บทที่ 5

ทฤษฎีการควบคุมคุณภาพของเครื่องมือนับวัดและเครื่องมือสร้างภาพ

ขบวนการควบคุมคุณภาพของเครื่องมือทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์แบ่งการวิจัยเป็น 2 ประเภท คือ

ก. การวิจัยหาข้อมูลอ้างอิงและข้อมูลเมื่อแรกรับรวมทั้งข้อมูลภายหลังการซ่อมบำรุงเครื่องมือ ต้องทำการบันทึกผลและรายละเอียดเป็นตัวเลข ภาพถ่ายและวิธีการวิจัยอันมีผลต่อการทำงานทั้งระบบของเครื่องมือไว้อย่างละเอียดในสมุดคู่มือการทำงานและการใช้ครื่องมือ ข้อมูลที่บันทึกไว้อย่างละเอียดในสมุดคู่มือการทำงจนและการใช้เครื่องมือ ข้อมูลที่บันทึกไว้นี้ใช้เป็นหลักฐานอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องมือครั้งต่อไป

ข. การวิจัยการทำงานประจำของเครื่องมือเมื่อใช้เครื่องมือเช่น ประจำวัน ประจำสัปดาห์ เป็นต้น เพื่อควบคุมให้เครื่องมือทำงานได้ถูกต้องทุกวัน ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้อธิบายการทำงานหรือการเปลี่ยนแปลงการทำงานของเครื่องมือซึ่งแสดงออกมาเป็นตัวเลขและภาพถ่ายต้องเก็บรวบรวมไว้ในสมุดคู่มือเช่นเดียวกับการเก็บข้อมูลอ้างอิงเสมอ การเก็บรวบรวมข้อมูลเหล่านี้สำคัญมากเพราะการทดสอบหลายชนิดจากเครื่องมือเดียวกัน ต้องใช้วิธีทำแบบเดียวกันและนำข้อมูลเดิมมาใช้คำนวณหรือนำมาเปรียบเทียบกันอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่ใช้เครื่องมือ

นอกจากนี้การศึกษาและวิจัยการทำงานของเครื่องมือทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์อาจแตกต่างกันในเครื่องมือแต่ละชนิด การทดสอบเครื่องมือแต่ละเครื่องแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

ก. การวิจัยคุณสมบัติเฉพาะเครื่องมือทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ซึ่งมีความแตกต่างกันในเครื่องมือแต่ละประเภท ผลของการวิจัยควรได้ค่าหรือตัวเลขซึ่งอยู่ในขอบเขตที่สำนักงานมาตรฐานกำหนดไว้ เช่น กำลังแยก (resolution) ความไวในการนับวัด (sensitivity) ของเครื่องมือ ความสม่ำเสมอ (uniformity) ของภาพและความถูกในแนวเส้นตรง (linearity) ถ้าผลที่ได้ค่าซึ่งแตกต่างจากขอบเขตที่กำหนดไว้จากสำนักงานมาตรฐานสากลควรพิจารณาว่ามีปัจจัยใดที่ทำให้เครื่องมือผิดพลาดควรรีบทำการแก้ไขและไม่ควรนำมาใช้งานจนกว่าแก้ไขหรือซ่อมแซมให้ทำงานได้ถูกต้อง

ข. การวิจัยความสามารถในการนับวัดรังสีแกมมาของเครื่องมือนิวเคลียร์ ที่มีค่าแปรผันกันทางสถิติที่ควรจะเป็นหรือความสามารถเฉพาะเครื่องมือแต่ละเครื่อง เช่น ความแม่นยำ (precision) ความแน่นอนในการนับวัด (accuracy) การหาอัตรานับวัด (count rate performance) และแบคกราวด์ (background) การทำงานทั้งหมด (total performance) เป็นต้น

วิธีการควบคุมคุณภาพของเครื่องมือทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ที่สำคัญแบ่งออกได้ 10 ชนิด คือ

ตารางที่ 5.1 การควบคุมคุณภาพของเครื่องมือสร้างภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์

ประเภทของการวิจัย	แบบทดสอบที่เหมาะสมกับเครื่องมือ	
	สแกนเนอร์	เครื่องถ่ายภาพ
1. energy calibration	✓	✓
2. sensitivity	✓	✓
3. resolution:a) spatial resolution	✓	✓
b) energy resolution	✓	✓
4. background	✓	✓
5. linearity :-		
a. linearity of energy response	✓	✓
b. linearity of activity response	—	—
c. spatial linearity	—	✓
d. system linearity	✓	✓
6. total performance	✓	✓
7. Uniformity	✓	✓
8. count rate Performance	—	✓
9. contrast enhancement	✓	✓
10. Precision (X^2)	✓	—

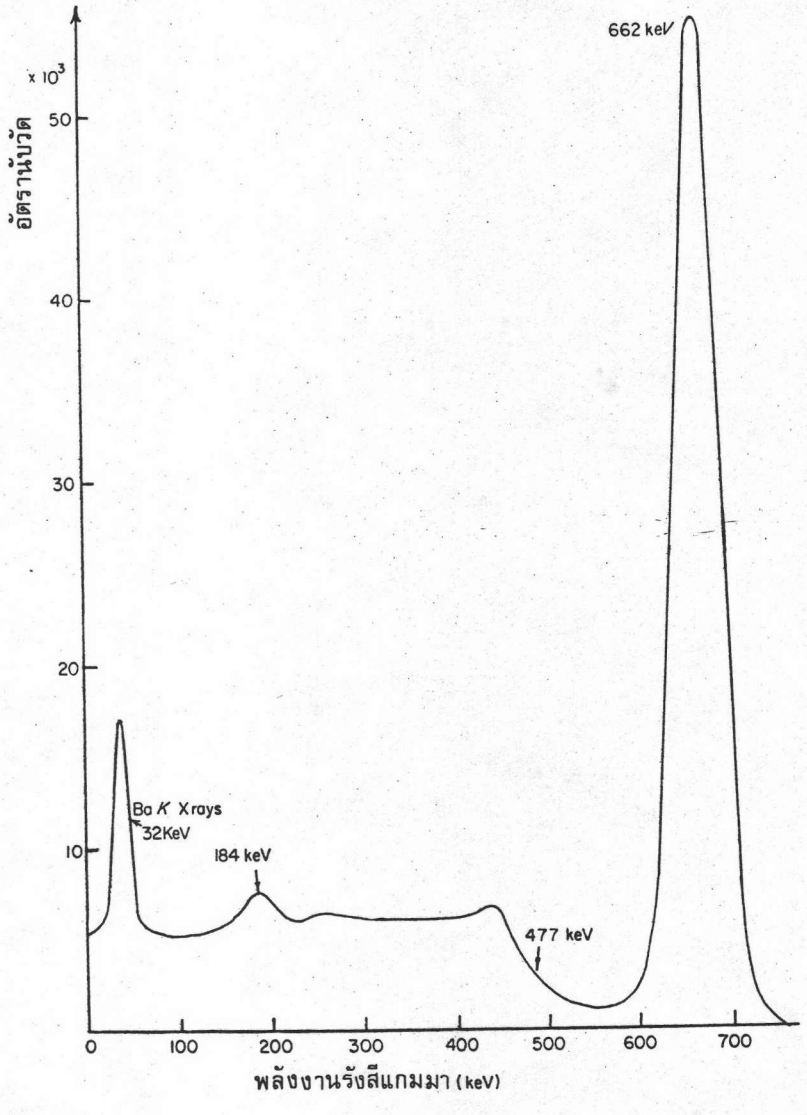
การควบคุมคุณภาพของเครื่องมือทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์แตกต่างกันตามประเภทของเครื่องมือดังรายละเอียดคือ

5.1 Energy calibration (การปรับระดับพลังงานของเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ)

การปรับระดับพลังงานของเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณเป็นการศึกษาความสามารถของเครื่องมือนิวเคลียร์ที่จะวัดพลังงานโฟตอนของรังสีแกมมาของนิวไคลด์รังสีมาตรฐานซีเซียม-137 ได้ถูกต้องตรงกับพลังงานโฟตอนที่แท้จริง โดยเฉพาะการวัดพลังงานของรังสีแกมมาที่โฟโตพีค โดยปรับกำลังขยาย (gain) และศักย์ไฟฟ้าของเครื่องนับวัดให้วัดอัตรานับวัดได้สูงสุด

ปรับความกว้างของหน้าต่าง (energy window width) ของเครื่องนับวัดและเครื่องถ่ายภาพให้เล็กสุด หรือในเครื่องเรคติลิเนียร์สแกนเนอร์มีปุ่มปรับพลังงานระดับสูง (upper level) และพลังงานระดับต่ำ (lower level) ให้กึ่งกลางของระดับพลังงาน (center line) หรือกึ่งกลางระหว่างพลังงานสูงและต่ำจากค่าต่ำ ๆ ซึ่งยังไม่มีอัตรานับวัดปรากฏขึ้น เพิ่มกึ่งกลางของระดับพลังงานครั้งละ 5 กิโลอิเล็คตรอนโวลท์ จนกระทั่งอัตรานับวัดปรากฏขึ้น เมื่อเพิ่มกึ่งกลางของระดับพลังงานตามลำดับจะได้อัตรานับวัดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามสเปคตรัมของนิวไคลด์รังสี ซึ่งให้อัตรานับวัดเกิดขึ้นซึ่งเนื่องมาจากการเกิดรังสีเอกซ์ในหัวนับวัด (K x-ray) การกระเจิงกลับของรังสีแกมมาในตัวกลางด้านหลังต้นกำเนิดรังสี และการกระเจิงแบบคอมพ์ตัน เป็นต้น จนกระทั่งได้อัตรานับวัดสูงสุดและลดลงตามลำดับ ดังรูปที่ 5.1 กึ่งกลางของระดับพลังงานที่ปรากฏอัตรานับวัดมากสุดนี้เรียกว่าโฟโตพีคของนิวไคลด์รังสีมาตรฐานซีเซียม-137 ปรับกึ่งกลางของระดับพลังงานให้ตรงกับตำแหน่งที่ ให้อัตรานับวัดมากสุดหรือโฟโตพีค

ในทำนองเดียวกันเมื่อใช้นิวไคลด์รังสีอื่น เช่น ไอโอดีน-131 หรือเทคนีเซียม-99 เอ็ม เป็นต้นกำเนิดรังสีสำหรับนับวัดหรือถ่ายภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ ควรหาอัตรานับวัดมากสุดหรือโฟโตพีคก่อนทดสอบได้โดยใช้นิวไคลด์เหล่านี้นับวัดแทนนิวไคลด์มาตรฐานซีเซียม-137 กึ่งกลางของระดับพลังงานที่โฟโตพีคคือตำแหน่งของการปรับเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับเครื่องนับวัดและเครื่องมือสร้างภาพซินทิลเลชันที่จะวัดพลังงานของรังสีแกมมาที่มีอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเลคตริกในผลึกนับวัด

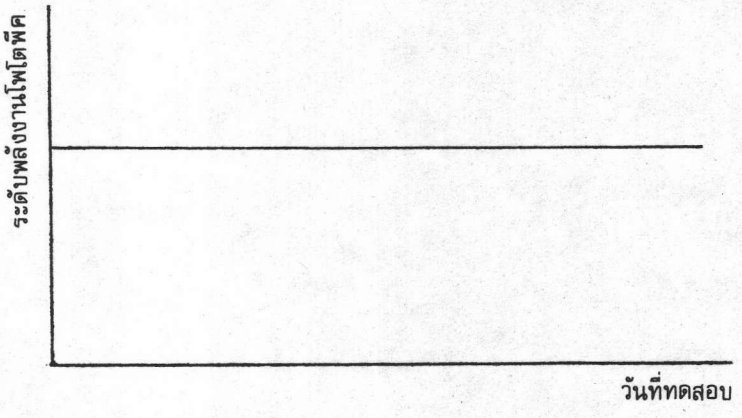


รูปที่ 5.1 แสดงสเปคตรัมของนิวไคลด์รังสีมาตรฐานซีเซียม-137 ซึ่งเป็นสเปคตรัมที่ถูกแสดงด้วยเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณซึ่งมีโฟโตพีคของซีเซียม-137 คือ 662 keV. คอมพ์ตันเอดจ์มีค่า 477 keV. และการกระเจิงกลับของรังสีแกมมาที่พลังงาน 184 keV.

การวัดพลังงานของรังสีแกมมาของเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณด้วยนิวไคลด์รังสีมาตรฐานซีเซียม-137 ใช้ในการปรับเครื่องนับวัดได้ดีเฉพาะเครื่องนับวัดที่มีผลึกซินทิลเลชันหนา เช่นเครื่องนับวัดซินทิลเลชันและสแกนเนอร์ สำหรับเครื่องมือถ่ายภาพมีผลึกหัวนับวัดบางจะวัดรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV ของซีเซียม-137 ได้ไม่สมบูรณ์ อาจใช้นิวไคลด์รังสีพลังงานต่ำที่ใช้อยู่ทดสอบแทน

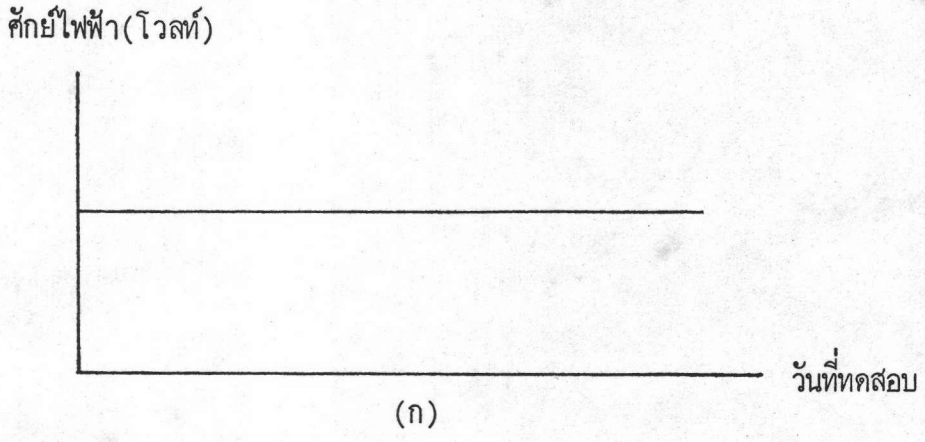
นอกจากนี้การปรับระดับพลังงานของเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณให้ถูกต้องควรคำนึงถึงกัมมันตภาพของนิวไคลด์รังสีที่ใช้ด้วยเสมอ ควรใช้นิวไคลด์รังสีที่มีกัมมันตภาพต่ำเช่น 100 ไมโครคูรี การใช้กัมมันตภาพสูงเช่นเกินกว่า 10 มิลลิคูรี เป็นต้น จะทำให้อัตรานับวัดสูงสุดที่ปรากฏคลาดเคลื่อนไป เกิดจากการขาดหายไปของค่านับวัดเนื่องจากรีโซลวิงไทม์ (resolving time) มีค่ามากและการซ้อนกันของสัญญาณ (pulse pileup) บริเวณโฟโตพีคของสเปคตรัมรังสีแกมมาจากนิวไคลด์รังสีดังแสดงไว้ในหัวข้อ 5.8 และ 2.5

ในการควบคุมการปรับระดับพลังงานของเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณให้ถูกต้องคอนโทรล ชาร์ท (control chart) ของความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่โฟโตพีคที่วัดได้และวันที่ทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของการปรับระดับพลังงานทุกวันที่ใช้เครื่องมือตลอดหนึ่งปี ดังรูปที่ 5.2

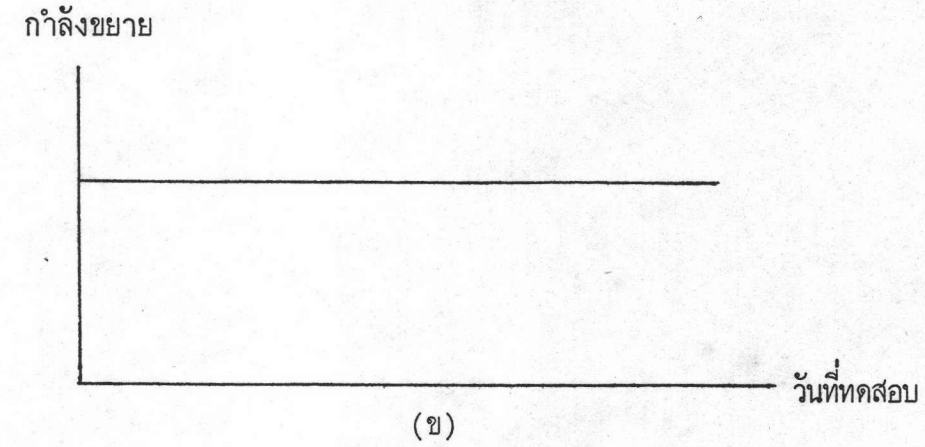


รูปที่ 5.2 แสดงคอนโทรลชาร์ทของการปรับระดับพลังงานที่โฟโตพีคของเครื่องนับวัดเครื่องถ่ายภาพซินทิลเลชัน ตลอดเวลาการใช้เครื่องมือหนึ่งปี

เพื่อให้การควบคุมการปรับระดับพลังงานของเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณได้ถูกต้อง จึงมีคอนโทรลชาร์ทของศักย์ไฟฟ้าและกำลังขยาย* ของเครื่องมือควบคู่ไปด้วยเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของการปรับระดับพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 5.3 เพราะการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าจะทำให้การวัดระดับพลังงานที่โฟโตพีคเปลี่ยนแปลงได้ เช่นในเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมาเมื่อศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น การวัดพลังงานที่โฟโตพีคจะเพิ่มตามด้วยเสมอ เป็นต้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3 (ก) แสดงคอนโทรลชาร์ทของการปรับศักย์ไฟฟ้าในเครื่องมือนิวเคลียร์ตลอดเวลาหนึ่งปี

(ข) แสดงคอนโทรลชาร์ทของการปรับกำลังขยายของเครื่องมือนิวเคลียร์ตลอดเวลาหนึ่งปี

---

* สำหรับเครื่องมือบางชนิดเช่น เครื่องนับวัดและเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมาที่ไม่มีการปรับกำลังขยายหรือใช้กำลังขยายคงที่ จึงทำเฉพาะคอนโทรลชาร์ทของศักย์ไฟฟ้าอย่างเดียวเท่านั้น

5.2 ความไวของการนับวัด (sensitivity)

ความไวเป็นความสามารถของเครื่องนับวัดชินทิลเลชันที่จะนับรังสีแกมมาที่ผ่านคอลลิเมเตอร์เข้ามาสู่หัวนับวัดและแสดงค่านับวัดออกมา[6] ความไวของระบบนับวัดเป็นอัตราส่วนของอัตรานับวัดที่หัวนับวัดได้กับกัมมันตภาพของต้นกำเนิดรังสี

$$\text{ความไว} = \frac{\text{อัตรานับวัด (ครั้งต่อวินาที)}}{\text{กัมมันตภาพ (ไมโครคูรี)}} \qquad \ldots\ldots\ldots 5.1$$

การหาค่าความไวมีประโยชน์ในการเปรียบเทียบความไวของการตอบสนองของระบบนับวัดต่าง ๆ หรือระบบนับวัดเดียวกันขณะใช้ตรวจวัดที่เวลาต่าง ๆ โดยมีสภาพการนับวัดเหมือนกัน ได้แก่ ขนาดและรูปร่างของต้นกำเนิดรังสี ชนิดของนิวไคลด์รังสีหรือวัสดุที่ใช้เป็นต้นกำเนิดรังสี ระยะระหว่างหัววัดและต้นกำเนิดรังสี ระดับขนาดของอัตรานับวัดซึ่งอาจขาดหายไปเนื่องจากรีโซลวิงไทม์ (resolving time)[6,12,17-26] การปรับเครื่องมือนับวัด การซ้อนกันของสัญญาณ (pulse pileup) เมื่อใช้อัตรานับวัดสูง ๆ นอกจากนี้ค่าความไวของสารกัมมันตรังสียังอาจนำมาใช้คำนวณกัมมันตภาพของสารเดียวกันที่ยังไม่ทราบค่า (Unknown) ได้อีกด้วย

ความไวของระบบนับวัดอาจนิยามตามลักษณะของต้นกำเนิดรังสีเป็นสี่แบบคือ ความไวจากต้นกำเนิดรังสีแบบจุด (Point Source) แบบเส้นตรง (Line Source) แบบระนาบ (Plane source) และแบบปริมาตร (Volume Source) การวัดความไวจากต้นกำเนิดรังสีแบบระนาบเป็นการวิจัยและการศึกษาคุณภาพที่เหมาะสมสำหรับเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมา

ความไวของเครื่องมือสร้างภาพเรดิลิเนียร์สแกนเนอร์และเครื่องนับวัดทำได้โดยให้เครื่องมือหาอัตรานับวัดจากนิวไคลด์มาตรฐานซีเซียม-137 ชนิดจุดทุก ๆ วัน นำอัตรานับวัดจากทุก ๆ วันมาทำคอนโทรลชาร์ท (control chart) ของความไว เพื่อความสะดวกในการวิจัยจึงวัดความไวออกมาเป็นอัตรานับวัดของนิวไคลด์มาตรฐานสำหรับทำคอนโทรลชาร์ทและความไวแบบระนาบของเครื่องถ่ายภาพวัดเป็นหน่วย ครั้งต่อวินาทีต่อไมโครคูรี หรือครั้งต่อวินาทีต่อแบคเคอเรล

การทำคอนโทรลชาร์ท (Control chart) ของความไว

ซีเซียม-137 มีครึ่งชีวิต 30 ปี หรือมีอัตราการสลายตัวไปของนิวเคลียส์นี้ 2.3% ต่อปี จากคุณสมบัตินี้จึงนำนิวไคลด์ซีเซียมมาใช้วิจัยความไวของการนับวัดของเครื่องมือนิวเคลียร์ในแต่ละวันที่ใช้เครื่องตลอดหนึ่งปี

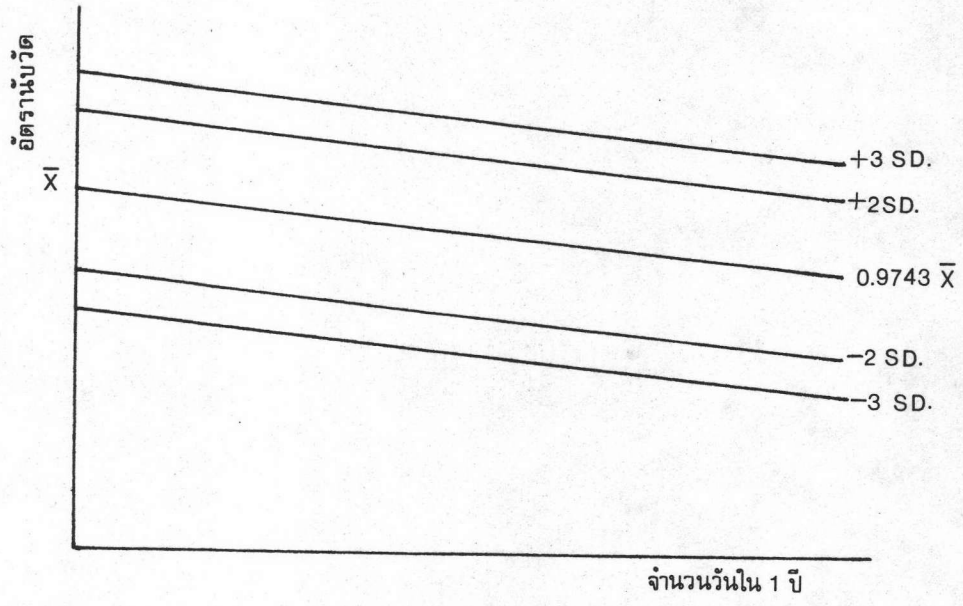
โดยใช้เครื่องมือนิวเคลียร์นับวัดนิวไคลด์ซีเซียม-137 แบบจุดอันเดียวกัน ทำการบันทึกผลการวิจัยและเขียนกราฟระหว่างอัตรานับวัดและวันที่ของการวิจัยเป็นเวลาต่อเนื่องกันนานหนึ่งปี จุดตั้งต้นของกราฟหาได้จากค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) ของอัตรานับวัดของนิวไคลด์ซีเซียม-137 จากวันแรกที่ทดลองจำนวน 20 ค่า ลากเส้นตรงแทนอัตรานับวัดของทุกๆวัน โดยมีอัตรานับวัดเมื่อครบเวลาหนึ่งปีคือ 0.974 $\bar{X}$ เขียนเส้นตรงแทนการเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้น $\bar{X}$-0.974$\bar{X}$ เป็นจำนวน $\pm$2 เท่า และ $\pm$3 เท่า ของการเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\pm$2 S.D., และ $\pm$3 S.D.) ดังรูปที่ 5.4

หาอัตรานับวัดจากนิวไคลด์มาตรฐานซีเซียม-137 นี้ทุก ๆ วันตลอด 1 ปี โดยค่านับวัดที่นับได้แต่ละครั้งไม่ควรต่ำกว่า 10,000 ครั้ง ใช้อ่านค่านับวัดจากเรตมิเตอร์อย่างน้อย 4 เท่าของค่าเวลาคงตัวที่มีค่ามาก (long time constant)[14]

บันทึกอัตรานับวัดแต่ละวันที่วัดได้ลงในกราฟ การกระจายของอัตรานับวัดจากเครื่องนับวัดที่มีความไวในการนับวัดคงที่และถูกต้องตลอดหนึ่งปีควรแสดงอัตรานับวัดอยู่ในแนวเส้นตรง $\bar{X}$-0.974 $\bar{X}$ ควรมีการกระจายของอัตรานับวัดอยู่นอก $\pm$2 S.D. ไม่เกิน 4.5% และกระจายอยู่นอก $\pm$3 S.D. ไม่เกิน 0.3% ตลอดปี[16] ถ้าอัตรานับวัดที่ได้อยู่นอกค่าที่กำหนดไว้ดังกล่าว ควรตรวจสอบเครื่องนับวัดและการปรับเครื่องมือให้เหมือนกับการตรวจสอบวันแรกในกราฟ และนับวัดใหม่ การกระจายของอัตรานับวัดที่ผิดไปจากค่าควรจะได้อาจเกิดจากหลายสาเหตุเช่น

1. ความไวของเครื่องมือเปลี่ยนแปลงไป
2. การปรับ Energy calibration ไม่ถูกต้อง
3. เครื่องนับวัดมีกำลังแยกของพลังงานลดลง[14]

ควรตรวจสอบข้อผิดพลาดจาก 2 และ 3 ใหม่ แล้วหาความไวของเครื่องนับวัดใหม่และบันทึกลงในคอนโทรลชาร์ท



รูปที่ 5.4 แสดงคอนโทรลชาร์ทของความไวของเครื่องนับวัดรังสีแกมมาจากนิวไคลด์รังสีซีเซียม-137 ตลอดเวลานับวัดหนึ่งปี

การตรวจสอบความไวของเครื่องถ่ายภาพด้วยต้นกำเนิดรังสีแบบระนาบมีพื้นที่ 100 ตารางเซนติเมตร ใช้นิวไคลด์รังสีเทคนีเชียม-99เอ็ม กัมมันตภาพ 40 MBq(1 mCi) และให้อัตรานับวัดไม่เกิน 10^4 ครั้งต่อวินาที(6,12) และใช้คอลลิเมเตอร์ช่องขนานสำหรับวัดพลังงานต่ำ ควรใช้คอลลิเมเตอร์เดียวกันนี้ทดสอบตลอดไป นับวัดโดยวางต้นกำเนิดรังสีชิดผิวคอลลิเมเตอร์ของหัวนับวัด คำนวณความไวของเครื่องถ่ายภาพดังสมการ 5.1

ความไวของเครื่องถ่ายภาพ ควรแตกต่างจากความไวที่กำหนดไว้โดยคู่มือการใช้เครื่องมือไม่เกิน 10%(14) ถ้าเกินกว่านี้ควรตรวจสอบหาสาเหตุความบกพร่องของเครื่องมือหรือความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น นอกจากนี้ความไวของเครื่องถ่ายภาพจะเปลี่ยนแปลงไปตามความถูกต้องในการนับวัดกัมมันตภาพจากต้นกำเนิดรังสีด้วยโดสแคลิเบรเตอร์* การคำนวณความไวได้ถูกต้องควรมีความผิดพลาดในการวัดกัมมันตรังสีด้วยโดสแคลิเบรเตอร์ไม่เกิน $\pm$5%(14)

---

*Dose calibrator เป็นเครื่องมือวัดกัมมันตภาพของสารกัมมันตรังสีก่อนนำไปใช้ทดสอบหรือวินิจฉัยโรค

5.3 กำลังแยก

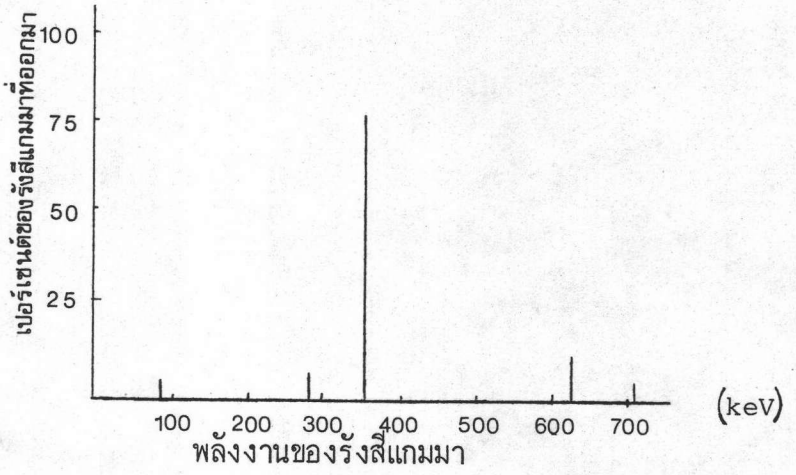
กำลังแยกของระบบนับวัดและเครื่องถ่ายภาพซินทิลเลชันแบ่งเป็น 2 ประเภท

ก. กำลังแยกของพลังงาน

ข. กำลังแยกของการขจัด

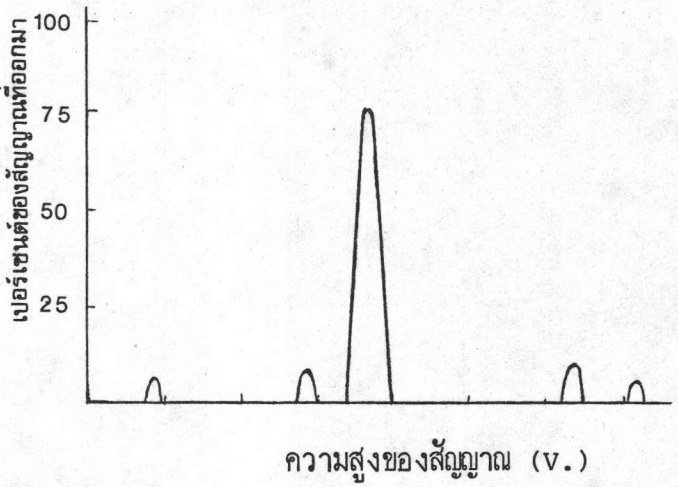
5.3.1 กำลังแยกของพลังงาน

รังสีแกมมาถูกปล่อยออกมาจากนิวไคลด์รังสีแต่ละชนิดประกอบด้วยพลังงานมีค่าคงที่หลายค่าพลังงานซึ่งแตกต่างกันตามชนิดของนิวไคลด์เหล่านั้น เช่น ไอโอดีน-131 ซึ่งให้รังสีแกมมาส่วนใหญ่มีพลังงาน 364 keV และรังสีแกมมาพลังงานสูงกว่าหรือต่ำกว่าระดับนี้ สเปคตรัมจากรังสีแกมมาที่ถูกปล่อยจากนิวเคลียส มีลักษณะเป็นเส้นของระดับพลังงานซึ่งแยกจากกันดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงสเปคตรัมรังสีแกมมาที่ถูกปล่อยออกมาจากนิวไคลด์รังสีไอโอดีน-131

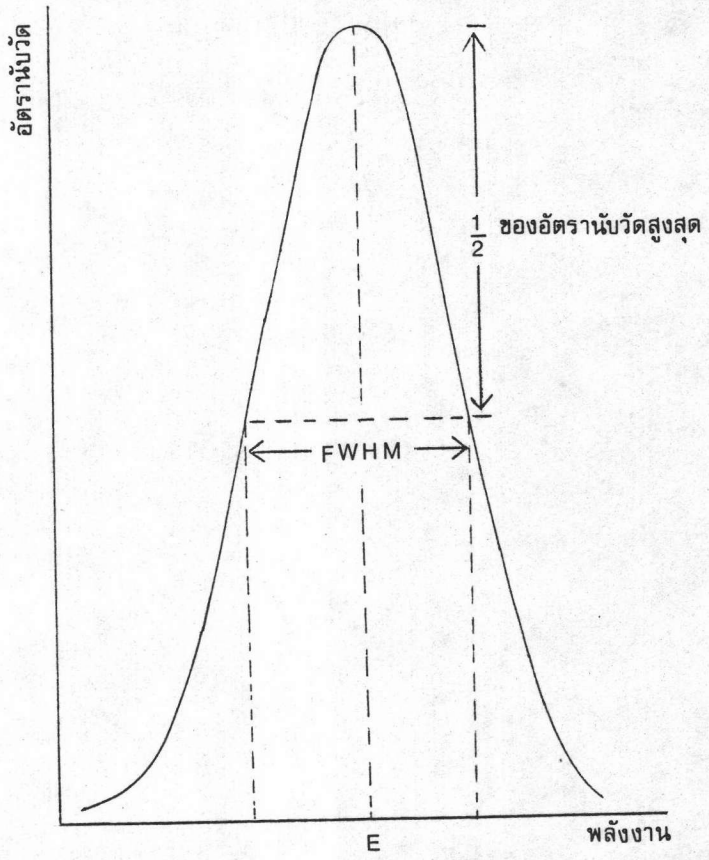
ตามทฤษฎีเครื่องนับวัดชนิดซินทิลเลชันควรนับวัดสัญญาณออกมาถูกต้องตรงกับความสูงของสัญญาณจากรังสีแกมมาโดยถือว่าไม่มีการกระเจิงเลยและรังสีแกมมาทุก ๆ อนุภาคถูกวัดในหัวนับวัดหมด สเปคตรัมที่บันทึกได้จะปรากฏออกมาดังรูปที่ 5.5 แต่สเปคตรัมที่ได้จากเครื่องนับวัดไม่เคยปรากฏดังรูปเลยเนื่องจากเหตุผลหลายๆ ประการของเครื่องนับวัดซินทิลเลชัน เหตุผลสำคัญที่สุดได้แก่ความสามารถของการรวบรวมแสงสว่างที่ได้จากการเกิดซินทิลเลชันในผลึกและการเปลี่ยนแสงเหล่านี้ไปเป็นอิเล็กตรอนที่ผิวของโฟโตแคโธดในหลอดโฟโตมัลติพลาย-เออร์ จากเหตุผลเหล่านี้ทำให้สัญญาณที่เกิดจากรังสีแกมมาที่ระดับพลังงานเดี่ยว ๆ มีความกว้างมากขึ้นดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงการกระจายของพลังงานรังสีแกมมาหรือความกว้างของอำพนของสเปคตรัมของรังสีแกมมาจากไอโอดีน-131 ซึ่งวัดด้วยเครื่องนับวัดรังสีแกมมา

การกระจายของพลังงานเนื่องจากระบบนับวัดจะขึ้นอยู่กับการทำงานของเครื่องนับวัดและพลังงานรังสีแกมมาที่โฟโตพีค ความกว้างของสัญญาณถูกวัดออกมาเป็นกำลังแยกของความสูงของพลังงาน (pulse height resolution) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความกว้างที่ครึ่งความสูงของโฟโตพีค (Full width at half maximum) กับพลังงานที่โฟโตพีคซึ่งเครื่องมือวัดได้

โดยปกติกำลังแยกของเครื่องนับวัดจะเปรียบเทียบกันเมื่อใช้วัดรังสีแกมมาพลังงาน 662 กิโลอิเล็คตรอนโวลท์จากซีเซียม-137 เหมือนกัน สำหรับผลึกของหัวนับวัดทรงกระบอกตันควรมีกำลังแยกไม่เกิน 8-9% เครื่องนับวัดชนิดเดียวกันแต่เป็นชนิดมีช่องใส่สารตัวอย่างในผลึกจะมีกำลังแยกเลวลงคือ อาจมีค่าสูงถึง 15% เนื่องจากผลึกแบบนี้รวบรวมควอนตาของแสงไปให้หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ได้น้อย (เราถือว่ากำลังแยกดีที่สุด 0% หรือความกว้างของอำพนของสัญญาณเป็นศูนย์ เมื่อกำลังแยกเลวลงจะได้เปอร์เซนต์ความกว้างมากขึ้นหรือความกว้างของอำพนของสัญญาณมากขึ้น). นอกจากนี้กำลังแยกของเครื่องนับวัดจะเปลี่ยนแปลงไปตามความกว้างของ window และพลังงานของโฟตอนของรังสีแกมมาที่ถูกนับวัด สำหรับกำลังแยกของพลังงานทดสอบด้วยซีเซียม-137 คำนวณได้จาก FWHM ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับวัดและพลังงานของรังสีแกมมา ซึ่งใช้สำหรับหาค่า FWHM จากกราฟ

ดังสมการ

$$\% \text{ energy resolution} = \frac{\text{FWHM} \times 100}{E} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (5.2)$$

เมื่อ E คือพลังงานรังสีแกมมาที่โฟโตพีคของซีเซียม-137 ซึ่งเครื่องนับวัดซินทิลเลชันวัดได้

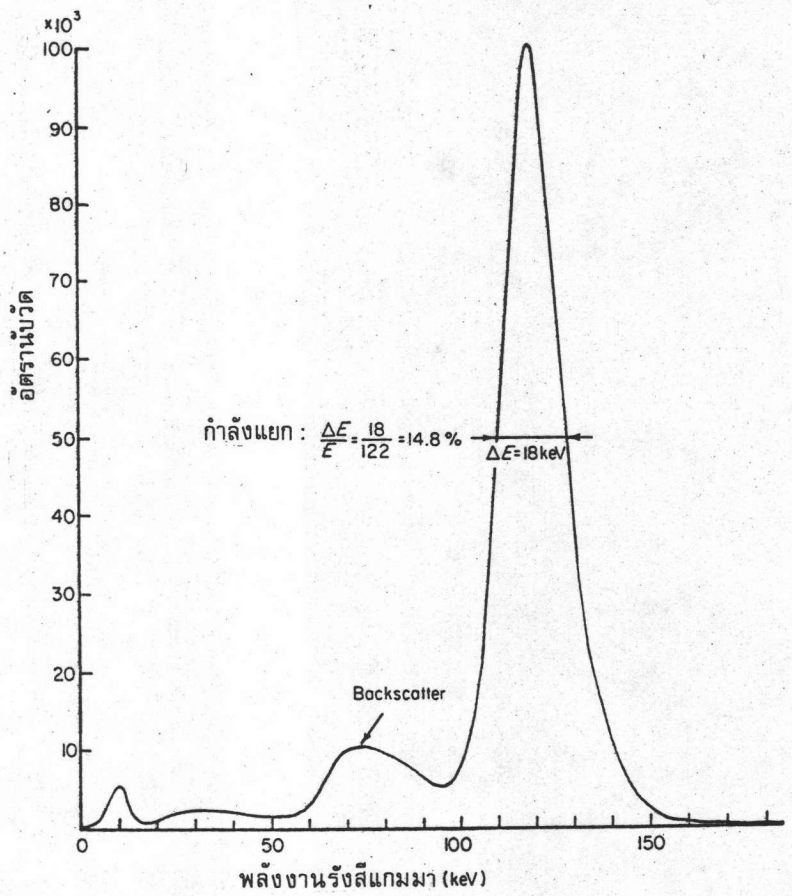
การวัดกำลังแยกของพลังงานของระบบนับวัดเป็นการวัดการขยายออกของพลังงานรังสีแกมมาที่กระจายอยู่บริเวณโฟโตพีค ความกว้างที่ครึ่งความสูงของโฟโตพีคเรียกว่ากำลังแยก (resolution หรือ line width) ปกติจะแสดงออกมาเป็นเปอร์เซนต์ของความสูงของกราฟของสัญญาณ สำหรับโฟโตพีคของโคบอลท์-57 (122 keV) จากรูปที่ 5.8 มีกำลังแยก

$$= \frac{\Delta E}{E}$$

$$= \frac{18}{122}$$

$$= 0.148$$

หรือ $= 14.8\%$ ของโฟโตพีค



รูปที่ 5.8 สเปคตรัมของโคบอลท์-57 ซึ่งมีโฟโตพีคที่ 122 keV มี FWHM 18 keV และกำลังแยกของพลังงานของเครื่องนับวัดที่วัดด้วยโคบอลท์คือ 14.8%

องค์ประกอบที่ทำให้กำลังแยกที่โฟโตพีคมีโอกาสเปลี่ยนแปลงไประหว่างขบวนการดูดกลืนในหัวนับวัดคือ

(1) การสร้างแสงสว่าง (luminescent light) รังสีแกมมาถูกดูดกลืนในผลึกทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิในผลึกขึ้น อิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานจลน์จะเคลื่อนที่ไปในผลึกและจะเสียพลังงานไปเป็นโฟตอนของแสง ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของรังสีแกมมาเป็นโฟตอนของแสงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของการเกิดอิเล็กตรอนในผลึก ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรังสีแกมมาเป็นโฟตอนจะไม่เป็นสัดส่วน ถ้าอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานจลน์น้อยเกินไป

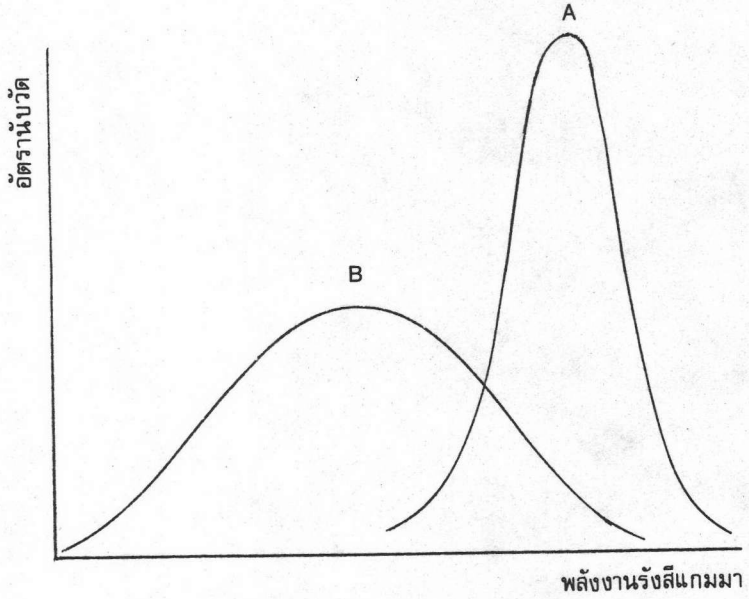
(2) การเก็บรวบรวมแสงของผลึกโซเดียมไอโอไดด์ ขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของผลึก ปริมาณแสงสว่าง (luminescent light) ที่มาถึงโฟโตแคโธดในหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์อาจจะแปรเปลี่ยนตามตำแหน่งของการดูดกลืนในผลึกซินทิลเลชัน จำนวนการสะท้อนของแสงและการดูดกลืนแสงในผลึกนับวัด

(3) โฟโตอิเล็กตรอนถูกสร้างขึ้นจากโฟโตแคโธดของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ โอกาสที่จะเกิดโฟโตอิเล็กตรอนแต่ละอนุภาคจะต้องได้รับแสงประมาณแปดควอนตา และโอกาสที่อิเล็กตรอนจากแคโธดเคลื่อนที่ไปถึงไดโนดแรกก็เป็นแฟคเตอร์สำคัญตัวหนึ่งที่ทำให้ค่านับวัดขาดหายไป

(4) การเพิ่มจำนวนของอิเล็กตรอนในหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ พบว่าอัตราส่วนของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ถูกปล่อยออกมาจากไดโนดกับจำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งชนไดโนดเดียวกันมีค่าประมาณ 4 เท่า ซึ่งให้อิเล็กตรอนจากแอโนด 10^6-10^7 อนุภาคต่ออิเล็กเลกตรอนที่ชนไดโนดแรก[7] ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างไดโนดและความสม่ำเสมอของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไดโนดต่าง ๆ

(5) ความไม่เสถียรของวงจรอิเลคทรอนิค ทำให้ภาคขยายที่ต่อจากหลอดโฟโตมัลติ-พลายเออร์ และภาควิเคราะห์ความสูงของสัญญาณอาจจะ ตอบสนองไม่คงเส้นคงวาเมื่อกำลังแยกพลังงาน (energy resolution) ของโฟโตพีคมีค่ามากขึ้น

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจะทำให้อำพนของสัญญาณที่ได้รับจากเครื่องนับวัดมีความแปรปรวนและทำให้กำลังแยกเปลี่ยนไป สำหรับรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำจะทำให้การกระจายของโฟโตพีคสูงหรือความกว้างของอำพนเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5.9

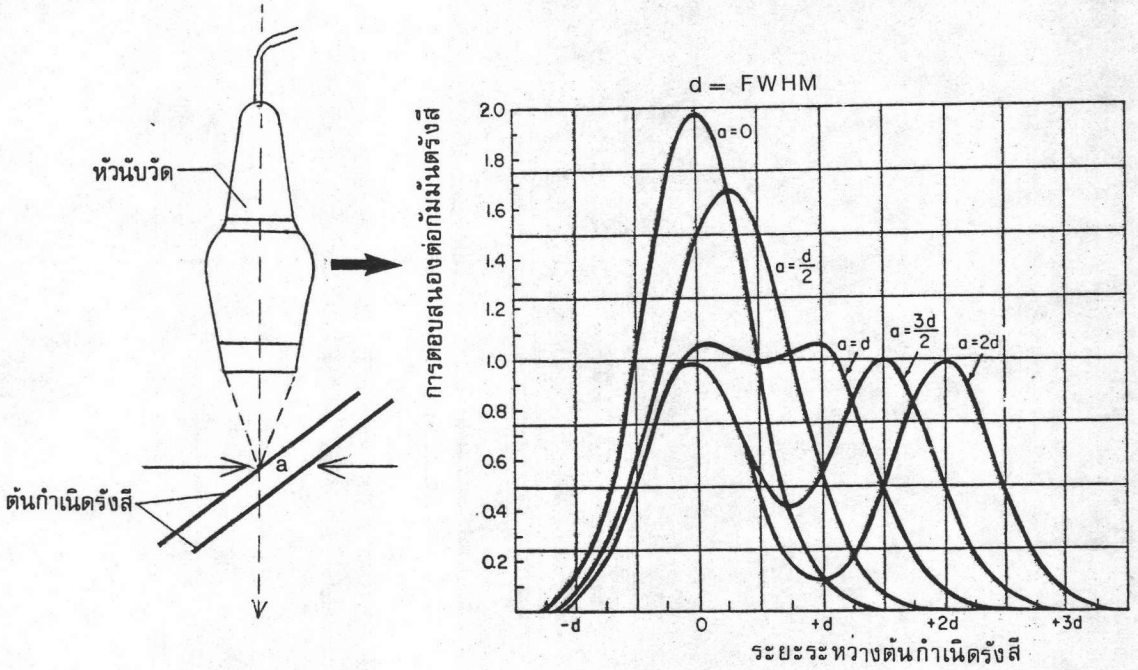


รูปที่ 5.9 A, B การกระจายของพลังงานรังสีแกมมา
พลังงานสูงและต่ำตามลำดับ

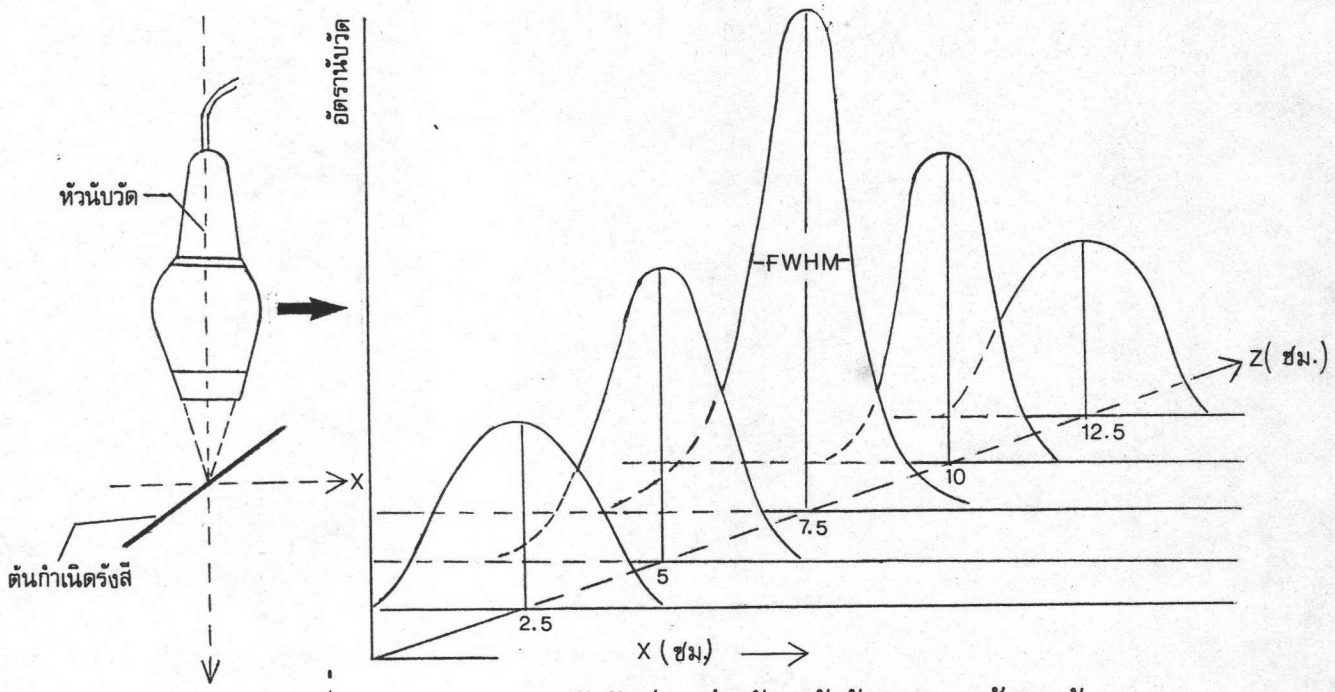
5.3.2 กำลังแยกของการขจัด (Spatial resolution)

กำลังแยกของการขจัดถูกกำหนดความหมายขึ้นครั้งแรกในวิชาแสง กำลังแยกของระบบหมายถึงระยะห่างน้อยสุดของจุดสองจุดที่ระบบสามารถแยกจุดทั้งสองจากกันได้และสามารถเห็นลักษณะของจุดทั้งสองได้ชัดเจน กำลังแยกที่เกี่ยวกับการทำงานของเครื่องมือทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์หมายถึงความสามารถของระบบที่จะจำแนกรายละเอียดเล็ก ๆ ที่เกิดจากการกระจายของต้นกำเนิดรังสีซึ่งเกือบเป็นเนื้อเดียวกันได้ชัด(11) การทดสอบกำลังแยกของการขจัดของเครื่องสแกนเนอร์และเครื่องมือถ่ายภาพรังสีแกมมาแตกต่างกันดังนี้

5.3.2.1 เครื่องสแกนเนอร์ หากำลังแยกของการขจัดของเครื่องสแกนเนอร์ได้โดยหาอัตรานับวัดจากต้นกำเนิดรังสีแบบเส้นสองเส้นขนานกันที่มีการขจัดต่าง ๆ กัน เครื่องสแกนเนอร์สามารถแยกต้นกำเนิดแบบเส้นทั้งสองได้เมื่อมีระยะห่างกันเท่ากับความกว้างที่ครึ่งความสูงของอำพนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับวัดและการขจัดของต้นกำเนิดรังสีหนึ่งเส้น เรียกระยะห่างหรือความกว้างที่ครึ่งความสูงนี้ว่า Full width at half maximum หรือ FWHM ดังรูปที่ 5.10 ปริมาณที่แสดงกำลังแยกของการขจัดของระบบเรียกว่า ดัชนีของกำลังแยก(6) ดัชนีของกำลังแยกเป็นฟังก์ชันของระยะทางระหว่างต้นกำเนิดรังสีและผิวหน้าของคอลลิเมเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 5.11 โดยหาอัตรานับวัดของต้นกำเนิดรังสีแบบเส้น ๆ หนึ่งที่ระนาบต่าง ๆ จากผิวหน้าของคอลลิเมเตอร์

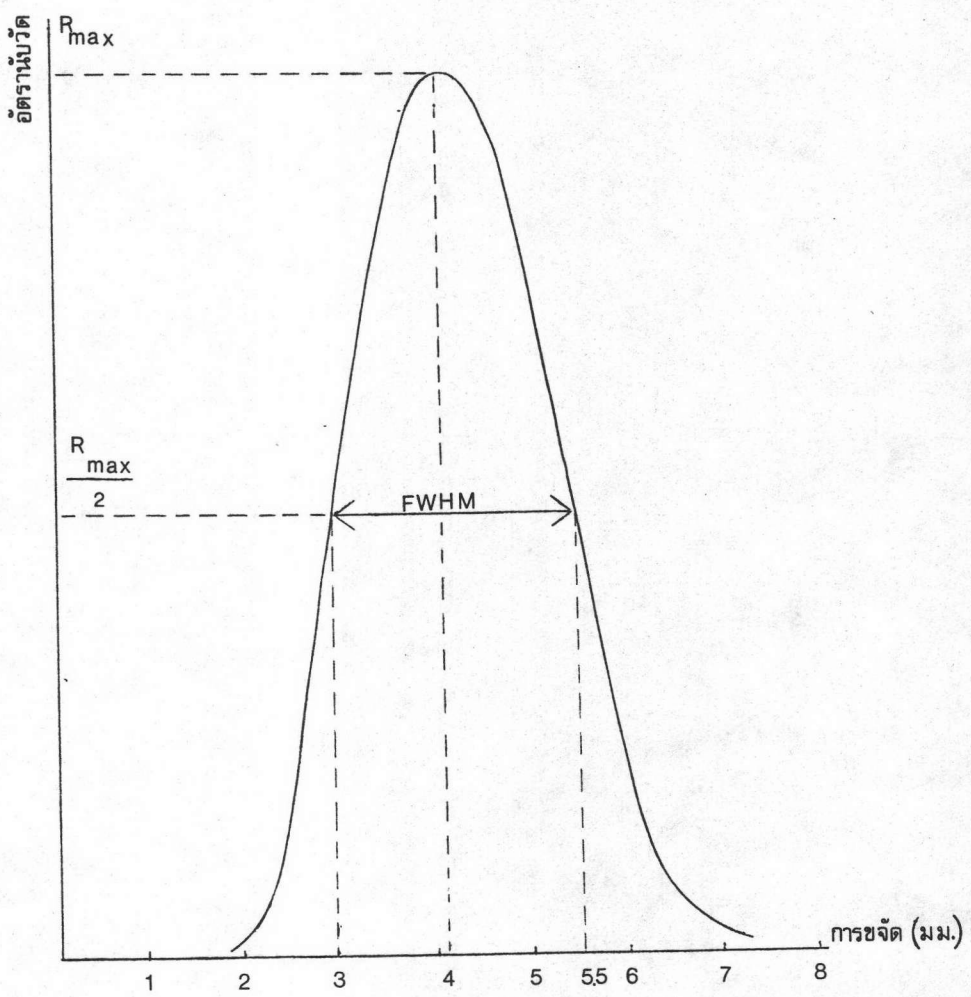


รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับวัดและการขจัดระหว่างต้นกำเนิดรังสี(a) จะพบว่าต้นกำเนิดรังสีแยกจากกันชัดเจนเมื่อ a>FWHM



รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับวัดและการขจัดของต้นกำเนิดรังสีจากหัวนับวัด อัตรานับวัดมากสุดเมื่อต้นกำเนิดรังสีอยู่ที่ระนาบโฟกัสของคอลลิเมเตอร์และมี FWHM น้อยสุด[31] อัตรานับวัดลดลงและ FWHM เพิ่มขึ้นเมื่อต้นกำเนิดรังสีอยู่ห่างระนาบโฟกัสของหัวนับวัด(Z)

FWHM มีประโยชน์ในการอธิบายกำลังแยกของระบบออกเป็นตัวเลขเดี่ยวๆ ซึ่งทำให้ค่าสมบูรณ์ขึ้น ระบบนับวัดมีองค์ประกอบต่าง ๆ กันคือ คอลลิเมเตอร์ หัวนับวัด เครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ เป็นต้น ไม่สามารถหากำลังแยกของการขจัดจากเครื่องมือแต่ละส่วนได้จึงหากำลังแยกรวมทั้งระบบ กำลังแยกของเครื่องมือจะดีขึ้นถ้าผู้ใช้เครื่องมือปรับปรุงวิธีการวัด การใช้และการดูแลระบบของเครื่องมือให้ทำงานได้ดีที่สุด กำลังแยกของการขจัดจากต้นกำเนิดรังสีแบบเส้นของเครื่องถ่ายภาพสแกนเนอร์หาได้จาก FWHM ดังรูป 5.12 คือ



รูปที่ 5.12 แสดงวิธีการหา FWHM ของการกระจายค่านับวัดรอบ ๆ ต้นกำเนิดรังสีแบบเส้น และวัดกำลังแยกของการขจัดหรือ FWHM ได้เท่ากับ 2.5 มม.

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำลังแยกของการขจัด = FWHM (5.3)

= 5.5-3

= 2.5 มม.

5.3.2.2 <u>เครื่องถ่ายภาพ</u> กำลังแยกของเครื่องถ่ายภาพซินทิลเลชันมีวิธีการวิจัยหลายวิธีเช่น

1. การใช้ต้นกำเนิดรังสีแบบเส้นหนึ่งเส้นเพื่อหาFWHM โดยถ่ายภาพของต้นกำเนิดรังสีแบบเส้นที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 1 มม. บันทึกภาพต้นกำเนิดรังสีแบบเส้นเป็นส่วนย่อย (Pixel) ต่าง ๆ ของภาพด้วยคอมพิวเตอร์ด้วยอัตรานับวัด 10^6 ครั้ง หาค่านับวัดจากแต่ละ Pixel ในแนวตั้งฉากกับจุดกึ่งกลางของภาพต้นกำเนิดรังสีบนจอภาพของคอมพิวเตอร์ จากการกระจายของค่านับวัดที่ระยะ*ต่าง ๆ จะแสดงออกมาดังรูป 5.12 สามารถหากำลังแยกของเครื่องถ่ายภาพ = FWHM ของการกระจายของค่านับวัด

2. การใช้ต้นกำเนิดรังสีแบบเส้นเล็ก ๆ สองเส้นวางขนานกัน มีระยะห่างกัน 2,4,6---- มม. เช่นเดียวกับการทดสอบในหัวข้อ 5.3.1.1 และบันทึกภาพของต้นกำเนิดรังสีทั้งสองทีละภาพจนครบ สังเกตการขจัดน้อยสุดระหว่างต้นกำเนิดรังสีทั้งสองที่สามารถมองเห็นภาพของต้นกำเนิดรังสีทั้งสองแยกจากกันได้ชัดเจน การขจัดน้อยสุดนี้คือกำลังแยกของการขจัด หรือในทำนองเดียวกันอาจใช้เส้นลวดตะกั่วสองเส้นแทนต้นกำเนิดรังสีทั้งสองและมีต้นกำเนิดรังสีแบบผลัดวางอยู่ด้านหลังของเส้นตะกั่วเพื่อให้เกิดเงาของเส้นลวดทั้งสองบนจอภาพสำหรับบันทึกภาพหากำลังแยกแทน

3. การใช้แฟนทอม ถ่ายภาพผลัดแฟนทอมกับ Hine-Duley Phantom หรือ Orthogonal-hole test Pattern หรือ Four-quadrant bar phantom ถ้าเครื่องถ่ายภาพ

---

*ระยะบนจอภาพสามารถหาได้โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแบบเส้นซึ่งทราบความยาวแน่นอนแล้วมาสร้างภาพ หาจำนวน pixel ตลอดความยาวของต้นกำเนิดรังสี หาความยาวของแต่ละ pixel จากความยาวของต้นกำเนิดรังสีและจำนวน Pixel ตลอดความยาวของต้นกำเนิดรังสีนั้น

สามารถมองเห็นแนวของเส้นตะกั่วหรือระยะระหว่างเส้นตะกั่วในแฟนทอมได้ชัดเจน กำลังแยกของการขจัดหาได้จากระยะน้อยสุดระหว่างเส้นตะกั่วในแฟนทอมซึ่งมองเห็นแยกจากกันได้ชัดเจน ลักษณะรูปร่างและการใช้งานของแฟนทอมเหล่านี้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.7 และ 4.8

4. การทดสอบกำลังแยกโดยใช้แฟนทอมชนิด BRH โดยถ่ายภาพรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านช่องของแฟนทอมชนิด BRH ดังภาพ 4.10 จากภาพถ่ายให้สังเกตรายละเอียดของภาพของช่องที่ยอมให้รังสีแกมมาผ่าน กำลังแยกของการขจัดหาได้จากระยะระหว่างเส้นตะกั่วที่เริ่มมองเห็นรายละเอียดหรือระยะระหว่างช่องในแฟนทอมดังสมการที่ 5.4[14] คือ

กำลังแยกของการขจัด (FWHM) = ระยะระหว่างช่องเล็กสุดที่เริ่มมองเห็น × 1.75..(5.4)

5.4 การหาค่าแบคกราวด์ (Background)

แบคกราวด์เป็นค่านับวัดหรืออัตรานับวัดที่เครื่องมือนิวเคลียร์สามารถวัดได้เมื่อไม่มีต้นกำเนิดรังสีอยู่ ค่าแบคกราวด์เกิดจากสาเหตุที่สำคัญหลายชนิดเช่น

ก. เกิดขึ้นภายในเครื่องมือนิวเคลียร์ (noise) เช่น สัญญาณที่เกิดขึ้นเองเมื่อนับวัดรังสีแกมมาพลังงานต่ำกว่า 20 keV แบคกราวด์ที่เพิ่มขึ้นได้เองเมื่อใช้กำลังขยายของเครื่องขยายสัญญาณสูง ๆ และสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความบกพร่องและการลดการทำงานลงของวงจรอิเลคทรอนิคภายในวงจร

ข. จากต้นกำเนิดรังสีอื่นรอบ ๆ หัวนับวัดเช่น สารกัมมันตรังสีที่เก็บไว้ใกล้เครื่องนับวัดหรือในห้องข้างเคียง การหกเปื้อนสารกัมมันตรังสีที่เครื่องมือและภายในห้องที่เก็บเครื่องมือนิว-เคลียร์ การมีผู้ป่วยที่ได้รับรังสีอยู่ในห้องหรือเดินผ่านห้องที่เก็บเครื่องมือ

ค. มีในธรรมชาติที่อยู่ในหัวนับวัดเช่น ^{40}K เป็นต้น

ง เกิดจากรังสีคอสมิค

5.4.1 ขอบเขตการยอมรับการทำงาน แบคกราวด์ที่ วัดได้มีค่าต่ำ ๆ เมื่อเทียบกับอัตรานับวัดก็อาจตัดทิ้งไปได้เช่น แบคกราวด์มีค่าไม่เกิน 10%ของค่านับวัดในเวลานับวัดเท่ากัน ซึ่งอยู่ในขอบเขต[14,16] ดังสมการ 5.5

$$B_g < \frac{1}{10} N \qquad \text{.....} \quad (5.5)$$

N = ค่านับวัดซึ่งวัดได้จากต้นกำเนิดรังสี

Bg = ค่านับวัดของแบคกราวด์ที่วัดในเวลาเท่ากันกับ N

ถ้าแบคกราวด์เพิ่มขึ้นมากผิดปกติเช่น แบคกราวด์เพิ่มถึง 20% ของค่านับวัดเป็นต้น จะต้องหาค่านับวัดสุทธิโดยหักค่านับวัดที่เครื่องมือวัดได้ด้วยแบคกราวด์ที่วัดในเวลาเดียวกันเสมอ

5.4.2 ผลของแบคกราวด์ต่ออัตรานับวัดและภาพจากเครื่องมือสร้างภาพซินทิลเลชัน

แบคกราวด์ที่เกิดขึ้นนอกจากทำให้อัตรานับวัดเปลี่ยนแปลงแล้วยังมีผลต่อการนับวัดและภาพที่ปรากฏออกมาเช่น มีความแปรปรวนของอัตรานับวัดมากขึ้นเมื่อการนับวัดรังสีมีแบคกราวด์เกิดขึ้น และความคมชัดของภาพลดลงเป็นต้น[39] ดังนี้คือ

ก. ความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนของค่านับวัดที่เกิดจากแบคกราวด์ ในเครื่องนับวัดทุกชนิดต้องมีอัตรานับวัดจากแบคกราวด์เกิดขึ้นเสมอเนื่องจากสาเหตุดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.4 ค่าแบคกราวด์ที่เกิดขึ้นจะทำให้มีการเพิ่มความเปลี่ยนแปลงทางสถิติในการหาอัตรานับวัดสุทธิจากต้นกำเนิดรังสีของเครื่องมือคือ

ถ้าให้ R_b = อัตรานับวัดของแบคกราวด์

R_g = อัตรานับวัดทั้งหมดที่วัดได้จากต้นกำเนิดรังสี

R_s = อัตรานับวัดสุทธิที่เครื่องมือนิวเคลียร์วัดได้จากต้นกำเนิดรังสีเพียงอย่างเดียว

t_g = เวลาที่หาค่านับวัดจากต้นกำเนิดรังสีเพื่อคำนวณหา R_g

t_b = เวลาที่หาค่านับวัดของแบคกราวด์เมื่อไม่มีต้นกำเนิดรังสีที่หัวนับวัดเพื่อหาค่า R_b

อัตรานับวัดสุทธิของต้นกำเนิดรังสีคือ

$$R_s = R_g - R_b \qquad \text{..... (5.6)}$$

ดังนั้นความไม่แน่นอนของการหาอัตรานับวัดสุทธิ (σ_{RS}) หาได้จากสมการ

$$\sigma_{RS} = \sqrt{R_g/t_g + R_b/t_b}$$

$t_g = t_b = t$

$$\sigma_{RS} = \frac{1}{\sqrt{t}}\sqrt{R_g + R_b}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{t}}\sqrt{R_s + 2R_b} \qquad \text{.....(5.7)}$$

ดังนั้นอัตรานับวัดสุทธิที่เครื่องมือวัดได้จากต้นกำเนิดรังสี = $R_g - R_b \pm 6_{RS}$ ...(5.8)
ซึ่งสามารถคิดเป็นเปอร์เซนต์ของความไม่แน่นอนของอัตรานับวัดสุทธิจากต้นกำเนิดรังสี (V_{RS}) คือ

$$V_{RS} = \frac{100\sqrt{R_g/t_g + R_b/t_b}}{R_g - R_b} \qquad \text{.....(5.9)}$$

เปอร์เซนต์ของความไม่แน่นอนของอัตรานับวัดสุทธิจากต้นกำเนิดรังสีที่มีแบคกราวด์ (V_{RS}) เท่ากับ 5% ของอัตรานับวัดสุทธิ (R_s) มากกว่าเปอร์เซนต์ของความไม่แน่นอนของอัตรานับวัดสุทธิเมื่อไม่มีแบคกราวด์ซึ่งจะลดลงเหลือ 2% ของอัตรานับวัดสุทธิดังสมการ 5.10

$$\text{อัตรานับวัด} = R_s \pm \sqrt{\frac{R_s}{t}} \qquad \text{.....(5.10)}$$

ข. ความคมชัด* ของ ภาพลดลงเนื่องจากแบคกราวด์มีค่าเพิ่มขึ้น

ความคมชัดของภาพจากเครื่องมือสร้างภาพสแกนเนอร์และเครื่องมือถ่ายภาพรังสีแกมมาจะหาได้จากสมการ 5.11

$$C = (R_1 - R_o)/(R_1 + R_o) \qquad \text{.....(5.11)}$$

C = ความคมชัดของภาพ

R_1 = อัตรานับวัดจากจุดที่ต้องการหาความคมชัดเช่นบริเวณที่เป็นเนื้องอกเป็นต้น

R_o = อัตรานับวัดรอบ ๆ บริเวณที่เป็นเนื้องอก

R_b = อัตรานับวัดของแบคกราวด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีต้นกำเนิดรังสีอื่นวางอยู่ด้านบนหรือด้านล่างของบริเวณที่เป็นเนื้องอก

เมื่อมีอัตรานับวัดของแบคกราวด์เกิดขึ้นรอบ ๆ บริเวณที่เป็นเนื้องอกทำให้ความคมชัดของภาพเปลี่ยนไปดังสมการ (5.12)

---

*ความคมชัดของภาพคือความแตกต่างของความเข้มของภาพสองจุด ซึ่งเกิดจากบริเวณอวัยวะ หรือแฟนทอมที่มีกัมมันตภาพแตกต่างกัน (39) ในภาพเดียวกัน

$$C = (R_1+R_b) - (R_o+R_b) \;/\; (R_1+R_b) + (R_o+R_b)$$

$$= (R_1-R_b) / (R_1+R_o+2R_b) \qquad \ldots\ldots(5.12)$$

จากสมการ (5.11)และ (5.12) ทำให้ความคมชัดของภาพลดลงด้วยแฟคเตอร์ $2R_b$

5.5 ความถูกต้องในการตอบสนองแนวเส้น (linearity)ความถูกต้องของเครื่องมือสร้างภาพและเครื่องมือนับวัดแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ตามลักษณะการทดสอบของเครื่องมือคือ

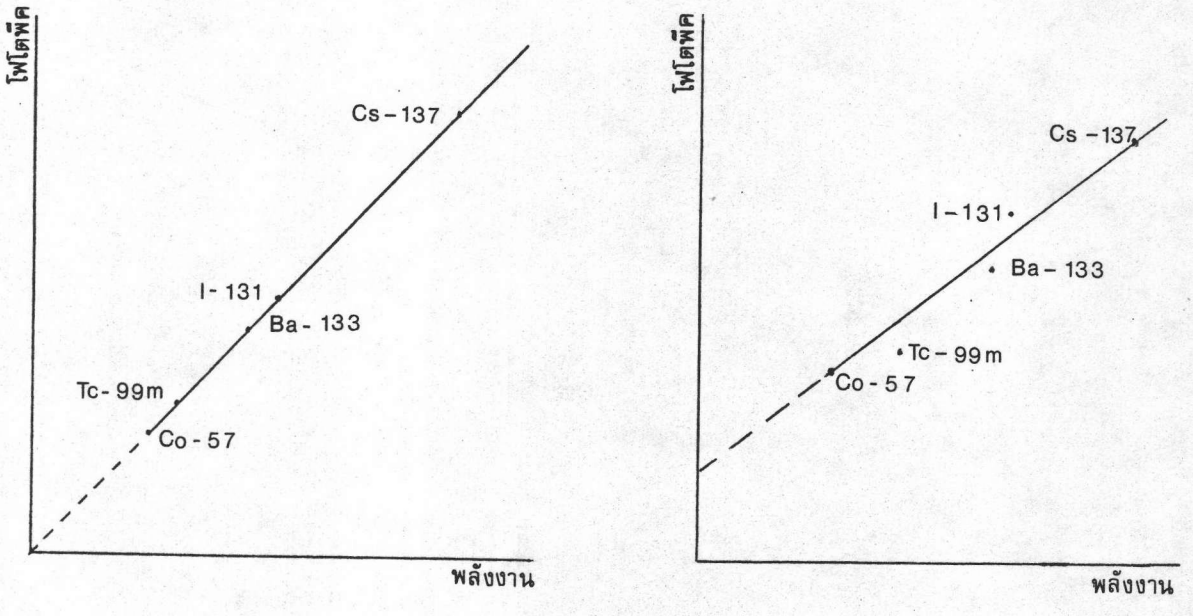
ก. ความถูกต้องในการตอบสนองต่อพลังงานของรังสีแกมมา (linearity of energy response) สำหรับเครื่องนับวัดและเครื่องมือสร้างภาพเรดิลิเนียร์สแกนเนอร์

ข. ความถูกต้องในการตอบสนองต่อกัมมันตภาพ (linearity of Activity response) ของสแกนเนอร์

ค. spatial linearity สำหรับเครื่องถ่ายภาพ

ง. system linearity สำหรับสแกนเนอร์และเครื่องถ่ายภาพ

5.5.1 ความถูกต้องในการตอบสนองต่อพลังงานของรังสีแกมมา (linearity of energy response) รังสีแกมมาที่ปล่อยออกจากธาตุกัมมันตรังสีแต่ละ ชนิดโดยเฉพาะที่โฟโตพีคจะมีพลังงานคงที่เช่น Ba-133 (355 keV) Tc-99m (140 keV) Co-57 (122 keV) I-131 (364 keV) Cs-137 (662 keV) เป็นต้น เมื่อรังสีแกมมาเหล่านี้ถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณจากหัวนับวัดและเครื่องขยายสัญญาณสู่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ ถ้าเครื่องขยายสัญญาณทำงานถูกต้องอำพนของสัญญาณ (amplitude) จะแปรผันตามระดับขนาดของพลังงานรังสีแกมมา เมื่อนำพลังงานของรังสีแกมมาของแต่ละนิวไคลด์ที่วัดได้จากโฟโตพีคเขียนกราฟกับพลังงานที่แท้จริงของรังสีแกมมาและลากเส้นตรงผ่านจุดที่ได้ดังรูป 5.13 ก. เส้นตรงผ่านทุกจุดแสดงว่าการตอบสนองของพลังงานถูกต้องตามแนวเส้นตรง ถ้าจุดเหล่านั้นคลาดเคลื่อนจากแนวเส้นตรงแสดงว่าเครื่องนับวัดทำงานไม่ถูกต้องดังแสดงในรูป 5.13 ข. ความผิดพลาดจากเครื่องขยายสัญญาณหาจากการวัดความคลาดเคลื่อนของจุดจากเส้นตรงในแนวขนานกับแกนโฟโตพีค



ก. เมื่อเครื่องนับวัดทำงานถูกต้อง ข. เมื่อเครื่องนับวัดทำงานผิดพลาด

รูปที่ 5.13 ความถูกต้องในการตอบสนองต่อพลังงานรังสีแกมมา

จากรูปที่ 5.13 ข. จุดของข้อมูลไม่อยู่ในแนวเส้นตรงอาจเกิดจากสาเหตุต่าง ๆ ซึ่งจะต้องทดสอบและแก้ไขให้ถูกต้องก่อนใช้เครื่องมือต่อไป คือ

ก. การตอบสนองต่อพลังงานรังสีแกมมาที่ระดับต่าง ๆ ของเครื่องมือไม่ต่อเนื่องกัน เช่น การตอบสนองของกำลังขยายจากเครื่องขยายสัญญาณ*ไม่ถูกต้องที่พลังงานระดับต่าง ๆ กัน ถ้ามีพลังงานสูงควรใช้กำลังขยายต่ำ หรือพลังงานต่ำควรเพิ่มกำลังขยายเพิ่มขึ้น เป็นต้น

ข. เกิดจากการปรับเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณไม่ถูกต้อง ต้องทดสอบการปรับระดับพลังงานของเครื่องมือ (energy calibration) ใหม่

ค. เกิดจากการลดลงของกำลังแยกของพลังงานในเครื่องมือนิวเคลียร์

---

*ในเครื่องมือถ่ายภาพรังสีแกมมามักใช้กำลังขยายคงที่อาจไม่ต้องคำนึงถึงส่วนนี้ก็ได้ เพราะการปรับกำลังขยายภายในเครื่องมือต้องแก้ไขได้ โดยตัวแทนจากโรงงานผู้ผลิตเครื่องมือเท่านั้น

ง. เกิดจากองค์ประกอบอื่น ๆ ซึ่งต้องทดสอบและดูแลอยู่เสมอ เช่น กำลังไฟฟ้าที่ใช้กับเครื่องมือนิวเคลียร์ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรอบเครื่องมือ การทำงานของวงจรอิเลกทรอนิกบกพร่อง การลดการทำงานลงของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์และผลึกนับวัดตามอายุการใช้งาน เป็นต้น

5.5.2 ความถูกต้องในการตอบสนองต่อกัมมันตภาพ สารกัมมันตรังสีครึ่งชีวิตสั้น เช่น เทคนีเชียม-99เอ็ม ครึ่งชีวิต 6 ชั่วโมง เมื่อทิ้งไว้ในระยะเวลาสองถึงสามเท่าของครึ่งชีวิตหรือมากกว่านั้น กัมมันตภาพจะลดลงด้วยอัตราคงที่ ดังสมการ 5.13 คือ

$$A = A_o e^{-\lambda t} \qquad \text{.....} \quad (5.13)$$

A_o = กัมมันตภาพของสารกัมมันตรังสีเมื่อเริ่มวัดครั้งแรก (Bq)

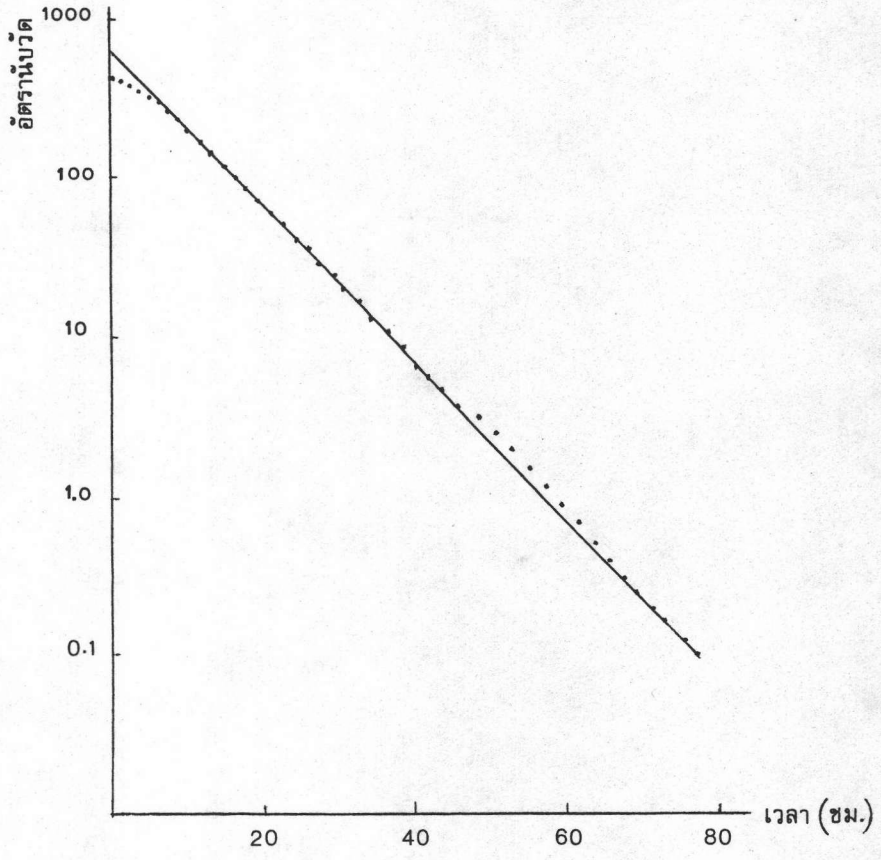
t = เวลาที่ปล่อยให้สารกัมมันตรังสีสลายตัว (วินาที)

A = กัมมันตภาพที่เหลืออยู่เมื่อเวลาผ่านไป t (Bq)

λ = ค่าคงที่ในการสลายตัว (1/วินาที)

อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติจะคงที่เสมอ จึงนำมาเป็นแนวทางตรวจความถูกต้องในการตอบสนองต่อกัมมันตภาพ (linearity of activity response) ของเครื่องนับวัด

ถ้ากัมมันตภาพที่ใช้นับวัดสูงพอ เช่น 100 มิลลิคูรี เป็นต้น และนำต้นกำเนิดรังสีมานับวัดทุก ๆ ครึ่งชั่วโมงหรือหนึ่งชั่วโมงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งได้อัตรานับวัดต่ำลง นำอัตรานับวัดที่ได้และเวลานับจากทดลองครั้งแรกเขียนกราฟแบบเซมิลอก (semi-log) ให้อัตรานับวัดเป็นแกนของลอก จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับวัดและเวลาจะได้กราฟดังรูป 5.14 [6,14]



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ของกัมมันตภาพและเวลาที่นับวัดเมื่อนับวัดกัมมันตภาพติดต่อกันทุกชั่วโมงในเวลาหลายเท่าของครึ่งชีวิต

จากความสัมพันธ์ของกัมมันตภาพและเวลาหรืออัตรานับวัดและเวลา ถ้าเครื่องมือสามารถตอบสนองต่อค่านับวัดหรือกัมมันตภาพได้ถูกต้อง การกระจายของทุกจุดจะต้องอยู่ในเส้นตรงเดียวกัน โดยความชันของเส้นตรงเป็นสัดส่วนกับส่วนกลับของครึ่งชีวิตของนิวไคลด์รังสีที่ใช้ การกระจายของกัมมันตภาพแตกต่างกันไปตามระดับขนาดของกัมมันตภาพดังรูป 5.14 เกิดจากหลายสาเหตุคือ

1. การกระจายของจุดแสดงกัมมันตภาพเมื่อใช้เวลานับวัดนาน ๆ จะอยู่นอกเส้นตรง เกิดจากสารกัมมันตรังสีที่ใช้นับวัดมีนิวไคลด์รังสีอื่นที่มีครึ่งชีวิตนาน ๆ เจือปนอยู่ เช่นมีโมลิบดินัม-99 (ครึ่งชีวิต 67 ชม.) ผสมอยู่ในเทคนีเชียม-99เอ็ม (6 ชม.) หรือมี Sn-133 (15 วัน) ผสมอยู่ใน In-113 m (100 นาที)[14] ทำให้มีนิวไคลด์เหล่านี้หลงเหลืออยู่และตรวจวัดได้ขณะที่นิวไคลด์รังสีที่ต้องการวัดสลายตัวไปเกือบหมดแล้ว

2. ความไวของเครื่องนับวัดเปลี่ยนแปลงบางช่วงเวลาระหว่างการทดสอบ[14] ทำให้การตอบสนองต่อกัมมันตภาพของเครื่องนับวัดไม่คงที่ ซึ่งอาจตรวจเครื่องนับวัดได้จากการทดสอบ

หาโฟโตพีคของนิวไคลด์รังสีจากเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณก่อนวัดกัมมันตภาพ

3. เมื่อใช้กัมมันตภาพมาก ๆ อัตรานับวัดหรือกัมมันตภาพที่วัดได้จะกระจายต่ำกว่าแนวเส้นตรง เพราะการขาดหายไปของค่านับวัดเนื่องจากรีโซลวิงไทม์ (resolving time)[14,17-26] ซึ่งสามารถหาค่านับวัดที่แท้จริงได้จากความสัมพันธ์

$$N = \frac{R}{1-RT} \qquad \text{..... (5.14)}$$

N = อัตรานับวัดที่ถูกต้อง (หรือกัมมันตภาพ)

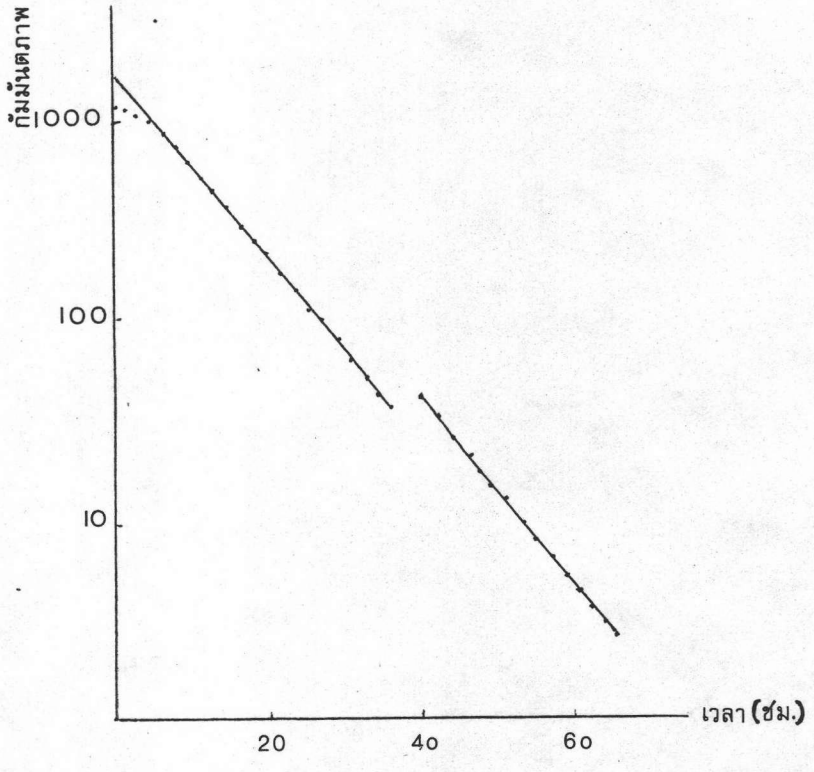
R = อัตรานับวัดที่วัดได้ (หรือกัมมันตภาพ)

T = รีโซลวิงไทม์(resolving time)

ในกรณีที่ resolving time = 10×10^{-6} วินาที อัตรานับวัด 1000 ครั้งต่อวินาที จะมีอัตรานับวัดขาดหายไป 1%[14] สำหรับอัตรานับวัดต่ำกว่านี้จะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากรีโซลวิงไทม์

4. ความคลาดเคลื่อนของจุดเมื่อวัดอัตรานับวัดต่ำ ๆ เนื่องจากความผิดพลาดในการปรับตั้งจุดเริ่มต้นของการนับวัด (preset zero adjustment)

5. ความคลาดเคลื่อน ของเส้นตรงแทนการตอบสนองเมื่อใช้กัมมันตภาพสูงและต่ำแยกกันคนละแนว ดังภาพที่ 5.15 เนื่องจากความผิดพลาดภายในระบบนับวัด (systematic errors) ต่อกัมมันตภาพที่มีระดับขนาดแตกต่างกัน[14]



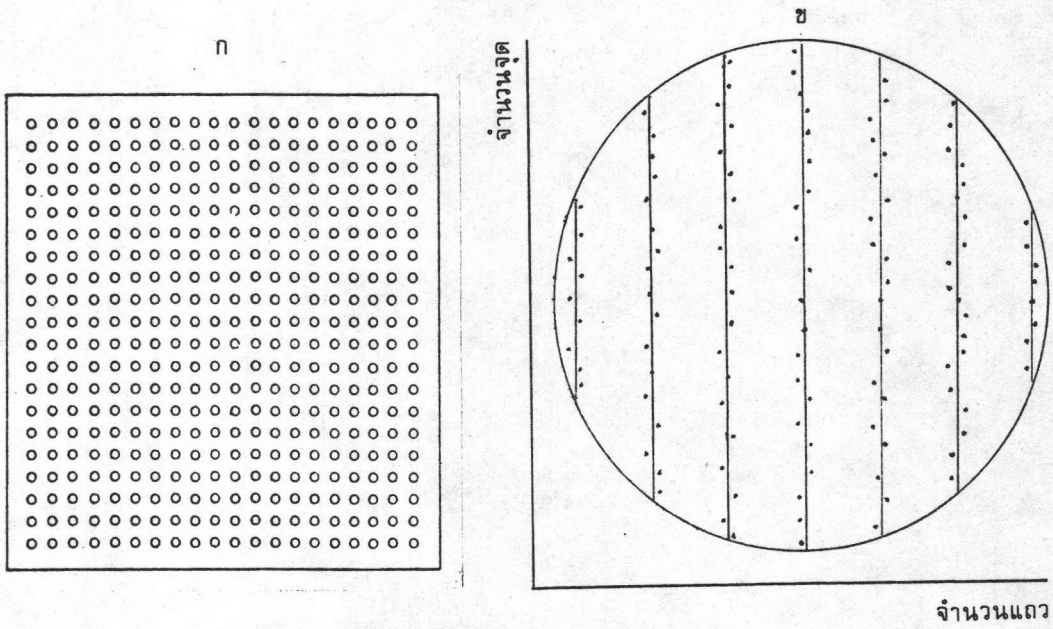
รูปที่ 5.15 แสดงความคลาดเคลื่อนของเครื่องนับวัดต่อกัมมันตภาพที่ระดับขนาดแตกต่างกัน เกิดจากความผิดพลาดของระบบนับวัดที่จะตอบสนองต่อกัมมันตภาพที่ระดับต่าง ๆ

5.5.3 ความถูกต้องของการขจัด (spatial linearity) เมื่อให้รังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีสม่ำเสมอผ่านแฟนทอมชนิด orthogonal-hole test pattern ซึ่งมีช่องที่ยอมให้รังสีแกมมาผ่านจำนวนมากมีเส้นผ่าศูนย์กลางช่องและระยะระหว่างขอบของช่องเท่ากันดังรูป 5.16 ภาพของแฟนทอมจากเครื่องถ่ายภาพจะเป็นแนวของจุด เมื่อลากเส้นผ่านแนวของจุดเหล่านี้ตลอดทั้งภาพและสำรวจความคลาดเคลื่อนของจุดจากแนวเส้นตรง[37] ถ้าความถูกต้องของการขจัดของเครื่องถ่ายภาพดี แนวจุดเหล่านี้จะอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน สำหรับความคลาดเคลื่อนของจุดในรูป 5.17 คำนวณได้[37] จากสูตร

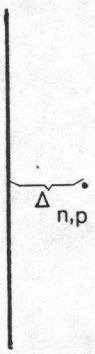
$$\text{ความคลาดเคลื่อน} = \frac{1}{N} \sum \left| \Delta_{n,p} \right| \qquad \text{.....(5.15)}$$

N = จำนวนจุดในภาพทั้งหมดที่คลาดเคลื่อนจากแนวเส้นตรง

$\Delta_{n,p}$ = ความคลาดเคลื่อนของจุดที่ (n, p) จากแนวเส้นตรง



รูปที่ 5.16 (ก) แสดงช่องของ orthogonal-hole test pattern ที่ยอมให้รังสีแกมมาผ่าน
(ข) แสดงภาพถ่ายจากแฟนทอมสำหรับหาความถูกต้องของการขจัด



รูปที่ 5.17 แสดงความคลาดเคลื่อนของจุดจากแนวเส้นตรง

$(\Delta_{n,p})$

5.5.4 ความถูกต้องของระบบ (system linearity) เป็นการทดสอบความถูกต้องในการตอบสนองต่อรังสีแกมมาของเครื่องมือสร้างภาพ โดยใช้เครื่องมือบันทึกภาพที่มีกัมมันตภาพแน่นอนจากสเตฟเวดจ์แฟนทอมลงบนฟิล์มหรือกระดาษบันทึกภาพดังรูปภาคผนวก ข-1,2 หาความเข้มของฟิล์มหรือความหนาแน่นของจุดจากกึ่งกลางของแต่ละบริเวณความหนาของแฟนทอมเปลี่ยนความเข้มของฟิล์มหรือความหนาแน่นของจุดเป็นเปอร์เซนต์โดยให้บริเวณที่มีกัมมันตภาพมากสุดมีความเข้มของฟิล์มหรือความหนาแน่นของจุดเป็น 100% ดังรูปที่ 5.18

เขียนรูปความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความเข้มของจุดบนฟิล์มหรือเปอร์เซนต์ความหนาแน่นของจุดบนกระดาษบันทึกภาพกับความหนาของสเตฟเวจด์แฟนทอม ใช้ least square method ลากเส้นตรงผ่านจุดทั้งห้า ถ้าเส้นตรงผ่านจุดทั้งห้าได้ทุกจุดแสดงถึงความถูกต้องในการตอบสนองของระบบสร้างภาพตามแนวเส้น ความคลาดเคลื่อนของแต่ละจุดจากแนวเส้นตรงที่ยอมรับว่าเครื่องมือสร้างภาพทำงานถูกต้องคือ $\pm$ 10%[14]

แต่ละจุดคลาดเคลื่อนจากแนวเส้นตรงอาจเกิดจากสาเหตุต่อไปนี้คือ

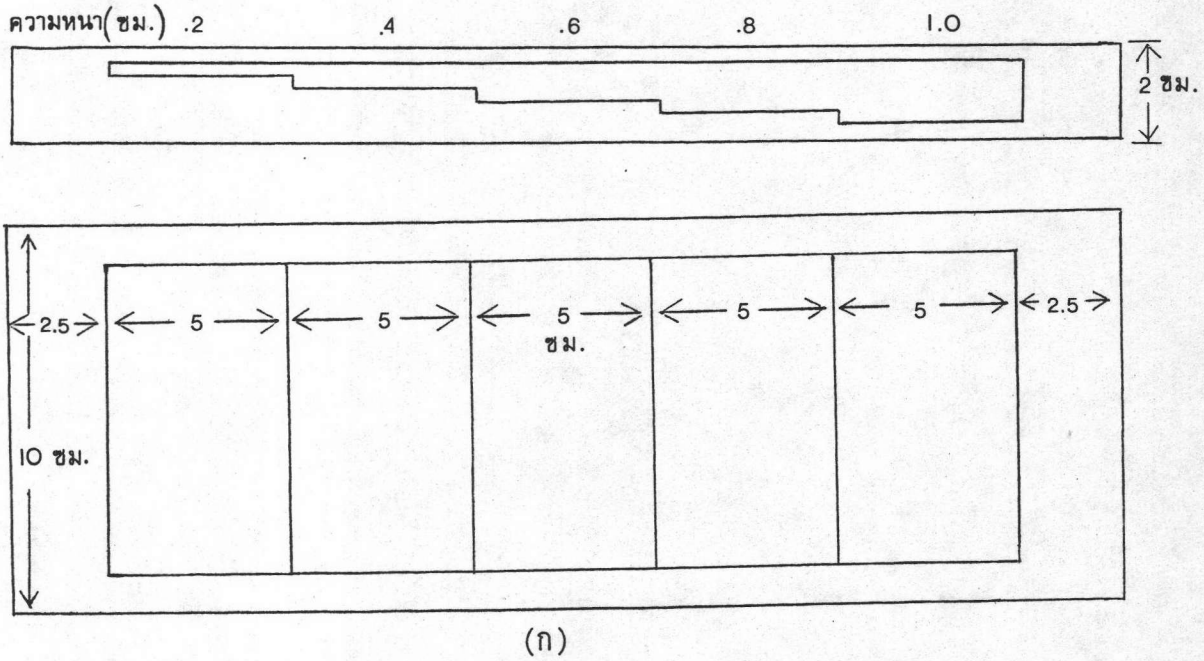
ก. การตัดแบคกราวด์และการเปลี่ยนความคมชัดของภาพอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่างไม่ถูกต้อง ทำให้การกระจายของจุดหรือความเข้มบนภาพผิดไปดังแสดงไว้ในหัวข้อ 5.4.2

ข. ความไม่ถูกต้องของความเข้มเกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่ใช้ ซึ่งมีครึ่งชีวิตสั้น สลายตัวได้เร็วทำให้ความเข้มบนฟิล์มมากน้อยตามครึ่งชีวิตของนิวไคลด์รังสีและเวลาที่ใช้ทดสอบ

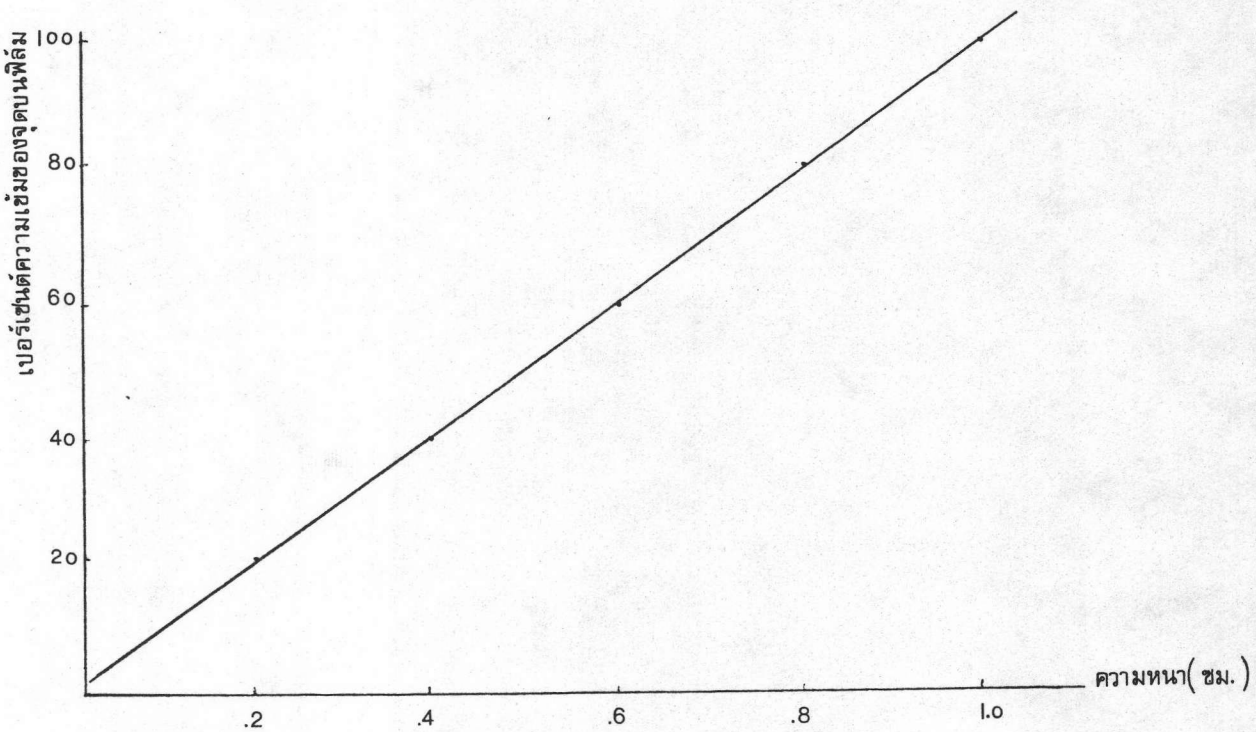
ค. ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงจรแสดงผลหรือเครื่องมือบันทึกภาพทำงานผิดพลาดทำให้ความเข้มที่ปรากฏแตกต่างจากความเข้มที่แท้จริง

5.6 การทดสอบการทำงานทั้งหมดของระบบสร้างภาพ (Total performance)

เมื่อถ่ายภาพจากวิลเลียมแฟนทอม (William phantom)[38] ซึ่งเป็นหุ่นจำลองแทนตับของมนุษย์ ด้วยเครื่องถ่ายภาพหรือสแกนเนอร์ ภาพที่ได้จะมีรายละเอียดแตกต่างกันโดยสังเกตจากจุด (nodule) เล็กสุดภายในแฟนทอมที่ปรากฏในภาพได้ชัดเพื่อสรุปการทำงานของเครื่องมือสร้างภาพ จุดภายในแฟนทอมทั้งแปดจุดจะมีขนาดและให้กัมมันตภาพแตกต่างกัน ทำให้สรุปความสามารถในการมองเห็นความผิดปกติภายในแฟนทอมของเครื่องถ่ายภาพและสแกนเนอร์ได้ดี นอกจากนี้เมื่อนำภาพถ่ายของแฟนทอมจากการนับวัดแต่ละครั้งมาเปรียบเทียบกันทำให้สามารถ



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.18 (ก) แสดงภาพของสเตพเวดจ์แฟนทอม (step wedge Phantom) ในแนวตั้งและแนวนอน

(ข) การทดสอบความถูกต้องของระบบที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่าง ความเข้มบนฟิล์มและความหนาของสารละลายในแฟนทอม

ตรวจสอบการลดการทำงานลงของหัวนับวัด[14] ได้โดยเปรียบเทียบการมองเห็นขนาดและรูปร่างของจุดภายในแฟนทอม จากการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องมือด้วยภาพถ่ายทำให้สามารถเลือกปรับการทำงานของเครื่องถ่ายภาพและใช้นิวไคลด์รังสีที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ และใช้ภาพถ่ายนี้เป็นภาพอ้างอิงต่อไป สำหรับรายละเอียดของวิลเลียมแฟนทอมดังแสดงในหัวข้อ 4.3.1

5.7 ความสม่ำเสมอของภาพ

ความสม่ำเสมอของภาพเป็นการแสดงความสม่ำเสมอของเครื่องมือที่จะสร้างภาพการกระจายของรังสีจากต้นกำเนิดรังสีที่สม่ำเสมอให้มีลักษณะสม่ำเสมอถูกต้องเหมือนจริง ได้จากการบันทึกภาพต้นกำเนิดรังสีที่ให้กัมมันตรังสีอย่างสม่ำเสมอและวางชิดผิวหน้าของคอลลิเมเตอร์หรือใช้ต้นกำเนิดรังสีแบบจุดวางไว้ห่างจากผิวคอลลิเมเตอร์ที่ระยะห้าเท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางผลึกนับวัด ความสม่ำเสมอเป็นตัวแปรสำคัญที่ประกันการทำงานของเครื่องมือถ่ายภาพได้ดีที่สุด

สาเหตุและการแก้ไขความไม่สม่ำเสมอ

1. ความไม่สม่ำเสมอของภาพเกิดจากโฟโตพีคไม่อยู่ที่กึ่งกลางของ window การปรับกำลังขยาย (gain) ของความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ไม่ถูกต้องหรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานขององค์ประกอบอิเลคทรอนิค ซึ่งแก้ไขได้โดยปรับวงจรใหม่ หรือเพิ่มความกว้างของหน้าต่าง (window) ให้มากขึ้นและบันทึกค่าของโฟโตพีคไว้สำหรับเปรียบเทียบและแก้ไขการทำงานของเครื่องถ่ายภาพต่อไป

2. ความไม่สม่ำเสมอเกิดจากใช้ต้นกำเนิดรังสีแบบฝลัคบางเกินไป ทำให้การกระเจิงของรังสีจากฟลัคสู่หัวนับวัดน้อย ฝลัคที่ใช้บรรจุเทคนีเชียม-99เอ็ม ควรมีความหนา 1 ซม.[6] จึงให้ภาพมีความสม่ำเสมอดีพอ

3. ความไม่สม่ำเสมอของภาพเปลี่ยนแปลงไปตามอัตรานับวัดและพลังงานของรังสีแกมมาที่เครื่องมือได้รับสูงหรือต่ำเกินไปจะทำให้ความไม่สม่ำเสมอเพิ่มขึ้น เมื่ออัตรานับวัดเพิ่มขึ้นสามารถแก้ไขได้โดยลดความกว้างของ window ลง หรืออัตรานับวัดต่ำเกินไปควรเพิ่มความกว้างของ window ให้มากขึ้น จะทำให้ความสม่ำเสมอของภาพดีขึ้น

4. ความไวของหัวนับวัดเปลี่ยนแปลงหรือทำให้เกิดการบิดเบือนของภาพเนื่องจากการทำงานของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์แต่ละหลอดไม่สม่ำเสมอและทำให้เกิดเป็นพื้นที่ไม่สม่ำเสมอของภาพบริเวณรอบ ๆ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์นี้ จะต้องปรับตั้งหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ใหม่

5. ความไม่สม่ำเสมอของภาพซึ่งเกิดอย่างถาวรเนื่องจากผลึกหัวนับวัดเสียคุณสมบัติในการโปร่งแสง เมื่อผลึกหัวนับวัดได้รับความชื้น ความสม่ำเสมอของภาพหาได้จากความสัมพันธ์ของความเข้มมากสุด (Max) และความเข้มน้อยสุด (Min)[12,14] บนฟิล์มของภาพเดียวกันคือ

$$\text{ความสม่ำเสมอของภาพทั้งหมด} = \pm \frac{100\ (\text{Max}-\text{Min})}{\text{Max} + \text{Min}} \qquad \ldots\ldots(5.16)$$

จากสมการ (5.16) สามารถหาความสม่ำเสมอของภาพจากฟลัดได้ 4 แบบ คือ การทดสอบความสม่ำเสมอเมื่อไม่มีคอลลิเมเตอร์ เมื่อใช้คอลลิเมเตอร์ ความสม่ำเสมอของภาพเมื่อเปลี่ยนความกว้างของ window ความสม่ำเสมอของภาพเมื่อใช้รังสีอื่นที่ไม่ใช้เทคนีเชียม-99เอ็ม ความสม่ำเสมอของภาพไม่ควรเกิน[6] $\pm$ 15% เพราะจะทำให้สามารถสังเกตความไม่สม่ำเสมอได้ด้วยตาเปล่า

5.8 การหาอัตรานับวัดของเครื่องถ่ายภาพเมื่อไม่มีคอลลิเมเตอร์ (Intrinsic count rate performance)

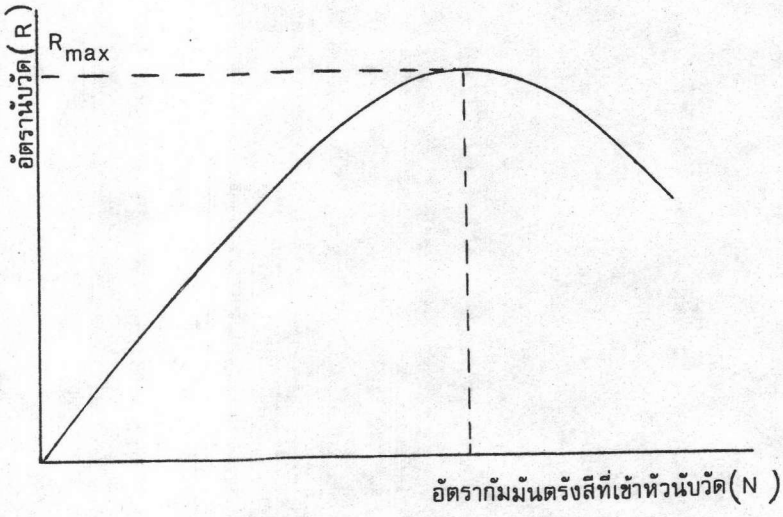
เป็นการหาอัตรานับวัดจากต้นกำเนิดรังสีที่ทราบจำนวนกัมมันตรังสีที่เข้าสู่หัวนับวัดแล้วถ้าประสิทธิภาพและความไวของหัวนับวัดคงที่พบว่าเมื่อต้นกำเนิดรังสีมีกัมมันตภาพต่ำ อัตรานับวัดที่เครื่องถ่ายภาพแสดงออกมาจะแปรผันตามการเพิ่มกัมมันตภาพของต้นกำเนิดรังสี โดยให้การขจัดระหว่างหัวนับวัดและต้นกำเนิดรังสีคงที่ หรือกัมมันตรังสีของต้นกำเนิดรังสีคงที่และเลื่อนต้นกำเนิดรังสีนี้เข้าหาหัวนับวัด จะได้อัตรานับวัด (R) และอัตรากัมมันตรังสีที่เข้าสู่หัวนับวัด (N) สัมพันธ์กันดังสมการ

$$R = Ne^{-NT} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(5.17)$$

เมื่อ T คือค่ารีโซลวิงไทม์ (resolving time) เป็นช่วงเวลาที่เครื่องนับวัดหยุดนับกัมมันตรังสีหลังจากเครื่องมือนับวัดค่านับวัดแล้วค่าหนึ่งและจะเริ่มนับค่านับวัดต่อไปเมื่อเครื่องนับวัดหยุดนับครบช่วงเวลานี้ จากสมการ 5.17 พบว่าอัตรานับวัดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งได้อัตรานับวัดมากสุด (R_{max}) และมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อต้นกำเนิดรังสีอยู่ใกล้หัวนับวัดหรือมีกัมมันตภาพสูง ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.19 สำหรับอัตรานับวัดมากสุดที่เครื่องนับวัดแสดงออกมาสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ 5.18

$$T = \frac{1}{eR_{max}} \qquad \ldots\ldots\ldots(5.18)$$

เมื่อ e = 2.7182818



รูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ของอัตรานับวัดและอัตรากัมมันตรังสีที่เข้าหัวนับวัด อัตรานับวัดจะแปรผันตามอัตรากัมมันตรังสีที่เข้าสู่หัวนับวัดเมื่อต้นกำเนิดรังสีมีกัมมันภาพต่ำ อัตรานับวัดเพิ่มขึ้นสูงสุด (R_{max}) และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตรากัมมันตรังสีเข้าสู่เครื่องนับวัดตามลำดับ

หรือให้การขจัดระหว่างต้นกำเนิดรังสีและหัวนับวัดคงที่ใช้แผ่นทองแดงความหนาเท่ากันเป็นแผ่นกั้นรังสีจากต้นกำเนิดรังสีที่มีกัมมันตภาพคงที่ ซึ่งทำหน้าที่ลดจำนวนรังสีที่เข้าสู่หัวนับวัด นำอัตรานับวัดและส่วนกลับของจำนวนแผ่นทองแดงเขียนกราฟจะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ของความหนาแผ่นกันรังสีและอัตรานับวัดดังสมการ 5.19

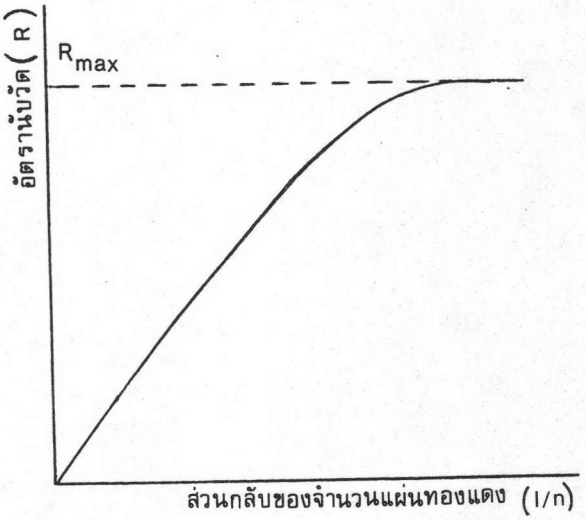
$$R = R_o e^{-\mu x} \qquad \text{..... (5.19)}$$

R_o = อัตรานับวัดเมื่อไม่ใช้แผ่นกั้นรังสี (ครั้งต่อวินาที)

R = อัตรานับวัดเมื่อใช้แผ่นทองแดงกั้นรังสีที่เข้าหัวนับวัด (ครั้งต่อวินาที)

X = ความหนาของแผ่นกั้นรังสี (เมตร)

μ = ค่าคงที่ในการลดลงของอัตรานับวัดในแผ่นกั้นรังสี (เมตร$^{-1}$)



รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับวัด (R) และส่วนกลับของจำนวนแผ่นทองแดง $(\frac{1}{n})$

ถ้าอัตรานับวัดมีค่าต่ำ ๆ สามารถหาความสัมพันธ์ของอัตรานับวัด (R) และอัตรารังสีแกมมาที่เข้าสู่ผลึกหัวนับวัด (N) ได้จากสมการ (5.14) $N = \frac{R}{1-RT}$

T = เวลาที่เครื่องนับวัดหยุดก่อนนับค่านับวัดต่อไป

ค่าของ T หาได้จากการนับวัดจากต้นกำเนิดรังสีสองอัน[6,12,14,17-26] ซึ่งมีกัมมันตภาพเท่ากันโดยแยกนับวัดและนับวัดรวมกัน มีระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีและหัวนับวัดคงที่เมื่อ

R_1 = อัตรานับวัดของต้นกำเนิดรังสีแรกอันเดียว

R_2 = อัตรานับวัดจากต้นกำเนิดรังสีที่สองอันเดียว

R_{12} = อัตรานับวัดเมื่อนับวัดต้นกำเนิดรังสีทั้งสองพร้อมกัน

$$T = \frac{2R_{12}}{(R_1+R_2)^2} \ln \frac{R_1 + R_2}{R_{12}} \quad \text{.....} \quad (5.20)$$

จากความสัมพันธ์ของรีโซลวิงไทม์ (T) สามารถหาอัตรารังสีที่เข้าสู่หัวนับวัด[12,14] จากสมการ

$$N_{-20\%} = \frac{1}{T} \ln\left(\frac{10}{8}\right)$$

$$= \frac{0.2231}{T} \qquad \ldots\ldots\ldots (5.21)$$

และอัตรานับวัดที่เครื่องนับวัดแสดงออกมาโดยคิดค่านับวัดหายไป 20% คือ

$$R_{-20\%} = 0.8\ N_{-20\%} \qquad \ldots\ldots\ldots (5.22)$$

ค่าอัตรานับวัด $N_{-20\%}$, $R_{-20\%}$ และเวลา T จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมาแต่ละเครื่อง

5.9 ความคมชัดของภาพ (Contrast)

ความคมชัดของภาพในฟิล์มถ่ายภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์จะเปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบที่สำคัญคือความเข้มของฟิล์มบันทึกภาพและคุณภาพของน้ำยาล้างฟิล์ม นอกจากนี้ความคมชัดอาจเปลี่ยนไปตามค่านับวัดทั้งหมดที่ใช้บันทึกภาพ ขนาดของภาพ เวลาในการบันทึกภาพและขนาดของจุดบนจอภาพของขบวนการบันทึกภาพบนฟิล์ม ลักษณะของจุดในฟิล์มเป็นตัวแปรหนึ่งในการกำหนดคุณภาพของภาพถ่าย ฟิล์มที่มีสารประกอบสำหรับสร้างภาพด้านเดียวจะให้ภาพที่มีความคมชัดมากและมีกำลังแยกดี ภาพถ่ายจากฟิล์มที่มีสารประกอบสำหรับสร้างภาพทั้งสองด้านจะได้ภาพที่มีความคมชัดและกำลังแยกของภาพลดลง ภาพถ่ายจากฟิล์มที่มีสารประกอบสองหน้ามีข้อดีคือความสม่ำเสมอของภาพดีกว่าทำให้สามารถแสดงจุดในภาพที่มีกัมมันตภาพต่างกันเล็กน้อยได้ชัด

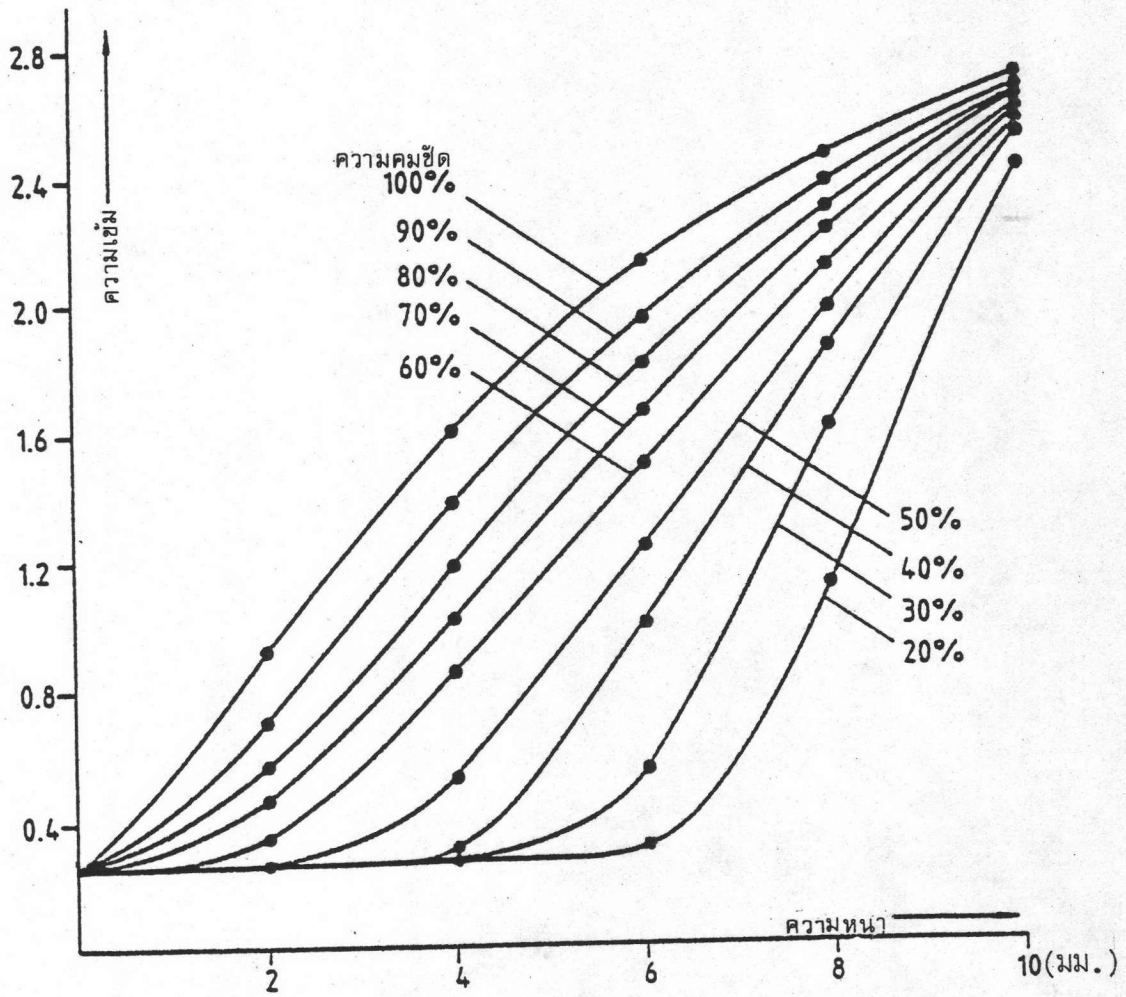
ความคมชัดของภาพถ่ายสเตพเวดจ์แฟนทอมบรรจุสารละลายกัมมันตรังสีอาจทดสอบได้โดยบันทึกภาพแต่ละภาพด้วยเครื่องถ่ายภาพที่ปรับความเข้ม (density) ของภาพเป็น 20,30, 40,.....100%* ทีละภาพ วัดความเข้มของฟิล์มบันทึกภาพที่กึ่งกลางแฟนทอมแต่ละบริเวณ

---

*ความเข้ม (density) ของภาพกำหนดเป็นตัวเลขที่เครื่องถ่ายภาพสแกนเนอร์ซึ่งปรับและใช้ได้เลย สำหรับเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมาใน โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์จะแสดงความเข้มของฟิล์มจากต่ำและสูงตามลำดับคือ 1,2,3.....14 เป็นต้น

ด้วยเครื่องวัดความเข้ม จากความสัมพันธ์ของความหนาของสารละลายในแฟนทอมกับความเข้มของจุดบนฟิล์มแต่ละบริเวณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์นี้จะแตกต่างจากความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงของความหนาของสารละลายกัมมันตรังสีและอัตรานับวัดจากแต่ละบริเวณดังรูปที่ 5.18 ดังนั้นรูปที่ 5.21 จึงเป็นคุณสมบัติเฉพาะของความคมชัดของภาพที่เกิดจากจอแสดงภาพและฟิล์มบันทึกภาพเมื่อเปลี่ยนคมเข้มของภาพแตกต่างกันไป

สำหรับการบันทึกภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์อาจใช้ความเข้มเพียงค่าเดียวเท่านั้นที่ความคมชัดของภาพเหมาะสมสำหรับการวินิจฉัยโรคมากที่สุดเช่นในเครื่องสแกนเนอร์ใช้ความเข้ม = 60% เป็นต้น



รูปที่ 5.21 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับวัดกับความหนาและความเข้มกับความหนาของสเตพเวดแฟนทอมเมื่อใช้ความคมชัดต่าง ๆ กัน จากการทดลองชุดเดียวกัน

ความคมชัดของฟิล์มไม่ถูกต้องเกิดจากหลายสาเหตุ

ก. การตอบสนองต่ออัตรานับวัดของเครื่องถ่ายภาพไม่ถูกต้องเนื่องจากภาพไม่มีความสม่ำเสมอหรือเครื่องถ่ายภาพมีรีโซลวิงไทม์มาก

ข. ถ้าการตอบสนองต่ออัตรานับวัดของเครื่องถ่ายภาพถูกต้อง แต่ความคมชัดของภาพเปลี่ยนไปเล็กน้อยแสดงว่าการปรับหรือการเลือกใช้เครื่องมือไม่ถูกต้องเช่น เครื่องมือแสดงภาพมีการปรับความเข้ม* ของแสงที่บันทึกลงในฟิล์ม, การเลือกชนิดของฟิล์มที่เหมาะสมกับความถี่ของแสงจากหลอดแคโธดและการเสื่อมของหลอดรังสีแคโธดตามอายุการใช้งานเป็นต้น

ค. ความคมชัดของจุด (contrast) และความเข้มของจุด (gradation) ความเข้มของจุดในภาพจะเปลี่ยนแปลงตามกัมมันตภาพจากวัตถุ ภาพที่มีความเข้มเหมาะสมจะทำให้สามารถมองเห็นความลึกของภาพและรายละเอียดภายในภาพได้ดี ส่วนภาพที่มีความคมชัดมากเกินไปจะทำให้สังเกตรายละเอียดของภาพได้น้อย ถ้าระบบของภาพที่มีความคมชัดเพิ่มขึ้นควรลดความเข้มของภาพลง(7)

ง. ขนาดของจุดในภาพ ถ้าจุดเล็กจะทำให้ระยะระหว่างจุดห่างเกินไปจึงไม่สามารถสังเกตความหนาแน่นของจุดได้ ถ้าจุดใหญ่เกินไปจะทำให้กำลังแยกของภาพลดลง

จ. อัตรานับวัดของเครื่องมือสร้างภาพต่ำกว่าขีดจำกัดทำให้ค่านับวัดบางค่าถูกตัดออกไปพร้อมแบคกราวด์ หรืออัตรานับวัดจากวัตถุสูงเกินไปทำให้อัตรานับวัดขาดหายไปเนื่องจากรีโซลวิงไทม์ และการเหลื่อมซ้อนกันของจุดในภาพ

ในเครื่องสแกนเนอร์ผลของอัตราเร็วการสแกน ระยะระหว่างแถว ความกว้างของจุด ความสว่างของจุด dot factor และค่า time constant ที่ไม่เหมาะสมล้วนเป็นสาเหตุให้ภาพเหลื่อมล้ำกันและความคมชัดลดลง

---

*สำหรับเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมาการใช้ความเข้มที่เหมาะสมในฟิล์มบันทึกภาพมักเปลี่ยนแปลงเสมอ จึงต้องทดสอบความเข้มหรือความคมชัดของภาพทุกวัน

5.10 ความแม่นยำในการนับวัด

ความถูกต้องหรือความแม่นยำในการนับวัดของเครื่องนับวัดรังสีแกมมาสามารถทดสอบได้ด้วยวิธีทางสถิติ โดยประมาณว่าการกระจายของค่านับวัดเป็นแบบปัวซองและทดสอบการกระจายของค่านับวัดได้จากการหาค่าไคสแควร์[15,16] คือ

$$X^2 = \sum_{i=1}^{N} \frac{(R_i - \bar{R})^2}{\bar{R}} \qquad \text{.....(5.23)}$$

N = จำนวนครั้งทั้งหมดที่ทดสอบหาค่านับวัด

R_i = ค่านับวัดแต่ละครั้งที่วัดได้ในเวลาเท่ากัน

$\bar{R}$ = ค่านับวัดเฉลี่ยจากการหาค่านับวัดทั้งหมด N ครั้ง

นำค่าไคสแควร์นี้หาโอกาสความน่าจะเป็น P ถ้า P = 0.5 แสดงว่านับวัดมีการกระจายแบบปัวซองถูกต้อง หรือมี $0.1 < P < 0.9$[16] ก็เป็นขอบเขตที่แสดงว่าค่านับวัดมีการกระจายถูกต้อง ถ้าค่า P อยู่นอกขอบเขตที่กำหนดไว้นี้แสดงว่าการทำงานของเครื่องวัดมีข้อบกพร่อง

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่าของไคสแควร์และค่า P[16]

N	P						
	0.99	0.95	0.90	0.50	0.10	0.05	0.01
10	2.088	3.325	4.168	8.343	14.684	16.919	21.666
20	7.633	10.117	11.651	18.338	27.204	30.144	36.191

ถ้าหาโอกาสความน่าจะเป็นจากค่าไคสแควร์แล้วได้ $p > 0.9$ หรือ $p < .01$ ควรทดสอบไคสแควร์ของเครื่องนับวัดใหม่ ถ้ายังผิดพลาดอยู่ไม่ควรนำเครื่องมือมานับวัด เครื่องนับวัดที่ดีจะต้องผ่านการทดสอบไคสแควร์เมื่อมี window แคบ ถ้าเพิ่มความกว้างของ window แล้วการทดสอบหาค่าไคสแคว์ยังไม่ถูกต้องควรหยุดใช้เครื่องมือจนกว่าจะซ่อมเครื่องนับวัดให้ถูกต้อง

สาเหตุความผิดพลาด

1. ถ้าหาโอกาสความน่าจะเป็นจากค่าไคสแควร์แล้วได้ $p < .01$ เกิดจาก

   ก. มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในวงจรอิเลคทรอนิค

   ข. ความไม่เสถียรของกำลังไฟฟ้าที่เครื่องนับวัดได้รับ

   ค. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

   ง. การทำงานของวงจรอิเลคทรอนิคคลาดเคลื่อน

2. ถ้าหาโอกาสความน่าจะเป็นจากค่าไคสแควร์แล้วได้ $p > 0.9$ เกิดจาก

   ก. ค่านับวัดสูญหายไปเนื่องจากอัตรานับวัดมากเกินไปหรือเนื่องจากรีโซลวิงไทม์มีค่ามาก

   ข. สัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในสัญญาณที่สร้างจากวงจรอิเลคทรอนิค