

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ชนิด และต้นกำเนิดนิวตรอน

2.1.1 ชนิดของนิวตรอน

อนุภาคนิวตรอนสามารถแบ่งตามระดับพลังงานเป็น 3 ช่วงกว้าง ๆ ได้ดังนี้

2.1.1.1 นิวตรอนช้าหรือเทอร์มัลนิวตรอน (slow or thermal neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานน้อยกว่า 0.5 eV นิวตรอนส่วนใหญ่จะมีพลังงาน 0.025 eV ที่ความเร็ว 2200 เมตร/วินาที ณ อุณหภูมิห้อง

2.1.1.2 อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (epithermal or intermediate neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานระหว่าง 0.5 eV และ 10 KeV

2.1.1.3 นิวตรอนเร็ว (fast neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานตั้งแต่ 10 KeV ถึง 20 MeV หรือสูงกว่า

2.1.2 ต้นกำเนิดนิวตรอน

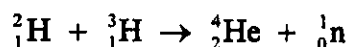
ต้นกำเนิดนิวตรอนที่สำคัญ ซึ่งสามารถผลิตนิวตรอนออกมาใช้ประโยชน์ได้แก่

2.1.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (nuclear reactor) เป็นต้นกำเนิดที่ให้นิวตรอนออกมาเนื่องจากการแตกตัว (fission) ของไอโซโทปที่สามารถแตกตัวได้ เช่น U-235, U-238, Pu-239 ให้นิวตรอนฟลักซ์ประมาณ $10^{10} - 10^{14}$ neutron/cm²/sec

2.1.2.2 เครื่องกำเนิดนิวตรอน (neutron generator) นิวตรอนจากต้นกำเนิดชนิดนี้เกิดจากการเร่งอนุภาคโปรตอน หรือดิวเทรียมเข้าชนนิวเคลียสของธาตุเบา ที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่



นิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยานี้มีพลังงานประมาณ 3 MeV

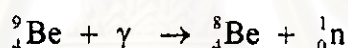


นิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยานี้มีพลังงานประมาณ 14 MeV

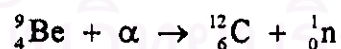
ต้นกำเนิดชนิดนี้จะให้นิวตรอนที่มีพลังงานสูง สมำเสมอ และให้นิวตรอนฟลักซ์สูง

2.1.2.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบแตกตัวด้วยตนเอง (spontaneous fission source) เป็นต้นกำเนิดที่ให้นิวตรอนออกมาจากการแตกตัวด้วยตนเองของธาตุหนักบางชนิด ได้แก่ Cf-252 มีข้อดี คือ ขนาดเล็ก นิวตรอนฟลักซ์สูง แต่มีข้อเสีย คือ ราคาแพง และมีอายุการใช้งานสั้น

2.1.2.4 ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยา (γ, n) นิวตรอนที่ได้เกิดจากการยิงรังสีแกมมาจากการสลายตัวของไอโซโทปริงส์ของธาตุ เช่น Na-24, Sb-124 เข้าไปยังนิวเคลียสธาตุเบา เช่น B, F, C, Be จะให้นิวตรอนออกมาพลังงานประมาณ 0.8 MeV และ 24 MeV ตามลำดับ ดังสมการ



2.1.2.5 ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยา (α, n) นิวตรอนที่ได้เกิดจากการยิงอนุภาคอัลฟาจากการสลายตัวของไอโซโทปริงส์ของธาตุหนัก เช่น Po-210, Ra-226, Am-241, Pu-238, Pu-239 เข้าไปยังนิวเคลียสของธาตุเบา เช่น B, F, C, Be ดังสมการ



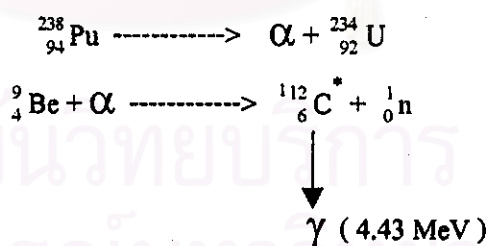
พลังงานของนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้มีค่าระหว่าง 1-13 MeV โดยมีพลังงานเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4 - 5 MeV

ต้นกำเนิดที่ได้จากปฏิกิริยา (γ, n), (α, n) มีข้อดีคือราคาถูก เคลื่อนย้ายสะดวก แต่มีข้อเสียคือ อัตราการให้นิวตรอนต่ำ

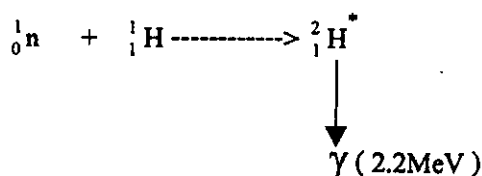
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติบางประการของต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดต่าง ๆ

ต้นกำเนิดนิวตรอน	ปฏิกิริยา	ครึ่งชีวิต	ปริมาณนิวตรอนที่ออกมา (นิวตรอน/วินาที/คูรี)	รังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมา (mr/hr/Ci-m)
$^{124}\text{Sb} / \text{Be}$	(γ, n)	60วัน	1.6×10^6	1000
$^{210}\text{Po} / \text{Be}$	(α, n)	138วัน	2.4×10^6	0.12
$^{226}\text{Ra} / \text{Be}$	(α, n)	1620ปี	1.3×10^7	780
$^{241}\text{Am} / \text{Be}$	(α, n)	458 ปี	2.2×10^6	10
$^{238}\text{Pu} / \text{Be}$	(α, n)	87.4 ปี	2.2×10^6	0.01
$^{239}\text{Pu} / \text{Be}$	(α, n)	2.1 ปี	1.6×10^6	850

ในงานวิจัยนี้ใช้ ต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดพลูโตเนียม-238 / เบอริลเลียม ($^{238}\text{Pu} / \text{Be}$) ความแรง 5 คูรี รูปทรงกระบอก มีครึ่งชีวิต 87.4 ปี (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) ^{238}Pu สลายตัวตามธรรมชาติ ให้รังสีอัลฟาออกมาพลังงาน 5.50 MeV (72%) และ 5.46 MeV (28%) รังสีอัลฟาจะทำปฏิกิริยากับธาตุเบอริลเลียมทำให้นิวตรอนออกมามีจำนวน 2.2×10^6 นิวตรอน / วินาที / คูรี พลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนประมาณ 4 - 5 MeV และมีรังสีแกมมาเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา (α, n) ดังสมการ



นอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดรังสีแกมมาขึ้นอีกส่วนหนึ่งจากปฏิกิริยาระหว่าง เทอร์มัลนิวตรอนกับน้ำในถังบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอน ดังแสดงในปฏิกิริยาดังนี้



2.2 การลดพลังงานของนิวตรอน

นิวตรอนที่เกิดจากต้นกำเนิดนิวตรอน $^{238}\text{Pu} / \text{Be}$ เป็นนิวตรอนเร็วพลังงานสูง เมื่อเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสของไฮโดรเจนในน้ำแบบยืดหยุ่น ในการชนแต่ละครั้งนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานให้กับนิวเคลียสที่ถูกชนจนในที่สุดนิวตรอนมีพลังงานเฉลี่ยลดลงกลายเป็นเทอร์มัลนิวตรอน กระบวนการนี้เรียกว่า เทอร์มัลไลเซชัน (thermalization)

2.3 เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์

เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ หมายถึง จำนวนเทอร์มัลนิวตรอนที่ตกกระทบบนพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตรในเวลา 1 วินาที มีหน่วยเป็น นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

$$\phi = n(V)V$$

ϕ = ฟลักซ์ มีหน่วยเป็น นิวตรอน ต่อ ตารางเซนติเมตร ต่อ วินาที

$n(V)$ = ความหนาแน่นนิวตรอนที่มีความเร็ว V มีหน่วยเป็น นิวตรอน ต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร

V = ความเร็วของนิวตรอน มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

ภาคตัดขวางจุดภาคของการดูดกลืน (σ_a) ในช่วงเทอร์มัลนิวตรอนของธาตุต่าง ๆ จะเป็นปฏิภาคกลับกับรากที่สองของพลังงานและความเร็วของนิวตรอน

$$\sigma_a(E) \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$$

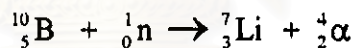
$$\sigma_a(V) \propto \frac{1}{V}$$

2.4 การวัดนิวตรอน (Neutron detection)

เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า การวัดอนุภาคนิวตรอนจึงไม่สามารถทำได้โดยตรงจากการทำให้ตัวกลางแตกตัวเป็นไอออน แต่จะวัดแบบทางอ้อมจากอันตรกิริยาของนิวตรอน ดังนี้

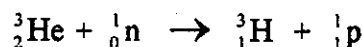
2.4.1 ใช้ผลการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ของนิวตรอน (neutron induced nuclear reaction) โดยให้นิวตรอนทำปฏิกิริยากับสารอื่น แล้วให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าขึ้น จากนั้นจึงวัดประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเกิดไอออไนเซชัน (ionization) ในหัววัด ทำให้สามารถเทียบหาปริมาณนิวตรอนได้ ดังเช่น ปฏิกิริยา $^{10}_5\text{B}(n,\alpha)^7_3\text{Li}$, $^6_3\text{Li}(n,\alpha)^4_2\text{He}$ หรือ $^{14}_7\text{N}(n,p)^{14}_6\text{C}$ หัววัดนิวตรอนที่ใช้หลักการนี้ ได้แก่ BF_3 -detector, ^3H -detector หรือ Scintillation detector

BF_3 - Detector ใช้ปฏิกิริยา



หัววัดนิวตรอนชนิดนี้ใช้สำหรับวัดเทอร์มัลนิวตรอน ส่วนนิวตรอนเร็วจะใช้พาราฟินหุ้มหัววัด เพื่อเปลี่ยนนิวตรอนเร็วให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอนเสียก่อน เมื่อเทอร์มัลนิวตรอนผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับหัววัดที่มีสารประกอบลิเทียมหรือโบรอน จะเกิดรังสีอัลฟา อนุภาคเหล่านี้ทำให้เกิดการไอออไนเซชันขึ้นภายในหัววัดทำให้สามารถวัดจำนวนนิวตรอนได้ หัววัดนิวตรอนชนิดนี้ มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดใหญ่ว่าจะทำให้ การจัด geometry ค่อนข้างยุ่งยาก

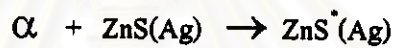
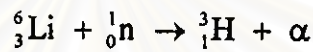
^3He -Detector ใช้ปฏิกิริยา



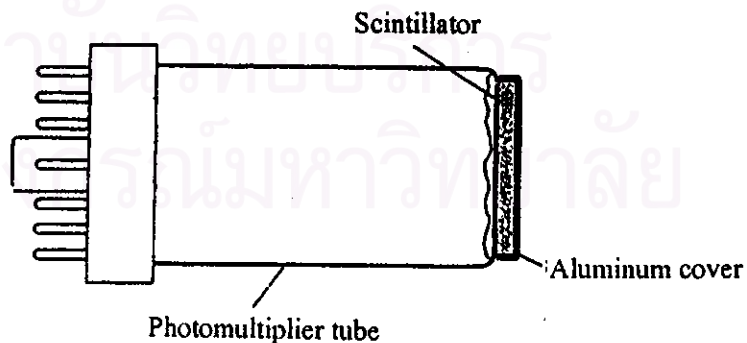
หัววัดนิวตรอนชนิดนี้ใช้สำหรับวัดเทอร์มัลนิวตรอน เมื่อนิวตรอนเข้าทำปฏิกิริยากับฮีเลียม จะเกิดอนุภาคโปรตอน โดยอนุภาคโปรตอนที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดไอออไนเซชันขึ้นภายในหัววัด ทำให้สามารถวัดจำนวนนิวตรอนได้ หัววัดนิวตรอนชนิดนี้มีข้อจำกัดในเรื่อง ขนาดของหัววัดที่มี

ขนาดใหญ่ และวัสดุที่ใช้ทำจะอยู่ในรูปของก๊าซเท่านั้น เนื่องจาก ^3He เป็นก๊าซเฉื่อย จึงไม่สามารถทำให้อยู่ในรูปสารประกอบที่เป็นของแข็งได้

Scintillation-Detector อาจใช้ปฏิกิริยาได้หลายแบบขึ้นอยู่กับสารที่ใช้เป็นฉินทิลเลเตอร์ ส่วนใหญ่นิยมใช้สารประกอบของโบรอนหรือลิเทียมเป็นตัวทำปฏิกิริยากับนิวตรอนแล้วให้อนุภาคที่มีประจุ ได้แก่ รังสีอัลฟา จากนั้นใช้สารเรืองรังสีเพื่อเกิดปฏิกิริยากับอนุภาคที่มีประจุเหล่านั้น แล้วจะให้แสงออกมา ได้แก่ สารผสมของลิเทียมไอโอไดด์ (LiI) กับ ยูโรเพียม (Eu), ลิเทียม-ฟลูออไรด์ (LiF) กับ สังกะสีซัลไฟด์ (ZnS(Ag)) เป็นต้น

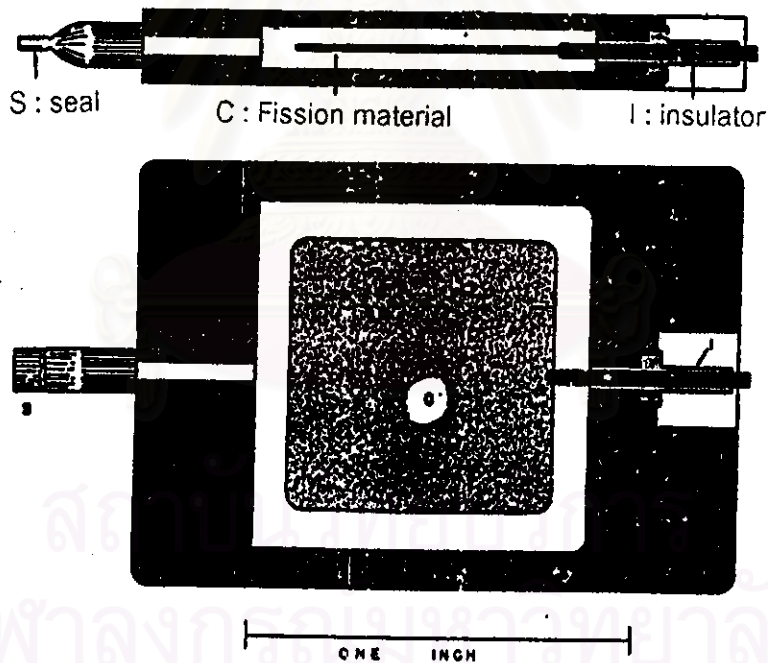


แสงที่เกิดขึ้นจะถูกส่งต่อไปยังหลอดทวีคูณแสง ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้อยู่ในรูปสัญญาณทางไฟฟ้า เพื่อวัดจำนวนนิวตรอนต่อไป หัววัดฉินทิลเลเตอร์นี้ใช้สำหรับวัดเทอร์มัลนิวตรอน เป็นหัววัดที่มีประสิทธิภาพสูงและมีกระบวนการในการวัดน้อย ทำให้ใช้เวลารวดเร็วในการวัด



รูปที่ 2.1 แสดงหัววัดนิวตรอนชนิดฉินทิลเลชัน^[2]

2.4.2 ใช้ผลการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันโดยนิวตรอน เมื่ออนุภาคนิวตรอนชนสารบางชนิด เช่น ยูเรเนียม - 235 , ยูเรเนียม - 238 หรือ ทอเรียม - 232 จะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว จึงใช้สารเหล่านี้เป็นหัววัดนิวตรอนแล้ววัดปริมาณนิวตรอนจากการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ เรียกว่า Fission detector หัววัดที่นิยมใช้ เช่น fission chambers ซึ่งแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับสารที่ใช้ได้แก่ หัววัดชนิด thermal neutron fission chambers จะใช้สาร ยูเรเนียม - 235, เนปทูเนียม - 234 หรือ พลูโตเนียม - 239 เคลือบอยู่ที่แผ่นโลหะภายในหัววัด ซึ่งบรรจุ oxygen - free argon ที่ความดันสูง โดยอาศัยการเกิดไอออไนซ์เซชันแล้วได้สัญญาณพัลส์ขึ้น ทำให้สามารถวัดจำนวนนิวตรอนได้ ส่วนหัววัดชนิด fast neutron fission chambers ใช้ โบรอน-10 หรือ แคลเซียม เป็นตัวดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอน แล้วปล่อยนิวตรอนเร็วไปทำปฏิกิริยากับ ยูเรเนียม - 238 หรือใช้ ทอเรียม - 232 ทำให้เกิดการแตกตัว หัววัด fission chamber สามารถใช้ในการวัด thermal neutron flux ได้ด้วย แต่มี Resolution ไม่ดีเท่าที่ควร และเป็นที่ยอมรับน้อยกว่าแบบวิธี Foils Activation



รูปที่ 2.2 แสดงหัววัดนิวตรอนชนิด fission chamber^[2]

2.4.3 ใช้ผลการกระเจิงของนิวตรอน (neutron scattering) แล้วทำให้เกิดอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าขึ้น วิธีนี้มักใช้กับการวัดนิวตรอนเร็ว หัววัดที่ใช้หลักการนี้มีลักษณะเป็น chamber ภายในบรรจุก๊าซที่มีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบ เช่น มีเทน นิวตรอนเร็วจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน

ภายใน chamber เป็นแบบการกระเจิงแบบชิดหุ่่น เกิดอนุภาคโปรตอนหรืออิเล็กตรอน อนุภาคเหล่านี้ทำให้เกิดไอออนเซชัน หรือเอกไซเซชันขึ้นทำให้สามารถวัดจำนวนนิวตรอนได้

2.4.4 ใช้ผลการอาบนิวตรอนแล้วทำให้เกิดสารกัมมันตรังสี (neutron induced foil activation) เมื่อนำแผ่นฟอยล์ไปอาบรังสีนิวตรอน จะทำให้เกิดสารกัมมันตภาพรังสีขึ้น จากการวัดกัมมันตภาพรังสีที่เกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีนั้น ก็สามารถคำนวณหาปริมาณนิวตรอนได้ เช่น $^{115}_{49}\text{In}(n,\gamma)^{116}_{49}\text{In}$, $^{197}_{79}\text{Au}(n,\gamma)^{198}_{79}\text{Au}$

2.4.5 การนับจำนวนรอย (track) บนฟิล์ม เมื่อนิวตรอนวิ่งไปชนสารที่เคลือบบนผิวฟิล์ม เช่น สารลิเทียมเตตระโบเรต (LiB_4O_7) จะเกิดอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เมื่ออนุภาคนั้นไปกระทบแผ่นฟิล์มจะทำลายโครงสร้างโมเลกุลบนแผ่นฟิล์ม ทำให้เกิดรอยหรือหลุมเล็ก ๆ บนฟิล์มนั้น ถ้านำฟิล์มนั้นไปกัดขยายรอยด้วยสารละลายที่เหมาะสมแล้วส่งด้วยกล้องจุลทรรศน์ ทำให้สามารถอ่านจำนวนรอยที่อนุภาคนิวเคลียร์ทำอันตรกิริยาได้ เรียกวิธีการนี้ว่า Track – etch detection

2.5 หัววัดนิวตรอนชนิดท่อนำแสงเคลือบปลายด้วยซินทิลเลเตอร์

Chizuo Mori^[9] นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ได้พัฒนาวิธีการวัดการกระจายของเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ โดยใช้เส้นใยพลาสติกนำแสง (Optical plastic fiber) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ยาว 2 เมตร ที่ปลายของเส้นใยนำแสงเคลือบด้วยสารซินทิลเลเตอร์ที่เป็นส่วนผสมของ $\text{ZnS}(\text{Ag})$, LiF และสารยึดเหนี่ยวในอัตราส่วน 1 : 1 : 2 หนา 0.3 มิลลิเมตร ส่วนที่ปลายอีกด้านหนึ่งเชื่อมต่อเข้ากับหลอดทวีคูณแสงแล้วทำการวัดการกระจายของเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ใน Critical assembly หรือ Research reactor ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของเส้นใยนำแสง เท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร/วินาที โดยทำการเปรียบเทียบค่าการกระจายของเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ที่วัดได้กับวิธี Gold Wire Activation สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการเดียวกันในการพัฒนาหัววัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์

โดยหัววัดนิวตรอนที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัย ประกอบด้วย 3 ส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. สารซินทิลเลเตอร์ (scintillator)
2. เส้นใยนำแสง ชนิดท่อนำแสง (Liquid Light Guide)
3. หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier Tube)

2.5.1 สารซินทิลเลเตอร์

สารซินทิลเลเตอร์ที่จะนำมาใช้ ในการพัฒนาหัววัดเทอร์มัลนิวตรอน ควรมีคุณสมบัติดังนี้

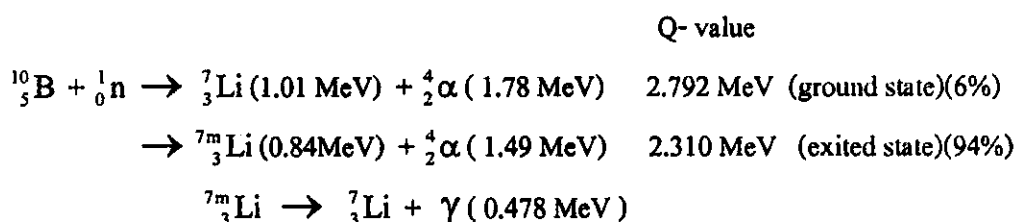
- สามารถทำอันตรกิริยากับเทอร์มัลนิวตรอน แล้วให้อนุภาคที่มีประจุและแสง ได้ดี ถึงแม้กับต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีความเข้มข้นนิวตรอนต่ำ
- แสงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการซินทิลเลชัน จะต้องเป็นสัดส่วนกับพลังงานของ นิวตรอนในช่วงกว้าง
- ความยาวคลื่นของแสงที่เกิดขึ้นจะต้องเหมาะกับท่อนำแสง และหลอดทวิคูณ แสง
- เวลาในการสลายตัวของสารเกิดแสง (decay time) สั้น เพื่อกำหนดพัลส์ได้ รวดเร็ว
- เป็นสารที่มีคุณสมบัติการนำแสงที่ดี
- มีดัชนีหักเหของแสงใกล้เคียงกับแก้ว (≈ 1.5) ทำให้การเชื่อมต่อ (coupling) แสงที่เกิดจาก ซินทิลเลเตอร์ไปยังหลอดทวิคูณแสง มีประสิทธิภาพ

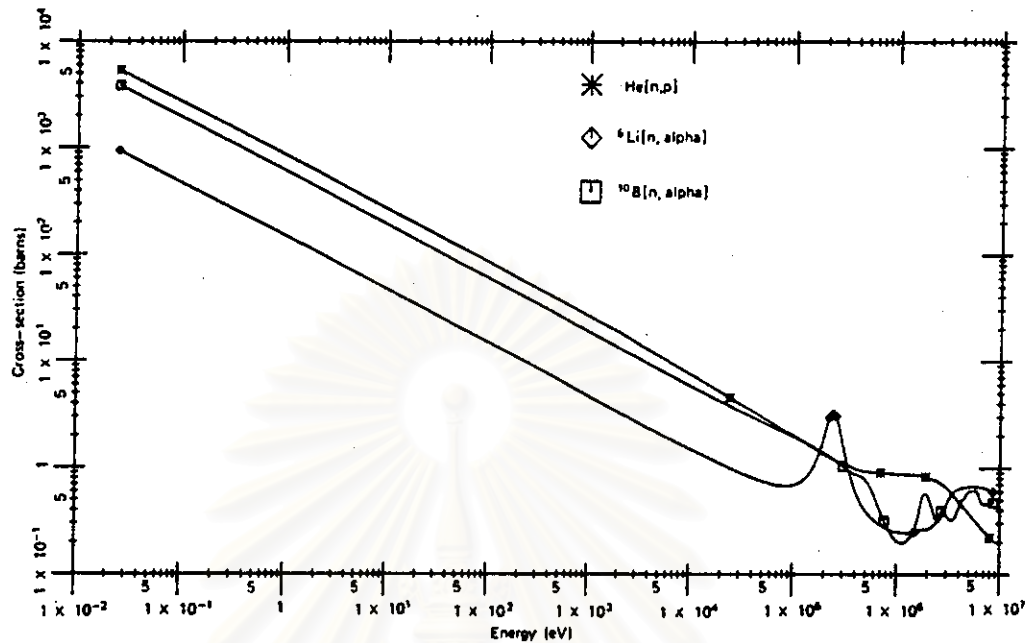
สารซินทิลเลเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย สารดูคกตินนิวตรอน สารเรืองรังสี สารยึดเหนี่ยว และตัวทำละลาย

2.5.1.1 สารดูคกตินนิวตรอน เป็นสารที่ทำปฏิกิริยากับเทอร์มัลนิวตรอน แล้วให้ รังสีอัลฟา ที่มีอนิใช้จะเป็นสารประกอบที่มีโบรอน -10 และลิเทียม -6 เนื่องจาก มีค่าภาคตัดขวาง ของการดูคกตินนิวตรอนสูง เช่น สารลิเทียมเมตาบอเรต (LiBO_2), สารลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF)

ตัวอย่างปฏิกิริยา (n, α) ของเทอร์มัลนิวตรอนกับสารดูคกตินนิวตรอนชนิดต่าง ๆ

ก. ปฏิกิริยา $^{10}\text{B}(n, \alpha)$

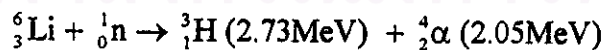




รูปที่ 2.3 กราฟแสดงภาคตัดขวางของสารดูดกลืนนิวตรอนชนิดต่าง ๆ
ที่แปรผันตามพลังงานของนิวตรอน^[3]

จากรูปที่ 2.3 ค่าภาคตัดขวางของเทอร์มัลนิวตรอน สำหรับปฏิกิริยา $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ มีค่าเท่ากับ 3,840 บาร์น ค่าภาคตัดขวางจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อพลังงานของนิวตรอนเพิ่มขึ้นและเป็นสัดส่วนเท่ากับ $\frac{1}{V}$

ข. ปฏิกิริยา $^3_3\text{Li}(n,\alpha)$



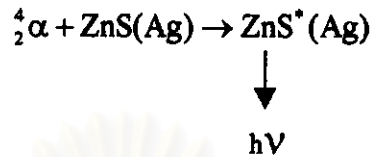
Q-value

4.78 MeV

เป็นปฏิกิริยาสำหรับการวัดเทอร์มัลนิวตรอน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสถานะพื้นเท่านั้น ค่าภาคตัดขวางของเทอร์มัลนิวตรอน สำหรับปฏิกิริยา $^6_3\text{Li}(n,\alpha)$ มีค่าเท่ากับ 940 บาร์น ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าปฏิกิริยา $^{10}_5\text{B}(n,\alpha)$ ยกเว้นช่วงเรโซแนนซ์ (>100 keV) แต่จะมี Q-value สูงกว่า

2.5.1.2 สารเรืองรังสี เป็นสารที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคที่มีประจุจะให้แสงออกมา สารเรืองรังสีที่นิยมใช้คือ สังกะสีซัลไฟด์ (เงิน) มีสูตรโมเลกุลเป็น $\text{ZnS}(\text{Ag})$ ปลดปล่อย

แสงในช่วงแสงสีน้ำเงินออกมาซึ่ง มีความยาวคลื่นประมาณ 450 นาโนเมตร ภายหลังจากถูก กระตุ้นด้วยอนุภาคอัลฟาจาก ทิเทียม - 6 หรือ โบรอน - 10 จะ ได้ปฏิกิริยาดังนี้



ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงความยาวคลื่นแสงที่เกิดขึ้นจากสารเรืองรังสีชนิดต่าง ๆ⁽³⁾

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 Scintillation Efficiency for Fast Electrons	Relative γ -Ray Pulse Height with Bialkali PM Tube
Nal(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	0.5	38000	11.3%	1.00
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	1.0	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	0.30	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	—	0.0006	—	—	—	0.03 ^a
ZnS(Ag) (polycrystalline)	4.09	450	2.36	0.2	—	—	—	1.30 ^b
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 ^c	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	3.0	0.25

^aUsing UV-sensitive PM tube.

^bFor alpha particles.

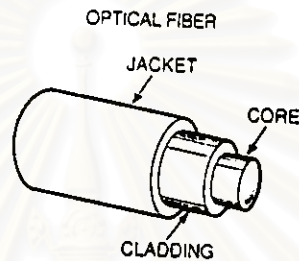
^cProperties vary with exact formulation. Also see Table 15-1.

2.5.1.3 สารยึดเหนี่ยว (binder) ใช้เพื่อทำให้สารดูดกลืนนิวตรอนและสารเรืองรังสียึดเกาะกันอย่างเหนียวแน่น ในงานวิจัยนี้ใช้ กาวดูโร (duro) ซึ่งเป็นกาวชนิดหนึ่งมีความแข็งแรงทนทาน ทนความร้อน ไม่ละลายน้ำ ค่อนข้างใส แห้งสนิทภายใน 2-3 ชั่วโมง และถ้าทิ้งไว้นานก็จะยิ่งแข็งแรง ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณกาวที่ใช้ กาวชนิดนี้เป็นกาวสังเคราะห์ (synthetic glue) มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ อะซิโตน (acetone) และ ไอโซบิวทิลอะซิเตต (isobutyl acetate) โดยใช้ปริมาณสารยึดเหนี่ยวด้วยปริมาณน้อยที่สุด เพื่อจะไม่ไปกั้นขวางอนุภาคและแสง ตามลำดับ

2.5.1.4 ตัวทำละลาย ใช้เพื่อทำให้สารยึดเหนี่ยวมีความหนืดลดลง และทำให้สารซินทิลเลเตอร์สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน สารละลายแข็งตัวช้าลงทำให้การปฏิบัติงานสะดวกขึ้น ในงานวิจัยนี้ใช้ ทินเนอร์ชนิดเกรด AAA เป็นตัวทำละลาย

2.5.2 เส้นใยนำแสง (fiber optic)

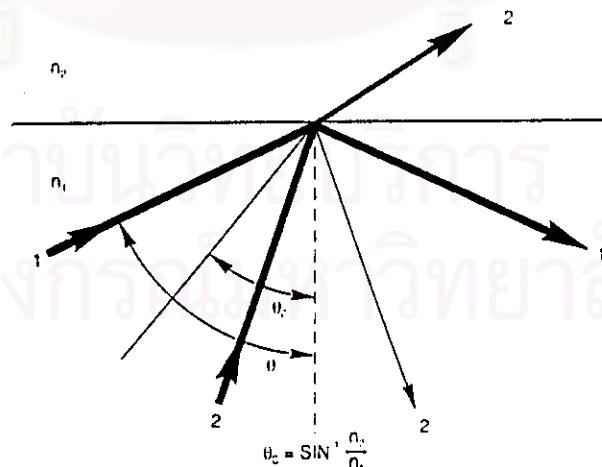
เส้นใยนำแสงมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นแกนกลาง เรียกว่า คอร์ (core) และส่วนที่ทำหน้าที่ห่อหุ้มคอร์ เรียกว่า แคลดดิ้ง (cladding) โดยคอร์จะทำจากวัสดุที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า แคลดดิ้ง เพื่อทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดของแสงตรงรอยต่อระหว่าง คอร์ กับ แคลดดิ้ง นอกจากนี้คอร์และแคลดดิ้งแล้ว ยังมีส่วนที่ใช้ห่อหุ้มภายนอก เพื่อป้องกันการชำรุดที่จะเกิดกับคอร์ และแคลดดิ้ง และยังเป็นกรเพิ่มความแข็งแรงให้กับเส้นใยนำแสงอีกด้วย



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเส้นใยนำแสง

การสะท้อนและการหักเหของแสงภายในเส้นใยนำแสง

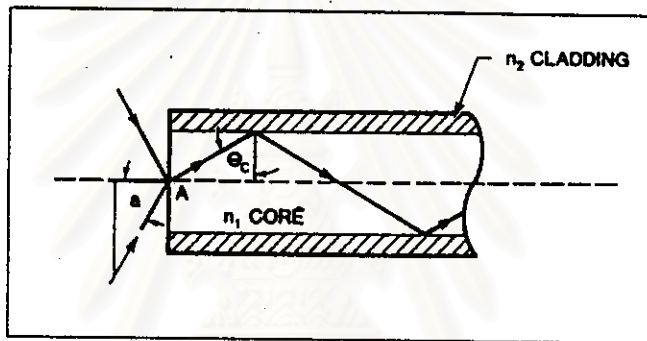
แสงที่ถูกส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสงจะเคลื่อนที่ในเส้นใยนำแสง โดยใช้หลักการสะท้อนกลับหมดตรงรอยต่อระหว่าง คอร์ กับแคลดดิ้ง



รูปที่ 2.5 แสดง ถ้าแสง 1 จะตกกระทบที่มุม $> \theta_c$ จะเกิดการสะท้อนกลับหมด
ถ้าแสง 2 จะตกกระทบที่มุม $< \theta_c$ จะมีแสงบางส่วนหักเห และบาง
ส่วนสะท้อน^[4]

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มมุมตกกระทบให้มากขึ้นมุมหักเหก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ มุมตกกระทบที่ทำให้มุมหักเห มีค่า 90° นี้เรียกว่า มุมวิกฤติ (critical angle, θ_c) และถ้าเพิ่มมุมตกกระทบให้มากกว่ามุมวิกฤติ แสงจะไม่หักเหเข้าสู่ตัวกลางที่ 2 ที่เป็นแคดคดิง แต่จะสะท้อนกลับในตัวกลางเดิม เรียกว่า การสะท้อนกลับหมด (total internal reflection) ดังนั้นการที่จะเกิดการสะท้อนกลับหมดได้ ต้องมีเงื่อนไขดังนี้

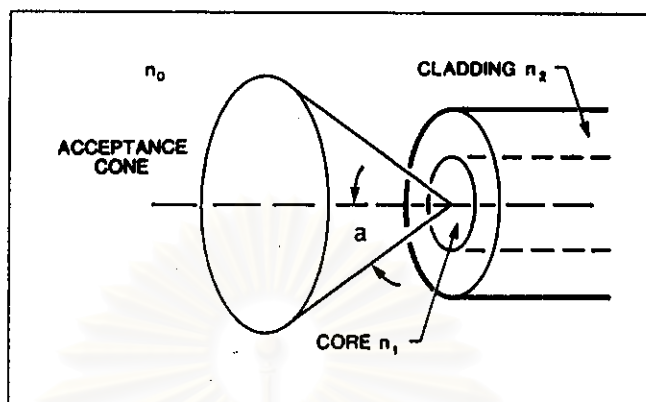
- ดัชนีหักเหของคอร์ (n_1) > ดัชนีหักเหของแคดคดิง (n_2)
- มุมตกกระทบจะต้อง เท่ากับหรือมากกว่า มุมวิกฤติ $\theta \geq \theta_c = \sin^{-1}(n_2 / n_1)$



รูปที่ 2.6 แสดงแสงที่ตกกระทบเส้นใยนำแสงภายใน acceptance cone เกิดการสะท้อนกลับหมดที่ผิวของคอร์ และแคดคดิง^[4]

มุมรองรับ (acceptance angle) ที่เส้นใยนำแสงขึ้นกับดัชนีหักเหของคอร์และแคดคดิง สามารถหาค่าได้ดังสมการ

$$\sin a = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



รูปที่ 2.7 แสดงปริมาณแสงที่สามารถผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้วได้ ภายในมุมรองรับรูปทรงกรวย (acceptance cone)

ปริมาณของแสงที่สามารถเดินทางเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ สามารถอธิบายได้จาก numerical aperture (NA) ในกรณีที่เส้นใยนำแสงวางอยู่ในอากาศ $n_0 = 1$

$$NA = \sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

ชนิดของเส้นใยนำแสง (type of fiber optic)

เส้นใยนำแสงสามารถแบ่งเป็นชนิดใหญ่ ๆ ได้ 3 ชนิด คือ

1. Fiber Bundles
2. Single Fibers
3. Liquid Light Guides

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงชนิดต่าง ๆ⁽⁴⁾

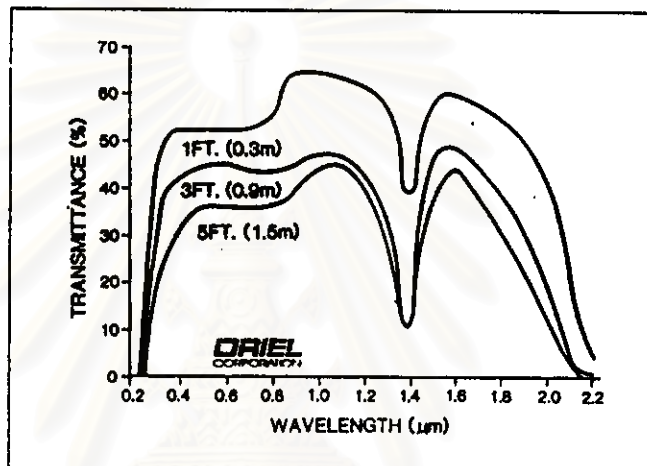
ชนิดของเส้นใยนำแสง	ช่วงความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความยาวสาย fiber (เมตร)	ประโยชน์
Glass Bundles	400-500	1.6 และ 3.2	0.61-1.83	ราคาถูก, มีมุมมองรองรับกว้าง มีรูปแบบต่างๆ ให้เลือกให้เหมาะกับงานที่ใช้ เช่น rectangular – circular bifurcated และ trifurcated
Standard Grade Fused Silica Bundle	280-2200	1.6 และ 3.2	0.61-0.92	มีการส่งผ่านได้ดีในช่วง UV
High Grade Silica Bundle	240-2200	1.6 และ 3.2	0.61-0.92	มีการส่งผ่านได้ดีในช่วง UV และ VIS มีรูปแบบให้เลือก เช่น Rectangular – circular bifurcated และ fluorescence probe
Liquid Light Guides	270-750	3 และ 5	1-200	มีมุมรองรับ และขนาดของ core ใหญ่
Uv-VIS Single Fibers	200-1000	0.2,0.4,0.6,0.8 และ 1	1-200	มีการส่งผ่านในช่วง UV-NIR สามารถใช้ประโยชน์กับ SMA connector High power handling capability
VIS-NIR Single Fibers	250-2000	0.2,0.4,0.6,0.8 และ 1	1-200	มีการส่งผ่านแสงดีมาก ใช้ประโยชน์กับ SMA connector

2.5.2.1 Fiber Bundles

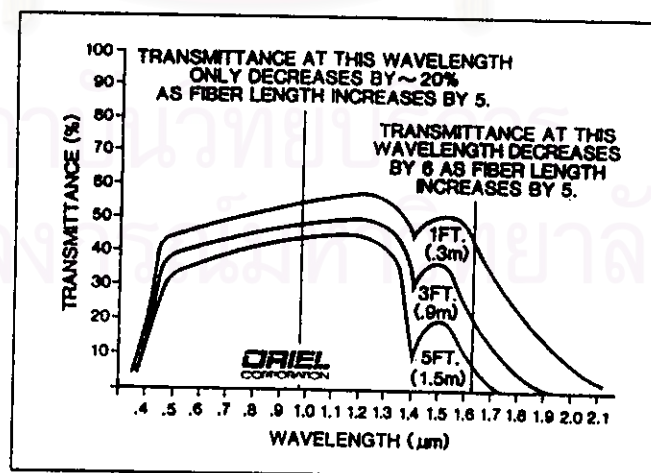
โครงสร้างของเส้นใยนำแสงชนิดนี้จะเป็นการนำเส้นใยนำแสงหลาย ๆ เส้น นำมามัดรวมกันในท่อเดียวกัน เพื่อทำให้พื้นที่หน้าตัดโต หรือมีลำแสงเข้าทางอินพุตเส้นเดียว แล้วสามารถแยกเป็นหลาย ๆ เส้นทางด้านเอาต์พุต โดยที่ทางออกของสายแต่ละเส้นสามารถแยกใช้ความยาวคลื่นที่แตกต่างกันได้ตามต้องการ

fiber bundles ที่นิยมใช้ ได้แก่ Glass Bundles , Standard Fused Silica Bundles และ High Grade Fused Silica Bundles

- Glass bundles สามารถส่งผ่านแสงได้ดีในช่วงที่ตามองเห็นและอินฟราเรด มีมุมรองรับกว้าง 68° ดังนั้นมีพื้นที่ในการรับแสงกว้าง นิยมใช้ดัดกันแดดแสงใหญ่ๆ
- Standard Grade Fused Silica Bundles มีแฉกคดโค้งเป็นสารจำพวกพอลิเมอร์ มีการส่งผ่านแสงได้ดีในช่วง UV – 1200 และ 1500 – 1900 นาโนเมตร
- High Grade Fused Silica Bundles มีแฉกคดโค้งเป็นสารจำพวกซิลิกา มีการส่งผ่านแสงในช่วงต่ำกว่า UV ได้มากกว่า Standard Grade



รูปที่ 2.8 แสดงการส่งผ่านแสงของ Fiber Bundles ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น จะมีค่าลดลงเมื่อความยาวสายเพิ่มขึ้น^[4]

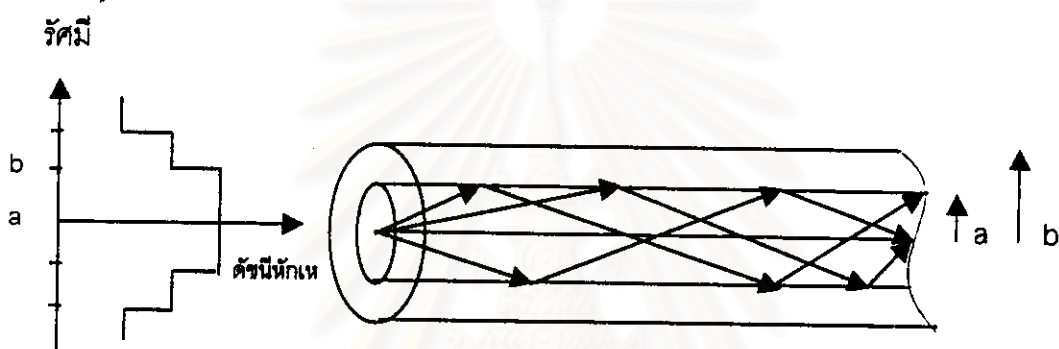


รูปที่ 2.9 การส่งผ่านแสงของ Standard Grade Fused Silica Bundles^[4]

2.5.2.2 Single Fibers

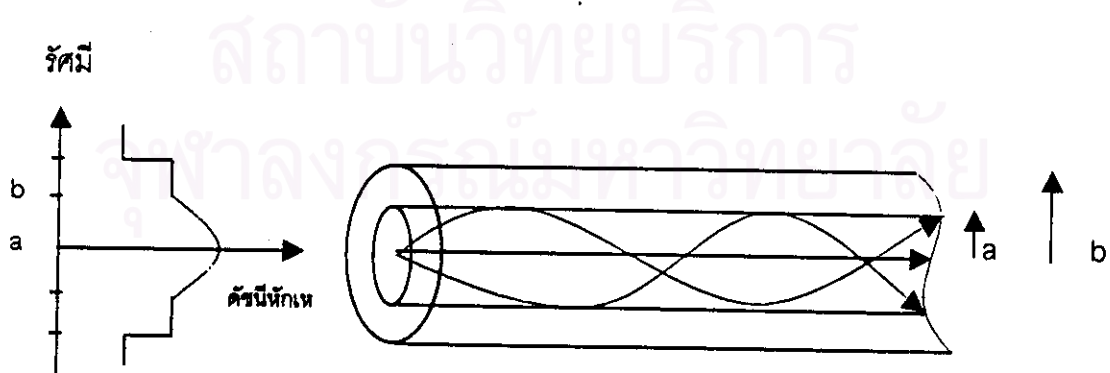
การแบ่งเส้นใยนำแสงชนิด Single Fibers มีการพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ
กรณีที่ 1 แบ่งตามการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหของคอร์ และแคลดดิ้ง ซึ่งจะแบ่ง
ออกเป็น 2 ชนิด คือ เส้นใยนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (Step index fiber) และเส้นใยนำแสงชนิด
เกรดอินเด็กซ์ (Graded index fiber)

- Step index fiber วัสดุที่ใช้เป็นคอร์และแคลดดิ้งจะมีดัชนีหักเหคงที่ แสงที่เดิน
ทางภายในคอร์จะเป็นเส้นตรง



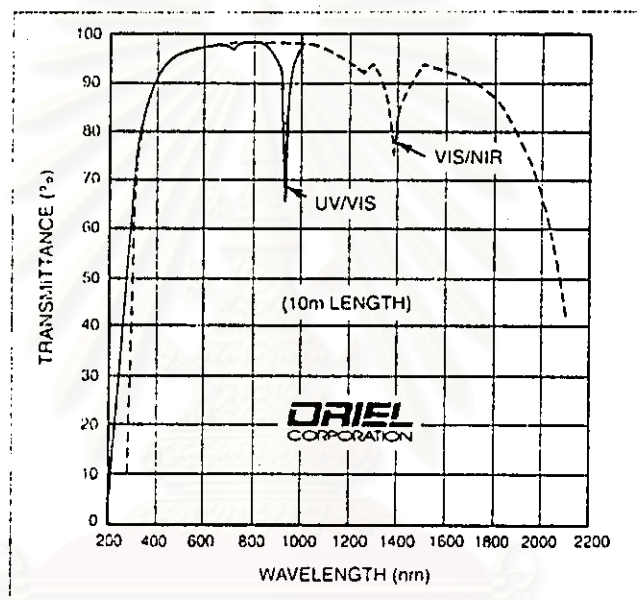
รูปที่ 2.10 แสดงทางเดินของแสงในเส้นใยนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์

สำหรับเส้นใยนำแสงชนิดเกรดอินเด็กซ์ นั้นบริเวณที่เป็นคอร์จะมีดัชนีหักเหไม่คงที่ โดย
ดัชนีหักเหจะมีค่าสูงสุดที่แกนกลางของเส้นใยนำแสงและจะมีค่าลดลง เมื่อระยะห่างจากแกนกลาง
เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหของคอร์จะมีได้หลายแบบ เช่น เป็นพาราโบลา หรือครึ่งวงกลม
ขึ้นกับการออกแบบ ส่วนในบริเวณที่เป็นแคลดดิ้งจะมีดัชนีหักเหคงที่



รูปที่ 2.11 แสดงทางเดินของแสงในเส้นใยนำแสงชนิดเกรดอินเด็กซ์

กรณีที่ 2 แบ่งตามโหมด (mode) ของแสงที่เคลื่อนที่ในเส้นใยนำแสง ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว (single mode fiber) และเส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมด (multimode fiber) ในเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียวจะยอมให้แสงมีทางเดินได้ทางเดียวเท่านั้นเคลื่อนที่ไปในเส้นใยนำแสง ซึ่งปกติจะเป็นเส้นใยนำแสงที่มีรัศมีของคอร์น้อยกว่า 5 - 10 ไมโครเมตร ส่วนในเส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมดจะยอมให้แสงเดินทางได้หลายแบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมดจะมีรัศมีของคอร์ประมาณ 200 ไมโครเมตร



รูป 2.12 แสดงการส่งผ่านแสงในช่วง UV-VIS และ VIS-NIR ของ single fiber^[4]

ในปัจจุบันเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวนิยมใช้สำหรับงานด้านสื่อสาร เส้นใยนำแสงชนิดนี้ส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรด จึงสามารถส่งข้อมูลได้ระยะไกล ๆ

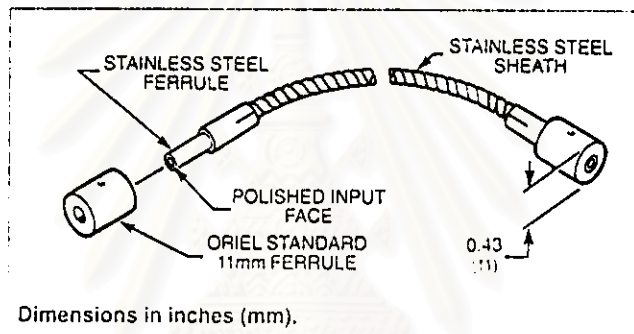
2.5.2.3 Liquid Light Guide

เป็นเส้นใยนำแสงที่สามารถส่งผ่านแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นของแสงตั้งแต่ 270 - 720 นาโนเมตร โดยสามารถส่งผ่านแสงในช่วงอุลตราไวโอเลต และแสงที่ตามองเห็น มีลักษณะคล้ายกับ fiber optic bundles ซึ่งใช้หลักการสะท้อนกลับหมดภายใน แต่จะมีการส่งผ่านและความยืดหยุ่นตัวมากกว่า fused silica bundle เมื่อมีขนาดคอร์เท่ากัน

คุณสมบัติของท่อนำแสง

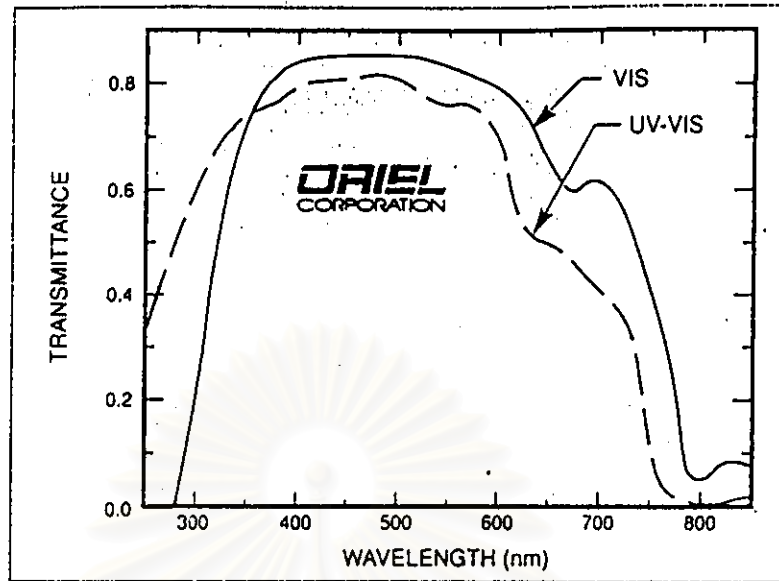
- มีการรวบรวมแสงได้ดีมาก เนื่องจากขนาดของคอร์ใหญ่, มีอัตราการสูญเสียของแสงภายในท่อนำแสงต่ำ
- มีการส่งผ่านในช่วง UV สูง
- เป็นท่อที่มีความยืดหยุ่นมาก

โครงสร้างของ Liquid Light Guide จะประกอบด้วยท่อพลาสติก ซึ่งบรรจุสารเหลวใสบริสุทธิ์ไม่มีพิษ สำหรับปลายท่อทั้งสองข้างจะปิดด้วยแก้วซิลิกา สำหรับเป็นหน้าต่างส่งประกายแสงแล้วหุ้มด้วยโลหะกันสนิมประเภทสแตนเลส ชั้นนอกสุดจะเป็น PVC



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของ Liquid Light Guide

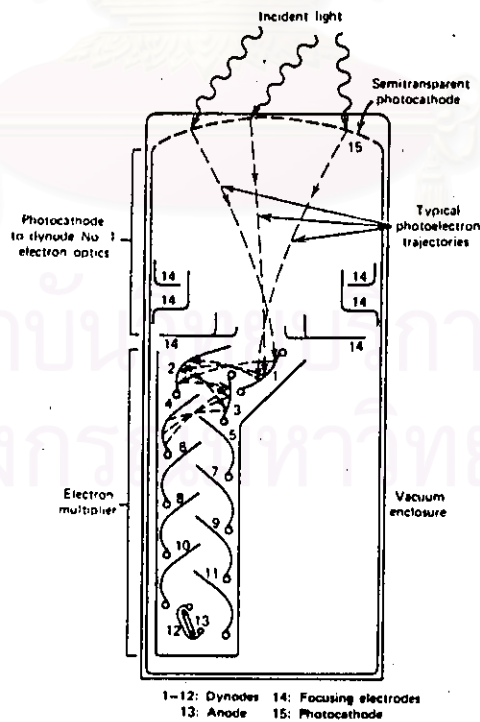
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางคอร์นำแสงที่เป็นมาตรฐานมีขนาด 3 - 5 มิลลิเมตร ส่วนความยาวของท่อนำแสงที่เป็นมาตรฐานมีขนาด 1 เมตร 1.5 เมตร และ 2 เมตร ท่อนำแสงมีมุมรองรับ 28° ค่า $N.A. = 0.47$ มีความสามารถในการรวมแสงเท่ากับ $14.4 \text{ mm}^2\text{sr}$ เมื่อใช้เส้นผ่าศูนย์กลางคอร์ 5 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับ fused silica bundles มีการรวบรวมแสงเท่ากับ $3 \text{ mm}^2\text{sr}$ เมื่อมีเส้นผ่าศูนย์กลางคอร์ 3.2 mm ส่วน glass bundles จะมีการรวมแสงเท่ากับ $7 \text{ mm}^2\text{sr}$ ที่เส้นผ่าศูนย์กลางคอร์ 3.2 mm



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงการส่งผ่าน Liquid Light Guide

2.5.3 หลอดทวีคูณแสง

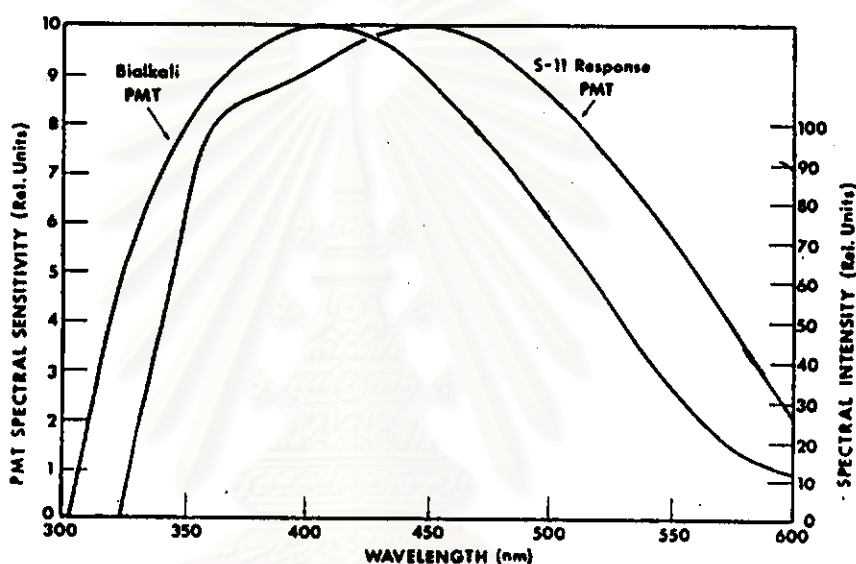
หลอดทวีคูณแสงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในหัววัดนิวตรอนที่พัฒนาขึ้นสำหรับวัดเทอร์มินัลนิวตรอนฟลักซ์ ทำหน้าที่ขยายแสงและเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสัญญาณทางไฟฟ้า



1-12: Dynodes 14: Focusing electrodes
13: Anode 15: Photocathode

รูปที่ 2.15 โครงสร้างของหลอดทวีคูณแสง^[3]

โครงสร้างภายในของหลอดทวีคูณแสงจะประกอบด้วย โฟโตคาโทด (photocathod) และ ไดโนด (dynode) เรียงกันไปตามลำดับ ภายในหลอดจะมีสถานะเป็นสุญญากาศ เมื่อประกายแสง มาตกกระทบหลอดทวีคูณแสง โฟโตคาโทดจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา เนื่องจากผลของ ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก อิเล็กตรอนเหล่านี้จะวิ่งไปยังแผ่นโลหะโค้งที่เรียกว่า ไดโนด ทำให้ เกิดการขยายอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจนมีจำนวนมากพอที่จะถูกส่งต่อไปยังฮาโนด เกิดเป็นสัญญาณพัลส์ ขึ้น



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความไวของหลอดทวีคูณแสงต่อแสง ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

Liquid Light Guide และหลอดทวีคูณแสงที่ใช้ในงานวิจัยมีการตอบสนองต่อแสง ได้ดีในช่วงความยาวคลื่น 400 – 500 นาโนเมตร ซึ่งเหมาะสมกับประกายแสงที่เกิดจากสารซินทิลเลเตอร์ที่เลือกใช้ ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 450 นาโนเมตร