



การนำเอาสารละลายอินทรีย์พลาสติก มาใช้เป็นซินติเลเตอร์ เริ่มต้นในปี ค.ศ.1950 โดยสกอร์ และทอร์นี่<sup>1</sup> ในขณะนั้นการวัดด้วยสารละลายเหลวได้ประสบความสำเร็จแล้ว การพัฒนาซินติเลเตอร์ทั้งสองแบบกระทำควบคู่กันมาตลอด

#### 4.1 การจัดแบ่งประเภทของพลาสติกซินติเลเตอร์<sup>(1)</sup>

พลาสติกซินติเลเตอร์แบ่งตามองค์ประกอบที่เป็นส่วนผสมได้ 3 แบบด้วยกันคือ

4.1.1 ระบบยูนิทารี (unitary systems) เป็นสารละลายพลาสติกบริสุทธิ์ เช่น โพลีสไตรีน (PS), โพลีไวนิลโทลูอีน (PVT) เป็นต้น สารละลายพลาสติกในระบบนี้ไม่นิยมนำมาใช้เป็นหัววัดรังสีเนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำเกินไป

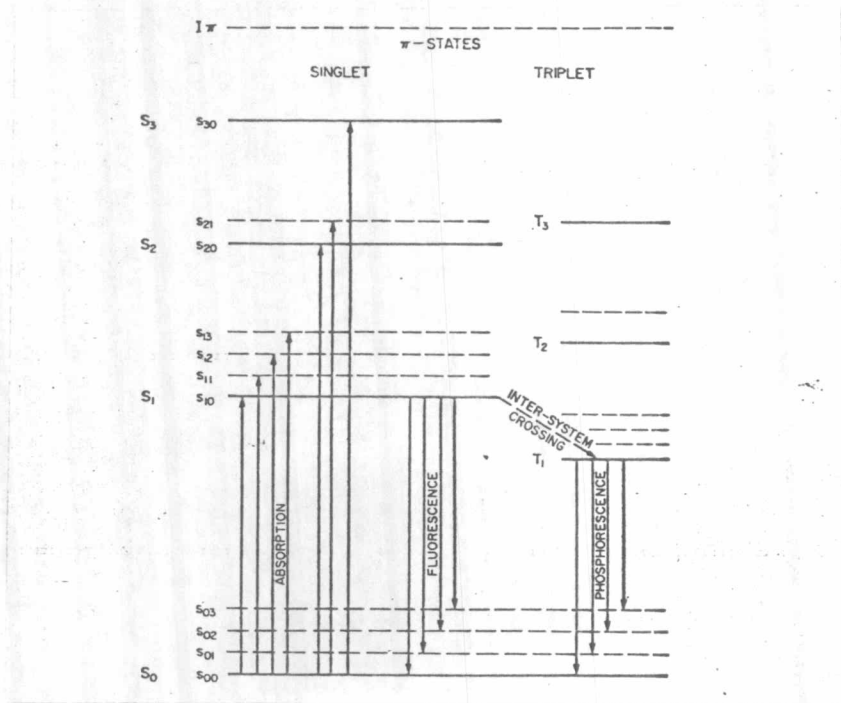
4.1.2 ระบบไบนารี (binary systems) เช่น พี-เทอพีนิล (TP) ใน PS, 2-phenyl-5-(4-biphenyl)-1, 3, 4-oxadiazole (PBD) ใน PVT เป็นต้น

4.1.3 ระบบเทอนารี (ternary systems) เช่น TP และ 2, 2'-p-phenylene-bis-(5-phenyloxazole) (POPOP) ใน PS, PBD และ 2-(1-Naphthyl)-5-phenyloxazole ( $\alpha$ NPO) ใน PVT เป็นต้น

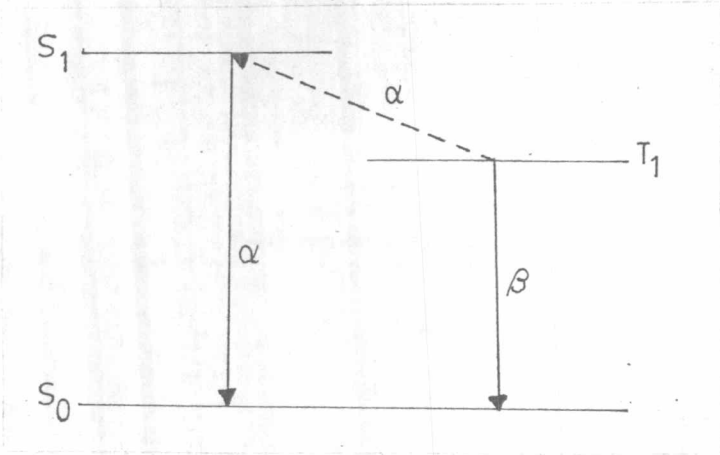
#### 4.2 ซินติเลชันแมคคาณิสซึม (scintillation mechanism)

##### 4.2.1 ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในโมเลกุลของสารอินทรีย์

อิเล็กตรอนในโมเลกุลของสารอินทรีย์ประกอบด้วย พาย-อิเล็กตรอนและซิกมา-อิเล็กตรอน แต่อิเล็กตรอนส่วนที่มีความสำคัญต่อซินติเลชันแมคคาณิสซึมคือ พาย-อิเล็กตรอน



รูป 4.1<sup>(1)</sup> ระดับพลังงานของโมเลกุลสารอินทรีย์  $S_0$  เป็นสภาวะปกติ  $S_1, S_2, S_3$ , เป็น excited singlet states,  $T_1, T_2, T_3$  เป็น excited triplet states  $S_{00}, S_{01}, \dots, S_{10}, S_{11}, \dots$  ฯลฯ เป็น vibrational sub-levels  $I_{\pi}$  เป็น  $\pi$ -ionization energy



รูป 4.2<sup>(1)</sup> แสดงการเกิดกระบวนการ  $\alpha$  และ กระบวนการ  $\beta$

ระดับพลังงานของพาย-อิเล็กตรอนประกอบด้วย  $\Pi$ -electron singlet states  $S_0, S_1, S_2, S_3, \dots$  ซึ่งมีระดับพลังงานเป็น  $0, E_1, E_2, E_3, \dots$  เทียบกับสภาวะปกติ จนกระทั่งถึงระดับ  $\Pi$ -electron ionization energy  $I_{\Pi}$  ในแต่ละระดับของ  $\Pi$ -electron singlet states จะมี vibrational sub-levels ซึ่งแต่ละระดับห่างกันประมาณ  $0.16\text{eV}$  โดยที่  $S_{00}, S_{01}, S_{02}, \dots$  เป็น vibrational sub-levels ของระดับ  $S_0$  และ  $S_{10}, S_{11}, S_{12}, \dots$  เป็น vibrational sub-levels ของ  $S_1$  เป็นต้น ที่ระดับพลังงานสูงกว่า  $E_3$  จะมีระดับพลังงานของซิกมา-อิเล็กตรอนด้วย การศึกษาระดับพลังงานของพาย-อิเล็กตรอนที่สูงกว่า  $E_3$  จึงถูกรบกวนจากซิกมา-อิเล็กตรอน

นอกจากนี้ยังมี  $\Pi$ -electron triplet states  $T_1, T_2, T_3, \dots$  ตามลำดับ เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นจนกระทั่งมีระดับพลังงานเป็น  $S_1$  โมเลกุลส่วนหนึ่งจะลดระดับพลังงานลงโดยไม่ปล่อยรังสี (radiationless transition) ไปยังระดับ triplet state  $T_1$  กระบวนการนี้เรียกว่า inter-system crossing การเปลี่ยนระดับจาก  $T_1$  ไปยัง Triplet state อื่นใด อาจทำได้โดยการกระตุ้นโดยตรง

4.2.2 การปล่อยแสง (luminescence) จากโมเลกุลของสารอินทรีย์แบ่งเป็น 3 วิธีด้วยกัน (1)

4.2.2.1 ฟลูออเรสเซนซ์เกิดจากการเปลี่ยนระดับโดยการแผ่รังสี จากระดับ  $S_1$  ไปยัง  $S_0$  ตามหลังการดูดกลืนพลังงานจากการกระตุ้นช่วงเวลาในการแผ่รังสีของ  $S_1$  มีค่าประมาณ  $10^{-9} - 10^{-8}$  วินาที เปรียบเทียบกับคาบในการสั่นของโมเลกุลซึ่งมีค่าประมาณ  $10^{-12}$  วินาที แล้วจะเห็นว่า ก่อนที่โมเลกุลจะปล่อยแสงออกมา โมเลกุลจะอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนแล้ว การเปลี่ยนระดับโดยการแผ่รังสีแบบนี้จะเปลี่ยนจากระดับ  $S_{10}$  ไปยัง vibrational sub-levels ต่าง ๆ ของสภาวะปกติ  $S_{00}, S_{01}, S_{02}, \dots$  (รูป 4.1) ความเข้มของแสงจะลดลงตามสมการ

$$I = I_0 e^{-t/\tau} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $I_0$  และ  $I$  = ความเข้มของแสงที่เวลา  $t = 0$  และ  $t$

$\tau$  = เวลาสลายตัวฟลูออเรสเซนซ์

4.2.2.2 ฟอสฟอเรสเซนซ์ เกิดจากการเปลี่ยนระดับของพาย-อีเลคตรอนจากระดับ  $T_1$  ไปยังสภาวะปกติ  $S_0$  พลังงานของแสงที่ได้จะต่ำกว่าแสงจากฟลูออเรสเซนซ์ บางทีเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการเบตา ( $\beta$ -process)

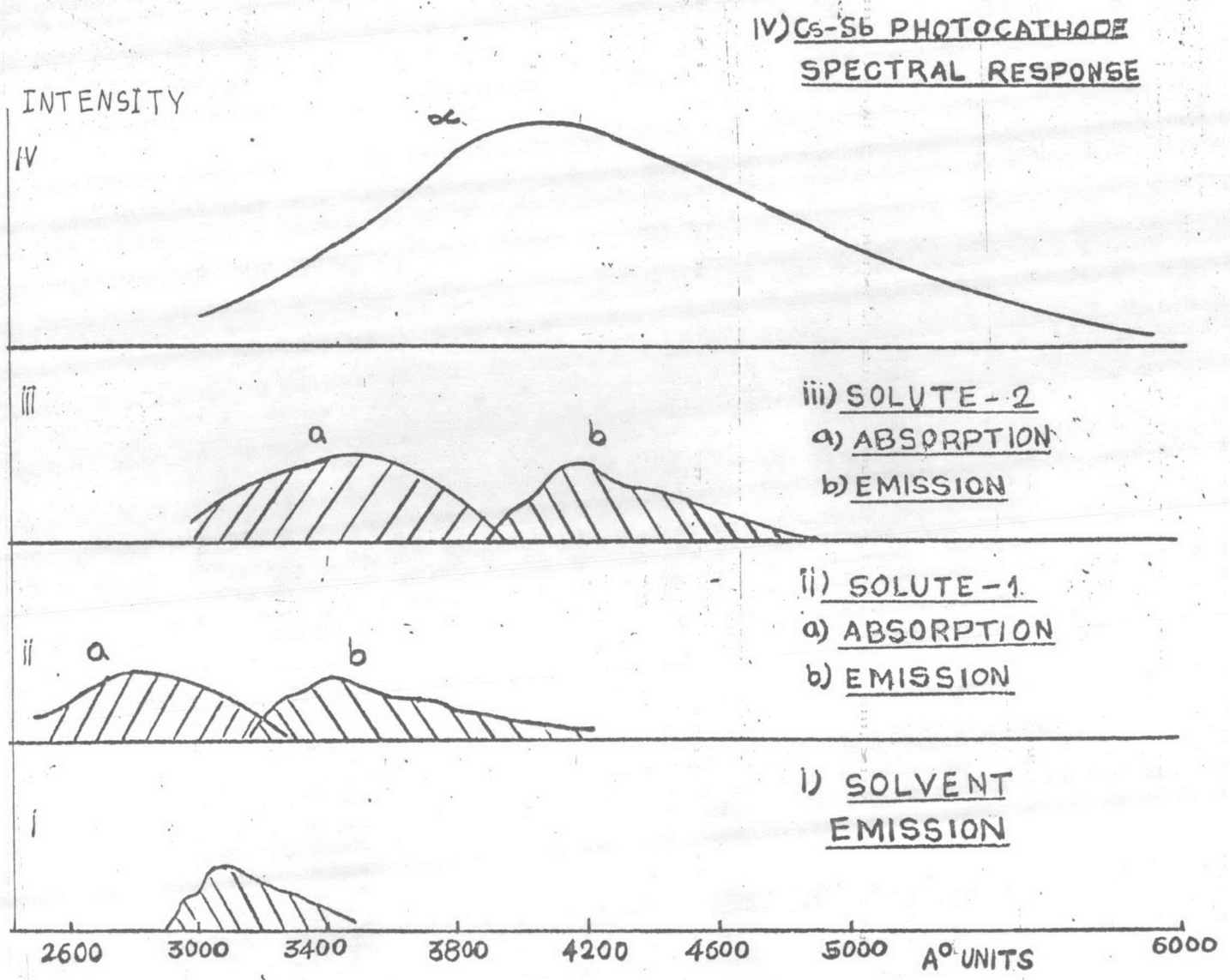
4.2.2.3 ดีเลย์ด์ฟลูออเรสเซนซ์ (delayed fluorescence) เกิดจากพาย-อีเลคตรอนในระดับ  $T_1$  ถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ที่ระดับ  $S_1$  แล้วเปลี่ยนระดับโดยการแผ่รังสีมายังระดับ  $S_0$  สเปกตรัมของแสง จะเหมือนกับกระบวนการฟลูออเรสเซนซ์ แต่ความเข้มของแสงไม่ได้ลดลงแบบเอกซโปเนนเชียล กระบวนการนี้บางทีเรียกว่ากระบวนการอัลฟา ( $\alpha$ -process)

#### 4.2.3 การถ่ายเทพลังงานและการปลดปล่อยแสงจากพลาสติกซินติเลเตอร์

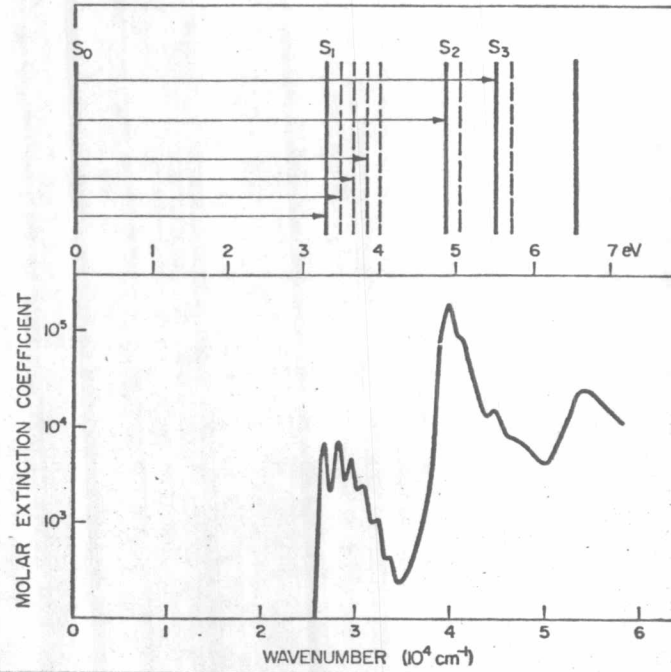
เมื่อรังสีมาตกลงบนพลาสติกซินติเลเตอร์ เบสจะดูดกลืนรังสีส่วนใหญ่ไว้แล้วเปลี่ยนพลังงานส่วนหนึ่งเป็นรังสีเหนียว ดังนั้น ในระบบยูนิทาร์แสงที่ได้จากพลาสติกซินติเลเตอร์จะเป็นรังสีเหนียวเป็นส่วนใหญ่ ถ้าเป็นระบบไบนารีโซลูท 1 หรือไพรมารีโซลูท จะดูดกลืนรังสีเหนียวนั้น แล้วปล่อยแสงที่มีความถี่ต่ำกว่ารังสีเหนียวออกมา ในระบบเทอนารีโซลูท 2 หรือเซคันดารีโซลูท จะดูดกลืนแสงที่ปล่อยออกมาจากไพรมารีโซลูท แล้วปล่อยแสงที่มีความถี่ต่ำกว่าให้เหมาะสมกับลักษณะสมบัติของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์โซลูท 2 บางทีเรียกว่าตัวเปลี่ยนความยาวคลื่น (wave-length shifter)

#### 4.2.4 ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกตรัม (fluorescence spectrum) ของพลาสติกซินติเลเตอร์

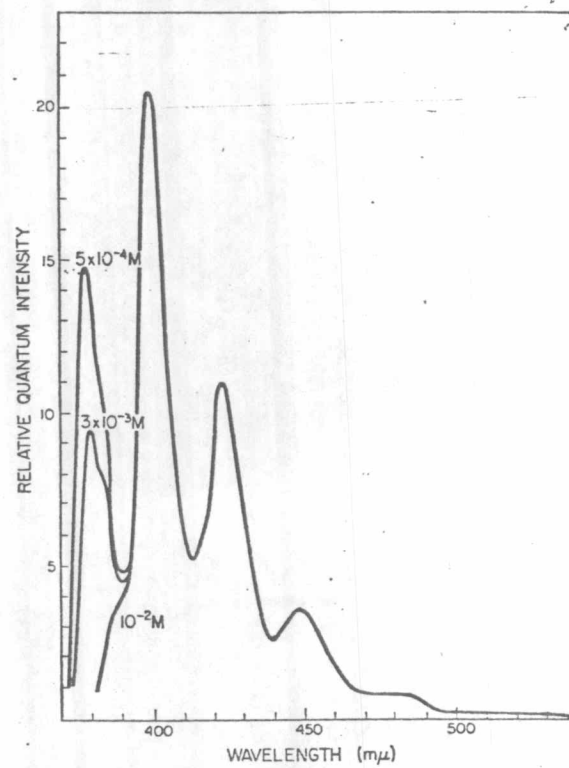
จากการทดลองของเบซิล<sup>(1),(37)</sup>, บัค<sup>(1)</sup> และเบิร์ก<sup>(1)</sup> พบว่า ความยาวคลื่นของแสงที่ปล่อยออกมาจากพลาสติกซินติเลเตอร์แบบต่าง ๆ จะอยู่ในช่วงระหว่าง 340-480 นาโนเมตร และหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ที่ใช้ ซีเซียม-ฟลวง ( $SbCS_3$ ) เป็นโฟโตคาโทดไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่าง 300-500 นาโนเมตร ดังนั้น จึงนำพลาสติกซินติเลเตอร์ประกอบกับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์เพื่อใช้เป็นหัววัดรังสีได้



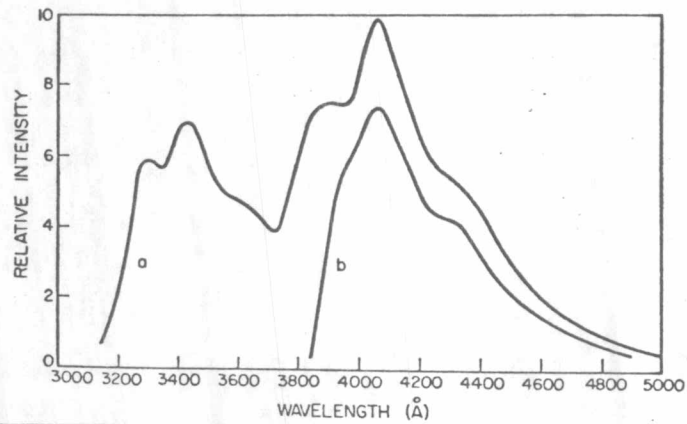
รูป 4.3<sup>(39)</sup> เปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงที่ เบส, โคลลูท 1 และ โคลลูท 2  
ดูดกลืนและปลดปล่อยออกมา เปรียบเทียบกับ response  
spectrum ของ โฟโตแคโทด ที่ทำจาก พลวง-ซีเซียม



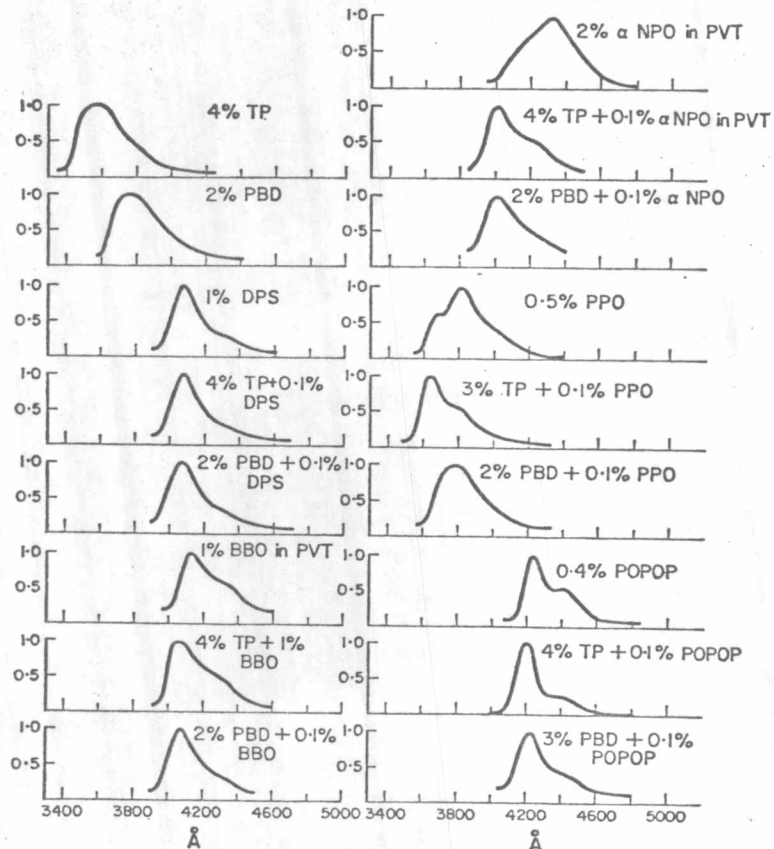
รูป 4.4<sup>(1)</sup> สเปกตรัมการดูดกลืนของแอนทราซีน ในไซโคลเฮกเซน



รูป 4.5<sup>(1)</sup> สเปกตรัมของฟลูออเรสเซนซ์ จากแอนทราซีนในไซโคลเฮกเซน



รูป 4.6<sup>(1)</sup> สเปกตรัมของฟลูออเรสเซนซ์ จากโพลีเอท-บี พลาสติกหนา 4 มิลลิเมตร กระตุ้นโดยแสงที่มีความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร  
 (a) แสดงสเปกตรัมของฟลูออเรสเซนซ์ที่สะท้อนออกมาจากด้านหน้า  
 (b) แสดงสเปกตรัมของฟลูออเรสเซนซ์ทางด้านหลังของซินติเลเตอร์



รูป 4.7<sup>(37)</sup> สเปกตรัมของฟลูออเรสเซนซ์ จากพลาสติก ซินติเลเตอร์แบบต่างๆ ขนาดหนา  $\frac{1}{2}$  นิ้ว กระตุ้นโดยรังสีเหนือม่วง วัดจากด้านหลังของซินติเลเตอร์ โดยให้ความเข้มที่ยอดพิคเป็น 1.0

DPS = 4, 4' - diphenylstilbene

BBO = 2, 5 - Di - (4-biphenyl)-oxazole

PPO = 2, 5 - diphenyloxazole

#### 4.3 ประสิทธิภาพของพลาสติกชนิดีเลเตอร์

ประสิทธิภาพของพลาสติกชนิดีเลเตอร์ขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของไพรมารีโซลูท และเซคันดารีโซลูทที่ผสมอยู่ในชนิดีเลเตอร์ จากการศึกษาของ สว่างค์ และบัค<sup>(1),(38)</sup>, เบซิล<sup>(1),(37)</sup> และเมตรีเคฟ และผู้ร่วมงาน ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.8, 4.9 และตารางที่ 4.1 นอกจากนั้น รอสแมน<sup>(1)</sup> ยังพบว่า ประสิทธิภาพยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งผลของการศึกษาของรอสแมนอ่านได้จาก ตารางที่ 4.2

#### 4.4 การเตรียมพลาสติกชนิดีเลเตอร์

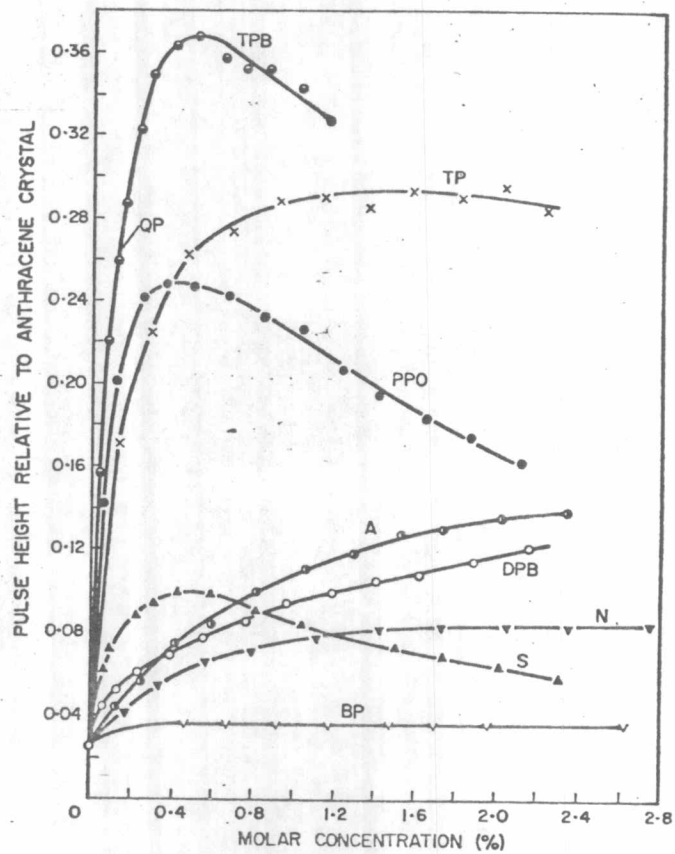
เดชปานดี และ ไบค<sup>(39)</sup> แห่งทบวงการประมาญของอินเดีย เตรียมพลาสติกชนิดีเลเตอร์ ขนาด 2' x 2' x 4" โดยใช้อัตราส่วนผสมดังนี้คือ

สไตรีนโมโนเมอร์	48	ลิตร
TP	450	กรัม
POPOP	20	กรัม
สังกะสีสเตียเรท	8	กรัม

แล้วโพลีเมอไรซ์สารละลายโมโนเมอร์ที่ใกล้ ๆ กับจุดเดือดหลาย ๆ วัน การเติมสังกะสี สเตียเรทลงไปจะทำให้พลาสติกชนิดีเลเตอร์ไม่ติดกับภาชนะที่ใช้บรรจุ แต่จะลดประสิทธิภาพของชนิดีเลเตอร์ลงไปประมาณ 5%<sup>(1)</sup>

นอกจากวิธีการของเดชปานดีและไบคแล้ว นักวิทยาศาสตร์ท่านอื่น ๆ เช่น แอนครีเซฟ และผู้ร่วมงาน, เมตรีเคฟและผู้ร่วมงาน, บรูคส์และผู้ร่วมงาน ฯลฯ ได้ใช้เทคนิคที่แตกต่างกันออกไป<sup>(1)</sup> แต่คงใช้หลักการเดียวกันคือ การโพลีเมอไรซ์ สารละลายโมโนเมอร์ที่อุณหภูมิสูง





รูป 4.8<sup>(38)</sup> ความสูงของพัลส์ที่ได้จากพลาสติกซินติเลเตอร์ ที่ใช้โพลิสไตรีน เป็นเบส เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของโซลูท โดยกระตุ้นด้วย อนุภาคอัลฟา

TPB = 1, 1', 4, 4' - tetraphenylbutadiene

QP = p - quaterphenyl

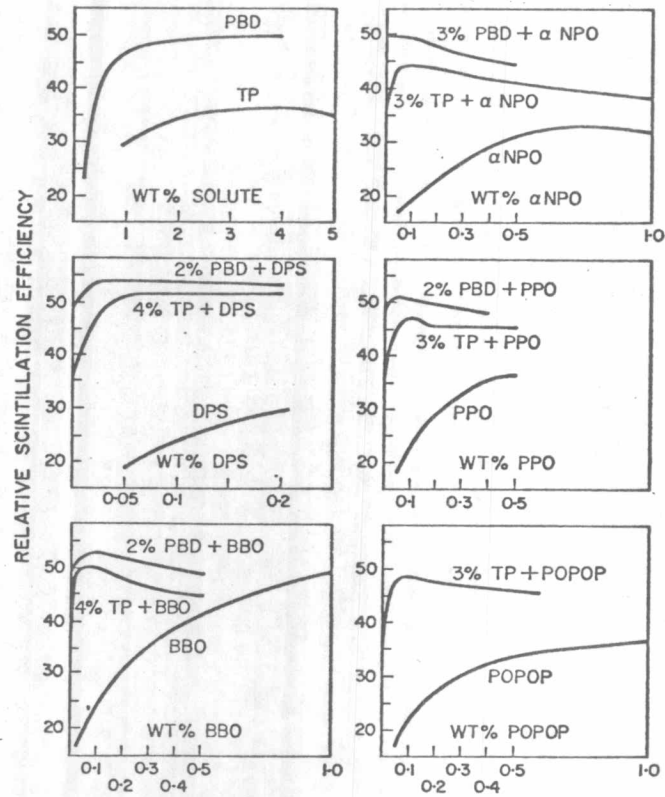
A = anthracene

DPB = 1, 4-diphenylbutadiene

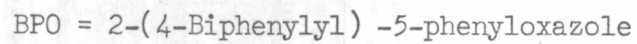
N = naphthalene

S = trans-stilbene

BP = biphenyl



รูป 4.9<sup>(37)</sup> ประสิทธิภาพของพลาสติกซินติเลเตอร์ ระบบไนนารี และเทอนารี  
 ที่ใช้ PVT เป็นเบสหลายชนิด เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของ  
 แอนทราซีน (ให้ประสิทธิภาพของ แอนทราซีน = 100)



ตาราง 4.1<sup>(1)</sup>

ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ของสารละลายพลาสติกโพลีไสตรีน  
(หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ FEU-19 M ผลึกสดีลป็น  
= 100)

Solutes	Relative pulse height
2% TP + 0.1% BBO	86
2% TP + 0.02% POPOP	86
2% TP + 0.1% $\alpha$ NPO	82
1% TP + 1% PPO	81
2% PPO + 0.1% $\alpha$ NPO	77
2% TP + 0.02% BBO	76
1% PBD	71
1% PPO	70
0.5% BPO	70
0.5% BBO	69
1% $\alpha$ NPO	63
1% POPOP	62

ตาราง 4.2<sup>(1)</sup>

ประสิทธิภาพของ PS ซินติเลเตอร์ เป็นฟังก์ชันของ  
อุณหภูมิ

Solute	Concentration (g/100 g)	Relative efficiency at indicated temperature °K					
		100	140	190	240	290	340
None	—	52	41	32	24	17	11
TPB	1.5	98	106	110	108	100	78
TP + TPB	3 + 0.05	134	134	133	132	122	108
3PP	1.0	104	103	102	101	100	92
Anthracene	3.0	53	49	43	37	30	23

3PP = 1, 3, 5-triphenyl-4<sup>2</sup>-pyrazoline