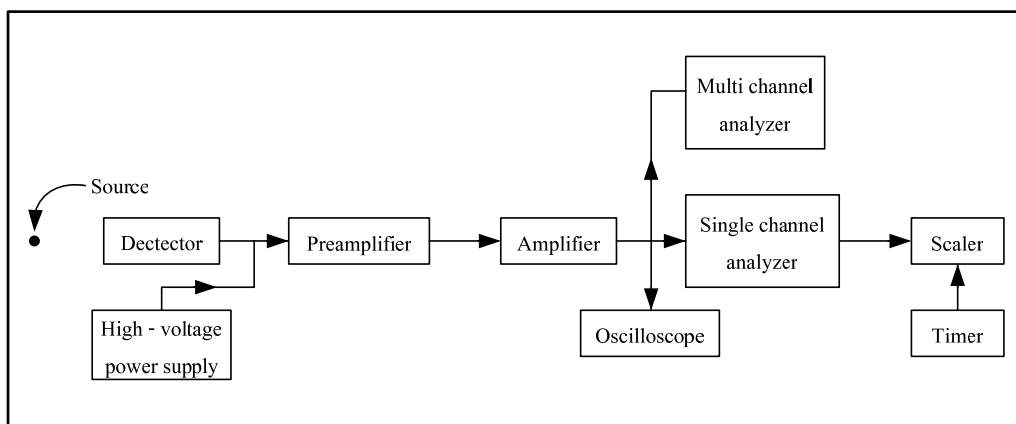


## ภาคผนวก ก

## การตรวจ และการวัดรังสี

ระบบพื้นฐานที่ใช้ในการตรวจ และวัดรังสี สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ ก.1



ภาพประกอบที่ ก.1 ระบบพื้นฐานที่ใช้ในการตรวจ และวัดรังสี

สามารถอธิบายส่วนประกอบต่างๆ ของภาพประกอบที่ ก.1 ได้ดังนี้

1 หัววัดรังสี (Detector) คุณสมบัติทั่วไปของหัววัดรังสีคือ การผลิตสัญญาณพัลส์ออกมา ทุกครั้งที่มีอนุภาคพุ่งชน ซึ่งหัววัดรังสีที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปได้แก่

- |                             |                                       |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1.1 หัววัดชนิดบรรจุด้วยแก๊ส | 1.6 อิมัลชัน โฟโตกราฟฟิค              |
| 1.2 หัววัดชนิดเปล่งแสงวับ   | 1.7 มาตรฐาน โคสแบบเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ |
| 1.3 หัววัดชนิดสารกึ่งตัวนำ  | 1.8 เครื่องวัดเซเรน โกว               |
| 1.4 แคมเบอร์ประกาย          | 1.9 หัววัดรังสีแกมมา                  |
| 1.5 แคมเบอร์ฟอง             |                                       |

2 แหล่งจ่ายกำลังความต่างศักย์สูง (High voltage power supply : HVPS) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จ่ายความต่างศักย์บวกหรือลบให้แก่หัววัดตามความต้องการของหัววัด ซึ่งส่วนใหญ่หัววัดต้องการความต่างศักย์สูงบวก

3 หน่วยขยายส่วนหน้า (Preamplifier) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อขาออกของหัววัดกับ ส่วนที่เหลือของระบบ รวมทั้งทำหน้าที่ลดแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่อาจเปลี่ยนเป็นสัญญาณ

โดยทั่วไปสัญญาณที่ออกมาจากหัววัดจะมีค่าค่อนข้างอ่อนคือ อยู่ในช่วง mV ซึ่งก่อนที่ทำการบันทึกต้องขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้น 1000 เท่าหรือมากกว่าด้วยการส่งสัญญาณดังกล่าว

ตามสายเคเบิลไปยังหน่วยขยายเพื่อทำการขยายสัญญาณ แต่จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สัญญาณที่ออกมาจากหัววัดค่อนข้างอ่อนทำให้อาจสูญเสียไปในขณะที่ส่งไปตามสายเคเบิลได้ จึงต้องมีหน่วยขยายส่วนหน้าขึ้น ซึ่งส่วนนี้จะต้องอยู่ใกล้หัววัดให้มากที่สุด เพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนรูป และลดการสูญเสียสัญญาณ โดยการจับคู่ความต้านทานเชิงซ้อนของหัววัดกับหน่วยขยาย นอกจากนั้นส่วนนี้ยังทำการขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยอีกด้วย

4 หน่วยขยาย (Amplifier) เป็นส่วนที่ใช้ขยายสัญญาณให้มีขนาดเพิ่มขึ้น 1000 เท่าหรือมากกว่า

5 หน่วยแสดงผล (Scaler) เป็นส่วนที่ใช้บันทึกพัลส์ โดยทุกพัลส์ที่เข้าสู่เครื่องนับจะไปเพิ่มค่าอีกหนึ่งให้กับค่าเดิม เมื่อสิ้นสุดช่วงการนับจำนวนนับทั้งหมดของพัลส์ที่บันทึกได้จะแสดงผลออกมา

6 เครื่องตั้งเวลา (Timer) เป็นส่วนที่เชื่อมโยงเข้ากับเครื่องนับ เพื่อกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการนับ

7 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยออสซิลโลสโคปจะถูกใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณว่ามีคุณภาพดีหรือไม่ในการวัดรังสี

8 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณช่องเดียว (Single channel analyzer : SCA) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กำจัดสัญญาณรบกวน และปฏิเสธพัลส์ที่ไม่ต้องการ

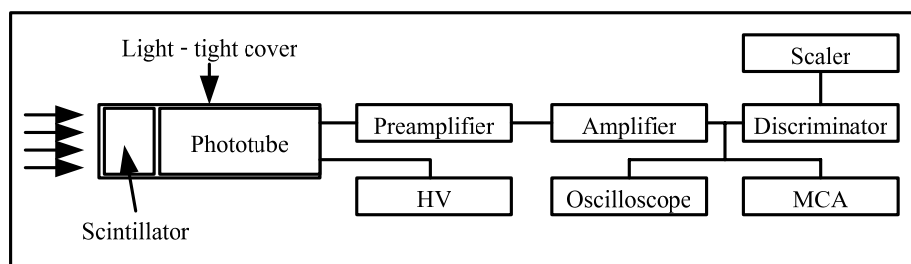
ในการขยายสัญญาณของหน่วยขยายนอกจากสัญญาณพัลส์ที่ออกมาจากหัววัดจะถูกขยายแล้ว สัญญาณรบกวนที่อยู่ในวงจรก็จะถูกขยายด้วยเช่นกัน จึงต้องอาศัยหน่วยนี้ในการคัดเลือกสัญญาณรบกวนออก นอกจากนั้นหน่วยนี้ยังสามารถใช้กำหนดพัลส์ที่มีพลังงานสูงกว่าที่ต้องการให้ไม่ถูกนับได้อีกด้วย

9 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง (Multi channel analyzer : MCA) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้บันทึก และเก็บพัลส์ที่ขึ้นอยู่กับขนาดความสูง ซึ่งหน่วยเก็บแต่ละหน่วยเรียกว่าช่อง โดยสามารถทราบความสัมพันธ์ในรูปปฏิภาคของพลังงานกับอนุภาคที่เข้าสู่หัววัดได้จากความสูงพัลส์ ซึ่งแต่ละพัลส์จะถูกเก็บในช่องเฉพาะที่สมนัยกับพลังงานนั้นๆ สำหรับการแจกแจงของพัลส์ในแต่ละช่องคือภาพของการแจกแจงพลังงานของอนุภาค และเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาการวัด สเปกตรัมที่ถูกบันทึกจะแสดงผลที่จอภาพของ MCA โดยแกนระนาบคือ หมายเลขช่องหรือพลังงานของอนุภาค ส่วนแกนตั้งคือ จำนวนอนุภาคที่ถูกบันทึกต่อช่วง

## ก.1 การวัดโฟตอนด้วยหัววัดเปล่งแสงวับ

### ก.1.1 หัววัดรังสีชนิดเปล่งแสงวับ

ตัวเปล่งแสงวับ (Scintillation) เป็นวัสดุ ของแข็ง ของเหลวหรือแก๊ส ที่ทำให้เกิดประกายหรือเปล่งแสงวับเมื่อมีรังสีพุ่งผ่าน โดยในปี ค.ศ. 1910 รัทเทอฟอร์ด ได้ใช้ผลึกสังกะสีซัลไฟด์ทำเป็นฉากเพื่อวัดรังสีแอลฟาที่กระเจิงมากระทบแล้วทำให้เกิดแสงวับที่สามารถวัดได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่มีประสิทธิภาพ ไม่แม่นยำ และกินเวลามากจึงเลิกใช้ไป จนกระทั่งมีการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถวัดสัญญาณแสงที่เกิดจากตัวเปล่งแสงวับขึ้น โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดังกล่าวคือ หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tube) ซึ่งสามารถขยายสัญญาณได้ประมาณ  $10^6$  เท่า สำหรับตำแหน่งของหลอดทวีคูณแสงในระบบวัดที่ใช้ตัวเปล่งแสงวับสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ ก.2



ภาพประกอบที่ ก.2 ระบบวัดที่ใช้ตัวเปล่งแสงวับ

ในการทำงานของหัววัดชนิดเปล่งแสงวับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังนี้

1 การดูดกลืนพลังงานของรังสีตกกระทบโดยตัวเปล่งแสงวับ และผลิตโฟตอนในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองเห็นได้

2 ขยายแสงวับที่ได้ในข้อ 1 ด้วยหลอดทวีคูณแสง และผลิตพัลส์ส่งออก

โดยตัวเปล่งแสงวับสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ ตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์ ตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์ และตัวเปล่งแสงวับสภาพแก๊ส ซึ่งรายละเอียดของตัวเปล่งแสงวับชนิดต่างเป็นดังนี้

#### ก.1.1.1 ตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์

ผลึกส่วนใหญ่ของตัวเปล่งแสงวับจะอยู่ในรูปผลึกโลหะแอลคาไลน์ โดยมีสิ่งแปลกปลอมเจือปนอยู่ด้วยเล็กน้อย ตัวอย่างเช่น NaI(Tl), CsI(Tl), CsI(Na), LiI(Eu) และ  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  ซึ่งธาตุที่อยู่ในวงเล็บคือ สิ่งแปลกปลอมหรือตัวกักกัมมันต์ที่ทำหน้าที่ในการเปล่งแสงของผลึก

### ก.1.1.1.1 กลไกของกระบวนการเปล่งแสงวับ

การเปล่งแสงของตัวเปล่งแสงวับอนินทรีย์สามารถอธิบายได้ในเทอมของแถบพลังงาน อนุญาต และต้องห้ามดังภาพประกอบที่ ก.3 โดยแถบอินยอมล่างสุดเรียกว่าแถบเวเลนซ์ (Valence band) และแถบอินยอมถัดมาเรียกว่าแถบการนำ (Conduction band) ซึ่งในสถานะพื้นแถบเวเลนซ์ จะมีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็ม โดยแถบการนำจะว่างเปล่า

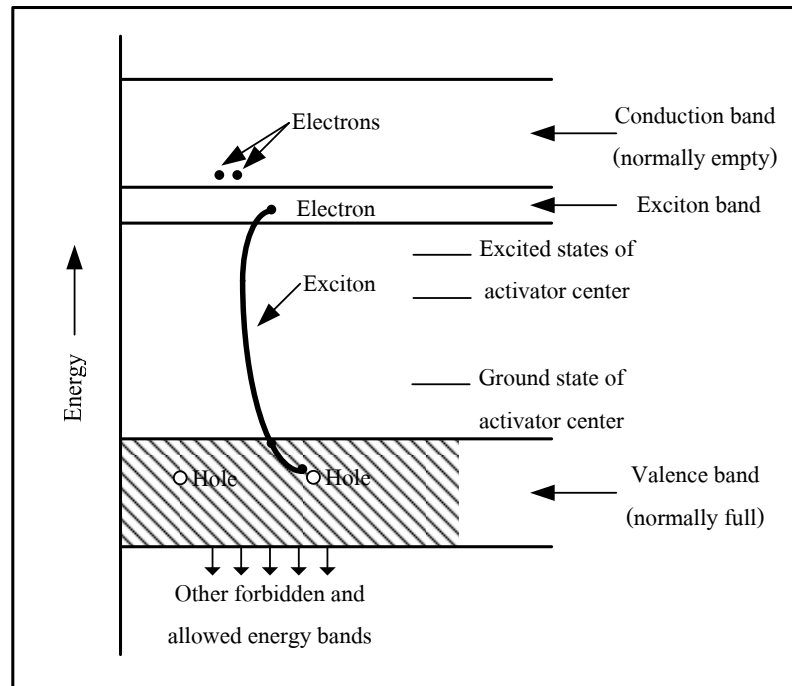
เมื่ออิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานเพียงพอจากรังสีตกกระทบ อิเล็กตรอนดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำ และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแลกทิกซ์ โดยช่องว่างในแถบเวเลนซ์ที่เกิดจากอิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายไปยังแถบการนำเรียกว่าหลุม (Hole) ซึ่งหลุมดังกล่าวจะเคลื่อนที่ได้เช่นกัน และถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากรังสีตกกระทบไม่เพียงพอ จะทำให้เกิดการจับคู่กันระหว่างอิเล็กตรอนกับหลุมเรียกว่าเอกซ์ไซทอน (Exciton) ขึ้นแทน

ถ้าพิจารณาเอกซ์ไซทอนในเทอมสถานะพลังงานจะสมนัยกับการยกระดับของอิเล็กตรอนไปยังสถานะที่สูงกว่าแถบเวเลนซ์แต่ต่ำกว่าแถบการนำ โดยสถานะเอกซ์ไซทอนจะมีลักษณะเป็นแถบบางๆ ที่มีระดับบนของแถบซ้อนทับกับระดับล่างของแถบการนำดังภาพประกอบที่ ก.3 ซึ่งความกว้างของแถบเอกซ์ไซทอนจะอยู่ในช่วง 1 eV ในขณะที่ช่องว่างระหว่างแถบเวเลนซ์กับแถบการนำจะอยู่ในช่วง 8 eV

นอกจากสถานะพลังงานจะเกิดจากแถบเอกซ์ไซทอนแล้วยังอาจเกิดขึ้นระหว่างแถบการนำ เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกหรือสิ่งเจือปนได้อีกด้วย โดยสถานะกระตุ้นจะเกิดขึ้นจากอะตอมก่อกัมมันต์ที่อยู่ในสถานะพื้นหรือสถานะกระตุ้นก็ได้ และถ้าอะตอมเจือปนถูกยกระดับไปยังสถานะกระตุ้นจะมีการทรานซิชันของอะตอมเจือปนจากสถานะกระตุ้นไปยังสถานะพื้นด้วยการปลดปล่อยโฟตอนในช่วงเวลา  $10^{-8}$  s ออกมา ซึ่งโฟตอนที่เกิดขึ้นคือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็นได้

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถสรุปขั้นตอนการเกิดแสงวับได้ใหม่ดังนี้

- 1 รังสีพุ่งผ่านผลึก
- 2 อิเล็กตรอนถูกยกระดับไปสู่แถบการนำ
- 3 เกิดหลุมขึ้นในแถบเวเลนซ์
- 4 เกิดเอกซ์ไซทอน
- 5 ศูนย์กลางการก่อกัมมันต์ถูกยกระดับไปสู่สถานะกระตุ้น โดยการดูดกลืนอิเล็กตรอน หลุม และเอกซ์ไซทอน
- 6 การลดภาวะกระตุ้นซึ่งติดตามด้วยการปลดปล่อยโฟตอน

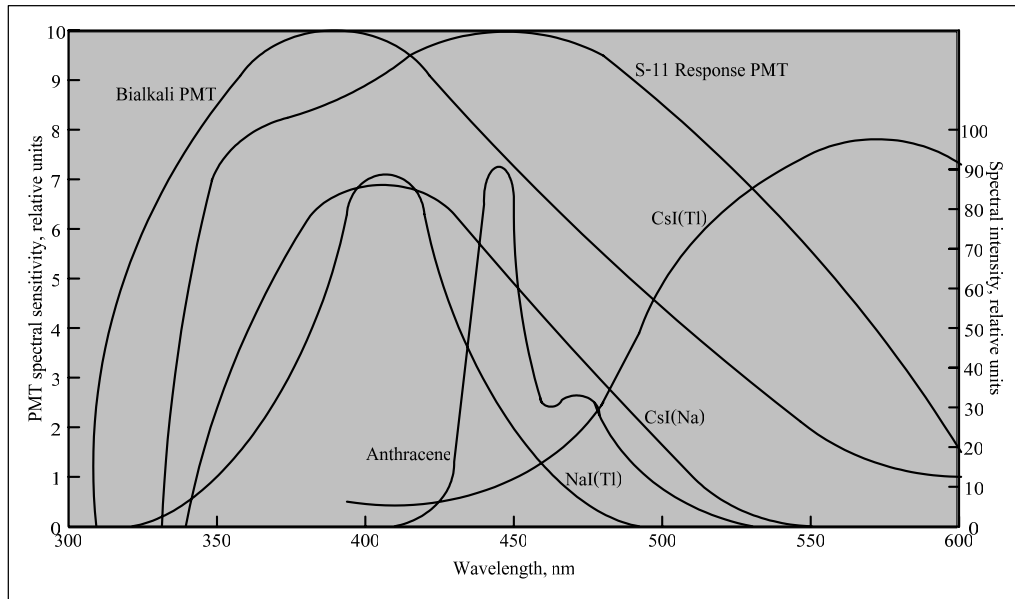


ภาพประกอบที่ ก.3 แถบพลังงานอินยอม และต้องห้ามของผลึก

จะเห็นได้ว่าการก่อกัมมันต์ไม่ได้เป็นตัวหลักในการปลดปล่อยแสง โดยตัวหลักของการปลดปล่อยแสงจริงๆ แล้วคือ การทรานซิชันของอะตอมเจือปน ซึ่งเกิดจากพลังงานตกกระทบส่วนใหญ่จะจ่ายไปยังแลททิซของผลึกก่อให้เกิดความร้อนขึ้น จากนั้นอะตอมก่อกัมมันต์จะส่งผ่านพลังงานจากตัวผลึกไปยังสิ่งเจือปน โดยการเปล่งแสงวิบจะเกิดจากการทรานซิชันจากสถานะกระตุ้นไปเป็นสถานะพื้นของอะตอมเจือปนนั่นเอง

โดยความยาวคลื่นของแสงส่งออก และแสงที่เปล่งจะเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวเปล่งแสงวิบ ซึ่งแสงที่ส่งออกจะมีผลต่อจำนวนของโฟโตอิเล็กตรอนที่ผลิตขึ้นที่ขาเข้าของหลอดทวีคูณแสง และส่งผลกระทบต่อขนาดความสูงของพัลส์ที่ผลิตขึ้นทางขาออกของระบบ

สำหรับสเปกตรัมที่เปล่งออกมาจาก NaI(Tl), CsI(Tl) และ CsI(Na) รวมทั้งการตอบสนองของวัสดุทำแคโทดของหลอดโฟโตแอสคได้ดังภาพประกอบที่ ก.4 และข้อมูลของตัวเปล่งแสงวิบอินทรีย์ที่สำคัญๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ ก.1

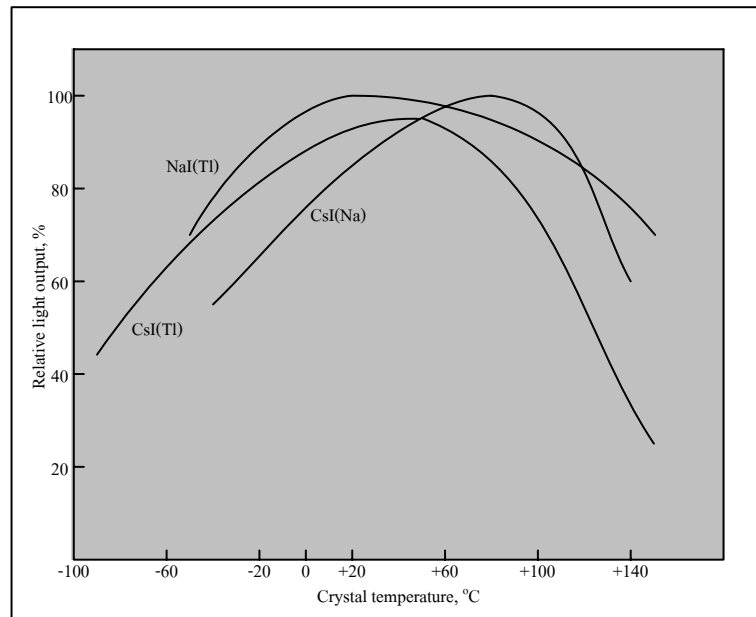


ภาพประกอบที่ ก.4 การปลดปล่อยสเปกตรัมของ NaI(Tl), CsI(Tl), CsI(Na) และแอนทราซีน  
เปรียบเทียบกับสเปกตรัมตอบสนองของวัสดุ 2 ชนิด ของโฟโตแคโทด

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของตัวแปลงแสงวัับอินทรีย์บางชนิด

วัสดุ	ความยาวคลื่น ปลดปล่อยสูงสุด (nm)	ประสิทธิภาพ การแปลงแสงวัับ สัมพัทธ์ (%)	เวลาการสลายตัว ( $\mu$ s)	ความหนาแน่น ( $10^3$ kg/m <sup>3</sup> )
NaI(Tl)	410	100	0.23	3.67
CaF <sub>2</sub> (Eu)	435	50	0.94	3.18
CsI(Na)	420	80	0.63	4.51
CsI(Tl)	565	45	1.80	4.51
Bi <sub>4</sub> Gr <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	480	8	0.30	7.13
CdWO <sub>4</sub>	530	20	0.90	7.90
<sup>6</sup> LiI(Eu)	470	30	0.94	3.49

นอกจากนั้นแสงที่เปล่งจากตัวแปลงแสงวัับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งการตอบสนองของ NaI(Tl), CsI(Tl) และ CsI(Na) กับอุณหภูมิแสงได้ดังภาพประกอบที่ ก.5



ภาพประกอบที่ ก.5 อุณหภูมิที่ขึ้นอยู่กับแสงส่งออกของ NaI(Tl), CsI(Tl) และ CsI(Na)

#### ก.1.1.1.2 การขึ้นต่อเวลาของการปลดปล่อยโฟตอน

เนื่องจากโฟตอนถูกปลดปล่อยจากการสลายสถานะกระตุ้น เวลาในการปล่อยจึงขึ้นอยู่กับค่าคงที่การสลายของสถานะต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นไปตามกฎการสลายแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังสมการ (ก.1)

$$N(t) = N_0 e^{-t/T} \quad (\text{ก.1})$$

โดยที่  $N(t)$  คือ จำนวนของโฟตอนที่ปลดปล่อย ณ เวลา  $t$

$T$  คือ เวลาสลายตัวของตัวเปล่งแสงวับ

สถานะกระตุ้นส่วนใหญ่ในตัวเปล่งแสงวับจะมีชีวิตเฉลี่ย  $T$  ใกล้เคียงกันแต่จะมีบางสถานะที่มีชีวิตเฉลี่ยยาวนานกว่า โดยจะเสริมในส่วนการสลายตัวในช่วงเวลาต่อมา ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าเรืองภายหลัง (Afterglow) ดังนั้นในการวัดเฉพาะอย่างที่ต้องการตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์ควรใช้สัญญาณส่งออกของหลอดโฟโตที่มีตัวเปล่งแสงวับ 2 ชนิด ที่ไม่ต้องคำนึงถึงการเรืองภายหลัง ซึ่งได้แก่  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  และ  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$

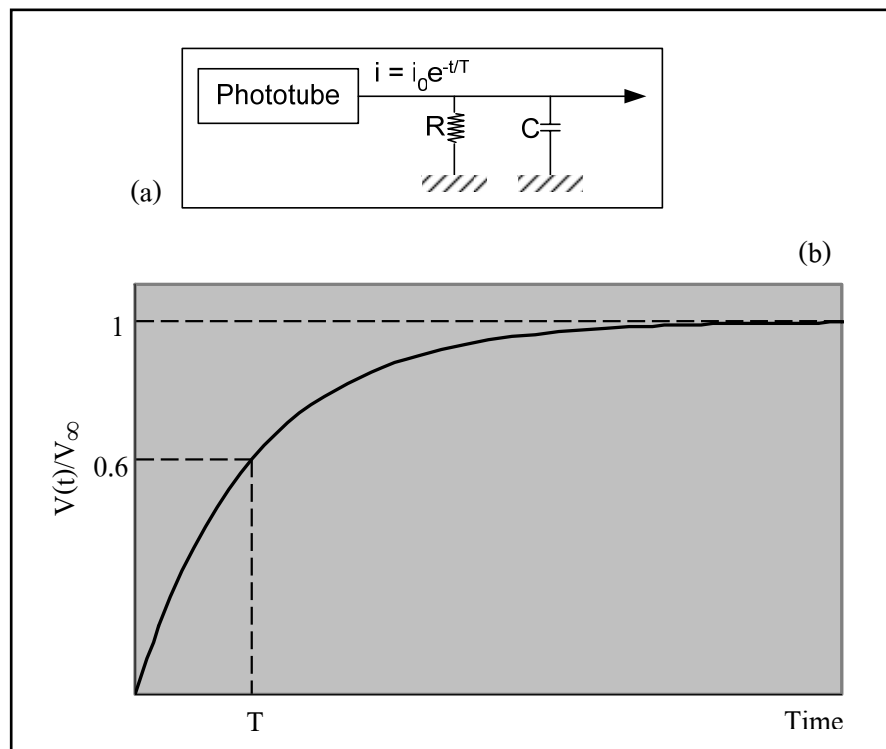
ในระบบวัดที่ใช้ตัวเปล่งแสงวับ แสงที่ผลิตออกมาจะถูกขยายด้วยหลอดทวีคูณแสง และเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งมีพฤติกรรมแบบเอกซ์โพเนนเชียล จากนั้นกระแสจะถูกป้อน

ให้กับวงจร RC ดังแสดงในภาพประกอบที่ ก.6 โดยพัลส์ของความต่างศักย์จะถูกผลิตในรูปของความสัมพันธ์ดังสมการ (ก.2)

$$V(t) = V_{\infty} (e^{-t/RC} - e^{-t/T}) \quad (\text{ก.2})$$

แต่ในทางปฏิบัติค่า RC จะถูกเลือกให้อยู่ในช่วง 200 – 300 ms ดังนั้นในช่วงเวลาที่สั้นๆ ( $T \ll RC$ ) สมการ (ก.2) จะอยู่ในรูป

$$V(t) = V_{\infty} (1 - e^{-t/T}) \quad (\text{ก.3})$$



ภาพประกอบที่ ก.6 (a) พัลส์ความต่างศักย์ที่เป็นผลมาจากกระแสเอกซ์โพเนนเชียล

(b) รูปร่างพัลส์สำหรับ  $T \ll RC$

#### ก.1.1.1.3 คุณสมบัติของตัวเปล่งแสงวับอนินทรีย์บางชนิด

NaI(Tl) เป็นตัวเปล่งแสงวับที่ใช้กันมากในการวัดรังสีแกมมา โดยผลิตอยู่ในรูปของผลึกเดี่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด 75 cm หนา 2.5 cm มีความหนาแน่น  $3.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  และเนื่องจาก NaI มีเลขอะตอมที่สูงประกอบกับปริมาตรขนาดใหญ่จึงมีประสิทธิภาพในการวัดรังสี



แกมมาสูงมากเมื่อทำเป็นหัววัด ซึ่งสเปกตรัมที่ปล่อยออกมาจาก NaI(Tl) จะมียอดฟีกที่ 410 nm โดยประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแสงของ NaI(Tl) จะมีค่าสูงสุดในกลุ่มของตัวเปล่งแสงวับทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ ก.1 แต่อย่างไรก็ตาม NaI(Tl) ก็มีคุณสมบัติที่ไม่จำเป็นต้องการหลายประการ เช่น แดกหักง่าย ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และเป็นตัวที่ดูดความชื้นได้ดีมาก นอกจากนั้น NaI จะมีโพแทสเซียม (K) จำนวนเล็กน้อยผสมอยู่ ซึ่งโพแทสเซียมดังกล่าวจะเป็นตัวกำเนิดรังสีกัมมันต์ให้กับโพแทสเซียม - 40 ( $K - 40$ ) ได้

**CsI(Tl)** เป็นตัวเปล่งแสงวับที่มีความหนาแน่น  $4.51 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  และมีเลขอะตอมที่สูงกว่า NaI ทำให้มีประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมามากกว่า โดยประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงของ CsI(Tl) มีค่าประมาณ 0.45 เท่าของ NaI(Tl) ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิในโตรเจนเหลว (77 K) CsI บริสุทธิ์จะให้แสงออกมาเท่ากับ NaI(Tl) ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับสเปกตรัมที่ปลดปล่อยออกมาจาก CsI(Tl) จะอยู่ในช่วง 420 – 600 nm

คุณสมบัติที่สำคัญของ CsI(Tl) คือ ไม่ค่อยดูดความชื้น นิ่ม และคล้ายพลาสติกมากกว่า NaI รวมทั้งไม่มีโพแทสเซียมปนอยู่ นอกจากนั้นยังสามารถทนต่อการกระแทก การเร่ง การสั่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เหมาะกับการทดลองในอวกาศ

**CsI(Na)** เป็นตัวเปล่งแสงวับที่มีความหนาแน่น และเลขอะตอมเหมือนกับ CsI(Tl) โดยมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงอยู่ที่ 0.85 เท่าของ NaI(Tl) สำหรับสเปกตรัมที่ปล่อยออกมาจาก CsI(Na) จะอยู่ในช่วง 320 – 540 nm และคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างของ CsI(Na) คือ การดูดความชื้นเพียงเล็กน้อย

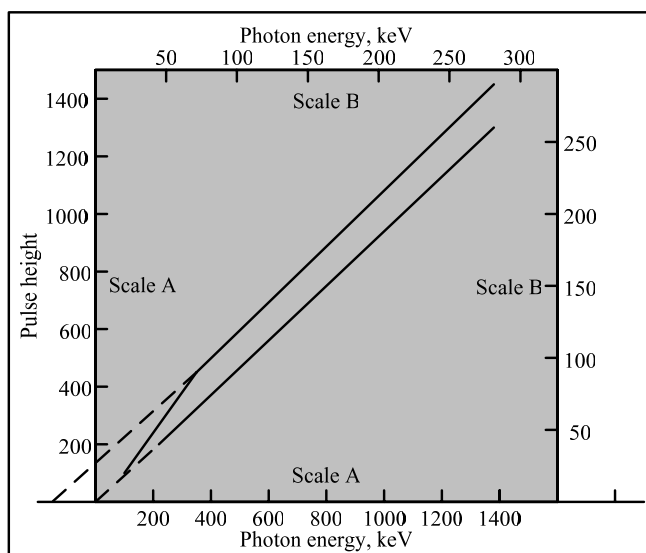
**CaF<sub>2</sub>(Eu)** เป็นตัวเปล่งแสงวับที่ประกอบด้วยวัสดุเลขอะตอมต่ำจึงมีประสิทธิภาพในการวัดอนุภาคบีตา รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมาพลังงานต่ำได้ดี โดย CaF<sub>2</sub>(Eu) จะมีลักษณะคล้ายไพเร็กซ์ (Pyrex) และสามารถทำให้อยู่ในรูปทรงทางเรขาคณิตใดๆ ก็ได้ด้วยการตัด และขัด นอกจากนั้น CaF<sub>2</sub>(Eu) จะไม่ละลาย และเนื้อจึงเหมาะกับการทดลองที่เกี่ยวกับไอโซโทปรังสีที่เป็นของเหลว สำหรับประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงของ CaF<sub>2</sub>(Eu) อยู่ที่ 0.50 เท่าของ NaI(Tl) และสเปกตรัมที่ปล่อยออกมาจาก CaF<sub>2</sub>(Eu) อยู่ในช่วง 405 – 490 nm

**LiI(Eu)** เป็นตัวเปล่งแสงวับที่มีความหนาแน่น  $4.06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  และมีค่าคงที่การสลายตัวเท่ากับ  $1.1 \times 10^{-9} \text{ s}$  ซึ่งเหมาะกับการวัดนิวตรอนเทอร์มัลไปจนถึงปฏิกิริยา  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$  รวมทั้งอนุภาคแอลฟา และไตรตอน โดย LiI(Eu) จะมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงอยู่ที่ 0.33 เท่าของ NaI และสเปกตรัมที่ปล่อยออกมาจะมียอดฟีกอยู่ที่ 470 nm สำหรับคุณสมบัติที่สำคัญของ LiI(Eu) คือ การดูดความชื้นได้ดีมาก และสามารถถูกทำลายได้ด้วยโคสของนิวตรอน

ตัวเปล่งแสงวับอนินทรีย์อื่นๆ ยังมีตัวเปล่งแสงวับอื่นๆ ที่ออกแบบมาใช้งานเฉพาะ เช่น  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{CdWO}_4$ ,  $\text{MF}_2:\text{UF}_4:\text{CeF}_3$  (เมื่อ M แทนธาตุโคธาตุนึงเหล่านี้คือ Ca, Sr และ Ba) โดยตัวเปล่งแสงวับตัวสุดท้ายมี  $\text{UF}_4$  2 % และใช้ Ce เป็นสารเรืองแสงซึ่งเหมาะสำหรับใช้วัดผลผลิตจากการแบ่งแยกนิวเคลียร์ (Fission fragment)

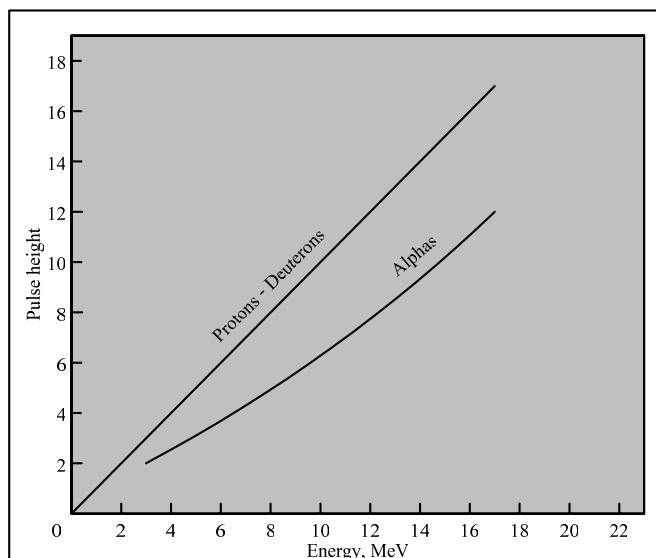
#### ก.1.1.1.4 การตอบสนองของตัวเปล่งแสงวับอนินทรีย์

โฟตอน การตอบสนองของ NaI(Tl) ต่อแกมมาเป็นแบบเชิงเส้น ยกเว้นโฟตอนที่มีพลังงานต่ำกว่า 400 keV จะมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังภาพประกอบที่ ก.7



ภาพประกอบที่ ก.7 ความสูงพัลส์ต่อพลังงานของผลึก NaI(Tl) โดยบริเวณที่ต่ำกว่า 300 keV จะถูกขยายออกเป็นกราฟ B เพื่อแสดงความไม่เป็นเชิงเส้น

อนุภาคที่มีประจุ สำหรับโฟตอน และนิวตรอนการตอบสนองของตัวเปล่งแสงวับจะแปรผันตรงกับพลังงานของอนุภาค (อย่างน้อย  $E > 1$  MeV) ส่วนอนุภาคแอลฟาการเป็นสัดส่วนต่อกันจะเริ่มที่ 15 MeV ขึ้นไป ดังภาพประกอบที่ ก.8

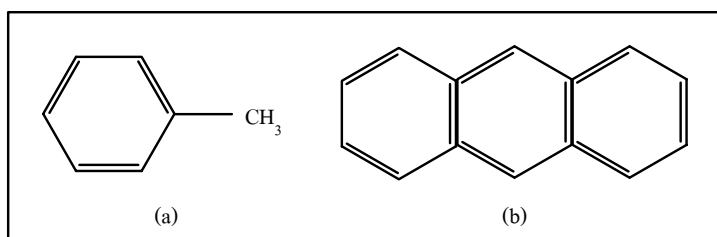


ภาพประกอบที่ ก.8 ความสูงพัลส์ต่อพลังงานของ NaI(Tl) ที่เป็นผลมาจากอนุภาคมีประจุ

นิวตรอน เนื่องจากการวัดนิวตรอนเป็นการวัดทางอ้อมโดยอาศัยอนุภาคมีประจุที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ นั่นคือ ในการวัดนิวตรอนจะต้องดูจากการตอบสนองของอนุภาคแอลฟา และโปรตอน ซึ่ง LiI(Eu) เป็นผลึกที่ใช้วัดนิวตรอนได้ดีเช่นเดียวกับ NaI(Tl)

#### ก.1.1.2 ตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์

วัสดุที่มีประสิทธิภาพเป็นตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์จะอยู่ในกลุ่มของสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลระนาบที่ทำให้เกิดวงแหวนเบนซีนอยด์ (Benzenoid) เช่น ทูโลอีน (Toluene) และแอนทราซีน (Anthracene) ดังแสดงในภาพประกอบที่ ก.9



ภาพประกอบที่ ก.9 โครงสร้างโมเลกุลของ (a) ทูโลอีน และ (b) แอนทราซีน

ตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์เกิดจากการรวมสารประกอบอย่างเหมาะสมเข้าด้วยกัน ซึ่งจำแนกเป็นแบบเดี่ยว (Unitary) คู่ (Binary) ... ตามลำดับ โดยขึ้นอยู่กับจำนวนสารประกอบในของผสมเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งสารที่มีความเข้มข้นสูงสุดเรียกว่าตัวทำละลาย (Solvent) ส่วนที่เหลือเรียกว่าตัวถูก

ละลาย (Solute) สำหรับตัวเปล่งแสงวับแบบคู่จะประกอบด้วยตัวทำละลาย และตัวถูกละลาย ในขณะที่ตัวเปล่งแสงวับแบบสามจะทำจากตัวทำละลาย ตัวถูกละลายปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ซึ่งรายชื่อของสารประกอบที่ใช้บ่อยๆ ได้แสดงไว้ดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 สารประกอบตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์

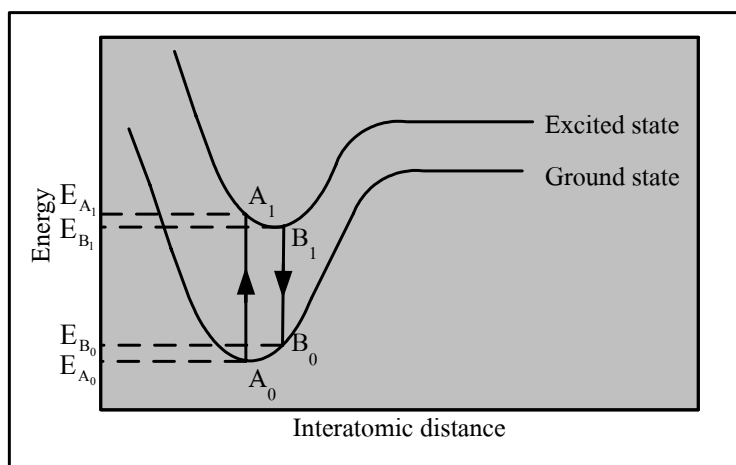
Compound	Formula	Application
Benzene	$C_6H_6$	S
Toluene	$C_6H_5CH_3$	S
P – Xylene	$C_6H_4(CH_3)_2$	S
1, 2 , 4 – Trimethylbenzene (pseudocumene)	$C_6H_3(CH_3)_3$	S
Hexamethylbenzene	$C_6(CH_3)_6$	S
Styrene monomer	$C_6H_5C_2H_3$	S
Vinyltoluene monomer	$C_6H_4CH_3C_2H_3$	S
Naphthalene	$C_{10}H_8$	S', C
Anthracene	$C_{14}H_{10}$	C
Biphenyl	$C_{12}H_{10}$	S'
P – Terphenyl	$C_{18}H_{14}$	C, PS
P – Quaterphenyl	$C_{24}H_{18}$	C
trans – Stilbene	$C_{14}H_{12}$	C
Diphenylacetylene	$C_{14}H_{10}$	C
1, 1', 4, 4' – Tetraphenylbutadiene	$C_{28}H_{22}$	SS
Diphenylstilbene	$C_{26}H_{20}$	SS
PPO (2, 5 – diphenyloxazole)	$C_{15}H_{11}NO$	PS
$\alpha$ – NPO [2 – (1 – Naphthyl) – 5 – phenyloxazole]	$C_{19}H_{13}NO$	PS
PBD [2 – Phenyl, 5 – (4 – biphenyl) – 1, 3, 4 – oxadiazole]	$C_{20}H_{14}N_2O$	PS
BBO [2, 5 – Di(4 – biphenyl) – oxazole]	$C_{27}H_{19}NO$	SS
POPOP {1, 4 – Bis[2 – (5 – phenyloxazolyl)] – benzene}	$C_{24}H_{16}N_2O_2$	SS
TOPOT {1, 4 – Di – [2 – (5 – p – tolyloxazolyl)] – benzene}	$C_{24}H_{20}N_2O_2$	SS

\* S – primary solvent; S' – secondary solvent; PS – primary solute;

SS – secondary solute; C – crystal scintillator

### ก.1.1.2.1 กลไกของกระบวนการเปล่งแสงวิบ

การผลิตแสงในตัวเปล่งแสงวิบอินทรีย์เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุล ซึ่งแผนภาพระดับพลังงานอย่างง่ายของโมเลกุลแสดงได้ดังภาพประกอบที่ ก.10 โดยกำหนดให้สถานะพื้นของโมเลกุลอยู่ที่จุด A ซึ่งซ้อนทับกับค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์ เมื่อรังสีพุ่งผ่าน ตัวเปล่งแสงวิบจะจ่ายพลังงานให้กับโมเลกุล และยกระดับไปยังสถานะกระตุ้น ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนสถานะจาก  $A_0$  ไปเป็น  $A_1$  โดยตำแหน่ง  $A_1$  ไม่ใช่ตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำสุด โมเลกุลจะปลดปล่อยพลังงานผ่านการสั่นของแลกทิจ (พลังงานจะกระจายไปในรูปความร้อน) และเคลื่อนไปยังจุด  $B_1$  ซึ่งจุด  $B_1$  ยังคงเป็นสถานะกระตุ้น และในบางกรณีโมเลกุลจะทรานซิชั่นจาก  $B_1$  ไปเป็น  $B_0$  ตามด้วยการปลดปล่อยโฟตอนพลังงาน  $E_{B_1} - E_{B_0}$  ออกมา สำหรับเวลาของการทรานซิชั่นจะอยู่ที่  $10^{-8}$  s ข้อสังเกตคือ พลังงานของโฟตอนที่ปลดปล่อย ( $E_{B_1} - E_{B_0}$ ) จะน้อยกว่าพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้น ( $E_{A_1} - E_{A_0}$ ) ซึ่งความแตกต่างนี้มีความสำคัญมากเพราะว่าสเปกตรัมที่ปล่อยออกมาของตัวเปล่งแสงวิบจะซ้อนทับกับสเปกตรัมดูดกลืนทำให้ไม่มีการเปล่งแสงวิบเกิดขึ้น



ภาพประกอบที่ ก.10 แผนภาพระดับพลังงานอย่างง่ายของโมเลกุล โดยแกน x คือ ระยะทางระหว่างอะตอม และแกน y คือ พลังงานศักย์ของโมเลกุล

ซึ่งข้อสังเกตที่สำคัญ และน่าสนใจของตัวเปล่งแสงวิบอินทรีย์ และอนินทรีย์คือ เวลาตอบสนองของสารอินทรีย์มีค่า  $10^{-6}$  s ในขณะที่สารอินทรีย์มีค่าน้อยกว่า  $10^{-8}$  s ซึ่งเหมาะสมกับการวัดที่ต้องการความรวดเร็ว

### ก.1.1.2.2 คุณสมบัติของตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์

ผลึกตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์ ตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์ไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวก่อกัมมันต์หรือสิ่งเจือปนใดๆ เพื่อการเปล่งแสงของผลึก เพราะจะเป็นการทำให้เกิดการลดลงของความเข้มแสงที่ส่งออก ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำผลึกจึงต้องทำให้บริสุทธิ์ โดยผลึกที่เหมาะสมมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ

1 แอนทราซีน (Anthracene) เป็นผลึกที่มีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงสูงสุดของตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์ โดยมีความหนาแน่นเท่ากับ  $1.25 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  ถึงอย่างไรก็ตามแอนทราซีนก็ยังมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงเพียง 1 ใน 3 ของ NaI(Tl) เท่านั้น แต่เวลาการสลายตัวของแอนทราซีนจะอยู่ที่  $3 \times 10^{-8} \text{ s}$  ซึ่งน้อยกว่าผลึกอินทรีย์มาก นอกจากนั้นแอนทราซีนยังสามารถทำให้อยู่ในหลายรูปแบบ และขนาดได้

2 ทรานส์ – สไทล์บีน (Trans – Stilbene) จะมีความหนาแน่น  $1.15 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  และมีเวลาการสลายตัวอยู่ในช่วง  $4 \times 10^{-9}$  ถึง  $8 \times 10^{-9} \text{ s}$  โดยประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงจะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของแอนทราซีน ส่วนคุณสมบัติที่สำคัญของทรานส์ – สไทล์บีนคือ สามารถทำให้ใสไม่มีสีได้ นอกจากนั้นยังสามารถปลูกผลึกเดี่ยวให้มีขนาดใหญ่ถึงหลายมิลลิเมตรได้อีกด้วย และข้อสังเกตอีกอย่างที่น่าสนใจคือ ผลึกสไทล์บีนจะไวต่อความร้อน และแรงกระแทก

ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติของตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์บางชนิด

วัสดุ	ความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยสูงสุด (nm)	ประสิทธิภาพการเปล่งแสงวับสัมพัทธ์ (%)	เวลาการสลายตัว (ns)	ความหนาแน่น ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ )
แอนทราซีน	445	100	30	1.25
ทรานส์ – สไทล์บีน	385	60	4 -8	1.16
NE 102	350 – 450	65	2	1.06
NE 110	350 – 450	60	3	1.06
NE213 (ของเหลว)	350 – 450	60	2	0.867
PILOT B	350 – 450	68	2	1.06
PILOT Y	350 – 450	64	3	1.06

ตัวเปล่งแสงวับของเหลวอินทรีย์ ประกอบด้วยของผสมทำละลายกับตัวถูกละลายหนึ่งหรือสองชนิด โดยสารประกอบที่ใช้เป็นตัวทำละลายได้แก่ ไซลีน ทูโลอิน และเฮกซะเมทิลเบนซีน ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้งานได้ดีคือ พารา – เทอร์ฟีนิล (p – terphenyl) PBD และ POPOP

ในตัวเปล่งแสงวับแบบคู่ (Binary scintillator) พลังงานของรังสีตกกระทบจะสูญเสียให้กับตัวทำละลายเกือบทั้งหมด ซึ่งการเปล่งแสงก็จะเกิดจากสารละลายเกือบทั้งหมดเช่นกัน ดังนั้นการถ่ายทอดพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพจะเกิดจากก้อนของสารเรืองแสงถ่ายทอดไปยังวัสดุที่มีความเข้มต่ำ (ตัวก่อกัมมันต์ในตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์ซึ่งละลายในสารอินทรีย์อีกชนิดหนึ่ง) สำหรับการเลื่อนความยาวคลื่นจะใช้วิธีการเติมตัวละลายตัวที่สองลงไปเพื่อเพิ่มความยาวคลื่นของแสงที่ปล่อยออกมาจากสารละลายตัวแรก ดังนั้นรังสีที่ถูกปลดปล่อยจะเหมาะสมกับคุณสมบัติของแคโทดในหลอดทวีคูณแสง

ตัวเปล่งแสงวับของเหลวจะมีประโยชน์มากสำหรับการวัดที่ต้องการหัววัดขนาดใหญ่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น การวัดรังสีบีตาพลังงานต่ำจำพวก  $^3\text{H}$  และ  $^{14}\text{C}$  หรือรังสีคอสมิก และวัดสเปกตรัมพลังงานในช่วง MeV ของนิวตรอนโดยใช้ตัวเปล่งแสงวับ NE 213 ซึ่งข้อดีของการใช้ตัวเปล่งแสงวับของเหลวคือ สามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก และทำหัววัดให้อยู่ในรูปแบบ และขนาดอย่างไรก็ได้โดยขึ้นอยู่กับภาชนะที่ใช้บรรจุ

ในการผสมไอโซโทปรังสีเข้ากับตัวเปล่งแสงวับจะทำให้ได้การวัดรูปทรงเรขาคณิต  $4\pi$  ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการวัด และอาจเติมธาตุบางตัวหรือสารประกอบให้กับตัวเปล่งแสงวับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพตัวเปล่งแสงวับได้โดยไม่ทำให้การเปล่งแสงเกิดปัญหาขึ้น เช่น ธาตุโบรอน (B) แคดเมียม (Cd) หรือแกโดลิเนียม (Gd) ใช้เติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการวัดนิวตรอน และในการเติมฟลูออรีน (F) ลงในตัวเปล่งแสงวับจะทำให้เกิดเป็นสารเรืองแสงที่ไวต่อนิวตรอนพลังงานต่ำ

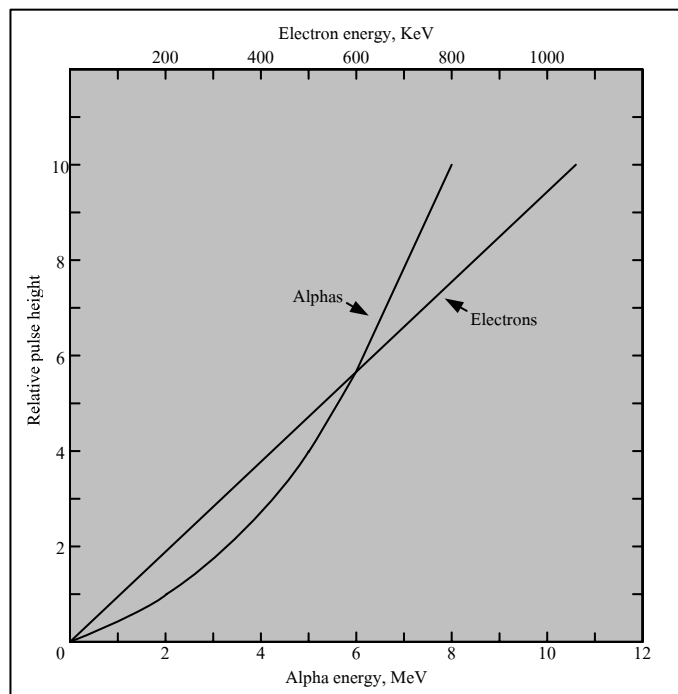
**ตัวเปล่งแสงวับพลาสติก** ตัวเปล่งแสงวับชนิดนี้เป็นของผสมของตัวทำละลาย และตัวถูกละลายหนึ่งชนิดหรือมากกว่า โดยตัวทำละลายส่วนใหญ่จะใช้โพลีสไตรีน (Polystyrene) และพอลิวินิลโทลูอีน (Polyvinyltoluene) สำหรับสารละลายจะใช้ พาราเทอร์ฟีนิล (p - Terphenyl) และ POPOP ซึ่งตัวเปล่งแสงวับพลาสติกอาจถือเป็นตัวเปล่งแสงวับอินทรีย์ชนิดของเหลวแข็ง โดยจะมีคุณสมบัติคล้ายตัวทำละลายอินทรีย์ของเหลว แต่มีความได้เปรียบกว่าคือ ไม่ต้องใช้ภาชนะบรรจุ นอกจากนั้นยังสามารถทำให้มีรูป และขนาดตั้งแต่เส้นใยบางจนถึงแผ่นบางได้ นอกจากนั้นยังเชื่อมต่อกับอากาศ น้ำ และสารเคมีอีกหลายตัว ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสัมผัสโดยตรงกับตัวอย่างไอโซโทปรังสีได้

คุณสมบัติของตัวเปล่งแสงวับพลาสติกคือ มีความหนาแน่น  $10^3 \text{ kg/m}^3$  แต่แสงที่ส่องออกมาจะน้อยกว่าแอนทราซีน และเวลาในการสลายตัวจะสั้น โดยความยาวคลื่นสมนัยกับความเข้มสูงสุดของสเปกตรัมปลดปล่อยซึ่งอยู่ในช่วง 350 – 450 nm และชื่อที่ใช้ในทางการค้าของตัวเปล่งแสงวับพลาสติกคือ PILOTB, PILOTY, NE 102 และ NE 110 สำหรับตัวเปล่งแสงวับที่ผสมด้วยดีบุก และตะกั่วจะใช้วัดรังสีเอกซ์ในช่วงพลังงาน 5 – 100 MeV ส่วนฟิล์มตัวเปล่งแสงวับ

พลาสติกบาง (บางประมาณ  $20 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$  หรือ  $20 \mu\text{g/cm}^2$ ) สามารถใช้ในการวัดไทม์ออฟไฟลด์ (Time of flight) ได้

### ก.1.1.2.3 การตอบสนองของตัวแปลงแสงวับอินทรีย์

อนุภาคมีประจุ ผลึกตัวแปลงแสงอินทรีย์จะแสดงการตอบสนองที่ขึ้นกับทิศทางของแอลฟา โดยการตอบสนองของตัวแปลงแสงวับของเหลวต่ออิเล็กตรอน และแอลฟาสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ ก.11



ภาพประกอบที่ ก.11 ความสูงพัลส์ต่อพลังงานของตัวแปลงแสงวับของเหลวที่มีต่ออิเล็กตรอน และแอลฟา

โฟตอน และนิวตรอน ตัวแปลงแสงวับอินทรีย์ในภาวะปกติจะไม่ใช้วัดรังสีแกมมาเนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำมาก แต่การวัดรังสีแกมมาที่ผสมอยู่ในสนามนิวตรอน – แกมมาจะใช้ตัวแปลงแสงวับของเหลว NE 213 เนื่องจากมีความสามารถที่จะคัคนิวตรอนออกได้ ซึ่งนิวตรอนจะถูกวัดด้วย NE 213 โดยอาศัยโปรตรอนรีคอยล์



### ก.1.1.3 ตัวแปลงแสงวับแก๊ส

ตัวแปลงแสงวับแก๊สเป็นของผสมของแก๊สเฉื่อย ซึ่งแสงที่ปล่อยออกมาจากแก๊สเฉื่อยจะอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต โดยแก๊สอื่นๆ เช่น ไนโตรเจนจะใช้เติมผสมกับแก๊สหลักเพื่อเลื่อนความยาวคลื่น และอาจใช้วัสดุฟลูออเรสเซนต์ในการเคลือบผนังด้านในของภาชนะบรรจุแก๊สเพื่อทำหน้าที่เช่นเดียวกับไนโตรเจน สำหรับลักษณะของตัวแปลงแสงวับแก๊สคือ มีเวลาการสลายตัวสั้น โดยแสงส่งออกจากแก๊สที่ได้รับพลังงานต่อ MeV จะขึ้นอยู่กับประจุ และมวลของอนุภาคที่จะวัดน้อยมาก และประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมาต่ำมาก ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ตัวแปลงแสงวับแก๊สเหมาะสำหรับใช้วัดอนุภาคที่มีประจุขนาดใหญ่ เช่น แอลฟา นิวตรอนฟิชชัน และไอออนหนักอื่นๆ

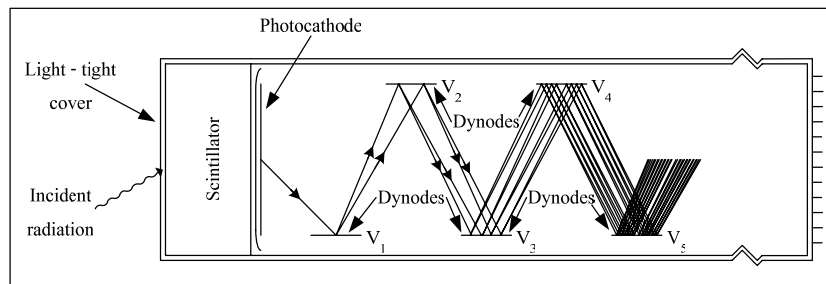
### ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพัลส์ พลังงาน และชนิดของอนุภาคที่ตกกระทบ

ในการวัดพลังงานของอนุภาคที่ตกกระทบกับตัวแปลงแสงวับจะต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพัลส์ และพลังงานที่จ่ายในตัวแปลงแสงวับ เนื่องจากความสูงพัลส์แปรผันตรงกับสัญญาณส่งออกของหลอดทวีคูณแสงซึ่งแปรผันตรงกับแสงที่ผลิตในตัวแปลงแสงวับ นอกจากนั้นยังมีความจำเป็นต้องทราบประสิทธิภาพการเปลี่ยนของตัวแปลงแสงวับที่เป็นฟังก์ชันของชนิด และพลังงานของรังสีตกกระทบอีกด้วย

### ก.3 หลอดทวีคูณแสง

หลอดทวีคูณแสงหรือหลอดโฟโตเป็นส่วนกลางของระบบวัดแบบแปลงแสงวับ ซึ่งถ้าไม่มีการขยายที่เกิดขึ้นในส่วนนี้ตัวทวีคูณแสงก็จะไม่มีประโยชน์ โดยหลอดทวีคูณแสงจะทำการขยายสัญญาณพัลส์ของแสงที่มองเห็นภายใน  $10^{-9}$  s ให้มีขนาดขยายขึ้น  $10^6$  เท่าหรือมากกว่านั้น

โดยหลอดทวีคูณแสงจะประกอบไปด้วยหลอดแก้วสุญญากาศที่มีโฟโตแคโทดอยู่ตรงทางเข้า และมีไดโนดอยู่ตรงกลางดังภาพประกอบที่ ก.12 ซึ่งโฟตอนที่เกิดขึ้นในตัวแปลงแสงวับจะผ่านหลอดโฟโต และชนกับโฟโตแคโทดที่ทำด้วยวัสดุที่เมื่อมีแสงมาตกกระทบแล้วจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา โดยอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมาจะถูกเหนี่ยวนำด้วยอำนาจสนามไฟฟ้าไปยังไดโนดตัวที่หนึ่งที่ฉาบด้วยสารที่ปล่อยอิเล็กตรอนเมื่อมีอิเล็กตรอนมาตกกระทบ จากนั้นอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปยังไดโนดตัวที่สองพร้อมกับให้อิเล็กตรอนชุดใหม่ออกมา และจะเป็นอย่างนี้ต่อเนื่องไป (สำหรับความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับไดโนดเพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าจะอยู่ในช่วง 80 – 120 V และจะมีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ) ซึ่งหลอดโฟโตที่มีขายทั่วไปจะมีถึง 15 ไดโนด โดยวัสดุที่ใช้ทำหลอดโฟโตแคโทดที่มีขายทั่วไปในเชิงพาณิชย์คือ ซีเซียม – พลวง (Cs – Sb) และจะใช้ Cs – Sb หรือ เงิน – แมกนีเซียม (Ag – Mg) เป็นวัสดุที่เคลือบไดโนด



ภาพประกอบที่ ก.12 องค์ประกอบภายในของหลอดทวีคูณแสง

## ภาคผนวก ข

## สมการทางสถิติที่ใช้ในงานวิจัย

ในการเลือกใช้สมการเพื่อทดสอบหาความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยสองค่าที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างสองกลุ่มที่เป็นอิสระจากกัน (Independent sample) จะพิจารณาจากขนาดของกลุ่มตัวอย่างซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

**กรณีที่ 1** กลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีขนาดใหญ่ ( $n_1$  และ  $n_2$  มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 30) ในกรณีนี้จะเลือกใช้การทดสอบค่าซี (Z – test) โดยมีสมการดังนี้

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (\text{ข.1})$$

แต่ในทางปฏิบัติค่า  $\sigma_1, \sigma_2$  ไม่สามารถหาได้จึงต้องใช้  $S_1, S_2$  แทน ดังนั้นสมการที่ (ข.1) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (\text{ข.2})$$

**กรณีที่ 2** กลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีขนาดเล็ก ( $n$  ในแต่ละกลุ่มน้อยกว่า 30) จะใช้การทดสอบค่าที (t – test) ซึ่งต้องคำนึงถึงค่าองศาความเป็นอิสระ (degree of freedom : df) โดยสมการจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1 ไม่ทราบความแปรปรวนของกลุ่มประชากรทั้ง 2 กลุ่ม แต่กำหนดให้  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$  สมการในลักษณะนี้จะอยู่ในรูป

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{S_p^2 \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (\text{ข.3})$$

เมื่อ  $S_p^2$  คือ ความแปรปรวนร่วม (Pooled variance) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (\text{ข.4})$$

แทน  $S_p^2$  จากสมการ (ข.4) ลงไปในสมการ (ข.3)

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (\text{ข.5})$$

ในลักษณะนี้ค่าขององศาความเป็นอิสระสามารถหาได้จาก  $n_1 + n_2 - 2$

2 ไม่ทราบความแปรปรวนของกลุ่มประชากรทั้ง 2 กลุ่ม แต่กำหนดให้  $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$  สมการที่ใช้จะอยู่ในรูป

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (\text{ข.6})$$

โดยค่าขององศาความเป็นอิสระสามารถหาได้ดังนี้

$$df = \frac{\left( \frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right)^2}{\frac{\left( \frac{S_1^2}{n_1} \right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left( \frac{S_2^2}{n_2} \right)^2}{n_2 - 1}} \quad (\text{ข.7})$$

หมายเหตุ ตามทฤษฎี t-test ใช้เมื่อกลุ่มตัวอย่างมีขนาดเล็ก แต่ในทางปฏิบัติ t-test ใช้กับกลุ่มตัวอย่างใดก็ได้ (ไม่ว่าจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ตาม) ขอเพียงแต่ให้ประชากรของกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มมา มีการแจกแจงปกติหรือเข้าใกล้การแจกแจงปกติก็ได้

สำหรับความหมายของสัญลักษณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การคำนวณ แสดง ได้ดังนี้

- $n_1, n_2$  คือ จำนวนข้อมูลในกลุ่มตัวอย่างกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ตามลำดับ
- $\bar{X}_1, \bar{X}_2$  คือค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ตามลำดับ
- $\mu_1, \mu_2$  คือค่าเฉลี่ยของกลุ่มประชากรกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ตามลำดับ
- $S_1^2, S_2^2$  คือค่าความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ตามลำดับ
- $\sigma_1^2, \sigma_2^2$  คือค่าความแปรปรวนของกลุ่มประชากรกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ตามลำดับ

## ภาคผนวก ก

### หน่วยวัดทางรังสี

#### ค.1 ความหมายของรังสี

คำว่ารังสีโดยทั่วไปอาจมีด้วยกันสองความหมายคือ

**1 กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)** หมายถึง จำนวนของไอโซโทปรังสีที่อยู่ในสถานะไม่คงตัว และมีการสลายตัวให้รังสีออกมาในช่วงเวลาหนึ่ง

**2 รังสี (Radiation)** หมายถึง อนุภาคซึ่งมีพลังงานที่มาจากสลายตัวของไอโซโทปรังสี รังสีคอสมิก และจากเครื่องเร่งอนุภาค โดยพลังงานของรังสีจะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด เช่น รังสีบีตาจากสตรอนเชียม-90 (Sr - 90) มีพลังงานสูงสุดเท่ากับ 546 keV รังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 (Co - 60) มีพลังงาน 1.17 และ 1.33 MeV เป็นต้น

#### ค.2 หน่วยของรังสี และกัมมันตภาพรังสี

หน่วยคือ ชื่อเฉพาะที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้บอกขนาด และปริมาณของสิ่งต่างๆ โดยหน่วยของรังสี และกัมมันตภาพรังสีสามารถแสดงได้ดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 หน่วยต่างๆ ของรังสี และกัมมันตภาพรังสี

ปริมาณ	หน่วยเดิม	หน่วยใหม่
กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)	คูรี (Ci)	เบคเคอเรล (Bq)
รังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorbed dose)	แรด (Rad)	เกรย์ (Gy)
รังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว (Exposure)	เรินท์เกน (R)	คูลอมบ์ต่อกิโลกรัม (C/kg)
รังสีสมมูล (Dose equivalent)	เรม (Rem)	ซีเวิร์ต (Sv)

โดยหน่วยต่างๆ ในตารางที่ ค. 1 มีรายละเอียดดังนี้

#### ค.2.1 ปริมาณกัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)

ดังที่กล่าวมาแล้วว่ากัมมันตภาพรังสีคือ การเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ที่ส่งผลให้เกิดการแผ่รังสีหรือมีอนุภาคที่มีพลังงานเกิดขึ้น โดยเรียกแหล่งกำเนิดรังสีว่าไอโซโทปรังสีหรือนิวไคลด์รังสี (Radionuclide) ซึ่งการวัดจำนวนไอโซโทปรังสีหรือนิวไคลด์รังสีไม่อาจทำได้โดยการชั่ง

น้ำหนักหรือดวงวัดได้ เพราะไอโซโทปรังสีจะปนอยู่กับไอโซโทปอื่นๆ เสมอ แม้เมื่อทำการแยกให้บริสุทธิ์แล้วก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวก็จะทำให้เกิดธาตุใหม่ปะปนขึ้นอีก ดังนั้นปริมาณกัมมันตภาพรังสีในขณะใดขณะหนึ่งจึงวัดได้จากรังสีที่เกิดขึ้นในขณะนั้น โดยหน่วยของปริมาณกัมมันตภาพรังสีเดิมจะอาศัยการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ของธาตุเรเดียมหนัก 1 กรัม ซึ่งเท่ากับ  $3.7 \times 10^{10}$  Disintegration per second (dps) และเรียกว่า 1 คูรี (Ci)

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} \quad (\text{ค.1})$$

ต่อมาใช้หน่วย SI หน่วยของกัมมันตรังสีจึงเปลี่ยนเป็นเบคเคอเรล (Bq) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\text{s}^{-1}$

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps} \text{ และ } 1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (\text{ค.2})$$

ปริมาณกัมมันตภาพรังสีจะมีผลเมื่อเข้าสู่ร่างกาย เพราะรังสีที่เกิดขึ้นจะถูกดูดกลืนในอวัยวะ และเนื้อเยื่อของร่างกาย โดยเฉพาะเมื่อการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์นั้นให้อนุภาคแอลฟาหรือบีตา เพราะอนุภาคทั้งสองเป็นอนุภาคที่มีพิสัยต่ำจึงทำให้เกิดการถ่ายพลังงานทั้งหมดให้กับอวัยวะ และเนื้อเยื่อซึ่งถือว่าเป็นอันตรายอย่างมาก

### ค.2.2 ปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorbed dose)

เนื่องจากรังสีแต่ละชนิดมีความสามารถในการทะลุผ่านวัตถุได้ต่างกัน และถ่ายเทพลังงานให้กับวัตถุแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ดังนั้นผลของรังสีต่อวัตถุจึงแปรผันตามปริมาณพลังงานของรังสีที่วัตถุนั้นดูดกลืน ตัวอย่างเช่น รังสีแอลฟา และรังสีบีตาซึ่งเป็นรังสีที่มีพิสัยต่ำจะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับวัตถุ เช่นเดียวกับกับโฟตอนพลังงานต่ำๆ โดยจะส่งผลให้เกิดรอยไหม้ที่ผิวหนัง และถ้าเป็นโฟตอนพลังงานสูงหรือนิวตรอน พลังงานส่วนมากจะทะลุผ่านออกไปจากวัตถุ และจะมีเพียงบางส่วนของพลังงานเท่านั้นที่ถูกดูดกลืนไว้ โดยหน่วยของปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนเดิมนั้นใช้ Radiation absorbed dose (rad) ซึ่งเท่ากับพลังงานรังสีที่ถูกดูดกลืน 100 ergs ในวัตถุมวล 1 g

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ ergs/g} \quad (\text{ค.3})$$

ในปัจจุบันหน่วยเปลี่ยนเป็นระบบ SI โดยใช้ mks เป็นมาตรฐาน ทำให้หน่วยปริมาณรังสีที่ถูกดัดแปลงเปลี่ยนไปเป็นหน่วยเกรย์ (Gy)

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ Jkg}^{-1} = 100 \text{ rads} \quad (\text{ก.4})$$

### ค.2.3 ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว (Exposure)

ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัวเป็นปริมาณรังสีที่ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับผลของรังสี เพราะเพียงแต่คิดว่ามีการแตกตัวของอากาศมากขึ้นเพียงใดเท่านั้น ซึ่งการวัดรังสีในรูปแบบนี้นิยมใช้กันมากเนื่องจากเป็นวิธีที่มีความไวสูง และสามารถวัดค่าได้ถูกต้องแม่นยำ โดยหน่วยเดิมของปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัวคือ เรินเกนท์ (R) ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัวให้ประจุ 1 e.s.u. ในอากาศแห้ง 1 cm<sup>3</sup> ที่ ATP หรืออากาศมวล 1.293 x 10<sup>-3</sup> g สำหรับในหน่วย SI ใช้เป็นคูอมบ์ต่อกิโลกรัม (C/kg) โดยประจุ 1 e.s.u. มีค่าเท่ากับ 3.335 x 10<sup>-10</sup> C

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \quad (\text{ก.5})$$

### ค.2.4 ปริมาณรังสีสมมูล (Dose equivalent)

ปริมาณรังสีสมมูลเป็นหน่วยที่นำเอาผลทางชีววิทยาของรังสีเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยอาศัยค่าปริมาณรังสีที่ถูกดัดแปลงเฉลี่ยทั่วกลุ่มของเนื้อเยื่อหรืออวัยวะร่วมกับ Radiation weighting factor ( $W_R$ ) ตามชนิด และพลังงานของรังสี ซึ่งสามารถหาค่าปริมาณรังสีสมมูล ( $H_T$ ) ของกลุ่มเนื้อเยื่อ และอวัยวะต่างๆ ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$H_T = S_R W_R \times D_{\text{TxR}} \quad (\text{ก.6})$$

เมื่อ  $D_{\text{TxR}}$  คือ รังสีที่ถูกดัดแปลงเฉลี่ยทั่วกลุ่มเนื้อเยื่อหรืออวัยวะ (T) เนื่องจากรังสี (R) และค่า  $W_R$  จะมีความสัมพันธ์กับค่า Relative biological effectiveness (RBE) โดยอาศัยการเปรียบเทียบความเสียหายของเนื้อเยื่อ เมื่อเนื้อเยื่อถูกดัดแปลงรังสีที่ต่างชนิด และต่างพลังงานกัน

ในหน่วยเดิมของปริมาณรังสีสมมูลเรียกว่า Rem มีค่าเท่ากับ

$$\text{Absorbed dose (rad)} \times W_R \quad (\text{ก.7})$$



สำหรับในปัจจุบันหน่วยของปริมาณรังสีสมมูล ซึ่งเป็นหน่วย SI เปลี่ยนเป็นซีเวิร์ต (Sv) และมีค่าเท่ากับ

$$\text{Absorbed dose (Gy)} \times W_R \quad (\text{ค.8})$$

ดังนั้น

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} \quad (\text{ค.9})$$

แต่หน่วยซีเวิร์ต (Sv) เป็นหน่วยที่ใหญ่มาก ค่าปริมาณรังสีสมมูลส่วนมากจึงนิยมใช้เป็นมิลลิซีเวิร์ต (mSv) แทน

ตารางที่ ค.2 ค่า Radiation weighting factor ( $W_R$ )

Type and energy range	Radiation weighting factor : $W_R$
Photons, all energies	1
Electrons and muons, all energies	1
Neutrons, energy < 10 keV	5
10 keV to 100 keV	10
> 100 keV to 2MeV	20
> 2 MeV to 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protons, other than recoil protons, energy > 2 MeV	5
Alpha particles, fission fragments, heavy nuclei	20

### ภาคผนวก ข

#### ความแรงรังสีในบริเวณห้องที่ใช้ทำการทดลอง

ในบริเวณห้องที่ใช้ทำการทดลองไม่สามารถตรวจวัดค่าความแรงรังสีรังสีแกมมาหลังได้ (ค่าเฉลี่ยสูงสุดของเครื่องมือวัดเท่ากับ 0.25 mR/hr) เช่นเดียวกับบริเวณด้านข้างของชุดกำบังรังสี แต่สำหรับในบริเวณด้านบนของชุดกำบังรังสีจะมีค่าความแรงรังสีเท่ากับ 0.25 mR/hr โดยค่าความแรงรังสีที่ระยะห่างต่างๆ จากปลายของชุดกำบังรังสีแสดงได้ดังตารางที่ ข.1

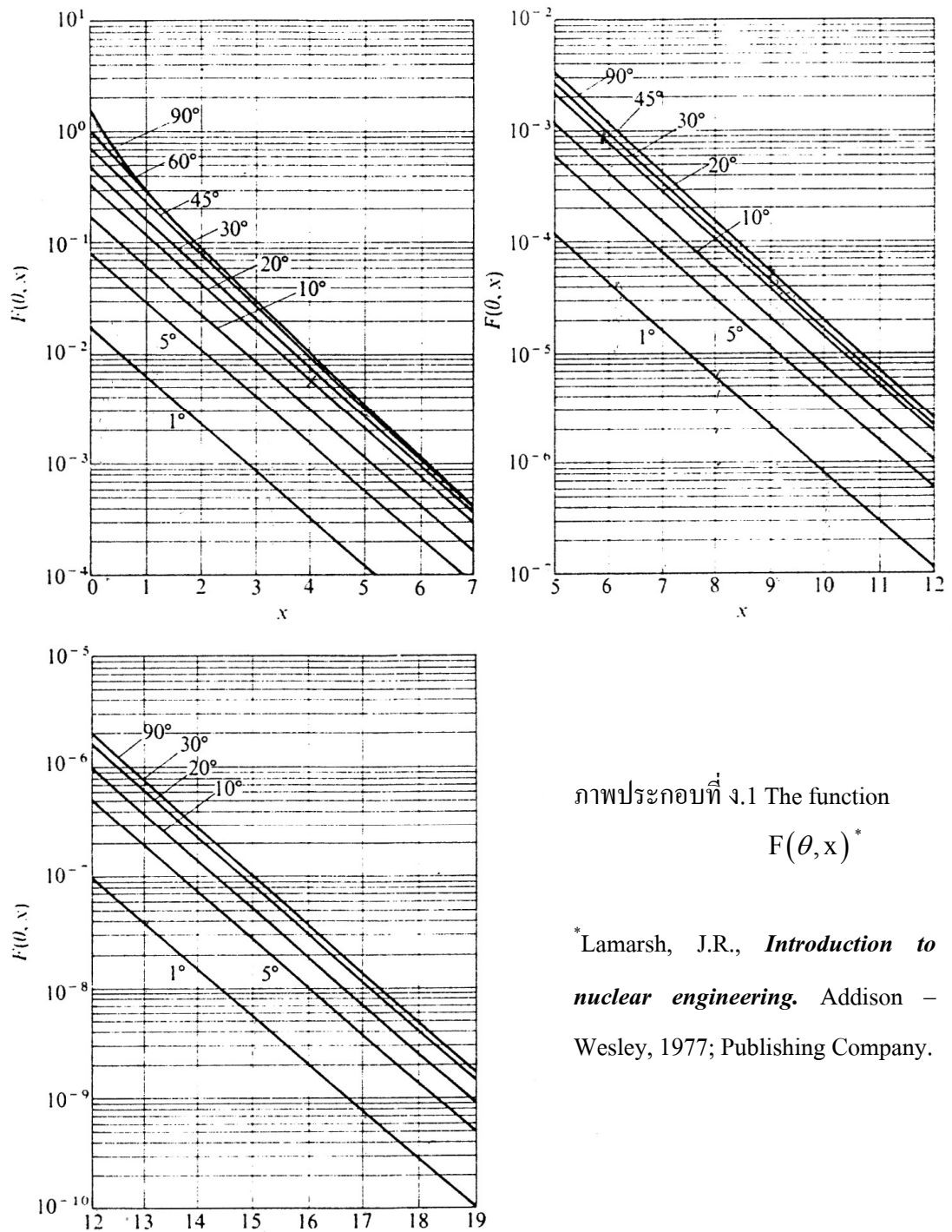
ตารางที่ ข.1 ค่าความแรงรังสีที่ระยะห่างต่างๆ จากปลายของชุดทอปปิงรังสี

ระยะห่างจากปลาย ของชุดทอปปิงรังสี (cm)	ความแรงรังสี (mR/hr)	
	ขณะปิดช่องทางเดินรังสี	ขณะเปิดช่องทางเดินรังสี
0	0.25 – 0.50	3.75 – 4.25
10	0.25 – 0.50	3.00 – 4.00
20	0.00 – 0.25	3.00 – 3.50
30	0.00 – 0.25	2.00 – 3.00
40	0.00 – 0.25	1.50 – 2.00
50	0.00 – 0.25	0.75 – 1.25

\*ทำการวัดค่าความแรงรังสีด้วย Portable survey meter model 2105A ซึ่งปรับเทียบมาตรฐานโดย OAEP

## ภาคผนวก ง

ตาราง และภาพประกอบที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาของชุดกำบังรังสี



ภาพประกอบที่ ง.1 The function  $F(\theta, x)^*$

\*Lamarsh, J.R., *Introduction to nuclear engineering*. Addison - Wesley, 1977; Publishing Company.

ตารางที่ ง.1 ค่า Exposure Buildup Factor for Isotropic Point Source \*

Material	E <sub>0</sub> (MeV)	$\mu_0 \Gamma$						
		1	2	4	7	10	15	20
Water	0.255	3.09	7.14	23.0	72.9	166	456	982
	0.5	2.52	5.14	14.3	38.8	77.6	178	334
	1.0	2.13	3.71	7.68	16.2	27.1	50.4	82.2
	2.0	1.83	2.77	4.88	8.46	12.4	19.5	27.7
	3.0	1.69	2.42	3.91	6.23	8.63	12.8	17.0
	4.0	1.58	2.17	3.34	5.13	6.94	9.97	12.9
	6.0	1.46	1.91	2.76	3.99	5.18	7.09	8.85
	8.0	1.38	1.74	2.40	3.34	4.25	5.66	6.95
	10.0	1.33	1.63	2.19	2.97	3.72	4.90	5.98
Aluminum	0.5	2.37	4.24	9.47	21.5	38.9	80.8	141
	1.0	2.02	3.31	6.57	13.1	21.2	37.9	58.5
	2.0	1.75	2.61	4.62	8.05	11.9	18.7	26.3
	3.0	1.64	2.32	3.78	6.14	8.65	13.0	17.7
	4.0	1.53	2.08	3.22	5.01	6.88	10.1	13.4
	6.0	1.42	1.85	2.70	4.06	5.49	7.97	10.4
	8.0	1.34	1.68	2.37	3.45	4.58	6.56	8.52
	10.0	1.28	1.55	2.12	3.01	3.96	5.63	7.32
Iron	0.5	1.98	3.09	5.98	11.7	19.2	35.4	55.6
	1.0	1.87	2.89	5.39	10.2	16.2	28.3	42.7
	2.0	1.76	2.43	4.13	7.25	10.9	17.6	25.1
	3.0	1.55	2.15	3.51	5.85	8.51	13.5	19.1
	4.0	1.45	1.94	3.03	4.91	7.11	11.2	16.0
	6.0	1.34	1.72	2.58	4.14	6.02	9.89	14.7
	8.0	1.27	1.56	2.23	3.49	5.07	8.50	13.0
	10.0	1.20	1.42	1.95	2.99	4.35	7.54	12.4
Tin	0.5	1.56	2.08	3.09	4.57	6.04	8.64	
	1.0	1.64	2.30	3.74	6.17	8.85	13.7	18.8
	2.0	1.57	2.17	3.53	5.87	8.53	13.6	19.3
	3.0	1.46	1.96	3.13	5.28	7.91	13.3	20.1
	4.0	1.38	1.81	2.82	4.82	7.41	13.2	21.2
	6.0	1.26	1.57	2.37	4.17	6.94	14.8	29.1
	8.0	1.19	1.42	2.05	3.57	6.19	15.1	34.0
	10.0	1.14	1.31	1.79	2.99	5.21	12.5	33.4
Tungsten	0.5	1.28	1.50	1.84	2.24	2.61	3.12	
	1.0	1.44	1.83	2.57	3.62	4.64	6.25	(7.35)
	2.0	1.42	1.85	2.72	4.09	5.27	8.07	(10.6)
	3.0	1.36	1.74	2.59	4.00	5.92	9.66	14.1
	4.0	1.29	1.62	2.41	4.03	6.27	12.0	20.9
	6.0	1.20	1.43	2.07	3.60	6.29	15.7	36.3
	8.0	1.14	1.32	1.81	3.05	5.40	15.2	41.9
	10.0	1.11	1.25	1.64	2.62	4.65	14.0	39.3

ตารางที่ ง.1 ค่า Exposure Buildup Factor for Isotropic Point Source\* (ต่อ)

Material	E <sub>0</sub> (MeV)	$\mu_0 r$						
		1	2	4	7	10	15	20
Lead	0.5	1.24	1.42	1.69	2.00	2.27	2.65	(2.73)
	1.0	1.37	1.69	2.26	3.02	3.74	4.81	5.86
	2.0	1.39	1.76	2.51	3.66	4.84	6.87	9.00
	3.0	1.34	1.68	2.43	3.75	5.30	8.44	12.3
	4.0	1.27	1.56	2.25	3.61	5.44	9.80	16.3
	5.1	1.21	1.46	2.08	3.44	5.55	11.7	23.6
	6.0	1.18	1.40	1.97	3.34	5.69	13.8	32.7
	8.0	1.14	1.30	1.74	2.89	5.07	14.1	44.6
	10.0	1.11	1.23	1.58	2.52	4.34	12.5	39.2
Uranium	0.5	1.17	1.30	1.48	1.67	1.85	2.08	
	1.0	1.31	1.56	1.98	2.50	2.97	3.67	
	2.0	1.33	1.64	2.23	3.09	3.95	5.36	(6.48)
	3.0	1.29	1.58	2.21	3.27	4.51	6.97	9.88
	4.0	1.24	1.50	2.09	3.21	4.66	8.01	12.7
	6.0	1.16	1.36	1.85	2.96	4.80	10.8	23.0
	8.0	1.12	1.27	1.66	2.61	4.36	11.2	28.0
	10.0	1.09	1.20	1.51	2.26	3.78	10.5	28.5

\*From H. Goldstein, *Fundamental Aspects of Reactor Shielding*. Reading, Mass. : Addison – Wesley, 1959; now available from Johnson Reprint Corp., New York.

ตารางที่ ๓.2 ค่า Exposure Buildup Factor for Plane Monodirectional Source \*

Material	E <sub>0</sub> (MeV)	$\mu_0 X$					
		1	2	4	7	10	15
Water	0.5	2.63	4.29	9.05	20	35.9	74.9
	1	2.26	3.39	6.27	11.5	18.0	30.8
	2	1.84	2.63	4.28	6.96	9.87	14.4
	3	1.69	2.31	3.57	5.51	7.48	10.8
	4	1.58	2.10	3.12	4.63	6.19	8.54
	6	1.45	1.86	2.63	3.76	4.86	6.78
	8	1.36	1.69	2.30	3.16	4.00	5.47
Iron	0.5	2.07	2.94	4.87	8.31	12.4	20.6
	1	1.92	2.74	4.57	7.81	11.6	18.9
	2	1.69	2.35	3.76	6.11	8.78	13.7
	3	1.58	2.13	3.32	5.26	7.41	11.4
	4	1.48	1.90	2.95	4.61	6.46	9.92
	6	1.35	1.71	2.48	3.81	5.35	8.39
	8	1.27	1.55	2.17	3.27	4.58	7.33
Tin	1	1.65	2.24	3.40	5.18	7.19	10.5
	2	1.58	2.13	3.27	5.12	7.13	11.0
	4	1.39	1.80	2.69	4.31	6.30	
	6	1.27	1.57	2.27	3.72	5.77	11.0
	10	1.16	1.33	1.77	2.81	4.53	9.68
Lead	0.5	1.24	1.39	1.63	1.87	2.08	
	1	1.38	1.68	2.18	2.80	3.40	4.20
	2	1.4	1.76	2.41	3.36	4.35	5.94
	3	1.36	1.71	2.42	3.55	4.82	7.18
	4	1.28	1.56	2.18	3.29	4.69	7.70
	6	1.19	1.40	1.87	2.97	4.69	9.53
	8	1.14	1.30	1.69	2.61	4.18	9.08
Uranium	0.5	1.17	1.28	1.45	1.60	1.73	
	1	1.3	1.53	1.90	2.32	2.70	3.60
	2	1.33	1.62	2.15	2.87	3.56	4.89
	3	1.29	1.57	2.13	3.02	3.99	5.94
	4	1.25	1.49	2.02	2.94	4.06	6.47
	6	1.18	1.37	1.82	2.74	4.12	7.79
	8	1.13	1.27	1.61	2.39	3.65	7.36
	10	1.1	1.21	1.48	2.12	3.21	6.58

\*From H. Goldstein, *Fundamental Aspects of Reactor Shielding*. Reading, Mass. : Addison – Wesley, 1959; now available from Johnson Reprint Corp., New York

ตารางที่ 3.3 ค่า Parameters for the Taylor Form of the Exposure Buildup Factor for Point Isotropic Source\*

Substance	Energy (MeV)	$A_1$	$-\alpha_1$	$\alpha_2$
Water	0.5	100.845	0.12687	0.10925
	1.0	19.601	0.09037	-0.02522
	2.0	12.612	0.05320	0.01932
	3.0	11.110	0.03550	0.03206
	4.0	11.163	0.02543	0.03025
	6.0	8.385	0.01820	0.04164
	8.0	4.635	0.02633	0.07097
	10.0	3.545	0.02991	0.08717
Concrete	0.5	38.225	0.14824	0.10579
	1.0	25.507	0.07230	0.01843
	2.0	18.089	0.04250	0.00849
	3.0	13.640	0.03200	0.02022
	4.0	11.460	0.02600	0.02450
	6.0	10.781	0.01520	0.02925
	8.0	8.972	0.01300	0.02979
	10.0	4.015	0.02880	0.06844
Aluminum	0.5	38.911	0.10015	0.06312
	1.0	28.782	0.06820	-0.02913
	2.0	16.981	0.04588	0.00271
	3.0	10.583	0.04066	0.02514
	4.0	7.526	0.03973	0.38600
	6.0	5.713	0.03934	0.04347
	8.0	4.716	0.03837	0.04431
	10.0	3.999	0.03900	0.04130
Iron	0.5	31.379	0.06842	-0.03742
	1.0	24.957	0.06086	-0.02463
	2.0	17.622	0.04627	-0.00526
	3.0	13.218	0.04431	-0.00087
	4.0	9.624	0.04698	0.00175
	6.0	5.867	0.06150	-0.00186
	8.0	3.243	0.07500	0.02123
	10.0	1.747	0.09900	0.06627
Tin	0.5	11.440	0.01800	0.03187
	1.0	11.426	0.04266	0.01606
	2.0	8.783	0.05349	0.01505
	3.0	5.400	0.07440	0.02080
	4.0	3.496	0.09517	0.02598
	6.0	2.005	0.13733	0.01501
	8.0	1.101	0.17288	-0.01787
	10.0	0.708	0.19200	0.01552
Lead	0.5	1.677	0.03084	0.30941
	1.0	2.984	0.03503	0.13486
	2.0	5.421	0.03482	0.04379
	3.0	5.580	0.05422	0.00611
	4.0	3.897	0.08468	-0.02383
	6.0	0.926	0.17860	-0.04635
	8.0	0.368	0.23691	-0.05864
	10.0	0.311	0.24024	-0.02783

\*From H. Goldstein, *Fundamental Aspects of Reactor Shielding*. Reading, Mass. : Addison – Wesley, 1959; now available from Johnson Reprint Corp., New York.

ตารางที่ ๓.๔ ค่า The Mass Absorption Coefficient ( $\mu_a / \rho$ ) for Several Materials, in  $\text{cm}^2/\text{g}$ \*

Material	Gamma - Ray Energy (MeV)																	
	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00	1.25	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	10.00
H	0.0411	0.0487	0.0531	0.0575	0.0589	0.0591	0.0590	0.0575	0.0557	0.0533	0.0509	0.0467	0.0401	0.0354	0.0318	0.0291	0.0252	0.0255
Be	0.0183	0.0217	0.0237	0.0256	0.0263	0.0264	0.0263	0.0256	0.0248	0.0237	0.0227	0.0210	0.0183	0.0164	0.0151	0.0141	0.0127	0.0118
C	0.0215	0.0246	0.0267	0.0288	0.0296	0.0297	0.0296	0.0289	0.0280	0.0268	0.0256	0.0237	0.0209	0.0190	0.0177	0.0166	0.0153	0.0145
N	0.0224	0.0249	0.0267	0.0288	0.0296	0.0297	0.0296	0.0289	0.0280	0.0268	0.0256	0.0236	0.0211	0.0193	0.0180	0.0171	0.0158	0.0151
O	0.0233	0.0252	0.0271	0.0289	0.0296	0.0297	0.0296	0.0289	0.0280	0.0268	0.0257	0.0238	0.0212	0.0195	0.0183	0.0175	0.0163	0.0157
Na	0.0289	0.0258	0.0266	0.0279	0.0283	0.0284	0.0284	0.0276	0.0268	0.0257	0.0246	0.0229	0.0207	0.0194	0.0185	0.0179	0.0171	0.0168
Mg	0.0335	0.0276	0.0278	0.0290	0.0294	0.0293	0.0292	0.0285	0.0276	0.0265	0.0254	0.0237	0.0215	0.0203	0.0194	0.0188	0.0182	0.0180
Al	0.0373	0.0283	0.0275	0.0283	0.0287	0.0286	0.0286	0.0278	0.0270	0.0259	0.0248	0.0232	0.0212	0.0200	0.0192	0.0188	0.0183	0.0182
Si	0.0435	0.0300	0.0286	0.0291	0.0293	0.0290	0.0290	0.0282	0.0274	0.0263	0.0252	0.0236	0.0217	0.0206	0.0198	0.0194	0.0190	0.0189
P	0.0501	0.0315	0.0292	0.0289	0.0290	0.0290	0.0287	0.0280	0.0271	0.0260	0.0250	0.0234	0.0216	0.0206	0.0200	0.0197	0.0194	0.0195
S	0.0601	0.0351	0.0310	0.0301	0.0301	0.0300	0.0298	0.0288	0.0279	0.0268	0.0258	0.0242	0.0224	0.0215	0.0209	0.0206	0.0206	0.0206
Ar	0.0729	0.0368	0.0302	0.0278	0.0274	0.0272	0.0270	0.0260	0.0252	0.0242	0.0233	0.0220	0.0206	0.0199	0.0195	0.0195	0.0194	0.0197
K	0.0909	0.0433	0.0340	0.0304	0.0298	0.0295	0.0291	0.0282	0.0272	0.0261	0.0251	0.0237	0.0222	0.0217	0.0214	0.0212	0.0215	0.0219
Ca	0.111	0.0489	0.0367	0.0318	0.0309	0.0304	0.0300	0.0290	0.0279	0.0268	0.0258	0.0244	0.0230	0.0225	0.0222	0.0223	0.0225	0.0231
Fe	0.225	0.0810	0.0489	0.0340	0.0307	0.0294	0.0287	0.0274	0.0261	0.0250	0.0242	0.0231	0.0224	0.0224	0.0227	0.0231	0.0239	0.0250
Cu	0.310	0.107	0.0594	0.0368	0.0316	0.0296	0.0286	0.0271	0.0260	0.0247	0.0237	0.0229	0.0223	0.0227	0.0231	0.0237	0.0248	0.0261
Mo	0.922	0.294	0.141	0.0617	0.0422	0.0348	0.0315	0.0281	0.0263	0.0248	0.0239	0.0233	0.0237	0.0250	0.0262	0.0274	0.0296	0.0316
Sn	1.469	0.471	0.222	0.0873	0.0534	0.0403	0.0346	0.0294	0.0268	0.0248	0.0239	0.0233	0.0243	0.0259	0.0276	0.0291	0.0316	0.0339
I	1.726	0.557	0.260	0.100	0.0589	0.0433	0.0366	0.0303	0.0274	0.0252	0.0241	0.0236	0.0247	0.0265	0.0283	0.0299	0.0327	0.0353
W	4.112	1.356	0.631	0.230	0.121	0.0786	0.0599	0.0426	0.0353	0.0302	0.0281	0.0271	0.0287	0.0311	0.0335	0.0355	0.0390	0.0426
Pt	4.645	1.556	0.719	0.262	0.138	0.0892	0.0666	0.0465	0.0375	0.0315	0.0293	0.0280	0.0296	0.0320	0.0343	0.0365	0.0400	0.0438
Tl	5.057	1.717	0.791	0.285	0.152	0.0972	0.0718	0.0491	0.0393	0.0326	0.0301	0.0288	0.0304	0.0326	0.0349	0.0354	0.0406	0.0446
Pb	5.193	1.753	0.821	0.294	0.156	0.0994	0.0738	0.0505	0.0402	0.0332	0.0306	0.0293	0.0305	0.0330	0.0352	0.0373	0.0412	0.0450
U	9.630	2.337	1.096	0.392	0.208	0.132	0.0968	0.0628	0.0482	0.0383	0.0346	0.0324	0.0332	0.0352	0.0374	0.0394	0.0443	0.0474
Air	0.0233	0.0251	0.0268	0.0288	0.0296	0.0297	0.0296	0.0289	0.0280	0.0268	0.0256	0.0238	0.0211	0.0194	0.0181	0.0172	0.0160	0.0153
Nal	1.466	0.4760	0.224	0.0889	0.0542	0.0410	0.0354	0.0299	0.0273	0.0253	0.0242	0.0235	0.0241	0.0254	0.0268	0.0281	0.0303	0.0325
H <sub>2</sub> O	0.0253	0.0278	0.0300	0.0321	0.0328	0.0330	0.0329	0.0321	0.0311	0.0298	0.0285	0.0264	0.0233	0.0213	0.0198	0.0188	0.0173	0.0165
Concrete	0.0416	0.0300	0.0289	0.0294	0.0297	0.0296	0.0295	0.0287	0.0278	0.0272	0.0256	0.0239	0.0216	0.0203	0.0194	0.0188	0.0180	0.0177
Tissue	0.0271	0.0282	0.0293	0.0312	0.0317	0.0320	0.0319	0.0311	0.0300	0.0288	0.0276	0.0256	0.0220	0.0206	0.0192	0.0182	0.0168	0.0160

\*From L. T. Templin, editor, *Reactor Physics Constants*. ANL – 5800, 2<sup>nd</sup> ed., 1963; based on G. W. Grodstein, National Bureau of Standards Circular 583, 1957



ตารางที่ ๓.5 ค่า The Mass Attenuation Coefficient ( $\mu/\rho$ ) for Several Materials, in  $\text{cm}^2/\text{g}^*$

Material	Gamma - Ray Energy (MeV)																	
	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00	1.25	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	10.00
H	0.295	0.265	0.243	0.212	0.189	0.173	0.160	0.140	0.126	0.113	0.103	0.0876	0.0691	0.0579	0.0502	0.0446	0.0371	0.0321
Be	0.132	0.119	0.109	0.0945	0.0847	0.0773	0.0715	0.0628	0.0565	0.0504	0.0459	0.0394	0.0313	0.0266	0.0234	0.0211	0.0180	0.0161
C	0.149	0.134	0.122	0.106	0.0953	0.0870	0.0805	0.0707	0.0636	0.0568	0.0518	0.0444	0.0356	0.0304	0.0270	0.0245	0.0213	0.0194
N	0.150	0.134	0.123	0.106	0.0955	0.0869	0.0805	0.0707	0.0636	0.0568	0.0517	0.0445	0.0357	0.0306	0.0273	0.0249	0.0218	0.0200
O	0.151	0.134	0.123	0.107	0.0953	0.0870	0.0806	0.0708	0.0636	0.0568	0.0518	0.0445	0.0359	0.0309	0.0276	0.0254	0.0224	0.0206
Na	0.151	0.130	0.118	0.102	0.0912	0.0833	0.0770	0.0676	0.0608	0.0546	0.0496	0.0427	0.0348	0.0303	0.0274	0.0254	0.0229	0.0215
Mg	0.160	0.135	0.122	0.106	0.0944	0.0860	0.0795	0.0699	0.0627	0.0560	0.0512	0.0442	0.0360	0.0315	0.0286	0.0266	0.0242	0.0228
Al	0.161	0.134	0.120	0.103	0.0922	0.0840	0.0777	0.0683	0.0614	0.0548	0.0500	0.0432	0.0353	0.0310	0.0282	0.0264	0.0241	0.0229
Si	0.172	0.139	0.125	0.107	0.0954	0.0869	0.0802	0.0706	0.0635	0.0567	0.0517	0.0447	0.0367	0.0323	0.0296	0.0277	0.0254	0.0243
P	0.174	0.137	0.122	0.104	0.0928	0.0846	0.0780	0.0685	0.0617	0.0551	0.0502	0.0436	0.0358	0.0316	0.0290	0.0273	0.0252	0.0242
S	0.188	0.144	0.127	0.108	0.0958	0.0874	0.0806	0.0707	0.0635	0.0568	0.0519	0.0448	0.0371	0.0328	0.0302	0.0284	0.0266	0.0255
Ar	0.188	0.135	0.117	0.0977	0.0867	0.0790	0.0730	0.0638	0.0573	0.0512	0.0468	0.0407	0.0338	0.0301	0.0279	0.0266	0.0248	0.0241
K	0.215	0.149	0.127	0.106	0.0938	0.0852	0.0786	0.0689	0.0618	0.0552	0.0505	0.0438	0.0365	0.0327	0.0305	0.0289	0.0274	0.0267
a	0.238	0.158	0.132	0.109	0.0965	0.0876	0.0809	0.0708	0.0634	0.0566	0.0518	0.0451	0.0376	0.0338	0.0316	0.0302	0.0285	0.0280
Fe	0.344	0.183	0.138	0.106	0.0919	0.0828	0.0762	0.0664	0.0595	0.0531	0.0485	0.0424	0.0361	0.0330	0.0313	0.0304	0.0295	0.0294
Cu	0.427	0.206	0.147	0.108	0.0916	0.0820	0.0751	0.0654	0.0585	0.0521	0.0476	0.0418	0.0357	0.0330	0.0316	0.0309	0.0303	0.0305
Mo	1.03	0.389	0.225	0.130	0.0998	0.0851	0.0761	0.0648	0.0575	0.0510	0.0467	0.0414	0.0365	0.0349	0.0344	0.0344	0.0349	0.0359
Sn	1.58	0.563	0.303	0.153	0.109	0.0886	0.0776	0.0647	0.0568	0.0501	0.0459	0.0408	0.0367	0.0355	0.0355	0.0358	0.0368	0.0383
I	1.83	0.648	0.339	0.165	0.114	0.0913	0.0792	0.0653	0.0571	0.0502	0.0460	0.0409	0.0370	0.0360	0.0361	0.0365	0.0377	0.0394
W	4.21	1.44	0.708	0.293	0.174	0.125	0.101	0.0763	0.0640	0.0544	0.0492	0.0437	0.0405	0.0402	0.0409	0.0418	0.0438	0.0465
Pt	4.75	1.64	0.795	0.324	0.191	0.135	0.107	0.0800	0.0659	0.0554	0.0501	0.0445	0.0414	0.0411	0.0418	0.0427	0.0448	0.0477
Tl	5.16	1.80	0.866	0.346	0.204	0.143	0.112	0.0824	0.0675	0.0563	0.0508	0.0452	0.0420	0.0416	0.0423	0.0433	0.0454	0.0484
Pb	5.29	1.84	0.896	0.356	0.208	0.145	0.114	0.0836	0.0684	0.0569	0.0512	0.0457	0.0421	0.0420	0.0426	0.0436	0.0459	0.0489
U	10.60	2.42	1.17	0.452	0.259	0.176	0.136	0.0952	0.0757	0.0615	0.0548	0.0484	0.0445	0.0440	0.0446	0.0455	0.0479	0.0511
Air	0.151	0.134	0.123	0.106	0.0953	0.0868	0.0804	0.0706	0.0636	0.0567	0.0517	0.0445	0.0357	0.0307	0.0274	0.0250	0.0220	0.0202
Nal	1.57	0.568	0.305	0.155	0.111	0.0901	0.0789	0.0657	0.0577	0.0508	0.0465	0.0412	0.0367	0.0351	0.0347	0.0347	0.0354	0.0366
H <sub>2</sub> O	0.167	0.149	0.136	0.118	0.106	0.0966	0.0896	0.0786	0.0706	0.0630	0.0575	0.0493	0.0396	0.0339	0.0301	0.0275	0.0240	0.0219
Concrete	0.169	0.139	0.124	0.107	0.0954	0.0870	0.0804	0.0706	0.0635	0.0567	0.0517	0.0445	0.0363	0.0317	0.0287	0.0268	0.0243	0.0229
Tissue	0.163	0.144	0.132	0.115	0.100	0.0936	0.0867	0.0761	0.0683	0.0600	0.0556	0.0478	0.0384	0.0329	0.0292	0.0267	0.0233	0.0212

\*From L. T. Templin, editor, *Reactor Physics Constants*, ANL – 5800, 2<sup>nd</sup> ed., 1963 ; based on G. W. Grodstein. National Bureau of Standards Circular 583.

ภาคผนวก จ

ตารางข้อมูลการทดสอบทางสถิติแบบทีของแบบจำลองผลสัม ผลสัม และมั่งคุด

ตารางที่ จ.1 แสดงข้อมูลการทดสอบทางสถิติแบบทีของแบบจำลองผลสัม

t - test for independent samples											
Note : Variables were treated as independent samples											
Group 1 vs. Group 2	Mean Group 1	Mean Group 2	t - value	df	p	Valid N Group 1	Valid N Group 2	Std. Dev. Group 1	Std. Dev. Group 2	F - ratio Variances	p Variances
0.0 % vs. 25.0 %	647.3	747.9	-0.4313	18	0.6714	4	16	272.1	440.3	2.6189	0.4649
0.0 % vs. 50.0 %	647.3	631.2	0.0505	22	0.9602	4	20	272.1	616.0	5.1263	0.2031
0.0 % vs. 75.0 %	647.3	478.8	1.2691	22	0.2177	4	20	272.1	237.4	1.3134	0.5984
0.0 % vs. 87.5 %	647.3	415.3	1.5586	10	0.1502	4	8	272.1	229.5	1.4058	0.6378
0.0 % vs. 100.0 %	647.3	365.5	1.9822	8	0.0828	4	6	272.1	182.1	2.2315	0.4050
25.0 % vs. 50.0 %	747.9	631.2	0.6374	34	0.5282	16	20	440.3	616.0	1.9574	0.1914
25.0 % vs. 75.0 %	747.9	478.8	2.3450	34	0.0250	16	20	440.3	237.4	3.4395	0.0126
25.0 % vs. 87.5 %	747.9	415.3	1.9898	22	0.0592	16	8	440.3	229.5	3.6817	0.0886
25.0 % vs. 100.0 %	747.9	365.5	2.0371	20	0.0551	16	6	440.3	182.1	5.8440	0.0613
50.0 % vs. 75.0 %	631.2	478.8	1.0327	38	0.3083	20	20	616.0	237.4	6.7326	0.0001
50.0 % vs. 87.5 %	631.2	415.3	0.9559	26	0.3479	20	8	616.0	229.5	7.2067	0.0127
50.0 % vs. 100.0 %	631.2	365.5	1.0296	24	0.3135	20	6	616.0	182.1	11.4392	0.0133
75.0 % vs. 87.5 %	478.8	415.3	0.6445	26	0.5249	20	8	237.4	229.5	1.0704	0.9931
75.0 % vs. 100.0 %	478.8	365.5	1.0716	24	0.2945	20	6	237.4	182.1	1.6991	0.5825
87.5 % vs. 100.0 %	415.3	365.5	0.4369	12	0.6699	8	6	229.5	182.1	1.5873	0.6316

ตารางที่ จ.2 แสดงข้อมูลการทดสอบทางสถิติแบบทีของผลสัม

Group 1 vs. Group 2	t - test for independent samples										
	Note : Variables were treated as independent samples										
	Mean Group 1	Mean Group 2	t - value	df	p	Valid N Group 1	Valid N Group 2	Std. Dev. Group 1	Std. Dev. Group 2	F - ratio Variances	p Variances
เนื้อปกติ vs. เนื้อฟาม	475.1	676.0	-2.3276	158	0.0212	132	28	381.1	550.2	2.0843	0.0068

ตารางที่ จ.3 แสดงข้อมูลการทดสอบทางสถิติแบบทีของผลมั่งคุด

Group 1 vs. Group 2	t - test for independent samples										
	Note : Variables were treated as independent samples										
	Mean Group 1	Mean Group 2	t - value	df	p	Valid N Group 1	Valid N Group 2	Std. Dev. Group 1	Std. Dev. Group 2	F - ratio Variances	p Variances
เนื้อปกติ vs. เมล็ดใหญ่	715.7	685.8	0.5001	131	0.6178	38	95	290.6	320.1	1.2132	0.5149
เนื้อปกติ vs. เนื้อแกวยางไหล	715.7	799.4	-0.7345	46	0.4663	38	10	290.6	421.5	2.1031	0.1090
เนื้อปกติ vs. เนื้อเนา	715.7	825.0	-1.0525	48	0.2978	38	12	290.6	380.5	1.7136	0.2172
เมล็ดใหญ่ vs. เนื้อแกวยางไหล	685.8	799.4	-1.0349	103	0.3031	95	10	320.1	421.5	1.7335	0.1841
เมล็ดใหญ่ vs. เนื้อเนา	685.8	825.0	-1.3898	105	0.1675	95	12	320.1	380.5	1.4125	0.3603
เนื้อแกวยางไหล vs. เนื้อเนา	799.4	825.0	-0.1497	20	0.8825	10	12	421.5	380.5	1.2273	0.7365

ภาคผนวก จ

ตารางข้อมูลการทดสอบทางสถิติแบบทีของแบบจำลองผลส้ม ผลส้ม และมังคุด

ตารางที่ จ.1 แสดงข้อมูลการทดสอบทางสถิติแบบทีของแบบจำลองผลส้ม

Group 1 vs. Group 2	t - test for independent samples										
	Note : Variables were treated as independent samples										
	Mean Group 1	Mean Group 2	t - value	df	p	Valid N Group 1	Valid N Group 2	Std. Dev. Group 1	Std. Dev. Group 2	F - ratio Variances	p Variances
0.0 % vs. 25.0 %	647.3	747.9	-0.4313	18	0.6714	4	16	272.1	440.3	2.6189	0.4649
0.0 % vs. 50.0 %	647.3	631.2	0.0505	22	0.9602	4	20	272.1	616.0	5.1263	0.2031
0.0 % vs. 75.0 %	647.3	478.8	1.2691	22	0.2177	4	20	272.1	237.4	1.3134	0.5984
0.0 % vs. 87.5 %	647.3	415.3	1.5586	10	0.1502	4	8	272.1	229.5	1.4058	0.6378
0.0 % vs. 100.0 %	647.3	365.5	1.9822	8	0.0828	4	6	272.1	182.1	2.2315	0.4050
25.0 % vs. 50.0 %	747.9	631.2	0.6374	34	0.5282	16	20	440.3	616.0	1.9574	0.1914
25.0 % vs. 75.0 %	747.9	478.8	2.3450	34	0.0250	16	20	440.3	237.4	3.4395	0.0126
25.0 % vs. 87.5 %	747.9	415.3	1.9898	22	0.0592	16	8	440.3	229.5	3.6817	0.0886
25.0 % vs. 100.0 %	747.9	365.5	2.0371	20	0.0551	16	6	440.3	182.1	5.8440	0.0613
50.0 % vs. 75.0 %	631.2	478.8	1.0327	38	0.3083	20	20	616.0	237.4	6.7326	0.0001
50.0 % vs. 87.5 %	631.2	415.3	0.9559	26	0.3479	20	8	616.0	229.5	7.2067	0.0127
50.0 % vs. 100.0 %	631.2	365.5	1.0296	24	0.3135	20	6	616.0	182.1	11.4392	0.0133
75.0 % vs. 87.5 %	478.8	415.3	0.6445	26	0.5249	20	8	237.4	229.5	1.0704	0.9931
75.0 % vs. 100.0 %	478.8	365.5	1.0716	24	0.2945	20	6	237.4	182.1	1.6991	0.5825
87.5 % vs. 100.0 %	415.3	365.5	0.4369	12	0.6699	8	6	229.5	182.1	1.5873	0.6316

ตารางที่ จ.2 แสดงข้อมูลการทดสอบทางสถิติแบบทีของผลส้ม

Group 1 vs. Group 2	t - test for independent samples										
	Note : Variables were treated as independent samples										
	Mean Group 1	Mean Group 2	t - value	df	p	Valid N Group 1	Valid N Group 2	Std. Dev. Group 1	Std. Dev. Group 2	F - ratio Variances	p Variances
เนื้อปกติ vs. เนื้อฟาม	475.1	676.0	-2.3276	158	0.0212	132	28	381.1	550.2	2.0843	0.0068

ตารางที่ จ.3 แสดงข้อมูลการทดสอบทางสถิติแบบทีของผลมังคุด

Group 1 vs. Group 2	t - test for independent samples										
	Note : Variables were treated as independent samples										
	Mean Group 1	Mean Group 2	t - value	df	p	Valid N Group 1	Valid N Group 2	Std. Dev. Group 1	Std. Dev. Group 2	F - ratio Variances	p Variances
เนื้อปกติ vs. เมล็ดใหญ่	715.7	685.8	0.5001	131	0.6178	38	95	290.6	320.1	1.2132	0.5149
เนื้อปกติ vs. เนื้อแก้วยางไหล	715.7	799.4	-0.7345	46	0.4663	38	10	290.6	421.5	2.1031	0.1090
เนื้อปกติ vs. เนื้อเนา	715.7	825.0	-1.0525	48	0.2978	38	12	290.6	380.5	1.7136	0.2172
เมล็ดใหญ่ vs. เนื้อแก้วยางไหล	685.8	799.4	-1.0349	103	0.3031	95	10	320.1	421.5	1.7335	0.1841
เมล็ดใหญ่ vs. เนื้อเนา	685.8	825.0	-1.3898	105	0.1675	95	12	320.1	380.5	1.4125	0.3603
เนื้อแก้วยางไหล vs. เนื้อเนา	799.4	825.0	-0.1497	20	0.8825	10	12	421.5	380.5	1.2273	0.7365

## ภาคผนวก ข

## ข้อมูลพื้นฐานของผลส้ม และแบบจำลองของผลส้ม

## ผลส้ม

- น้ำหนักเฉลี่ยของผลส้มที่ใช้ในการทดลอง  $142.08 \pm 16.92$  g
- ปริมาตรเฉลี่ยของผลส้มที่ใช้ในการทดลอง  $148.37 \pm 20.24$  cm<sup>3</sup>
- ความหนาแน่นเฉลี่ย  $0.9608 \pm 0.0482$  g/cm<sup>3</sup>
- ค่า pH เฉลี่ย  $4.09 \pm 0.29$
- ค่า % Brix เฉลี่ย  $10.91 \pm 0.97$

## แบบจำลองของผลส้ม

- น้ำหนักแห้ง 3.96 g
- น้ำหนักเปียก 149.87 g
- ปริมาตร 199.87 cm<sup>3</sup>
- ความหนาแน่นขณะแห้ง  $0.019812$  g/cm<sup>3</sup>
- ความหนาแน่นขณะเปียก  $0.749837$  g/cm<sup>3</sup>

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายกัมปนาท พรรณราย

วัน เดือน ปีเกิด 24 กรกฎาคม 2522

วุฒิการศึกษา

วุฒิ  
วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ชื่อสถาบัน  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ปีที่สำเร็จการศึกษา  
2543





