

การพัฒนาเทคนิคนิวเคลียร์สำหรับจำแนกประเภทของเหลวในภาชนะปิด

นางสาว เหมือนฝัน เขี่ยมศิริ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

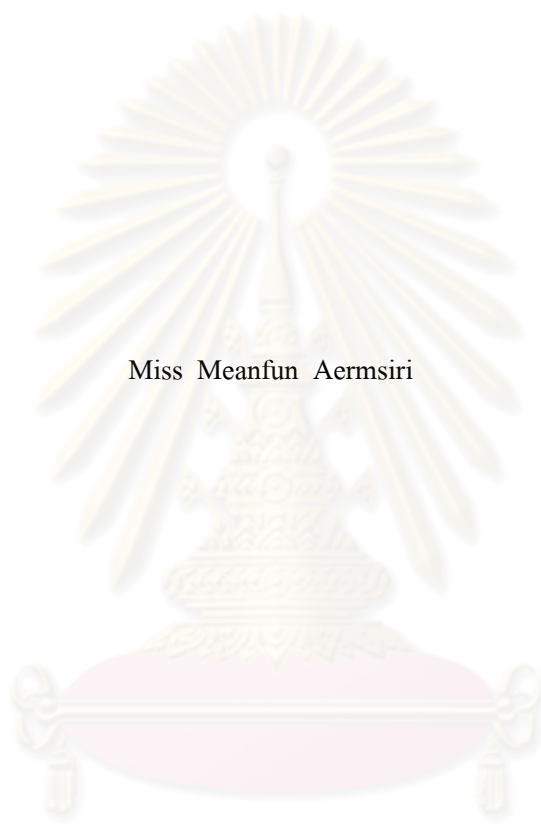
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A NUCLEAR TECHNIQUE
TO IDENTIFY LIQUID TYPE IN CLOSED CONTAINER



Miss Meanfun Aernsiri

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

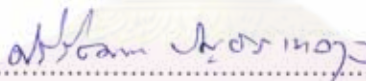
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเทคนิคนิวเคลียร์สำหรับจำแนกประเภทของเหลว ในภาชนะปิด
โดย	นางสาวเหมือนฝัน เอี่ยมศิริ
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว

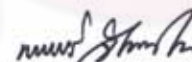
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ


.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สัมชาย นิลสุวรรณโรษิต)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)


.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(พันตรี ดร.ประทีป โภคินวงศ์)

เหมือนฝัน เอี่ยมศิริ : การพัฒนาเทคนิคนิวเคลียร์สำหรับจำแนกประเภทของเหลวในภาชนะปิด. (DEVELOPMENT OF A NUCLEAR TECHNIQUE TO IDENTIFY LIQUID TYPE IN CLOSED CONTAINER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม:รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, 81 หน้า.

ภายใต้กฎความปลอดภัยในการบินตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549 ผู้โดยสารแต่ละคนสามารถนำของเหลวแต่ละชนิดติดตัวขึ้นเครื่องบินได้ไม่เกิน 100 มิลลิลิตร เพื่อป้องกันมิให้ผู้ก่อการร้ายนำวัตถุไวไฟ, สารกัดกร่อน และวัตถุระเบิดขึ้นไปในห้องโดยสาร การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาเทคนิคนิวเคลียร์ที่สามารถจำแนกประเภทของของเหลวซึ่งบรรจุในภาชนะได้โดยไม่ต้องเปิดขวด ได้ทำการทดลองส่งผ่านรังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ ได้แก่ 22.1, 25.0 และ 88.0 keV จากต้นกำเนิดแคดเมียม-109 รวมทั้ง 59.6 keV จากต้นกำเนิดอะเมริเซียม-241 ผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่บรรจุในขวดพลาสติก พบว่า สำหรับขวดที่มีขนาด 600 มิลลิลิตร รังสีแกมมาพลังงาน 22.1 keV ทะลุผ่านแอลกอฮอล์ และน้ำมันเชื้อเพลิงได้มากกว่าน้ำประมาณ 4 และ 8 เท่าตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทดสอบกับของเหลวประเภทอื่น ๆ ด้วย และพบว่าความไวในการจำแนกประเภทต่ำลง เมื่อพลังงานของรังสีแกมมาสูงขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทดลองใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีแกมมา และเทคนิคนิวตรอน ซึ่งพบว่าทั้งสองเทคนิคนี้ไม่เหมาะที่จะใช้ในการแยกประเภทของของเหลว เนื่องจากมีความไวต่ำเกินไป ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาพลังงานต่ำในการตรวจแยกประเภทของของเหลวโดยไม่ต้องเปิดขวด เพื่อความปลอดภัยในการบิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....	ลายมือชื่อนิสิต <i>เป็ยอนเจม เคอ</i>
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก <i>ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล</i>
ปีการศึกษา 2553.....	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม <i>นเรศร์ จันทน์ขาว</i>

##5070657221 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: NUCLEAR TECHNIQUE / GAMMA-RAYS TRANSMISSION / AVIATION SECURITY / FLAMMABLE MATERIAL / EXPLOSIVE MATERIAL

MEANFUN AERMSIRI : DEVELOPMENT OF A NUCLEAR TECHNIQUE TO IDENTIFY LIQUID TYPE IN CLOSED CONTAINER. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. SIRIWATTANA BANCHORNDHEVAKUL, THESIS CO-ADVISOR : ASSOC.PROF. NARES CHANKOW, 81 pp.

Under aviation security regulations since 2006, each passenger is allowed to carry liquid on board in container no larger than 100 ml of each item to prevent terrorist from bringing flammable, corrosive and explosive materials into passenger cabin. The objective of this research is to develop a non-intrusive nuclear technique to be used for identifying liquid type in closed container. Transmission of gamma-rays of different energies, including 22.1, 25.0, and 88.0 keV from ¹⁰⁹Cd as well as 59.6 keV from ²⁴¹Am, through liquid contained in plastic bottles was investigated. It was found that, for 600 ml plastic bottle, the transmission factors of 22.1 keV gamma-rays for alcohol and fuel oils were approximately 4 and 8 times respectively comparing to water. Transmission factors of gamma-rays for other liquid types were also determined. It was also found that the sensitivity decreased with increasing of gamma-ray energy. Moreover, scattering of gamma-rays and neutron techniques were also tested for the same purpose. It was found that both techniques were not suitable for use in identifying liquid type due to too low sensitivity. The results indicated possibility in design and construction of a non-intrusive prototype device using low energy gamma-rays transmission technique to be used for identifying liquid type in aviation security.

Department : Nuclear Technology Student's Signature..... Meanfun Aemsiri
Field of Study : Nuclear Technology Advisor's Signature..... Siriwattana Banchorndhevakul
Academic Year : 2010 Co-Advisor's Signature..... Nares Chankow

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชา ความรู้ต่าง ๆ ตลอดจนให้คำปรึกษา ชี้แนะ และถ่ายทอดประสบการณ์ อีกทั้งให้โอกาสในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีที่ได้อบรมสั่งสอน และให้ความรู้ในทุก ๆ ด้าน

ขอขอบคุณผู้บังคับบัญชา เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ กรมการพลังงานทหาร ที่ให้การสนับสนุนในการศึกษาที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และให้ความช่วยเหลือในการเรียนทุก ๆ ด้าน

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือสำหรับงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ คุณ ธัญชัช พิรุณพันธ์ คุณ เฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำ สำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ที่ได้อำนวยความสะดวก แนะนำให้การช่วยเหลือต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ พี่ๆญาติทุกคน ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำ และคำปรึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
2 ทฤษฎี.....	4
2.1 วัตถุประสงค์ราย.....	4
2.2 ของเหลว.....	12
2.3 เทคนิคการตรวจสอบของเหลวต้องสงสัยก่อนขึ้นเครื่องบิน.....	14
2.4 ต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	35
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	40
4 ผลการวิจัย และวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	44
4.1 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่าน ของเหลวประเภทต่างๆ.....	44
4.2 ผลการทดสอบความสามารถในการจำแนกประเภทของของเหลวโดยใช้ เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา.....	46

บทที่	หน้า
4.3 การจำแนกประเภทของของเหลวโดยใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีแกมมา.....	66
4.4 ผลของการศึกษาการจำแนกประเภทของของเหลวโดยใช้เทคนิคนิวตรอน.....	68
5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	72
รายการอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก	75
ภาคผนวก ก.	76
ภาคผนวก ข.....	79
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	81



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตราจ

ตารางที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างองค้ประกอบของสารบางชนิด วัสดุระเบิด และสารเสฟติด	7
2.2	ลักษณะเฉพาะความสามารถในการติดไฟของของเหลวบางชนิด	11
2.3	ค่าความตึงผิวของของเหลวบางชนิด.....	12
2.4	คุณสมบัติไอโซโทปกัมมันตรังสีบางชนิดที่ให้รังสีแกมมาพลังงานต่ำ.....	34
2.5	คุณสมบัติไอโซโทปกัมมันตรังสีบางชนิดที่เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน.....	34
4.1	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่รังสีแกมมาพลังงาน 15.0, 20.0, 22.0, 25.0, 60.0 และ 88.0 keV (จากการคำนวณ).....	44
4.2	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่พลังงานที่ 22.1 keV ในภาชนะปิดขนาดความจุ 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร.....	46
4.3	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่พลังงาน 22.1 keV เมื่อของเหลวบรรจุในภาชนะปิดชนิดต่าง ๆ.....	65
5.1	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของเหลวบางประเภทเมื่อเทียบกับน้ำที่รังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ.....	71

สารบัญญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของ Nitroglycerine และตัวอย่างของเหลว Nitroglycerine.....	4
2.2	โครงสร้างของ Ammonium nitrate	4
2.3	ตัวอย่างวัตถุระเบิดชนิด Powergel.....	5
2.4	สัดส่วนอะตอมของธาตุไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจนในระเบิด ยาเสพติด และวัสดุบางชนิด	6
2.5	โครงสร้างทางเคมีของเบนซิน ไอโซออกเทน และเฮปเทน.....	8
2.6	โครงสร้างทางเคมีของ MTBE.....	8
2.7	โครงสร้างทางเคมีของซีเทน และแอลฟาเมทิลแนฟทาซีน.....	8
2.8	โครงสร้างทางเคมีของ Toluene	8
2.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความดันไอของของเหลวชนิด ต่างๆ.....	13
2.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดของความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านออกมา จากตัวกลาง.....	17
2.11	แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์	20
2.12	ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคต์ของตะกั่วที่พลังงาน ต่างกัน	21
2.13	ค่า n ที่พลังงานรังสีแกมมาต่างๆ	23
2.14	แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตัน	23
2.15	สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่เกิดจากการกระเจิงคอมป์ตันโดยมีความยาวคลื่นที่ เปลี่ยนแปลงไปตามมุมกระเจิงต่างๆ	27
2.16	ค่า σ_c ที่พลังงานของรังสีแกมมาต่าง ๆ.....	28
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางของ Klein-Nishina ที่กระเจิงเป็นมุม θ จากรังสีแกมมาที่แต่ละพลังงาน	30
2.18	แผนภาพการเกิดแพร์โพรดักชัน	31

รูปที่		หน้า
2.19	ภาคตัดขวางของการเกิดแฟร์โพรงดักจับ (σ_{pp}) ของตะกั่วที่พลังงานต่าง ๆ	32
2.20	โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่พลังงานสัมพันธ์กับเลขอะตอม ของตัวกลาง	32
2.21	ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจาก Am-241.....	33
2.22	ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจาก Cd-109.....	33
3.1	วัสดุบรรจุของเหลวตัวอย่างที่มีปริมาตรความจุ 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร.....	36
3.2	หัววัดรังสีแกมมา CdTe.....	36
3.3	หัววัดนิวตรอนชนิด Li loaded glass scintillator รุ่น NE905.....	37
3.4	อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าศักดาสูงและภาคขยาย/ปรับแต่งสัญญาณ สำหรับหัววัดรังสี CdTe.....	37
3.5	อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าศักดาสูง ORTEC รุ่น 456 สำหรับหัววัดนิวตรอน.....	37
3.6	อุปกรณ์ขยายสัญญาณ CANBERRA รุ่น 2022 สำหรับหัววัดนิวตรอน.....	38
3.7	ตะกั่วบังค้ำลำรังสีแกมมา และกำบังรังสีแกมมา.....	38
3.8	ลักษณะการจัดระบบวัดรังสีแกมมาทะลุผ่าน.....	39
3.9	ลักษณะการจัดระบบวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับของรังสีแกมมาที่มุมกระเจิง 135 องศา ที่ใช้ในการวิจัย.....	39
3.10	ลักษณะการจัดระบบวัดนิวตรอน.....	40
3.11	แผนภาพการจัดระบบวัดในการทดสอบโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา.....	41
3.12	แผนภาพการจัดระบบวัดในการทดสอบโดยใช้เทคนิคการการกระเจิงกลับ ของรังสีแกมมาที่มุมกระเจิง 135 องศา.....	42
4.1	ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมา (จากการ คำนวณ) ที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่พลังงาน 15.0, 20.0, 22.0, 25.0, 60.0 และ 88.0 keV.....	45
4.2	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำที่ 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV.....	47
4.3	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับ น้ำที่ 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV.....	47
4.4	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านน้ำมันประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำที่ 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV.....	48

รูปที่	หน้า
4.5	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำที่ 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV..... 48
4.6	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายไนโตรเจนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำที่ 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV..... 49
4.7	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายน้ำเกลือที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำที่ 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV..... 49
4.8	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำที่ 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV..... 50
4.9	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ ในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 22.1 keV..... 51
4.10	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 22.1 keV..... 51
4.11	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของน้ำมันประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 22.1 keV..... 52
4.12	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 22.1 keV..... 52
4.13	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายไนโตรเจนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 22.1 keV..... 53
4.14	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายน้ำเกลือที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 22.1 keV..... 53

รูปที่	หน้า	
4.15	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มชั้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 22.1 keV.....	54
4.16	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านสารละลายประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 25.0 keV.....	54
4.17	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านเอทานอลที่ความเข้มชั้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 25.0 keV....	55
4.18	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านน้ำมันประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 25.0 keV.....	55
4.19	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านสายละลายน้ำตาลที่ความเข้มชั้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 25.0 keV.....	56
4.20	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านสายละลายไนโตรเจนที่ความเข้มชั้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 25.0 keV.....	56
4.21	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านสารละลายน้ำเกลือที่ความเข้มชั้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 25.0 keV.....	57
4.22	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 25.0 keV.....	57
4.23	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 59.6 keV....	58
4.24	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเอทานอลที่ความเข้มชั้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 59.6 keV.....	58
4.25	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของน้ำมันประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 59.6 keV.....	59

รูปที่	หน้า	
4.26	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 59.6 keV.....	59
4.27	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายไนโตรเจนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 59.6 keV.....	60
4.28	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายน้ำเกลือที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 59.6 keV.....	60
4.29	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อเทียบกับน้ำ ในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 59.6 keV.....	61
4.30	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ ในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 88.0 keV....	61
4.31	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 88.0 keV.....	62
4.32	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของน้ำมันประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ ในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 88.0 keV.....	62
4.33	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 88.0 keV.....	63
4.34	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายไนโตรเจนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 88.0 keV.....	63
4.35	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายน้ำเกลือที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 88.0 keV.....	64

รูปที่	หน้า
4.36	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 88.0 keV... 64
4.37	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่กระเจิงกลับเมื่อเทียบกับน้ำโดยเทคนิคการกระเจิงกลับที่มุม 135 องศา ที่พลังงาน 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV..... 66
4.38	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่กระเจิงกลับของเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำโดยเทคนิคการกระเจิงกลับที่มุม 135 องศา ที่พลังงาน 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV..... 67
4.39	อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่กระเจิงกลับของน้ำมันประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ โดยเทคนิคการกระเจิงกลับที่มุม 135 องศา ที่พลังงาน 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV..... 67
4.40	อัตราส่วนของนิวตรอนที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ โดยใช้เทคนิคทะลุผ่านของนิวตรอน..... 68
4.41	อัตราส่วนของนิวตรอนที่ทะลุผ่านเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ โดยใช้เทคนิคทะลุผ่านของนิวตรอน..... 69
4.42	อัตราส่วนของนิวตรอนที่ทะลุผ่านน้ำมันประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ โดยใช้เทคนิคทะลุผ่านของนิวตรอน..... 69

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่เหตุการณ์ก่อการร้ายที่เกิดขึ้นหลายครั้งในหลายประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ World Trade Center ในประเทศสหรัฐอเมริกา ทำให้มาตรการรักษาความปลอดภัยในด้านต่าง ๆ เข้มข้นขึ้นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นการขนส่งสินค้า พัสตุภัณฑ์ ไปรษณีย์ภัณฑ์ รวมทั้งการโดยสารของผู้คนจำนวนมากในยานพาหนะขนาดใหญ่ เช่น รถยนต์โดยสาร เรือ และเครื่องบิน ที่สำคัญอย่างหนึ่งก็คือ ตั้งแต่วันที่ 10 สิงหาคม 2549 ได้เริ่มมีการจำกัดปริมาณของเหลวที่ผู้โดยสารเครื่องบินสามารถนำติดตัวไปได้ชนิดละไม่เกิน 100 มิลลิลิตร เพราะเกรงว่าอาจมีการนำของเหลวที่ติดไฟเมื่อได้รับความร้อน หรือของเหลวที่เป็นวัตถุระเบิด ซึ่งของเหลวเหล่านี้การตรวจสอบด้วยเครื่องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ และเครื่องตรวจวัตถุระเบิดในปัจจุบันยังไม่สามารถทำได้ ดังนั้นสนามบินจึงต้องเพิ่มมาตรการรักษาความปลอดภัยให้สูงขึ้นกว่าเดิมซึ่งอาจจะกระทบต่อความไม่สะดวกสบายของผู้โดยสารได้ สนามบินบางแห่งจึงมีการนำเครื่องตรวจชนิดของของเหลวมาใช้แล้ว แต่ยังเป็นเพียงระยะเริ่มแรกเท่านั้น ได้แก่ เทคนิค Magnetic Resonance Imaging (MRI), เทคนิค Ion Mobility Spectrometry (IMS), เทคนิค Computed Tomography (CT), เทคนิค Gas Chromatography (GC) และเทคนิคนิวเคลียร์

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้เทคนิคนิวเคลียร์ ซึ่งได้แก่ การส่งผ่านรังสีแกมมาในการจำแนกประเภทของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิด เช่น น้ำ, แอลกอฮอล์, น้ำมัน, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และวัตถุเหลวที่ติดไฟ เมื่อได้รับความร้อนหรือวัตถุเหลวที่เป็นองค์ประกอบของระเบิดได้ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเป็นเครื่องตรวจหาวัตถุเหลวอันตรายต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาเทคนิคนิวเคลียร์สำหรับจำแนกประเภทของเหลวในภาชนะปิด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาและทดลองหาเทคนิคที่เหมาะสมในการนำเทคนิคทางนิวเคลียร์สำหรับจำแนกประเภทของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิดขนาดระหว่าง 100 - 750 ml เช่น น้ำ, แอลกอฮอล์, น้ำมันพืช, น้ำมันเชื้อเพลิง และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น

2. เทคนิคที่จะทำการศึกษาวิจัย ได้แก่ เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา, เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีแกมมา และเทคนิคนิวตรอน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เทคนิคนิวเคลียร์ที่สามารถใช้สำหรับจำแนกประเภทของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิด ซึ่งสามารถพัฒนาต่อไปเป็นเครื่องตรวจแยกประเภทของเหลวสำหรับงานด้านการรักษาความปลอดภัยตามสนามบิน

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ทำการวัดค่าแบคกราวด์ และปรับเทียบการวัดโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา, เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีแกมมา และเทคนิคนิวตรอน โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา อะเมริเซียม-241 (Am-241), ต้นกำเนิดรังสีแกมมาแคดเมียม-109 (Cd-109) และต้นกำเนิดนิวตรอนอะเมริเซียม-241/เบริลเลียม (Am-241/Be)
3. ทดลองวัดค่าแบคกราวด์ (background) หรือรังสีภูมิหลังของภาชนะปิด โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา, เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีแกมมา และเทคนิคนิวตรอน
4. ทดลองนำของเหลวต่าง ๆ บรรจุในภาชนะปิด แล้วทำการวัดค่ารังสี
5. ประเมินผลโดย การเปรียบเทียบความสามารถในการจำแนกประเภทของเหลวในภาชนะปิดในการใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา, เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีแกมมา และเทคนิคนิวตรอน
6. สรุป วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2550 เฉลิมพงษ์ ไพฑูริย์ ได้ทำการวิจัยเรื่องการพัฒนาวิธีสำหรับตรวจหา กัมมะกอกโดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริง ระบบที่ใช้ประกอบด้วยต้นกำเนิดรังสีแกมมาซีเซียม-137 ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 662 keV และหัววัดไซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว โดยจัดให้ลำรังสีแกมมาตกกระทบบนหน้าดินในแนวตั้งฉาก ในขณะที่วางหัววัดรังสีแกมมาทำมุม 45° เพื่อวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับที่มุม 135° เมื่อใช้ยูเรีย ซึ่งใช้เป็นวัสดุเสมือนวัตถุระเบิดอัดไว้ในภาชนะพลาสติกขนาดต่าง ๆ กัน และฝังไว้ที่ระดับลึกต่าง ๆ กัน ผลพบว่าความเข้มข้น และลักษณะสเปกตรัมของดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์ขึ้นอยู่กับขนาดของ

ภาษา และความลึก ในขั้นสุดท้ายได้ทดสอบระบบในภาคสนามในลักษณะทำนองเดียวกันกับในห้องปฏิบัติการ ซึ่งก็ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

ในปี พ.ศ. 2542 พรรณี เสถียรศรี ได้ทำการวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ธาตุหลักบางชนิดในดิน ณ พื้นที่โดยใช้เทคนิคนิวตรอน เทคนิคที่ใช้ศึกษามี 3 เทคนิค คือ การวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน และ เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ระบบวิเคราะห์ที่ใช้ ประกอบด้วย ต้นกำเนิดนิวตรอน อะเมริเซียม-241/เบริลเลียม ความแรง 1 คูรี (37 กิกะเบคเคอเรล) และหัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงแบบที่ใช้งานในภาคสนาม ผลการวิจัยพบว่ามียังมีจำนวน 8 ธาตุที่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วย การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน คือ ไฮโดรเจน โบรอน ออกซิเจน อะลูมิเนียม ซิลิกอน แคลเซียม ไทเทเนียม และเหล็ก มี 5 ธาตุวิเคราะห์ได้ด้วย การวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน คือ ออกซิเจน อะลูมิเนียม คลอรีน และแมงกานีส

ในปี พ.ศ. 2548 วิศิษฎ์ ปฐมชัยวาลย์ ได้ทำการวิจัยเรื่องการหาปริมาณปรอทโดยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา : กรณีศึกษาตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม ระบบที่ใช้ศึกษาประกอบด้วยต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-57 ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 122 และ 136 keV ซึ่งมีพลังงานสูงกว่า K-absorption edge ของปรอทเล็กน้อย จึงมีความไวในการเปลี่ยนแปลงของปรอทในสารตัวอย่าง และใช้รังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากซีเซียม-137 ใช้ในการปรับแก้ความแตกต่างของความหนาของสารตัวอย่าง โดยใช้หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดต์ (ทลเลียม) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว ผลการวิจัยพบว่าหากมีการปรับเทียบที่เหมาะสมสามารถนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณปรอทในตัวอย่างสลัดจ์จากการผลิตปิโตรเลียม และตัวอย่างอื่น ๆ ที่มีปรอทปนเปื้อนได้

ในปี ค.ศ. 2001 Andy Buffer ได้ทำการวิจัยเรื่องการตรวจวัดสินค้านำเข้าอย่างผิดกฎหมายโดยการใช้นิวตรอน โดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 เมื่อใช้เทคนิคเทอร์มัลนิวตรอนสามารถวิเคราะห์ธาตุไฮโดรเจน ไนโตรเจน และคลอรีน ได้ ส่วนเมื่อใช้เทคนิคนิวตรอนเร็วสามารถวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน คลอรีน และธาตุอื่น ๆ ได้

บทที่ 2

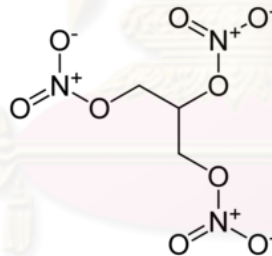
ทฤษฎี

2.1 วัตถุอันตราย [1],[2]

หมายถึง วัตถุหรือสิ่งของที่โดยคุณสมบัติของมันเองก่อให้เกิดอันตราย ต่อสุขภาพของมนุษย์ ความปลอดภัย หรือทรัพย์สินได้ ซึ่งมีการจัดประเภทของวัตถุอันตรายถูกกำหนดจากลักษณะของความอันตรายของสารนั้น ทั้งนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 9 ประเภท ดังนี้

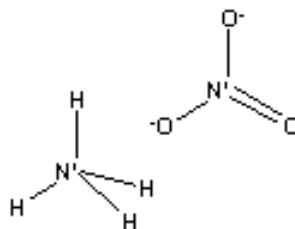
ประเภทที่ 1 วัตถุระเบิด หมายถึง ของแข็งหรือของเหลว หรือสารผสมที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีด้วยตัวมันเอง ทำให้เกิดก๊าซที่มีความดัน และความร้อนอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดการระเบิดสร้างความเสียหายแก่บริเวณโดยรอบได้ ตัวอย่างของเหลว เช่น Liquid Nitroglycerine ($C_3H_5(NO_3)_3$) (มีความหนาแน่น 1.6 g/cm^3 เป็นสารเหลวที่ใช้ในการทำระเบิด), สารละลาย Ammonium nitrate เป็นต้น

- Nitroglycerine ($C_3H_5(NO_3)_3$) มีความหนาแน่น 1.6 g/cm^3 เป็นสารเหลวที่ใช้ในการทำระเบิด



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ Nitroglycerine และตัวอย่างของเหลว Nitroglycerine

- Ammonium nitrate (NH_4NO_3) มีความหนาแน่น 1.73 g/cm^3 เป็นสารที่เป็นองค์ประกอบในการทำวัตถุระเบิดเหลว



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ Ammonium nitrate

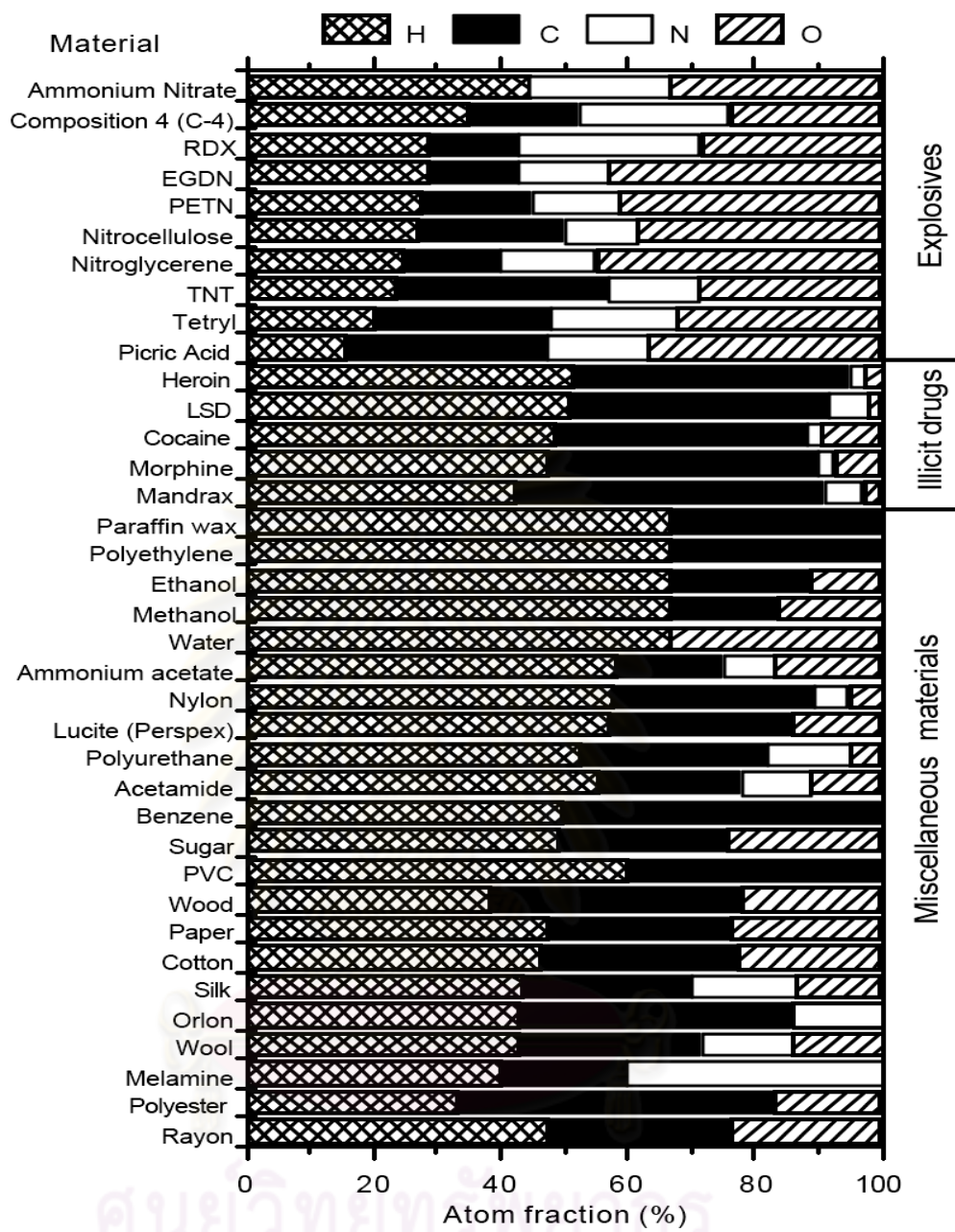
ตัวอย่างวัตถุระเบิดเหลว

- วัตถุระเบิดประเภทเจลน้ำ (Watergel) มีส่วนประกอบสำคัญคือ Ammonium Nitrate และน้ำประมาณ 10-30 % นอกจากนั้นจะมีเชื้อเพลิงที่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบคาร์บอน ผงอลูมิเนียม หรือ วัตถุระเบิดแรงสูงชนิดอื่นเช่น TNT วัตถุระเบิดประเภทนี้หากนำมาทำให้มีความไวต่อการจุดระเบิดด้วยเชื้อปะทุหรือจุดระเบิดด้วยวัตถุระเบิดแรงสูงที่เป็นได้ง่าย เรียกว่า วัตถุระเบิดชนิดเหลวหนืด (Slurry Explosive) วัตถุระเบิดชนิดนี้มีชื่อทางการค้า ได้แก่ Powergel, Magnum



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างวัตถุระเบิดชนิด Powergel

- วัตถุระเบิดแบบหนืด (Emulsion Explosive) มีส่วนประกอบสำคัญ คือสารละลายของ Ammonium Nitrate และสารให้ออกซิเจนชนิดอื่นกับซีดีฟี่ปิโตรเลียม น้ำมันเชื้อเพลิง และผงละเอียดของโลหะอลูมิเนียม ซึ่งทำหน้าที่เป็นเชื้อเพลิงและสารเร่งปฏิกิริยาของวัตถุระเบิด นอกจากนี้วัตถุระเบิดชนิดนี้จะมีฟองอากาศขนาดเล็กผสมอยู่ระหว่างสารให้ออกซิเจนและเชื้อเพลิงอย่างสม่ำเสมอเรียกว่า Micro balloons ซึ่งทำหน้าที่เป็นเหมือนสารเร่งปฏิกิริยาของวัตถุระเบิดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยไฟรงอากาศเล็กๆเหล่านี้ จะถูกอัดตัวจนมีความร้อนและความดันสูง ทำให้มีการระเบิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่



รูปที่ 2.4 สัดส่วนอะตอมของธาตุไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจนในระเบิด ยาเสพติด และวัสดุบางชนิด [3]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างองค์ประกอบของสารบางชนิด วัตถุระเบิด และสารเสพติด [4]

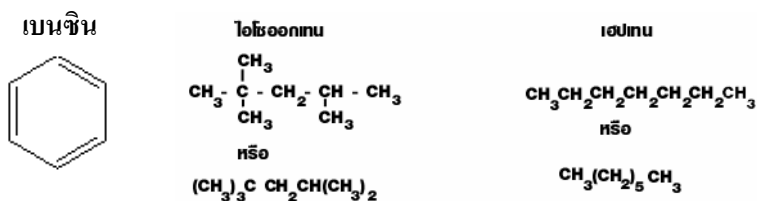
Substance	D (g/cc)	%H	%C	%N	%O	%Cl	% Other Elements	Examples of Elemental Signatures			
								C/O	N/O	Cl/C	Cl/H
Salt	0.77	0	0	0	0	60	40	0	0	0	0
Sugar	1.20	7	42	0	51	0	0	0.8	0	0	0
Sand	2.30	0	0	0	53	0	47	0	0	0	0
Water	1.00	11	0	0	89	0	0	0	0	0	0
Wood	0.62	6	47	0	44	0	3	1.1	0	0	0
Petroleum	0.87	14	86	0	0	0	0	0	0	0	0
Cement	2.30	0	0	0	35	0	65	0	0	0	0
PVC	1.32	5	38	0	0	57	0	0	0	1.5	11.5
Polyethylene	0.94	14	86	0	0	0	0	0	0	0	0
Fiberglass	1.70	3	46	0	35	0	16	3	1.3	0	0
Sea Water	1.02	10	0	0	88	1.2	.8	0	0	0	.03
Explosives											
PETN	1.76	2.4	19	17.7	60.8	0	0	0.3	0.3	0	0
TNT	1.63	2.2	37	18.5	42.3	0	0	0.9	0.4	0	0
Dynamite	1.18	4.2	14.8	18.5	62.4	0	0	0.2	0.3	0	0
C4	1.65	3.6	21.9	34.4	40.1	0	0	0.6	0.9	0	0
Narcotics											
Heroin Hydrochloride	-0.87	6.0	62.1	3.5	19.7	8.7	0	3.2	0.2	0.1	1.5
Cocaine Hydrochloride	-0.87	6.5	60.1	4.1	18.8	10.4	0	3.2	0.2	0.2	1.6
Heroin	-0.87	6.3	68.2	3.8	21.7	0	0	3.2	0.2	0	0
Cocaine	-0.87	6.9	67.3	4.6	21.1	0	0	3.2	0.2	0	0

ประเภทที่ 2 ก๊าซ เป็นวัตถุที่อยู่ในสภาพก๊าซอัดภายใต้ความดัน ซึ่งอาจมีคุณสมบัติอื่นที่เป็นอันตรายด้วย เช่น ไวไฟ เป็นก๊าซพิษ เป็นก๊าซที่ช่วยในการเผาไหม้ หรือเป็นก๊าซที่มีฤทธิ์กัดกร่อนบางชนิดเป็นก๊าซเฉื่อย บางชนิดสามารถทำให้ผู้ที่สูดดมเกิดอาการง่วงซึม และบางชนิดเมื่อเผาไหม้จะทำให้เกิดพิษสูงขึ้น ก๊าซทุกชนิดที่หนักกว่าอากาศ หากปล่อยให้สะสมอยู่ในบริเวณที่ต่ำจะมีอันตรายสูง เช่น ก๊าซหุงต้มหรือก๊าซแอลพีจี คาร์บอนไดออกไซด์ อาร์กอน คลอรีน เป็นต้น

ประเภทที่ 3 ของเหลวไวไฟ ของเหลวที่มีจุดวาบไฟไม่มากกว่า 93 องศาเซลเซียส ตัวอย่างเช่น อะซีโตน น้ำมันเชื้อเพลิง ทินเนอร์ เป็นต้น

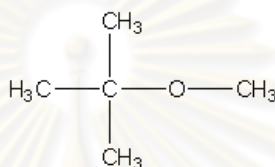
- อะซีโตน หรือไดเมทิลคีโตนหรือไดเมทิล ฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นของเหลว ไม่มีสี มีกลิ่นคล้ายมินต์ ใช้เป็นสารทำละลาย ในกระบวนการต่างๆ ของเรซิน แลกเกอร์ ไซซีฟุ้ง ส่วนผสมของหมึกพิมพ์ พลาสติก วาร์นิช

- ปิโตรเลียม คือ สารพวกไฮโดรคาร์บอนและอาจพบสารอินทรีย์ที่มีธาตุ O N หรือ S เป็นองค์ประกอบอยู่บ้างเล็กน้อย เกิดจากการตายทับถมของซากพืชซากสัตว์นับเป็นเวลานับล้าน ๆ ปี ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปิโตรเลียม คือ น้ำมันเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเบนซินเลขออกเทน 91 มีสมบัติการเผาไหม้เช่นเดียวกับเชื้อเพลิงที่มีไอโซออกเทนร้อยละ 91 และเฮปเทนร้อยละ 9 โดยมวล



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเบนซิน ไอโซออกเทน และเฮกเซน

ปัจจุบันการเพิ่มเลขออกเทน ทำได้โดยเติมสารเมทิลเทอร์เชียรีบิวทิลอีเทอร์ (MTBE)



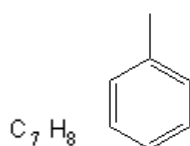
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ MTBE

น้ำมันดีเซลจะมีตัวเลขที่บอกคุณภาพ เรียกว่า เลขซีเทน (Cetane number) ซึ่งเป็นตัวเลขที่แสดงเป็นร้อยละโดยมวลของซีเทน ในของผสมระหว่างซีเทน ($\text{C}_{16}\text{H}_{34}$) และแอลฟาเมทิลแนฟทาซีน ($\text{C}_{11}\text{H}_{10}$) ซึ่งเกิดการเผาไหม้หมด เช่น น้ำมันดีเซลที่มีเลขซีเทน 100 คือ น้ำมันดีเซลที่มีสมบัติการเผาไหม้หมดของซีเทน 100% โดยมวล น้ำมันดีเซลที่มีเลขซีเทน 0 คือ น้ำมันดีเซลที่มีสมบัติการเผาไหม้หมดของแอลฟาเมทิลแนฟทาซีน 100% โดยมวล น้ำมันดีเซลที่มีเลขซีเทน 80 คือ น้ำมันดีเซลที่มีสมบัติการเผาไหม้เช่นเดียวกับซีเทนร้อยละ 80 โดยมวล



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของซีเทน และแอลฟาเมทิลแนฟทาซีน

- ทินเนอร์ เป็นสารระเหยมีลักษณะเป็นของเหลว มีกลิ่น มีคุณสมบัติระเหยได้ง่ายและเร็ว ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก คือ Toluene



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ Toluene

- เครื่องดื่ม เช่น สุรา ประเภทเหล้า วิสกี้ บรั่นดี คือการมีส่วนประกอบของแอลกอฮอล์ที่ได้จากการหมักน้ำตาลจากเมล็ดธัญชาติ หรือผลองุ่น หรือผลไม้อื่น มาทำการกลั่นแยกเอาแอลกอฮอล์ออกมาอีกครั้งหนึ่ง จึงเรียกสุราประเภทนี้ว่า สุรากลั่น, ไวน์ ส่วนมากเกิดจากการหมักน้ำตาลที่ได้จากผลองุ่น ที่เรียกว่า ไวน์องุ่นหรือการหมักน้ำตาลที่ได้จากน้ำผลไม้ ที่เรียกว่า ไวน์ผลไม้ ไวน์จะประกอบด้วย น้ำ น้ำตาล โปรตีน และเกลือแร่ต่างๆ, เบียร์ เกิดจากการหมักน้ำตาลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงแป้งของเมล็ดธัญพืช หรือ ธัญชาติประเภทข้าวมอลต์ ดังนั้น เบียร์จึงเป็นเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับไวน์ และเหล้าวิสกี้ หรือบรั่นดี เบียร์ประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีปริมาณมากกว่า 90% ที่เหลือจะเป็นแอลกอฮอล์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำตาล คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และเกลือแร่ต่างๆ

ประเภทที่ 4 ของแข็งไวไฟ สารที่มีความเสี่ยงต่อการลุกไหม้ได้เอง และสารที่สัมผัสกับน้ำแล้วทำให้เกิดก๊าซไวไฟ เช่น สารระเบิดที่ถูกลดความไวต่อการเกิดระเบิด ไม่ขีดไฟ ผงกำมะถัน Carbon black Calcium เป็นต้น

ประเภทที่ 5 สารออกซิไดซ์และสารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์

- สารออกซิไดซ์ (Oxidizing Substances) หมายถึง ของแข็ง ของเหลวที่ตัวของสารเองไม่ติดไฟ แต่ให้ออกซิเจนซึ่งช่วยให้วัตถุอื่นเกิดการลุกไหม้และอาจจะก่อให้เกิดไฟ เมื่อสัมผัสกับสารที่ลุกไหม้และเกิดการระเบิดอย่างรุนแรง ตัวอย่าง ของเหลวเช่น ไนเตรทเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น

- สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ (Organic Peroxides) หมายถึง ของแข็งหรือของเหลวที่มีโครงสร้างออกซิเจนสองอะตอม -O-O- และอาจถือได้ว่าเป็นอนุพันธ์ของ Hydrogen peroxide ช่วยในการเผาสารที่ลุกไหม้ หรือทำปฏิกิริยากับสารอื่นแล้วก่อให้เกิดอันตรายได้ หรือเมื่อได้รับความร้อนหรือลุกไหม้แล้วภาชนะบรรจุสารนี้อาจระเบิดได้ ตัวอย่างเช่น Methyl Ethyl Ketone Peroxide, Cyclohexanone Peroxide เป็นต้น

ประเภทที่ 6 สารพิษและสารติดเชื้อ

- สารพิษ (Toxic Substances) หมายถึง ของแข็งหรือของเหลวที่สามารถทำให้เสียชีวิตหรือบาดเจ็บ รุนแรงต่อสุขภาพของคน หากกลืน สูดดมหรือหายใจรับสารนี้เข้าไป หรือเมื่อสารนี้ได้รับความร้อนหรือลุกไหม้จะปล่อยก๊าซพิษ ตัวอย่างเช่น โซเดียมไซยาไนด์ กลุ่มสารกำจัดแมลงศัตรูพืชและสัตว์ เป็นต้น

- สารติดเชื้อ (Infectious Substances) หมายถึง สารที่มีเชื้อโรคปนเปื้อนหรือสารที่มีตัวอย่าง การตรวจสอบของพยาธิ สภาพปนเปื้อนที่เป็นสาเหตุของ การเกิดโรคในสัตว์และคน ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียเพาะเชื้อ เป็นต้น

ประเภทที่ 7 วัตถุแก๊สถังสี หมายถึง วัสดุที่สามารถแผ่รังสีที่มองไม่เห็นอย่างต่อเนื่องมากกว่า 0.002 ไมโครคูรีต่อกรัม ตัวอย่างเช่น โมนาไซด์ ยูเรเนียม โคบอลต์-60 เป็นต้น

ประเภทที่ 8 วัตถุกัดกร่อน หมายถึง ของแข็งหรือของเหลวซึ่งโดยปฏิกิริยาเคมีมีฤทธิ์กัดกร่อนทำความเสียหาย ต่อเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตอย่างรุนแรงหรือ ทำลายสินค้า/ยานพาหนะที่ทำการขนส่ง เมื่อเกิดการรั่วไหลของสารไอระเหยของ สารประเภทนี้ บางชนิดก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อจมูกและตา ตัวอย่างเช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

ประเภทที่ 9 วัสดุอันตรายเบ็ดเตล็ด หมายถึง สารหรือสิ่งของที่ในขณะที่ขนส่งเป็นสารอันตรายซึ่งไม่จัดอยู่ในประเภทที่ 1 ถึงประเภทที่ 8 ตัวอย่างเช่น ปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรต เป็นต้น และให้รวมถึงสารที่ต้อง ควบคุมให้มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ในสภาพของเหลว หรือมีอุณหภูมิ ไม่ต่ำกว่า 240 องศาเซลเซียสในสภาพของแข็งในระหว่างการขนส่ง เช่น ปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรต Asbestos เป็นต้น

2.1.1 เคมีการติดไฟ [1]

การติดไฟต้องมีองค์ประกอบร่วมกัน 3 องค์ประกอบ ซึ่งองค์ประกอบทั้งสามนี้ต้องมีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจึงสามารถเกิดการติดไฟขึ้นได้ ถ้าขาดองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งก็ไม่สามารถทำให้ไฟเกิดขึ้นได้ องค์ประกอบทั้ง 3 คือ

2.1.1.1 เชื้อเพลิง แบ่งออกเป็นเชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ ดังนี้

- เชื้อเพลิงแข็ง ได้แก่ ไม้ กระดาษ พลาสติก ยาง และผ้า เป็นต้น
- เชื้อเพลิงเหลว ได้แก่ สารไฮโดรคาร์บอนบางชนิด สารที่มีองค์ประกอบของสารผสมที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีด้วยตัวมันเอง ทำให้เกิดก๊าซที่มีความดันและความร้อนอย่างรวดเร็ว ของเหลวไวไฟ สารออกซิไดซ์และสารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ เป็นต้น

- เชื้อเพลิงแก๊ส ได้แก่ แก๊ส LPG เป็นต้น

2.1.1.2 ออกซิเจน ทำหน้าที่ล้อมรอบเชื้อเพลิง ทำให้เชื้อเพลิงเกิดการติดไฟได้ดีขึ้น

2.1.1.3 ความร้อน คือ อุณหภูมิที่สูงพอที่จะก่อให้เกิดการเผาไหม้ ซึ่งเชื้อเพลิง แต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิในการลุกไหม้ที่ต่างกัน

การไหม้เกิดขึ้นเนื่องจากเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจนอยู่ในรูปของไอระเหย หรือฝอยละเอียดของของเหลวฟุ้งกระจายในอัตราส่วนที่เหมาะสม เมื่อผสมกับออกซิเจนซึ่งปนอยู่ในอากาศ และได้รับความร้อนจากการลุกไหม้ขึ้นทันที การลุกไหม้จะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยความร้อนจากต้นกำเนิดการลุกไหม้อีก เนื่องจากการลุกไหม้แล้วจะเกิดความร้อน

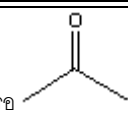

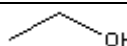

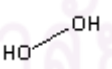
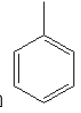
อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเพลิงที่เกิดขึ้นจะลุกไหม้ไปจนกว่าเชื้อเพลิงจะหมด หรือจนกว่าจะขาดความสมดุลในองค์ประกอบที่ทำให้เกิดไฟ

เมื่อเกิดเพลิงไหม้ขึ้นสิ่งที่ตามมา คือ หมอกควันและพลังงานความร้อน หรือรังสีความร้อน ซึ่งมีผลต่อการขยายขอบเขตของเพลิงให้ลุกลามออกไปในบริเวณใกล้เคียงได้ ถ้าหากในบริเวณนั้นมีเชื้อเพลิงอยู่ และขยายขอบเขตของเพลิงได้

2.1.2 จุดวาบไฟ (Flash point) [1]

เป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญตัวหนึ่งที่ใช้ในการหาอันตรายจากการติดไฟ และการระเบิดของของเหลว ซึ่งเป็นคุณสมบัติต่ำสุดที่สามารถทำให้ของเหลวกลายเป็นไอเพียงพอต่อการเริ่มต้นลุกไหม้ขึ้นเมื่อมีแหล่งจุดติดไฟ

ตารางที่ 2.2 ลักษณะเฉพาะความสามารถในการติดไฟของของเหลวบางชนิด [1]

Common name	Flash point (°C)	Density (g/cm ³)	สูตรโครงสร้าง	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์
Acetone	-20	0.79	C_3H_6O หรือ 	น้ำยาล้างเล็บ, น้ำมันเชื้อเพลิง
Benzene	-43	0.87	C_6H_6 หรือ 	น้ำมันเชื้อเพลิง
Diesel	62	0.80		
Ethanol	12.8	0.78	C_2H_6O หรือ 	สุรา, น้ำมันเชื้อเพลิง
Hexane	-23	0.66	C_6H_{14} หรือ 	สี, กาว, น้ำมัน เฟอร์นิเจอร์
Hydrogen peroxide	0.0	1.44	H_2O_2 หรือ 	สารฆ่าเชื้อบาดแผล หรือ ฆ่าเชื้อโรค, น้ำยาขัดผม, น้ำยาบ้วนปาก
Methanol	11.1	0.79	CH_3OH	กาว, สีย้อม, น้ำยาลอกสี
Toluene	6	0.87	C_7H_8 หรือ 	น้ำหมึก, กาว, ทินเนอร์, เครื่องสำอางบางชนิด

2.2 ของเหลว [6]

คือ สสารที่มีสถานะที่อยู่ระหว่างของแข็งกับก๊าซ โดยของเหลวประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่เป็นอะตอมหรือโมเลกุลกระจายอย่างสุ่ม ของเหลวโดยทั่วไปมีการกระจายแบบเหมือนกันทุกทิศทาง ของเหลวมีลักษณะเป็นของไหลคุณสมบัติเป็นของไหล มีปริมาตรที่แน่นอน ไม่อาจเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เนื่องจากสถานะของสสารซึ่งมีอนุภาคอยู่ใกล้มากกว่าในสถานะก๊าซ แต่ยังมีช่องว่างระหว่างอนุภาค จึงเคลื่อนที่ไปมาได้ในระยะใกล้ๆ มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค

2.2.1 สมบัติของเหลว

2.2.1.1 ความตึงผิว (Surface tension)

โมเลกุลของของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้ตลอดเวลา ไม่หยุดนิ่ง แต่การเคลื่อนที่ของแต่ละโมเลกุลก็จะขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดและอิทธิพลของโมเลกุลอื่น ๆ ที่อยู่ข้างเคียงด้วย โมเลกุลที่อยู่ภายในของของเหลวจะได้รับแรงดึงดูดจากโมเลกุลอื่น ๆ ที่อยู่ล้อมรอบเท่ากันทุกทิศทาง ในขณะที่โมเลกุลที่อยู่บริเวณผิวหน้าของของเหลว จะได้รับแรงดึงดูดเฉพาะโมเลกุลที่อยู่ด้านข้างและด้านล่างเท่านั้น โมเลกุลที่อยู่บริเวณผิวหน้าจึงมีเสถียรภาพน้อยกว่าโมเลกุลที่อยู่ภายใน ดังนั้นการลดพื้นที่ผิวของของเหลวจึงเป็นการลดจำนวนโมเลกุลที่บริเวณผิว ซึ่งจะทำให้ของเหลวมีเสถียรภาพมากขึ้น พบว่าความตึงผิวของของเหลวจะแปรผันตรงกับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลว ยิ่งแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมาก ความตึงผิวของของเหลวยิ่งมีค่าเพิ่มสูงขึ้น หรือกล่าวอีกนัยคือ ยิ่งของเหลวมีความหนืดมาก ความตึงผิวก็ยิ่งมีค่าสูงมาก

ตารางที่ 2.3 ค่าความตึงผิวของของเหลวบางชนิด

ชนิดของของเหลว	ความตึงผิว (N/m)
Benzene*	0.029
Blood (37°C)	0.058
Glycerin*	0.063
Mercury*	0.47
Water*	0.073
Water (100°C)	0.059

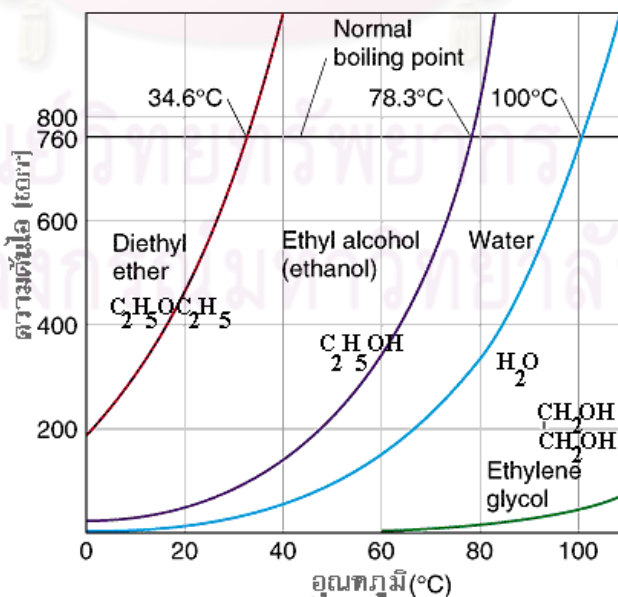
* ความตึงผิวของของเหลวที่อุณหภูมิ 20 °C

2.2.1.2 การระเหย (Evaporation)

คือ การที่โมเลกุลของของเหลวไม่ได้อยู่นิ่งกับที่ แต่จะเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ก็แสดงว่าโมเลกุลของของเหลวแต่ละโมเลกุลจะต้องมีความเร็ว หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือ โมเลกุลของเหลวมีพลังงานจลน์ เมื่อโมเลกุลมีการเคลื่อนที่ ย่อมจะทำให้เกิดการชนกันของโมเลกุลที่อยู่ในของเหลว สิ่งที่เกิดขึ้น คือ ทำให้โมเลกุลของของเหลวมีการแลกเปลี่ยนพลังงานซึ่งกันและกัน หลังจากที่เกิดการชนของโมเลกุล อาจจะทำให้โมเลกุลหนึ่งมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น และอีกโมเลกุลหนึ่งอาจจะมีพลังงานจลน์ลดลง ซึ่งในที่สุดจะทำให้แต่ละโมเลกุลของของเหลวมีพลังงานจลน์แตกต่างกัน ซึ่งอาจจะสูงกว่าหรือต่ำกว่าพลังงานจลน์เฉลี่ย โมเลกุลที่มีพลังงานจลน์สูง ก็จะเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล และในที่สุดก็จะหลุดออกไปจากผิวหน้าของของเหลว และกลายเป็นแก๊ส เรียกกระบวนการการเปลี่ยนแปลงจากสถานะของเหลวไปเป็นแก๊สว่าการระเหย

2.2.1.3 ความดันไอ (Vapor pressure)

โดยทั่วไปเมื่อของเหลวหนึ่งๆ บรรจุอยู่ใน ภาชนะเปิด เมื่อทิ้งไว้ระยะหนึ่ง จะเห็นว่า ในที่สุดของเหลวนี้จะระเหยไปหมด ไม่มีของเหลวเหลืออยู่ แต่ถ้านำของเหลวไปบรรจุในภาชนะปิด โดยวางภาชนะนี้ไว้ในที่สภาวะเดียวกัน มีอุณหภูมิ และความดันเดียวกัน เมื่อทิ้งไว้ในระยะเวลาหนึ่งจะพบว่า มีไอซึ่งเกิดจากการระเหยปรากฏอยู่เหนือของเหลวนี้ ไอของโมเลกุลของเหลวที่อยู่เหนือของเหลวนี้จะวิ่งชนกับผนังของภาชนะ จึงทำให้เกิดความดัน เราเรียกว่า ความดันไอ (Vapor pressure)



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความดันไอของของเหลวชนิดต่างๆ

ของเหลวแต่ละชนิดจะมีความดันไอไม่เท่ากัน โดยทั่วไป พบว่าถ้าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้อย ความดันไอของของเหลวจะมีค่าสูง เพราะโมเลกุลของของเหลวสามารถระเหยได้ง่าย ในทางตรงกันข้าม ถ้าของเหลวมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมาก ความดันไอของของเหลวก็จะมีค่าน้อย ถ้าพิจารณาความสัมพันธ์ในแง่ของความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความดันไอ ผลที่ได้ ก็จะมีแนวโน้มเหมือนกับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล พบว่า ถ้าความหนืดของของเหลวมาก ความดันไอจะต่ำ และในทางกลับกัน ถ้าความหนืดของของเหลวน้อยความดันไอจะสูง

2.2.2 สารละลาย

เป็นของผสมเอกพันธ์ขององค์ประกอบสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดขึ้นไป รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันแบบ Homogeneous system ซึ่งปริมาณองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงได้ โดยองค์ประกอบที่มีปริมาณมากกว่า คือ ตัวทำละลาย และองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีปริมาณน้อยกว่า คือ ตัวถูกละลาย ซึ่งของเหลวที่เป็นสารละลายแบ่งได้ ดังนี้

2.2.2.1 แก๊สในของเหลว คือ การที่แก๊สละลายอยู่ในของเหลว เช่น น้ำโซดา (มีองค์ประกอบของ $\text{CO}_2(\text{g})$ และน้ำ) น้ำอัดลม และเบียร์ เป็นต้น

2.2.2.2 ของเหลวในของเหลว คือ การที่ของเหลวกระจายตัวในของเหลว เช่น น้ำผลไม้ เอทานอล ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) ที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น เครื่องดื่มพวกแอลกอฮอล์ เป็นต้น

2.2.2.3 ของแข็งในของเหลว คือ การที่ของแข็งที่ละลายอยู่ในของเหลว เช่น ของแข็งมีขนาดอนุภาค $<1\text{m}\mu$ เช่น น้ำตาลละลายในน้ำ

2.3 เทคนิคการตรวจสอบของเหลวต้องสงสัยก่อนขึ้นเครื่องบิน

หลักการตรวจสอบ มี 2 ประเภท คือ

1. ตรวจสอบของเหลวต้องสงสัย โดยใช้เทคนิคนิวเคลียร์ตามชนิดของรังสี ได้แก่

- นิวตรอน
- โฟตอน (รังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมา)

2. ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของ เช่น การเคลื่อนตัว, กลิ่น หรือไอที่ระเหยจากของเหลว เป็นต้น โดยตรวจสอบด้วยการดม/ดมด้วยคนที่ชำนาญการ หรือสุนัขดมกลิ่น เนื่องจากสุนัขมีประสาทสัมผัสด้านการรับกลิ่นได้ดีกว่ามนุษย์มาก แต่ข้อจำกัดของสุนัข คือ ไม่สามารถปฏิบัติงานได้อย่างต่อเนื่อง จึงมีการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกลิ่น แต่ความสามารถในการแยกกลิ่นไม่ดีเท่ากับสุนัข

นอกจากนี้ในสถานที่ปฏิบัติงานจะเต็มไปด้วยกลิ่น หรือไอที่ระเหยจากของเหลว อาจทำให้สูดดมได้

การตรวจสอบที่ได้กล่าวมาข้างต้นต้องอาศัย ผู้ที่มีระเบียบวินัยในการทำงาน และผ่านการฝึกฝนจนมีความเชี่ยวชาญในการตรวจสอบ

2.3.1 การตรวจวัดโดยวิธีทางนิวเคลียร์

เป็นการตรวจวัดโดยอาศัยการส่งผ่านรังสีนิวตรอน หรือ รังสีแกมมา และเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีแกมมา แล้วตรวจวัดรังสีทุติยภูมิที่เกิดจากการกระตุ้น วิธีนี้จะทำให้ได้ลักษณะเฉพาะของวัตถุเหลวที่ติดไฟเมื่อได้รับความร้อนหรือวัตถุเหลวที่เป็นองค์ประกอบของระเบิดได้ เนื่องจากวัตถุเหลวที่ติดไฟเมื่อได้รับความร้อนส่วนมากจะมีหมู่ไฮดรอกซิล หรือเป็นสารที่มีจุดวาบไฟต่ำ และมีความหนาแน่นต่ำทำให้สามารถบ่งชี้ได้ ส่วนวัตถุเหลวที่เป็นองค์ประกอบของระเบิดจะมีองค์ประกอบของไนโตรเจน (สารเชื่อม) และออกซิเจน (สารออกซิไดซ์) ค่อนข้างสูง ทำให้มีความหนาแน่นสูง

สำหรับองค์ประกอบของของเหลวมีองค์ประกอบ และความหนาแน่นแตกต่างกัน ดังนั้นการนำใช้ข้อมูลด้านองค์ประกอบรวมกับความหนาแน่นจึงมีประโยชน์มากในการจำแนกของเหลวต้องสงสัย เทคนิคนิวเคลียร์ที่ใช้ตรวจของเหลวต้องสงสัยแบ่งได้ตามชนิดของรังสี ดังนี้

2.3.1.1 นิวตรอน [7]

อาศัยการวัดรังสีแกมมาเฉพาะตัวที่ปลดปล่อยออกมา เมื่ออะตอมถูกกระตุ้นด้วยนิวตรอน โดยเทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนแบ่งได้ตามพลังงานของนิวตรอน ดังนี้

ก) นิวตรอนช้า (Slow neutron) หมายถึง นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ช่วงระหว่าง 0 – 1 keV โดยแบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้ ดังนี้

- โคลด์นิวตรอน (Cold neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่าเทอร์มอลนิวตรอน เกิดจากการกระเจิงติดต่อกันของเทอร์มอลนิวตรอน มักมีพลังงานน้อยกว่า 0.01 eV

- เทอร์มอลนิวตรอน (Thermal neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานเฉลี่ยเท่ากับพลังงานความร้อนเฉลี่ยของอะตอมตัวกลาง โดยที่พลังงานและความเร็วสัมพันธ์ของนิวตรอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางที่วิ่งผ่าน พลังงานของเทอร์มอลนิวตรอนที่พบมากที่สุด ณ 20°C คือ 0.0253 eV

- เอพิเทอร์มอลนิวตรอน (Epithermal neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าเทอร์มอลนิวตรอนในช่วงระหว่าง 0.3 – 10 keV

- เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานในช่วงระหว่าง 1 – 100 eV นิวเคลียสของธาตุหลายชนิดมีการจับนิวตรอนในช่วงพลังงานนี้ได้ดี เรียกว่า “Resonance absorption”

ข) อินเตอร์มีเดียตนิวตรอน (Intermediate neutron) หมายถึง นิวตรอนที่มีพลังงานในช่วงระหว่าง 0.1–0.5 MeV

ค) นิวตรอนเร็ว (Fast neutron) หมายถึง นิวตรอนที่มีพลังงานตั้งแต่ 0.5 MeV ขึ้นไป วิธีการส่งผ่านรังสีนิวตรอน แล้วตรวจวัดรังสีแกมมาเฉพาะตัวที่เกิดจากการปลดปล่อยออกมาเมื่ออะตอมตัวกลางถูกกระตุ้นด้วยนิวตรอน ทำให้เกิดอันตรกิริยาที่นิวเคลียสของอะตอมตัวกลางรวมตัวกับนิวตรอน วิเคราะห์ได้ทั้งหมด 3 เทคนิค คือ

- เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน ($n, n'\gamma$) เมื่อนิวตรอนเร็วซึ่งมีพลังงานสูงจากต้นกำเนิดรังสีวิ่งเข้าชนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแล้วนิวตรอนทำอันตรกิริยา โดยถูกจับเข้าไปรวมตัวเป็นนิวเคลียสรวม จากนั้นนิวตรอนตัวใหม่ถูกปล่อยออกมาในทิศทางที่กระเจิงออกไปจากเดิมพร้อมกับมีพลังงานลดลง

เนื่องจากได้ถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับนิวเคลียส ทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้นจึงปลดปล่อยรังสีพรอมต์แกมมาออกมาเพื่อกลับเข้าสู่สภาวะปกติ นิวเคลียสอาจจะถูกกระตุ้นยกระดับพลังงานขึ้นไปอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นได้หลายระดับขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนเร็วที่มีพลังงานสูงมากพอ

- เทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n, γ) อาศัยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน แต่รังสีแกมมาที่ตรวจวัดมาจากแหล่งกำเนิดต่างกัน นั่นคือ รังสีพรอมต์แกมมาเกิดจากนิวเคลียสรวมที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นและพยายามลดพลังงานลงจึงปลดปล่อยรังสีพรอมต์แกมมาออกมา ส่วนรังสีแกมมาที่ถูกวัดในเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันเกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสผลผลิตที่เกิดขึ้นใหม่ ทำให้เวลาที่วัดรังสีแกมมาทั้งสองต่างกัน รังสีพรอมต์แกมมาวัดในขณะที่อาบรังสีและรังสีแกมมาที่ได้จากการสลายตัวสามารถวัดได้หลังการอาบรังสีแล้ว

- เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน เป็นเทคนิคที่ไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี เกิดได้เนื่องจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n, γ) เมื่อนิวตรอนพลังงานต่ำหรือเทอร์โมนิวตรอนวิ่งเข้ามาทำอันตรกิริยาถูกจับรวมตัวกลายเป็นนิวเคลียสใหม่ ถ้าเป็นนิวเคลียสกัมมันตรังสีนิวเคลียสนั้นจะสลายตัวให้นิวเคลียสผลผลิต โดยการปลดปล่อยอนุภาค และรังสีดีเลย์แกมมา โดยที่รังสีดีเลย์แกมมานี้มีพลังงานและครึ่งชีวิตเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละนิวไคลด์นั้น

2.3.1.2 รังสีแกมมา

อาศัยหลักการตรวจวัดรังสีกระเจิง หรือ รังสีคอมป์ตัน ซึ่งเป็นอันตรกิริยาหลักที่เกิดในวัสดุ โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาจะขึ้นกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงขึ้นกับความหนาแน่นของตัวกลาง วิธีนี้จะนำไปใช้ในการสร้างแผนภาพประเภทของเหลว และสามารถเป็นข้อมูลจำแนกของเหลวต้องสงสัยออกจากของเหลวทั่วไปได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังไม่สามารถบ่งบอกได้ถึงลักษณะเฉพาะของของเหลวได้

เมื่อรังสีแกมมาเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางมีโอกาสเกิดกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งจาก 3 กระบวนการ คือ 1) เกิดการดูดกลืนพลังงานที่รังสีแกมมาถ่ายเทให้กับตัวกลาง 2) เกิดรังสีกระเจิงในขณะที่เกิดอันตรกิริยา และ 3) การเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ ถ้ารังสีแกมมาถูกดูดกลืนหรือเกิดรังสีกระเจิง ทำให้ปริมาณรังสีที่ยุติภูมิน้อยกว่ารังสีปฐมภูมิ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการลดทอนรังสี (Attenuation) เมื่อความหนาแน่นของตัวกลางมากขึ้น ทำให้รังสีที่ยุติภูมิลดลงมาก เนื่องจากมีระยะทางให้เกิดการดูดกลืนรังสีแกมมาหรือเกิดรังสีกระเจิง ซึ่งอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้โดยสมการของแลมเบิร์ต (Lambert's Law) ดังนี้

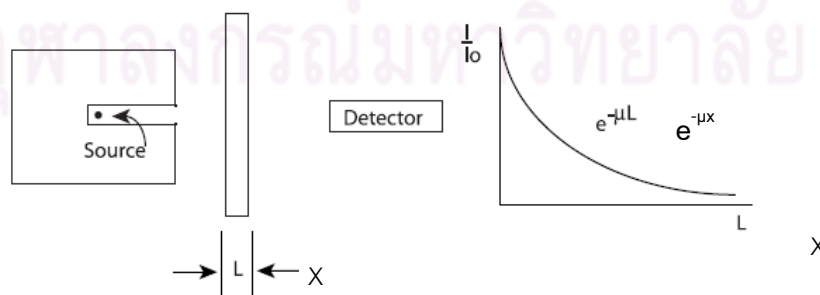
$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \dots(2.1)$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มรังสีแกมมาเมื่อไม่มีตัวกลางขวางกั้น

I คือ ความเข้มรังสีแกมมาเมื่อมีตัวกลางขวางกั้น

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (linear attenuation coefficient) เมื่อรังสีแกมมาเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง มีหน่วยเป็น cm^{-1}

x คือ ความหนาแน่นของตัวกลางที่รังสีแกมมาเคลื่อนที่ผ่าน ในหน่วย cm



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนของความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านออกมาจากตัวกลาง

เนื่องจาก $e^{-\mu x}$ เป็นจำนวนที่แสดงถึงจำนวนรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านออกมาจากตัวกลาง ถ้า $e^{-\mu x}$ มีค่ามาก ปริมาณรังสีแกมมาที่วิ่งผ่านออกมาจากตัวกลางจะมีจำนวนมาก แต่ถ้า $e^{-\mu x}$ มีค่าน้อย ปริมาณรังสีแกมมาที่วิ่งออกจากตัวกลางจะมีจำนวนน้อย ดังนั้น $e^{-\mu x}$ จึงเป็นตัวเลขที่แสดงถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 5 อันตรกิริยา ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$e^{-\mu x} = (e^{-w x}) \cdot (e^{-\tau x}) \cdot (e^{-\sigma x}) \cdot (e^{-K x}) \cdot (e^{-\pi x}) \quad \dots(2.2)$$

และจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$e^{-\mu x} = e^{-(w + \tau + \sigma + K + \pi) x} \quad \dots(2.3)$$

เมื่อ w คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนของการกระเจิงแบบโคเฮเรนต์ (Coherent scattering)

τ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนของกระบวนการโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)

σ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนของการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering)

K คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนของกระบวนการเพร์โปรดักชัน (Pair production)

π คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนของกระบวนการโฟโตดิสอินทิเกรชัน (Photodisintegration)

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu = w + \tau + \sigma + K + \pi \quad \dots(2.4)$$

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น μ เป็นผลรวมของสัมประสิทธิ์การลดทอนของกระบวนการต่าง ๆ ดังนั้นจึงเรียก μ ว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมเชิงเส้น (Total linear attenuation coefficient) ในกรณีที่ไมคิดกระบวนการเพร์โปรดักชัน (Pair production) และกระบวนการโฟโตดิสอินทิเกรชัน (Photodisintegration) เนื่องจากมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก ทำให้ประมาณค่า μ ได้ดังนี้

$$\mu = w + \tau + \sigma \quad \dots(2.5)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนนี้ จะแปรผันกับพลังงานของรังสีและเลขอะตอมของตัวกลาง นอกจากนี้ยังขึ้นกับความหนาและความหนาแน่นของตัวกลางอีกด้วย ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้สัมประสิทธิ์การลดทอนไม่มีค่าขึ้นกับความหนาแน่น จึงหารสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นด้วยความหนาแน่นของตัวกลาง และเรียกว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนมวล (Mass attenuation coefficient) ดังสมการ

$$\mu_m = \mu/\rho \quad \dots(2.6)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง

μ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนมวล มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม

ส่วน x_m คือ ความหนา มีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเซนติเมตร

รังสีแกมมาเป็นรังสีชนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ไม่มีประจุ ไม่มีมวล ไม่เบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้า มีความเร็วเท่ากับแสง พลังงานของรังสีแกมมาจะมีความสัมพันธ์กับความถี่ ดังต่อไปนี้

$$E = h\nu \quad \dots(2.7)$$

$$E = \frac{1.240 \times 10^{-6}}{\lambda} \quad \dots(2.8)$$

เมื่อ E คือ พลังงานของรังสีแกมมา (eV)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant = 4.135×10^{-15} eV.s)

ν คือ ความถี่ของคลื่น (s^{-1})

λ คือ ความยาวคลื่น (m)

เมื่อนิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนแปลง หลังจากการสลายตัวหรือเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ นิวเคลียสจะอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) การลดระดับพลังงานลงมาอยู่ในสถานะพื้น (ground state) จะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในรูปรังสีแกมมา ถ้าให้สถานะเริ่มต้น นิวเคลียสมีระดับพลังงาน E_i (สถานะกระตุ้น) และ E_f เป็นสถานะสุดท้าย ถ้าสถานะสุดท้ายเป็นสถานะพื้น การลดระดับพลังงานจะสิ้นสุด แต่ถ้าสถานะสุดท้ายยังเป็นสถานะกระตุ้นอยู่ การลดระดับพลังงานก็จะเกิดขึ้นอีกจนกระทั่งเป็นสถานะพื้น พลังงานของรังสีแกมมาที่ถูก

ปลดปล่อยออกมาจะเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของสถานะเริ่มต้นกับพลังงานของสถานะสุดท้าย ดังนี้

$$h\nu = \Delta E = E_i - E_f \quad \dots(2.9)$$

ก) อันตรกิริยาของรังสีแกมมา

- ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (photoelectric effect) [12], [13], [14]

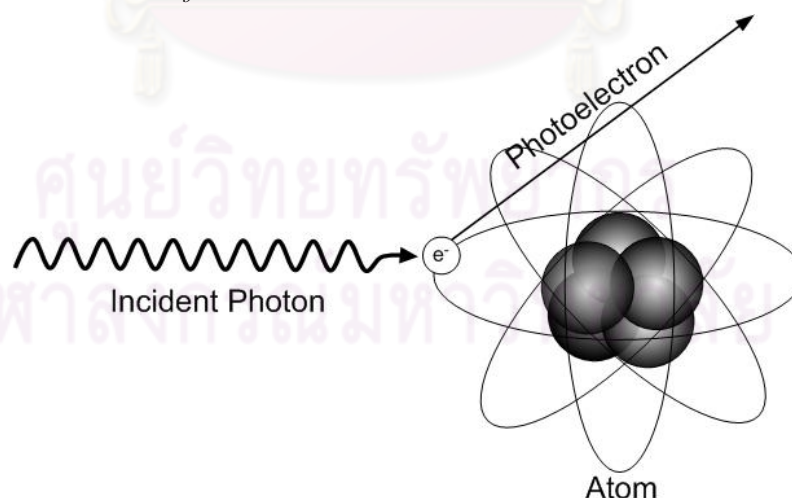
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ เกิดจากรังสีแกมมาพลังงานต่ำแต่มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร เมื่อรังสีแกมมาเคลื่อนเข้าชนอะตอมจะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากรังสีแกมมาหายไปและอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนอยู่ภายในวงโคจรด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวจำนวนหนึ่ง ดังนั้น พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจึงมีค่าเท่ากับพลังงานของรังสีแกมมาลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน ดังสมการ (2.10)

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad \dots(2.10)$$

เมื่อ E_e คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอม

E_γ คือ พลังงานของรังสีแกมมาที่เคลื่อนเข้าชนอะตอม

E_b คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.11 แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ [9]

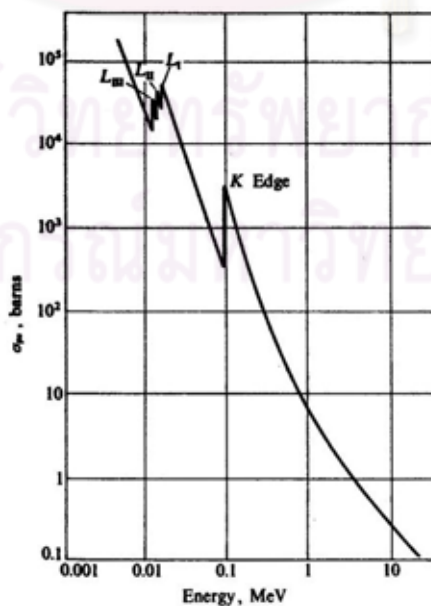
อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) กระบวนการนี้โฟตอนจะเสียพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนแล้วโฟโตอิเล็กตรอนจะเป็นตัวทำให้เกิดการ

แตกตัวเมื่อเคลื่อนผ่านอะตอมของสาร และเมื่อมีโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมจะทำให้เกิดช่องว่างในอะตอม อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอกจะเลื่อนเข้ามาแทนตำแหน่งเดิมที่ว่างพร้อมกับปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะ (characteristic x-ray) ออกมา และอาจจะชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในรอบนอกแล้วทำให้เกิดไอเจริอิเล็กตรอน (Auger electron) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะกับพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในวงโคจร เมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูงโฟโตอิเล็กตรอนจะถูกผลักไปในทิศทางข้างหน้าในแนวเดียวกับทิศของรังสีแกมมา ส่วนรังสีแกมมาที่มาตกกระทบมีพลังงานต่ำมักจะส่งอิเล็กตรอนในแนวทำมุมฉาก

ถ้าให้ σ_{pe} เป็นค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟกต์ต่ออะตอมของตัวกลาง เมื่อรังสีแกมมาความเข้ม I (γ - photon / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) ตกกระทบเป้าซึ่งมีความหนาแน่นของอะตอมเท่ากับ N อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราการเกิดโฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟกต์ต่อปริมาตรของเป้า, F_{pe} ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) จะแสดงได้ดังนี้

$$F_{pe} = I N \sigma_{pe} \quad \dots(2.11)$$

ค่า σ_{pe} ขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของตัวกลางและพลังงานของรังสีแกมมา σ_{pe} จะมีค่าลดลงเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานสูงขึ้น และ σ_{pe} จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมของตัวกลาง รูปที่ 2.12 แสดงค่า σ_{pe} ของตะกั่วที่พลังงานของรังสีแกมมาต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อพลังงานต่ำกว่า 1 MeV ค่า σ_{pe} ของตะกั่วมีค่าสูงและจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานลดลง นั่นก็หมายความว่ารังสีแกมมาพลังงานต่ำจะทะลุผ่านตะกั่วได้ยาก



รูปที่ 2.12 ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟกต์ของตะกั่วที่พลังงานต่างกัน [8]

จากรูปที่ 2.12 ค่า σ_{pe} มีความไม่ต่อเนื่อง (discontinuities) ในบางพลังงานแสดงว่ามี การเปลี่ยนแปลงค่า σ_{pe} อย่างรวดเร็ว บริเวณรอยหยักนี้เรียกว่า “แอบซอร์พชันเอจ” (absorption edge) ซึ่งบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่ค่าพลังงานของรังสีแกมมามีค่าเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมพอดี เนื่องจากอิเล็กตรอนในอะตอมแบ่งเป็นชั้น ระดับพลังงานต่าง ๆ แต่ละชั้น จึงมีค่าแอบซอร์พชันเอจ ต่างกันคือ K_{edge} , L_{edge} , M_{edge} เป็นต้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นระดับพลังงานต่ำ (ใกล้นิวเคลียส) จะหลุดออกมาจากอะตอมได้ยากกว่า อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอกที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ดังนั้นค่าสันขอบการดูดกลืนของชั้น K จึงมี พลังงานสูงกว่าชั้น L สำหรับชั้น K มีพลังงานค่าเดียวเนื่องจากในชั้น K มีระดับพลังงานเดียว ส่วน ชั้น L จะมีระดับพลังงานย่อย 3 พลังงานจึงมียอดสันขอบการดูดกลืน 3 ค่าพลังงานที่ใกล้เคียงกัน

K_{edge} เป็นค่าพลังงานที่สอดคล้องกับพลังงานยึดเหนี่ยว หรือ พลังงานที่ทำให้เกิดการ ไอออไนซ์ (ionization energy) ของอิเล็กตรอนในวงโคจร K เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานเท่ากับค่า พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร K (K- electron) พอดี อะตอมจะมีค่า σ_{pe} สูงขึ้นขึ้น เพราะฉะนั้นอะตอมจะดูดกลืนพลังงานของรังสีแกมมาพลังงานเท่ากับ K_{edge} ได้ดีกว่าในช่วง พลังงานใกล้เคียงกันในกรณีที่รังสีแกมมามีพลังงานต่ำกว่า K_{edge} ก็ไม่สามารถที่จะทำให้เกิด ไฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์กับอิเล็กตรอนในวงโคจร K (K-electron) ได้

ส่วน L_I , L_{II} และ L_{III} ก็ทำนองเดียวกันคือ เป็นจุดที่สอดคล้องกับพลังงานยึดเหนี่ยว หรือ พลังงานที่ทำให้เกิดการไอออไนซ์ (ionization energy) ของอิเล็กตรอนในวงโคจร L (L – electron) ในวงโคจรย่อย (sub shell) ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ช่วงที่รังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า K_{edge} ขึ้นไป ค่า σ_{pe} จะลดลงตามค่าพลังงาน ดังนี้

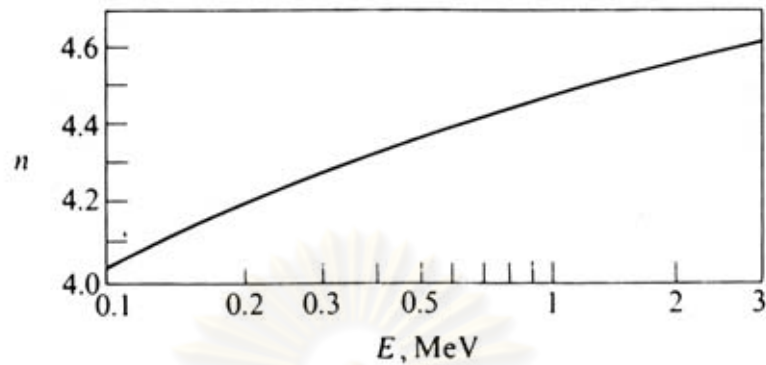
$$\sigma_{pe} \approx E^{-3} \quad \dots(2.12)$$

นอกจากนี้ค่า σ_{pe} ยังขึ้นอยู่กับค่า Z ของตัวกลางอย่างมาก คือ

$$\sigma_{pe} \approx Z^n \quad \dots(2.13)$$

ค่า n จะแปรผันตามพลังงานของรังสีแกมมาแต่จะมีค่าประมาณ 4 กราฟของค่า n แสดงดังรูปที่ 2.13 ดังนั้นอันตรกิริยาแบบไฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์จึงเกิดกับธาตุที่เลขอะตอมสูง เช่น ตะกั่ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับรังสีแกมมาพลังงานต่ำโอกาสของการเกิดปรากฏการณ์ไฟโต อิเล็กทริกเอฟเฟคต์จะมีค่าประมาณดังสมการ

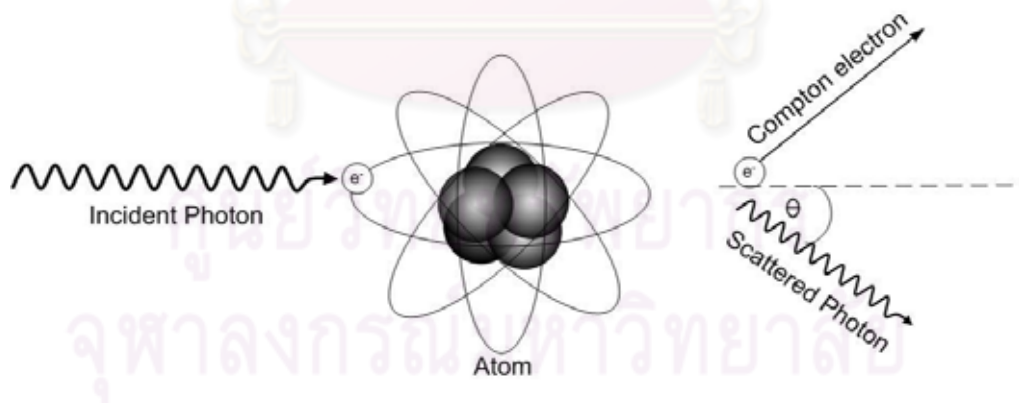
$$\sigma_{pe} \approx \frac{Z^n}{E^3} \times const \quad \dots(2.14)$$



รูปที่ 2.13 ค่า n ที่พลังงานรังสีแกมมาต่างๆ [8]

- ปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตัน(The Compton Effect) [11], [12],[13], [14]

ปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์ หรือการกระเจิงแบบคอมป์ตัน เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาเข้าชนกับอะตอมของตัวกลาง แล้วถ่ายเทพลังงานเพียงบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา ส่วนรังสีแกมมาจะกระเจิงทำมุม θ กับแนวการเคลื่อนที่เดิม โดยมีพลังงานลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตัน [10]

กำหนดให้รังสีแกมมาที่มีพลังงาน $h\nu$ และโมเมนตัม $h\nu/c$ ตกกระทบกับอิเล็กตรอนที่มีมวลนิ่ง (m_0) รังสีแกมมาที่กระเจิงออกมาเป็นมุม θ มีพลังงาน $h\nu'$ และโมเมนตัม $h\nu'/c$ (ν' น้อยกว่า ν) จึงทำให้ความยาวคลื่น λ' มากกว่า λ พลังงานของรังสีแกมมาที่ลดลงไป ($h\nu - h\nu'$) กลายเป็นพลังงานจลน์ E_k ของอิเล็กตรอนที่ถอยกลับออกมา ถ้ามวลของอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เท่ากับ m จะได้

$$\begin{aligned} E_k &= mc^2 - m_0c^2 \\ &= m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \end{aligned} \quad \dots(2.15)$$

เมื่อ $\beta = v/c$ โดย v เป็นความเร็วของอิเล็กตรอนถอยกลับและโมเมนตัมของอิเล็กตรอน (p_e) จะมีค่า

$$\begin{aligned} p_e &= m\beta c \\ &= \frac{m_0\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \end{aligned} \quad \dots(2.16)$$

เมื่อแยกโมเมนตัมออกเป็น 2 แนวแกน x และ y และใช้หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานทำให้ได้

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos\theta + \frac{m_0\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \cos\phi \quad \dots(2.17)$$

$$0 = \frac{h\nu'}{c} \sin\theta - \frac{m_0\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin\phi \quad \dots(2.18)$$

$$\begin{aligned} h\nu &= h\nu' + E_k \\ &= h\nu' + m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \end{aligned} \quad \dots(2.19)$$

เมื่อให้ค่าของมุม ϕ คงที่ จะหาค่าของสมการได้

$$p_e c \cos \phi = h\nu - h\nu' \cos \theta \quad \dots(2.20)$$

$$p_e c \sin \phi = h\nu' \sin \theta \quad \dots(2.21)$$

ยกกำลังสองทั้งสองสมการแล้วนำมารวมกันได้

$$p_e^2 c^2 = (h\nu)^2 - 2(h\nu)(h\nu') \cos \theta + (h\nu')^2 \quad \dots(2.22)$$

พลังงานรวมของอิเล็กตรอนมีค่า

$$E_e = E_k + m_0 c^2 \quad \dots(2.23)$$

และจากทฤษฎีสัมพันธภาพได้

$$E_e = \sqrt{(p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4)} \quad \dots(2.24)$$

แทนค่าลงในสมการ (2.23) ได้

$$p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4 = (E_k + m_0 c^2)^2 \quad \dots(2.25)$$

และแทนค่า $E_k = h\nu - h\nu'$ จากสมการ (2.18) ได้

$$p_e^2 c^2 = (h\nu - h\nu')^2 + 2(h\nu - h\nu') m_0 c^2 \quad \dots(2.26)$$

สมการ (2.22) และสมการ (2.26) เท่ากันดังนั้น

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \quad \dots(2.27)$$

เมื่อ $\alpha = \frac{h\nu}{m_0c^2}$ ซึ่งเท่ากับพลังงานของโฟตอนที่ตกลงบนอิเล็กตรอนที่อยู่ในหน่วยของมวลนิ่งของอิเล็กตรอน

ทำนองเดียวกัน สามารถหาค่าของพลังงานจลน์ได้

$$\begin{aligned} E_k &= h\nu - h\nu' \\ &= h\nu \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right) \\ &= h\nu \left(\frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right) \end{aligned} \quad \dots(2.28)$$

$$\cos\theta = 1 - \frac{2}{(1 + \alpha)^2 \tan^2\phi + 1} \quad \dots(2.29)$$

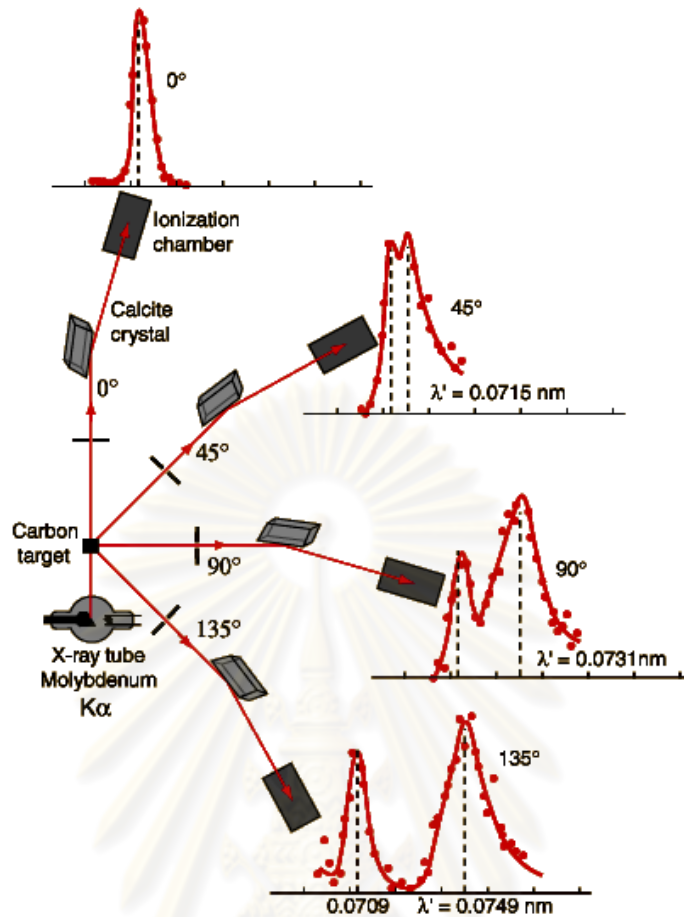
จากสมการ (2.27) เมื่อเปลี่ยนความถี่คลื่นให้อยู่ในรูปความยาวคลื่นจะได้เป็น

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta) \quad \dots(2.30)$$

โฟตอนที่กระเจิงออกมา มีความยาวคลื่นมากกว่าโฟตอนที่ตกกระทบกับอิเล็กตรอน และความยาวคลื่นที่เปลี่ยน ($\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$) ไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ตกกระทบอิเล็กตรอน แต่จะขึ้นอยู่กับมุมกระเจิง θ และมวลของอิเล็กตรอน m_0 สำหรับค่า h/m_0c มีหน่วยเป็นความยาวเรียกว่า ความยาวคลื่นคอมป์ตัน (Compton wavelength) เมื่อแทนค่า m_0 , h และ c แล้วจะได้ $h/m_0c = 0.02426 \text{ \AA}$ ดังนั้นจากสมการ (2.30) ได้

$$\Delta\lambda = 0.02426(1 - \cos\theta) \text{ \AA} \quad \dots(2.31)$$

ที่ $\theta = 0^\circ$ ความยาวคลื่นของรังสีแกมมาไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนที่มุม $\theta = 90^\circ$ ความยาวคลื่นของรังสีแกมมาเปลี่ยนไป $\Delta\lambda = 0.02426 \text{ \AA}$ และที่มุม $\theta = 180^\circ$ ทำให้ได้ $\Delta\lambda = 2 \times 0.02426 = 0.4852 \text{ \AA}$ ผลการทดลองหาค่าความเข้มรังสีแกมมาที่กระเจิงเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นนั้นแสดงดังรูปที่ 2.15 จากรูปจะเห็นว่าความเข้มของรังสีและความยาวคลื่นของรังสีเพิ่มขึ้นตามค่ามุมกระเจิง



รูปที่ 2.15 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่เกิดจากการกระเจิงคอมป์ตันโดยมีความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมกระเจิงต่างๆ [15]

สามารถคำนวณหาค่าพลังงาน $h\nu$ ของโฟตอนที่ตกกระทบกับอิเล็กตรอนได้ โดยใช้สมการ (2.28) จากการวัดพลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งมีค่าสูงสุดที่มุมกระเจิง 180° จาก

$$E_k = h\nu \left(\frac{2\alpha}{1+2\alpha} \right)$$

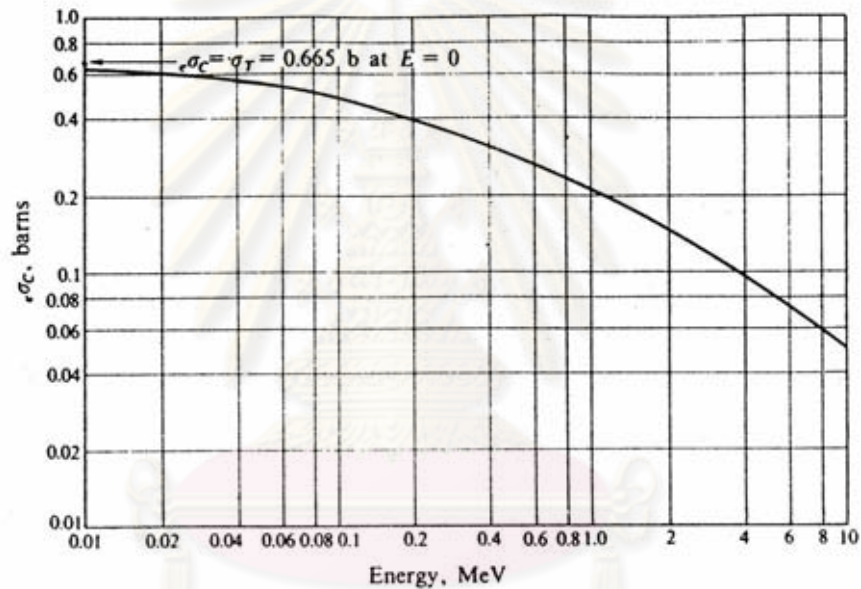
$$= h\nu \left(\frac{2h\nu/m_0c^2}{1+2h\nu/m_0c^2} \right) \quad \dots(2.32)$$

เนื่องจากปรากฏการณ์คอมป์ตันเกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมา กับอิเล็กตรอนในอะตอม ดังนั้นค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันต่ออะตอม (σ_c) จึงเป็นค่าภาคตัดขวางการกระเจิงคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอน (${}_e\sigma_c$) ซึ่ง

$${}_e\sigma_c = {}_e\sigma_s + {}_e\sigma_a \quad \dots(2.33)$$

เมื่อ ${}_e\sigma_s$ คือ ภาคตัดขวางคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอนในการกระเจิงพลังงานของรังสีแกมมา

${}_e\sigma_a$ คือ ภาคตัดขวางคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอนในการดูดกลืนพลังงานโดยอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.16 ค่า ${}_e\sigma_c$ ที่พลังงานของรังสีแกมมาต่าง ๆ [8]

ค่าภาคตัดขวางนี้จะลดลงเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นจากที่สูงสุด 0.655 บาร์น (barns) ที่พลังงาน 0 MeV ซึ่งเรียกว่าภาคตัดขวางทอมสัน (Thomson cross section, σ_T) ดังรูปที่ 2.16 จะเห็นว่าที่รังสีแกมมามีพลังงานสูงขึ้นจน $E_\gamma \gg E_0$ ค่า ${}_e\sigma_c$ จะแปรผกผันตรงตามค่า E^{-1} และค่าภาคตัดขวางการกระเจิงคอมป์ตันต่ออะตอม (σ_c) จะขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของตัวดูดกลืนดังสมการ

$$\sigma_c = Z_e \sigma_c \quad \dots(2.34)$$

$${}_e \sigma_c \propto E_\gamma^{-1} \quad \dots(2.35)$$

ดังนั้นโอกาสของการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์ จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมของตัวดูดกลืน และจะเกิดได้ดีกับสารที่มีเลขอะตอม, Z สูง และจะลดลงเมื่อพลังงานของรังสีแกมมา, E_γ สูงขึ้นจึงประมาณโอกาสของการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันได้ว่า

$$\sigma_c \approx \frac{Z}{E_\gamma} \quad \dots(2.36)$$

ค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิง ที่กระเจิงเป็นมุมต่าง ๆ สามารถคำนวณหาได้จากสูตรของ Klein-Nishina ดังสมการ

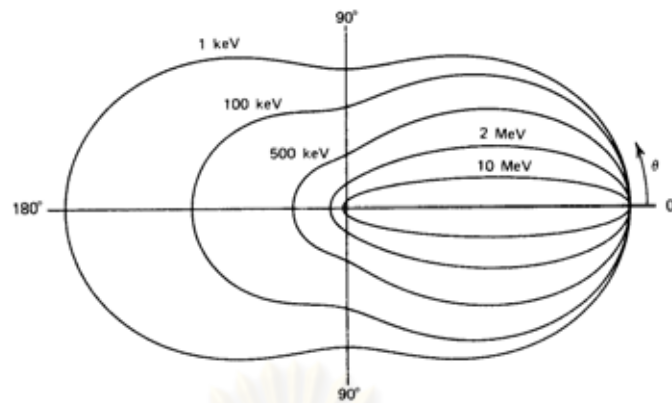
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \right)^2 \left(\frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right) \left(1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta)[1 + \alpha(1 - \cos \theta)]} \right) \quad \dots(2.37)$$

เมื่อ r_0 คือ classical electron radius = 2.82×10^{-13} cm

$$\alpha = \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} = \frac{662 \text{ keV}}{511 \text{ keV}} = 1.29 \quad \text{for } {}^{137}\text{Cs}$$

θ คือ มุมกระเจิง

ค่าภาคตัดขวางของการกระเจิงจากโฟตอนระดับพลังงานต่าง ๆ แสดงดังรูป 2.17 จากสมการของ Klein-Nishina เมื่อพลังงานของรังสีตกกระทบยิ่งสูงมากการกระเจิงส่วนใหญ่จะเป็นการกระเจิงไปข้างหน้า (forward scattering) และที่พลังงานต่ำ ๆ $E \approx E_0$ จะลดรูปเหลือเป็น $(1 + \cos^2 \theta)$ ซึ่งจะสมมาตรที่มุม 90°



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางของ Klein-Nishina ที่กระเจิงเป็นมุม θ จากรังสีแกมมาที่แต่ละพลังงาน [5]

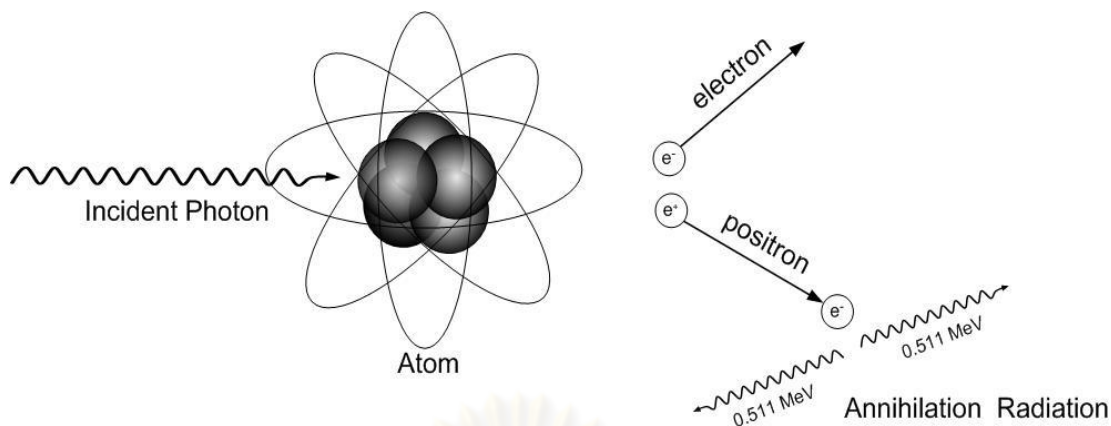
ข้อแตกต่างระหว่างปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์และปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์ ก็คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์เป็นการดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดที่ตกกระทบกับอิเล็กตรอน แต่ในกระบวนการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์นั้นเพียงแต่ลดขนาดพลังงานเดิมของโฟตอน เกิดโฟตอนใหม่ที่มีพลังงานลดลงและอิเล็กตรอนที่มีพลังงานค่าหนึ่ง หลังจากการเกิดคอมป์ตันแล้วโฟตอนที่มีพลังงานต่ำลงก็อาจจะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนตัวอื่นทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ได้อีก

- แพร่โพดำกั้น (pair production) [8] , [10]

ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อ รังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงกว่า 1.022 MeV เคลื่อนผ่านสนามไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในอะตอม รังสีแกมมาจะหายไปกลายเป็นอิเล็กตรอนและโพสิตรอนวิ่งไปในทิศทางตรงกันข้าม อันตรกิริยานี้เป็นตัวอย่งการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นมวล ดังนั้นพลังงานเริ่มต้นจะต้องมีค่าอย่างน้อยเท่ากับมวลนิ่ง (rest mass energy) ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน นั่นคือ 1.022 MeV

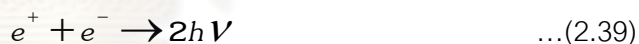
$$h\nu = e^+ + e^- + 2E_k \quad \dots(2.38)$$

เมื่อ $2E_k$ คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน



รูปที่ 2.18 แผนภาพการเกิดเพริโพรดักชัน [10]

ถ้าพลังงานของรังสีแกมมาทำให้เกิดอันตรกิริยาแบบโพรดักชันมีค่ามากกว่า 1.02 MeV พลังงานที่เหลือจะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน โพสิตรอนที่เกิดก็จะสามารถไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนทำให้เกิดโฟตอน 2 ตัวที่มีพลังงานแต่ละ 0.511 MeV เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม เรียกว่า ปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชัน (annihilation) ได้เป็นตัวอย่งการเปลี่ยนแปลงมวลไปเป็นพลังงาน ตรงข้ามกับอันตรกิริยาแบบเพริโพรดักชัน

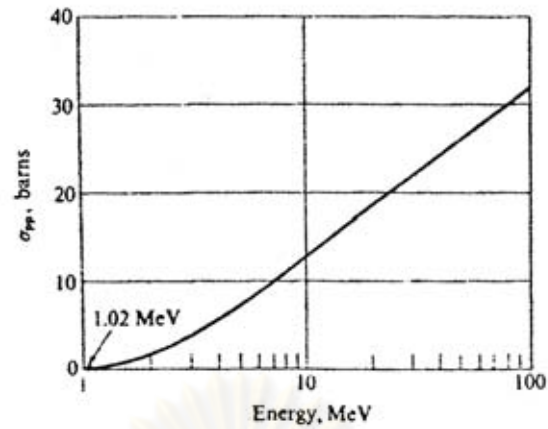


ค่าภาคตัดขวางของการเกิดเพริโพรดักชัน (σ_{pp}) จะเพิ่มขึ้นตามพลังงานที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งแสดงค่าภาคตัดขวางของการเกิดเพริโพรดักชันของตะกั่ว และจะเกิดได้มากเมื่ออะตอมของตัวกลางมีค่าสูงขึ้น

$$\sigma_{pp} \cong Z^2$$

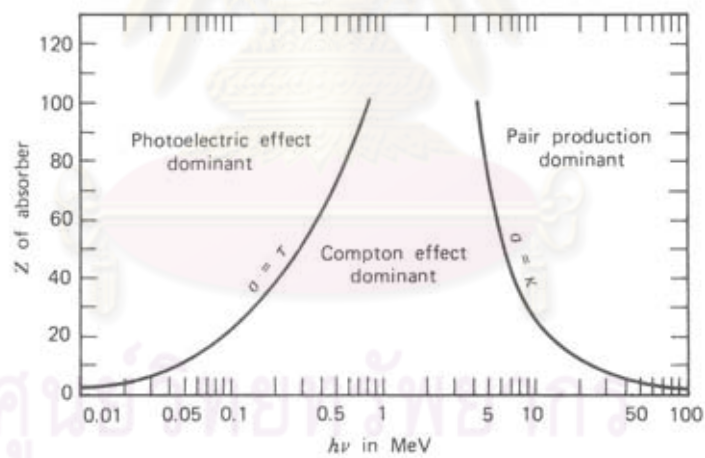
โอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยาแบบเพริโพรดักชันจะประมาณได้ว่า

$$\sigma_{pp} \cong Z^2 (E-1.02)$$



รูปที่ 2.19 ภาคตัดขวางของการเกิดแพริโฟรดักชัน (σ_{pp}) ของตะกั่วที่พลังงานต่าง ๆ [8]

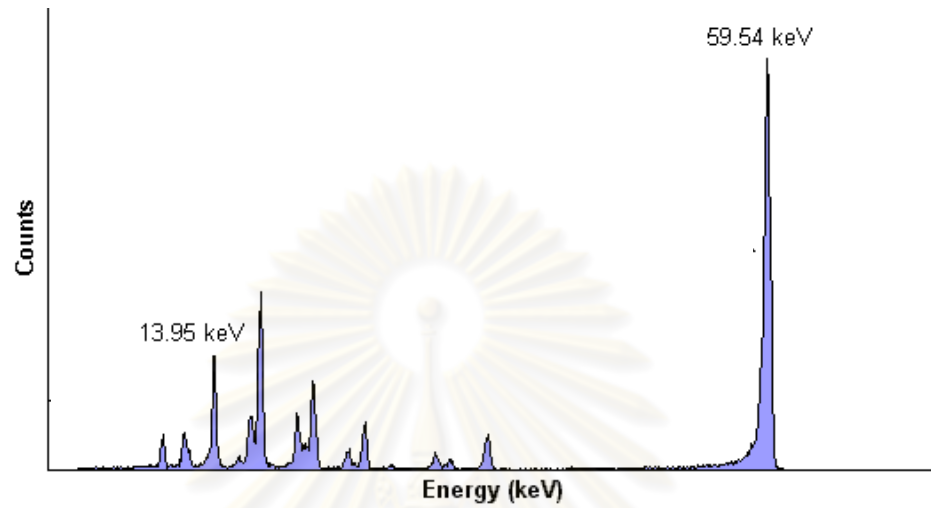
เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ในการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 แบบ จะพบว่าโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาแต่ละแบบนี้จะมีความสัมพันธ์กับพลังงานของรังสีแกมมา และตัวกลางที่รังสีแกมมาไปทำอันตรกิริยาดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่พลังงานสัมพันธ์กับเลขอะตอมของตัวกลาง [10]

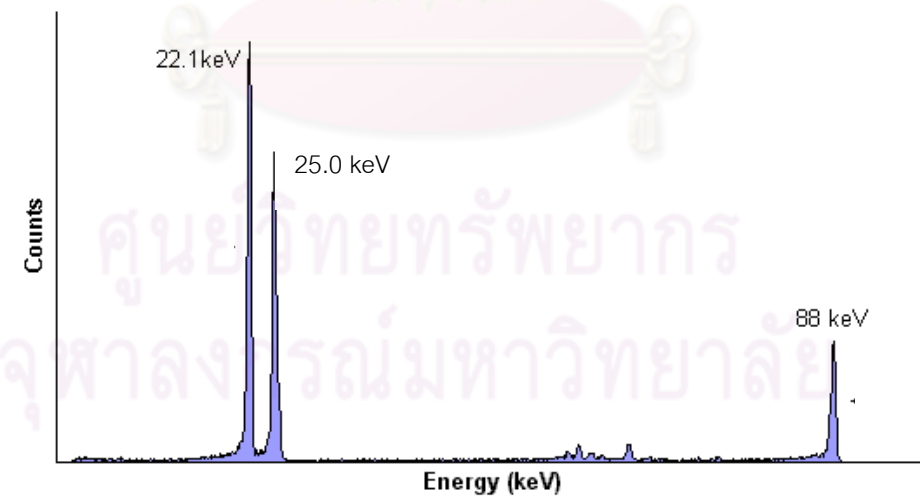
2.4 ต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ในงานวิจัย [10]

2.4.1 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจาก Am-241

2.4.2 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cd-109



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจาก Cd-109

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติไอโซโทปกัมมันตรังสีบางชนิดที่ให้รังสีแกมมาพลังงานต่ำ

Source	Half-life	Photon Energies (keV)	Specific Activity (GBq/g)	Type of Decay
Am-241	433 y	12-22	127	L x-rays of Np ($\approx 40\%$)
		59.5		γ decay (35.9%)
		26		γ decay (2.5%)
Cd-109	462 d	20-26	9.6×10^4	K x-rays of Ag (96.2%)
	40 s	88		γ decay of ^{109m}Ag (3.8%)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติไอโซโทปกัมมันตรังสีบางชนิดที่เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน [10]

Source	Energy	Half-life	Specific Activity	Working Life	Neutron yield
241Am/Be	MeV range	433 y	110 Bq/g (AmO) ₂	15 y	6×10^4 (n/s)/GBq
	≈ 4.5 (ave.)				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 ของเหลวตัวอย่างที่ใช้ทำการวิจัย ได้แก่ น้ำมันเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเบนซิน 91, น้ำมันเบนซิน 95, น้ำมันดีเซล, น้ำมันไบโอดีเซล 5, น้ำมันพีช, ทินเนอร์, เหล้าขาว 40 ดีกรี, สารละลายเอทานอล (C_2H_6O) ที่มีความเข้มข้น 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, และ 100 % โดยปริมาตร, น้ำดื่ม, สารละลายน้ำตาลทรายขาว โดยมีสัดส่วนของน้ำตาลทรายขาว คือ 1.25, 2.5, 5, 10, 15, 20 และ 25 % โดยน้ำหนัก, กลีเซอริน, สารละลายน้ำเกลือ โดยมีสัดส่วนของเกลือ คือ 1.25, 2.5, 5, 7.5, 10 และ 12.5 % โดยน้ำหนัก, นมไขมันสูง, ครีมบำรุงผิว, สบู่เหลว, แชมพูสระผม, ครีมนวดผม, ยาสีฟัน, น้ำยาเช็ดเครื่องสำอาง, สารละลายปุ๋ยยูเรียสูตร 46-0-0 (Urea fertilizer) $[(NH)_2CO]$ โดยมีสัดส่วนของไนโตรเจน คือ 5, 10, 15, 20 และ 25 % โดยน้ำหนัก, น้ำยาล้าง Contact lens, สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่มีความเข้มข้น 5 และ 18 % โดยปริมาตร

3.1.2 วัสดุบรรจุของเหลวตัวอย่าง คือ ขวดน้ำดื่มพลาสติกใสทรงกระบอกที่มีปริมาตร ความจุ 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร

3.1.3 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ความแรงแรังสี 97.26 มิลลิวูรี่ (ณ ม.ค.53)

3.1.4 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cd-109 ความแรงแรังสี 0.44 มิลลิวูรี่ (ณ ม.ค.53)

3.1.5 ต้นกำเนิดนิวตรอน Am-241/Be ความแรงแรังสี 90 มิลลิวูรี่

3.1.6 หัววัดรังสีแกมมา ชนิด Cadmium telluride (CdTe) ขนาด 5 มม. x 5 มม.

3.1.7 หัววัดนิวตรอนชนิด Li loaded Glass Scintillator รุ่น NE905

3.1.8 อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าศักดาสูงและภาคขยาย/ปรับแต่งสัญญาณ สำหรับหัววัดรังสี ชนิด CdTe รุ่น PX2-T

3.1.9 อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าศักดาสูง (High voltage power supply : HVPS) ยี่ห้อ ORTEC รุ่น 456 สำหรับหัววัดนิวตรอน

3.1.10 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) ยี่ห้อ CANBERRA รุ่น 2022 สำหรับหัววัด นิวตรอน

3.1.11 ตะกั่วบังคับลำรังสีแกมมา และกำบังรังสีแกมมา



รูปที่ 3.1 วัสดุบรรจุของเหลวตัวอย่างที่มีปริมาตรความจุ 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 หัววัดรังสีแกมมา CdTe

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 หัววัดนิวตรอนชนิด Li loaded glass scintillator รุ่น NE905



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าศักดาสูงและภาคขยาย/ปรับแต่งสัญญาณ สำหรับหัววัดรังสี CdTe



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าศักดาสูง ORTEC รุ่น 456 สำหรับหัววัดนิวตรอน

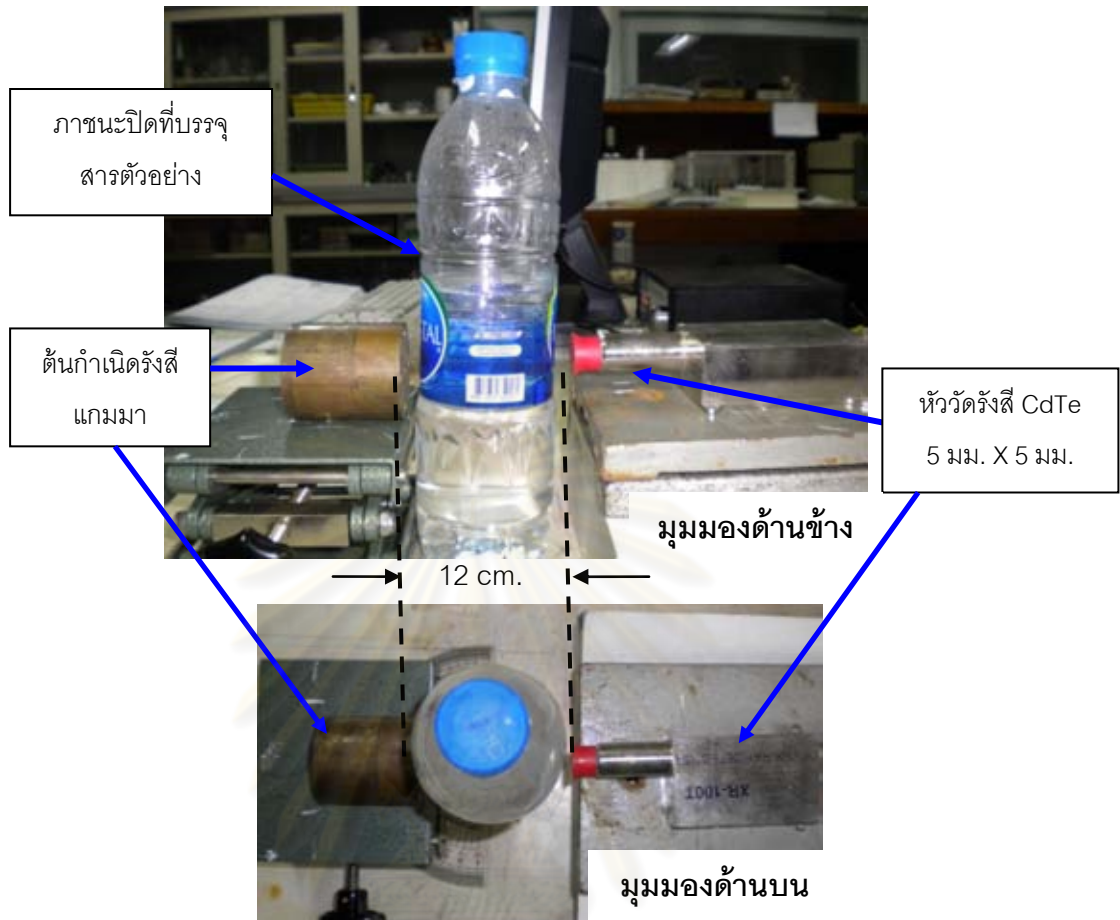


รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ CANBERRA รุ่น 2022 สำหรับหัววัดนิวตรอน



รูปที่ 3.7 ตะกั่วบังค้ำลำรังสีแกมมา และกำบังรังสีแกมมา

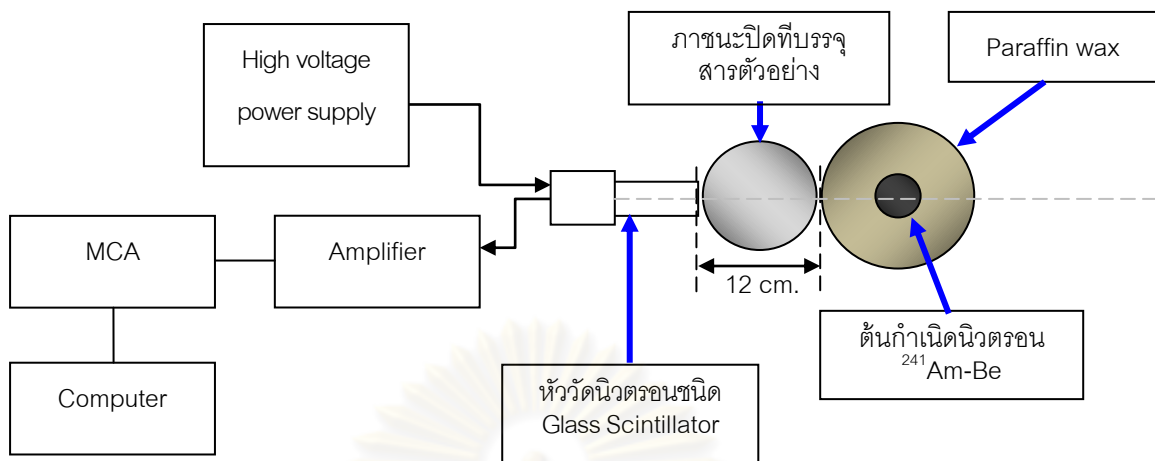
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 ลักษณะการจัดระบบวัดรังสีแกมมาทะลุผ่าน



รูปที่ 3.9 ลักษณะการจัดระบบวัดรังสีแกมมากระเจิงกลับของรังสีแกมมาที่มุมกระเจิง 135 องศา ที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ 3.10 ลักษณะการจัดระบบวัดนิวตรอน

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เทคนิคนิวเคลียร์ เช่น การส่งผ่านรังสีแกมมา, เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีแกมมา และเทคนิคนิวตรอน ในการจำแนกประเภทของเหลวตัวอย่างที่บรรจุในภาชนะปิด โดยจะทำการศึกษาผลของรังสีที่กระเจิงจากของเหลวประเภทต่าง ๆ ซึ่งบรรจุในภาชนะปิด และปัจจัยต่างๆ ที่มีผลในการกระเจิงของรังสีเข้าสู่หัววัด เพื่อตรวจแยกประเภทของเหลว สำหรับเป็นแนวทางในการนำไปใช้งานด้านการรักษาความปลอดภัยตามสนามบิน

3.2.1 การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนของความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านตัวกลาง เป็นไปตามสมการของแลมเบิร์ต (Lambert's Law) ดังนี้

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มรังสีแกมมาเมื่อไม่มีตัวกลางขวางกั้น

I คือ ความเข้มรังสีแกมมาเมื่อมีตัวกลางขวางกั้น

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient) เมื่อรังสีแกมมาเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง มีหน่วยเป็น cm^{-1}

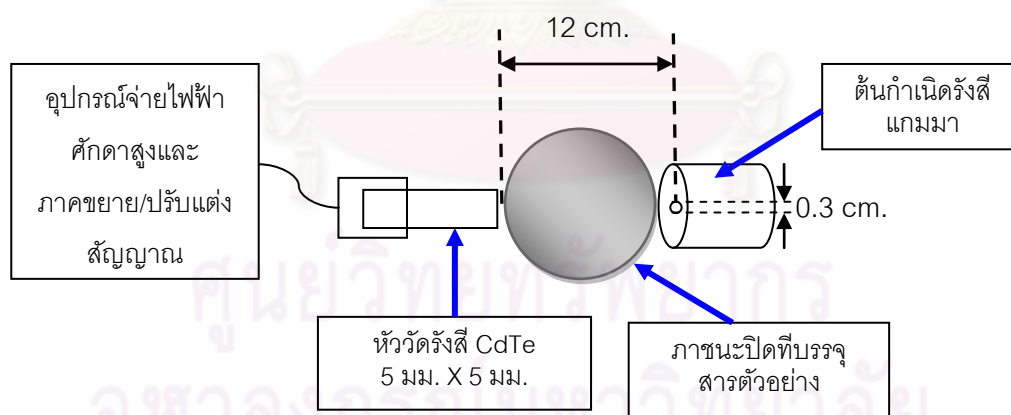
x คือ ความหนาของตัวกลางที่รังสีแกมมาเคลื่อนที่ผ่าน ในหน่วย cm

3.2.2 การออกแบบระบบวัดรังสีแกมมา

ในการทำวิจัยนี้ได้ออกแบบวิธีการทดลองโดยการนำของเหลวที่จะทดสอบบรรจุลงในขวดพลาสติกใสทรงกระบอกขนาดความจุ 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร นำมาตรวจวัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด CdTe ขนาด 5 มม. x 5 มม. โดยมีต้นกำเนิดที่บรรจุอยู่ภายในตะกั่วทรงกระบอกที่มีช่องบังคับลำรังสีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 มิลลิเมตร เพื่อวัดรังสีแกมมาที่ทะลุผ่าน และการกระเจิงกลับของรังสีแกมมาจากของเหลวตัวอย่างที่บรรจุในภาชนะปิด ดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 ตามลำดับ

3.2.2.1 การจำแนกประเภทของของเหลวโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา

ก) การศึกษาผลของพลังงานของต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ทำการตรวจวัดที่มีผลต่อรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิด โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ความแรงรังสี 97.26 มิลลิลิวรี่ และต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cd-109 ความแรงรังสี 0.44 มิลลิลิวรี่ ได้ทำการจัดระบบวัดดังรูปที่ 3.11 ซึ่งระยะระหว่างระบบวัดกับต้นกำเนิดรังสี คือ 12.0 เซนติเมตร โดยในแต่ละครั้งได้ทำการวัดรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิด



รูปที่ 3.11 แผนภาพการจัดระบบวัดในการทดสอบโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา

ข) การศึกษาผลของปริมาตรของของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิดในการตรวจวัดที่มีผลต่อรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิด โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ความแรงรังสี 97.26 มิลลิลิวรี่ และต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cd-109 ความแรงรังสี 0.44 มิลลิลิวรี่ ได้ทำการจัดระบบวัดดังรูปที่ 3.11 ซึ่งระยะระหว่างระบบวัดกับต้นกำเนิดรังสี คือ 12.0 เซนติเมตร

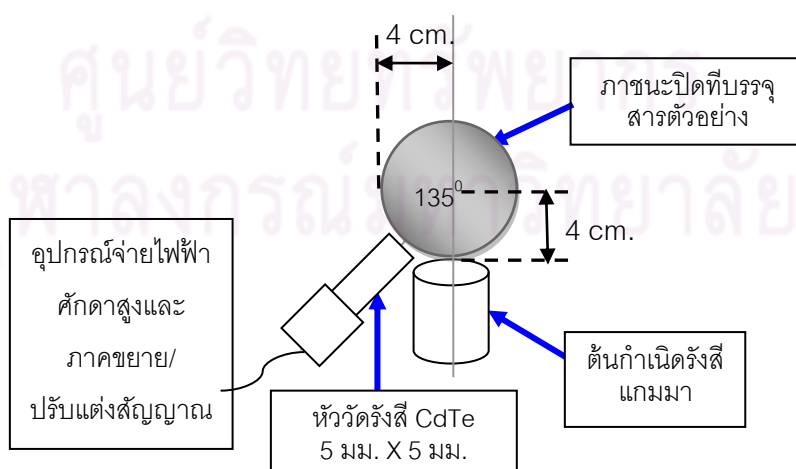
โดยในแต่ละครั้งได้ทำการวัดรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิดขนาดความจุ 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร

เนื่องจากสารประกอบที่ใช้ทำตัวกระตุ้นเปิดเหลวส่วนใหญ่จะมีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ในการวิจัยนี้ได้ใช้ปุ๋ยยูเรีย ซึ่งมีองค์ประกอบของไนโตรเจนถึง 46% ผสมกับน้ำเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจน 5, 10, 15, 20 และ 25% โดยน้ำหนัก เป็นตัวแทนของสารที่ใช้ทำตัวกระตุ้นเปิดเหลว

ค) การศึกษาหาความสัมพันธ์อัตราการลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่พลังงาน 22.1 keV เมื่อของเหลวบรรจุในภาชนะปิดชนิดต่าง ๆ โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cd-109 ความแรงรังสี 0.44 มิลลิลิวรี่ ได้ทำการจัดระบบวัดดังรูปที่ 3.11 ซึ่งระยะระหว่างระบบวัดกับต้นกำเนิดรังสี คือ 12.0 เซนติเมตร โดยในแต่ละครั้งได้ทำการวัดรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิดชนิดต่าง ๆ

3.2.2.2 การจำแนกประเภทของของเหลวโดยใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีแกมมา

ก) การศึกษาผลของพลังงานของต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ทำการตรวจวัดที่มีผลต่อรังสีแกมมาที่การกระเจิงกลับจากของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิด โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ความแรงรังสี 97.26 มิลลิลิวรี่ และต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cd-109 ความแรงรังสี 0.44 มิลลิลิวรี่ ได้ทำการจัดระบบวัดดังรูปที่ 3.12 ซึ่งระยะระหว่างจุดศูนย์กลางภาชนะปิดกับระบบวัด และจุดศูนย์กลางภาชนะปิดกับต้นกำเนิดรังสี คือ 4.0 เซนติเมตร มีมุมกระเจิงที่ 135 องศา โดยในแต่ละครั้งได้ทำการวัดรังสีแกมมาที่มีการกระเจิงกลับจากของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิด



รูปที่ 3.12 แผนภาพการจัดระบบวัดในการทดสอบโดยใช้เทคนิคการการกระเจิงกลับของรังสีแกมมาที่มีมุมกระเจิง 135 องศา

ข) การศึกษาผลของปริมาณของของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิดในการตรวจวัดที่มีผลต่อรังสีแกมมาที่กระเจิงกลับจากของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิด โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาอะเมริเซียม-241 (Am-241) ความแรงแรังสี 97.26 มิลลิวูรี่ ได้ทำการจัดระบบวัดดังรูปที่ 3.12 ซึ่งระยะระหว่างจุดศูนย์กลางภาชนะปิดกับระบบวัด และจุดศูนย์กลางภาชนะปิดกับต้นกำเนิดรังสี คือ 4.0 เซนติเมตร โดยในแต่ละครั้งได้ทำการวัดรังสีแกมมาที่กระเจิงกลับจากของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิดขนาดความจุ 100 และ 600 มิลลิลิตร

เนื่องจากสารประกอบที่ใช้ทำวัตถุระเบิดเหลวส่วนใหญ่จะมีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ในการวิจัยนี้ได้ใช้ปุ๋ยยูเรีย ซึ่งมีองค์ประกอบของไนโตรเจนถึง 46% ผสมกับน้ำเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจน 5, 10, 15, 20 และ 25% โดยน้ำหนัก เป็นตัวแทนของสารที่ใช้ทำวัตถุระเบิดเหลว

3.2.3 การออกแบบระบบวัดนิวตรอน

การศึกษาผลนิวตรอนที่ทะลุผ่านของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิด โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีที่ให้อนุภาคนิวตรอน Am-241/Be ความแรงแรังสี 90 มิลลิวูรี่ ได้ทำการจัดระบบวัดดังรูปที่ 3.10 ซึ่งระยะระหว่างระบบวัดกับต้นกำเนิดรังสี คือ 12.0 เซนติเมตร โดยในแต่ละครั้งได้ทำการวัดนิวตรอนที่ทะลุผ่านของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิดที่มีความจุ 600 มิลลิลิตร และใช้เวลาในการตรวจวัดที่ 1,000 วินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิจัย และวิเคราะห์ผลการวิจัย

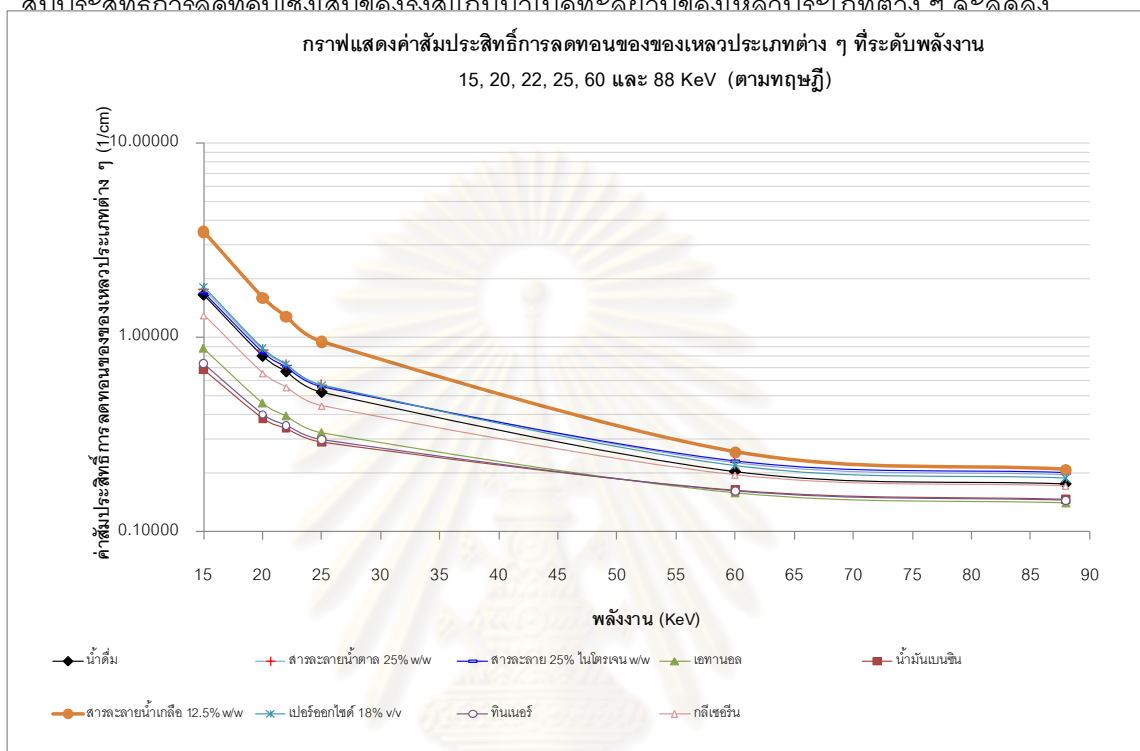
4.1 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ

4.1.1 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมา เมื่อทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่รังสีแกมมาพลังงาน 15.0, 20.0, 22.0, 25.0, 60.0 และ 88.0 keV แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่รังสีแกมมาพลังงาน 15.0, 20.0, 22.0, 25.0, 60.0 และ 88.0 keV (จากการคำนวณ)

ประเภทของเหลว	μ (cm ⁻¹) (จากการคำนวณ) ที่รังสีแกมมาพลังงาน					
	15.0 keV	20.0 keV	22.0 keV	25.0 keV	60.0 keV	88.0 keV
น้ำดื่ม	1.65979	0.80366	0.66839	0.52367	0.20431	0.17666
สารละลายน้ำตาลทรายขาว 25% w/w	1.77374	0.86486	0.72179	0.56819	0.22730	0.19716
สารละลายมีโนโตรเจน 25% w/w	1.69196	0.83423	0.70065	0.55592	0.23095	0.20126
เอทานอลความเข้มข้น 100%	0.79133	0.42219	0.36669	0.30442	0.15554	0.13854
น้ำมันเบนซิน	0.67885	0.38269	0.33945	0.28949	0.16399	0.14743
สารละลายน้ำเกลือ 12.5 % w/w	3.48301	1.59642	1.27467	0.94690	0.25673	0.20839
สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 18.00 % v/v	1.81445	0.87567	0.72737	0.56872	0.21905	0.18909
ทินเนอร์	0.86504	0.46934	0.40829	0.34109	0.18181	0.16264
กลีเซอริน	1.29744	0.65212	0.55189	0.44288	0.19531	0.17136

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาเมื่อทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีแกมมากับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของของเหลวประเภทต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.1 จากการคำนวณพบว่าเมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาจะยิ่งลดลง



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมา (จากการคำนวณ) เมื่อทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่พลังงาน 15.0, 20.0, 22.0, 25.0, 60.0 และ 88.0 keV

4.1.2 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมา เมื่อทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่พลังงาน 22.1 keV ในภาชนะปิดที่มีปริมาตรความจุต่าง ๆ

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมา (μ) สามารถหาได้จากการสมการ $I = I_0 e^{-\mu x}$ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (μ) เมื่อ I คือ ค่าจำนวนนับหรือความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทนั้น ๆ ที่หัววัดวัดได้, I_0 คือ ค่าจำนวนนับหรือความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านภาชนะเปล่าที่หัววัดวัดได้ และ X คือ ความหนาของของเหลวที่รังสีแกมมาทะลุผ่าน (cm) ซึ่งตารางระหว่างประเภทของเหลวกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาแสดงดังตารางที่ 4.2 โดยในการวิจัยนี้ได้เลือกพิจารณารังสีแกมมาที่พลังงาน 22.1 keV ในภาชนะปิดที่มีปริมาตรความจุ 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่เวลานับวัด 600 วินาที พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นลดลง เมื่อภาชนะปิดมีปริมาตรความจุมากขึ้น รวมทั้งค่า

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่ได้จากการคำนวณ และการวิจัยมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้สามารถจำแนกประเภทของของเหลวได้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของของเหลวแต่ละประเภทยังมีค่าแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่พลังงานที่ 22.1 keV ในภาชนะปิดปริมาตรความจุ 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร

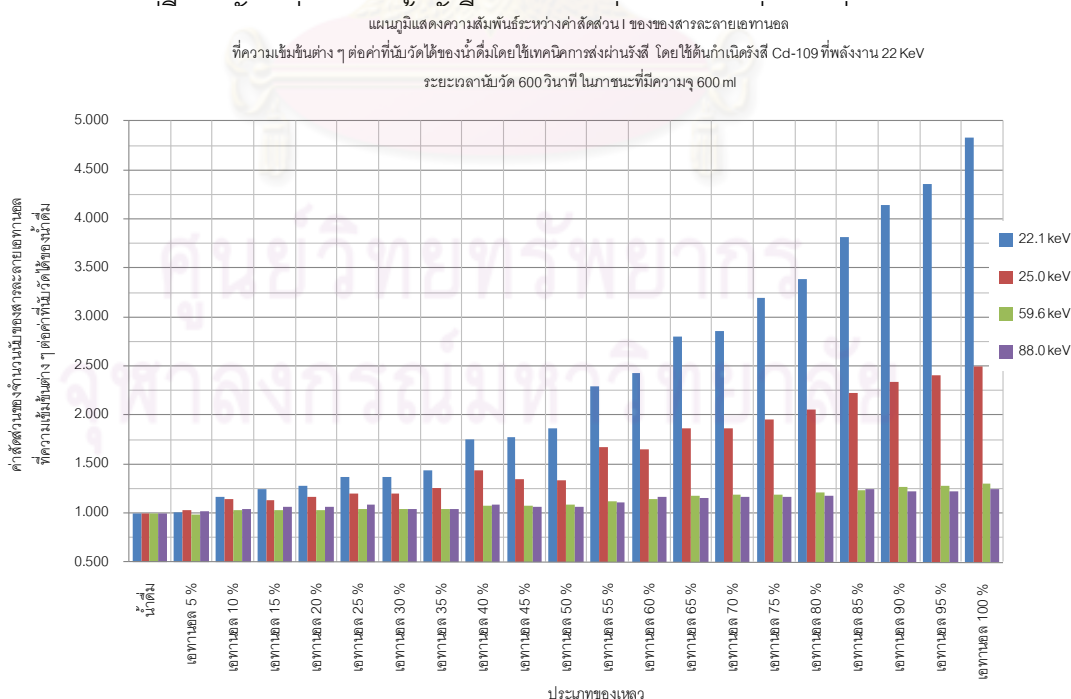
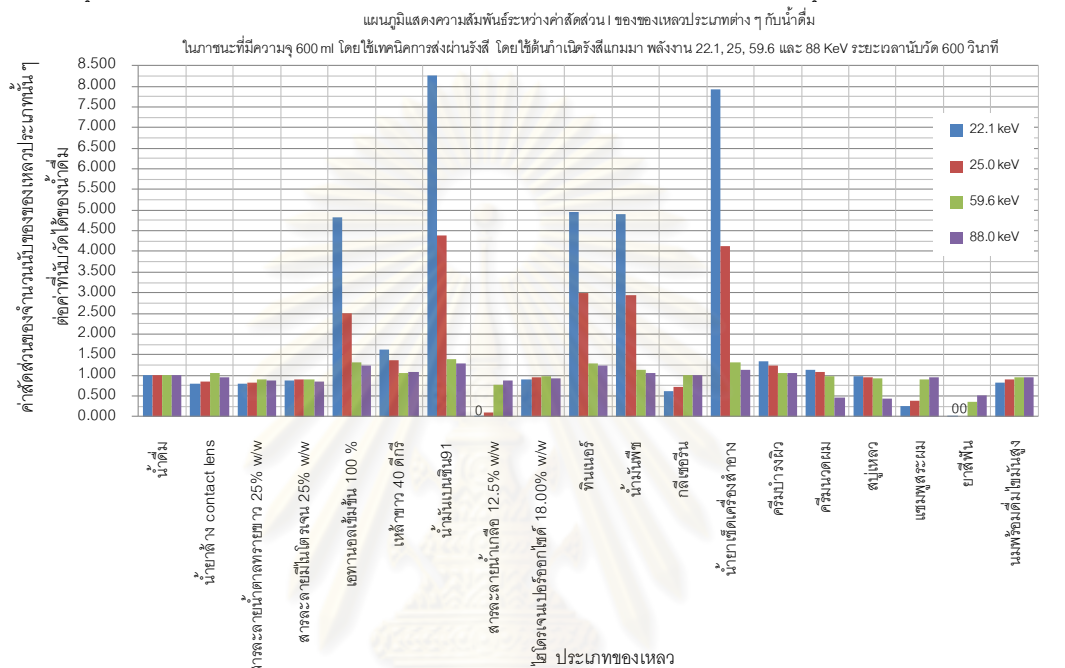
ประเภทของเหลว	μ (cm ⁻¹) (จากการคำนวณ)	μ (cm ⁻¹) (จากการวิจัย) ที่ปริมาตรความจุภาชนะ		
		100 ml	600 ml	1,500 ml
น้ำดื่ม	0.668	0.635	0.617	0.610
สารละลายน้ำตาลทรายขาว 25% w/w	0.722	0.665	0.652	0.648
สารละลายมีในโตรเจน 25% w/w	0.701	0.646	0.638	0.629
เอทานอลความเข้มข้น 100%	0.367	0.366	0.362	0.367
น้ำมันเบนซิน	0.340	0.277	0.269	0.273
สารละลายน้ำเกลือ 12.5 % w/w	1.275	1.182	1.179	วัดไม่ได้

4.2 ผลการทดสอบความสามารถในการจำแนกประเภทของของเหลวโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา

4.2.1 การศึกษาผลของพลังงานของต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ทำการตรวจวัดที่มีผลต่อรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิด

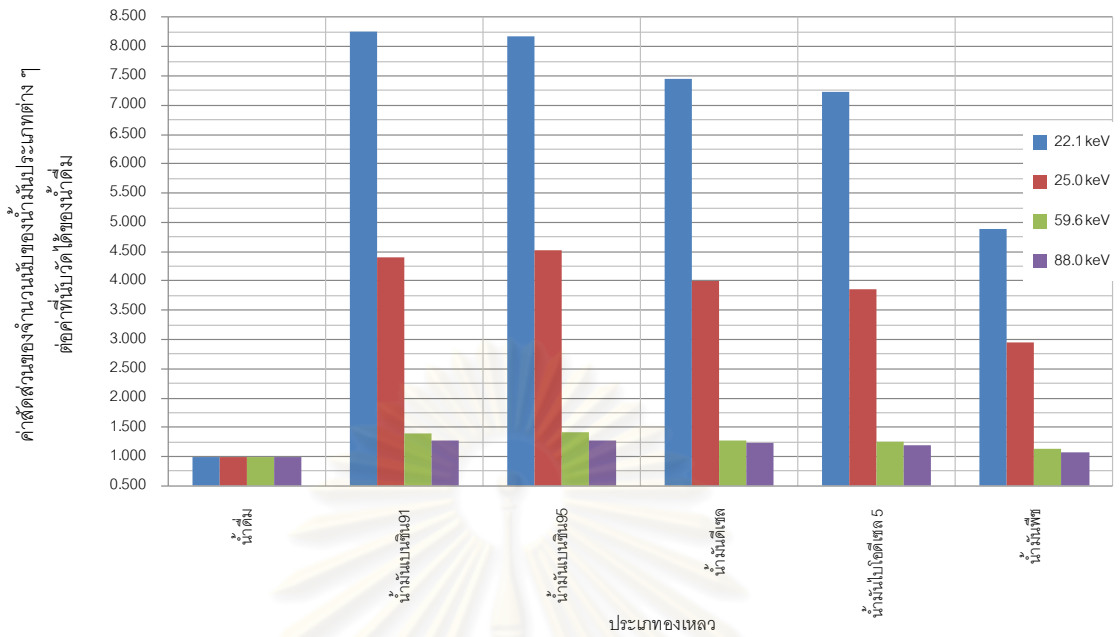
ในการหาอัตราส่วนความเข้มข้นรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านเมื่อเทียบกับน้ำ (คือให้ความเข้มข้นรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านน้ำเท่ากับ 1.00) ในแต่ละพลังงานของรังสีแกมมาได้สร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ ดังรูปที่ 4.2 - 4.8 โดยในการวิจัยนี้ได้เลือกพิจารณารังสีแกมมาที่พลังงาน 22.1, 25.0 และ 88.0 keV จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cd-109 และ 59.6 keV จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ในภาชนะปิดที่มีปริมาตรความจุ 600 มิลลิลิตร ที่เวลานับวัด 600 วินาที พบว่ารังสีแกมมาพลังงาน 22.1 keV ทะลุผ่านแอลกอฮอล์, สารที่มีองค์ประกอบของแอลกอฮอล์, สารไวไฟ และน้ำมันเชื้อเพลิงได้มากกว่าน้ำประมาณ 4 - 8 เท่า นอกจากนี้ยังได้ทดสอบกับของเหลวประเภทอื่น ๆ พบว่าความไวในการจำแนกประเภทต่ำลง เมื่อ

พลังงานของรังสีแกมมาสูงขึ้น อีกทั้งความสามารถในการแยกของเหลวประเภทเดียวกันที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มีความไวต่ำลงเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาสูงขึ้นเช่นกัน เนื่องจากของเหลวแต่ละประเภทมีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยของเหลวที่มีความหนาแน่นต่ำเมื่อได้รับรังสีแกมมาพลังงานต่ำจะสามารถทะลุผ่านไปได้จำนวนมาก ส่วนของเหลวที่มีความหนาแน่นสูงความสามารถในการทะลุผ่านของรังสีแกมมาพลังงานต่ำจะมีจำนวนน้อยหรือไม่สามารถทะลุผ่านได้เลย



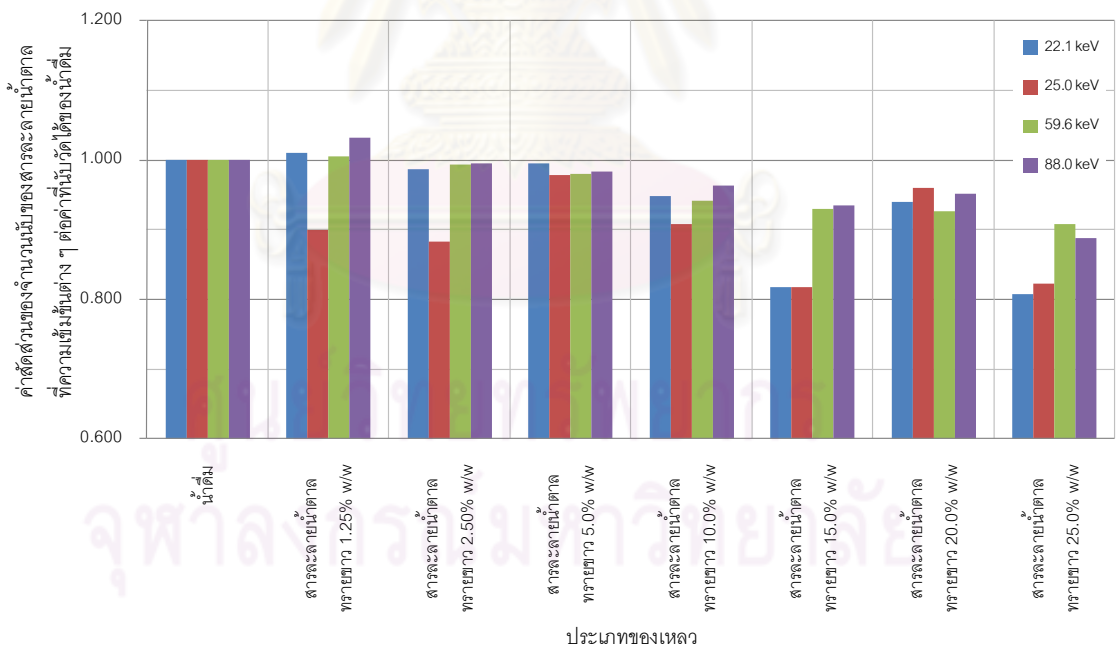
รูปที่ 4.3 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำที่ 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม
 ในภาชนะที่มีความจุ 600 ml โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 22 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที



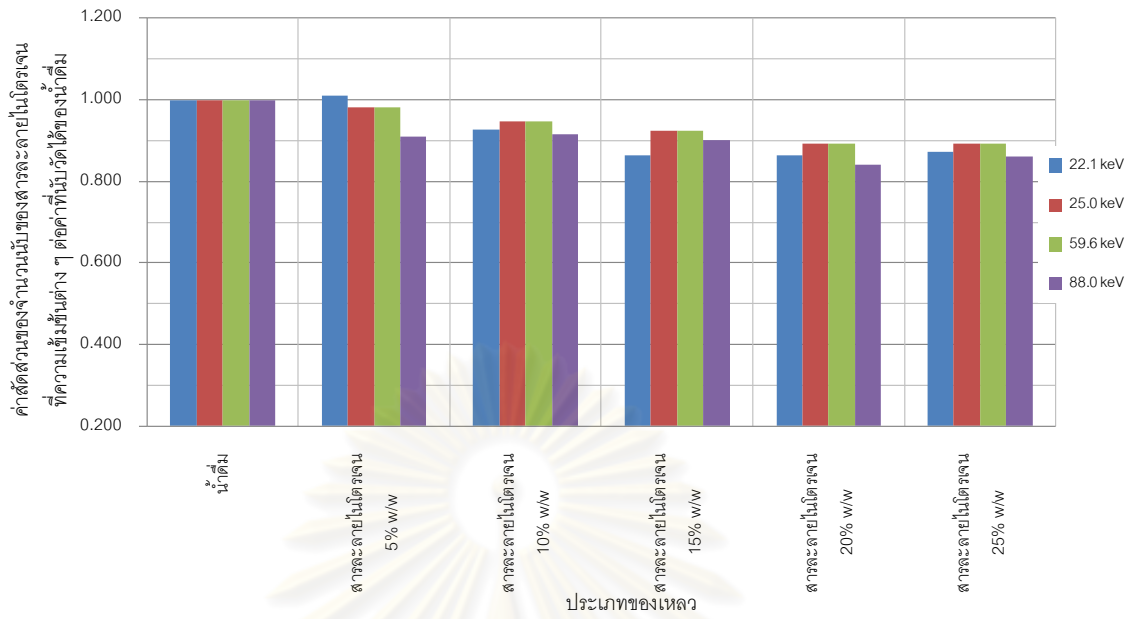
รูปที่ 4.4 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านน้ำมันประเภทต่าง ๆ
 เมื่อเทียบกับน้ำที่ 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม
 โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 22 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่มีความจุ 600 ml



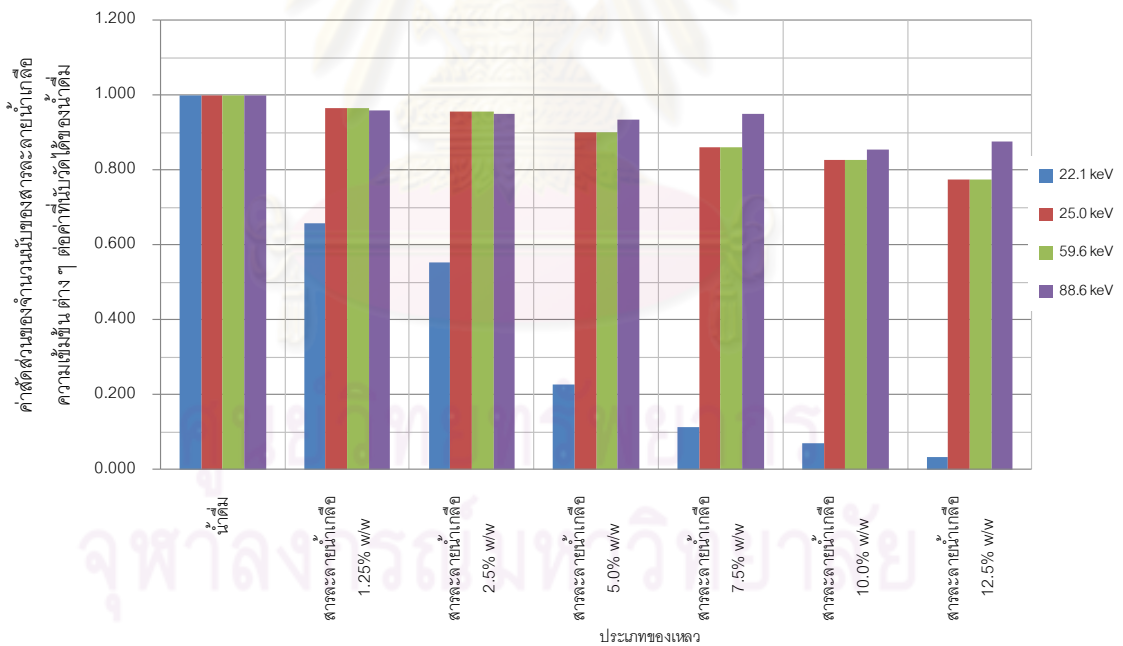
รูปที่ 4.5 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ
 เมื่อเทียบกับน้ำที่ 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่างๆ กับน้ำดื่ม
โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 22 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่มีความจุ 600 ml



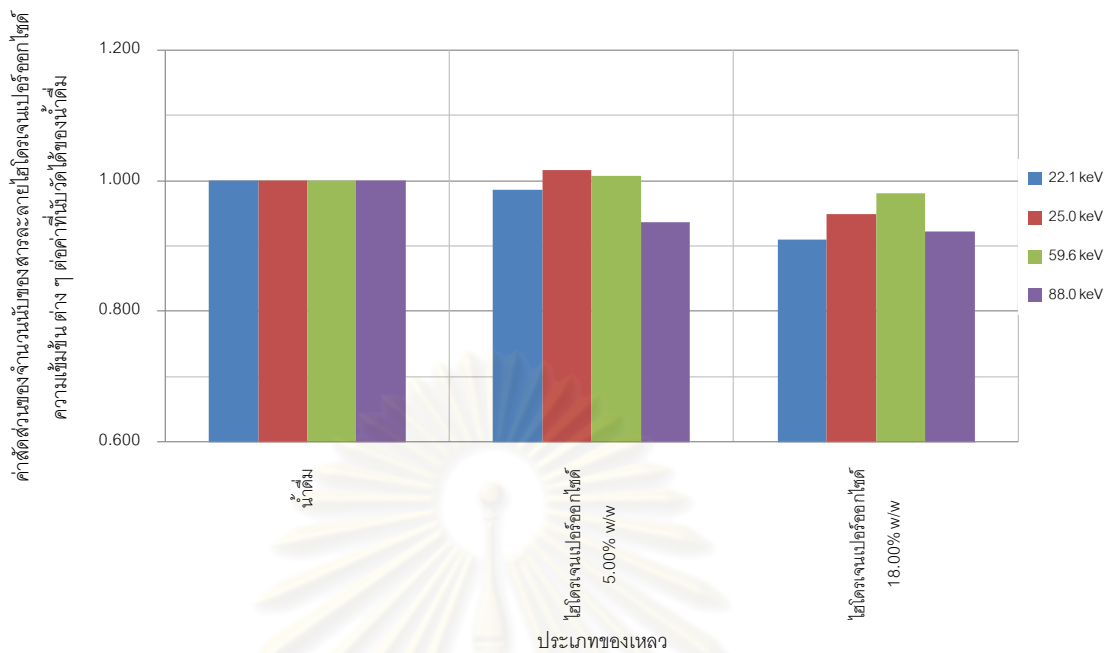
รูปที่ 4.6 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายในโตรเจนที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อเทียบกับน้ำที่ 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่างๆ กับน้ำเกลือ
โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 22 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่มีความจุ 600 ml



รูปที่ 4.7 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายน้ำเกลือที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อเทียบกับน้ำที่ 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 22 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่มีความจุ 600 ml

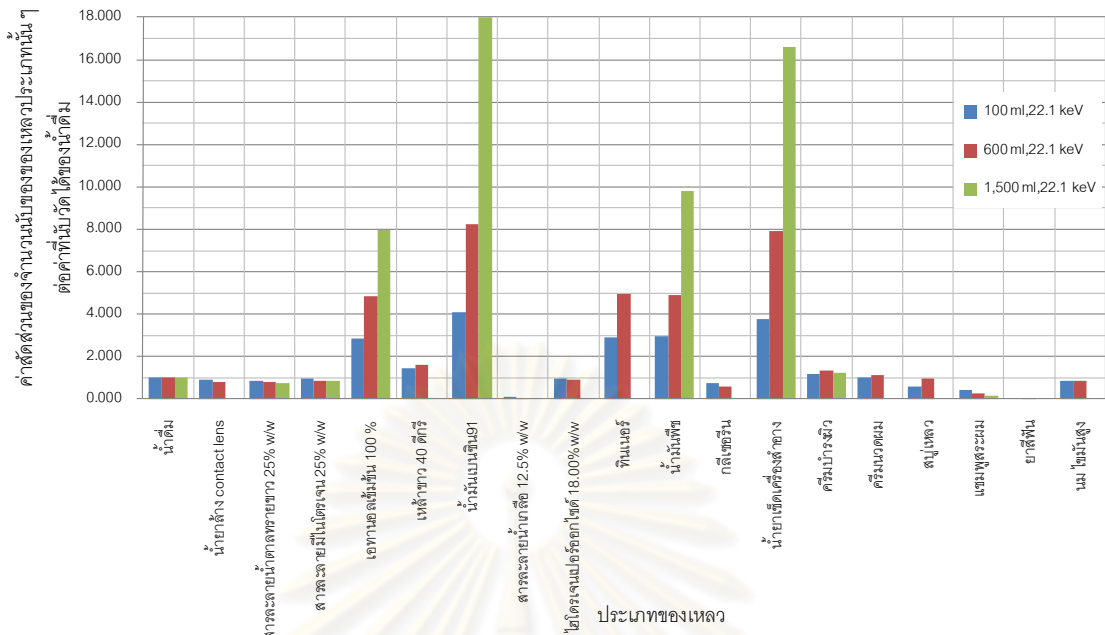


รูปที่ 4.8 อัตราส่วนความเข้มข้นรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำที่ 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV

4.2.2 การศึกษาผลของปริมาตรของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิดที่มีผลต่อรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิด

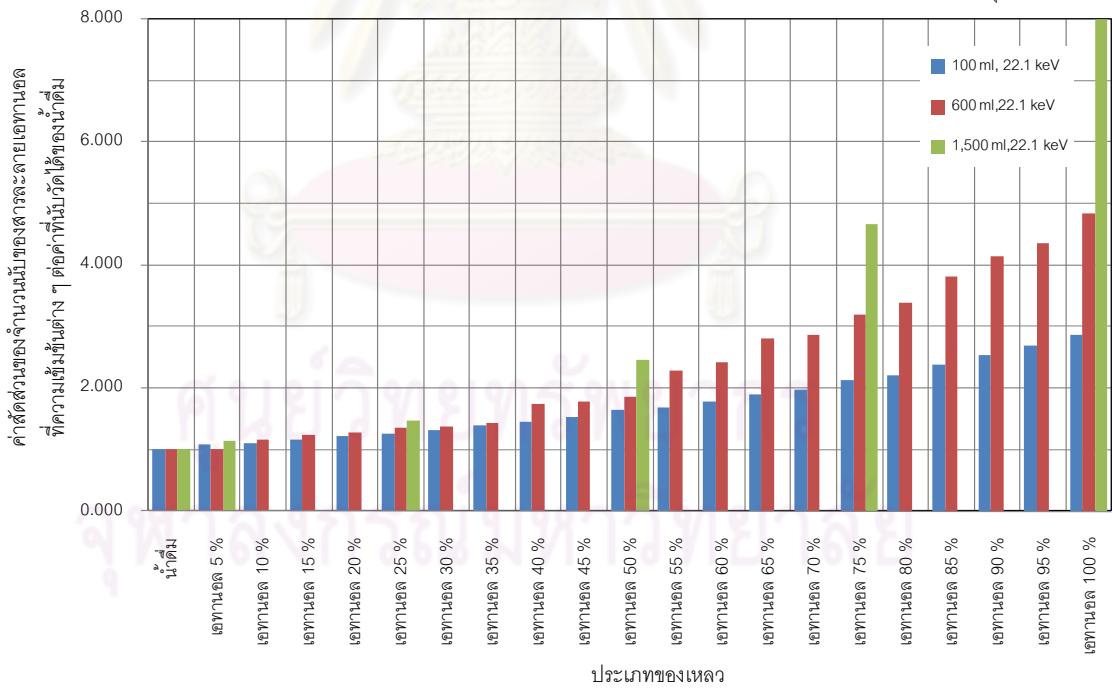
ในการหาอัตราส่วนความเข้มข้นรังสีแกมมาทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ ในแต่ละพลังงาน ดังรูปที่ 4.9 – 4.36 โดยในการวิจัยนี้ได้เลือกพิจารณารังสีแกมมาที่พลังงาน 22.1, 25.0 และ 88.0 keV จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cd-109 และ 59.6 keV จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ในภาชนะปิดที่มีปริมาตรความจุ 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่เวลานับวัด 600 วินาที พบว่า อัตราส่วนความเข้มข้นรังสีแกมมาทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ ที่รังสีแกมมาพลังงาน 22.1 keV มีความสามารถทะลุผ่านแอลกอฮอล์, สารที่มีองค์ประกอบของแอลกอฮอล์, สารไวไฟ และน้ำมันเชื้อเพลิงได้มากกว่าการใช้รังสีแกมมาพลังงานสูง รวมทั้งภาชนะปิดที่มีปริมาตรความจุสูงจะมีความไวในการจำแนกประเภทสูงเมื่อใช้รังสีแกมมาพลังงานต่ำ ส่วนแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ, น้ำมัน และสายละลายน้ำเกลือที่ความเข้มข้นต่าง ๆ การใช้รังสีแกมมาพลังงานต่ำมีความสามารถในการจำแนกความเข้มข้นได้ดีกว่าการใช้รังสีแกมมาพลังงานสูง อีกทั้งเมื่อภาชนะที่มีปริมาตรความจุมากขึ้นมีความไวในการจำแนกประเภทสูงขึ้นเมื่อใช้รังสีแกมมาพลังงานต่ำ ส่วนของเหลวประเภทอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นไม่สามารถจำแนกประเภท และความเข้มข้นของของเหลวประเภทนั้น ๆ ได้

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 22 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



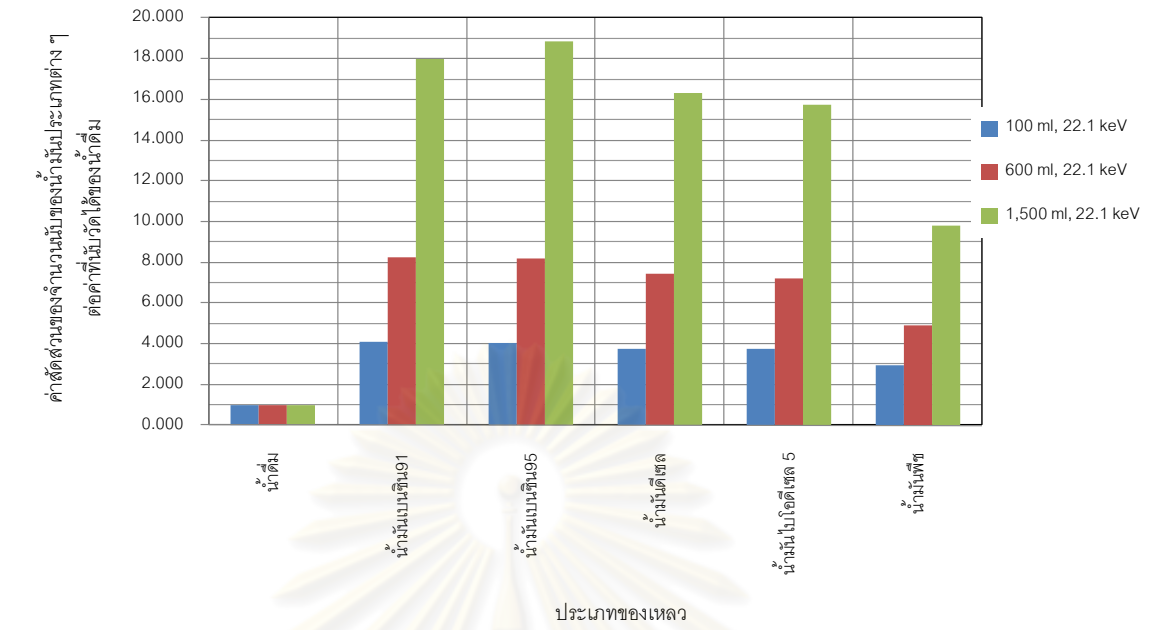
รูปที่ 4.9 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ ในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 22.1 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 22 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



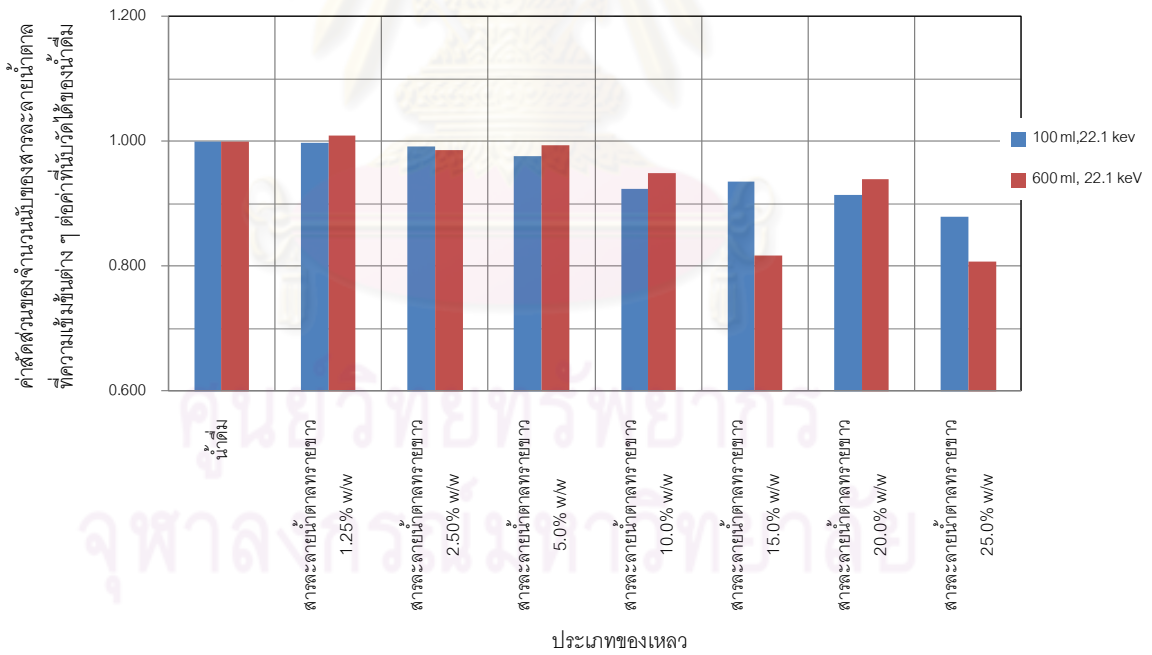
รูปที่ 4.10 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ ในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 22.1 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 22 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



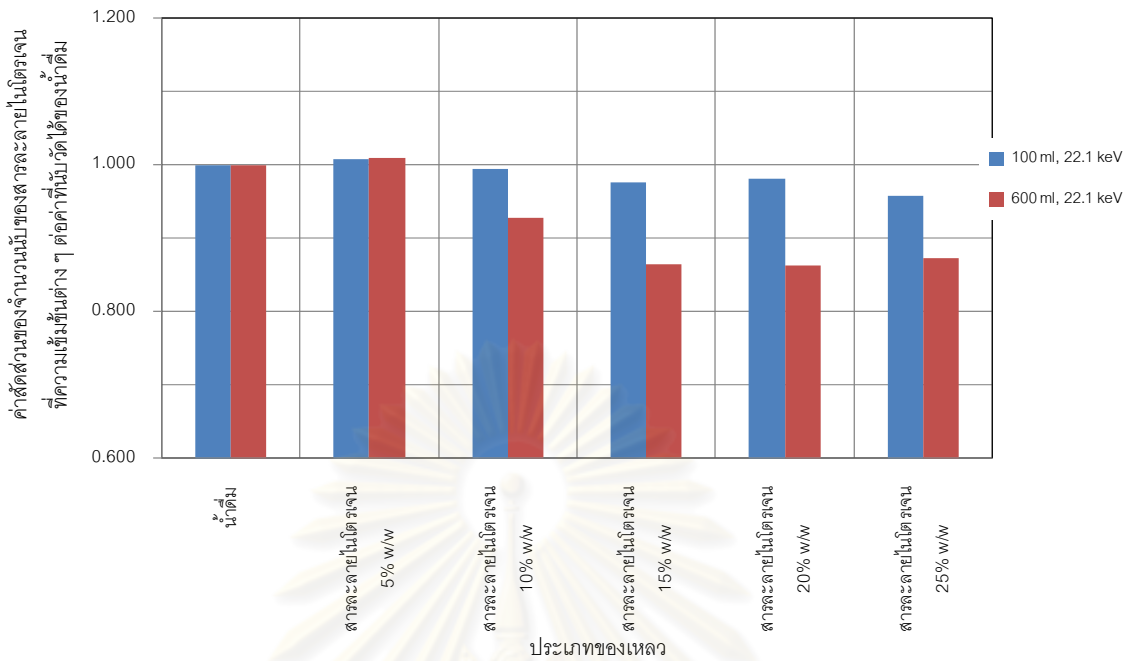
รูปที่ 4.11 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของน้ำมันประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 22 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.12 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 22.1 keV

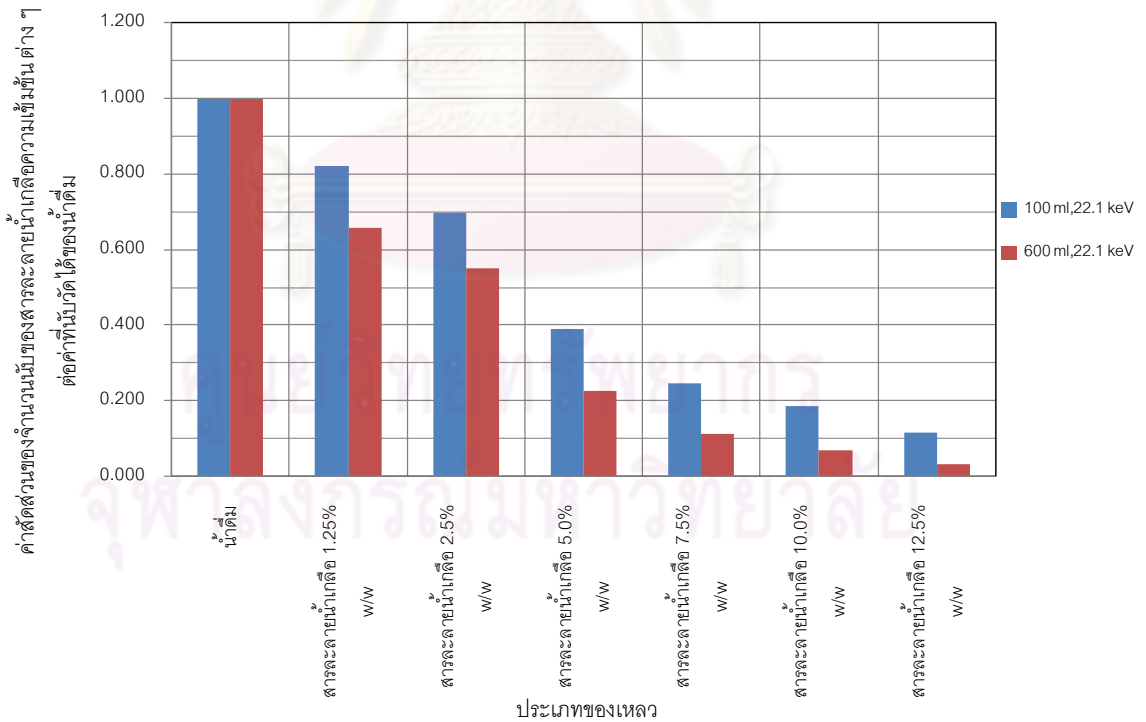
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 22 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.13 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายในโตรเจนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 22.1 keV

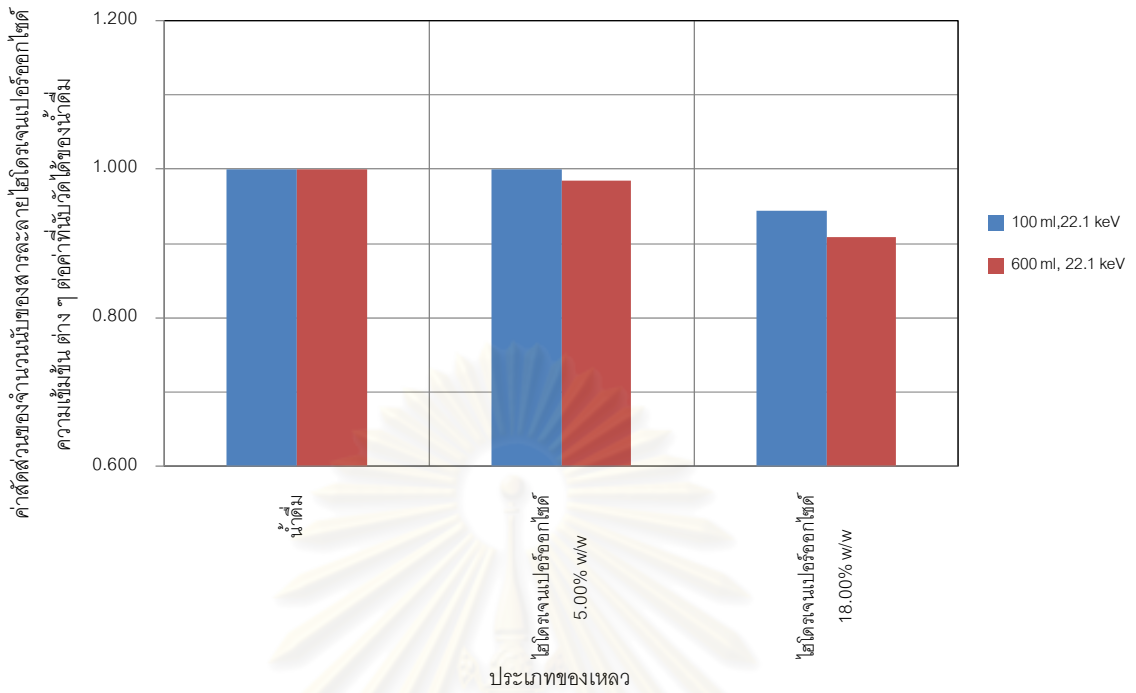
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 22 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.14 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายน้ำเกลือที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

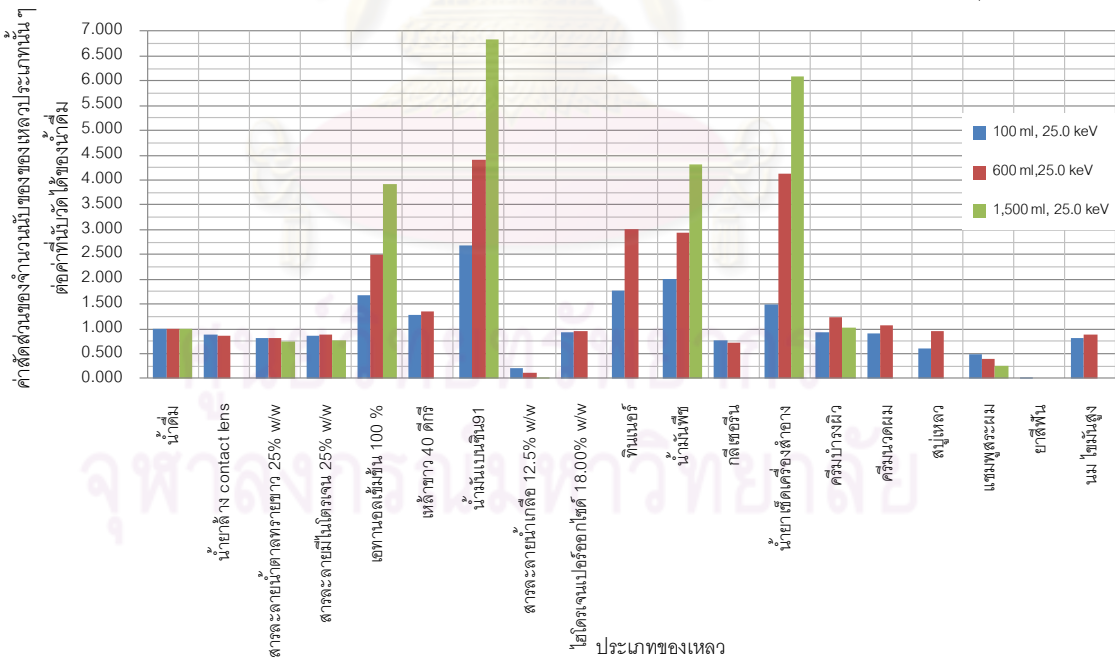
เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 22.1 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้นิวไคนิวตริ่งลี Cd-109 ที่พลังงาน 22 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



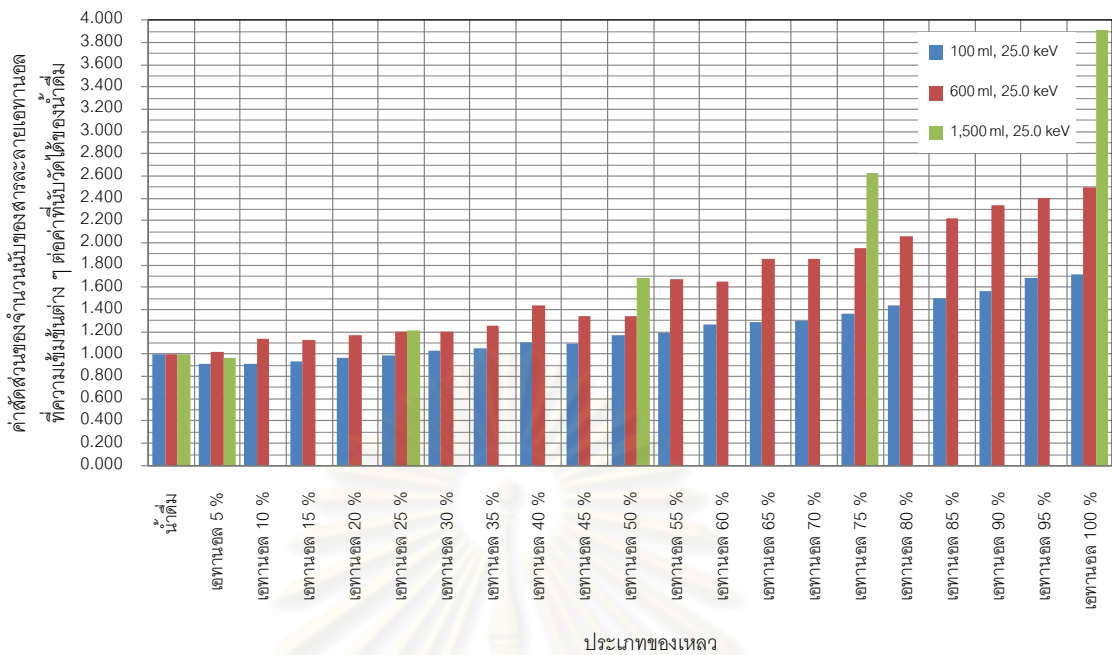
รูปที่ 4.15 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 22.1 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้นิวไคนิวตริ่งลี Cd-109 ที่พลังงาน 25 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



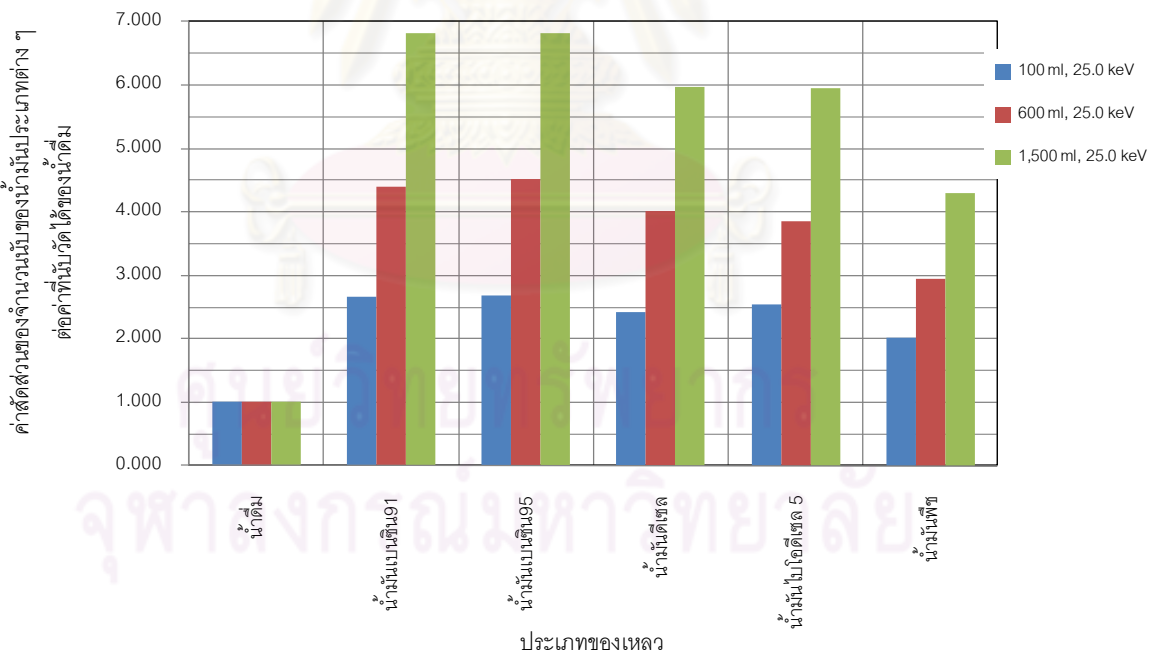
รูปที่ 4.16 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 25.0 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม
โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 25 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.17 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบ

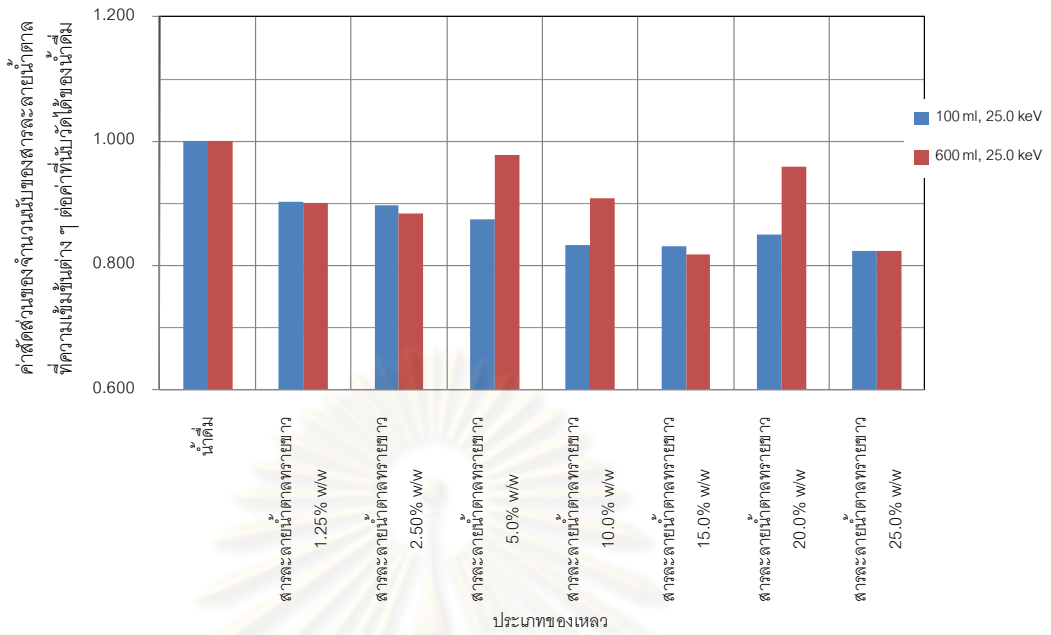
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม
โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 25 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที



รูปที่ 4.18 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านน้ำมันประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ

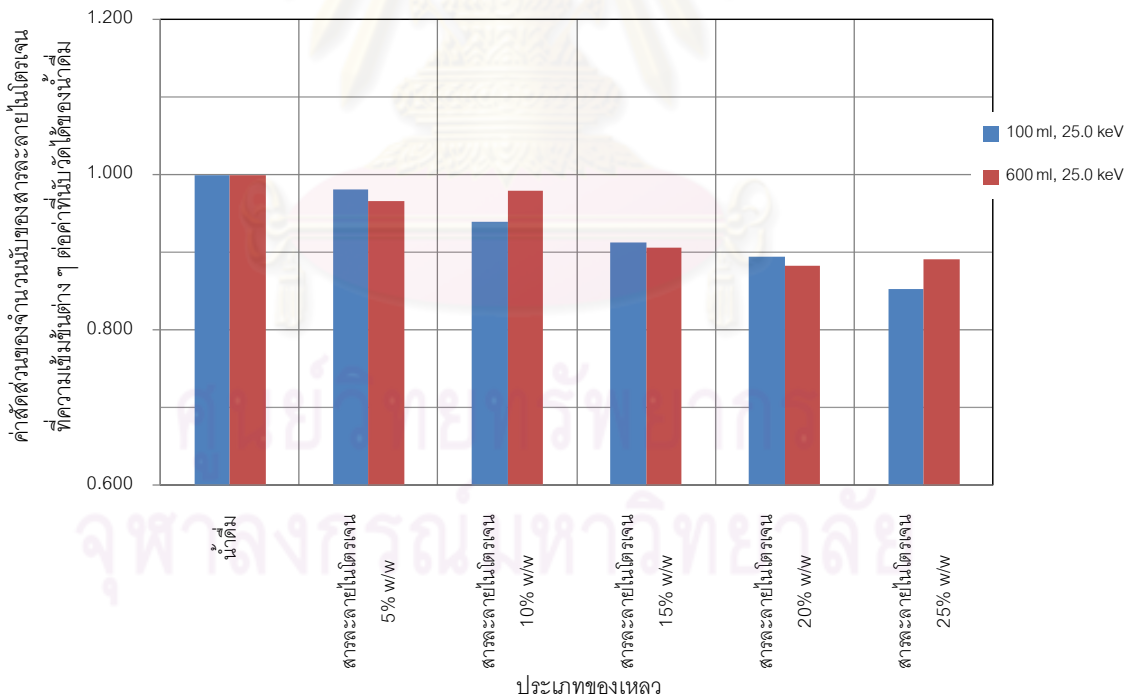
ในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 25.0 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 25 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.19 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสายละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 25 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml

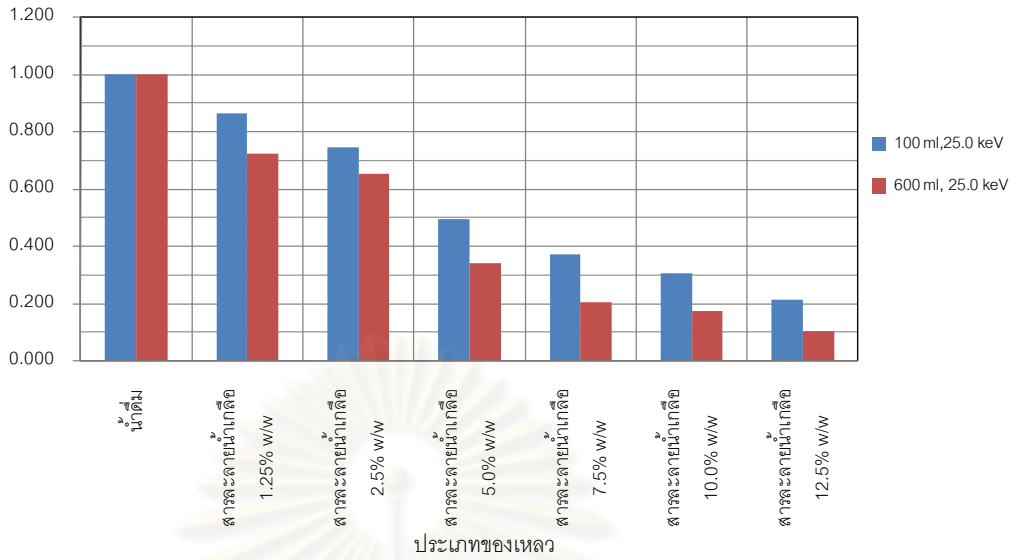


รูปที่ 4.20 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสายละลายไนโตรเจนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 25.0 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยให้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 25 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml

ค่าสัดส่วนของจำนวนนับของสารละลายน้ำเกลือ ความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อค่าที่นับวัดได้ของน้ำดื่ม

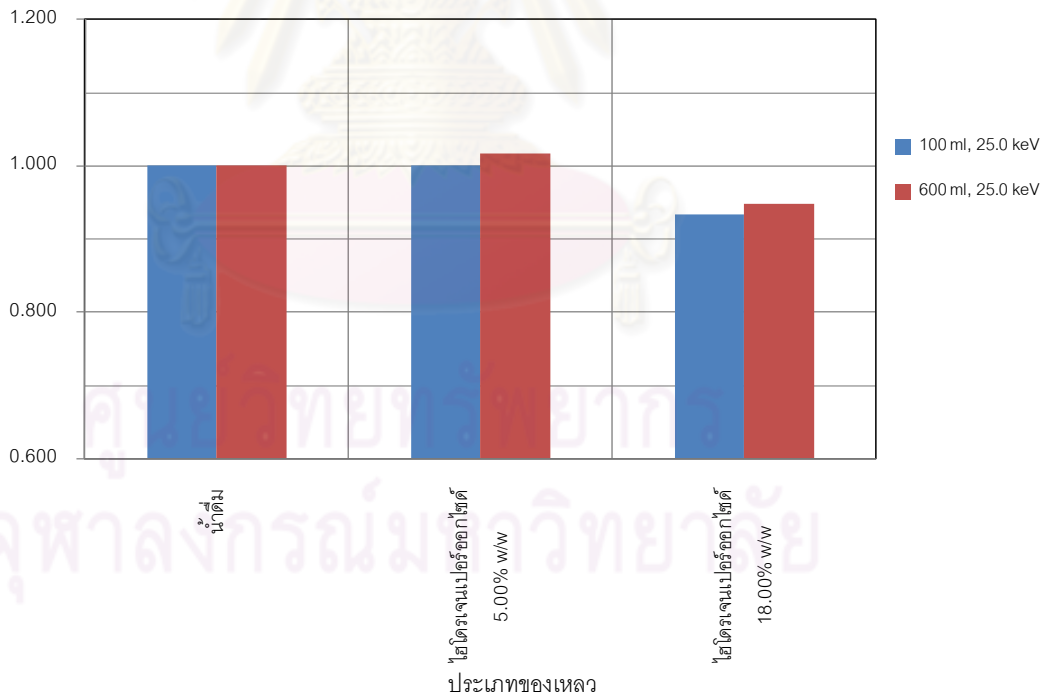


รูปที่ 4.21 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายน้ำเกลือที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

เมื่อเทียบกับน้ำดื่มในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 มิลลิลิตร ที่ 25.0 keV

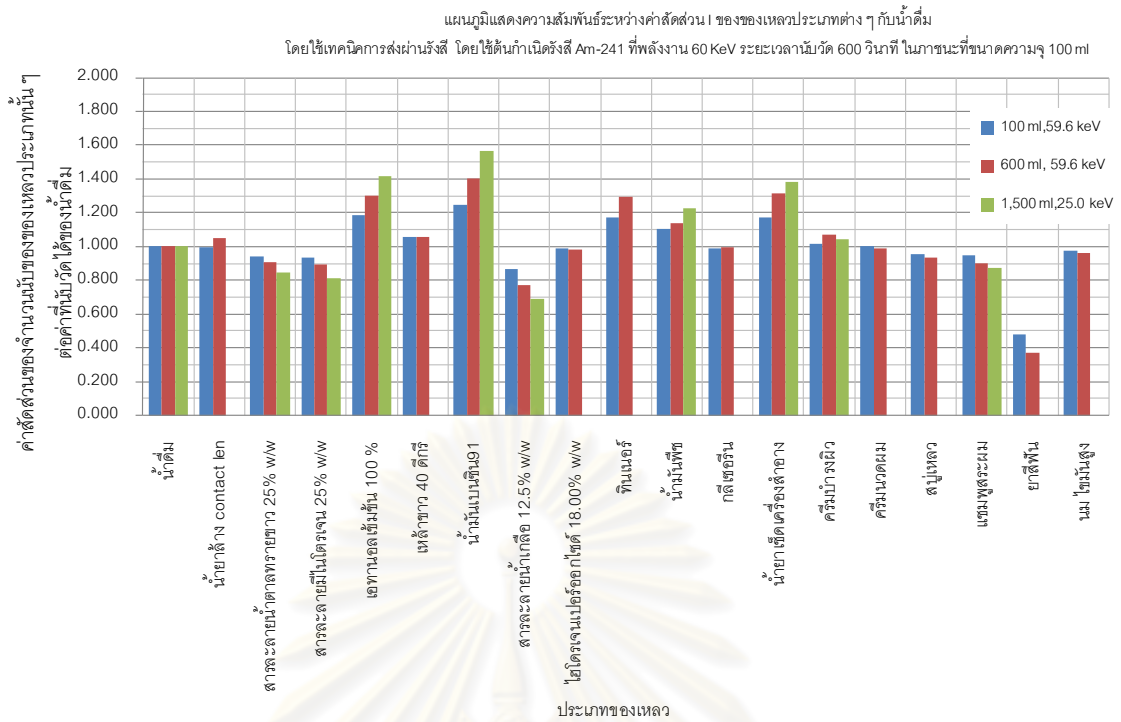
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยให้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 25 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml

ค่าสัดส่วนของจำนวนนับของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อค่าที่นับวัดได้ของน้ำดื่ม

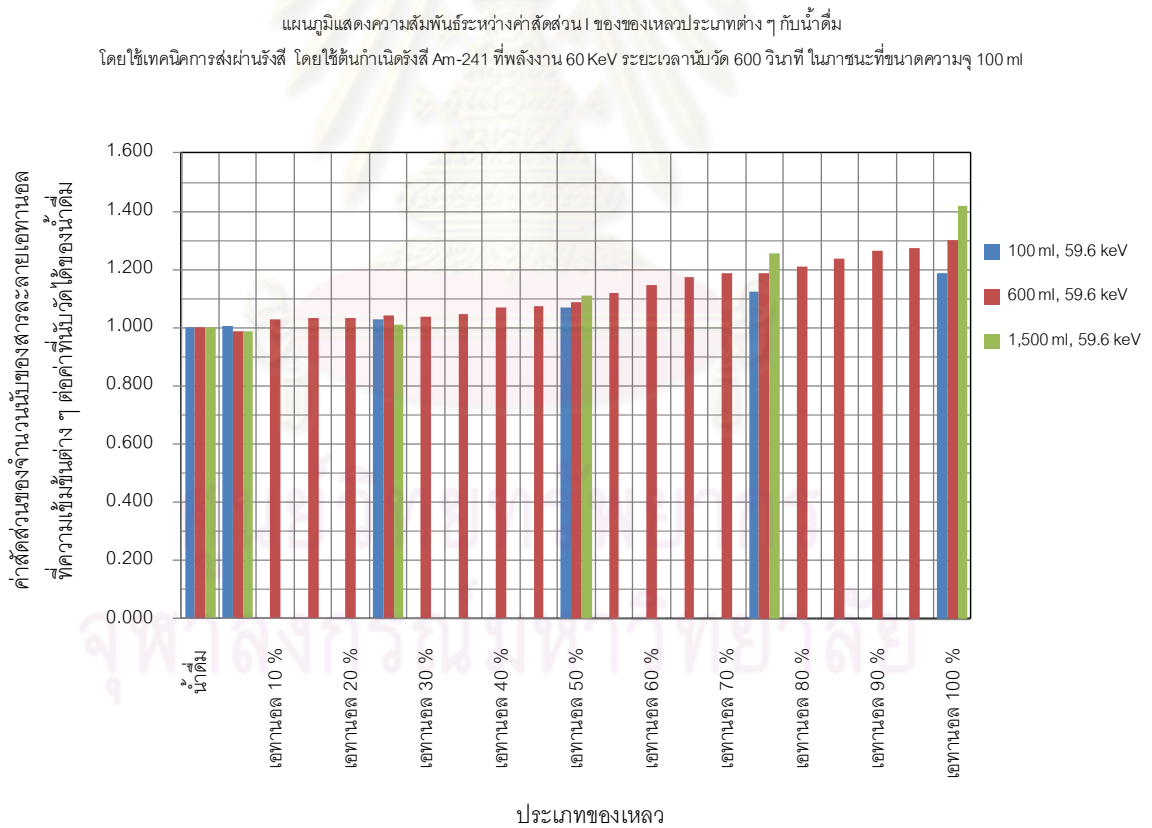


รูปที่ 4.22 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 25.0 keV

เมื่อเทียบกับน้ำดื่มในภาชนะปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 25.0 keV

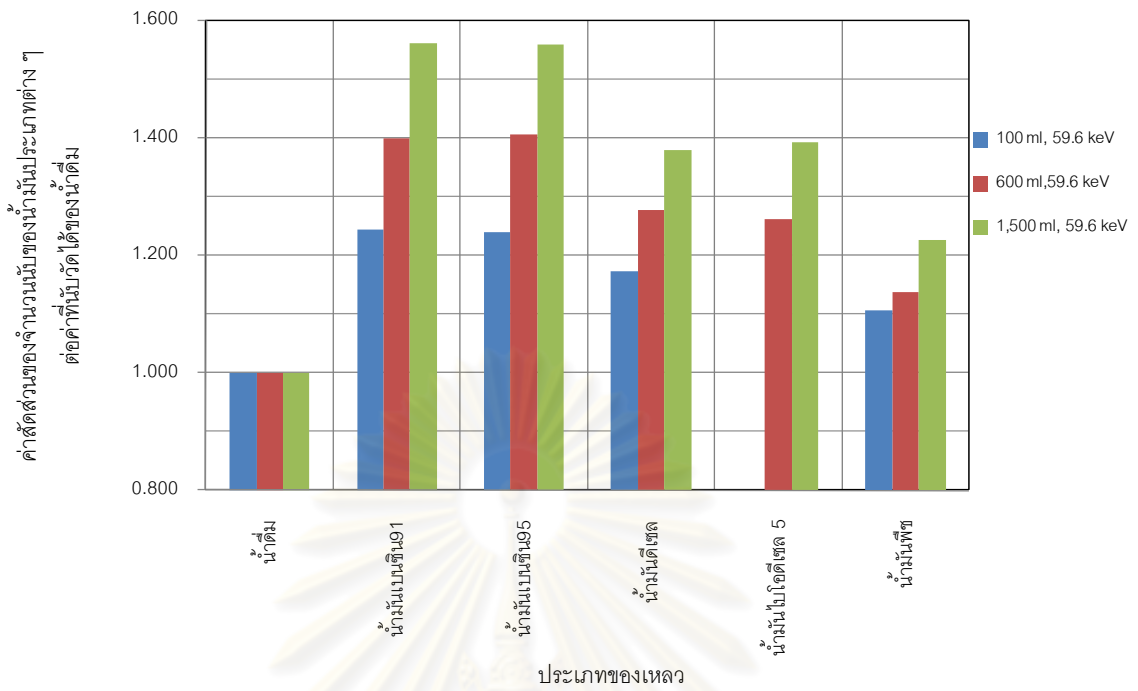


รูปที่ 4.23 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ



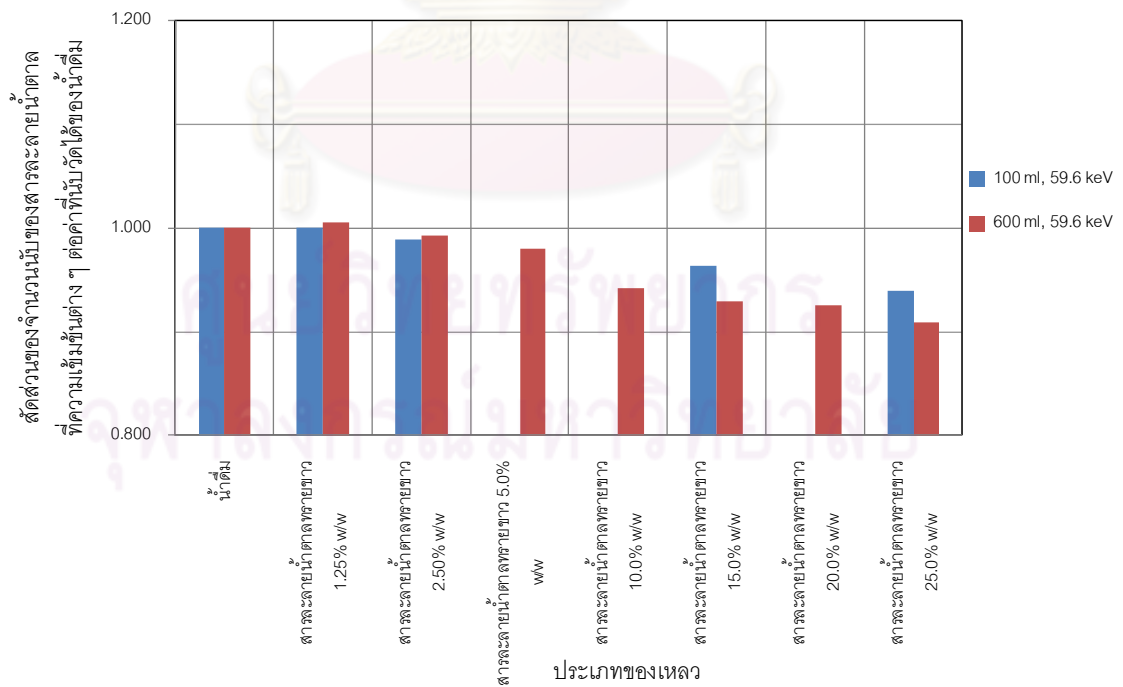
รูปที่ 4.24 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 59.6 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Am-241 ที่พลังงาน 60 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที



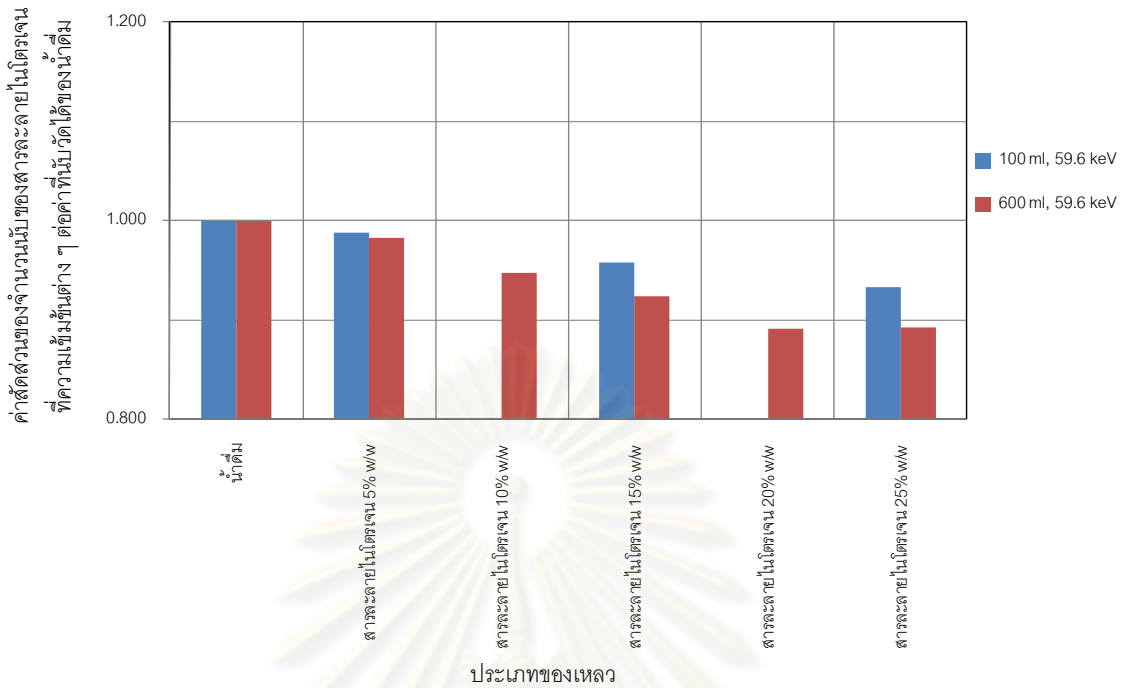
รูปที่ 4.25 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของน้ำมันประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Am-241 ที่พลังงาน 60 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



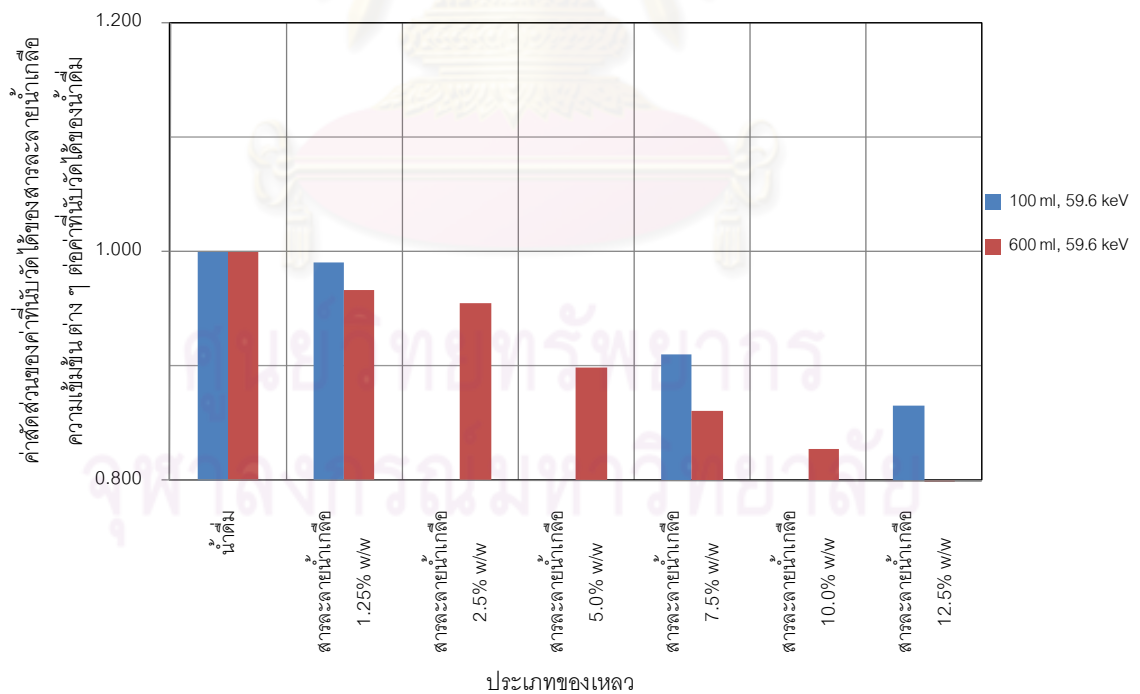
รูปที่ 4.26 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 59.6 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Am-241 ที่พลังงาน 60 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.27 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายไนโตรเจนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

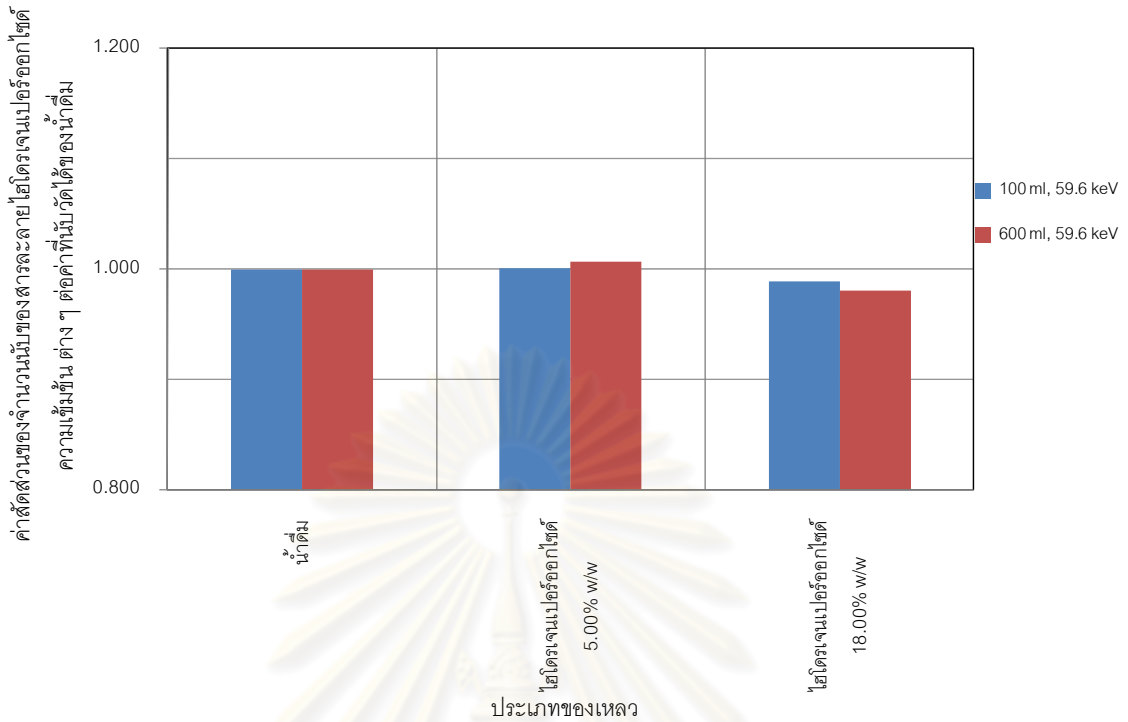
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Am-241 ที่พลังงาน 60 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.28 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายน้ำเกลือที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 59.6 keV

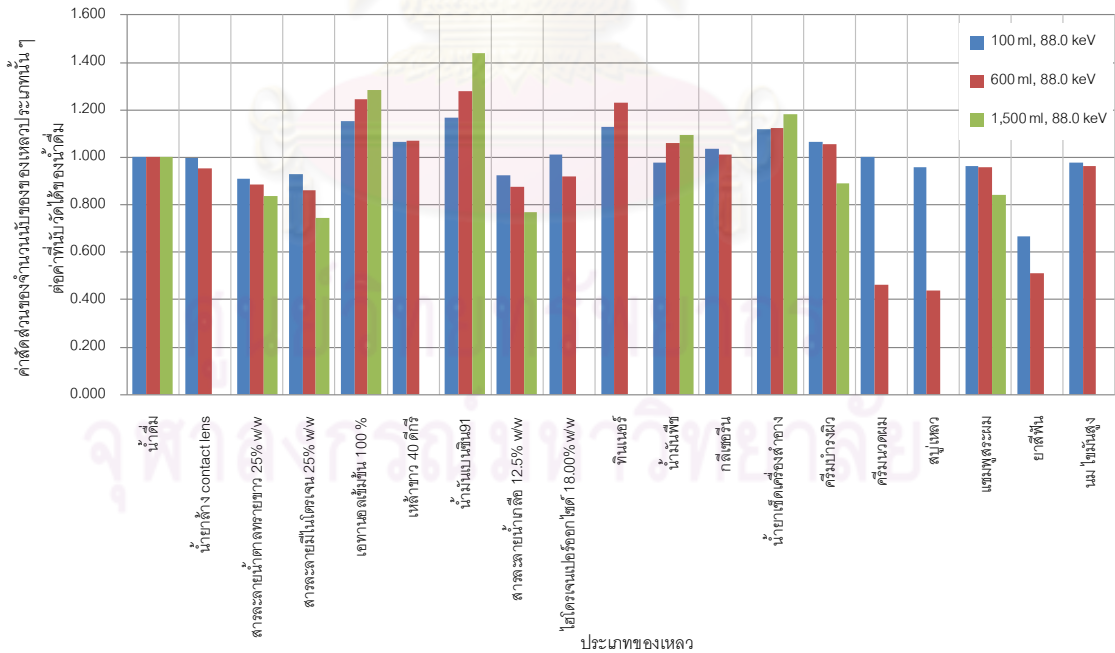
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Am-241 ที่พลังงาน 60 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.29 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เมื่อเทียบกับน้ำ ในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 59.6 keV

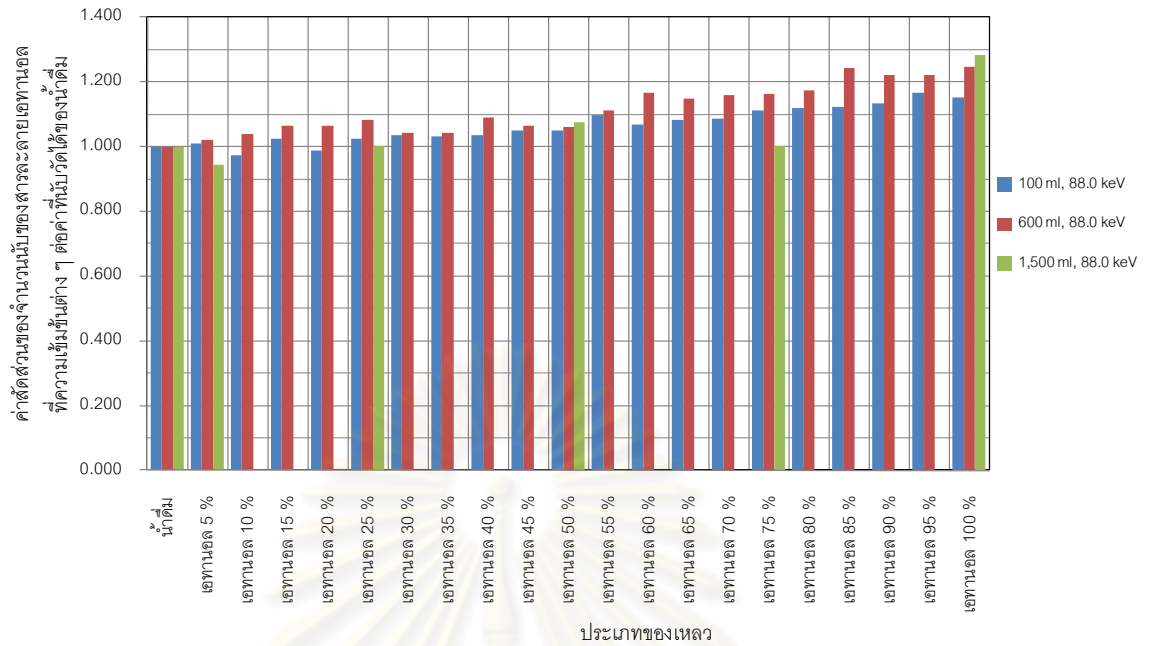
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 88 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.30 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ

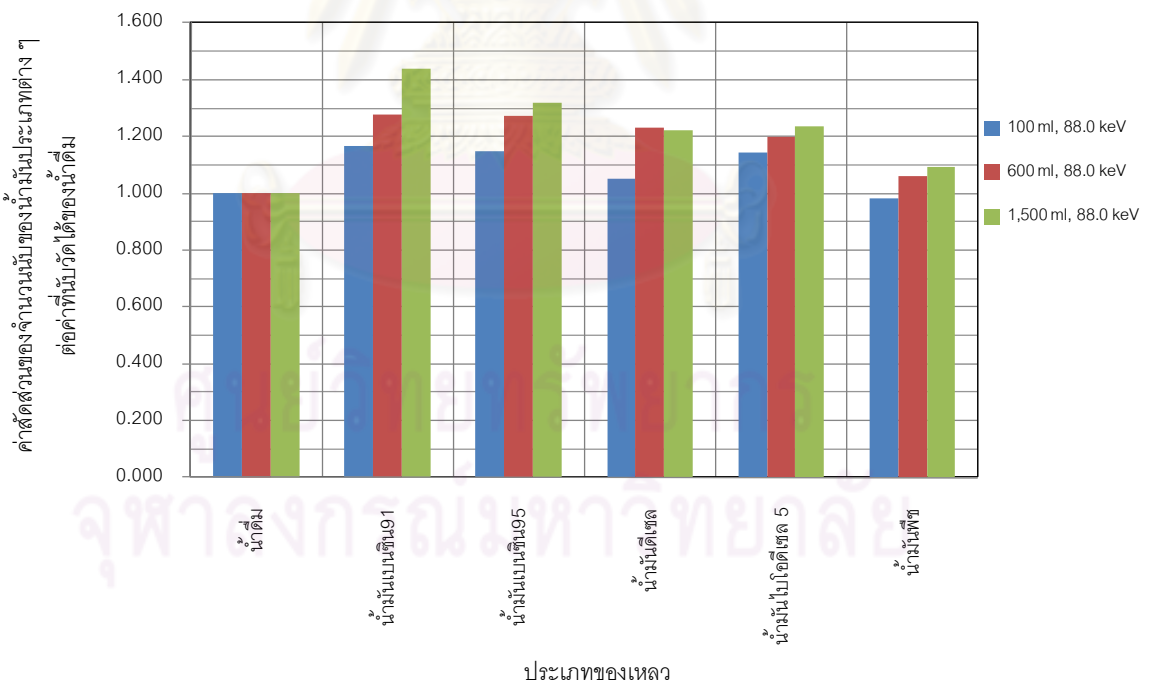
ในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 88.0 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 88 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.31 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับ

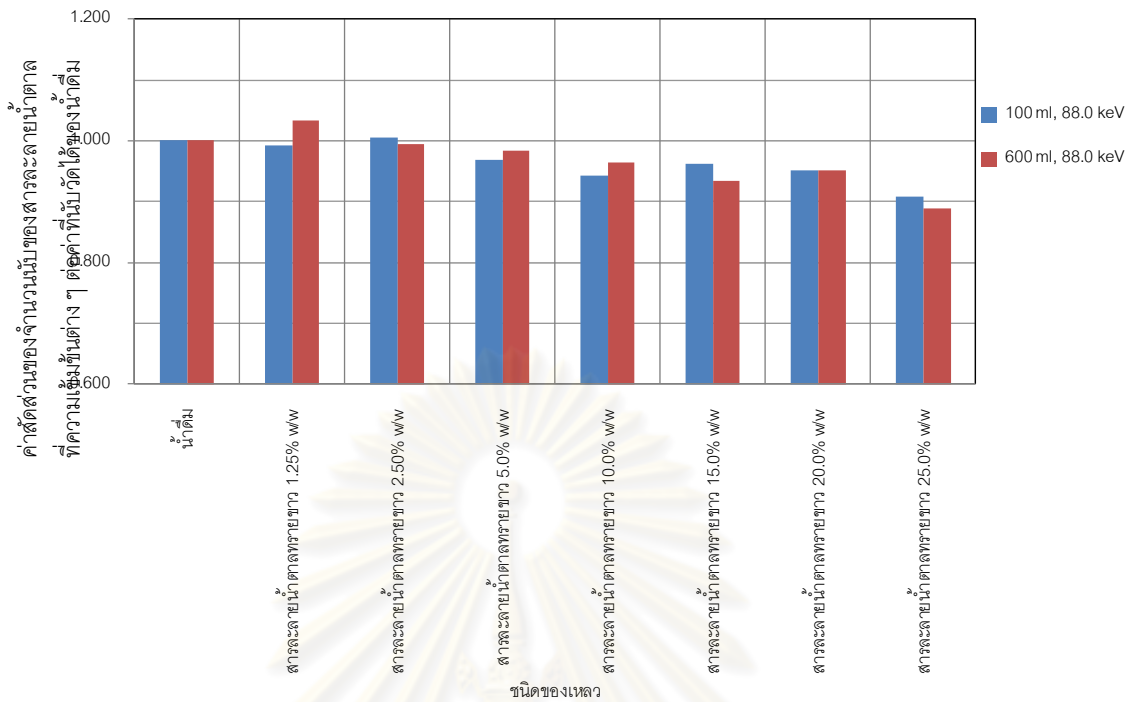
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 88 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.32 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของน้ำมันประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ

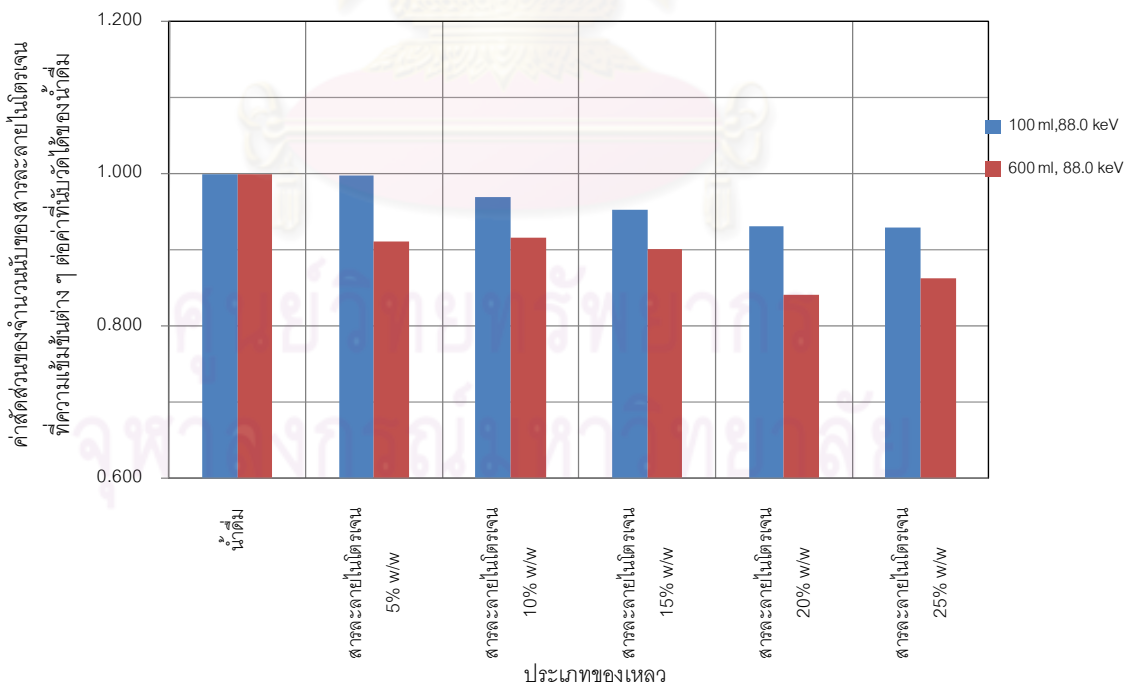
ในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร ที่ 88.0 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้น้ำกัมมันตรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 88 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.33 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

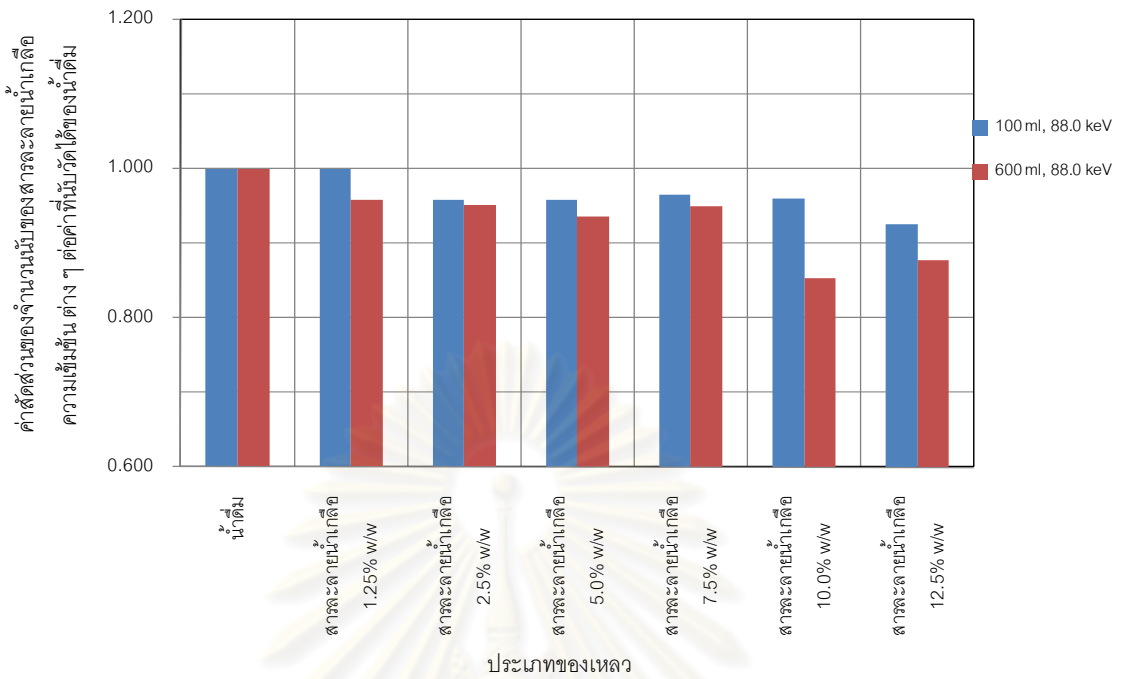
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้น้ำกัมมันตรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 88 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.34 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายไนโตรเจนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

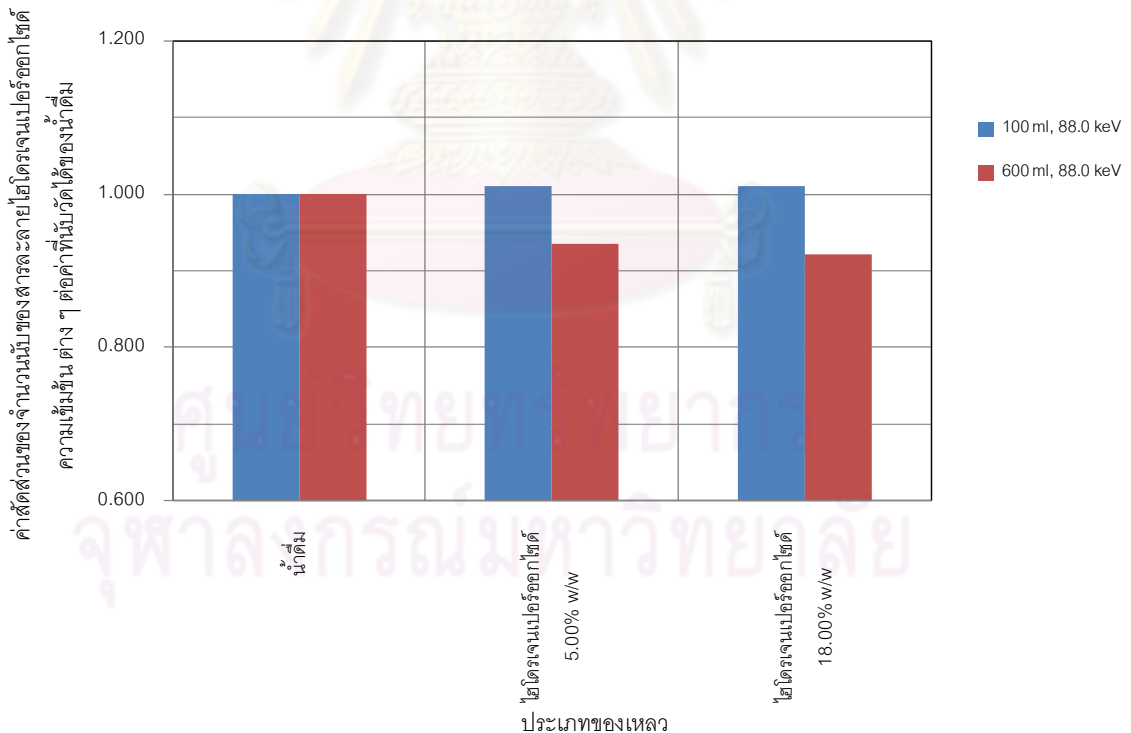
เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 88.0 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่างๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 88 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.25 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาของเหลวประเภทต่างๆ เปรียบเทียบกับน้ำดื่ม

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่างๆ กับน้ำดื่ม โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสี โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 88 KeV ระยะเวลานับวัด 600 วินาที ในภาชนะที่ขนาดความจุ 100 ml



รูปที่ 4.36 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เมื่อเทียบกับน้ำในภาชนะปิดปริมาตรความจุขนาด 100 และ 600 มิลลิลิตร ที่ 88.0 keV

4.2.3 การศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่รังสีแกมมาพลังงาน 22.1 keV เมื่อของเหลวบรรจุในภาชนะปิดชนิดต่าง ๆ

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่พลังงาน 22.1 keV เมื่อของเหลวบรรจุในภาชนะปิดชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิดชนิดต่าง ๆ จากการวิจัยมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่ได้จากการคำนวณ และพบว่าสามารถแยกแยะเอทานอล และน้ำมันเชื้อเพลิงออกจากของเหลวประเภทอื่นได้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของเอทานอล และน้ำมันเชื้อเพลิง (น้ำมันเบนซิน) ที่บรรจุในภาชนะปิดชนิดต่าง ๆ มีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของน้ำดื่ม, สารละลายน้ำตาลทรายขาว 25% โดยน้ำหนัก และสารละลายไนโตรเจน 25% โดยน้ำหนักอย่างชัดเจน

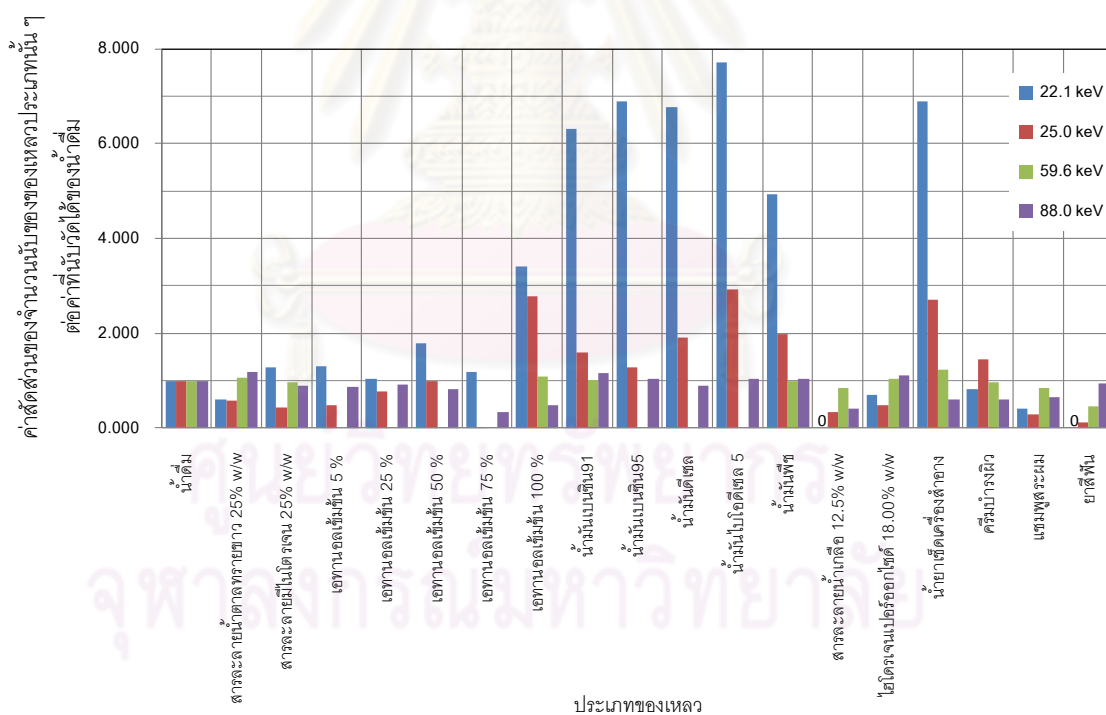
ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่รังสีแกมมาพลังงาน 22.1 keV เมื่อของเหลวบรรจุในภาชนะปิดชนิดต่าง ๆ

ประเภทของเหลว	μ (cm ⁻¹) (จากการคำนวณ)	μ (cm ⁻¹) (จากการวิจัย) ที่ภาชนะปิดชนิดต่าง ๆ					
		ขวดแก้ว ไซดา	ขวด PET	ขวดแก้ว สีชา	ขวด HDPE	กระป๋อง น้ำอัดลม	กล่อง นม
น้ำดื่ม	0.668	0.657	0.624	0.762	0.626	0.625	0.637
สารละลายน้ำตาล ทรายขาว 25% w/w	0.722	0.746	0.650	0.725	0.677	0.663	0.670
สารละลายมี ไนโตรเจน 25% w/w	0.701	0.654	0.627	0.695	0.667	0.639	0.648
เอทานอลความ เข้มข้น 100% v/v	0.367	0.367	0.366	0.403	0.394	0.371	0.376
น้ำมันเบนซิน	0.340	0.256	0.277	0.323	0.270	0.269	0.270

4.3 การจำแนกประเภทของของเหลวโดยใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีแกมมา

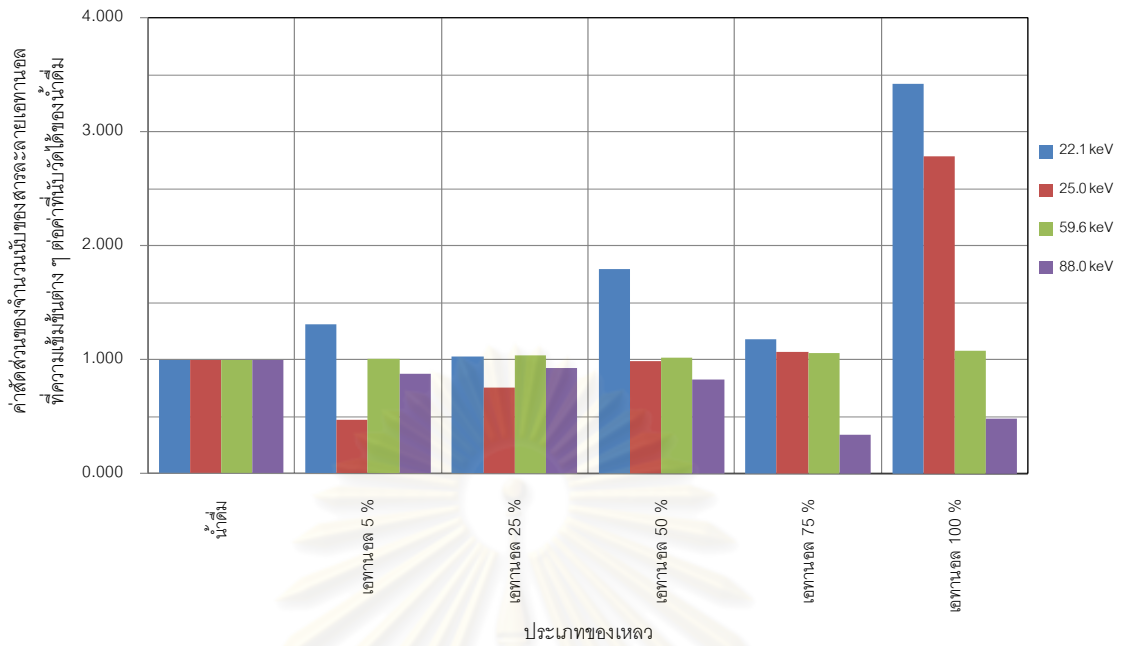
การศึกษาผลของพลังงานของต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้ทำการตรวจวัดที่มีผลต่อการกระเจิงกลับของรังสีแกมมาจากของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิด

ในการหาอัตราส่วนความเข้มข้นรังสีแกมมาที่กระเจิงกลับเมื่อเทียบกับน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.37 - 4.39 โดยในการวิจัยนี้ได้เลือกพิจารณาที่มุมกระเจิงที่ 135 องศา เวลารับวัด 1,000 วินาที ที่รังสีแกมมาพลังงาน 22.1, 25.0 และ 88.0 keV จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cd-109 และ 59.6 keV จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ในภาชนะปิดที่มีปริมาตรความจุ 600 มิลลิลิตร พบว่ารังสีแกมมาพลังงาน 22.1 keV สามารถกระเจิงกลับจากของเหลวประเภทน้ำมัน และสารไวไฟได้มากกว่าน้ำประมาณ 6 - 8 เท่า และความสามารถในการกระเจิงกลับลดลงเมื่อใช้รังสีแกมมาพลังงานสูงขึ้น เนื่องจากที่รังสีแกมมาพลังงานสูงจะสามารถทะลุผ่านของเหลวได้มากกว่าเกิดการกระเจิงกลับของรังสี สำหรับของเหลวประเภทอื่น ๆ เช่น เอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และน้ำมันไม่สามารถจำแนกความเข้มข้นของของเหลวประเภทนั้น ๆ และประเภทของเหลวได้



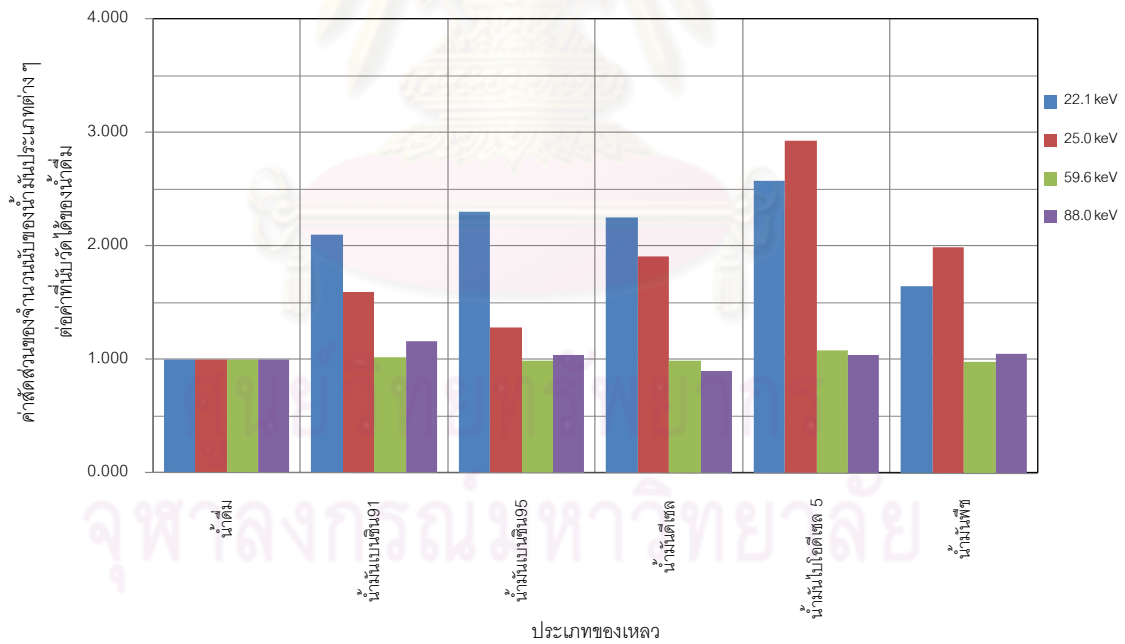
รูปที่ 4.37 อัตราส่วนความเข้มข้นรังสีแกมมาที่กระเจิงกลับเมื่อเทียบกับน้ำโดยเทคนิคการกระเจิงกลับที่มุม 135 องศา ที่พลังงาน 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม
 โดยใช้เทคนิคการกระเจิงกลับที่มุม 135 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 22 KeV ระยะเวลานับวัด 1,000 วินาที ในภาชนะที่มีความจุ 600 ml



รูปที่ 4.38 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่กระเจิงกลับของเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ
 โดยเทคนิคการกระเจิงกลับที่มุม 135 องศา ที่พลังงาน 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำมัน
 โดยใช้เทคนิคการกระเจิงกลับที่มุม 135 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Cd-109 ที่พลังงาน 22 KeV ระยะเวลานับวัด 1,000 วินาที ในภาชนะที่มีความจุ 600 ml

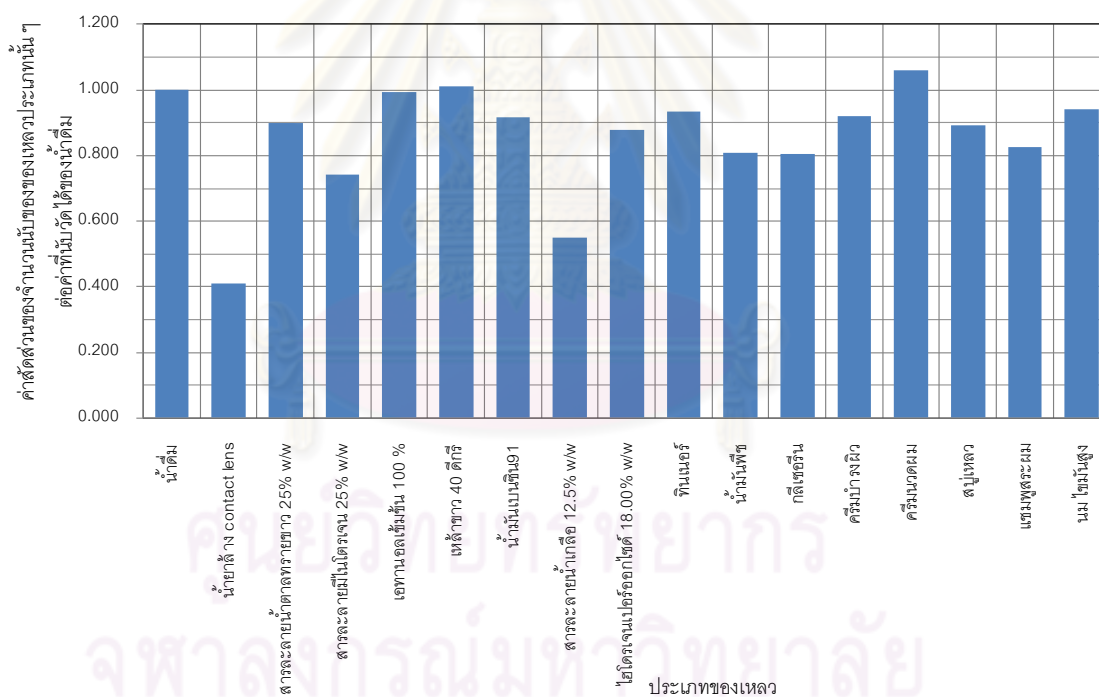


รูปที่ 4.39 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาที่กระเจิงกลับของน้ำมันประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ
 โดยเทคนิคการกระเจิงกลับที่มุม 135 องศา ที่พลังงาน 22.1, 25.0, 59.6 และ 88.0 keV

4.4 ผลของการศึกษาการจำแนกประเภทของของเหลวโดยใช้เทคนิคนิวตรอน

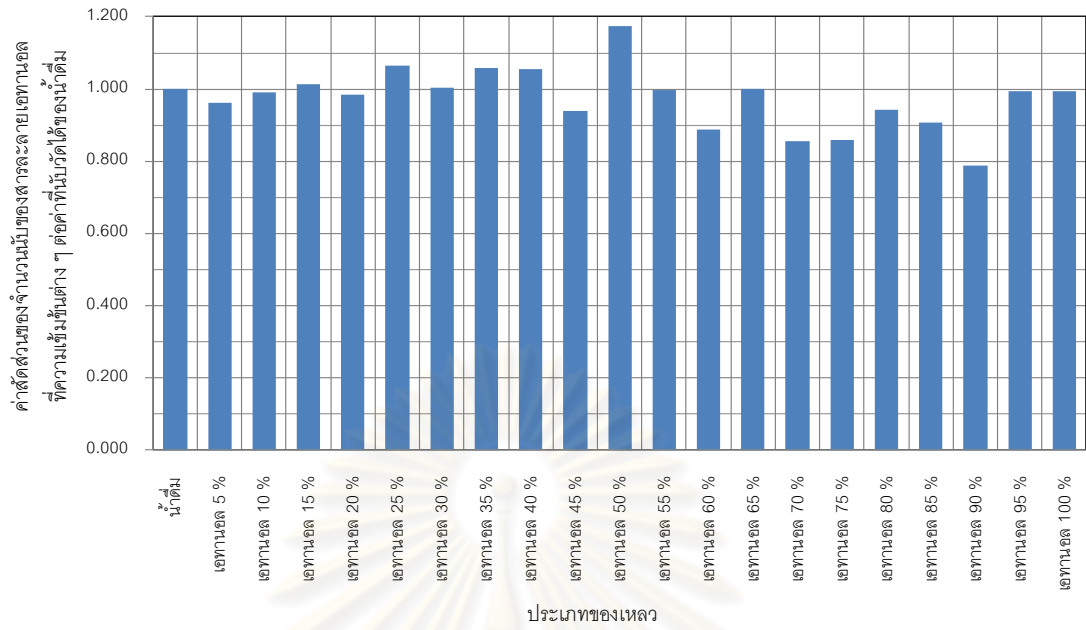
การศึกษาผลของนิวตรอนที่ทะลุผ่านของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิด

ในการหาอัตราส่วนของนิวตรอนที่ทะลุผ่านของเหลวเมื่อเทียบกับน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.40 – 4.42 โดยในการวิจัยนี้ได้เลือกพิจารณานิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน Am-241/Be ที่ทะลุผ่านภาชนะปิดที่มีปริมาตรความจุ 600 มิลลิลิตร ที่เวลานับวัด 1,000 วินาที พบว่าอัตราส่วนนิวตรอนที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำส่วนมากมีค่าน้อยกว่าน้ำ จากกราฟค่าอัตราส่วนของนิวตรอนที่ทะลุผ่านน้ำยาล้าง Contact len, สารละลายมีโนโตรเจน 25.00 % โดยน้ำหนัก และสารละลายน้ำเกลือ 12.50 % โดยน้ำหนัก มีค่าน้อยกว่าอัตราส่วนของนิวตรอนที่ทะลุผ่านน้ำประมาณ 0.4 – 0.75 เท่า แต่ของเหลวประเภทแอลกอฮอล์, สารที่มีองค์ประกอบของแอลกอฮอล์, น้ำมันเชื้อเพลิง และสารไวไฟ มีอัตราส่วนของนิวตรอนที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทนั้น ๆ ใกล้เคียงกับอัตราส่วนของนิวตรอนที่ทะลุผ่านน้ำมาก ทำให้ไม่สามารถจำแนกของเหลวแต่ละประเภทได้

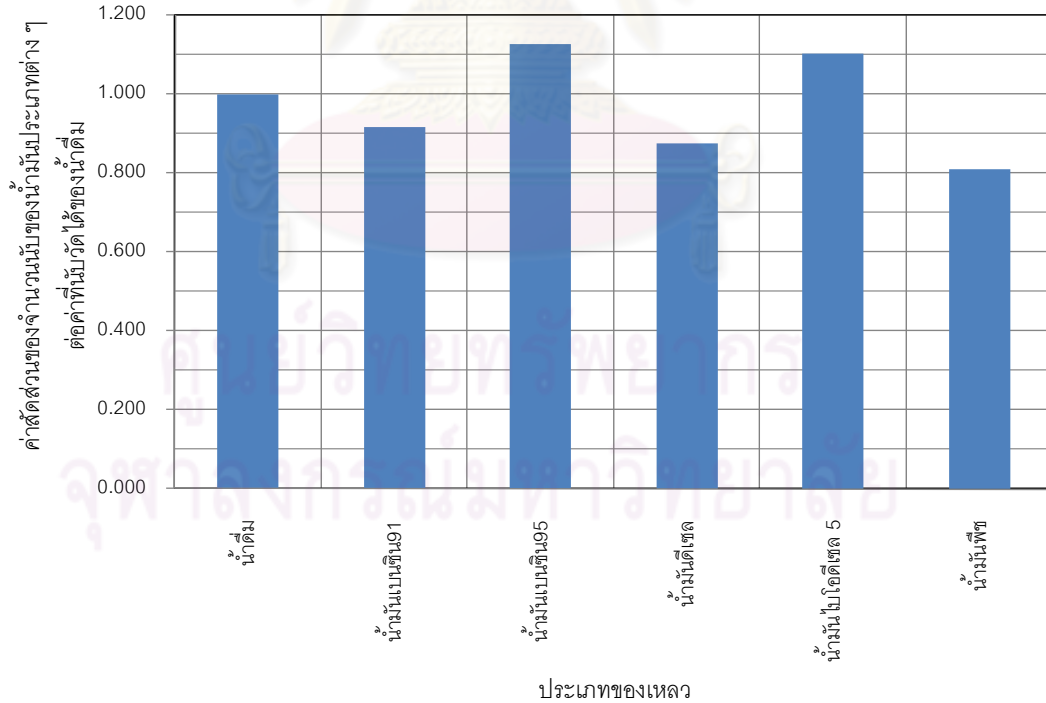


รูปที่ 4.40 อัตราส่วนนิวตรอนที่ทะลุผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ โดยใช้เทคนิคทะลุผ่านของนิวตรอน

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม
โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีนิวตรอน โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Am/Be ระยะเวลานับวัด 1,000 วินาที ในภาชนะที่มีความจุ 600 ml



รูปที่ 4.11 อัตราส่วนการไหลของเหลวที่ไหลผ่านภาชนะต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำดื่ม
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วน I ของของเหลวประเภทต่าง ๆ กับน้ำดื่ม
โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีนิวตรอน โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Am/Be ระยะเวลานับวัด 1,000 วินาที ในภาชนะที่มีความจุ 600 ml



รูปที่ 4.42 อัตราส่วนนิวตรอนที่ทะลุผ่านน้ำมันประเภทต่าง ๆ เมื่อเทียบกับน้ำ
โดยใช้เทคนิคทะลุผ่านของนิวตรอน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาเทคนิคนิวเคลียร์ที่สามารถจำแนกประเภทของของเหลว ซึ่งบรรจุในภาชนะได้โดยไม่ต้องเปิดขวด ได้ทำการทดลองส่งผ่านรังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ ได้แก่ 22.1, 25.0 และ 88.0 keV จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cd-109 และ 59.6 keV จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241 ผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่บรรจุในขวดพลาสติก

5.1.1 การพัฒนาเทคนิคนิวเคลียร์ที่สามารถจำแนกประเภทของของเหลว จากการใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาสามารถจำแนกประเภทของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิดได้อย่างชัดเจนมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีแกมมา และเทคนิคนิวตรอน

5.1.2 การใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมา โดยใช้รังสีแกมมาพลังงาน 22.1 keV สามารถจำแนกประเภทของเหลวที่บรรจุในภาชนะปิดได้อย่างชัดเจนมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้รังสีแกมมาที่พลังงาน 25.0, 59.6 และ 88.0 keV โดยความไวในการจำแนกประเภทของของเหลวลดลงเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติอาจไม่สามารถใช้รังสีแกมมาพลังงานต่ำกว่านี้ได้ เนื่องจากไม่สามารถทะลุผ่านความหนาของของเหลวที่ใช้ โดยแสดงอัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของเหลวบางประเภทเมื่อเทียบกับน้ำได้ ดังตารางที่ 5.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 อัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมาทะลุผ่านของเหลวบางประเภทเมื่อเทียบกับ
น้ำที่รังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ

พลังงาน (ต้นกำเนิดรังสี)	แอลกอฮอล์ 100 % v/v	น้ำมัน เบนซิน 91	ทินเนอร์	น้ำยาเช็ด เครื่องสำอาง	สารละลายน้ำตาล ทรายขาว 25.00 % w/w
22.1 KeV (¹⁰⁹ Cd)	4.83	8.26	4.95	7.93	0.81
25.0 KeV (¹⁰⁹ Cd)	2.50	4.40	3.01	4.13	0.82
59.6 KeV (²⁴¹ Am)	1.30	1.40	1.30	1.32	0.91
88.0 KeV (¹⁰⁹ Cd)	1.25	1.28	1.23	1.12	0.89

หมายเหตุ *สำหรับเวลานับรังสี 600 วินาที ในภาชนะปิดความจุ 600 มิลลิลิตร

5.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมา เมื่อเคลื่อนที่ผ่านของเหลวประเภทต่าง ๆ ที่ระดับพลังงานที่ 22.1 KeV ในภาชนะปิดขนาดความจุ 100, 600 และ 1,500 มิลลิลิตร จากการคำนวณ และการวิจัยมีค่าใกล้เคียงกัน

5.1.4 การใช้เทคนิคนิวตรอนในงานวิจัยนี้ไม่สามารถไม่สามารถจำแนกประเภทของเหลวได้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการวัดเทอร์มัลนิวตรอนที่ทะลุผ่านภาชนะบรรจุของเหลว แต่หากใช้การวัดเอพิเทอร์มัลนิวตรอนที่เข้าสู่หัววัด จะทำให้สามารถจำแนกประเภทของของเหลวได้ชัดเจนมากขึ้น เนื่องจากเอพิเทอร์มัลนิวตรอนจะลดระดับพลังงานลงเป็นเทอร์มัลนิวตรอนเมื่อเจออะตอมของไฮโดรเจนในของเหลว ซึ่งของเหลวแต่ละประเภทมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบต่างกัน

5.1.5 ข้อจำกัดของระบบโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาของงานวิจัยนี้ คือ ค่าความหนาสูงสุดของภาชนะที่บรรจุของเหลวที่ใช้กับระบบวัดไม่ควรเกิน 0.411 ซม. (เป็นความหนามากที่สุดของภาชนะบรรจุของเหลวที่ใช้ทั่วไป) และความหนาสูงสุดของของเหลวที่ใช้กับระบบวัดไม่ควรเกิน 7.313 ซม. เนื่องจากหากมีความหนาเกินค่าความหนาสูงสุดดังกล่าวจะทำให้ไม่สามารถวัดความเข้มรังสีแกมมาโดยใช้ระบบวัดโดยเทคนิคการส่งผ่านรังสีแกมมาของงานวิจัยนี้ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ภาชนะปิดที่บรรจุของเหลวมีความหนา ชนิดภาชนะ และพื้นผิวของภาชนะต่างกัน การวัดการส่งผ่านรังสีแกมมาควรวัดที่ตำแหน่งส่วนบนภาชนะที่ไม่มีของเหลวเป็น I_0 และควรวัดตำแหน่งของภาชนะหลาย ๆ ตำแหน่ง, ใช้หลายหัววัดวางหลาย ๆ ตำแหน่งรอบทิศทางของภาชนะบรรจุของเหลว หรือออกแบบระบบให้หัววัดสามารถเคลื่อนที่วัดรอบภาชนะบรรจุของเหลว จะทำให้การตรวจแยกประเภทของของเหลวมีความถูกต้อง และรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

5.2.2 ในการพัฒนาระบบนี้สามารถใช้ต้นกำเนิดรังสีที่เป็นแบบจุด (Point Source) หลาย ๆ พลังงานร่วมกันในการตรวจวัด จะทำให้การตรวจแยกประเภทของของเหลวมีความถูกต้อง และรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

5.2.3 อาจลดความคลาดเคลื่อนในการวัด โดยใช้หัววัดที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้

5.2.4 อาจใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ เพราะความเข้มของลำรังสีสูงมากจะทำให้ลดเวลาในการวัดได้มาก

5.2.5 อาจใช้เทคนิคนิวตรอน โดยการวัดเอพิเทอร์มัลนิวตรอนที่ทะลุผ่านภาชนะบรรจุของเหลวเข้าสู่หัววัดจะทำให้จำแนกประเภทของเหลวได้ดี และชัดเจนขึ้น

5.2.6 เครื่องตรวจแยกประเภทของของเหลวในงานวิจัยนี้ไม่มีผลกระทบทางรังสีต่อสิ่งแวดล้อม และต่อผู้ใช้เครื่อง เนื่องจากเครื่องถูกออกแบบเป็นระบบปิดเพื่อวางขวดหรือภาชนะที่บรรจุของเหลวในเครื่อง ดังนั้น เครื่องนี้จึงมีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งรังสีที่ให้มีพลังงานต่ำ จึงไม่สามารถทะลุผ่านออกมาภายนอกเครื่องได้

5.2.7 ระบบที่ใช้ในการวิจัยนี้สามารถจะเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับใช้ในการตรวจแยกประเภทของของเหลวโดยไม่ต้องเปิดขวด เพื่อความปลอดภัยในการบินในอนาคตได้

รายการอ้างอิง

- [1] ชันทอง สุนทรภา. ความปลอดภัยในกระบวนการเคมี. กรุงเทพมหานคร:สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [2] Dennis, P. N. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical and related facilities. 1sted. New Jersey: Noyes Publications, 1996.
- [3] Andy, B. Contraband detection by fast neutron scattering Paper presented at the 2nd National Nuclear Technology Conference, NAC, South Africa, 13-15 May 2001.
- [4] Tsahi, G., et al. Seaved – nonintrusive inspection of maritime vessels for concealed drugs, Journal of Energetic Materials, Vol. 4, 1986.
- [5] Knoll, F. (1999). Radiation Detection and Measurement. 3rd ed. John Wiley& Sons, Inc.
- [6] ประดิษฐ์ มีสุข. เคมีอินทรีย์เบื้องต้น. สงขลา:โรงพิมพ์มงคลการพิมพ์สงขลา, 2549.
- [7] Curtiss, L.F. Introduction to Neutron Physics. New Delhi:Affiliated East – West Press, 1959.
- [8] John, R.L. Introduction to Nuclear Engineering. 2nd ed. Massachusetts: Addison-Wesley, 1983.
- [9] จรัญ พรหมสุวรรณ. ปฏิกิริยานิวเคลียร์เชิงทฤษฎี. พิษณุโลก : ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2540.
- [10] Gilmore, G.,and John, D.H. Practical Gamma-Ray Spectrometry. Chichester: John Wiley & sons, 1995.
- [11] Cor, P.D., Victor, R.B.,and Carel, W.E. Van Eijk DUNBLAD: The Delft University Neutron Landmine Detection. the Dutch Ministry of Defence Manuscript recived March 20, 2002.
- [12] Shiro, T.,and Otomura, S. Locating the Positions of Reinforcing Bars in Reinforced Concrete using Backscattering Gamma Rays. Applied Radiation and Isotopes 41 ,10/11 (1990): 1013-1018.
- [13] Doczi, R., Kiraly, B., and Csikai, J. Landmine detection by neutron methods contact No. IRMM/ST/2001-248”14-CCR 478519(2001)

- [14] Esam, M.A.,and Hussein, E.J., Waller Landmine Detection: The Problem and the Challenge Applied Radiation and Isotopes, 53 (2000) : 557-563
- [15] อ่าง เมธาศิริ. ฟิสิกส์แผนใหม่: ความรู้พื้นฐานสำหรับนักฟิสิกส์. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

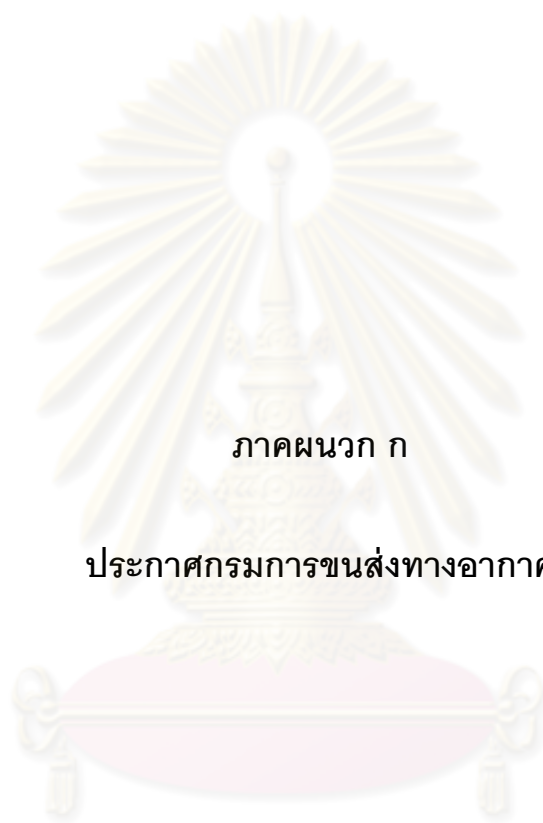


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ประกาศกรมการขนส่งทางอากาศ

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประกาศกรมการขนส่งทางอากาศ



ประกาศกรมการขนส่งทางอากาศ

เรื่อง ข้อกำหนดเกี่ยวกับการนำของเหลว เจล สเปรย์ หรือวัตถุและสารอื่นๆ
ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกันขึ้นในห้องโดยสารอากาศยาน

โดยที่ปัจจุบันเกิดสถานการณ์ภัยคุกคามด้านการบินพลเรือนจากวัตถุระเบิดที่อยู่ในรูปของเหลว เจล สเปรย์ หรือวัตถุและสารอื่นๆ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน และองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (International Civil Aviation Organization) ได้กำหนดแนวทางการควบคุมรักษาความปลอดภัยสำหรับการตรวจของเหลว เจล สเปรย์ หรือวัตถุและสารอื่นๆ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกันเพื่อให้ประเทศสมาชิกปฏิบัติ จึงเป็นกรณีที่มีความจำเป็นเพื่อประโยชน์ในการรักษาความปลอดภัยจากภัยคุกคามด้านการบินพลเรือน อธิบดีกรมการขนส่งทางอากาศจึงออกประกาศไว้ดังต่อไปนี้

ข้อ ๑. ในประกาศนี้

“ของเหลว เจล สเปรย์ หรือวัตถุและสารอื่นๆ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน” หมายความว่า ของเหลว เจล สเปรย์ หรือวัตถุและสารอื่นๆ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ทุกประเภทที่เป็นสัมภาระติดตัวผู้โดยสาร

“ผู้โดยสาร” หมายความว่า ผู้โดยสารและเจ้าหน้าที่ประจำอากาศยานที่เดินทางไปกับอากาศยานซึ่งเดินทางออกจากสนามบินในประเทศไทยในเที่ยวบินประจำและไม่ประจำหรือเที่ยวบินส่วนบุคคลทั้งภายในประเทศและระหว่างประเทศ ไม่ว่าจะเป็เที่ยวบินที่เริ่มต้นออกเดินทางจากสนามบินนั้น เที่ยวบินที่รับผู้โดยสารจากเที่ยวบินอื่นที่สนามบินนั้น หรือเที่ยวบินที่ลงจอดที่สนามบินนั้นโดยให้ผู้โดยสารเข้าไปในอาคารผู้โดยสาร

ข้อ ๒. ห้ามผู้โดยสารนำของเหลว เจล สเปรย์ หรือวัตถุและสารอื่นๆ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกันขึ้นในห้องโดยสารอากาศยาน เว้นแต่จะได้ปฏิบัติตามหลักเกณฑ์และวิธีการ ดังต่อไปนี้

๒.๑ ของเหลว เจล สเปรย์ หรือวัตถุและสารอื่นๆ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ต้องบรรจุในภาชนะซึ่งมีปริมาณความจุไม่เกิน ๑๐๐ มิลลิลิตร (หรือปริมาณที่เทียบเท่ากันในหน่วยวัดปริมาตรอื่น) สำหรับภาชนะซึ่งมีปริมาณความจุเกิน ๑๐๐ มิลลิลิตร จะนำขึ้นในห้องโดยสารอากาศยานไม่ได้ แม้ว่า จะบรรจุของเหลว เจล สเปรย์ หรือวัตถุและสารอื่นๆ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกันไว้เพียงเล็กน้อย

- ๒ -

๒.๒ ภาชนะบรรจุของเหลว เจล สเปรย์ หรือวัตถุและสารอื่นๆ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ตาม ๒.๑ ต้องใส่รวมไว้ในถุงพลาสติกใสที่มีปริมาณความจุไม่เกิน ๑ ลิตร และสามารถปิดผนึกได้ (Transparent Re-Sealable Plastic Bag) โดยต้องปิดผนึกปากถุงให้เรียบร้อย

๒.๓ ผู้โดยสารต้องแสดงถุงพลาสติกใส ตาม ๒.๒ เพื่อให้เจ้าหน้าที่ทำการตรวจ ณ บริเวณจุดตรวจคัดกรองเพื่อการรักษาความปลอดภัย (Security Screening Point) โดยจะต้องแยกถุงพลาสติกใสออกจากสัมภาระติดตัวอื่นๆ รวมทั้งเสื้อคลุมหรือแจ็คเก็ต และเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Laptop Computer)

ข้อ ๓. ผู้โดยสารสามารถนำถุงพลาสติกใส ตาม ๒.๒ ขึ้นในห้องโดยสารอากาศยานได้เพียงคนละ ๑ ถุง โดยไม่นับรวมอยู่ในจำนวนสัมภาระติดตัวที่ผู้ดำเนินการเดินอากาศแต่ละรายได้ประกาศอนุญาตให้นำขึ้นไปในห้องโดยสารอากาศยานของตน


ข้อ ๔. ของเหลว เจล สเปรย์ หรือวัตถุและสารอื่นๆ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ประเภท ยา และนมหรืออาหารสำหรับเด็กทารก ในปริมาณที่เหมาะสม ไม่ต้องปฏิบัติตามตามหลักเกณฑ์และวิธีการ ตามข้อ ๒. แต่ต้องแสดงให้เจ้าหน้าที่ ณ จุดตรวจคัดกรองเพื่อการรักษาความปลอดภัย (Security Screening Point) ตรวจสอบ

ข้อ ๕. ของเหลว เจล สเปรย์ หรือวัตถุและสารอื่นๆ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ซึ่งผู้โดยสารซื้อจากร้านค้าปลอดอากร (Duty Free Shops) ภายในสนามบินหรือบนอากาศยาน ไม่ต้องปฏิบัติตามหลักเกณฑ์และวิธีการ ตามข้อ ๒. แต่จะต้องบรรจุไว้ในถุงพลาสติกใสปิดผนึกปากถุง โดยต้องไม่มีร่องรอยการเปิดปากถุงหลังจากการซื้อ และมีหลักฐานแสดงว่าได้ซื้อ ณ วันที่ผู้โดยสารนั้นเดินทางไม่ว่าจะเป็นผู้โดยสารปกติหรือผู้โดยสารเปลี่ยนลำอากาศยาน (Transfer Passenger)

เพื่อประโยชน์ของผู้โดยสาร ก่อนซื้อสินค้า ผู้โดยสารต้องตรวจสอบข้อมูลจากร้านค้าปลอดอากร (Duty Free Shops) ภายในสนามบินหรือบนอากาศยาน เกี่ยวกับกฎเกณฑ์การปฏิบัติต่อของเหลว เจล สเปรย์ หรือวัตถุและสารอื่นๆ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ณ สนามบินปลายทางของการเดินทางและสนามบินทุกแห่งที่ผู้โดยสารต้องลงจากอากาศยานเพื่อแวะพักหรือเปลี่ยนลำอากาศยาน

ข้อ ๖. ให้ใช้ประกาศนี้ ตั้งแต่วันที่ ๑ มิถุนายน พ.ศ. ๒๕๕๐ เป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ ๘ พฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๕๐



(นายชัยศักดิ์ อังศ์สุวรรณ)
อธิบดีกรมการขนส่งทางอากาศ



ภาคผนวก ข

Prepare for Takeoff By

Transportation Security Administration

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Explosive Materials

Item	Carry-on	Checked
Blasting Caps	No	No
Dynamite	No	No
Fireworks	No	No
Flares (in any form)	No	No
Hand Grenades	No	No
Plastic Explosives	No	No
Realistic Replicas of Explosives	No	No

Flammable Items

Item	Carry-on	Checked
Aerosol - Any except for personal care or toiletries in limited quantities	No	No
Fuels - Including cooking fuels and any flammable liquid fuel	No	No
Gasoline	No	No
Gas Torches	No	No
Lighter Fluid	No	No
Common Lighters - Lighters without fuel are permitted in checked baggage. Lighters with fuel are prohibited in checked baggage, unless they adhere to the Department of Transportation (DOT) exemption, which allows up to two fueled lighters if properly enclosed in a DOT approved case. If you are uncertain as to whether your lighter is prohibited, please leave it at home.	Yes	No
Torch Lighters	No	No
Strike-anywhere Matches - Except one book of safety (non-strike anywhere) matches is permitted as carry-on items, but all matches are prohibited in checked baggage.	No	No
Flammable Paints - See Other Items for non-flammable paints	No	No
Turpentine and Paint Thinner	No	No
Realistic Replicas of Incendiaries	No	No

NOTE: There are other hazardous materials that are regulated by the FAA. For more information visit www.faa.gov.

Disabling Chemicals & Other Dangerous Items

Item	Carry-on	Checked
Chlorine for Pools and Spas	No	No
Small compressed gas cartridges - Up to 2 in life vests and 2 spares	Yes	Yes
Fire extinguishers and other compressed gas cylinders	No	No
Liquid Bleach	No	No
Spillable Batteries - Except those in wheelchairs	No	No
Spray Paint	No	No
Tear Gas	No	No

NOTE: There are other hazardous materials that are regulated by the FAA. This information is summarized at www.faa.gov.

Other Items

Item	Carry-on	Checked
Gel-type candles	No	Yes
Gel shoe inserts - Gel shoe inserts are not permitted, but shoes constructed with gel heels are allowed and must be removed and screened.	No	Yes
Non-flammable liquid, gel, or aerosol paint	Yes - 3 oz. or smaller container	Yes
Flammable liquid, gel, or aerosol paint	No	No
Snow globes and like decorations regardless of size or amount of liquid inside, even with documentation.	No	Yes

Updated: March 2009



Transportation Security Administration
www.TSA.gov



Prepare for Takeoff Prohibited Items List

Transportation Security Administration

Prohibited Items List

The prohibited items list is not intended to be all-inclusive and is updated as necessary. To ensure traveler's security, transportation security officers (TSOs) may determine that an item not on the prohibited items chart is prohibited. In addition, the TSO may also determine that an item on the permitted chart is dangerous and therefore may not be brought through the security checkpoint.

Please pay careful attention to the "Notes" included at the bottom of each section - they contain important information about restrictions and exceptions.

The chart applies to flights originating within the United States. Please check with your airline or travel agent for restrictions at destinations outside of the United States.

Sharp Objects

Item	Carry-on	Checked
Box Cutters	No	Yes
Ice Axes/Ice Picks	No	Yes
Knives - Except for plastic or round bladed butter knives	No	Yes
Meat Cleavers	No	Yes
Razor-Type Blades - Such as box cutters, utility knives, razor blades not in a cartridge, but excluding safety razors.	No	Yes
Sabers	No	Yes
Scissors - Metal with pointed tips and blades shorter than four inches	Yes	Yes
Swords	No	Yes

NOTE: Any sharp objects in checked baggage should be sheathed or securely wrapped to prevent injury to baggage handlers and inspectors.

Sporting Goods

Item	Carry-on	Checked
Baseball Bats	No	Yes
Bows and Arrows	No	Yes
Cricket Bats	No	Yes
Golf Clubs	No	Yes
Hockey Sticks	No	Yes
Lacrosse Sticks	No	Yes
Pool Cues	No	Yes
Ski Poles	No	Yes
Spear Guns	No	Yes

Guns & Firearms

Item	Carry-on	Checked
Ammunition - Check with your airline or travel agent to see if ammunition is permitted in checked baggage on the airline you are flying. If ammunition is permitted, it must be declared to the airline at check-in. Small arms ammunitions for personal use must be securely packed in fiber, wood or metal boxes or other packaging specifically designed to carry small amounts of ammunition. Ask about limitations or fees, if any, that apply.	No	Yes
BB guns	No	Yes
Compressed Air Guns (To include paintball markers) - Carried in checked luggage without compressed air cylinder attached.	No	Yes
Firearms - Firearms carried as checked baggage MUST be unloaded, packed in a locked hard-sided container, and declared to the airline at check-in.	No	Yes
Flare Guns - May be carried as checked baggage, but MUST be unloaded, packed in a locked hard-sided container, and declared to the airline at check-in.	No	Yes
Flares	No	No
Gun Lighters	No	Yes
Gun Powder - Including black powder and percussion caps	No	No
Parts of Guns and Firearms	No	Yes
Pellet Guns	No	Yes
Realistic Replicas of Firearms	No	Yes
Starter Pistols	No	Yes

Item	Carry-on	Checked
Axes and Hatchets	No	Yes
Cattle Prods	No	Yes
Crowbars	No	Yes
Hammers	No	Yes
Drills and drill bits - Including cordless portable power drills	No	Yes
Saws - Including cordless portable power saws	No	Yes
Tools - Greater than seven inches in length	No	Yes
Tools - Seven inches or less in length	Yes	Yes
Screwdrivers - Seven inches or less in length	Yes	Yes
Wrenches and Pliers - Seven inches or less in length	Yes	Yes

Martial Arts & Self Defense Items

Item	Carry-on	Checked
Billy Clubs	No	Yes
Black Jacks	No	Yes
Brass Knuckles	No	Yes
Kubaton	No	Yes
Mace/Pepper Spray - One 1.5 ml or 4 fl. oz. container of mace or pepper spray is permitted in checked baggage provided it is equipped with a safety mechanism to prevent accidental discharge.	No	Yes
Martial Arts Weapons	No	Yes
Night Sticks	No	Yes
Nunchakus	No	Yes
Stun Guns/Shocking Devices	No	Yes
Throwing Stars	No	Yes

NOTE: Any sharp objects in checked baggage should be sheathed or securely wrapped to prevent injury to baggage handlers and Security Officers.

Tools

Item	Carry-on	Checked
Axes and Hatchets	No	Yes
Cattle Prods	No	Yes
Crowbars	No	Yes
Hammers	No	Yes
Drills and drill bits - Including cordless portable power drills	No	Yes
Saws - Including cordless portable power saws	No	Yes
Tools - Greater than seven inches in length	No	Yes
Tools - Seven inches or less in length	Yes	Yes
Screwdrivers - Seven inches or less in length	Yes	Yes
Wrenches and Pliers - Seven inches or less in length	Yes	Yes

NOTE: Any sharp objects in checked baggage should be sheathed or securely wrapped to prevent injury to baggage handlers and Security Officers.

NOTE: Check with your airline or travel agent to see if firearms are permitted in checked baggage on the airline you are flying. Ask about limitations or fees, if any, that apply.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเหมือนฝัน เขี่ยมศิริ เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2525 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์) จากคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปี พ.ศ. 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (นิเวศวิทยร์เทคโนโลยี) ที่ภาควิชานิเวศวิทยร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2550 ปัจจุบันปฏิบัติหน้าที่ในตำแหน่ง ผู้ช่วยนักวิจัย แผนกวิจัยและพัฒนา กองพลังงานทดแทน กรมการพลังงานทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร



ศูนย์วิทยพักร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย