

วิธีการควบคุมคุณภาพสำหรับระบบสร้างภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์



นายวินิจ ช้อยประเสริฐ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2528

ISBN 9744564-645-8

009584

i 17358267

Quality Control Programs for Nuclear Medicine Imaging Systems

Mr.Winit Choiprasert

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1985

ISBN 974-564-645-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วิธีการควบคุมคุณภาพสำหรับระบบสร้างภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์
โดย นายวินิจ ช้อยประเสริฐ
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์อัญชลี กฤษณจินดา



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

อ. อัญชลี กฤษณจินดา คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุประคิษฐ์ ภูนาถ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อ. วิชัย หโยค ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ วิชัย หโยค)

อ. ธำรง เมธาศิริ กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธำรง เมธาศิริ)

อ. อัญชลี กฤษณจินดา กรรมการ
(อาจารย์อัญชลี กฤษณจินดา)

อ. จงจินต์ ภัทรมนตรี กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จงจินต์ ภัทรมนตรี)

อ. พยงค์ ตันศิริ กรรมการ
(รองศาสตราจารย์พยงค์ ตันศิริ)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วิธีการควบคุมคุณภาพสำหรับระบบสร้างภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์
ชื่อนิสิต นายวินิจ ช้อยประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์อัญชลี กฤษณจินดา
ภาค ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2527



บทคัดย่อ

เครื่องมือสร้างภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์จำเป็นต้องมีความแม่นยำและถูกต้อง เพื่อให้การวินิจฉัยโรคเป็นไปโดยมีประสิทธิภาพสูง ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาการควบคุมสภาพของเครื่องมือ โดยการสร้างแพนทอมสำหรับใช้แทนอวัยวะที่จะวินิจฉัย พร้อมต้นกำเนิดรังสีแบบต่าง ๆ ผลการวิจัยเครื่องมือสร้างภาพที่โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ ระหว่าง พ.ศ. 2524-2527 มีดังนี้ เครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมาที่มีความสม่ำเสมอของภาพเมื่อใช้ผลัดแพนทอมบรรจุเทคนิค ซีเอ็ม-99 เอ็ม 12.4% กำลังแยกการขจัดโดยใช้วิลเลียมแพนทอม 0.7 ซม. กำลังแยกพลังงานของเทคนิค ซีเอ็ม-99 เอ็ม 12.8% และความไวของการนับวัด 420 ครั้งต่อนาทีต่อไมโครคูรี สำหรับเครื่องมือสร้างภาพเรคคิเลียนีร์สแกนเนอร์มีกำลังแยกพลังงานวัดด้วยซีเอ็ม-137 16.9% กำลังแยกการขจัด 1 ซม. และความถูกต้องของระบบในการแสดงภาพ 1.2% ผลที่ได้จากการวิจัยแสดงว่าการทำงานของเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมาอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้จากสำนักงานมาตรฐานสากลให้ภาพถ่ายที่มีรายละเอียดถูกต้องเชื่อถือได้และมีประโยชน์ในการวินิจฉัยโรค การทำงานของเครื่องมือสร้างภาพเรคคิเลียนีร์สแกนเนอร์ส่วนใหญ่ถูกต้องแม้มีความไวการนับวัด และกำลังแยกพลังงานเลวลง เนื่องจากการใช้งานมาเป็นเวลานาน แต่ปริมาณเหล่านี้ก็ไม่ทำให้คุณภาพของภาพสูญเสียไป จึงกล่าวได้ว่าความสามารถในการสร้างภาพของเครื่องมือทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ยังคงให้รายละเอียดของภาพเป็นประโยชน์ต่อการวินิจฉัยโรคอยู่



กิติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ อาจารย์อัญชลี กฤษณจินดา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จงจินต์ ภัทรมนตรี ที่กรุณาให้แนวความคิดในการวิจัย พร้อมทั้งแนะวิธีแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งทางด้านทฤษฎีและอุปกรณ์ในการวิจัย ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ พยงค์ ตันศิริ และคณาจารย์ในภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่กรุณาสั่งสอนและแนะนำในการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ แพทย์หญิง มากัฒครอง โปษยะจินดา คณะแพทย์ นักวิทยาศาสตร์ และบุคลากรทุกท่านในหน่วยเวชศาสตร์นิวเคลียร์ โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ ที่กรุณาให้ใช้เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ ตลอดจนให้คำแนะนำต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยอย่างยิ่ง

นอกจากนี้ผู้เขียนยังได้รับความช่วยเหลือจาก คุณอารมณ โสคติอำรุง ในการพิมพ์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ และบุคลากรหน่วยช่างคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาฯ ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์เพื่อใช้ในการวิจัย จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้อีกทั้งขอขอบคุณ พี่และเพื่อนทุกคนที่ช่วยแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จ.

ขออาราธนาคุณพระศรีรัตนตรัยจงคุ้มครองและคลบ้นดาลให้ทุกท่านที่กล่าวมาแล้วจงมีความสุขความเจริญตลอดไป.



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฅ
บทที่	
1 บทนำ	1
2 เครื่องมือและทฤษฎีเบื้องต้นของรังสีแกมมาและระบบนับวัด	9
2.1 บทนำ	9
2.2 อันตรกิริยาของรังสีแกมมาต่อผลึกโซเดียมไอโอไดด์	12
2.2.1 ผลึกนับวัดซินทิลเลชันโซเดียมไอโอไดด์(เทลเลียม)	12
2.3 ทฤษฎีการเกิดโฟตอนในหัวนับวัดซินทิลเลชันโซเดียมไอโอไดด์(เทลเลียม)	14
2.4 หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์	16
2.5 วงจรขยายสัญญาณ	23
2.5.1 ปริแอมพลิไฟเออร์	23
2.5.2 เครื่องขยายสัญญาณ	27
2.6 เครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ	34
2.7 ภาคแสดง	39
2.7.1 ระบบสร้างภาพของเครื่องมือสร้างภาพเรคคิติเนียร์สแกนเนอร์	40
2.7.2 ระบบสร้างภาพของเครื่องมือถ่ายภาพรังสีแกมมา	44
3 คอลลิเมเตอร์	48
3.1 คอลลิเมเตอร์ชนิดช่องแคบในเครื่องนับวัด	48
3.2 คอลลิเมเตอร์ชนิดโฟกัสใช้กับเครื่องมือสร้างภาพเรคคิติเนียร์สแกนเนอร์	51
3.2.1 คุณสมบัติของคอลลิเมเตอร์ของเครื่องเรคคิติเนียร์สแกนเนอร์	55
3.3 คอลลิเมเตอร์สำหรับเครื่องถ่ายภาพซินทิลเลชัน	57

บทที่	หน้า	
3.3.1	คอลลิเมเตอร์ประเภทช่องขนาน	57
3.3.2	คอลลิเมเตอร์ประเภทรูเข็ม	59
3.3.3	คอลลิเมเตอร์ประเภทช่องเอียง	61
4	การควบคุมคุณภาพของเครื่องมือสร้างภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์.....	63
4.1	บทนำ	63
4.2	การควบคุมคุณภาพของเครื่องมือสร้างภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์.....	63
4.3	หุ่นจำลอง (phantom) สำหรับควบคุมคุณภาพของเครื่องมือสร้างภาพ.....	66
4.3.1	แฟนทอมชนิดบรรจุนิวไคลด์รังสีหรือต้นกำเนิดรังสี (Emission phantom).....	66
4.3.2	แฟนทอมชนิดยอมให้รังสีแกมมาผ่าน (Transmission phantom)....	73
4.4	การควบคุมคุณภาพของภาพถ่ายด้วยแฟนทอม	80
5	ทฤษฎีการควบคุมคุณภาพของเครื่องนับวัดและเครื่องมือสร้างภาพ.....	85
5.1	การปรับระดับพลังงานของเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ.....	87
5.2	ความไวของการนับวัด.....	91
5.3	กำลังแยก	94
5.3.1	กำลังแยกของพลังงาน.....	94
5.3.2	กำลังแยกของการจัด	99
5.3.2.1	เครื่องสแกนเนอร์	99
5.3.2.2	เครื่องถ่ายภาพ	102
5.4	การหาค่าแมคกวาร์ด.....	103
5.4.1	ขอบเขตการยอมรับการทำงาน	103
5.4.2	ผลของแมคกวาร์ดต่ออัตรานับวัดและภาพจากเครื่องมือสร้าง ภาพซินทิลเลชัน	104
5.5	ความถูกต้องในการตอบสนองแนวเส้น	106
5.5.1	ความถูกต้องในการตอบสนองต่อพลังงานของรังสีแกมมา	106
5.5.2	ความถูกต้องในการตอบสนองต่อกัมมันตภาพ	108

5.5.3	ความถูกต้องของการจัด	111
5.5.4	ความถูกต้องของระบบ	113
5.6	การทดสอบการทำงานทั้งหมดของระบบสร้างภาพ	113
5.7	ความสม่ำเสมอของภาพ	115
5.8	การทำอัตรานับวัดของเครื่องถ่ายภาพเมื่อไม่มีคอลลิเมเตอร์	116
5.9	ความคมชัดของภาพ	119
5.10	ความแม่นยำในการนับวัด	122
6	วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ การทดลองและผลการทดลอง	124
6.1	บทนำ	124
6.2	วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการศึกษาวิจัย	124
6.3	วิธีวิจัย	125
6.4	การศึกษาวิจัยการควบคุมคุณภาพของเครื่องมือถ่ายภาพรังสีแกมมา	125
6.5	การศึกษาวิจัยการควบคุมคุณภาพของเครื่องมือสร้างภาพเรคคิตลิเนียร์ สแกนเนอร์	129
6.6	ผลการทดลอง	135
6.7	วิธีการศึกษาการทำงานของเครื่องมือถ่ายภาพด้วยวิลเลียมแพนทอมที่สร้างขึ้น	169
6.8	วิธีการศึกษาการทำงานของเครื่องมือสร้างภาพเรคคิตลิเนียร์สแกนเนอร์ด้วย วิลเลียมแพนทอมที่สร้างขึ้น	169
6.9	ผลการศึกษากำลังแยกของการจัดและความคมชัดของเครื่องถ่ายภาพ ด้วยวิลเลียมแพนทอม	171
6.10	ผลการศึกษาการทำงานของเครื่องมือสร้างภาพเรคคิตลิเนียร์สแกนเนอร์ ด้วยวิลเลียมแพนทอม	182
7	การสรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัย	184
7.1	ผลการวิจัยเครื่องมือถ่ายภาพรังสีแกมมา	184
7.2	ผลการวิจัยเครื่องมือสร้างภาพเรคคิตลิเนียร์สแกนเนอร์ด้วยวิลเลียม แพนทอมและวิธีทดลองอื่น ๆ	189
7.3	สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัยการทำงานของเครื่องมือถ่ายภาพรังสีแกมมา ด้วยวิลเลียมแพนทอมและวิธีอื่น ๆ	190

7.3.1 ผลการวิจัยความสม่ำเสมอของภาพจากผลิตภัณฑ์แพนทอม.....	190
7.3.2 กำลังแยกของพลังงาน	191
7.3.3 ผลการวิจัยกำลังแยกของการจัด	191
7.3.4 ผลการวิจัยอัตรานับวัด	193
7.3.5 รีโซลวิงใหม่	193
7.3.6 ความคมชัดของภาพถ่ายจากวิลเลียมแพนทอม	194
7.3.7 ผลการวิจัยความไวของเครื่องถ่ายภาพ.....	195
7.4 ผลการวิจัยเครื่องมือสร้างภาพเรคคิตลิเนียร์สแกนเนอร์ด้วยวิลเลียม แพนทอมและวิธีทดลองอื่น ๆ	197
7.4.1 ผลการศึกษา กำลังแยกการจัด	197
7.4.2 ความถูกต้องของระบบ	199
7.4.3 ผลการศึกษา กำลังแยกพลังงาน.....	199
7.4.4 การศึกษาความไวของเครื่องมือสร้างภาพเรคคิตลิเนียร์สแกนเนอร์... ..	199
สรุปผลการควบคุมคุณภาพของเครื่องมือสร้างภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ ด้วยวิลเลียมแพนทอม	201
ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย	201
บรรณานุกรม	203
ภาคผนวก	208
ประวัติ	237

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของนิวไคลด์รังสี	8
2.1	แสดงคุณสมบัติมูลฐานของสารซินทิลเลชันที่เป็นของแข็งและของเหลว	11
2.2	แสดงขนาดและจำนวนผลิตภัณฑ์และหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ของเครื่อง นับวัดและเครื่องมือสร้างภาพซินทิลเลชัน	20
3.1	แสดงคุณสมบัติของคอลลิเมเตอร์ชนิดช่องขนานที่มีโชยู่ทั่วไป	58
3.2	แสดงขนาดของช่องและผนังกันช่องคอลลิเมเตอร์ชนิดช่องขนานและรังสี แกมมาพลังงานมากที่สุดที่สามารถใช้กับคอลลิเมเตอร์	59
5.1	การควบคุมคุณภาพของเครื่องมือสร้างภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์	86
5.2	ตารางแสดงค่าของไคสแควร์และค่า P	122
6.1	ก, ข, ค, การศึกษาความสม่ำเสมอของภาพจากเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมา ด้วยฟลัดแฟนทอมบรรจุเทคนิคนี้เซียม-99เอ็ม	140, 141
6.2	ก, ข. การศึกษากำลังแยกพลังงานของเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมา ด้วยนิวไคลด์รังสีเทคนิคนี้เซียม-99เอ็ม	142, 143
6.3	การศึกษความไวและกำลังแยกการขจัดด้วยตนเองกัมมันตรังสีและแฟนทอม ชนิดต่าง ๆ กับเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมา	149
6.4	การหาอัตรานับวัดและรีโซลิวชันใหม่ของเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมาด้วย ตนเองกัมมันตรังสีเทคนิคนี้เซียม 2 อัน	149
6.5	ก, ข. การหาอัตรานับวัดและรีโซลิวชันใหม่ของเครื่องถ่ายภาพรังสี แกมมาด้วยตนเองกัมมันตรังสีเทคนิคนี้เซียม-99เอ็ม 10 อัน	151, 153
6.6	การหา กำลังแยกพลังงานของเครื่องมือสร้างภาพเรคคิตีเนียร์สแกนเนอร์ด้วย ซีเซียม-137	155
6.7	ก, ข, ค, การศึกษากำลังแยกการขจัดของเครื่องมือสร้างภาพเรคคิตีเนียร์ สแกนเนอร์ด้วยตนเองกัมมันตรังสีแบบเส้นเมื่อใช้คอลลิเมเตอร์ชนิด 265, 85, 163 ช่อง	159, 161

6.8	การศึกษาความถูกต้องทุกส่วนของระบบเครื่องมือสร้างภาพเรคตินีแยร์ สแกนเนอร์ด้วยสเตปเวจแพนทอมบรจุเทคนิคซีเอ็ม-99เอ็ม.....	164
6.9	การศึกษาความถูกต้องในการตอบสนองต่อพลังงานระดับต่าง ๆ ของ เครื่องมือสร้างภาพเรคตินีแยร์สแกนเนอร์	167
6.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน (keV) และอัตรานับวัดจาก เทคนิคซีเอ็ม-99เอ็ม จากเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมา ความกว้างหน้าต่าง 20%.....	174
6.11	ก,ข. ผลการทดลองหาความคมชัดของฟิล์มถ่ายภาพจากวิลเลียม แพนทอมบรจุ เทคนิคซีเอ็ม-99เอ็ม โฟโตฟิค 140 keV เมื่อเปลี่ยน ความกว้างของหน้าต่างและพลังงานแตกต่างจากโฟโตฟิคต่าง ๆ กัน.....	176, 180
6.12	การศึกษาการทำงานของเครื่องมือสร้างภาพเรคตินีแยร์สแกนเนอร์ ด้วยวิลเลียมแพนทอมเมื่อใช้คอลลิเมเตอร์ชนิดต่าง ๆ.....	182
7.1	ผลการหาความสม่ำเสมอของภาพของเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมา.....	184
7.2	สรุปผลการทดลองหาค่าล้างแยก ความไวและการหาค่านับวัดของ เครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมา	186
7.3	ผลการทดลองหาความคมชัดของจุดแทนเนืองออกจากภาพถ่ายของ วิลเลียมแพนทอม	188
7.4	แสดงผลการทดลองการควบคุมคุณภาพของเครื่องมือสร้างภาพเรคตินีแยร์ สแกนเนอร์	189

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงระดับพลังงานของอะตอมไอโอดีนซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของฟลักซินทิลเลชันโซเดียมไอโอไดค์	10
2.2	แสดงอันตรกิริยาของรังสีแกมมาต่อฟลักโซเดียมไอโอไดค์ที่มีแทลเลียมเป็นตัวกระตุ้น	12
2.3	ระบบของเครื่องนับวัดรังสีแกมมาแบบซินทิลเลชันประกอบด้วยฟลักนับวัด หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ปริแอมป์ เครื่องขยายสัญญาณ เครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณและสเกเลอรั	13
2.4	แสดงการเกิดซินทิลเลชันในฟลักโซเดียมไอโอไดค์ มีโพตอนของแสงเกิดขึ้นตลอดแนวท่ออิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่และการสะท้อนของโพตอนแสงที่ผิวของฟลักสู่อุปกรณ์โพโตแคโทด	15
2.5	รังสีแกมมาเข้าสู่ฟลักนับวัดจะถ่ายทอดพลังงานแก่ฟลักทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิขึ้น ซึ่งจะเคลื่อนที่ไปชนอะตอมของฟลักทำให้อะตอมถูกกระตุ้นและเกิด	
2.6	รังสีแกมมาจากนิวไคลด์รังสีซีเซียม-137 พลังงาน 662 keV เมื่อชนกับฟลักโซเดียมไอโอไดค์ให้ อันตรกิริยาแบบคอมพตันมากกว่าเมื่อรังสีแกมมาจากนิวไคลด์รังสีทองคำ-198 ชนฟลักโซเดียมไอโอไดค์	19
2.7	แสดงการรับโพตอนและผลิตสัญญาณจากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในหัวนับวัด	21
2.8	แสดงผลของความหนาฟลักนับวัดในการแยกจุดที่เกิดซินทิลเลชัน	22
2.9	แสดงรายละเอียดของภาพเปลี่ยนแปลงตามขนาดฟลักและจำนวนหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ของหัวนับวัด	23
2.10	แสดงวงจรเครื่องนับวัดซึ่งแปลงรังสีแกมมาเป็นสัญญาณค่านับวัด	24
2.11	แสดงสัญญาณที่เข้าและออกจากวงจรปริแอมป์	26
2.12	เปรียบเทียบสัญญาณที่เกิดจากปริแอมป์และจากเครื่องขยายสัญญาณ	28
2.13	แสดงสัญญาณที่เกิดจากวงจรขยายสัญญาณและจัดรูปสัญญาณ CR และ RC	29
2.14	แสดงวงจรขยายสัญญาณชนิด CR และ CR สองชุดต่ออนุกรมกัน	31
2.15	แสดงการเลื่อนต่ำลงของโพโตพีคและการซ้อนกันของสัญญาณ	32

รูปที่	หน้า
2.16	แสดงการเลื่อนต่ำลงของโพโตพิคเมื่อใช้อัตรานับวัดสูง ๆ 33
2.17	แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่เข้าและถูกนับด้วยเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ ... 35
2.18	การวิเคราะห์สัญญาณที่ผ่านหน้าต่างของเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ 36
2.19	แสดงวงจรการทำงานของหัวนับวัดเพื่อกำหนดตำแหน่งซินทิลเลชันจากผลิกนับวัด 37
2.20	แสดงระบบขับเคลื่อนในการบันทึกภาพของเครื่องมือสร้างภาพเรคคิไลเนียร์ สแกนเนอร์ 40
2.21	แสดงความผิดปกติของภาพจากเรคคิไลเนียร์สแกนเนอร์เมื่อเลือกใช้ค่าเวลา คงตัว อัตรานับวัด และอัตราเร็วการสแกนไม่สัมพันธ์กัน 43
2.22	แสดงส่วนประกอบของหลอดรังสีแคโทดซึ่งเป็นจอแสดงภาพ 45
2.23	การบันทึกภาพหลายภาพบนฟิล์มเดียวกัน 46
3.1	แสดงหัวนับวัดพร้อมคอลลิเมเตอร์ 49
3.2	แสดงอัตรานับวัดโดยรอบหัวนับวัด 50
3.3	แสดงขอบเขตของการเห็นของคอลลิเมเตอร์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของอัตรานับวัด ที่จุดต่าง ๆ เมื่อเทียบกับอัตรานับวัดที่แกนกลางของผลิก 50
3.4	แสดงคอลลิเมเตอร์แบบโพกัส 51
3.5	แสดงเงามัวและการซ้อนกันของขอบเขตการมองเห็นของแต่ละช่องของ คอลลิเมเตอร์แบบโพกัส 51
3.6	แสดงเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่ออัตรานับวัดเมื่อวางต้นกำเนิดรังสีแบบเส้นที่ ระยะต่าง ๆ จากหน้าคอลลิเมเตอร์ชนิด 31 ช่อง และ 163 ช่อง 53
3.7	แสดงขอบเขตการตอบสนองต่ออัตรานับวัดบริเวณต่าง ๆ หน้าคอลลิเมเตอร์ ชนิดโพกัส 54
3.8	แสดงการตอบสนองของอัตรานับวัดที่ระยะต่าง ๆ หน้าคอลลิเมเตอร์..... 56
3.9	การกระจายของช่องในคอลลิเมเตอร์แบบแปดเหลี่ยมและแบบช่องกลม 56
3.10	แสดงคอลลิเมเตอร์ชนิดช่องขนานสำหรับวัดพลังงานระดับปานกลางและระดับต่ำ..... 58
3.11	แสดงคอลลิเมเตอร์ประเภทรูเข็มและการบิดเบือนของภาพจากคอลลิเมเตอร์ชนิดนี้... 60
3.12	แสดงคอลลิเมเตอร์ชนิดช่องลู่อกและการทำงานที่ระยะต่าง ๆ..... 62

รูปที่		หน้า
3.13	แสดงคอลลิเมเตอร์ชนิดช่องคู่ เข้าและการทำงานที่ระยะต่าง ๆ	62
4.1	แสดงภาพของผลัดแผ่นทอมชนิดแผ่นกลมตัน	67
4.2	แสดงผลัดแผ่นทอมชนิดบรรจุสารละลายนิวไคลด์รังสี	67
4.3	แสดงความผิดปกติของภาพที่เกิดจากการเตรียมผลัดแผ่นทอม	68
4.4	แสดงลักษณะของจุดแทนเนื้องอกในรัยรอยด์แผ่นทอม	70
4.5	แสดงรายละเอียดและจุดแทนเนื้องอกในวิลเลียมแผ่นทอม	71
4.6	แสดงรายละเอียดของสเตปเวจค์แผ่นทอมและความสัมพันธ์ของอัตรานับวัด กับความหนาของสารละลายในแผ่นทอม	72
4.7	แสดงรายละเอียดของทรานสมิสชันแผ่นทอมชนิดต่าง ๆ	74
4.8	แสดงการใช้งานของทรานสมิสชันแผ่นทอมประกอบเข้ากับผลัดแผ่นทอมและ หัวนับวัด	75
4.9	ภาพแสดง Orthogonal-hole test pattern และความสัมพันธ์ของ เส้นผ่าศูนย์กลางช่องและระยะระหว่างขอบช่อง	78
4.10	แสดงรายละเอียดของ BRH แผ่นทอม	79
4.11	แสดงความสม่ำเสมอของภาพจากผลัดแผ่นทอมเมื่อใช้กึ่งกลางหน้าต่างแตกต่างกัน ..	81
4.12	แสดงความผิดปกติของภาพจากเครื่องถ่ายภาพเนื่องจากการทำงานของโฟโต มัลติพลายเออร์	82
4.13	แสดงภาพความผิดปกติที่เกิดขึ้นจากผลิกนับวัด	84
5.1	แสดงสเปกตรัมของนิวไคลด์รังสีมาตรฐานซีเซียม-137	83
5.2	แสดงคอนโทรลชาร์ทของการปรับระดับพลังงานที่โฟโตพีคของเครื่องนับวัด เครื่องถ่ายภาพ ซินทิลเลชัน ตลอดเวลาการใช้เครื่องมือหนึ่งปี	89
5.3	แสดงคอนโทรลชาร์ทของการปรับศักย์ไฟฟ้าและกำลังขยายของเครื่องมือ นิวเคลียร์ตลอดเวลาหนึ่งปี	90
5.4	แสดงคอนโทรลชาร์ทของความไวจากเครื่องนับวัดรังสีแกมมาตลอดเวลาหนึ่งปี ..	93
5.5	แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาที่ถูกปล่อยออกมาจากนิวไคลด์รังสีไอโอดีน-131	94
5.6	แสดงการกระจายของพลังงานรังสีแกมมาหรือความกว้างของอำพนของสเปกตรัม ของรังสีแกมมาจากโคบอลต์-57 ซึ่งมีโฟโตพีค 122 keV	95

รูปที่	หน้า
5.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับวัดและพลังงานของรังสีแกมมา ซึ่งใช้หา ค่า FWHM จากกราฟ 96
5.8	สเปกตรัมของโคบอลต์-57 ซึ่งมีโพโตพีค 122 keV 97
5.9	แสดงการกระจายของพลังงานรังสีแกมมาในระดับพลังงานสูงและต่ำ..... 98
5.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับวัดและการขจัดระหว่างต้นกำเนิดรังสี แบบเส้น จะพบว่าต้นกำเนิดรังสีแยกจากกันชัดเจนเมื่อ $a > \text{FWHM}$ 99
5.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับวัดและการขจัดของต้นกำเนิดรังสีจาก หัวนับวัด อัตรานับวัดมากที่สุดเมื่อต้นกำเนิดรังสีอยู่ที่ระนาบโฟกัสของคอลลิเมเตอร์ และมี FWHM น้อยสุด 100
5.12	แสดงวิธีการหา FWHM ของการกระจายค่านับวัดรอบ ๆ ต้นกำเนิดรังสีแบบเส้น.. 101
5.13.	ความถูกต้องในการตอบสนองต่อพลังงานรังสีแกมมา..... 107
5.14	ความสัมพันธ์ของกัมมันตภาพและเวลาที่นับวัดเมื่อนับวัดกัมมันตภาพติดต่อกันทุก ชั่วโมงในเวลาหลายเท่าของครึ่งชีวิต..... 109
5.15	แสดงความคลาดเคลื่อนของเครื่องนับวัดต่อกัมมันตภาพที่ระดับขนาดแตกต่างกัน เกิดจากความผิดพลาดของระบบนับวัดที่จะตอบสนองต่อกัมมันตภาพที่ระดับต่าง ๆ... 111
5.16	แสดงช่องที่ย้อมให้รังสีแกมมาผ่านของ orthogonal-hole test pattern และภาพถ่ายจากแพนทอมสำหรับหาความถูกต้องของการขจัด..... 112
5.17	แสดงความคลาดเคลื่อนของจุดจากแนวเส้นตรง ($\Delta n, p$) 112
5.18	แสดงภาพของสเตปเวจจ์แพนทอมและการทดสอบความถูกต้องของระบบที่มี ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างความเข้มบนฟิล์ม และความหนาของสาร ละลายในแพนทอม 114
5.19	แสดงความสัมพันธ์ของอัตรานับวัดและอัตรากัมมันตรังสีที่เข้าหัวนับวัดของเครื่อง ถ่ายภาพรังสีแกมมาด้วยเทคนิคซีเอ็ม-99เอ็ม..... 117
5.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับวัด (R) และส่วนกลับของจำนวนแผ่น ทองแดง ($\frac{1}{n}$)..... 118
5.21	แสดงภาพความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับวัดกับความหนาและความเข้มกับความ หนาของแพนทอมเมื่อใช้ความคมชัดต่าง ๆ กัน 120

รูปที่	หน้า
6.1	แสดงการวัดอัตรานับวัดจากต้นกำเนิดรังสีแบบเส้นวางในแนวการเคลื่อนที่ ของหัวนับวัด..... 132
6.2	แสดงการบันทึกภาพของสเตปเวจด้วยเครื่องมือสร้างภาพเรคคิเลียนีเยร์ สแกนเนอร์..... 134
6.3	แสดงความสม่ำเสมอของภาพถ่ายจากฟลัดแพนทอมบรจุเทคโนโลยีเซียม-99เอ็ม ด้วยเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมา.....136-139
6.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างอัตรานับวัดและพลังงานของเทคโนโลยีเซียม -99เอ็ม จากเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมา..... 144,145
6.5	การทดสอบกำลังแยกการขจัดของเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมาด้วย BRH แพนทอม และต้นกำเนิดรังสีแบบเส้น..... 146,147
6.6	การศึกษาความคมชัดและกำลังแยก เครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมาด้วย ฉีดยรอยด์แพนทอมบรจุเทคโนโลยีเซียม-99เอ็ม..... 148
6.7	ก. ข. การศึกษาอัตรานับวัดและรีโซลวิงใหม่จากต้นกำเนิดรังสี 10 อัน....152,154
6.8	การศึกษากำลังแยกพลังงานของเครื่องมือสร้างภาพเรคคิเลียนีเยร์สแกนเนอร์ ด้วยซีเซียม-137 ชนิดจุด..... 156
6.9	ก,ข,ค,ง การศึกษากำลังแยกการขจัดของเครื่องมือสร้างภาพเรคคิเลียนีเยร์ สแกนเนอร์ด้วยต้นกำเนิดรังสีเทคโนโลยีเซียม-99เอ็ม ใช้คอลลิเมเตอร์ชนิด 265, 85, 163 ช่อง 158,160,162
6.10	ก, ข. การศึกษาความถูกต้องทุกส่วนของระบบเครื่องมือสร้างภาพเรคคิเลียนีเยร์ สแกนเนอร์ด้วยสเตปเวจแพนทอมบรจุเทคโนโลยีเซียม-99เอ็ม..... 165,166
6.11	การศึกษาความถูกต้องทุกส่วนของพลังงานของเครื่องมือสร้างภาพ เรคคิเลียนีเยร์สแกนเนอร์..... 168
6.12	แสดงรูปด้านข้างของวิลเลียมแพนทอมซึ่งมีความหนาของแพนทอมทั้งสิ้น 4 ซม.... 170
6.13	แสดงทิศการสแกนของหัวนับวัดตามความยาวของวิลเลียมแพนทอม จุดโฟกัส ของคอลลิเมเตอร์อยู่ที่ต่ำกว่า ผิวบนของแพนทอม 1 ซม.....170
6.14	ก, ข. การศึกษา กำลังแยกและความคมชัดของภาพถ่ายวิลเลียมแพนทอม บรจุเทคโนโลยีเซียม-99เอ็ม ด้วยเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมา..... 172,173

รูปที่

หน้า

- 6.15 แสดงสเปกตรัมของเทคนิคซีสม-99เอ็ม วัดด้วยเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมา มีโพโตพีค 140 keV ความกว้างทั้งหมดของโพโตพีค 40 keV หรือ 29% ของโพโตพีค 175
- 6.16 ก,ข. แสดงภาพถ่ายของวิลเลียมแพนทอมบรรจุเทคนิคซีสม-99เอ็ม ด้วยเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมา ใช้ความกว้างของหน้าต่าง 20% ของโพโตพีค โดยเปลี่ยนกึ่งกลางหน้าต่างเป็น 98, 105, 112, 119, 126, 154, 161 และ 168 keV เพื่อศึกษากำลังแยกการขจัดและความคมชัด.....178,179