tracor Northern Model TN-1706
- 10) ต้นกำเนิดรังสี Cs-137 ความแรงรังสี 93.9  $\mu\text{Ci}$  จำนวน 1 ตัว
- 11) ต้นกำเนิดรังสี Sr-90/Y-90 ความแรงรังสี 0.6  $\mu\text{Ci}$  จำนวน 2 ตัว
- 12) เครื่องอ่านรูปสัญญาณ (Oscilloscope) ของ HAMEG Model HM1507-3

##### 4.4.2 การทดลองและผลการทดลอง

การทดสอบระบบวัดไวต่อตำแหน่งรังสีจากหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งในการวัดตำแหน่งรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 และรังสีบีตาจากต้นกำเนิดรังสี Sr-90/Y-90 ตามแนวท่อเรืองรังสี ได้จัดระบบวัดเพื่อทดสอบการทำงานดังแผนภาพในภาพที่ 4.21 และรูปถ่ายระบบวัดดังในภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.21 แผนภาพการจัดระบบวัดรังสีเพื่อทำการทดสอบหัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่ง

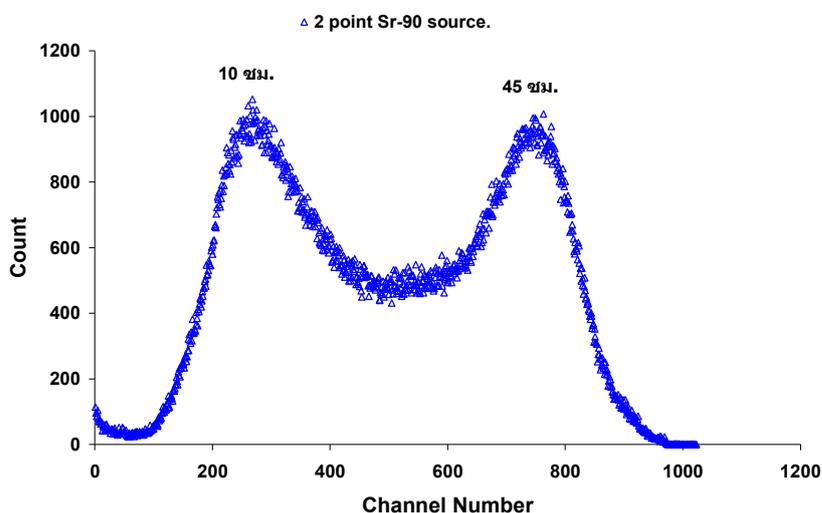


ภาพที่ 4. 22 การจัดระบบวัดรังสีเพื่อทำการทดสอบหัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่ง

#### ก) การทดสอบการทำงานของระบบวัดตำแหน่ง

ก่อนการทดสอบได้ทดลองปรับตั้งค่าอุปกรณ์วัดเพื่อให้ได้สัญญาณที่เหมาะสม โดยใช้ไบอัสหัววัดรังสีที่ 1,020 โวลต์ สัญญาณจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณเลือกใช้แบบ Unipolar ตั้งค่า Shaping time ที่  $0.5 \mu\text{s}$  อัตราขยายที่ประมาณ 130 เท่า และตั้งระดับคัดเลือกสัญญาณที่ 0.4 โวลต์ ค่าหน่วงเวลาสัญญาณเปิดเกต  $3.75 \mu\text{s}$  อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง จากนั้นทดสอบการทำงานของระบบวัดตำแหน่งด้วยต้นกำเนิดรังสี Sr-90/Y-90 ความแรงรังสี  $0.6 \mu\text{Ci}$  ซึ่งมีช่องบังคับลำรังสี 5 มิลลิเมตร จำนวน 2 ตัว วางที่ผิวท่อนอ้อนเรอกรังสีที่จัดในแนวเส้นตรง โดยมีระยะห่างจากด้านหน้าของหลอดทวิคูณแสงด้านซ้าย 10.0 เซนติเมตร ด้านขวา 45.0 เซนติเมตร

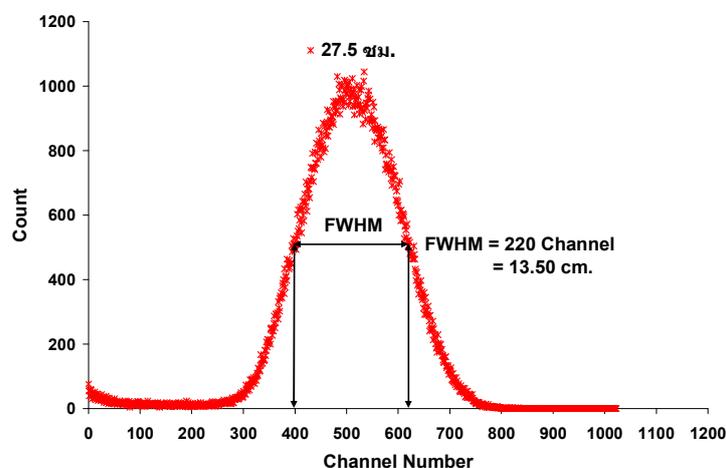
ตั้งจำนวนนับรังสีที่ตำแหน่งพีค 1,000 counts วิเคราะห์ตำแหน่งรังสีและส่งข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์ ได้ผลการวัดโปรไฟล์ตำแหน่งรังสีปีตาตามแนวยาวดังภาพที่ 4.23 จากโปรไฟล์วัดรังสีจะเห็นว่า หัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบที่อ่อนที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดตำแหน่งรังสีได้



ภาพที่ 4.23 โปรไฟล์วัดตำแหน่งรังสีปีตาจาก Sr-90/Y-90 พร้อมกัน 2 จุด

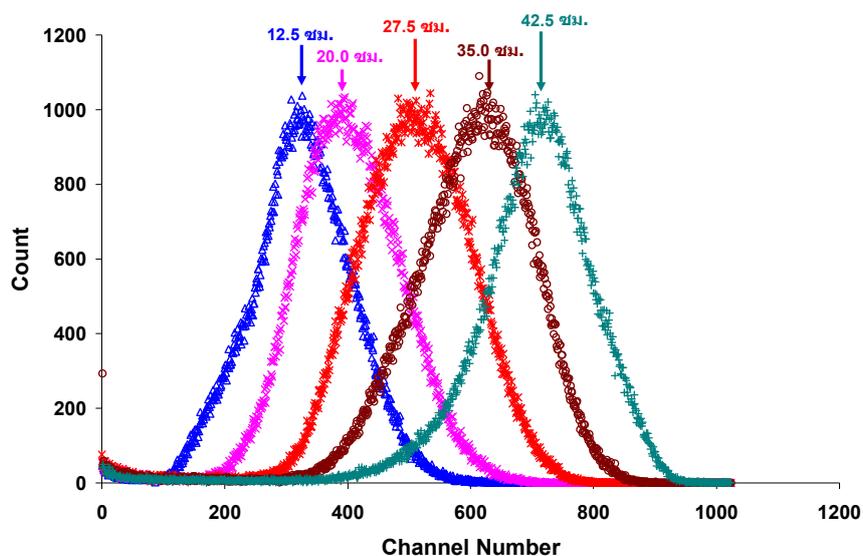
ข) การทดสอบความสามารถในการวัดตำแหน่งรังสีปีตา

การทดสอบหาความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งรังสีปีตาของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งที่พัฒนาขึ้น ปรับเงื่อนไขของระบบวัดรังสีเช่นเดียวกับข้อ 4.4.2 ก. และใช้ต้นกำเนิดรังสี Sr-90/Y-90 ซึ่งบังคับลำรังสีขนาด 5 มิลลิเมตร วางตรงจุดกึ่งกลางของหัววัดเรืองรังสี (27.5 ซม) ตั้งจำนวนนับรังสีที่ตำแหน่งพีค 1,000 counts วิเคราะห์ตำแหน่งรังสีด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่องและส่งข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์ ได้โปรไฟล์การวัดตำแหน่งรังสีปีตาเฉพาะตำแหน่งดังภาพที่ 4.24

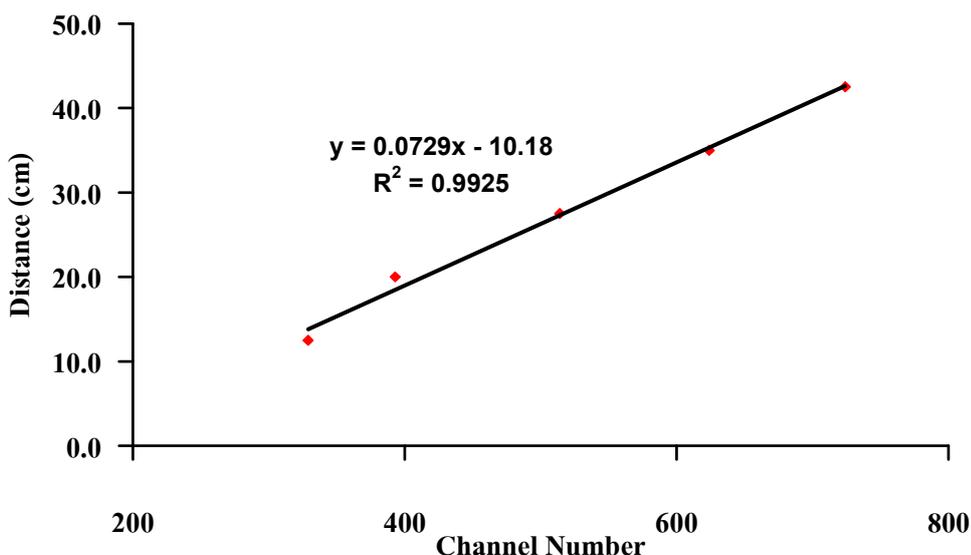


ภาพที่ 4.24 ความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งของหัววัดรังสีสำหรับต้นกำเนิดรังสี Sr-90

จากนั้นทดสอบความเป็นเชิงเส้นของหัววัดเรืองรังสีไวต่อตำแหน่งในการวัดตำแหน่งรังสีปีตา โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Sr-90/Y-90 ความแรงแรังสี 0.6  $\mu\text{Ci}$  ซึ่งบังคับลำรังสีขนาด 5 มิลลิเมตร วางบนผิวท่อนเรืองรังสีเริ่มที่ระยะห่างจากด้านหน้าของหลอดทวิคูณแสงด้านซ้าย 12.5 เซนติเมตร และเลื่อนตำแหน่งไปยังหลอดทวิคูณแสงด้านขวาตามแนวยาวท่อนเรืองรังสีครั้งละ 7.5 เซนติเมตร จนถึงระยะ 42.5 เซนติเมตร แต่ทุกครั้งตั้งจำนวนนับรังสีที่พีคตำแหน่ง 1,000 counts ได้ผลทดลองดังโปรไฟล์ตำแหน่งรังสีแต่ละตำแหน่งตามระยะทางในภาพที่ 4.25



ภาพที่ 4.25 โปรไฟล์วัดตำแหน่งรังสีปีตาแต่ละตำแหน่งตามระยะทาง

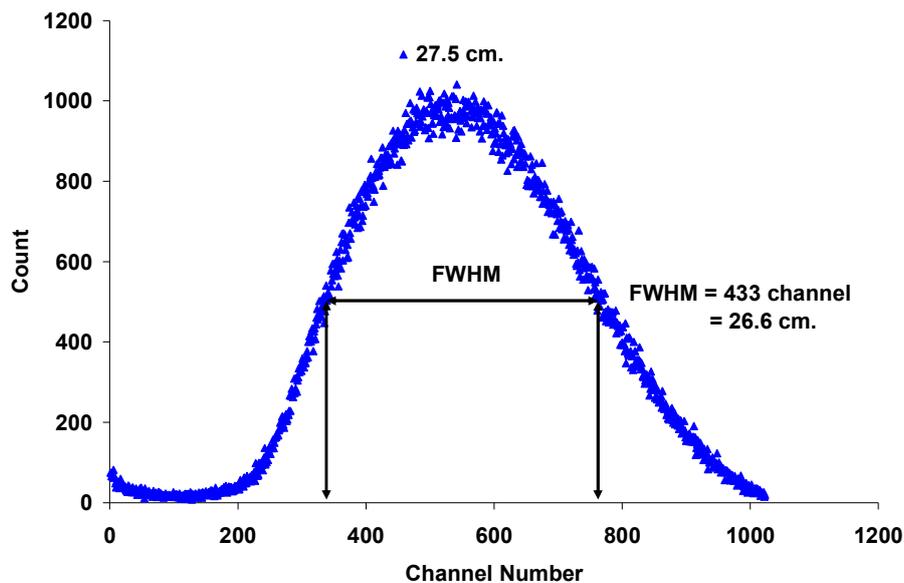


ภาพที่ 4.26 กราฟความเป็นเชิงเส้นจากการวัดตำแหน่งรังสีปีตาตามระยะทาง

ผลการทดลองพบว่าหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนเรื่องรังสีที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งรังสีบีตาที่ FWHM เท่ากับ 13.50 เซนติเมตร และจากโปรไฟล์ วัดตำแหน่งรังสีบีตาแต่ละตำแหน่งตามระยะทางในภาพที่ 4.25 สามารถเปรียบเทียบตำแหน่งต่อช่องวิเคราะห์ได้ 0.076 เซนติเมตร/ ช่องวิเคราะห์ (cm/ch) โดยผลการวัดตำแหน่งมีความเป็นเชิงเส้น  $R^2 = 0.9925$  ดังภาพที่ 4.26

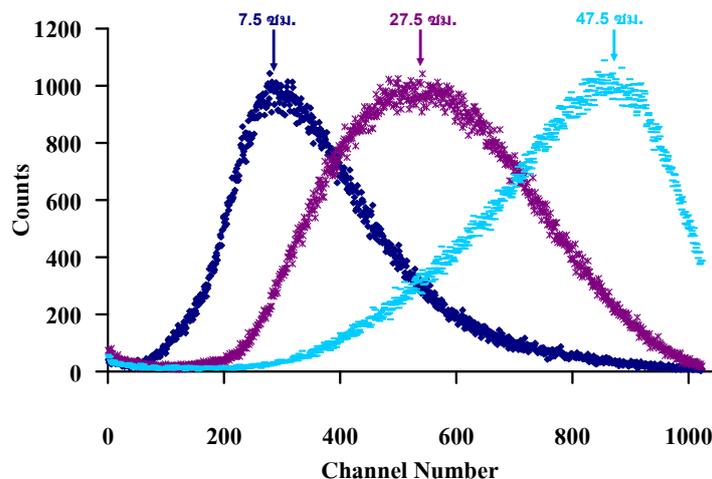
ค) การทดสอบความสามารถในการวัดตำแหน่งรังสีแกมมา

การทดสอบหาความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งรังสีแกมมาของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งที่พัฒนาขึ้น ปรับเงื่อนไขของระบบวัดรังสีเช่นเดียวกับข้อ 4.4.2 ก. ใช้ต้นกำเนิดรังสี Cs-137 ซึ่งบังคับลำรังสีขนาด 5 มิลลิเมตร วางตรงจุดกึ่งกลางของหัววัดเรื่องรังสี (27.5 ซม) ตั้งจำนวนนับรังสีที่ตำแหน่งพีค 1,000 counts วิเคราะห์ตำแหน่งรังสีด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่องและส่งข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์ ได้โปรไฟล์การวัดตำแหน่งรังสีแกมมาเฉพาะตำแหน่งดังภาพที่ 4.27

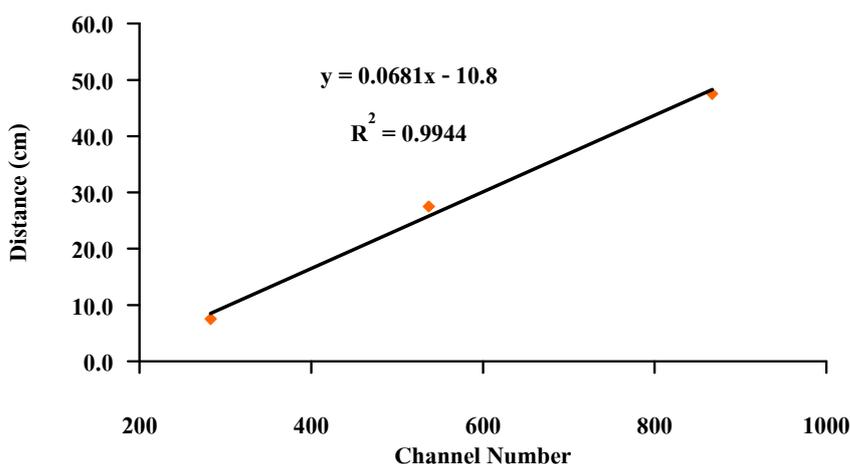


ภาพที่ 4.27 ความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งของหัววัดรังสีสำหรับต้นกำเนิดรังสี Cs-137

จากนั้นทดสอบความเป็นเชิงเส้นของหัววัดเรื่องรังสีไวต่อตำแหน่งในการวัดตำแหน่งรังสีแกมมา โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cs-137 ความแรงรังสี 93.9  $\mu\text{Ci}$  ซึ่งบังคับลำรังสีขนาด 5 มิลลิเมตร วางบนผิวท่ออ่อนเรื่องรังสีเริ่มที่ระยะห่างจากด้านหน้าของหลอดทวิคูณแสงด้านซ้าย 7.5 เซนติเมตร และเลื่อนตำแหน่งไปยังหลอดทวิคูณแสงด้านขวาตามแนวยาวท่ออ่อนเรื่องรังสีครั้งละ 15 เซนติเมตร จนถึงระยะ 47.5 เซนติเมตร แต่ละครั้งตั้งจำนวนนับรังสีที่พีคตำแหน่ง 1,000 counts ได้ผลการทดลองดังโปรไฟล์ตำแหน่งรังสีแต่ละตำแหน่งตามระยะทางในภาพที่ 4.28



ภาพที่ 4.28 โปรไฟล์วัดตำแหน่งรังสีแกมมาแต่ละตำแหน่งตามระยะทาง



ภาพที่ 4.29 กราฟความเป็นเชิงเส้นจากการวัดตำแหน่งรังสีแกมมาตามระยะทาง

ผลการทดลองพบว่าหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนเรืองรังสีที่พัฒนาขึ้น มีความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งรังสีแกมมาที่ FWHM เท่ากับ 26.60 เซนติเมตร และจากโปรไฟล์วัดตำแหน่งรังสีแกมมาแต่ละตำแหน่งตามระยะทางในภาพที่ 4.28 สามารถปรับเทียบตำแหน่งต่อช่องวิเคราะห์ได้ 0.068 เซนติเมตร/ ช่องวิเคราะห์ (cm/ch) โดยผลการวัดตำแหน่งมีความเป็นเชิงเส้น  $R^2 = 0.9944$  ดังภาพที่ 4.29

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง ของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนเรืองรังสีที่พัฒนาขึ้น ในกรณีของการวัดตำแหน่งรังสีบีตาจากต้นกำเนิดรังสี Sr-90/Y-90 (พลังงาน 0.55 MeV/2.28 MeV) มีความสามารถในการวัดตำแหน่งดีกว่าการวัดตำแหน่งรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 (พลังงาน 0.662 MeV) โดยแตกต่างกัน 97.04 %

#### 4.5 ทดสอบการวัดตำแหน่งรังสีตามแนวโค้ง

ได้ทดสอบผลการวัดตำแหน่งรังสีตามแนวโค้งหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนเรื่องรังสีที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Sr-90/Y-90 ความแรงแรังสี 0.6  $\mu\text{Ci}$  ซึ่งบังคับลำรังสีขนาด 5 มิลลิเมตร ทดสอบการวัดรังสีเมื่อท่ออ่อนเรื่องรังสีถูกจัดให้อยู่ในลักษณะแนวโค้งทำมุม 90 องศา และแนวโค้งรูปตัวยู

การทดลองวัดตำแหน่งรังสีตามแนวโค้งทำมุม 90 องศา ดังในภาพที่ 4.30 ทำโดยวางต้นกำเนิดรังสีบนผิวท่ออ่อนเรื่องรังสี เริ่มที่ระยะห่างจากด้านหน้าของหลอดทวิคูณแสงด้านซ้าย 12.5 เซนติเมตร และเลื่อนตำแหน่งไปยังหลอดทวิคูณแสงด้านขวาตามแนวยาวท่ออ่อนเรื่องรังสีครั้งละ 7.5 เซนติเมตร จนถึงระยะ 42.5 เซนติเมตร แต่ครั้งตั้งจำนวนนับรังสีที่พีคตำแหน่ง 1,000 counts ได้โปรไฟล์วัดตำแหน่งรังสีแต่ละตำแหน่งตามระยะทางดังภาพที่ 4.32 และในการทดลองวัดตำแหน่งรังสีตามแนวโค้งรูปตัวยู ดังในภาพที่ 4.31 ด้วยการทดลองเช่นเดียวกัน ได้โปรไฟล์วัดตำแหน่งรังสีแต่ละตำแหน่งตามระยะทางดังภาพที่ 4.33

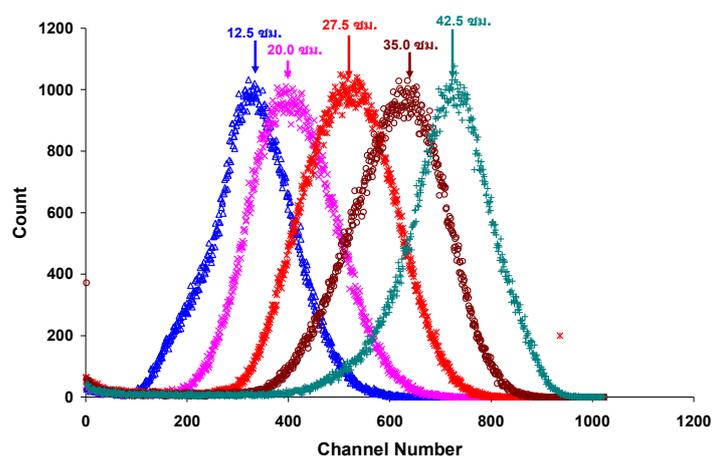
จากผลการทดลองจะเห็นว่าความสามารถในการวัดตำแหน่งรังสีของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนเรื่องรังสีตามแนวโค้งไม่พบความแตกต่างกับผลการวัดตำแหน่งรังสีตามแนวเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญ



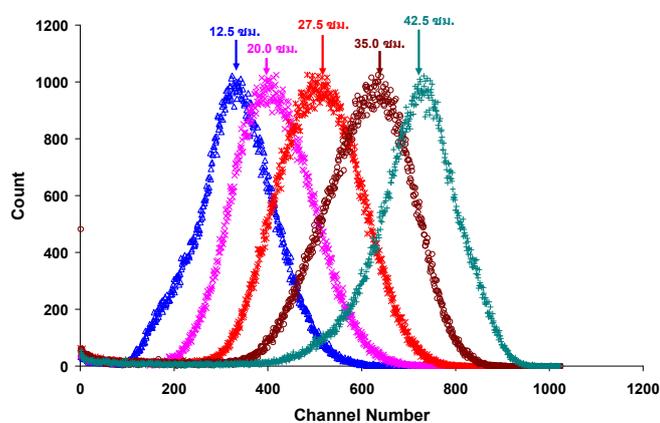
ภาพที่ 4.30 การจัดระบบวัดรังสีเพื่อทำการทดสอบหัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่งในแนวโค้ง



ภาพที่ 4.31 การจัดระบบวัดรังสีเพื่อทำการทดสอบหัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่งในแนวโค้งรูปตัวยู



ภาพที่ 4.32 โปรไฟล์วัดตำแหน่งรังสีปีตาแต่ละตำแหน่งตามแนวโค้ง 90 องศา



ภาพที่ 4.33 โปรไฟล์วัดตำแหน่งรังสีปีตาแต่ละตำแหน่งตามแนวโค้งรูปตัวยู

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนโดยใช้สารอินทรีย์เรืองรังสีเหลวชนิด OptiPhase Hisafe-2 บรรจุในท่อนำแสงชนิดแกนกลางของเหลวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 5 มิลลิเมตร ยาว 550 มิลลิเมตร ปลายท่อแต่ละด้านเชื่อมต่อกับหลอดทวิคูณแสงผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อซึ่งทำจากพลาสติกชนิด Superlene (Polyamide) สีดำบรรจุสารเหลวนำแสงทำหน้าที่ส่งผ่านแสงจากปลายท่ออ่อนเรืองรังสี ไปยังผิวหน้าโฟโตแคโทดของหลอดทวิคูณแสง ในส่วนของระบบวัดตำแหน่งรังสีนั้นได้ออกแบบและสร้างระบบวัดสัดส่วนสัญญาณทำงานร่วมกับระบบวัดรังสีมาตรฐาน NIM และอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง เพื่อประมวลตำแหน่งรังสีตกกระทบท่อเรืองรังสีตามแนวยาว จากผลการวัดความเข้มแสงจากปลายท่ออ่อนเรืองรังสี จากการทดสอบสมรรถนะของหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 (พลังงาน 0.662 MeV) ความแรงรังสี 93.9  $\mu\text{Ci}$  และต้นกำเนิดรังสีบีตา Sr-90/Y-90 (พลังงาน 0.55 MeV/2.28 MeV) ความแรงรังสี 0.6  $\mu\text{Ci}$  สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 จากการทดสอบหัววัดเรืองรังสีแบบท่ออ่อนเรืองรังสีก่อนที่จะพัฒนาเป็นหัววัดเรืองรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อน พบว่าโปรไฟล์ค่านับรังสีตลอดความยาวของหัววัดรังสีมีลักษณะการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และสามารถตอบสนองต่อรังสีบีตาได้ดีกว่ารังสีแกมมา เนื่องจากสารเรืองรังสีชนิดเหลวทำอันตรกิริยากับรังสีเบรมสตาห์สูง ที่เกิดขึ้นจากการที่รังสีบีตาทำอันตรกิริยากับอะตอมเนียมฟอสฟอรัส ผลการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อรังสีแกมมา โดยการนำแผ่นอะลูมิเนียมฟอสฟอรัสมาหุ้มรอบท่ออ่อนเรืองรังสีพบว่าที่ความหนา 48 ไมโครเมตรจะได้ค่านับรังสีสูงที่สุด โดยเพิ่มจากเดิม 31% สำหรับรังสีแกมมาและ 22% สำหรับรังสีบีตา โดยมีค่า Attenuation length (L) เมื่อใช้หัววัดรังสีแกมมาจาก Cs-137 ได้เท่ากับ 11.75 เซนติเมตร และเมื่อใช้หัววัดรังสีบีตาจาก Sr-90/Y-90 ได้เท่ากับ 16.28 เซนติเมตร นอกจากนี้ผลการวัดประสิทธิภาพที่รังสีตกกระทบจริง ( $\epsilon_{int}$ ) ของหัววัดสำหรับรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 พบว่าได้เท่ากับ  $5.98 \times 10^{-3} \%$

5.1.2 ในการทดสอบระบบวัดสัดส่วนสัญญาณที่พัฒนาขึ้นด้วยการใช้สัญญาณพัลส์ที่สร้างจากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulser) พบว่าความสามารถในการสนองสัญญาณของวงจรตรวจจับสัญญาณ (Output 1 และ Output 2) มีความเป็นเชิงเส้นเท่ากัน โดยมี  $R^2$  เท่ากับ 1 และการตอบสนองผลหารสัญญาณของวงจรหารสัญญาณมีความเป็นเชิงเส้น ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9999

5.1.3 ในการทดสอบระบบวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณที่ออกแบบขึ้น ซึ่งทำงานร่วมกันระหว่างระบบวัดสัดส่วนสัญญาณกับระบบประมวลตำแหน่งรังสีที่ใช้ระบบวัดมาตรฐาน NIM ด้วยการใช้สัญญาณสัดส่วนที่สร้างจากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulser) พบว่าความสามารถในการวัดตำแหน่งสัดส่วนสัญญาณของระบบมีความเป็นเชิงเส้น ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9999

5.1.4 การทดสอบระบบวัดรังสีไวต่อตำแหน่งที่ทำงานเต็มระบบร่วมกันระหว่างหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนเรืองรังสีและระบบวัดที่ไวต่อตำแหน่งการตกกระทบของรังสีตามแนวยาวของหัววัดรังสี ด้วยรังสีบีตาจากต้นกำเนิดรังสี Sr-90/Y-90 ซึ่งบังคับลำรังสีขนาด 5 มิลลิเมตร พบว่าหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งรังสีบีตาที่ FWHM เท่ากับ 13.50 เซนติเมตร และมีความเป็นเชิงเส้น ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9925 และเมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสี Cs-137 ซึ่งบังคับลำรังสีขนาด 3 มิลลิเมตร พบว่าหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนเรืองรังสีที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งรังสีแกมมาที่ FWHM เท่ากับ 26.60 เซนติเมตร และมีความเป็นเชิงเส้น ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9944

5.1.5 จากการทดสอบผลการวัดตำแหน่งรังสีตามแนวโค้งของหัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนเรืองรังสีที่พัฒนาขึ้น โดยทดสอบการวัดรังสีเมื่อท่ออ่อนเรืองรังสีถูกจัดให้อยู่ในลักษณะแนวโค้งทำมุม 90 องศาและแนวโค้งรูปตัวยูนั้น พบว่าความสามารถในการวัดตำแหน่งรังสีของหัววัดรังสีไม่มีความแตกต่างกับผลการวัดตำแหน่งรังสีตามแนวเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญ

## 5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

5.2.1 ในการประยุกต์ท่ออ่อนนำแสงมาสร้างเป็นท่ออ่อนเรืองรังสี ได้พบปัญหาด้านการปิดปลายเปิดของท่อด้านบรรจุสารเรืองรังสี เนื่องจากต้องใช้ปลอกเหล็กกล้าไร้สนิมและแท่งแก้วซิลิกาที่ถอดออกมาจากท่อนำแสงเส้นอื่นมาอัดเข้าไปในท่อนำแสงอาจไม่แน่นพอ ซึ่งจะมีผลทำให้สารเรืองรังสีชนิดเหลวที่บรรจุอยู่ภายในท่อนำแสงรั่วซึมออกมา เมื่อนำไปเชื่อมต่อเข้ากับหลอดทวีคูณแสง สารเรืองรังสีชนิดเหลวจะไปผสมกับสารเหลวนำแสงทำให้เกิดเป็นสีเหลืองขุ่น และเกิดการดูดกลืนแสงเรืองที่จะส่งไปยังหลอดทวีคูณแสง นอกจากนี้การฉนวนกันความร้อนที่ไม่สนิทอายุการใช้งานจะสั้นเนื่องจากสารนำแสงจะดูดความชื้นและสูญเสียประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงย่าน UV

5.2.2 หัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนบรรจุสารเรืองรังสีชนิดเหลวที่ได้พัฒนาขึ้น ยังมีความสามารถในการตอบสนองต่อรังสีแกมมาได้น้อย เนื่องจากสารเรืองรังสีเหลวที่นำมาใช้มีความหนาแน่นต่ำ ( $0.960 \text{ g/cm}^3$ ) และเส้นผ่านศูนย์กลางแกนบรรจุสารเรืองรังสีชนิดเหลวยังมีขนาดเพียง 5 mm

5.2.3 การนำหลอดทวิคูณแสงที่เป็นคนละรุ่นหรือคนละบริษัทมาใช้ร่วมกัน จะมีผลทำให้สัญญาณที่ส่งออกมาจากหลอดทวิคูณแสงไม่เป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน จะทำให้ยากต่อการจัดการสัญญาณ และส่งผลให้สูญเสียความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง

5.2.4 ไอซีสำเร็จรูปที่นำมาใช้ในวงจรตรวจจับสัญญาณนั้นมีค่า slew rate ที่ต่ำเกินไป ทำให้ต้องใช้เวลานานในการไต่ระดับสัญญาณไปจนถึงระดับแรงดันจากอินพุท จึงไม่สามารถใช้ shaping time สั้นได้ มีผลต่อการเกิดพัลส์อัมพลิจูดของสัญญาณที่มาติดกัน ซึ่งกระทบต่อความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการจัดแท่งแก้วซิลิกาเข้าไปในท่อनाแสงนั้น ควรมีการสร้างปลอกเหล็กกล้าไร้สนิมขึ้นมาใหม่ หรือพัฒนาเทคนิคในการอัด เพื่อแก้ไขปัญหการรั่วซึมของสารเรืองรังสีชนิดเหลว

5.3.2 ควรเลือกใช้สารเรืองรังสีเหลวที่มีความหนาแน่นสูงหรือเลือกสารเรืองรังสีเหลวที่มีการเติมสารบางชนิดที่สามารถช่วยเพิ่มการเกิดอันตรกิริยากับรังสีแกมมา แต่ต้องคำนึงถึงความโปร่งแสงของสารเรืองรังสี หลังจากเติมสารดังกล่าวเพื่อป้องกันการยับยั้งแสงเรืองที่เกิดขึ้น

5.3.3 หลอดทวิคูณแสงทั้งสองหลอดที่นำมาประกบกับท่ออ่อนเรืองรังสี ควรเลือกหลอดที่เป็นของบริษัทเดียวกัน รุ่นเดียวกัน และมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน เพื่อให้สัญญาณที่มาจากแต่ละด้านของหัววัดใกล้เคียงกัน และมีสัดส่วนที่สัมพันธ์กันมากที่สุด

5.3.4 ไอซีสำเร็จรูปที่นำมาใช้ในการตรวจจับสัญญาณ ควรเลือกชนิดที่มีค่า slew rate ที่สูง เพื่อให้วงจรสามารถรับสัญญาณพัลส์สูงใหม่จากหัววัดรังสีมาประมวลผลได้เร็วขึ้น

5.3.5 ระบบวัดตำแหน่งที่ใช้เทคนิควัดสัดส่วนสัญญาณมีความซับซ้อนน้อยกว่าระบบวัดแบบวัดไรส์ไทม์ (Rise time) และจากการเปรียบเทียบความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งของหัววัดเรืองรังสีไวต่อตำแหน่งกับงานวิจัยที่ผ่านมา [14] ซึ่งใช้หัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งแบบท่ออ่อนชนิดสารเรืองรังสีเหลวความยาว 2 เมตร วัดตำแหน่งรังสีบีตาจาก Sr-90/Y-90 ด้วยระบบวัดแบบวัดไรส์ไทม์ พบว่ามีความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งที่ FWHM เท่ากับ 85 เซนติเมตร

## รายการอ้างอิง

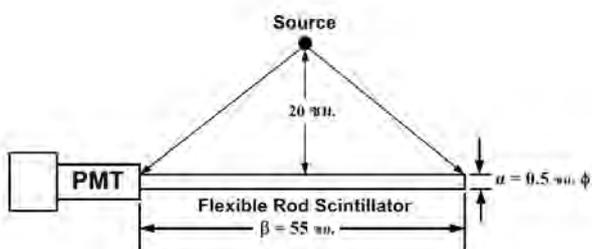
- [1] Google. Performance Comparison of Flexible Detector Designs [Online]. Available from : <http://www.ronanmeasure.com/pages/images/Fill-Fluid%20vs%20Fiber%20Comparison.pdf> [2012, August 20]
- [2] อธิพงษ์ ประทุมศิริ. การส่งประกายแสงจากผลึกโซเดียมไอโอ-ไดด์ (แทลเลียม) ผ่านเส้นใยนำแสง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [3] อติศักดิ์ ปัญญาสุข. การพัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ชนิดพรอพอร์ชันแนลก๊าซไหลที่ไวต่อตำแหน่งราคาประหยัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [4] Jun Kawarabayashi, Ryoji Mizuno, Daisuke Inui, Kenichi Watanabe and Tetsuo Iguchi. Potential on Liquid Light Guide as Distributed Radiation Sensor. Nuclear Science Symposium Conference Record. Oct 2004 : 712 - 714
- [5] Mitsunobu Hayashi, Jun Kawarabayashi, Keisuke Asai, Haruki Iwai, Yuri Akagawa and Tetsuo Iguchi. Position-Sensitive Radiation Detector with Flexible Light Guide and Liquid Organic Scintillator to Monitor Distributions of Radioactive Isotopes. Journal of nuclear science and technology. Dec 2007 : 81 – 84
- [6] Glenn Frederick Knoll. Radiation Detection and Measurement. 3<sup>rd</sup> ed. USA : John Wiley & Sons, Inc.1999
- [7] Google. Photomultiplier Tubes Basics and Applications [Online]. Available from : [http://www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/pmt\\_handbook\\_complete.pdf](http://www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/pmt_handbook_complete.pdf) [2012, August 20]
- [8] Kenneth, R. Spring and Davidson, Michael W. Theory of Confocal Microscopy [Online]. Available from : <http://www.olympusfluoview.com/theory/pmtintro.html> [2012,February 7]
- [9] Google. Snell's Law [Online]. Available from : <http://www.math.ubc.ca/~cass/courses/m309-01a/chu/Fundamentals/snell.htm> [2012, August 15]

- [10] Google. Fundamentals of Metal Halide Arc Lamps [Online]. Available from : <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/metalhalide.html>  
[2011, February 14]
- [11] Google. Liquid Light Guides [Online]. Available from : <http://www.newport.com/Liquid-Light-Guides/378731/1033/catalog.aspx> [2011, February 12]
- [12] Google. FiberFlex [Online]. Available from : <http://www.gsiautomation.com/pdfs/FIBERFLEX.pdf> [2011, July 25]
- [13] Google. Performance Comparison of Flexible Detector Designs. [Online]. Available from : <http://www.ronanmeasure.com/pages/images/FillFluid%20vs%20Fiber%20Comparison.pdf> [2011, August 22]
- [14] Jun Kawarabayashi, Yusuke Takebe, Norihiro Naoi, Keisuke Asai, Kenichi Watanabe and Tetsuo Iguchi. Distributed Radiation Sensor with Flexible Light Guide filled with Liquid Organic Scintillator. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Oct. 29–Nov. 1, 2, 1164–1165 (2006).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

1. การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของหัววัดเรืองรังสีชนิดไวต่อตำแหน่งด้วยการบรจจุสารเรืองรังสีเหลวในท่อนำแสง



จากประสิทธิภาพแท้จริง  $\epsilon_{int} = \epsilon_{abs} \times \left(\frac{4\pi}{\Omega}\right)$

และประสิทธิภาพสัมบูรณ์  $\epsilon_{abs} = \frac{\text{ปริมาณรังสีที่ระบบบันทึกได้}}{\text{ปริมาณรังสีจากต้นกำเนิดรังสี}}$

ปริมาณรังสีที่ระบบบันทึกได้  $= \left(\frac{45cps(Bq)}{3.7 \times 10^{10}}\right) \times \left(\frac{85.1}{100}\right) = 1.035 \times 10^{-9} Ci$

ปริมาณรังสีจากต้นกำเนิดรังสี  $= 93.9 \times 10^{-6} Ci$

$$\epsilon_{abs} = \frac{1.035 \times 10^{-9} Ci}{93.9 \times 10^{-6} Ci}$$

ดังนั้นประสิทธิภาพสัมบูรณ์  $\epsilon_{abs} = 1.102 \times 10^{-5}$

Solid angle ของหัววัดรังสี  $\Omega = 4 \sin^{-1} \times \frac{\alpha \times \beta}{\sqrt{(4d^2 + \alpha^2) \times (4d^2 + \beta^2)}}$

$$\Omega = 4 \sin^{-1} \times \frac{0.5 \times 55}{\sqrt{[(4 \times 20^2) + 0.5^2] \times [(4 \times 20^2) + 55^2]}}$$

$$\Omega = 4 \sin^{-1} \times \frac{27.5}{\sqrt{2,720.507}}$$

$$\Omega = 4 \sin^{-1} \times (1.011 \times 10^{-2})$$

ดังนั้น Solid angle ของหัววัดรังสี  $\Omega = 2.317$

ประสิทธิภาพแท้จริง  $\epsilon_{int} = (1.102 \times 10^{-5}) \times \left(\frac{4\pi}{2.317}\right)$

$$\epsilon_{int} = (1.102 \times 10^{-5}) \times 5.424$$

ดังนั้นประสิทธิภาพแท้จริง  $\epsilon_{int} = 5.98 \times 10^{-5}$

หรือ  $\% \epsilon_{int} = 5.98 \times 10^{-3} \%$

ANS

2) การคำนวณหาระยะการลดทอน (attenuation length) ของแสงเรืองที่เกิดขึ้นในท่อนำแสงจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา (Cs-137) ด้วยสมการที่ (2.5)

$$\text{จาก } \frac{I}{I_0} = e^{-x/L}$$

เมื่อ  $I_0$  คือ ความเข้มแสงที่ระยะ 8 ซม. = 2,770 counts

$I$  คือ ความเข้มแสงที่ระยะ 45 ซม. = 118 counts

และ  $x$  คือ ระยะทางจาก  $I_0$  ถึง  $I$  = 37 ซม.

$$\text{จะได้ } \frac{118}{2,770} = e^{-37/L}$$

$$L = \frac{-37}{\ln\left(\frac{118}{2,770}\right)}$$

$$L = \frac{-37}{\ln 0.043} = \frac{-37}{-3.15}$$

ดังนั้นระยะการลดทอน ( $L$ ) = 11.75 ซม.

3) การคำนวณหาระยะการลดทอน (attenuation length) ของแสงเรืองที่เกิดขึ้นในท่อนำแสงจากต้นกำเนิดรังสีบีตา (Sr-90) ด้วยสมการที่ (2.5)

$$\text{จาก } \frac{I}{I_0} = e^{-x/L}$$

เมื่อ  $I_0$  คือ ความเข้มแสงที่ระยะ 8 ซม. = 7,880 counts

$I$  คือ ความเข้มแสงที่ระยะ 45 ซม. = 810 counts

และ  $x$  คือ ระยะทางจาก  $I_0$  ถึง  $I$  = 37 ซม.

$$\text{จะได้ } \frac{810}{7,880} = e^{-37/L}$$

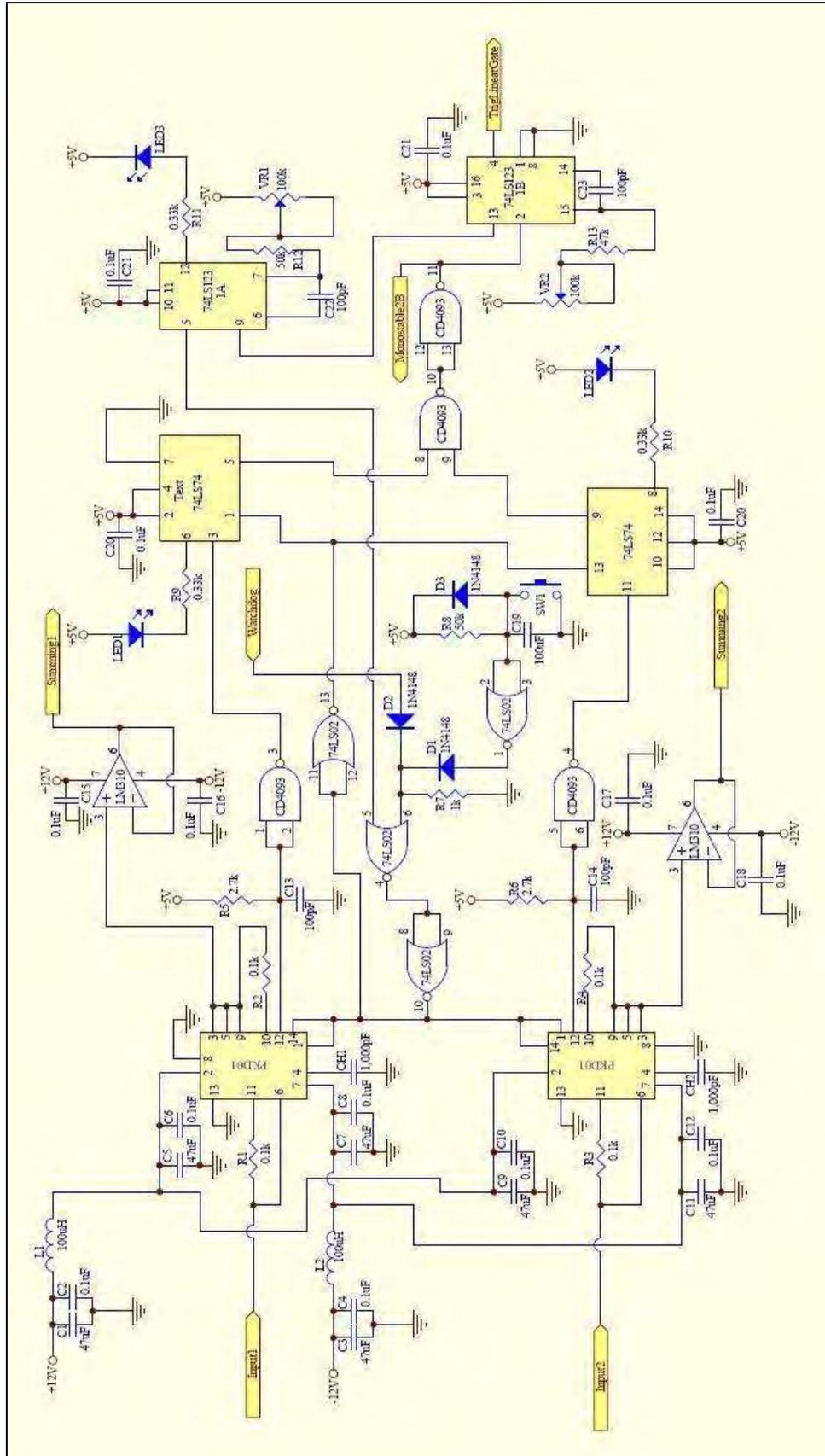
$$L = \frac{-37}{\ln\left(\frac{810}{7,880}\right)}$$

$$L = \frac{-37}{\ln 0.103} = \frac{-37}{-2.273}$$

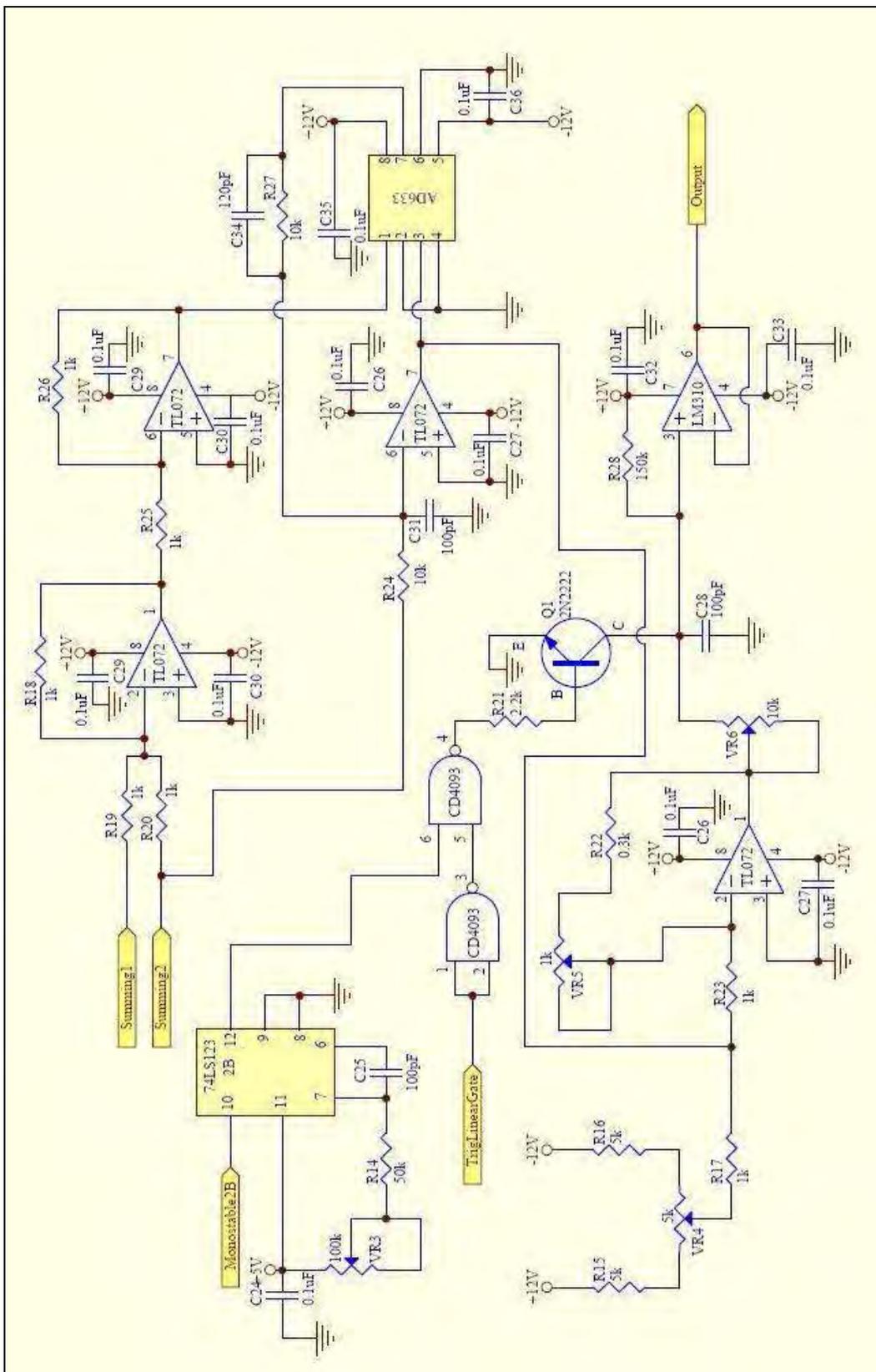
ดังนั้นระยะการลดทอน ( $L$ ) = 16.28 ซม.

ภาคผนวก ข

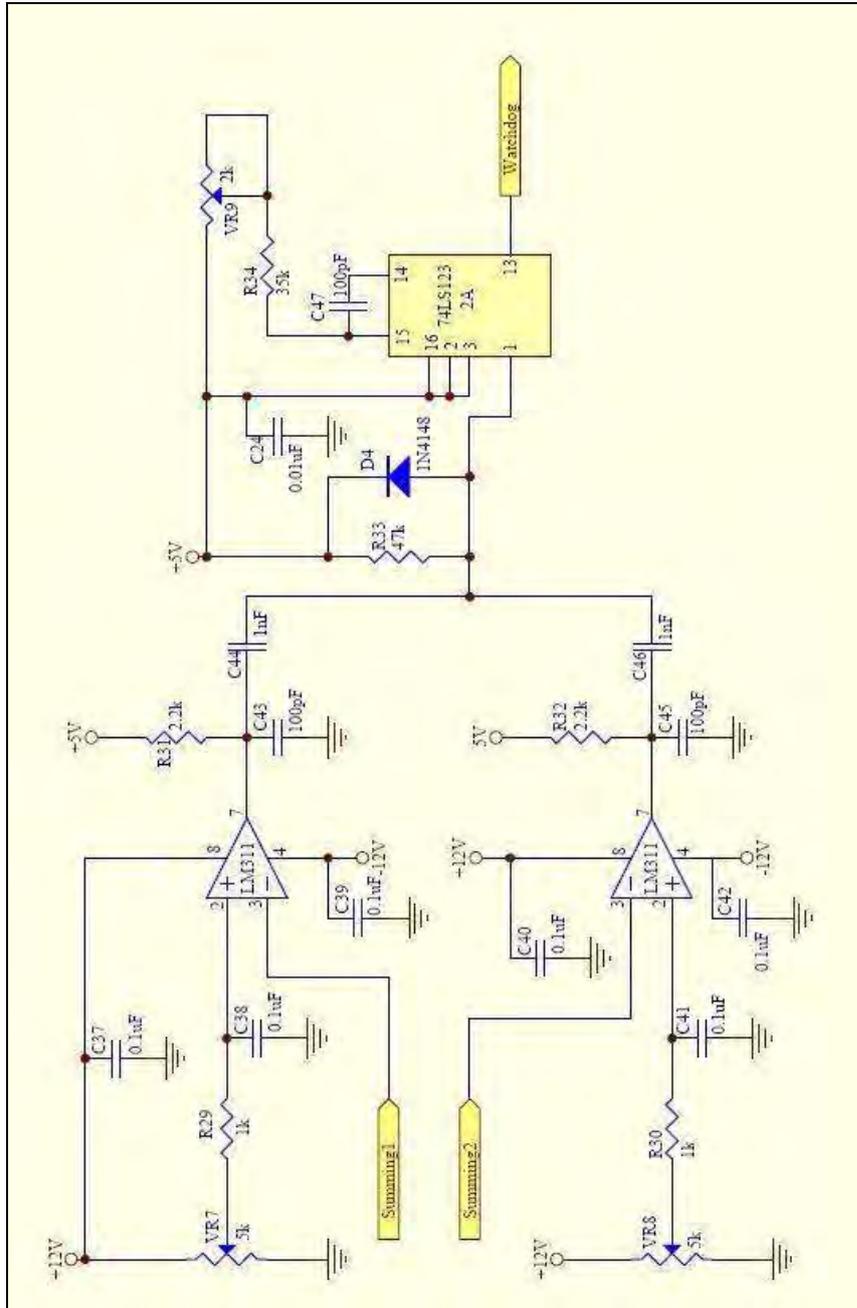
แผนภาพวงจรตรวจจับสนัยสัญญาณพัลส์ (Peak Detector with Reset and Hold Circuit)



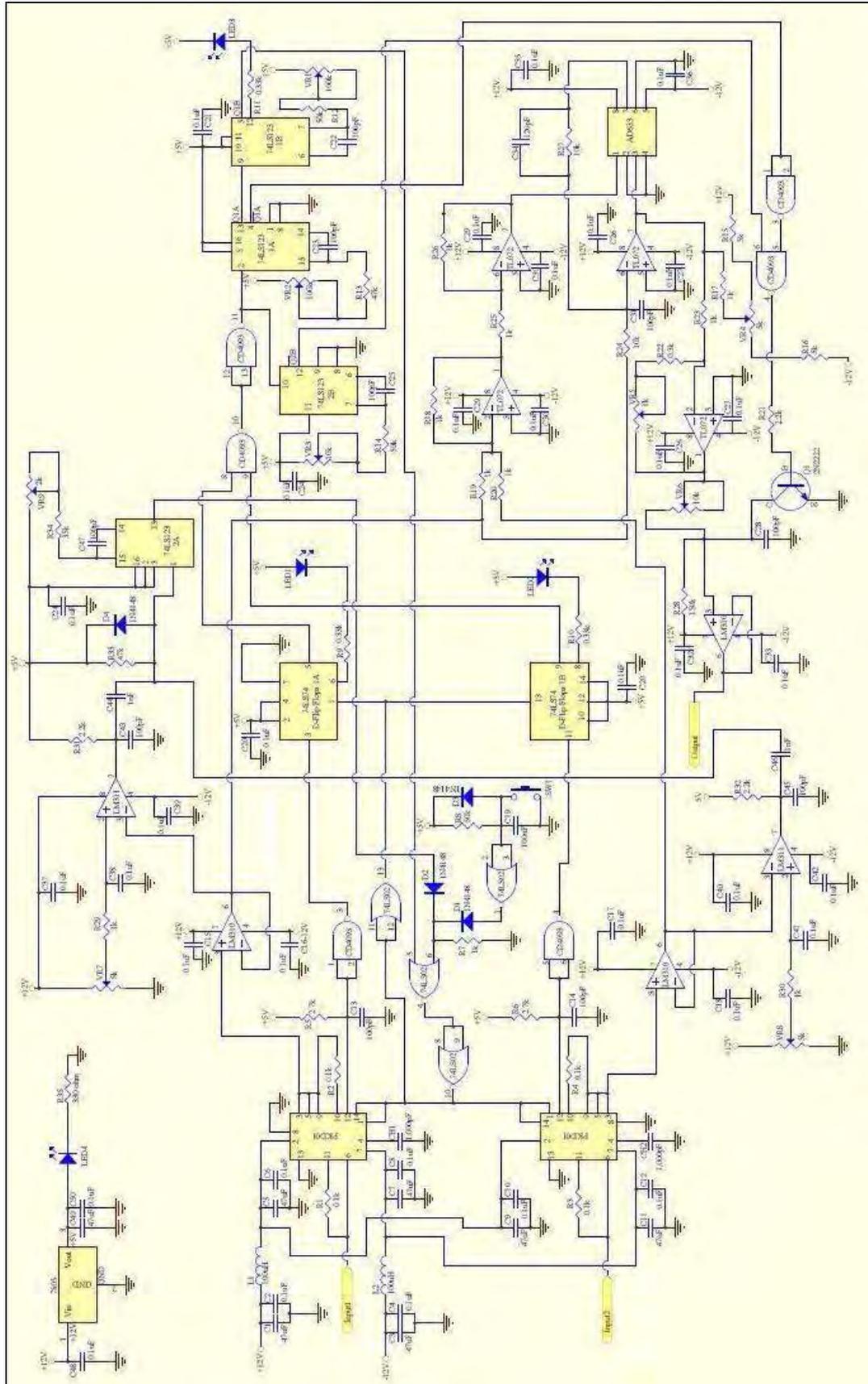
แผนภาพวงจรหารสัดส่วนสัญญาณ (Analog Division Ratio Circuit)



แผนภาพวงจรเฝ้าตรวจความผิดปกติของสัญญาณ (Watchdog)



แผนภาพวงจรวัดสัดส่วนสัญญาณพัลส์ทั้งระบบ



ภาคผนวก ค



## Monolithic Peak Detector with Reset-and-Hold Mode

### PKD01

#### FEATURES

Monolithic Design for Reliability and Low Cost  
 High Slew Rate: 0.5 V/ $\mu$ s  
 Low Droop Rate  
 $T_A = 25^\circ\text{C}$ : 0.1 mV/ms  
 $T_A = 125^\circ\text{C}$ : 10 mV/ms  
 Low Zero-Scale Error: 4 mV  
 Digitally Selected Hold and Reset Modes  
 Reset to Positive or Negative Voltage Levels  
 Logic Signals TTL and CMOS Compatible  
 Uncommitted Comparator On-Chip  
 Available in Die Form

#### GENERAL DESCRIPTION

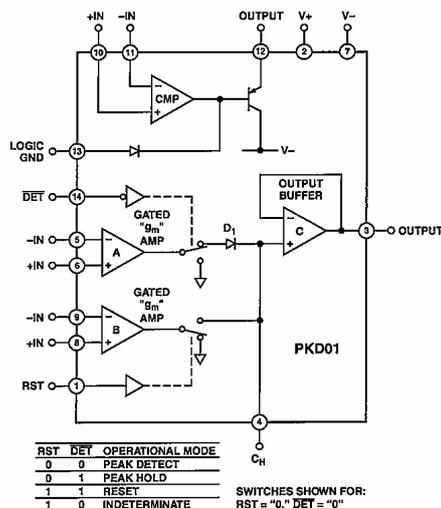
The PKD01 tracks an analog input signal until a maximum amplitude is reached. The maximum value is then retained as a peak voltage on a hold capacitor. Being a monolithic circuit, the PKD01 offers significant performance and package density advantages over hybrid modules and discrete designs without sacrificing system versatility. The matching characteristics attained in a monolithic circuit provide inherent advantages when charge injection and droop rate error reduction are primary goals.

Innovative design techniques maximize the advantages of monolithic technology. Transconductance ( $g_m$ ) amplifiers were chosen over conventional voltage amplifier circuit building blocks. The  $g_m$  amplifiers simplify internal frequency compensation, minimize acquisition time and maximize circuit accuracy. Their outputs are easily switched by low glitch current steering circuits. The steered outputs are clamped to reduce charge injection errors upon entering the hold mode or exiting the reset mode. The inherently low zero-scale error is further reduced by active Zener-Zap trimming to optimize overall accuracy.

#### REV. A

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

#### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



The output buffer amplifier features an FET input stage to reduce droop rate error during lengthy peak hold periods. A bias current cancellation circuit minimizes droop error at high ambient temperatures.

Through the  $\overline{\text{DET}}$  control pin, new peaks may either be detected or ignored. Detected peaks are presented as positive output levels. Positive or negative peaks may be detected without additional active circuits, since Amplifier A can operate as an inverting or noninverting gain stage.

An uncommitted comparator provides many application options. Status indication and logic shaping/shifting are typical examples.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
 Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>  
 Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 2001

## PKD01

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS<sup>1,2</sup>

Supply Voltage	±18 V
Input Voltage	Equal to Supply Voltage
Logic and Logic Ground Voltage	Equal to Supply Voltage
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Amplifier A or B Differential Input Voltage	±24 V
Comparator Differential Input Voltage	±24 V
Comparator Output Voltage	Equal to Positive Supply Voltage
Hold Capacitor Short-Circuit Duration	Indefinite
Lead Temperature (Soldering, 60 sec)	300°C
Storage Temperature Range	
PKD01AY, PKD01EY, PKD01FY	-65°C to +150°C
PKD01EP, PKD01FP	-65°C to +125°C
Operating Temperature Range	
PKD01AY	-55°C to +125°C
PKD01EY, PKD01FY	-25°C to +85°C
PKD01EP, PKD01FP	0°C to 70°C
Junction Temperature	-65°C to +150°C

### NOTES

- <sup>1</sup>Absolute maximum ratings apply to both DICE and packaged parts, unless otherwise noted.
- <sup>2</sup>Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those listed in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

### THERMAL CHARACTERISTICS

Package Type	$\theta_{JA}^*$	$\theta_{JC}$	Unit
14-Lead Hermetic DIP (Y)	99	12	°C/W
14-Lead Plastic DIP (P)	76	33	°C/W

\* $\theta_{JA}$  is specified for worst-case mounting conditions, i.e.,  $\theta_{JA}$  is specified for device in socket for cerdip and PDIP packages.

### CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although the PKD01 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high-energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.



### ORDERING GUIDE<sup>1</sup>

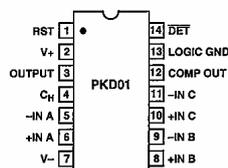
Model <sup>2</sup>	Temperature Range	Package Description	Package Option
PKD01AY	-55°C to +85°C	Cerdip	Q-14
PKD01EY	-25°C to +85°C	Cerdip	Q-14
PKD01FY	-25°C to +85°C	Cerdip	Q-14
PKD01EP	0°C to 70°C	Plastic DIP	N-14
PKD01FP	0°C to 70°C	Plastic DIP	N-14

### NOTES

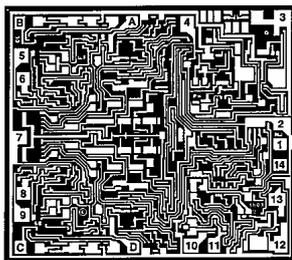
<sup>1</sup>Burn-in is available on commercial and industrial temperature range parts in cerdip, plastic DIP, and TO-can packages.

<sup>2</sup>For devices processed in total compliance to MIL-STD-883, add /883 after part number. Consult factory for 883 data sheet.

### PIN CONFIGURATION



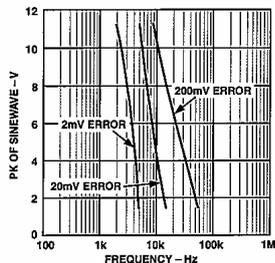
### DICE CHARACTERISTICS



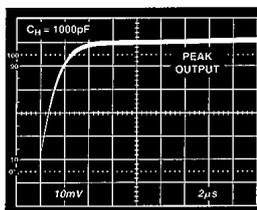
1. RST (RESET CONTROL)
2. V+
3. OUTPUT
4. CH (HOLD CAPACITOR)
5. INVERTING INPUT (A)
6. NONINVERTING INPUT (A)
7. V-
8. NONINVERTING INPUT (B)
9. INVERTING INPUT (B)
10. COMPARATOR NONINVERTING INPUT
11. COMPARATOR INVERTING INPUT
12. COMPARATOR OUTPUT
13. LOGIC GROUND
14. DET (PEAK DETECT CONTROL)  
A, B (A) NULL  
C, D (B) NULL

DIE SIZE 0.090 x 0.100 INCH, 9000 SQ. MILS  
(2.286 x 2.54mm, 5.8 SQ. mm)

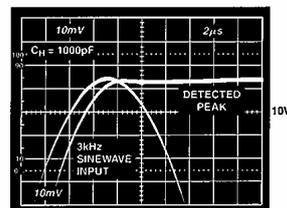
FOR ADDITIONAL DICE INFORMATION REFER TO  
1986 DATA BOOK, SECTION 2.



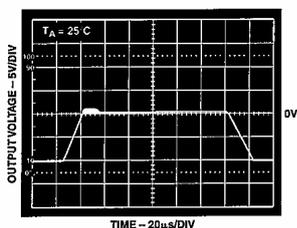
TPC 10. Output Error vs. Frequency and Input Voltage



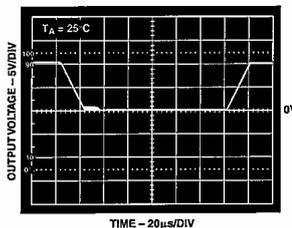
TPC 11. Settling Response



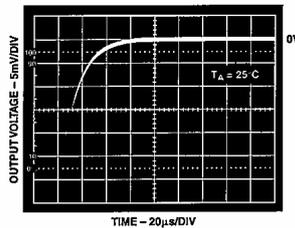
TPC 12. Settling Response



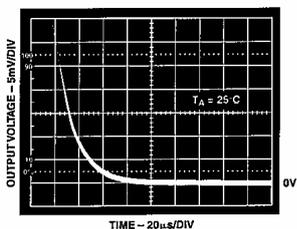
TPC 13. Large-Signal Inverting Response



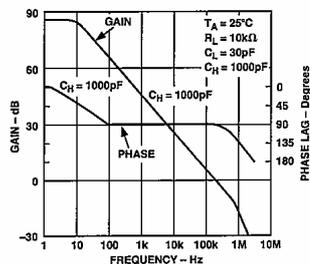
TPC 14. Large-Signal Noninverting Response



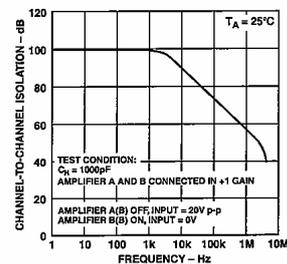
TPC 15. Settling Time for -10 V to 0 V Step Input



TPC 16. Settling Time for +10 V to 0 V Step Input

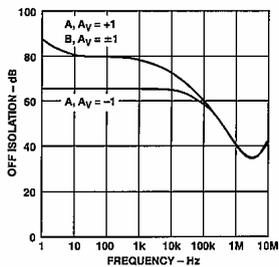


TPC 17. Small-Signal Open-Loop Gain/Phase vs. Frequency

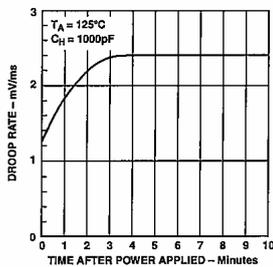


TPC 18. Channel-to-Channel Isolation vs. Frequency

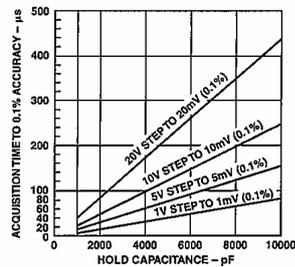
**PKD01**



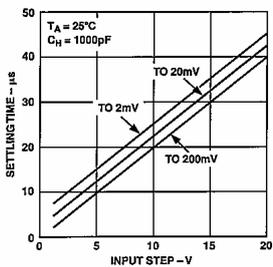
TPC 19. Off Isolation vs. Frequency



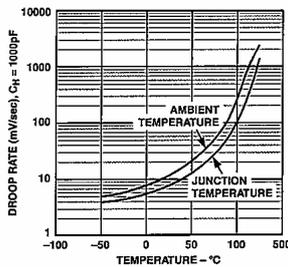
TPC 20. Droop Rate vs. Time after Power On



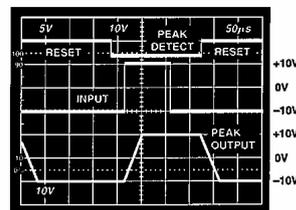
TPC 21. Acquisition Time vs. External Hold Capacitor and Acquisition Step



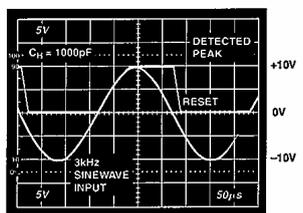
TPC 22. Acquisition Time vs. Input Voltage Step Size



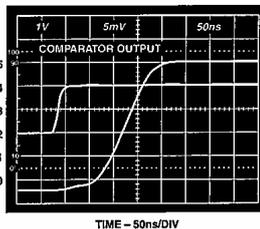
TPC 23. Droop Rate vs. Temperature



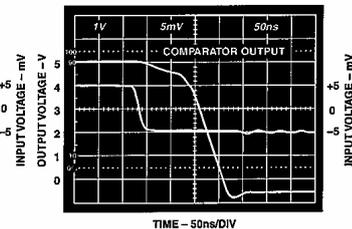
TPC 24. Acquisition of Step Input



TPC 25. Acquisition of Sine Wave Peak



TPC 26. Comparator Output Response Time (2 kΩ Pull-Up Resistor, T<sub>A</sub> = 25°C)



TPC 27. Comparator Output Response Time (2 kΩ Pull-Up Resistor, T<sub>A</sub> = 25°C)

### PKD01

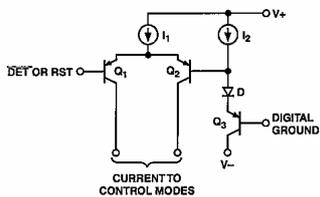


Figure 11. Logic Control

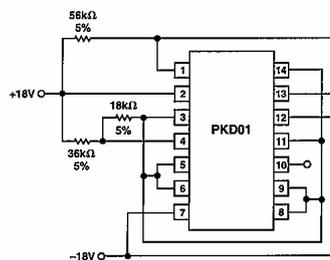


Figure 12. Burn-In Circuit

### Typical Circuit Configurations

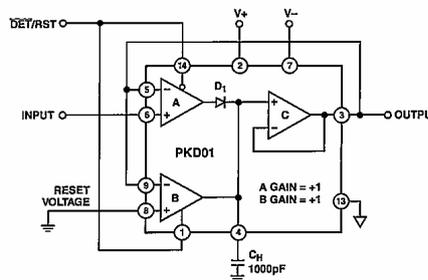
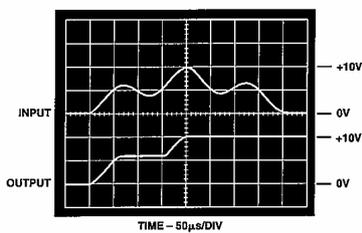


Figure 13. Unity Gain Positive Peak Detector

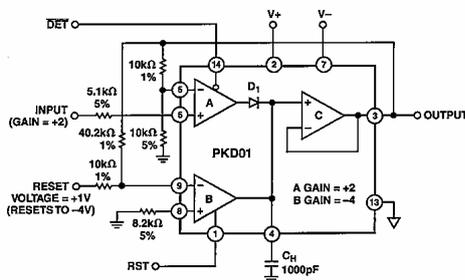
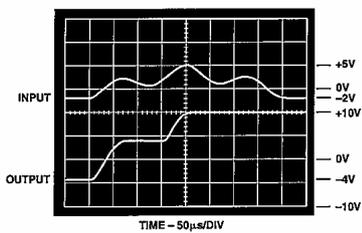


Figure 14. Positive Peak Detector with Gain



## Low Cost Analog Multiplier

### AD633

#### FEATURES

Four-Quadrant Multiplication  
Low Cost 8-Lead Package  
Complete—No External Components Required  
Laser-Trimmed Accuracy and Stability  
Total Error Within 2% of FS  
Differential High Impedance X and Y Inputs  
High Impedance Unity-Gain Summing Input  
Laser-Trimmed 10 V Scaling Reference

#### APPLICATIONS

Multiplication, Division, Squaring  
Modulation/Demodulation, Phase Detection  
Voltage-Controlled Amplifiers/Attenuators/Filters

#### PRODUCT DESCRIPTION

The AD633 is a functionally complete, four-quadrant, analog multiplier. It includes high impedance, differential X and Y inputs and a high impedance summing input (Z). The low impedance output voltage is a nominal 10 V full scale provided by a buried Zener. The AD633 is the first product to offer these features in modestly priced 8-lead plastic DIP and SOIC packages.

The AD633 is laser calibrated to a guaranteed total accuracy of 2% of full scale. Nonlinearity for the Y-input is typically less than 0.1% and noise referred to the output is typically less than 100  $\mu\text{V}$  rms in a 10 Hz to 10 kHz bandwidth. A 1 MHz bandwidth, 20 V/ $\mu\text{s}$  slew rate, and the ability to drive capacitive loads make the AD633 useful in a wide variety of applications where simplicity and cost are key concerns.

The AD633's versatility is not compromised by its simplicity. The Z-input provides access to the output buffer amplifier, enabling the user to sum the outputs of two or more multipliers, increase the multiplier gain, convert the output voltage to a current, and configure a variety of applications.

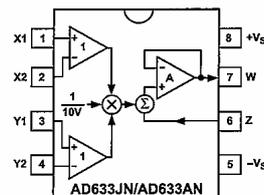
The AD633 is available in an 8-lead plastic DIP package (N) and 8-lead SOIC (R). It is specified to operate over the 0°C to +70°C commercial temperature range (J Grade) or the -40°C to +85°C industrial temperature range (A Grade).

#### REV. B

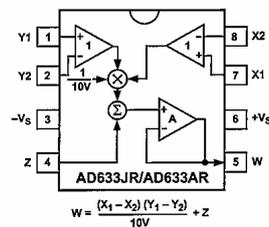
Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

#### CONNECTION DIAGRAMS

##### 8-Lead Plastic DIP (N) Package



##### 8-Lead Plastic SOIC (SO-8) Package



$$W = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10V} + Z$$

#### PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD633 is a complete four-quadrant multiplier offered in low cost 8-lead plastic packages. The result is a product that is cost effective and easy to apply.
2. No external components or expensive user calibration are required to apply the AD633.
3. Monolithic construction and laser calibration make the device stable and reliable.
4. High (10 M $\Omega$ ) input resistances make signal source loading negligible.
5. Power supply voltages can range from  $\pm 8$  V to  $\pm 18$  V. The internal scaling voltage is generated by a stable Zener diode; multiplier accuracy is essentially supply insensitive.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>  
Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1999

## AD633

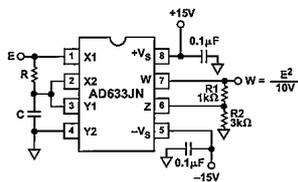


Figure 5. "Bounceless" Frequency Doubler

At  $\omega_0 = 1/CR$ , the X input leads the input signal by  $45^\circ$  (and is attenuated by  $\sqrt{2}$ ), and the Y input lags the X input by  $45^\circ$  (and is also attenuated by  $\sqrt{2}$ ). Since the X and Y inputs are  $90^\circ$  out of phase, the response of the circuit will be (satisfying Equation 3):

$$W = \frac{1}{(10V)\sqrt{2}} (\sin \omega_0 t + 45^\circ) \frac{E}{\sqrt{2}} (\sin \omega_0 t - 45^\circ)$$

$$= \frac{E^2}{(40V)} (\sin 2 \omega_0 t) \quad \text{(Equation 4)}$$

which has no dc component. Resistors R1 and R2 are included to restore the output amplitude to 10 V for an input amplitude of 10 V. The amplitude of the output is only a weak function of frequency: the output amplitude will be 0.5% too low at  $\omega = 0.9 \omega_0$ , and  $\omega_0 = 1.1 \omega_0$ .

### Generating Inverse Functions

Inverse functions of multiplication, such as division and square rooting, can be implemented by placing a multiplier in the feedback loop of an op amp. Figure 6 shows how to implement a square rooter with the transfer function

$$W = \sqrt{-(10V)E} \quad \text{(Equation 5)}$$

for the condition  $E < 0$ .

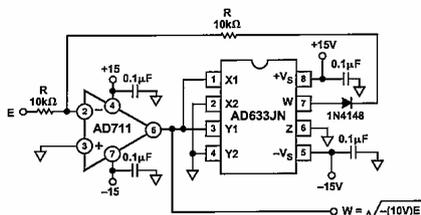


Figure 6. Connections for Square Rooting

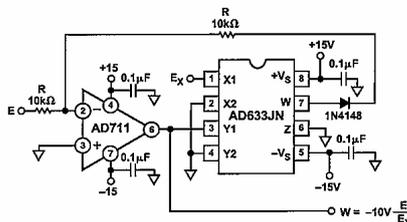


Figure 7. Connections for Division

Likewise, Figure 7 shows how to implement a divider using a multiplier in a feedback loop. The transfer function for the divider is

$$W = -(10V) \frac{E}{E_X} \quad \text{(Equation 6)}$$

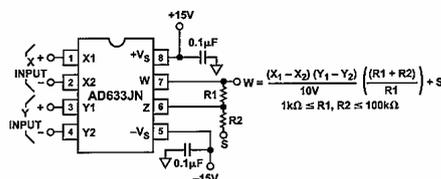


Figure 8. Connections for Variable Scale Factor

### Variable Scale Factor

In some instances, it may be desirable to use a scaling voltage other than 10 V. The connections shown in Figure 8 increase the gain of the system by the ratio  $(R1 + R2)/R1$ . This ratio is limited to 100 in practical applications. The summing input, S, may be used to add an additional signal to the output or it may be grounded.

### Current Output

The AD633's voltage output can be converted to a current output by the addition of a resistor R between the AD633's W and Z pins as shown in Figure 9 below. This arrangement forms

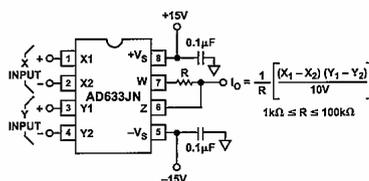


Figure 9. Current Output Connections

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธิตี เรืองสีสำราญ เกิดวันที่ 17 กันยายน พ.ศ.2523 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยี อุตสาหกรรม สถาบันราชภัฏพระนคร ในปีการศึกษา 2545 และในปีการศึกษา 2552 ได้เข้าศึกษา ระดับปริญญาโทที่ภาควิชาวิศวกรรมนิเวศศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย