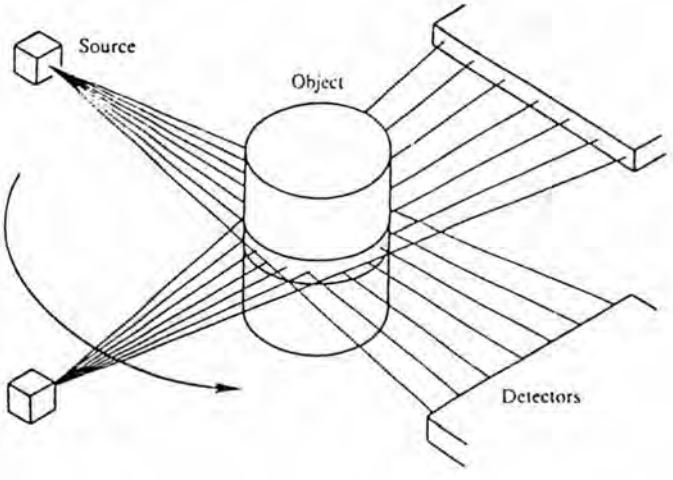
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

ภาพโทโมกราฟี หมายถึง " ภาพตัดขวาง" ที่สามารถมองเห็นภายในของวัตถุได้ซึ่งมีลักษณะเป็นภาพระนาบ 2 มิติ สามารถทำได้โดยการปล่อยรังสีลำแคบตัดผ่านไปในระนาบของวัตถุแล้วสแกนเก็บข้อมูลโพรไฟล์ทีละระนาบด้วยการหมุนวัตถุตัวอย่างไปด้วยมุมน้อยๆ จนได้ภาพของวัตถุครบ หรือ อย่างน้อย 180 องศา แล้วนำข้อมูลภาพที่ได้ทั้งหมดไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี



รูป 2.1 การจัดระบบสแกนเพื่อการเก็บข้อมูลสำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

2.1.1 หลักการเก็บข้อมูลโพรไฟล์เพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี[1,2,3]

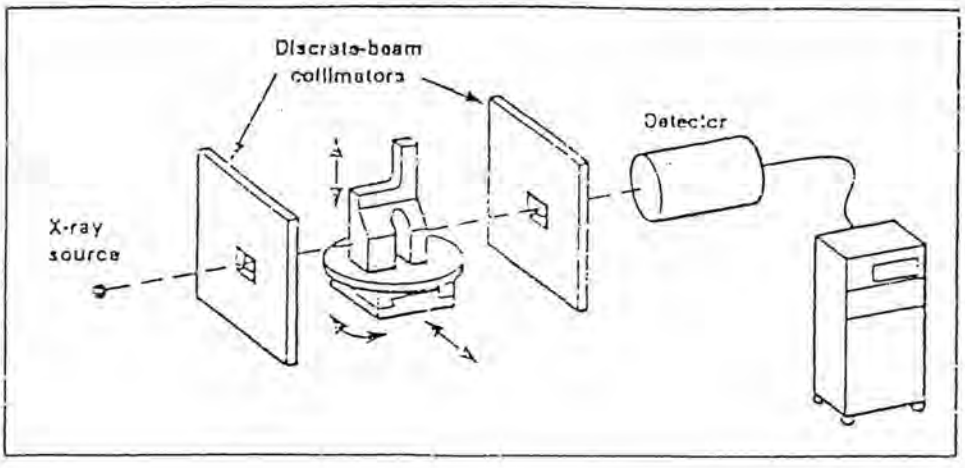
โดยทั่วไปการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ใช้หลักการทะลุผ่านของรังสีต่อวัตถุตัวอย่าง ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสร้างภาพ คือ ค่าความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านวัตถุออกมาในทิศ

ทางต่างๆ จำนวนมากซึ่งเมื่อเก็บข้อมูลจากวิธีต่างๆ แล้วนำข้อมูลเหล่านั้นมาประมวลผลด้วยคณิตศาสตร์ชั้นสูง จะแสดงผลภาพในลักษณะของภาพตัดขวาง

วิวัฒนาการของระบบสร้างภาพโทโมกราฟีได้มีการพัฒนาการเป็นเวลานานแล้ว มีการนำระบบการสร้างภาพโทโมกราฟีมาประยุกต์ใช้ในงานแขนงต่างๆ เช่น ด้านการอุตสาหกรรม ด้านการแพทย์ เทคนิคการเก็บข้อมูลโพรไฟล์เพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี สามารถจำแนกวิธีการเป็น 3 วิธี ได้แก่

2.1.1.1 วิธีสแกนแบบรังสีลำแคบ (Narrow beam)

การทำงานของวิธีการเก็บข้อมูลลักษณะนี้ คือ การออกแบบให้ลำรังสีซึ่งจำกัดให้เป็นลำแคบ เคลื่อนที่ผ่านวัตถุในแนวราบ ตกกระทบหัววัดรังสีซึ่งอยู่ด้านตรงข้าม การสแกนวิธีนี้กำหนดให้วัตถุเคลื่อนผ่านลำรังสีไปจนสุดขอบวัตถุ จากนั้นหมุนวัตถุด้วยมุมน้อยๆ แล้วสแกนกลับมาจุดเดิมจนได้ข้อมูลเพียงพอที่จะนำมาสร้างภาพโทโมกราฟี เรียกปริมาณรังสีแต่ละจุดว่า "เรย์ซัม (Ray-Sum)" การสแกนผ่านวัตถุต่อการหมุนของวัตถุด้วยมุมน้อยๆ ประกอบไปด้วยหลายๆ เรย์ซัม เรียกว่า "โพรไฟล์ (Profile)" หรือ "โปรเจกชัน (Projection)" วิธีนี้ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลมาก

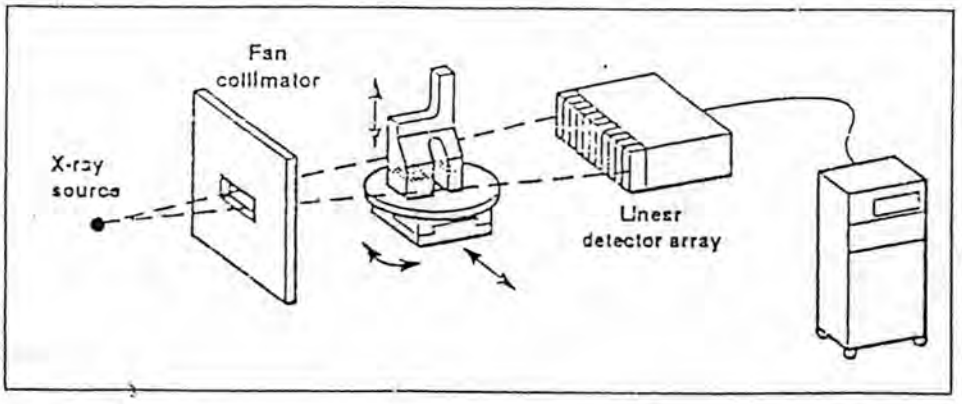


รูปที่ 2.2 ระบบการเก็บข้อมูลแบบรังสีลำแคบ

2.1.1.2 วิธีสแกนแบบลำรังสีรูปพัด (Fan Beam)

การเก็บข้อมูลลักษณะนี้ใช้ลำรังสีเป็นรูปพัด และ หัววัดรังสีเป็นแถว (Linear Detector Array) ในการเก็บข้อมูลหนึ่งครั้ง จะได้ข้อมูลหนึ่งระนาบชิ้นงาน หรือหนึ่งโพรไฟล์ ซึ่งจะใช้เวลาในการเก็บข้อมูลน้อยกว่าแบบแรก แต่ใช้ได้กับรังสีเอกซ์หรือแกมมา

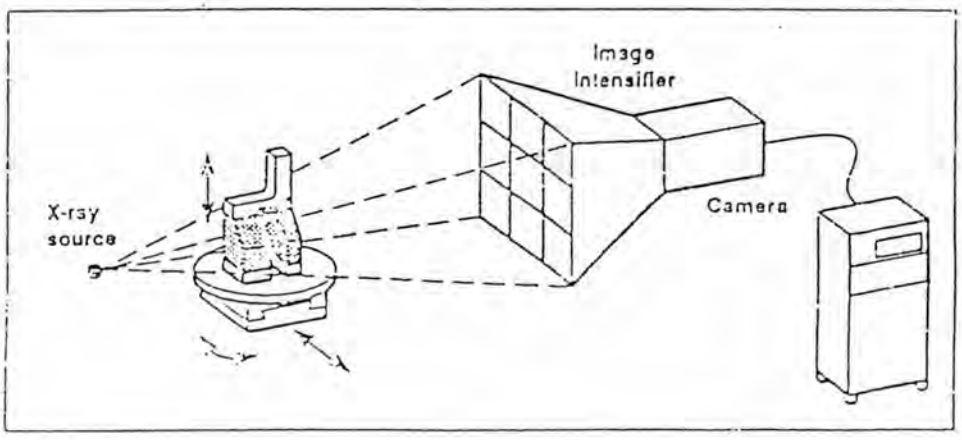
พลังงานต่ำ สามารถที่จะออกแบบให้วัตถุตัวอย่างเคลื่อนที่ หรือ ออกแบบให้หัววัดเคลื่อนที่ไปพร้อมๆกับต้นกำเนิดรังสีก็ได้



รูปที่ 2.3 ระบบการเก็บข้อมูลแบบลำรังสีรูปพัด

2.1.1.3 วิธีสแกนแบบลำรังสีรูปกรวย (Cone Beam)

การเก็บข้อมูลลักษณะนี้ สามารถสร้างรายละเอียดของภาพได้ 2 ระนาบ คือ ระนาบในแนวแกนนอน และ ระนาบในแนวแกนตั้ง โดยออกแบบลำรังสีให้เป็นรูปกรวย สำหรับส่วนรับข้อมูลหรือหัววัดรังสี จะเรียงกันมากกว่า 1 แถว และในแต่ละแถวจะมีหัววัดอยู่หลายอันหรืออาจใช้ แผ่นเรืองรังสีรับภาพ โดยมีกล้องโทรทัศน์จับภาพ เรียกว่า "ระบบโทรทัศน์ (Television System)" โดยระบบนี้จะใช้เวลาในการสแกนเก็บข้อมูลโพรไฟล์น้อยกว่าทั้งสองระบบที่ผ่านมา



รูปที่ 2.4 ระบบการเก็บข้อมูลแบบลำรังสีรูปกรวย

2.1.2 ทฤษฎีการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

จากแนวความคิดที่ว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนของความเข้มรังสีเอกซ์ในวัตถุต่างชนิดกันในระนาบใดระนาบหนึ่งสามารถหาได้โดย การนำเอาปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านวัตถุในทิศทางต่างๆ มาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ชั้นสูง สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการคำนวณสร้างภาพแบบ คอนโวลูชันฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน

2.1.2.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีเอกซ์[3]

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง สามารถทะลุทะลวงผ่านวัตถุได้ เมื่อเดินทางผ่านตัวกลางใดก็ตามจะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางนั้น เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก ปรากฏการณ์คอมพ์ตัน หรือ การผลิตสารคู่ (Pair Production) เป็นต้น ปรากฏการณ์ต่างๆ เหล่านี้มีผลทำให้รังสีเอกซ์ที่เดินทางผ่านตัวกลางนั้นๆ ออกมาแล้วมีความเข้มลดลง

สมมติมีตัวกลางหรือวัตถุที่ประกอบด้วยเนื้อเดียวกันตลอด มีความหนา x ฉายรังสีเอกซ์ที่มีความเข้ม I_0 ผ่านเข้าไปในตัวกลางนี้ เมื่อรังสีเอกซ์ทะลุออกมาปรากฏว่ามีความเข้มลดลงเป็น I ดังรูป 2.5 (ก) ถ้ารังสีเอกซ์พลังงานเดียว แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I = I_0 e^{-\mu x} \qquad (2\text{-}1)$$

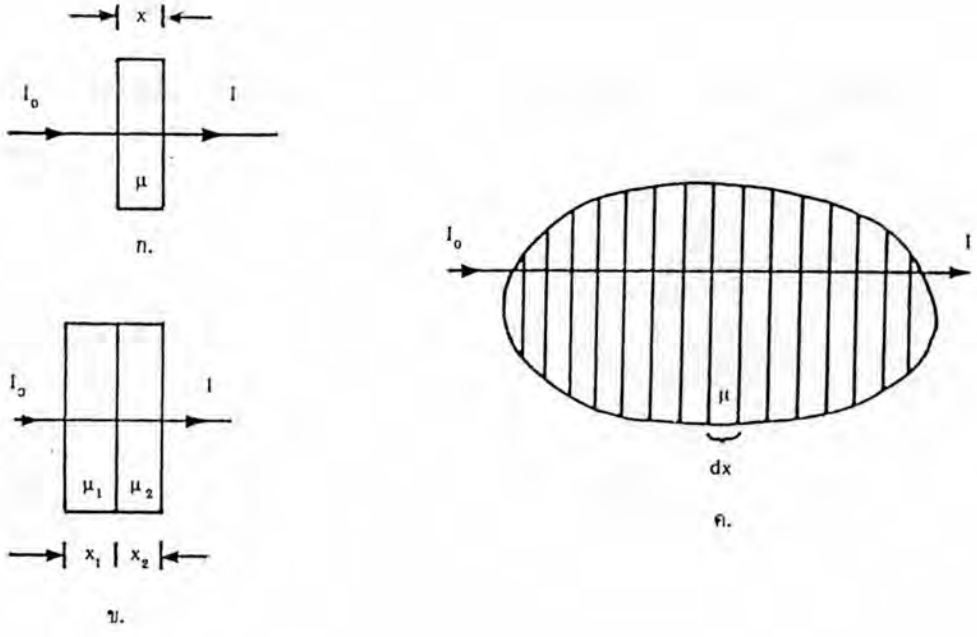
μ คือ สัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีเอกซ์

กรณีที่ตัวกลางประกอบด้วยสาร 2 ชนิด หนา x_1 และ x_2 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีเอกซ์ของตัวกลางทั้งสองเป็น μ_1 และ μ_2 ตามลำดับ ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$I = I_0 e^{-\mu_1 x_1 - \mu_2 x_2} \qquad (2\text{-}2)$$

กรณีที่ตัวกลางประกอบด้วยสารหลายชนิด ในการคิดการดูดกลืนรังสีเอกซ์จำเป็นต้องแบ่งตัวกลางออกเป็นแถบเล็กๆ ขนาดความหนา dx เท่ากันจำนวนมาก ดังรูป 2.5 (ค) ความหนาของแถบเล็กๆนั้น เล็กจนกระทั่งสามารถคิดว่าในแถบเล็กๆ นั้นประกอบด้วยสารเนื้อเดียวตลอด แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I = I_0 \exp\left[\int -\mu dx\right] \qquad (2\text{-}3)$$



รูปที่ 2.5 แสดงเรขาคณิตของลำรังสีเอกซ์ที่เดินทางผ่านตัวกลาง 3 แบบ

ก) ตัวกลางที่มีเนื้อเดียวกันตลอด

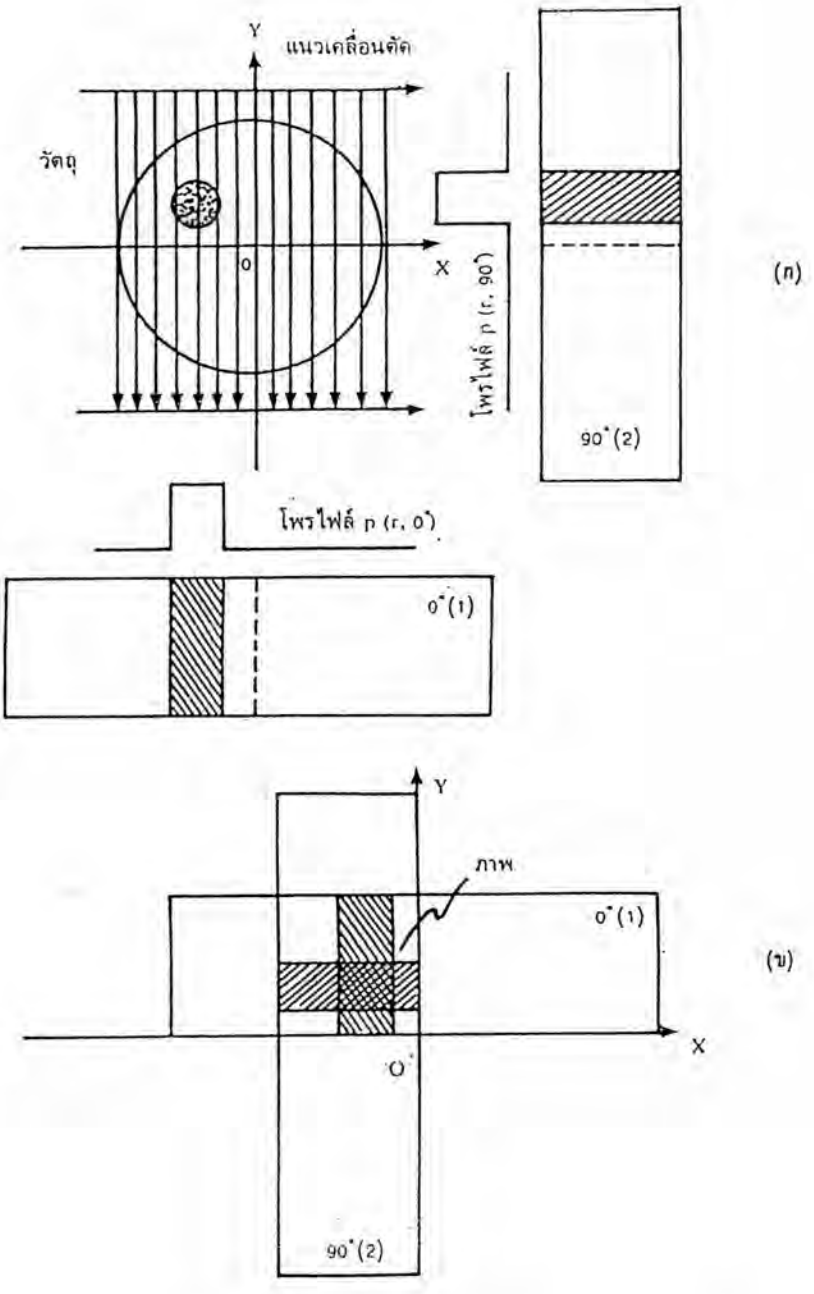
ข) ตัวกลางที่มีเนื้อต่างกัน 2 ชนิด

ค) ตัวกลางที่มีเนื้อต่างกันหลายชนิด

2.1.2.2 การคำนวณสร้างภาพแบบคอนโวลูชันฟิลเตอร์ แบคโปรเจกชัน[4]

ได้กล่าวแล้วว่าการที่รังสีเอกซ์ลำแคบเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงไปในระนาบของตัวกลางใดๆ 1 ครั้งจะได้ 1 โพรไฟล์ ซึ่งประกอบด้วยเรย์ซัม หรือ p(r,∅) จำนวนหนึ่ง ถ้าบิดแนวรังสีเอกซ์ไปจากแนวเดิมทีละ 1 องศาจนครบ 180 องศา โดยที่แต่ละองศาให้รังสีเอกซ์ลำแคบเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงผลลัพธ์จะได้ 180 โพรไฟล์ ซึ่งเป็นข้อมูลสำหรับไปคำนวณสร้างภาพ

เพื่อความชัดเจนจะพิจารณาจากรูป 2.6(ก) สมมติว่าการเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงครั้งแรกมุม $\varnothing = 0^0$ จะได้โพรไฟล์ 1 ชุด หรือได้ $p(r, 0^0)$ การเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงครั้งที่สองมุม $\varnothing = 90^0$ จะได้โพรไฟล์อีก 1 ชุด หรือ ได้ $p(r, 90^0)$ เมื่อนำโพรไฟล์ทั้งสองมาซ้อนทับกันอย่างเหมาะสม ดังรูป 2.6(ข)จะเห็นว่าตรงตำแหน่งที่สอดคล้องกับตำแหน่งวัตถุ $p(r, 0^0)$ และ $p(r, 90^0)$ ที่มีค่าสูงมากจะรวมกันหรือเสริมกันทำให้เห็นเด่นเป็นภาพของวัตถุขึ้น



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดภาพตามวิธีการแบคโปรเจกชัน

ก) โพรไฟล์ของวัตถุที่บันทึกได้ในสองทิศทาง คือ 0^0(1) และ 90^0(2) วัดเทียบกับแกน Y

ข) โพรไฟล์ในรูป ก) นำมาซ้อนกันอย่างเหมาะสมเพื่อสร้างภาพ

วิธีการดังกล่าว คือทฤษฎีการสร้างภาพที่เรียกว่าแบคโปรเจกชัน (Back Projection) ยังไม่ใช่วิธีการที่ดีในการนำข้อมูลที่หัววัดรังสีเอกซ์บันทึกไว้มาสร้างภาพเพราะแต่ละเรย์ซัมไม่ได้นำไปรวมกันเฉพาะตรงจุดที่มีความหนาแน่นสูงเท่านั้น แต่จะนำไปรวมกันบนทุกๆ

จุดตามเส้นทางของลำรังสีเอกซ์ เหตุนี้ทำให้ภาพที่สร้างไม่คมชัดที่ควร แต่อย่างไรก็ตามการสร้างภาพสามารถทำให้ดีได้ถ้าปรับปรุงโพรไฟล์ที่บันทึกได้เสียใหม่ซึ่งเป็นแนวทางนำไปสู่วิธีการสร้างภาพที่เรียกว่าฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน โดยกรองข้อมูลโพรไฟล์ด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชัน ซึ่งในที่นี้เลือกใช้ฟิลเตอร์ฟังก์ชันของ Shepp&Logan วิธีการคำนวณแบบนี้เรียกว่า "คอนโวลูชันฟิลเตอร์แบบโปร เจกชัน"

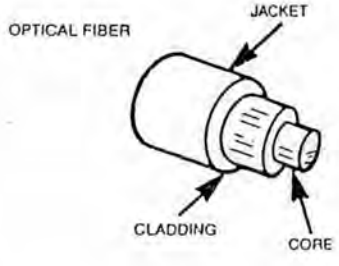
2.2 หัววัดรังสีชนิดเส้นใยนำแสงเคลือบปลายด้วยสารเรืองรังสีเอกซ์

หัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

1. เส้นใยพลาสติกนำแสง
2. หลอดทวีคูณแสง
3. สารเรืองรังสีเอกซ์

2.2.1 เส้นใยนำแสง (Optical Fiber)[5]

เส้นใยนำแสง คือ เส้นใยขนาดเล็กที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำแสง โครงสร้างของเส้นใยนำแสงประกอบด้วย ส่วนที่แสงเดินทางผ่านเรียกว่า "คอร์ (Core)" และส่วนหุ้มคอร์ อยู่เรียกว่า "แคลดดิง (Cladding)" ทั้งคอร์ และ แคลดดิง เป็น ไดอิเล็กตริก (Dielectric หมายถึง สารที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น แก้ว พลาสติก) ใส 2 ชนิด โดยการทำให้ค่าดัชนีการหักเหของแคลดดิง มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีการหักเหของคอร์ เล็กน้อยประมาณ 0.2~3% และอาศัยปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดของแสงสามารถทำให้แสงที่ป้อนเข้าไปในคอร์เดินทางไปได้

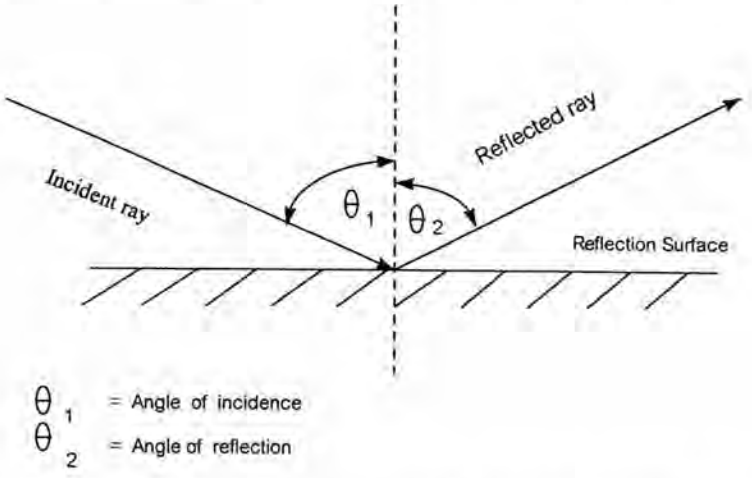


รูปที่ 2.7 โครงสร้างเส้นใยนำแสง

คุณสมบัติของเส้นใยนำแสงจะใช้ทฤษฎีการสะท้อนกลับหมดที่ผิวขอบเขตของสารไดอิเล็กตริก สองชนิด ตามกฎของสเนลล์

$$\frac{\text{Sin}\,\theta_1}{\text{Sin}\,\theta_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

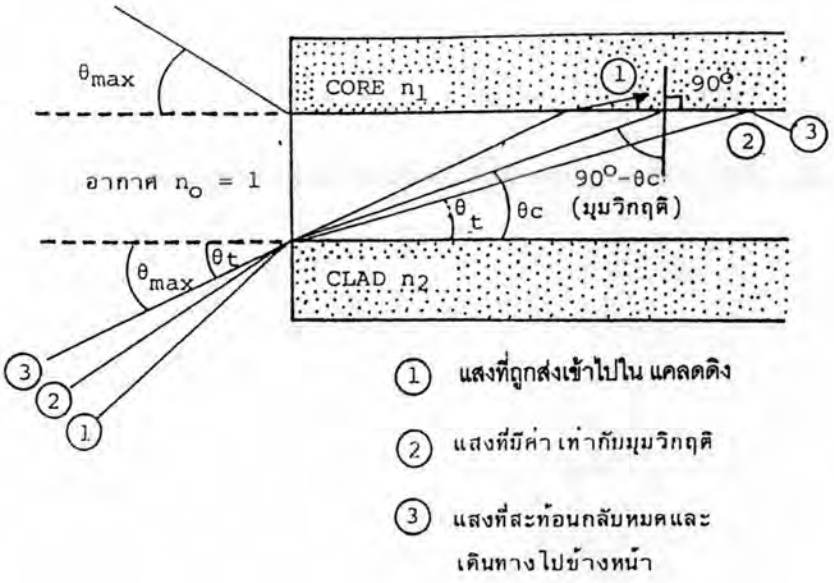
โดย N_1 และ N_2 เป็นค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 และ 2 จากรูปถ้า $\theta_2 = 90^0$ ก็ไม่มีคลื่นหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่ 2 คือ คลื่นแสงที่เข้ามาที่ผิวขอบเขตจะสะท้อนกลับออกไปหมด



รูปที่ 2.8 การสะท้อนและหักเหของแสงที่ผิวระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด

แสงที่ปล่อยจากแหล่งกำเนิดแสง ไม่ใช่ว่าจะถูกป้อนเข้าไปในเส้นใยนำแสง ได้ทั้งหมด แสงที่มีมุมตกกระทบที่เหมาะสมเท่านั้นจึงจะสามารถเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ รูป 2.9 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยนำแสง จากรูปจะเห็นว่าที่จุดป้อนแสงของเส้นใยนำแสงนั้นจะเป็นจุดต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงต่างกัน 3 ชนิด

ตัวกลางทั้ง 3 ชนิดนี้ คือ อากาศ คอร์ของเส้นใยนำแสงและ แคลดดิงของเส้นใยนำแสง ถ้าให้ค่าดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลางทั้ง 3 ชนิด เป็น n_0 ($n_0 = 1$) , n_1 และ n_2 ตามลำดับ จะเกิดการหักเห การสะท้อนกลับของแสงที่มีค่ามากที่สุดเป็น θ_{max} ยกตัวอย่างเช่นในรูป 2.9 จะเห็นว่าลำแสงที่ 2 นั้นมุมรับแสงอยู่ตรงรอยต่อของคอร์ กับแคลดดิง นั้นมีค่าเป็นมุมวิกฤติ (Critical Angle) ตรงรอยต่อของอากาศกับ คอร์ และของ คอร์ กับ แคลดดิง นั้นจากกฎของสเนลล์จะได้ว่า



รูปที่ 2.9 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยนำแสง

$$\text{Sin}\ \theta_{max} = n_1 \text{Sin}\ \theta \quad \text{.....(1)}$$

$$\text{Sin}\ (90^0 - \theta_c) = \text{Cos}\ \theta_c = n_2/n_1 \quad \text{.....(2)}$$

สำหรับ $\text{Sin}\ \theta_{max}$ นี้ตามศัพท์เทคนิคของวิชาแสงเรียกว่า Numerical Aperture เขียนย่อว่า "NA" หมายถึงขนาดของการเปิดรับให้แสงผ่าน และใช้เป็นตัวแสดงเงื่อนไขการป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง

วิธีการแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงมีหลายวิธี กล่าวคือ แบ่งตามชนิดของสารไดอิเล็กตริกที่ใช้ แบ่งตามจำนวน Propagation Mode และแบ่งตามลักษณะของดัชนีการหักเหของคอร์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.2.1.1 การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามชนิดของไดอิเล็กตริกที่ใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

2.2.1.1.1 Silica Glass Optic Fiber ซึ่งใช้ ไดอิเล็กตริกที่เป็น Silica glass

2.2.1.1.2 Multi Component Glass Optic Fiber ซึ่งใช้ไดอิเล็กตริกที่เป็นแก้ว หลายชนิดปนกัน

2.2.1.1.3 Plastic Optic Fiber ซึ่งใช้ไดอิเล็กตริกที่เป็นพลาสติก

แบ่งตามชนิดของสาร DIELECTRIC ที่ใช้	Silica glass optic fiber
	Multi component glass optic fiber
	Plastic optic fiber
แบ่งตามจำนวน PROPAGATION MODE	Single Mode optic fiber
	Multi Mode optic fiber
แบ่งตามลักษณะของดัชนีการหักเหของ core	Step Index optic fiber
	Graded Index optic fiber

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสง

สำหรับ Silica Glass Optic Fiber นั้นนอกจากจะใช้ Silica (SiO_2) ที่บริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่แล้วยังใช้สารอื่นเติมลงไปเพื่อทำให้ค่าดัชนีการหักเหเปลี่ยนแปลงตามต้องการ สารอื่นที่เติมลงไปนี้เรียกว่า Dopant ได้แก่ Germanium (Ge) , Boron (B) , Fluorine (F) เป็นต้น

สำหรับ Multi Component Glass Optic Fiber นั้นส่วนมากใช้ Soda Calcium , แก้ว , แก้วที่มี Boron และ Silicon ผสมอื่นๆเป็นสารหลัก ส่วน Dopant ได้แก่ โซเดียม (Na) , แคลเซียม (Ca)

สำหรับ Plastic Optic Fiber นั้นใช้สารพวก Silicon Resin , Acryl Resin (เช่น Polymetacryl Methyl Acid : PMMA)

สำหรับเคเบิ้ลเส้นใยนำแสงที่ใช้ในข่ายการสื่อสารโทรคมนาคมนั้นนิยมใช้ Silica glass Optic Fiber เพราะมีข้อดี คือ การสูญเสีย (loss) ต่ำ และคุณสมบัติการส่ง (Transmission Characteristic) คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

แต่สำหรับงานที่ต้องการคุณสมบัติการส่งด้อยลงมา ใช้งานง่าย (ต่องาย หักยากแม้จะงอเส้นใยนำแสงมากๆเป็นต้น) และใช้กับการสื่อสารระยะทางใกล้ ในกรณีนี้นิยมใช้เส้นใยนำแสงที่เป็น Plastic Optic Fiber

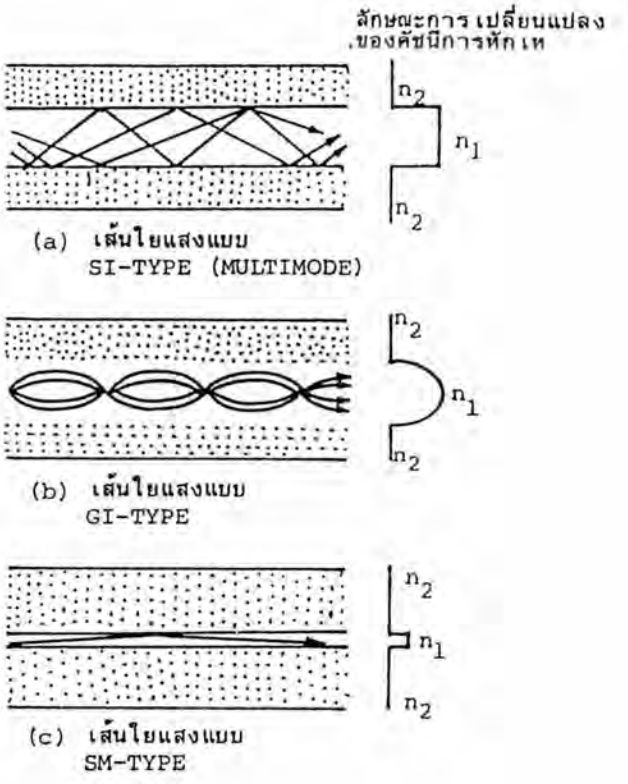
2.2.1.2 การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามจำนวนโหมดการเดินทางของแสง (Propagation Mode) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ เส้นใยนำแสงที่มีจำนวนโหมดการเดินทางของแสงเพียงอันเดียวเดินทางไปได้นั้นเรียกว่า Single Mode Optic Fiber ใช้ชื่อย่อว่า SM Fiber และอีกชนิดหนึ่ง คือ Multi Mode Optic Fiber ซึ่งคือเส้นใยนำแสงที่มีจำนวนโหมดการเดินทางของแสงเป็นจำนวนมาก

2.2.1.3 การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามลักษณะของดัชนีการหักเห สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเห คือ

2.2.1.3.1 Step Index Optic Fiber (SI-fiber) การเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหระหว่างคอร์ กับแคลดดิง เป็นลักษณะขั้นบันได (Step) จึงเรียกว่า Step Index Optic Fiber

2.2.1.3.2 Graded Index Optic Fiber (GI-fiber) เป็นเส้นใยนำแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหระหว่างคอร์ กับแคลดดิง ค่อยๆลดลงทีละน้อยต่างกับ Step Index Optic Fiber จึงเรียกว่า Graded Index Optic Fiber

SM fiber นั้นจัดอยู่ในพวกของ SI fiber เหมือนกัน แต่ทว่าเนื่องจากจุดประสงค์ต้องการให้เป็น Single Mode จึงทำให้อัตราส่วนผลต่างของค่าดัชนีการหักเหของคอร์ และแคลดดิง มีค่าน้อยมาก จึงแบ่งชนิดแยกออกมาต่างหาก ดังนั้นในกรณีที่เรียกว่า SI fiber นั้น โดยทั่วไปจะหมายถึง Multi Mode Optic Fiber ที่มีผลต่างของดัชนีการหักเหเปลี่ยนแปลงเป็นขั้นบันได

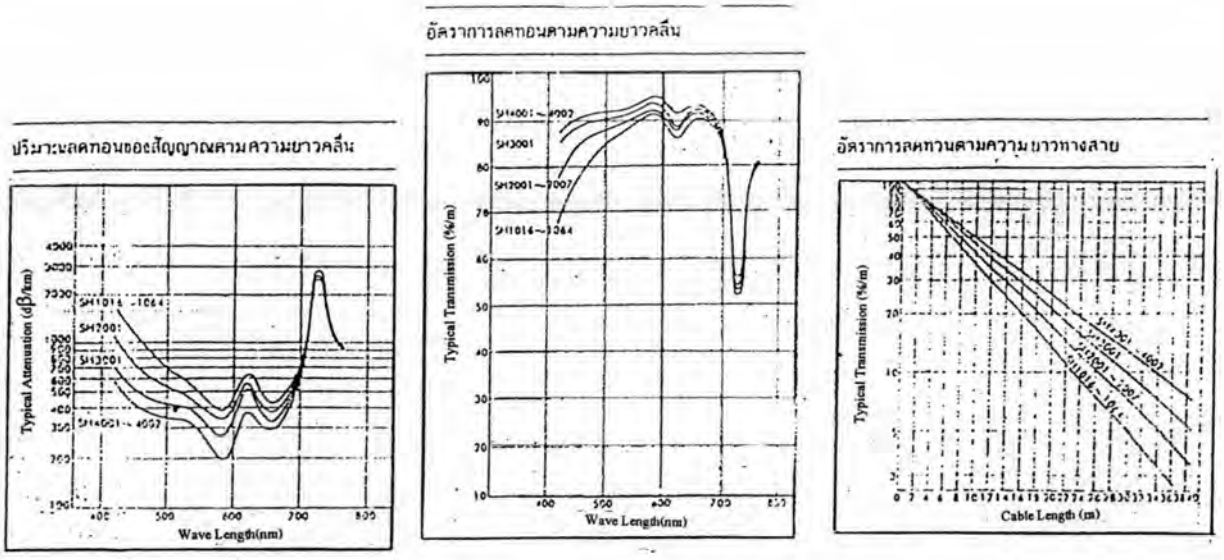


รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงในคอร์ของเส้นใยนำแสงแต่ละชนิด

ในงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยนำแสงชนิด Plastic Optic Fiber ของ โมโตโรลา รุ่น SH4001 โดยแกนนำแสงของ SH4001 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร และหุ้มด้วยท่อดำ ซึ่งทำจากสารโพลิเอธิลีน จึงสามารถทนต่อสารเคมีและแรงดึงต่างๆได้เป็นอย่างดี และยังป้องกันแสงภายนอกเข้าไปรบกวนสัญญาณภายในแกนได้ด้วย คุณสมบัติของเส้นใยนำแสงรุ่น SH4001 แสดงดังตารางที่ 2.2 และ รูปที่ 2.11

รหัส	จำนวนแกน	ขนาดϕของแกน	ขนาดϕของท่อดำ	อัตราลดทอน (dB/m)	Fiber NA	Tensile Strength(kg.)
SH4001	1	1.0 mm.	2.2mm.±0.7	≤ 0.2	0.5	0.7

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเส้นใยพลาสติกนำแสงของโมโตโรลารุ่น SH4001



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.11 คุณสมบัติต่างๆของเส้นใยพลาสติกนำแสงรุ่น SH4001

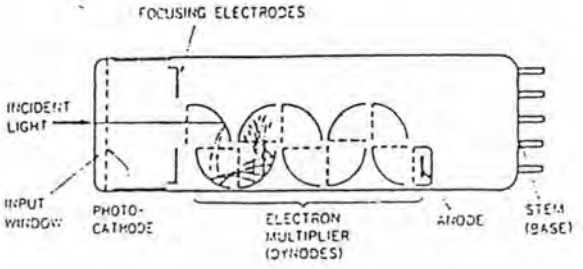
ก) ปริมาณลดทอนสัญญาณตามความยาวคลื่น

ข) อัตราการลดทอนตามยาวคลื่น

ค) อัตราการลดทอนความยาวตามสาย

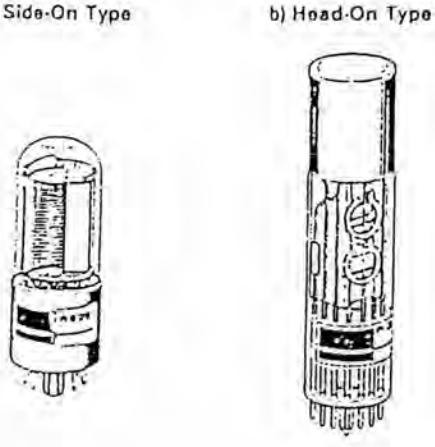
2.2.2 หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier Tubes ; PMT)

หลอดทวีคูณแสง คือ อุปกรณ์ไวแสง (Photosensitive Device) ชนิดหนึ่ง ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสงและเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ประกอบด้วย โฟโตแคโทด (photocatode) โฟกัสซิงอิเล็กโทรด (focusing electrode) ตัวทวีคูณอิเล็กตรอน (Electron Multiplier) และ ตัวรวมอิเล็กตรอน (Electron Collector or Anode) ดังรูปที่ 2.12

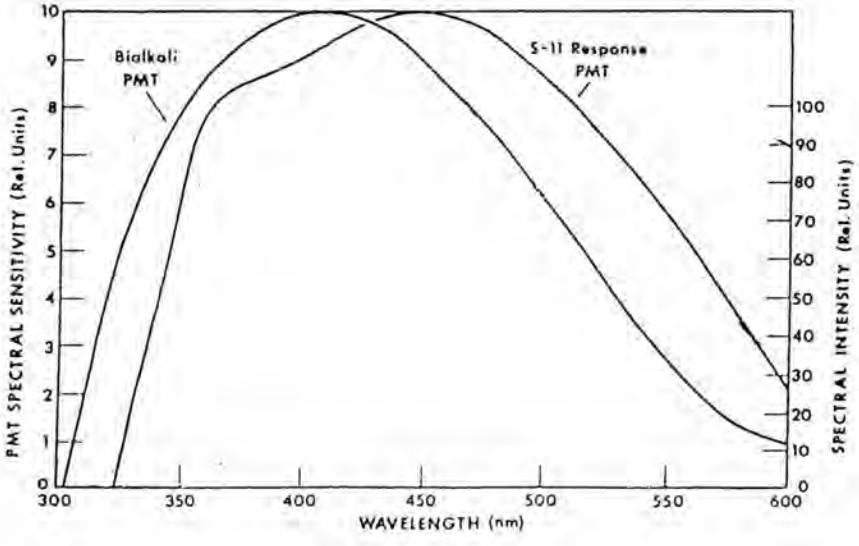


รูปที่ 2.12 ภาคตัดขวางหลอดทวีคูณแสง

หลอดทวีคูณแสงที่ใช้กันอยู่ทั่วไปสามารถจำแนกได้เป็นสองชนิดคือ ชนิด side-on และชนิด head-on สำหรับโครงสร้างของหลอดทวีคูณแสงทั้งสองชนิด ต่างมีโฟโตแคโทดทั้งคู่ แต่สำหรับ side-on จะรับแสงที่ตกกระทบผ่านทางด้านข้างของกระเปาะ ขณะที่ head-on จะรับผ่านไปยังปลายของกระเปาะแก้ว โดยทั่วไปแล้วหลอดทวีคูณแสงชนิด side-on จะราคาถูกและใช้อย่างกว้างขวางในด้าน spectrophotometer และระบบวัดทางแสงทั่วไป ส่วนใหญ่แล้ว โฟโตแคโทด จะเป็นชนิด reflection mode และตัวคูณอิเล็กตรอนจะเป็นชนิด circular cage structure สำหรับ head-on จะมี โฟโตแคโทด ชนิด transmission mode ซึ่งจะอยู่ในผิวหน้าของหน้าต่างซึ่งทำให้มีความแน่นอนของการวัดดีกว่าแบบ side-on



รูปที่ 2.13 ลักษณะภายนอกของหลอดทวีคูณแสง



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงการตอบสนองต่อแสงของหลอดทวีคูณแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ

2.2.3 สารเรืองรังสี (Scintillator)

สารเรืองรังสี หรือสารซินทิลเลเตอร์ คือสารที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคจะให้แสงออกมา เมื่อรังสีเกิดอันตรกิริยากับวัตถุแล้วจะเกิดคู่อิเล็กตรอนขึ้น และอิเล็กตรอนยังสามารถทำให้เกิด secondary ionization ได้อีก อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นสามารถทำให้อะตอมเกิดการกระตุ้น (excitation) ได้ และเมื่ออะตอมลดระดับพลังงานลงสามารถให้แสง (light quanta) ออกมาได้ สารที่มีลักษณะดังกล่าวนี้ เรียกว่า ฟอสฟอร์ หรือ ฟลูออร์ หรือ ซินทิลเลเตอร์ แสงที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นปฏิภาคกับพลังงานของรังสีที่ถูกดูดกลืน ดังนั้น สารเหล่านี้จึงสามารถนำมาใช้สำหรับทำหัววัดรังสีได้ และยังสามารถบอกความแตกต่างของพลังงานของรังสีได้อีกด้วย สารซินทิลเลเตอร์มีด้วยกันหลายชนิด เช่น NaI(Tl) , CsI(Tl) , Stilbene , Anthracence , ZnS(Ag)

Material	Specific Gravity	Wavelength of Maximum Emission(nm) λ_{MAX}	Index of Refraction at λ_{MAX}	Principal Decay Constant μs	Pulse 10-90% Rise Time μs	Total Light Yield in Photons/Mev	Absolute Scintiation Efficiency for Fast Electrons	Relative γ-Ray Pulse Height with Bialkali PM Tube
NaI(Ti)	3.67	415	1.85	0.23	0.5	38000	11.30%	1.00
CsI(Ti)	4.51	540	1.80	1	4	52000	11.9	0.49
CsI(Na)	4.51	420	1.84	0.63	4	39000	11.4	1.11
LiI(Eu)	4.08	470	1.96	1.4	-	11000	2.8	0.23
BGO	7.13	505	2.15	0.3	0.8	8200	2.1	0.13
BaF_2 slow component	4.89	310	1.49	0.62	3	10000	4.5	0.13
BaF_2 fast component	4.89	220		0.6	-	-	-	0.03
ZnS(Ag) (polycrystalline	4.09	450	2.36	0.2	-	-	-	1.30b
CaF_2 (Eu)	3.19	435	1.44	0.9	4	24000	6.7	0.78
CsF	4.11	390	1.48	0.004	-	-		0.05
Li glass	2.5	395	1.55	0.075	-	-	1.5	0.10
For comparison, a typical organic (plastic) scintillator :								
NE 102A	1.03	423	1.58	0.002	-	10000	3.00	0.25

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงคุณสมบัติของสารซินทิลเลเตอร์ชนิดต่างๆ

สารเรืองรังสีที่เหมาะต่อการนำมาใช้ในการพัฒนาหัววัดเส้นใยนำแสงเคลือบปลายด้วยสารเรืองรังสีเอกซ์ควรมีคุณสมบัติดังนี้

2.2.3.1 ความยาวคลื่นแสงที่เกิดขึ้นจะต้องเหมาะสมกับเส้นใยนำแสงและหลอดทวีคูณแสงที่ใช้

2.2.3.2 เป็นสารที่มีคุณสมบัติการนำแสงที่ดี

ในงานวิจัยนี้ใช้สารเรืองรังสีชนิด ZnS(Ag) ซึ่งจะให้ประกายแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 450 นาโนเมตรออกมาหลังจากถูกกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ซึ่งเหมาะสมกับเส้นใยพลาสติกนำแสง และหลอดทวีคูณแสงที่ใช้ซึ่งมีการตอบสนองต่อแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร