



## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### ธาตุพอลอเนียม (Polonium)

ธาตุพอลอเนียมถูกค้นพบโดย ปิแอร์ และมารี คูรี ในปี ค.ศ.1898 ขณะที่ทำงาน วิจัยเกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสีของแร่ยูเรเนียม และทอเรียม พบว่า พอลอเนียมมีคุณสมบัติคล้ายกับบีสมาท และสามารถแยกออกจากบีสมาทได้โดยการระเหิดในสุญญากาศ งานวิจัยเกี่ยวกับธาตุพอลอเนียมในช่วงแรกค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากไม่สามารถหาธาตุพอลอเนียมจำนวนมากที่จะใช้ในการศึกษาได้ หรือในบางครั้งก็ไม่สามารถแยกสารรังสีอื่นที่เจือปนออกได้ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1944 สามารถได้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมีของพอลอเนียมได้เป็นส่วนใหญ่ และหลังจากนั้นอีก 15 ปี ข้อมูลทางเคมีของพอลอเนียมสามารถกล่าวได้ว่าเกือบสมบูรณ์

#### 1. ไอโซโทปของพอลอเนียม

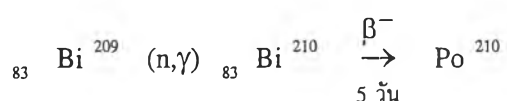
ตารางที่ 1 ไอโซโทปของพอลอเนียม

ไอโซโทป	ค่าครึ่งชีวิต	การสลายตัว	พลังงาน (MeV)
Po <sup>196</sup>	1.9 m	α	6.14
Po <sup>197</sup>	4 m	α	6.04
Po <sup>198</sup>	6 m	α	5.94
Po <sup>199</sup>	11 m	α	5.85
Po <sup>200</sup>	11 m	EC α	5.770
Po <sup>201</sup>	18 m	EC α	5.671
Po <sup>202</sup>	51 m	98% EC 2% α	5.58
Po <sup>203</sup>	42 m	EC	
Po <sup>204</sup>	3.8 h	99% EC 1% α	5.37

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ไอโซโทป	ค่าครึ่งชีวิต	การสลายตัว	พลังงาน (MeV)
Po <sup>205</sup>	1.8 h	99+% EC 0.74% $\alpha$	5.2
Po <sup>206</sup>	8.8 d	95% EC 5% $\alpha$	5.22
Po <sup>207</sup>	5.7 h	99+% EC 10 <sup>-2</sup> % $\alpha$	5.10
Po <sup>208</sup>	2.897 y	$\alpha$ EC	5.108
Po <sup>209</sup>	103 y	99+% $\alpha$ 0.5% EC	4.88
Po <sup>210</sup>	138.401 d	99+% $\alpha$ 1.0 <sup>-3</sup> % $\alpha$	5.305 4.5
Po <sup>211m</sup>	25 s	$\alpha$	7.14 7.85 8.70
Po <sup>211</sup>	0.52 s	$\alpha$	7.442
Po <sup>212</sup>	3x10 <sup>-7</sup> s	$\alpha$	8.780
Po <sup>213</sup>	4.2x10 <sup>-6</sup> s	$\alpha$	8.35
Po <sup>214</sup>	1.64x10 <sup>-4</sup> s	$\alpha$	7.68
Po <sup>215</sup>	1.83x10 <sup>-3</sup> s	$\alpha$	7.36
Po <sup>216</sup>	0.158 s	$\alpha$	6.775
Po <sup>217</sup>	10 s	$\alpha$	6.54
Po <sup>218</sup>	3.05 m	$\alpha$	5.998

พอลอเนียม-210 เป็นไอโซโทปที่มีอยู่ในธรรมชาติอยู่ในอนุกรมของยูเรเนียม-238 อัตราส่วนของยูเรเนียมต่อพอลอเนียมเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (equilibrium Ratio) มีค่าเท่ากับ  $1.19 \times 10^{10}$  หมายความว่า จะมีพอลอเนียมอยู่ 0.1 มิลลิกรัม ในแร่ยูเรเนียมหนัก 1 ตัน ในเกลือของเรเดียมก็สามารถพบพอลอเนียมในปริมาณที่ค่อนข้างสูงกว่าในแร่ยูเรเนียม คือ มีประมาณ 0.2 มิลลิกรัมต่อกรัมของเรเดียมที่สภาวะสมดุล พอลอเนียม-210 สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยการ นำบีสมาทมาอาบรังสีนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ดังสมการ



วิธีการนี้จึงเป็นวิธีที่ใช้ผลิตพอลอเนียม-210 สำหรับไอโซโทปอื่น ๆ ของพอลอเนียมที่เกิดจากการสลายตัวในอนุกรมต่าง ๆ ที่มีอยู่ในธรรมชาติ โดยมากจะมีค่าครึ่งชีวิตสั้น ๆ ทำให้ปริมาณที่มีปรากฏในธรรมชาติน้อยมาก แม้แต่พอลอเนียม-213 เป็นสมาชิกตัวหนึ่งของอนุกรมเนปทูเนียม ก็มีค่าครึ่งชีวิตที่สั้นเช่นกัน ( $4.2 \times 10^{-6}$  วินาที)

ในกรณีที่มีความแรงรังสีจำเพาะ (Specific activity) สูง การศึกษาพอลอเนียมจะมีความยุ่งยากมาก เพราะรังสีที่เกิดจากการสลายตัวของพอลอเนียม-210 จะทำลายโมเลกุลของ complexing agent หรือกระทั่งโมเลกุลของตัวทำละลาย (solvent) แม้แต่ผลึกของของแข็งก็ยังสามารถทำลายได้ ดังนั้น การศึกษาปฏิกิริยาของพอลอเนียมจึงจำเป็นต้องศึกษากับไอโซโทปที่มีความแรงรังสีจำเพาะต่ำ ๆ เช่น พอลอเนียม-209 สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์โดยการยิงบีสมาท-209 ด้วยอนุภาค โปรตอนที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอน (cyclotron)

ในการทำงานกับธาตุพอลอเนียมต้องการความระมัดระวังเป็นพิเศษ เนื่องจากค่า maximum permissible ในการรับพอลอเนียมเข้ามาในร่างกาย สามารถรับได้เพียง 0.2 ไมโครคูรี ( $4.5 \times 10^{-12}$  กรัมของพอลอเนียม-210) ในการทำงานกับธาตุพอลอเนียมที่มีความแรงรังสีขนาดมิลลิคูรีในรูปของสารละลายควรจะทำในตู้ควีน และสวมถุงมือในการปฏิบัติงานทุกครั้ง และเนื่องจากสารประกอบของพอลอเนียมบางตัว เช่น สารประกอบเฮไลด์ (halide) ระเหยได้ง่าย จึงจำเป็นต้องปฏิบัติงานใน glove box แม้จะทำงานกับพอลอเนียมที่มีความแรงรังสีในขนาดต่ำก็ตาม

## 2. โลหะพอลอเนียม

โลหะพอลอเนียมเป็นโลหะสีเทาเงา (silvery gray) มีความแข็งไม่มากนัก สามารถขูดเป็นรอยได้ง่าย โลหะพอลอเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ในบรรยากาศอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และจะทำปฏิกิริยาเร็วขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นโลหะบริสุทธิ์ของพอลอเนียมจะต้องเก็บไว้ในที่เก็บสุญญากาศ หรือในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย รังสีที่เกิดจากพอลอเนียมขนาดความแรงเป็นคูรี สามารถก่อให้เกิดการเรืองแสงของแก๊สที่อยู่รอบ ๆ และในภาชนะบรรจุที่เป็นแก้ว ซึ่งจะเห็นได้ชัดในที่มืด ถ้าพอลอเนียมมีความแรงรังสีสูง รังสีที่แผ่ออกมาจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นประมาณ 27.4 แคลลอรี่/ชั่วโมง/คูรี ซึ่งจะ ทำให้อุณหภูมิของโลหะพอลอเนียมสูงกว่าบริเวณรอบ ๆ ผลของรังสีที่แผ่ออกมาสามารถทำให้ภาชนะบรรจุเป็นแก้วเปลี่ยนเป็นสีชา และอาจจะแตกร้าวได้

โลหะพอลิเนียมประกอบด้วยอัญรูป อย่างน้อย 2 อัญรูป คือ low temperature  $\alpha$  phase ซึ่งมีรูปผลึกแบบ cubic lattice และ high temperature  $\beta$  phase มีรูปผลึกเป็นแบบ rhombohedral lattice เนื่องจากความร้อนที่เกิดมาจากการแผ่รังสีแอลฟา ทำให้โลหะที่เตรียมขึ้นมาใหม่ ๆ มักจะอยู่ในรูปของ  $\beta$  phase เมื่อโลหะพอลิเนียม สลายตัวไป ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการแผ่รังสีก็จะลดลงไปเรื่อย ๆ โลหะพอลิเนียมก็ จะค่อย ๆ กลับมาอยู่ในรูปของ  $\alpha$  phase

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะพอลิเนียม

คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะพอลิเนียมบางประการ

ความหนาแน่น	9.3 กรัม/ลบ.ซม.
จุดหลอมเหลว	$252 \pm 2$ °C
จุดเดือด	$962.04 \pm 1.93$ °C

### 3. เลขออกซิเดชันของพอลิเนียม (Oxidation States)

การเรียงตัวของอิเล็กตรอน สำหรับอะตอมของพอลิเนียมในระดับพื้น (ground State) สามารถเขียนได้ดังนี้ คือ  $5s^2 5p^6 5d^{10} 6s^2 6p^4 ({}^3p_2)$  ซึ่งเป็นแบบเดียวกันกับการเรียงตัวของอิเล็กตรอนในซีลีเนียม (Se) และ เทลลูเรียม (Te) ออกซิเดชันที่เสถียรเป็น  $-2, +2, +4$  และ  $+6$

Polonides เป็นสารประกอบที่พอลิเนียมมีออกซิเดชันเป็น  $-2$  ( $Po^{-2}$ ) สามารถเตรียมได้โดยนำพอลิเนียมหลอมละลายกับเงิน หรือทองแดงได้สารประกอบพอลิไนด์ของเงินหรือทองแดง และพบว่า พอลิเนียมสามารถเปลี่ยนเป็นสารประกอบ พอลิไนด์ กับสังกะสี ตะกั่ว แพลทินัม นิกเกิล เบริลเลียม แคลเซียม โซเดียม โปรท และ แมกนีเซียม

Bivalent Polonium ( $Po^{+2}$ ) สามารถเตรียมได้ในรูปของคลอไรด์ (chloride) และโบรมไนด์ (Bromide) ซึ่งได้มาจากวิธีการที่เรียกว่า Autooxidation ซึ่งเกิดจากการชนของอนุภาคแอลฟา ที่สลายตัวออกจากธาตุพอลิเนียม-210

Trivalent Polonium ( $Po^{+3}$ ) สามารถพบได้จากผลการทดลองเกี่ยวกับการตกตะกอนร่วม (Coprecipitate) และยังพบว่า  $Po^{+3}$  อาจเป็น unstable intermediate ของ Autooxidation ของ  $Po^{+2}$

Quadrivalent Polonium ( $Po^{+4}$ ) สามารถพบได้ในรูปของสารละลายสำหรับไดออกไซด์ สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาของโลหะพอลิเนียมกับออกซิเจนในอากาศ และยังพบว่า พอลิเนียมสามารถพบในรูปของ  $PoCl_4, PoBr_4$  และ  $PoI_4$  หรือในสารประกอบเชิงที่มีสูตรทั่วไปดังนี้  $M_2 Po_x$  เมื่อ M คือ อีออนที่มีประจุ  $+1$  และ  $Po(NO_3)_4$

Hexavalent Polonium ( $Po^{+6}$ ) มักจะอยู่ในรูป  $PoO_3$  สามารถพบได้โดย anodic deposition ของพอลิเนียม และยังพบจากวิธีการตกตะกอนร่วม

#### 4. เกลือของพอลิเนียม

##### 1. ประเภทของเกลือที่สามารถละลายน้ำ

เกลือที่ละลายน้ำของพอลิเนียมสามารถพบได้อยู่หลายชนิด เช่น  $\text{PoF}_4$ ,  $\text{PoCl}_4$ ,  $\text{PoCl}_2$ ,  $\text{PoBr}_4$ ,  $\text{PoBr}_2$  เป็นต้น

##### 2. ประเภทของเกลือที่ไม่สามารถละลายน้ำ

เกลือประเภทนี้มีอยู่หลายชนิด เช่น  $\text{PoO}(\text{OH})_2$  ซึ่งเตรียมได้จากการเติมแอมโมเนียหรือสารละลายของต่างลงในสารละลายของ  $\text{PoCl}_4$  หรือ  $\text{PoBr}_4$  เช่น เกลือประเภทนี้ได้แก่ Polonium Monosulfide, Polonium Formate และ Polonium Tetraiodide.

#### 5. การแยกพอลิเนียม

##### 1. การแยกโดยสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

ในสารละลายเฮไลต์ พอลิเนียมสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอนุมูลเฮไลต์ได้หลายชนิด K. Kimura และคณะ (1958) พบว่า isopropyl ether หรือ metyl isobutyl keton สามารถสกัดพอลิเนียมจากสารละลายของกรดไฮโดรคลอริกที่มีเกลือของโปตัสเซียมไอโอไดด์ (KI) ปนอยู่

Cairo (1958) ได้ทำการสกัดพอลิเนียมด้วย diisopropyl ketone พบว่าสามารถสกัดพอลิเนียมจากสารละลายผสมระหว่าง กรดไฮโดรคลอริก 3M กับโปตัสเซียมไอโอไดด์ 0.5 M ได้ถึง 97% Moore (1960) ได้ทำการศึกษากการสกัดพอลิเนียมจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้ diisopropyl carbinol และ diiso butyl carbinol

นอกจากนี้พอลิเนียมสามารถจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของสารอินทรีย์หลายชนิด เช่น Tributylphosphate (TBP) Thenoyltrifluoroacetone (TTA) Dithizone, Trioctylphosphene oxide (TOPO) Tri-n-benzylamine เป็นต้น

##### 2. การแยกโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน

การแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange) พอลิเนียมสามารถแยกออกจากปัสมาท โดยใช้ Dowex 50- (50-100 mesh) จากสารละลายของกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1-0.3 M และยังสามารถใช้ Amberlite IR-1 (40-60 mesh) ในการแยกปัสมาท ออกจากพอลิเนียม

การแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion exchange) พอลิเนียมสามารถจะถูกจับโดย strong base resin เช่น Dowex-1,-2 และ Amberlite TRA-410 จากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นตั้งแต่ 0.5-12 M Y. Sasaki (1955) ได้ทำการแยกพอลิเนียมออกจากธาตุในกลุ่ม 6B โดยใช้ Dowex-1x4 ในสารละลายของกรดไฮโดรคลอริก 12 M พบว่าพอลิเนียม ซีลีเนียม และเทลลูเรียม จะถูกจับบน resin และ ซีลีเนียม จะถูกชะล้างออกโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 6M, เทลลูเรียมจะถูกชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 M ส่วนพอลิเนียมจะถูกชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 M

### 3. การแยกโดยเทคนิคการระเหิด (Sublimation Techniques)

ในการวิจัยช่วงแรกของการศึกษาวิธีแยกพอลิเนียม พบว่า พอลิเนียม สามารถแยกออกจากปัสมาท โดยการระเหิดในสูญญากาศ (Vacuum sublimation) โดยทั่วไปวิธีการนี้ใช้สำหรับเตรียมพอลิเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูง ๆ (ขนาดมิลลิกรัม) ในอากาศพอลิเนียมจะเริ่มระเหิดที่  $700^{\circ}\text{C}$  และกลายเป็นไอหมดที่  $900^{\circ}\text{C}$  พอลิเนียมที่ได้จากการระเหิดในอากาศจะอยู่ในรูปของไดออกไซด์ (dioxide) แต่ถ้าวระเหิดในสูญญากาศจะได้รูปของโลหะพอลิเนียม สารประกอบอินทรีย์ของพอลิเนียมก็สามารถระเหยได้ เช่น สารประกอบของพอลิเนียมกับ diphenylcarbazone และ diphenylcarbazide ระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  และในกรณีของสารประกอบพอลิเนียมกับ diphenylthiocarbazone (dithizone) สามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิ  $115^{\circ}\text{C}$  และสามารถควมแน่นและรวบรวมได้ โดยใช้ Pt dish ซึ่งวางห่างเพียงเล็กน้อยเหนือสารประกอบนี้ โดยจะอยู่ในรูปของ Polonium dithizonate

### 4. การแยกโดยวิธีเกาะติดด้วยตัวเอง และเกาะติดด้วยไฟฟ้า

(Spontaneous Deposition and electrodeposition)

**การเกาะติดด้วยตัวเอง** พอลิเนียมสามารถเกาะติดด้วยตนเองบนแผ่นโลหะหลายประเภท เช่น แผ่นเงิน แผ่นทองแดง แผ่นนิกเกิล หรือแผ่นแพลทินัม แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ แผ่นเงิน พบว่า พอลิเนียมสามารถเกาะบนแผ่นเงินจากสารละลายเจือจางของกรดไนตริกหรือกรดไฮโดรคลอริก แต่มักจะมีแผ่นฟิล์มดำปรากฏบนแผ่นเงิน เนื่องจากการเกิดออกไซด์ลงไปในสารละลายขณะที่กำลังให้พอลิเนียมเกาะติดบนแผ่นเงิน

พอลิเนียมจะเกาะติดบนแผ่นเงินได้ดีในสารละลายของกรดไฮโดรคลอริก เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายของกรดไนตริก และซัลฟูริก ถ้ามี ทอง พรอท และ แพลทินัม หรือ เทลลูเรียม ปนอยู่ จะมีผลอย่างมากต่อการเกาะของพอลิเนียมบนแผ่นเงิน จึงต้องกำจัดโดยการรีดิวซ์ด้วย hydrazine และนอกจากนี้พวกอนุมูลของ ferric ก็มีผล ต่อการเกาะติดบนแผ่นเงินของพอลิเนียม ซึ่งกำจัดโดยรีดิวซ์ด้วย ascorbic acid

**การเกาะติดโดยอาศัยไฟฟ้า** พอลิเนียมสามารถเกาะติดโดยใช้ไฟฟ้าจากสารละลายของกรดหลายประเภท และกรดที่ให้ผลดีที่สุดคือกรดไนตริก โดยใช้ Pt เป็นขั้วลบและ Pt gauze เป็นขั้วบวก Au ก็สามารถนำมาใช้เป็นขั้วบวกได้ แต่ไม่สามารถนำมาใช้เป็นขั้วลบ เพราะทองจะละลายออกมาและไปเกาะที่ขั้วบวกพร้อมกับพอลิเนียม นอกจากนี้ยังมีแทนทาลัม โมลิบดีนัม และคาร์บอน สามารถนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในการ พอลิเนียมได้เช่นกัน

### เครื่องวัดรังสีแบบลิควิดซินทิลเลชัน (Liquid Scintillation counter)

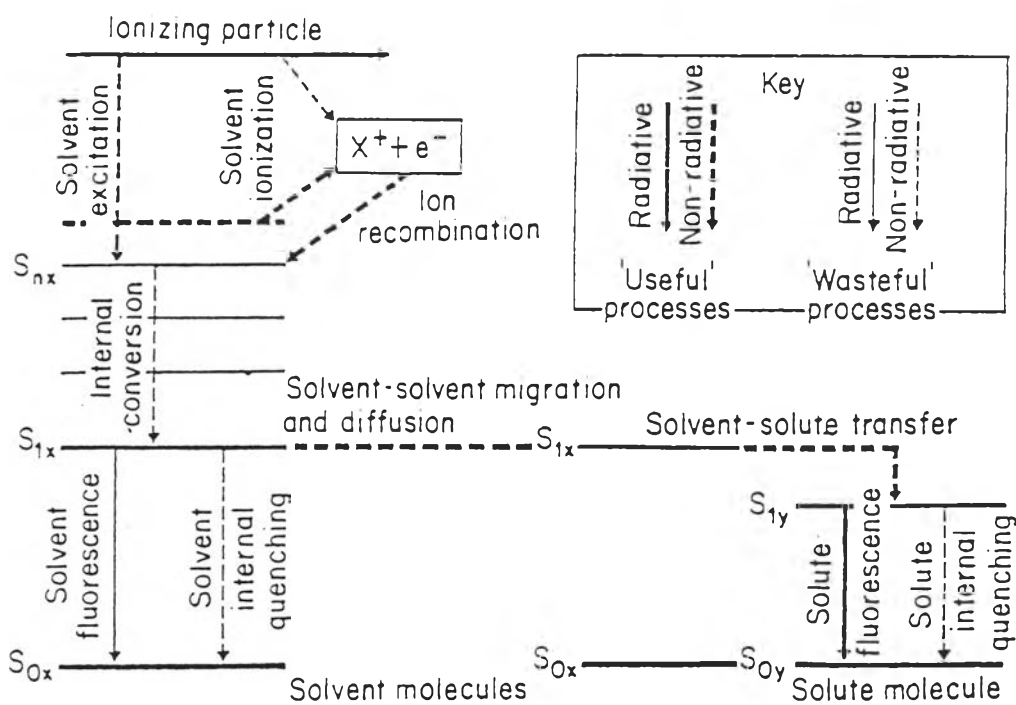
ในปี ค.ศ.1950 Reynolds และ Kallman (1950) พบว่า เมื่อรังสีกระทบกับสารอินทรีย์บางชนิด (สารเรืองแสง) จะเกิดกระบวนการเรืองแสงขึ้น ความเข้มข้นของแสงที่เกิดขึ้นนั้น จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ถ่ายเทให้กับสารเรืองแสง การวัดรังสีโดยเครื่องลิควิดซินทิลเลชันจึงเริ่มต้นขึ้น เนื่องจากการวัดรังสีโดยวิธีนี้ ตัวอย่างจะต้องผสมเป็นเนื้อเดียวกับสารเรืองแสง ดังนั้นจึงเหมาะสมสำหรับการนำไปวัดหาปริมาณรังสีจากสารกัมมันตรังสีที่ให้อนุภาคเบตาพลังงานต่ำ ๆ เช่น คาร์บอน-14 หรือ

ดริเทียมได้โดยมีประสิทธิภาพในการวัดสูงกว่าเครื่องมือชนิดอื่น และในปัจจุบันนี้มีการพัฒนาเครื่องมือวัดรังสีชนิดนี้ จนทำให้สามารถนำมาวัดรังสีแอลฟาได้ และมีศักยภาพสูง

### 1. ปฏิบัติการถ่ายทอดพลังงาน

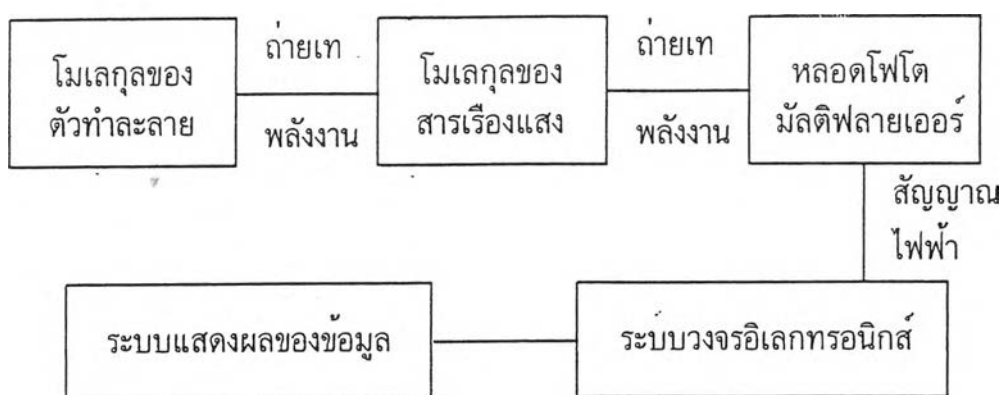
ในการวัดรังสีด้วยเครื่องลิวทิลเลชันนั้น กระบวนการเรืองแสง จะเป็นสิ่งสำคัญ สำหรับการวัดรังสีโดยวิธีนี้ ซึ่งองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการเรืองแสงคือ ตัวทำละลาย (solvent) และ ตัวถูกละลาย (Solute) รวมกันเรียกว่า คอกเทล (cocktail) ตัวทำละลายที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ ได้แก่ โทลูอีน (Toluene) ไซลีน (Xylene) หรือเบนซีน (Benzene) เป็นต้น สำหรับตัวถูกละลายหรือบางทีเรียกว่า สารเรืองแสง (Scintillator) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเรืองแสง ตัวอย่างสารเรืองแสง เช่น PPO (2, 5-Diphenyloxazole) หรือ PBD (2-phenyl-5-(4-biphenyl)-1, 3, 4-oxadiazole) เป็นต้น

เนื่องจากโมเลกุลของตัวทำละลายมากกว่าโมเลกุลของตัวถูกละลาย (สารเรืองแสง) โดยทั่วไปแล้วโมเลกุลของตัวทำละลายในคอกเทล จะดูดกลืนพลังงานจากการแผ่รังสีของสารรังสี ทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายนั้น อยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) หรือเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีประจุบวกกับอิเล็กตรอน (ionization) ซึ่ง โมเลกุลที่มีประจุบวก อาจจะรวมกับอิเล็กตรอนที่อยู่รอบ ๆ เป็นโมเลกุลที่อยู่ในสถานะ กระตุ้นเช่นกัน การที่โมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้น จะกลับมาสู่สถานะพื้น (ground state) นั้น จะมีหลายขั้นตอนด้วยกัน โมเลกุลที่อยู่ใน  $S_{1x}$  ดังแสดงในรูปที่ 2 จะมีระดับพลังงานของ vibrational Energy ลดต่ำลงมาอยู่ในระดับเดียวกับ vibrational energy ที่สูงของ excited singlet แรก คือ  $S_{1x}$  หรือ  $S_{1x}$  มีพลังงานต่ำลงกลายเป็น  $S_{1x}$  พลังงานสูง เกิดกระบวนการที่เรียกว่า Internal conversion (IC) กระบวนการลดพลังงานโดย IC นั้น ใช้เวลาอย่างรวดเร็ว (ประมาณ  $10^{-12}$  วินาที) โมเลกุลจะลงมาสู่  $S_{1x}$  โดยไม่มีการแผ่รังสี และอาจจะลดพลังงานต่อไปได้ 2 รูปแบบ คือ เกิด deexcited ไปสู่  $S_{0x}$  โดยมีการให้โฟตอน เรียกว่า ฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence) ซึ่งอาจเรียกว่า solvent fluorescence และให้ช่วงคลื่นที่ไม่เหมาะสมในการวัดด้วยหลอดโฟโตมัลติฟลายเออร์ จึงเป็นกระบวนการสูญเปล่า (wasteful-process) การลดพลังงานอีกแบบหนึ่ง โมเลกุลของตัวทำละลายที่อยู่ในระดับพลังงาน  $S_{1x}$  ก็คือ การถ่ายเทพลังงานให้แก่โมเลกุลของตัวถูกละลาย (สารเรืองแสง) ทำให้โมเลกุลของสารเรืองแสงอยู่ในสถานะกระตุ้น โดยทั่วไปจะอยู่ในระดับพลังงานต่ำ ( $S_{1y}$ ) ถ้าปริมาณความเข้มข้นของตัวถูกละลายมีปริมาณที่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการถ่ายเทพลังงานจากโมเลกุลของตัวทำละลาย สู่โมเลกุลของตัวถูกละลายจะเข้าใกล้ 1 ซึ่งหมายความว่า พลังงานเกือบทั้งหมดจะถูกถ่ายเทจากโมเลกุลของตัวทำละลายที่อยู่ในสถานะกระตุ้นไปยังโมเลกุลของตัวถูกละลาย เมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายอยู่ในสถานะกระตุ้นในระดับพลังงาน  $S_{1y}$  ก็จะมีให้โฟตอน ที่เรียกว่า ฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งสามารถจะวัดปริมาณฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นด้วยหลอดโฟโตมัลติฟลายเออร์ได้



รูปที่ 2 แสดงกระบวนการเรืองแสง

จากกระบวนการดังกล่าวข้างต้น สามารถเขียนเป็นแผนภาพอย่างง่าย ๆ ของเครื่องวัดรังสีแบบลิวทิตินทิลเลชัน ได้ดังนี้



รูปที่ 3 แสดงแผนภาพของเครื่องลิวทิตินทิลเลชัน



## 2. ตัวทำละลาย (Solvent)

ประสิทธิภาพของการวัดรังสีด้วยเครื่องลิวทอนทิลเลชันนั้น จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมตัวอย่าง ถ้าตัวอย่างสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกับตัวทำละลายที่ใช้ประสิทธิภาพของการวัดด้วยวิธีนี้ก็จะมีค่ามาก

ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า การวัดรังสีด้วยเครื่องลิวทอนทิลเลชัน นั้นจะประกอบด้วยตัวทำละลาย และตัวถูกละลาย (สารเรืองแสง) ดังนั้นจึงมีปัญหาว่าจะเลือกตัวทำละลายและตัวถูกละลายอย่างไร จึงจะได้ประสิทธิภาพในการวัดรังสีโดยวิธีนี้สูงสุด ในกรณีของตัวทำละลาย พบว่าในเรื่องขบวนการเกิดการเรืองแสง ตัวทำละลายที่ดีนั้น ขณะที่โมเลกุลของตัวทำละลายอยู่ในสภาวะตื่นตัวจะต้องสูญเสียพลังงานในรูปของแสง (fluorescence) น้อยที่สุด เพราะการสูญเสียพลังงานโดยวิธีนี้ จะเป็นการสูญเสียเปลว เนื่องจากเป็นช่วงคลื่นของแสงที่ไม่สามารถวัดหาปริมาณได้ด้วยหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ดังนั้นตัวทำละลายจึงควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. สามารถละลายตัวอย่าง และสารเรืองแสงได้ดี
2. มีความสามารถดูดกลืนพลังงานจากรังสี และถ่ายถอดพลังงานให้สารเรืองแสงมากที่สุด
3. มีการดูดกลืนแสงจากสารเรืองแสงน้อยที่สุด
4. มีความบริสุทธิ์สูง เพื่อลดการรบกวนการถ่ายถอดพลังงาน
5. ราคาไม่สูงมาก

ตัวทำละลายที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ โทลูอีน (Toluene) เนื่องจากมีคุณสมบัติในการถ่ายถอดพลังงานได้ดี ราคาถูก และมีความบริสุทธิ์สูง แต่มีข้อเสียคือ ละลายได้ดีเฉพาะตัวอย่างไขมัน สเตอรอยด์ (steroid) และสารประกอบอินทรีย์เท่านั้น ไม่ละลายตัวอย่างที่เป็นน้ำปน นอกจากนี้ยังมีตัวทำละลายอื่น ๆ ดังแสดงไว้ในตารางดังนี้

ตารางที่ 3 แสดงชนิดของตัวทำละลายและประสิทธิภาพในการวัด

ตัวทำละลาย	ประสิทธิภาพในการวัด
Toluene	100
Methoxybenzene (anisole)	100
Xylene (mixed isomer)	97
1, 3 -Dimethoxybenzene	81
n-heptane	70
1,4 -Dioxane	70
1, 2 -Dimethoxyethane	60
Benzyl alcohol	38
Diethylene glycol diethyl ether	32
Acetone	12
Tetrahydropyran	6
Ethyl ether	4
1,1 -Diethoxyethane	3
Tetra hydrofuran	2
1,3 -Dioxolane	0
Ethyl alcohol	0
Diethylene glycol monoethyl ether	0
Ethylene glycol monoethyl ether	0
Diethylene glycol	0
Ethylene glycol	0
2,5 -Diethoxytetra hydrofuran	0
Diethyl amine	0
n-Methyl morpholine	0
2-Ethylhexanoic acid	0
Tri-n-butyl phosphate	0

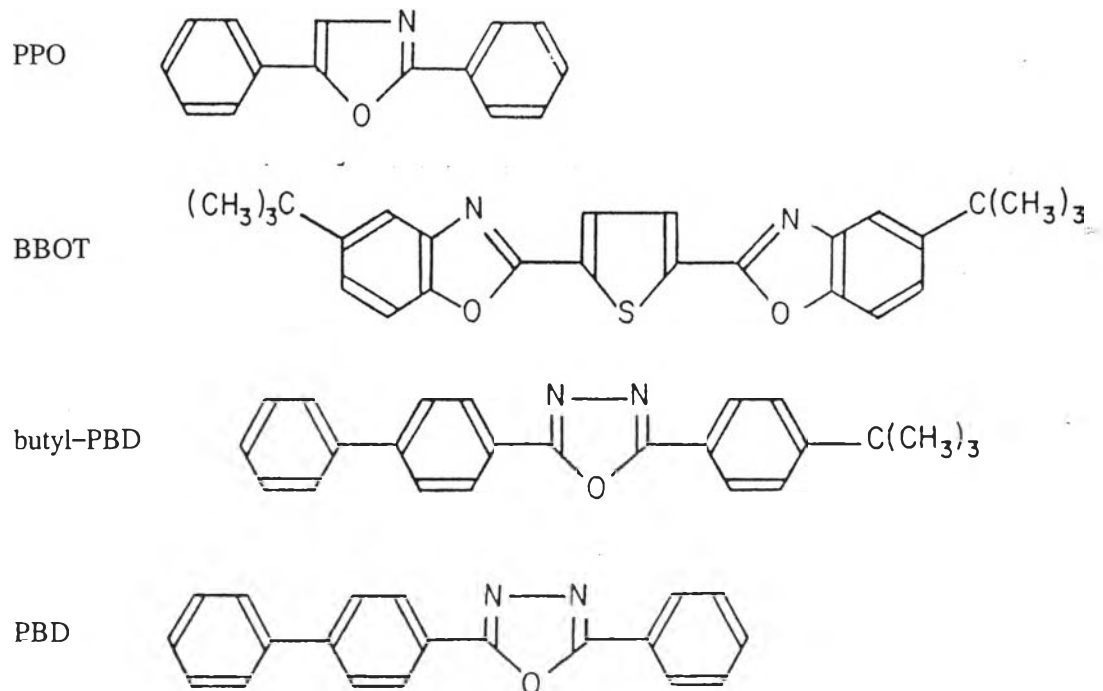
(ตัวทำละลายเหล่านี้อยู่ใน 0.3% ของ 2, 5 -diphenyloxazole)

### 3. สารเรืองแสง (Scintillator)

สารเรืองแสงหรือตัวถูกละลาย ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากการก่อกำเนิดสภาวะการ  
ตื่นตัวให้เป็นแสง โดยสารประกอบที่จะนำมาใช้เป็นสารเรืองแสงสำหรับการวัดด้วยเครื่องลิควิดซินทิลเลชัน  
จึงควรมีคุณสมบัติดังนี้

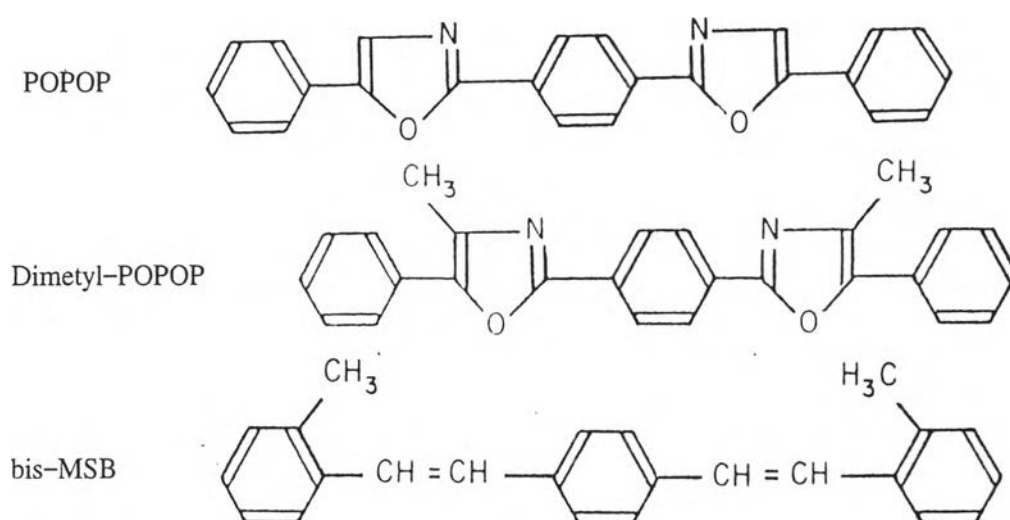
1. มีประสิทธิภาพสูงในการให้แสงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสี
2. เรืองแสงในช่วงคลื่นที่ให้ maximum sensitivity กับหัววัด
3. ละลายได้ดีและมีเสถียรภาพภายใต้สภาวะที่ทำการวัด
4. ไม่มีการเกิดควENCHING เนื่องจากความเข้มข้น
5. หาง่ายและมีราคาถูก

สารเรืองแสงที่นิยมใช้กันมากได้แก่ PPO [2, 5-diphenyloxazole] BBOT [2, 5 -bis  
- (5-tert-butylbenzoxazolyl(2))-Thiophene] butyl-PBD [2-(4-tert-butylphenyl)  
-5-(4-biphenyl)-1, 3, 4 -oxadiazole] PBD [2-phenyl-5-(4-biphenyl)-1, 3, 4 -oxadiazole]  
ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังนี้



รูปที่ 4 แสดงสูตรโครงสร้างของสารเรืองแสงปฐมภูมิบางตัว

สารเรืองแสงทั่ว ๆ ไป ส่วนใหญ่จะให้แสงที่มีความยาวคลื่น 360 นาโนเมตร ซึ่งไม่เหมาะสมกับความไวของหลอดโฟโตมัลติฟลายเออร์ จึงมีความจำเป็นต้องใช้สารเรืองแสงทุติยภูมิเดิมลงไป เพื่อเลื่อนคลื่นแสงให้อยู่ในช่วงที่สัมพันธ์กับการทำงานของหลอดโฟโตมัลติฟลายเออร์ สารเรืองแสงทุติยภูมิที่นิยมใช้ ได้แก่ POPOP [1, 4 -di-(2-(5- phenyloxazolyl)) benzene] DMPOPOP [1, 4-di-(2-(4-methyl-5- phenyloxazolyl)) benzene] bis-MSB [p-bis-(0-methylstyryl) benzene] ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังนี้



รูปที่ 5 แสดงสูตรโครงสร้างของสารเรืองแสงทุติยภูมิบางตัว

#### 4. เควนชิง (Quenching)

เควนชิงเป็นปรากฏการณ์ใด ๆ ก็ตามที่ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องลิวทิงทิลเลชันลดลง สาเหตุของการเกิดเควนชิงมีด้วยกันหลายประการ สามารถแยกเป็น ประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. เคมีคัลเควนชิง (Chemical Quenching) เกิดขึ้นเนื่องจากมีสารใน cocktail เข้าไปรบกวนขบวนการถ่ายทอดพลังงานจากโมเลกุลของตัวทำละลายไปยังสารเรืองแสง ทำให้ปริมาณการเรืองแสงจาก cocktail ลดลง สาเหตุของการเกิดเคมีคัลเควนชิง เกิดเนื่องมาจากความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ความเข้มข้นของสารเรืองแสงที่มากหรือน้อยเกินไป เนื่องมาจากออกซิเจนหรือสารประกอบจำพวกคลอโรฟอร์ม หรือคาร์บอนเตตระคลอไรด์

2. คัลเลอร์เควนชิง (Color quenching) สาเหตุของการเกิดเนื่องมาจากสีใด ๆ ก็ตามที่มีอยู่ใน cocktail และสามารถดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นจากสารเรืองแสงได้ ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณการเรืองแสงจาก cocktail ลดลง วิธีแก้ไขการเกิดเควนชิงจากสาเหตุนี้ทำได้โดยการเติมสารบางตัวลงไปเพื่อทำการฟอกสี เช่น พวกเปอร์ออกไซด์ (peroxide)

3. ออปติคัลเควนชิง (Optical quenching) สาเหตุของการเกิดคือ การดูดกลืนแสงเนื่องจากความขุ่นมัว ปลายนิ้วมือ หรือสิ่งตกค้างที่ขวดบรรจุ cocktail

เมื่อเกิดควมขิงขึ้นในการวัดตัวอย่างด้วยเครื่องลิวัดซินทิลเลชัน หมายความว่าจำนวนโฟตอนที่ยังโฟโตคาโทดนั้นลดลง และสัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีขนาดลดลง จึงเป็นเหตุให้สเปกตรัมเลื่อนไปทางซ้ายมือ และความสูงของสเปกตรัมก็ลดลงด้วย

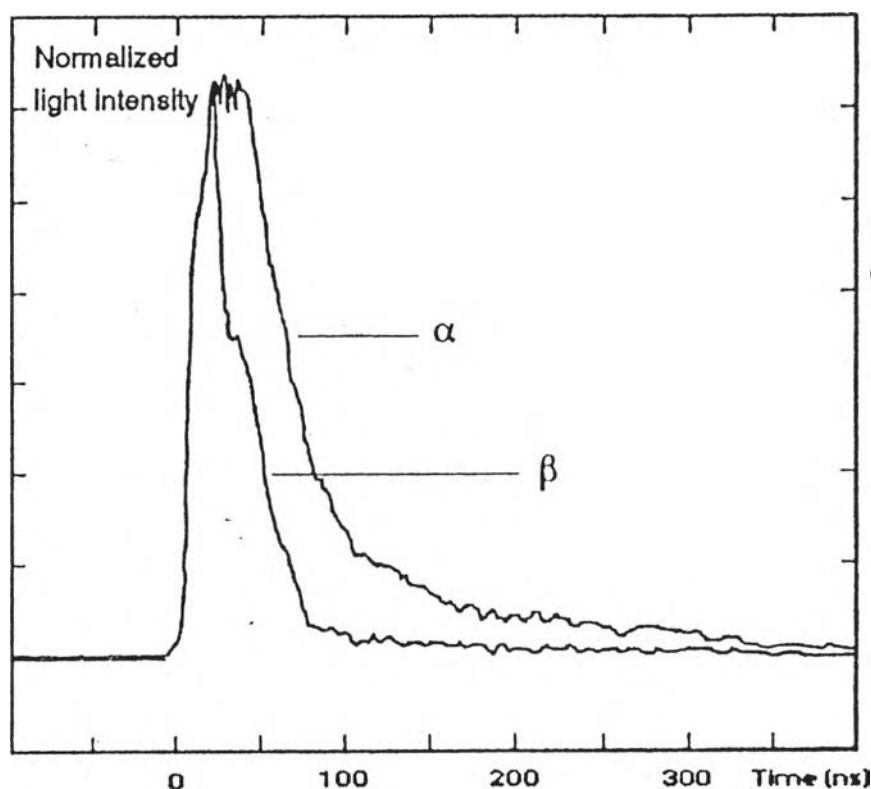
#### 5. การวัดรังสีแอลฟาด้วยเครื่องลิวัดซินทิลเลชัน

ปัจจุบันแนวโน้มของการนิยมใช้เครื่องลิวัดซินทิลเลชันมาวัดรังสีแอลฟามีมากขึ้น ความจริง ตั้งแต่เริ่มนำเอาเครื่องลิวัดซินทิลเลชันมาใช้วัดปริมาณรังสี ก็มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านที่พยายามใช้เครื่องลิวัดซินทิลเลชันมาวัดหาปริมาณรังสีแอลฟา แต่ก็ไม่ประสบผลสำเร็จ ซึ่งเนื่องมาจากสาเหตุใหญ่ ๆ 2 สาเหตุ สาเหตุแรก ประสิทธิภาพ ในการเกิดแสงโดยรังสีแอลฟามีประสิทธิภาพต่ำ (น้อยกว่ารังสีเบตาถึง 10 เท่า) เป็นเหตุ ให้ความสามารถในการแยกพลังงาน (energy resolution) ต่ำด้วยสาเหตุอีกประการหนึ่งคือ การแทรกสอด (interference) ของรังสีเบตาและรังสีแกมมา ซึ่งหมายถึงใน กรณีที่มีสารรังสีที่ให้รังสีทั้งแอลฟา เบตา และแกมมา เครื่องก็ไม่สามารถที่จะแยกวัดรังสีแต่ละชนิดได้ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่อง ลิวัดซินทิลเลชัน เป็นอย่างมาก พร้อมทั้งได้นำเอาระบบ pulse-shape discrimination เข้ามาใช้ จึงทำให้สามารถแก้ไขปัญหาการแทรกสอดของรังสีเบตาและรังสีแกมมาได้เป็นผลสำเร็จเมื่อนำเอาวิธีการสกัดด้วยของเหลวมาใช้แยกสารรังสีออกจากกันก่อนแล้วจึงนำมาวัดด้วยเครื่องลิวัดซินทิลเลชัน เพื่อแก้ไขปัญหาคือความสามารถในการแยกพลังงาน ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงเห็น ได้ว่าปัจจุบันการวัดรังสีแอลฟาด้วยเครื่องลิวัดซินทิลเลชัน สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 6. การวิเคราะห์โดยใช้รูปร่างของพัลส์ (Pulse Shape Analyser)

เทคนิค pulse shape discrimination นั้น เป็นเทคนิคที่ใช้ในนิวตรอนสเปกโตรสโคปี (neutron spectroscopy) อย่างกว้างขวาง Pulse shape discrimination อาศัยหลักที่ว่า สัญญาณที่เกิดขึ้นที่แอโนดของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ในเครื่องลิวัดซินทิลเลชันนั้น ประกอบด้วย สัญญาณ 2 แบบ คือ สัญญาณแบบ prompt และสัญญาณแบบ delayed เพื่อให้เข้าใจถึงการเกิดสัญญาณทั้ง 2 แบบ จำเป็นต้องเข้าใจถึงกระบวนการเรืองแสงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว นั่นคือ เมื่อรังสีผ่านตัวกลาง คือ cocktail พลังงานของรังสีก็จะถูกดูดกลืน และทำให้ โมเลกุลต่าง ๆ ใน cocktail อยู่ในสถานะกระตุ้น ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของ singlet state หรือรูปของ triplet state ในสถานะกระตุ้นแบบ singlet โมเลกุลนั้นจะ deexcited ไปสู่สถานะพื้น (ground state) โดยมีการให้โฟตอน เรียกว่าการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งเกิดเร็วมาก ประมาณน้อยกว่า  $10^{-8}$  วินาที สัญญาณที่เกิด จากฟลูออเรสเซนซ์นี้ เรียกว่าสัญญาณแบบ prompt ส่วนสัญญาณแบบ delayed เกิดจาก กรณีที่โมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้น อิเล็กตรอนตัวหนึ่งอาจเกิด spin กลับทาง โมเลกุล นั้นจะถูกเปลี่ยนจาก singlet state ไปเป็น triplet state โดยที่กระบวนการนี้ไม่มีการให้รังสีออกมา เรียกว่า Inter system crossing (ISC) โดย triplet state ที่มีพลังงานสูง ก็จะเกิดกระบวนการ vibrational Relaxation ลดพลังงาน ให้เป็น triplet state ที่มีพลังงานต่ำ และก้เกิดกระบวนการลดระดับพลังงานไปยัง สถานะพื้น โดยให้โฟตอนเกิดขึ้น เรียกฟอสฟอเรสเซนซ์ (phosphorescence) กระบวนการนี้จะใช้เวลาหรือมีชีวิติยาวประมาณมากกว่า  $10^{-3}$  วินาที เป็นที่ทราบแล้วว่า รังสีแอลฟามีอำนาจก่อให้เกิดการแตกตัวได้ดีกว่ารังสีเบตา หรืออาจจะ

กล่าวอีกนัยหนึ่งว่า รังสีแอลฟามีค่าการแตกตัวเป็นไอออนจำเพาะสูง (high specific ionization) สัดส่วนนี้ทำให้โมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะเปลี่ยนจาก singlet state ไปเป็น triplet state นั้น แปรผันโดยตรงกับค่าการแตกตัวเป็นไอออนจำเพาะ ดังนั้น รังสีแอลฟาจึงให้สัญญาณแบบ delayed มากกว่าทำให้ลักษณะพัลส์ของแอลฟาจะมีลักษณะแตกต่างจากของเบตา ดังแสดงในรูปที่ 6 จากลักษณะของพัลส์ที่แตกต่างกัน ทำให้เครื่องลิวทิตินทิลเลชันสมัยใหม่ สามารถแยกวัดรังสีแอลฟาและรังสีเบตาออกจากกันได้



รูปที่ 6 แสดง pulse shape  $^{241}\text{Am}$  ( $\alpha$ ) และ  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  ( $\beta$ ) ใน Optiphase HiSafe 2 จากเครื่อง ลิวทิตินทิลเลชัน Wallac 1411

ตัวอย่างเครื่องลิวทิตินทิลเลชัน เช่น LKB Quantulus 1220 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถใช้วัดได้ทั้งรังสีแอลฟา เบตา และแกมมา พลังงานต่ำ ที่ระดับความแรง รังสีต่ำ โดยที่การใช้งานนั้นจะเป็นการส่งผ่านชุดควบคุมคอมพิวเตอร์ ทางแป้นรหัส และมี โปรแกรมเฉพาะในการวัดและวิเคราะห์ ส่วนประกอบภายในระบบที่สำคัญ ๆ คือ

1. มีการออกแบบระบบเพื่อลดระดับแบคกราวด์
2. มีอุปกรณ์ในการตัดสิ่งรบกวน
3. มีระบบคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถเก็บข้อมูล และตรวจสอบความสมเหตุสมผล เพื่อให้การวัดและการวิเคราะห์ที่ดีที่สุด
4. ใช้ระบบ Anticoincidence
5. มี Multichannel analyzer

### การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

การสกัดด้วยตัวทำละลายสามารถทำได้โดยใช้ตัวทำละลายของเหลวชนิดหนึ่ง สกัดตัวถูกละลายออกจากของเหลวอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์อยู่ 3 วิธี คือ การสกัดแบบแบทช์ (Batch extraction) การสกัดแบบต่อเนื่อง (Continuous extraction) และการสกัดแบบเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์ (Counter current extraction) การสกัดจะเกิดขึ้นหรือไม่ ขึ้นอยู่กับการละลายของตัวถูกละลายในตัวทำละลาย ถ้าตัวถูกละลายสามารถละลายได้น้อย จำเป็นต้องใช้เทคนิคของการสกัดที่ทำไว้อย่างต่อเนื่อง และใช้ตัวทำละลายเพียงเล็กน้อย การสกัดจะเลือกใช้เทคนิค และวิธีการใดนั้น ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการสกัด หรือชนิดของตัวถูกละลาย และตัวทำละลาย ในการวิจัยครั้งนี้ จะขอกล่าวเฉพาะการสกัดแบบแบทช์เท่านั้น

#### 1. การสกัดแบบแบทช์ (Batch extraction)

เป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุดของวิธีสกัด ซึ่งมีหลักการคือ ทำให้ตัวถูกละลายที่ ละลายในตัวทำละลายที่ 1 (ปรกติคือ ตัวทำละลายของน้ำ) กระจายไปสู่ตัวทำละลายที่ 2 (ปรกติคือ ตัวทำละลายอินทรีย์) โดยตัวทำละลายทั้งสองชนิดนี้สัมผัสกันอย่างใกล้ชิด แต่ไม่ ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน วิธีการสกัดสามารถทำได้ง่าย ๆ คือ นำสารละลายของน้ำที่มีตัว ถูกละลายที่ต้องการแยกใส่ในกรวยแยก (Separatory funnel) แล้วเติมตัวทำละลาย อินทรีย์ตามลงไป ในกรวยแยก จากนั้นเขย่ากรวยแยก 2-3 นาที ให้คว่ำกรวยแยก แล้วเปิด จุกเพื่อระบายความดัน แล้วหงายกรวยเพื่อทำการเขย่าต่อ ทำแบบนี้ 2-5 ครั้ง จนกระทั่งการกระจายของตัวถูกละลายระหว่างตัวทำละลายทั้งสองถึงสมดุล ตั้งกรวยแยกทิ้งไว้ จน กระทั่งตัวทำละลายทั้งสองแยกชั้น เมื่อการสกัดถึงสมดุล อัตราส่วนของการกระจายของตัวถูกละลาย A ระหว่างตัวทำละลายที่ 1 และที่ 2 จะมีค่าคงที่ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของ การกระจาย (Distribution Coefficient; Kd)

$$Kd = \frac{[A]_2}{[A]_1}$$

- Kd คือ ค่าคงที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการกระจาย  
 [A]1 คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวทำละลายของน้ำ  
 [A]2 คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายนั้น หมายถึง อัตราส่วนของตัวถูกละลายที่อยู่ในตัวทำละลายทั้งสองเท่านั้น ไม่รวมถึงสปีชีส์อื่น ๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาข้างเคียง แต่ถ้านำผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมาคิดเป็นความเข้มข้นรวมของตัวถูกละลายทุกสปีชีส์ หมายถึงอัตราส่วนของการกระจาย (Distribution ratio, D)

$$D = \frac{[CA]_2}{[CA]_1}$$

เมื่อ  $[CA]_1$  คือ ความเข้มข้นรวมของ A ทุกสปีชีส์ ในตัวทำละลายของน้ำ  
 $[CA]_2$  คือ ความเข้มข้นรวมของ A ทุกสปีชีส์ ในตัวทำละลายอินทรีย์  
 D และ  $K_d$  จะมีค่าเท่ากัน เมื่อการสกัดไม่มีผลของปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นเลย

การสกัดสามารถทำเพียงครั้งเดียวได้ ถ้าค่าอัตราส่วนของการกระจายหรือ สัมประสิทธิ์ของการกระจายของตัวถูกละลายมีค่ามาก ๆ ( $> 1000$ ) แต่ถ้าค่าอัตราส่วนของการกระจาย หรือสัมประสิทธิ์ของการกระจายมีค่าไม่สูงมาก การสกัดด้วยกรวยแยกเพียงครั้งเดียว อาจทำให้สกัดแยกได้ไม่สมบูรณ์ เราสามารถทำการสกัดครั้งที่ 2 หรือ 3 ต่อไปได้อีก โดยการเติมตัวทำละลายอินทรีย์ลงในกรวยแยกอีกจำนวนหนึ่ง แล้วเขย่าจนถึงจุดสมดุล ตัวถูกละลายที่ยังมีเหลืออยู่ในชั้นของน้ำก็จะถูกแยกออกมาอีก ทำให้การแยกสมบูรณ์ขึ้น แสดงว่า สัมประสิทธิ์ของการสกัด นอกจากจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของการกระจายแล้ว ยังขึ้น อยู่กับจำนวนครั้งของการสกัดด้วย

## 2. เทคนิคในการทำให้การสกัดได้ผลดี

จากค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจาย ( $K_d$ ) และอัตราส่วนของการกระจาย (D) ทำให้ทราบว่ อัตราส่วนของการกระจายจะมีค่าต่างไปจากค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายเมื่อมีปฏิกิริยาข้างเคียงขึ้น ซึ่งทำให้ผลการสกัดดีขึ้น ดังนั้น สิ่งสำคัญในการ สกัดคือ ต้องทำให้ตัวถูกละลายกระจายไปสู่ตัวสกัดให้มากที่สุด หรือทำให้อัตราส่วนของการกระจาย (D) เพิ่มขึ้น ซึ่งทำได้ 2 วิธี

2.1 ทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงในชั้นตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อสารที่เราสนใจในตัวทำละลายของน้ำ กระจายไปสู่ตัวทำละลายอินทรีย์ แล้วเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น เกิดการแตกตัว เกิดการโพลีเมอไรซ์ หรือเกิดปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ที่มีอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ชั้น จะมีผลทำให้สารที่สนใจในชั้นน้ำ กระจายไปสู่ชั้นตัวทำละลายอินทรีย์ได้มากขึ้น

2.2 ทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงในชั้นน้ำ ถ้าสารที่สนใจจะสกัดไม่สามารถกระจายไปสู่ชั้นของตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เช่น อีออนของโลหะต่าง ๆ ในกรณีเช่นนี้ต้องมีการเติมสารประกอบบางชนิดลงไปชั้นของน้ำ เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา แล้วให้ ผลผลิตที่สามารถกระจายไปสู่ชั้นตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เช่น การเติมสารคอมเพลกซิงเอเจนต์ หรือลิแกนด์ลงในชั้นน้ำ จะทำให้อีออนของโลหะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่มีประจุ สามารถกระจายสู่ชั้นตัวทำละลายอินทรีย์ได้ ทำให้ผลการสกัดดีขึ้น

## 3. ประสิทธิภาพของการแยกตัวถูกละลายจากสารผสม

การสกัดตัวถูกละลายที่มีเพียงชนิดเดียวในตัวทำละลายชนิดหนึ่งไปสู่ตัวทำ ละลายอีกชนิดหนึ่งเป็นเรื่องที่ง่าย แต่ทำอย่างไรจึงจะสกัดแยกตัวถูกละลายที่มีมากกว่าหนึ่ง ชนิดออกจากกันได้ สมบูรณ์ เป็นเรื่องที่ยากและน่าสนใจ ซึ่งการแยกจะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่ ขึ้นกับอัตราส่วนของการกระจายของตัวถูกละลายแต่ละชนิด ถ้าตัวถูกละลายมีค่าอัตราส่วน ของการกระจายแตกต่างกันมาก การแยกย่อมทำได้ดี นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมี ของตัวถูกละลายอีกด้วย ถ้าตัวถูกละลาย 2 ชนิดมีค่า D ต่างกันและมีคุณสมบัติทางเคมี ต่างกัน พบว่า การสกัดเพียงครั้งเดียวสามารถแยกตัวถูกละลาย



ทั้งสองออกจากกันได้อย่าง สมบูรณ์ แต่ถ้าสารทั้งสองชนิดมีค่า  $D$  และสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกัน จะต้องทำการสกัดหลาย ๆ ครั้งจึงจะแยกสารทั้งสองได้

นอกจากนี้ การสกัดที่ให้ผลการสกัดที่ดีนั้น มีการเลือกสกัดเฉพาะตัวมากขึ้น (selectivity) สามารถทำได้โดยเติมสารมาสกินเอเจนต์ ซึ่งทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนชนิดมีประจุกับไอออนของโลหะ พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนชนิดที่มีประจุจะละลายในชั้นน้ำโดยไม่ถูกสกัด ทำให้เกิดการเลือกสกัดเฉพาะตัวที่สนใจได้