

การเตรียมโบรมีน-82 ในรูปของโบรโมเบนซีนสำหรับใช้เป็นสารรังสีติดตาม



นายธเนศ ดวงตา

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

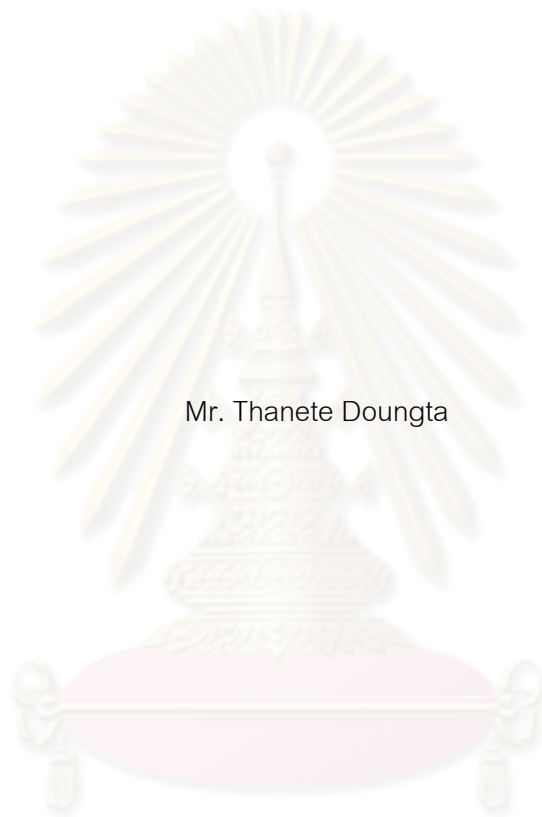
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF BROMINE-82 IN BROMOBENZENE FORM
TO BE USED AS A RADIOTRACER



Mr. Thanete Doungta

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

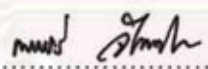
| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การเตรียมโบรมีน-82 ในรูปของโบรมเบนซีนสำหรับใช้เป็นสารรังสีติดตาม |
| โดย | นายธเนศ ดวงตา |
| สาขาวิชา | นิวเคลียร์เทคโนโลยี |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | นายสิริพล เชื้ออินตะ |


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนირงวงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(นายสิริพล เชื้ออินตะ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริรูปถัมภ์)

ธเนศ ดวงตา : การเตรียมโบรมีน-82 ในรูปของโบรมเบนซีนสำหรับใช้เป็นสารรังสีติดตาม. (PREPARATION OF BROMINE-82 IN BROMOBENZENE FORM TO BE USED AS A RADIOTRACER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: นายสิริพล เชื้ออินต๊ะ, 58 หน้า.

สารรังสีติดตามโบรมีน-82 (^{82}Br) ในรูปของโบรมเบนซีน สามารถเตรียมได้ด้วยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาการไหลและการผสมในอุตสาหกรรมน้ำมัน สารอินทรีย์ ^{82}Br มีครึ่งชีวิต 35.30 ชั่วโมง เตรียมโดยการใช้พารา-ไดโบรมเบนซีนเป็นสารตั้งต้น นำไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์เคสิลียร์ที่มีนิวตรอนฟลักซ์เท่ากับ 10^{12} n/cm².s เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นละลายสารตั้งต้นที่อบรังสีเสร็จแล้วด้วยก๊าซโซลีนเพื่อสำหรับใช้เป็นสารรังสีติดตาม โดยทำการฉีดสารรังสีติดตามเข้าไปในระบบน้ำมันที่มีการติดตั้งท่อและถังน้ำมัน ทำการตรวจวัดสารรังสีติดตามด้วยหัววัดรังสีแบบเรืองรังสีที่เชื่อมต่อกับระบบบันทึกข้อมูลและคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการบันทึกผลและประมวลผล จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้สารรังสีโบรมีนที่เตรียมขึ้นในการศึกษาการไหลและศึกษาการผสมมีความน่าเชื่อถือและมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารติดตามในกระบวนการทางอุตสาหกรรมน้ำมันและอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ตลอดจนอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้อีกด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา...นิวเคลียร์เทคโนโลยี..... ลายมือชื่อนิสิต..... สหศักดิ์.....
สาขาวิชา...นิวเคลียร์เทคโนโลยี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... มุขสิริพล.....
ปีการศึกษา...2553..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม..... สหศักดิ์.....

5270330121: MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : BROMINE-82 / RADIOTRACER / NEUTRON ACTIVATION

THANETE DOUNGTA: PREPARATION OF BROMINE-82 IN BROMOBENZENE FORM TO BE USED AS A RADIOTRACER. ADVISOR: ASSOC.PROF. NARES CHANKOW, CO-ADVISOR: SIRIPOL CHEREINTA, 58 pp.

Bromine-82 (⁸²Br) radiotracer in bromobenzene form was prepared by neutron activation for a purpose of applying to oil industrial for study of flow and mixing. Organic ⁸²Br radioactive tracer, half-life 35.30 hours, was prepared by bombarding of inactive p-dibromobenzene, target material, with a neutron flux 10¹² n/cm².s for 12 hour in the nuclear reactor. After irradiated target was dissolved in gasoline to be used as a radiotracer, the tracer was injection to a close circuit oil circulating system including tank and oil piping setup. The tracer was monitored using collimated scintillation detectors connected to a data acquisition system and a computer for data recording and transmitted the result. The experiment results show a reliability of the prepared radiobromine used in the flow rate study and mixing study. This radiotracer can be probably applied to oil industrial processes and petrochemical industry plant as well as other industry plants.



Department : ..Nuclear Technology.....

Student's Signature *Thanete Doungta*

Field of Study : ..Nuclear Technology.....

Advisor's Signature *Nares Chankow*

Academic Year : 2010.....

Co-advisor's Signature *Siripone Chereinta*

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้เชี่ยวชาญทางด้านนิเวศศาสตร์ นายสิริพล เชื้ออินตะ ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับข้อเสนอแนะและให้คำปรึกษาที่ดีในการทำวิทยานิพนธ์

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์ ประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปลัมภ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ ผู้ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ตรวจสอบและให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณผู้ให้ทุนสนับสนุนในโครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ให้เงินสนับสนุนงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อทองสา ดวงตา และ คุณแม่หมูน ดวงตา ที่ให้กำลังใจตลอดในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณคุณนินนาท วีรวัฒน์ และ คุณจตุพล แสงสุริยัน ผู้บังคับบัญชาที่ให้โอกาสไปศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษาพร้อมนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ ศูนย์ไอโซโทปรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือกันมาตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| บทที่ 1. บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 3 |
| 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 3 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| 1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| บทที่ 2. ทฤษฎี..... | 7 |
| 2.1 สารรังสีติดตาม (Radiotracer)..... | 7 |
| 2.2 ลักษณะที่ต้องการของสารรังสีติดตาม (Basic requirements of a Radiotracer)..... | 7 |
| 2.3 การเลือกสารรังสีติดตาม (Selection of radiotracer)..... | 8 |
| 2.4 โบรมีน-82 (Br-82)..... | 11 |
| 2.5 การเตรียม Br-82 ในรูปของโบรมобенซีน (Bromobenzene)..... | 15 |
| 2.6 การประยุกต์ใช้สารรังสีติดตามในอุตสาหกรรม..... | 18 |
| 2.6.1 การใช้สารรังสีติดตามในการวัดการไหล (Measurement of flow using radioactive tracers)..... | 19 |
| 2.6.1.1 Pulse Velocity Method หรือ Peak-to-Peak Method. | 19 |
| 2.6.1.2 Tracer Dilution Method..... | 20 |
| 2.6.1.2.1 Total Count Method..... | 20 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 2.6.1.2.2 | Constant-rate Injection Method..... | 22 |
| 2.6.2 | การหาเวลาการผสม (Determination of mixing time)..... | 22 |
| 2.6.3 | การตรวจสอบการรั่วไหล (Leak Test)..... | 23 |
| 2.6.3.1 | การวัดหาการรั่วไหลของทางผ่าน (By Pass) | 23 |
| 2.6.3.2 | การหารอยรั่วของท่อหรือถังที่ฝังไว้ใต้ดิน (Underground buried pipe or Tank) | 25 |
| บทที่ 3. | วิธีดำเนินการวิจัย..... | 27 |
| 3.1 | วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... | 27 |
| 3.2 | สารเคมี..... | 28 |
| 3.3 | วิธีดำเนินการวิจัย..... | 28 |
| 3.3.1 | การเตรียมวัสดุอุปกรณ์สำหรับอาบรังสีในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์... | 28 |
| 3.3.2 | การเตรียม Br-82 ในรูปของโบรมีนเบนซีน..... | 29 |
| 3.3.3 | ทดสอบคุณสมบัติของสารละลายอินทรีย์ Br-82..... | 29 |
| 3.3.3.1 | การหาความบริสุทธิ์ทางนิวไคลด์ของ Br-82..... | 29 |
| 3.3.3.2 | การหาการหาความแรงรังสีของ Br-82..... | 30 |
| 3.3.3.3 | การทดสอบการผสมกับน้ำมัน..... | 30 |
| 3.3.4 | การทดลองในห้องปฏิบัติการทดลอง..... | 32 |
| 3.3.4.1 | การทดลองการหาเวลาที่น้อยที่สุดในการผสม..... | 32 |
| 3.3.4.2 | การทดลองการหาอัตราการไหล..... | 33 |
| บทที่ 4. | ผลการวิจัย..... | 35 |
| 4.1 | ผลการเตรียมสารรังสี Br-82 ในรูปของโบรมีนเบนซีน..... | 35 |
| 4.2 | ผลการทดสอบคุณสมบัติของสารละลายอินทรีย์ Br-82..... | 35 |
| 4.2.1 | ผลการหาความบริสุทธิ์ทางนิวไคลด์ของ Br-82..... | 35 |
| 4.2.2 | ผลการหาการหาความแรงรังสี Br-82..... | 37 |
| 4.2.3 | ผลการทดสอบการผสมกับน้ำมัน..... | 39 |
| 4.3 | ผลการหาเวลาการผสม..... | 40 |
| 4.4 | ผลการหาอัตราการไหล..... | 43 |

| | |
|--|----|
| บทที่ 5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ..... | 47 |
| 5.1 การเตรียม Br-82 ในรูปของโบรมobenซีน..... | 47 |
| 5.2 การทดสอบคุณสมบัติของ Br-82..... | 47 |
| 5.2.1 การหาความบริสุทธิ์ทางนิวไคลด์ของ Br-82..... | 47 |
| 5.2.2 การหาความแรงรังสีของ Br-82..... | 47 |
| 5.2.3 การทดสอบการผสมกับน้ำมัน..... | 48 |
| 5.3 การหาเวลาการผสม..... | 48 |
| 5.4 การหาอัตราการไหล..... | 48 |
| 5.5 ข้อเสนอแนะ..... | 49 |
| 5.5.1 การเตรียมตัวอย่างสารตั้งต้นในการอาบรังสี..... | 49 |
| 5.5.2 การเตรียม Br-82 ในรูปของโบรมobenซีน..... | 49 |
| 5.5.3 การทดสอบคุณสมบัติของ Br-82..... | 49 |
| 5.5.3.1 การหาความบริสุทธิ์ทางนิวไคลด์ของ Br-82..... | 49 |
| 5.5.3.2 การทดสอบความแรงของ Br-82..... | 49 |
| 5.5.3.3 การทดสอบการผสมกับน้ำมัน..... | 50 |
| 5.5.4 การหาเวลาการผสม..... | 50 |
| 5.5.5 การหาอัตราการไหล..... | 50 |
| รายการอ้างอิง..... | 51 |
| ภาคผนวก..... | 53 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 58 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 สารรังสีติดตามทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Most commonly used radiotracer in industry) ^[9] | 9 |
| 2.2 สารรังสีติดตามทั่วไปในรูปของสารอินทรีย์ (COMMON RADIOTRACERS FOR ORGANIC PHASES) ^[9] | 10 |
| 2.3 คุณสมบัติเบื้องต้นของโบรมีนก่อนและหลังอาบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์..... | 11 |
| 2.4 พลังงานและความเข้มรังสีแกมมาของ Br-80 ^[10] | 12 |
| 2.5 พลังงานและความเข้มรังสีแกมมาของ Br-82 ^[10] | 14 |
| 2.6 ตัวอย่างนิวไคลด์รังสีที่ผลิตด้วยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์..... | 16 |
| 2.7 ตัวอย่างนิวไคลด์รังสีที่ผลิตด้วยเครื่องเร่งอนุภาค..... | 16 |
| 4.1 พลังงานและความเข้มของ Br-82 ที่จากการทดลองเทียบกับค่าจาก ENSDF ^[10] | 36 |
| 4.2 ความแรงรังสีของของ Br-82 ที่ได้จากการทดลองเทียบกับการคำนวณจากสูตร..... | 38 |
| 4.3 ผลการหาเวลาการผสม..... | 40 |
| 4.4 ผลการหาอัตราการใช้..... | 43 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 โครงสร้างของ <i>p</i> -dibromobenzene ($C_6H_4^{82}Br_2$)..... | 11 |
| 2.2 รูปแบบการสลายตัวของ Br-80 ^[10] | 12 |
| 2.3 แกมมาสเปกตรัมของ Br-80 ^[10] | 13 |
| 2.4 รูปแบบการสลายตัวของ Br-82 ^[10] | 13 |
| 2.5 แกมมาสเปกตรัมของ Br-82 ^[10] | 15 |
| 2.6 การวัดอัตราการไหลด้วยวิธี Pulse Velocity หรือ Peak to Peak..... | 20 |
| 2.7 การวัดอัตราการไหลด้วยวิธี Total Count..... | 21 |
| 2.8 การหา Calibration Factor, <i>F</i> | 21 |
| 2.9 การวัดอัตราการไหลด้วยวิธี Constant-rate Injection Method..... | 22 |
| 2.10 การหาเวลาการผสม (Mixing time)..... | 23 |
| 2.11 การวัดการรั่วของของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน | 24 |
| 2.12 การตรวจหารอยรั่วของท่อที่ฝังลึกใต้ดิน..... | 25 |
| 2.13 การตรวจหารอยรั่วของถังที่ฝังลึกใต้ดิน..... | 26 |
| 3.1 ลักษณะของตัวอย่างก่อนนำไปอาบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์..... | 29 |
| 3.2 เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์..... | 30 |
| 3.3 การจัดวางหัววัดสำหรับการทดสอบการผสมกับน้ำมัน..... | 31 |
| 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบการผสม Br-82 ในรูปของโบรมเบนซีนกับน้ำมัน | 31 |
| 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับหาเวลาในการผสม..... | 32 |
| 3.6 การจัดวางหัววัดสำหรับการวัดอัตราการไหล..... | 33 |
| 3.7 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการวัดอัตราการไหล..... | 34 |
| 4.1 ตัวอย่างโบรมีนก่อนหลังจากการอาบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์..... | 35 |
| 4.2 แกมมาสเปกตรัมของ Br-82 ที่วัดด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์..... | 36 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.3 | ผลการทดสอบการผสม Br-82 ในรูปของโบรมีนกับน้ำมัน..... | 39 |
| 4.4 | ผลการทดสอบการผสม Tc-99m ในรูปของน้ำกับน้ำมัน..... | 39 |
| 4.5 | ภาพการนำ Tc-99m ผสมกับน้ำมัน..... | 40 |
| 4.6 | ผลการหา Minimum mixing time ที่ความเร็วในการปั่นกวน 50 รอบต่อนาที..... | 41 |
| 4.7 | ผลการหา Minimum mixing time ที่ความเร็วในการปั่นกวน 100 รอบต่อนาที..... | 42 |
| 4.8 | ผลการหา Minimum mixing time ที่ความเร็วในการปั่นกวน 200 รอบต่อนาที..... | 42 |
| 4.9 | ผลการหาอัตราการไหลที่ค่า Dwell time เท่ากับ 0.005 วินาที..... | 44 |
| 4.10 | ผลการหาอัตราการไหลที่ค่า Dwell time เท่ากับ 0.01 วินาที..... | 45 |
| 4.11 | ผลการหาอัตราการไหลที่ค่า Dwell time เท่ากับ 0.03 วินาที..... | 45 |
| 4.12 | ผลการหาอัตราการไหลที่ค่า Dwell time เท่ากับ 0.05 วินาที..... | 46 |
| 4.13 | ผลการหาอัตราการไหลที่ค่า Dwell time เท่ากับ 0.01 วินาที..... | 46 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การขนส่งทางท่อเป็นระบบขนส่งที่มีลักษณะเฉพาะเนื่องจากสินค้าที่ขนส่งจะอยู่ในรูปของเหลว บริเวณที่ท่อผ่านจะต้องมีความชันไม่มากจนเกินไปเพื่อไม่ให้ของเหลวที่ผ่านท่อไหลย้อนกลับและไม่มี การขนส่งที่ยาวกลับ สินค้าที่นิยมขนส่งทางท่อ ได้แก่ น้ำมันดิบ ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ การจัดส่งน้ำมันด้วยระบบท่อจะก่อให้เกิดผลดีต่อส่วนรวมและประเทศไทย ดังนี้

- ช่วยลดปัญหาการจราจรติดขัด
- ช่วยเสริมสร้างความมั่นคงและความมีเสถียรภาพในด้านการขนส่งพลังงานของประเทศ
- เสริมสร้างสมรรถนะในการขนส่งน้ำมันของประเทศ
- ช่วยเสริมสร้างความมั่นคงทางเศรษฐกิจและการขยายตัวทางด้านการลงทุน
- รักษาสิ่งแวดล้อม

การขนส่งน้ำมันของประเทศไทยจะผ่านระบบท่อของบริษัทฯ ที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถขนส่งน้ำมันได้หลายชนิดภายในท่อเดียวกัน ซึ่งเรียกว่าการขนส่งผลิตภัณฑ์รวม (Multi-Product Pipeline) โดยใช้มาตรฐานสากล API (American Petroleum Institute) และ BS (British Standard) ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ส่งผ่านระบบท่อนั้นประกอบไปด้วยน้ำมันอากาศยาน (Jet A-1) และน้ำมันภาคพื้นดิน (Ground Product) ซึ่งได้แก่น้ำมัน U91 (Unlead Gasoline Octane 91), U95 (Unlead Gasoline Octane 95) และ HSD (High Speed Deisel) การขนส่งน้ำมันผ่านระบบท่อเป็นวิธีการขนส่งที่มีการยอมรับกันทั่วโลกว่า เป็นระบบขนส่งที่สะดวก รวดเร็ว ปลอดภัย ได้น้ำมันที่บริสุทธิ์ และมีปริมาณน้ำมันที่สูญเสียระหว่างการขนส่งน้อยที่สุด น้ำมันที่เข้าสู่ระบบท่อจะถูกจัดส่งด้วยเครื่องสูบน้ำความดันสูงมายังคลังน้ำมันปลายทาง ผ่านท่อส่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 14 นิ้ว ฝังลงใต้ดินลึกประมาณ 1.2 เมตร ท่อส่งน้ำมันจึงถูกออกแบบให้หนาประมาณ 7-8 มิลลิเมตร และเคลือบสารป้องกันสนิมทั้งภายในและภายนอก หลังจากที่มีการเชื่อมท่อต่อกันแล้ว ในระหว่างการก่อสร้างวางท่อส่งจะทำการตรวจสอบแนวเชื่อมทั้งหมด 100 % ด้วยวิธีการทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสี (Radiographic Testing) จากนั้นจึงพันเทปทับแนวเชื่อมเพื่อป้องกันสนิมอีกครั้งก่อนที่จะนำไปฝังลงใต้ดิน หลังจากวางท่อลงไปใต้ดินแล้วก็ยังมีระบบป้องกันการสึกกร่อน (Cathodic Protection) ในระหว่างการขนส่ง จะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า PIG

(Pipeline Inspection Gauge) สำหรับตรวจสอบสภาพของท่อ ภายใน PIG จะมีหัววัดรังสีและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (data logger) ประกอบเข้าด้วยกันภายในภาชนะทรงกระบอกที่สามารถกันน้ำได้ จากนั้นจึงทำการส่ง PIG เข้าไปในท่อเพื่อให้ไหลไปตามท่อในระบบวิ่งอยู่ภายในท่อ และทำการบันทึกสภาพภายในท่อโดยละเอียด กรณีที่จุดใดจุดหนึ่งของท่อเริ่มสึกกร่อนก็จะสามารถตรวจพบและทำการแก้ไขได้ก่อนที่จะมีการรั่วซึมเกิดขึ้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการตรวจสอบด้วยการใช้ PIG นี้ ลักษณะของท่อที่จะทำการตรวจสอบนั้นจะต้องสามารถใส่ PIG เข้าไปได้ ไม่มีข้อต่อที่โค้งงอจนเกินไปจนกระทั่ง PIG ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ และจะต้องมีสถานีที่สามารถจะปล่อย PIG เข้าไปในระบบรวมทั้งต้องมีสถานีที่สามารถนำ PIG ออกได้ ซึ่งค่อนข้างยุ่งยากในกรณีที่ทำการตรวจสอบระบบท่อที่ซับซ้อนมากๆ ด้วยเหตุดังกล่าวนี้จึงมีความพยายามที่จะนำวิธีอื่นมาใช้เพื่อให้สามารถทำได้ง่าย สะดวกและรวดเร็ว ไม่รบกวนต่อการทำงานของระบบหรือไม่ต้องทำการปิดระบบ (shutdown) ขณะที่ทำการตรวจสอบ

เทคนิคสารรังสีติดตาม (Radiotracer Technique) เป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจในการศึกษาการไหลของของไหล (flow study) การศึกษาการผสม (mixing or blending study) ตรวจหารอยรั่ว (leak test) และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา (residence time) ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยอาศัยการนำสารรังสีที่ติดตามที่มีพฤติกรรมเหมือนกันกับวัสดุที่จะตรวจสอบผสมเข้าไปในระบบและปล่อยไปตามกระแสของระบบ พร้อมกับทำการตรวจวัดรังสีที่ปล่อยออกมาจากสารติดตามที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยหัววัดรังสี จากนั้นจึงทำการเก็บรวบรวมข้อมูลและประมวลผล สารรังสีติดตามที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น ไอโอดีน-131 (I-131) โซเดียม-24 (Na-24) เทคนีเชียม-99m (Tc-99m) โมลิบดีนัม-99 (Mo-99) และ อื่นๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 ดังนั้นการเลือกชนิดของสารรังสีติดตาม จึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงานและความเหมาะสมของสารรังสีติดตามชนิดนั้นๆ ส่วนสารรังสีติดตามที่นิยมใช้ในการตรวจสอบท่อส่งน้ำมัน ได้แก่ โบรมีน-82 (Br-82) เนื่องจากเป็นสารรังสีที่ให้รังสีแกมมาพลังงานสูง สามารถทะลุผ่านวัสดุหรือภาชนะที่ทำการตรวจสอบรวมทั้งท่อที่ฝังลึกใต้ดินประมาณ 1.2 เมตรได้ ทำให้สามารถตรวจวัดจากบนพื้นผิวดินได้โดยตรง จึงพบการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมน้ำมันและอุตสาหกรรมปิโตรเคมี สถานะที่ใช้มี 3 สถานะด้วยกัน คือ สถานะที่เป็นสารละลายน้ำในรูปของ “แอมโมเนียมโบรไมด์ (ammonium bromide)” สถานะที่เป็น ไฮโดรคาร์บอนในรูปของ “โบรมобенซีน (bromobenzene)” และ สถานะแก๊สในรูปของ “เมทิลโบรไมด์ (methyl bromide)” แต่ข้อจำกัดของการใช้สารรังสีติดตาม Br-82 คือ มีครึ่งชีวิตที่สั้น ($T_{1/2} = 35.30$ ชั่วโมง) จึงไม่สามารถนำเข้ามาจากต่างประเทศได้ ทำให้ต้องผลิตขึ้นมาใช้เอง ดังนั้นจึงเหมาะกับประเทศที่มีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้วิจัยหรือแบบผลิตไอโซโทปรังสีสั่นบน จึงจะสามารถใช้สารรังสีติดตามนี้ได้ ด้วยเหตุที่ประเทศไทยมีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้วิจัยจึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์นี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อเตรียมสารรังสี Br-82 ในรูปสารละลายอินทรีย์ (organic phase) สำหรับใช้เป็นสารรังสีติดตามในกระบวนการอุตสาหกรรม โดยใช้นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 พัฒนาระบวนการเตรียมสารรังสีพร้อมใช้ Br-82 ในรูปของสารละลายอินทรีย์
- 1.3.2 ทดสอบคุณสมบัติของสารละลายอินทรีย์ Br-82 ที่เตรียมขึ้น ได้แก่ ความบริสุทธิ์ของสารรังสี Br-82 ความแรงรังสี และการผสมกับน้ำมัน เป็นต้น
- 1.3.3 นำสารรังสี Br-82 ในรูปสารละลายอินทรีย์ มาใช้สำหรับเทคนิคสารรังสีติดตามในการหาอัตราการไหล (flow rate measurement) และหาเวลาผสม (mixing time) ในห้องปฏิบัติการ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎี ข้อมูลและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 เตรียมสารรังสีพร้อมใช้ Br-82 โดยใช้นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
 - เตรียมตัวอย่างสำหรับอาบรังสีในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
 - เตรียม Br-82 ในรูปของโบรมเบนซีน
- 1.4.3 ทดสอบคุณสมบัติของสารละลายอินทรีย์ Br-82
 - ความบริสุทธิ์ของสารรังสี
 - ความแรงรังสี
 - การผสมกับน้ำมัน
- 1.4.4 ทดลองในห้องปฏิบัติการทดลอง
 - ออกแบบระบบการทดลองในห้องปฏิบัติการทดลองสำหรับการหาอัตราการไหล และหาเวลาการผสมในห้องปฏิบัติการ
 - ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการทดลอง
- 1.4.5 รวบรวมข้อมูล สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้กระบวนการเตรียมสารรังสีพร้อมใช้ Br-82 ในรูปของสารละลายอินทรีย์ เพื่อนำไปใช้สำหรับเทคนิคสารรังสีติดตามในอุตสาหกรรมน้ำมันหรืออุตสาหกรรมด้านอื่น ๆ ได้

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

H.J. Pant และ V.N. Yelgoankar⁽¹⁾ ได้ทำการทดลองเรื่อง การใช้สารรังสีติดตามในการตรวจสอบถึงปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตแอนนิลีน ในการทดลองได้ใช้ Br-82 ในรูปของ *p*-dibromobenzene ละลายใน servotherm special oil ความแรงประมาณ 74 MBq เป็นสารรังสีติดตาม ทำการฉีดและปั๊มสารรังสีเข้าไปในถังผลิตแอนนิลีน พร้อมทำการตรวจวัดรังสีแกมมาจาก Br-82 ที่ตำแหน่งทางเข้าและตำแหน่งทางออกของผลิตภัณฑ์ด้วยหัววัดแกมมาแบบเรืองรังสี (collimated scintillation detector) ที่ต่อกับระบบบันทึกข้อมูล data acquisition system (DAS) และทำการประมวลผล จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เทคนิคสารรังสีติดตามเหมาะสำหรับใช้ตรวจสอบระดับความเปราะเปื้อนที่มีผลต่อความผิดปกติของระบบในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม

S. Sugiharto และ คณะ⁽²⁾ ได้ทำการทดลองเรื่อง การใช้สารรังสีติดตามสำหรับศึกษา Residence time distribution ของระบบ multiphase flow ในการทดลองได้ใช้ ไอโอดีน-131 (I-131) ในรูปของโซเดียมไอโอดेट (Na¹³¹I) และในรูปของไอโอดobenซีน (C₆H₅¹³¹I) เป็นสารรังสีติดตาม ฉีดเข้าไปในท่อของระบบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว ยาว 37 กิโลเมตร ซึ่งของไหลภายในท่อประกอบด้วย น้ำ 95 % น้ำมัน 3 % และ ก๊าซ 2 % อุณหภูมิของของเหลวประมาณ 70 องศาเซลเซียส พร้อมทำการวัดรังสีแกมมาที่ปล่อยออกมาจาก I-131 ด้วยหัววัดแบบเรืองรังสี NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว จำนวน 2 หัววัด โดยวางหัววัดตัวที่ 1 และ 2 ห่างจากตำแหน่งฉีดสารรังสีเข้าระบบเป็นระยะทาง 80 เมตร และ 100 เมตร ตามลำดับ ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลและคำนวณอัตราการไหล จากการทดลองพบว่าน้ำมีอัตราการไหลเท่ากับ 0.74096 เมตร/วินาที ส่วนน้ำมันจะมีอัตราการไหลอยู่ที่ 0.68651 เมตร/วินาที แสดงให้เห็นว่าน้ำจะมีอัตราการไหลที่เร็วกว่าน้ำมัน

J. Behin และ M. Aghajari⁽³⁾ ได้ทำการทดลองเรื่อง การตรวจสอบอิทธิพลของระดับน้ำที่มีต่อการแยกน้ำมันกับน้ำโดยวิธี Residence time distribution ในการทดลองได้ใช้ I-131 ในรูปของโซเดียมไอโอดेट (Na¹³¹I) และในรูปของไอโอดobenซีน (C₆H₅¹³¹I) เป็นสารรังสีติดตาม ฉีดเข้าไปภายในถังแยกมีอัตราการไหลคงที่ 5.2 กิโลกรัมต่อวินาที ทำการวัดด้วยหัววัด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว พร้อมหน่วยขยายส่วนหน้า กับ หน่วยขยายสัญญาณ (PMT) เชื่อมต่อกับหน่วยแสดงผล (Counting meter) ทำการบันทึกข้อมูลและประมวลผล จากข้อมูลการทดลอง แสดงได้ว่า เมื่อระดับน้ำในถังเพิ่มขึ้นค่าของ Residence time distribution ของ Organic phase จะลดลงและแปรผันตามระดับน้ำภายในถัง โดยประสิทธิภาพในการแยกจะดีที่สุดที่ระดับน้ำประมาณ 0.7 เมตร ของถัง

H. Kasban และ คณะ⁽⁴⁾ ได้ทำการทดลองเรื่อง **การสร้างแบบจำลองในการทดลองประยุกต์ใช้สารรังสีติดตามในอุตสาหกรรม** ในการทดลองได้ใช้ โมลิบดีนัม-99 (Mo-99) ความเข้มข้น 300 ไมโครคูรีต่อลิตรเป็นสารรังสีติดตาม ฉีดเข้าไปในถังผสมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร ภายในถังประกอบด้วยใบพัดผสมจำนวน 4 ใบพัด ต่อกับระบบควบคุมความเร็วในการปั่นกวน จากนั้นทำการวัดความเข้มข้นของรังสี ณ ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของระบบ ด้วยหัววัดรังสีแบบเรืองรังสี (collimated scintillation detector) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว จำนวน 2 หัววัด เชื่อมต่อกับระบบบันทึกข้อมูล (data acquisition system) และคอมพิวเตอร์เพื่อทำการบันทึกข้อมูลและประมวลผล จากการทดลองจะเห็นได้ว่า การใช้สารรังสีติดตามในการหาอัตราการไหล (Measurement of flow rate) เวลาการผสม (Mixing time) และ Residence time distribution (RTD) เป็นวิธีที่เชื่อถือได้สูง

Fabio E. da Costa และ M. M. Hamada⁽⁵⁾ ได้ทำการวิจัยเรื่อง **การพัฒนาชุดหัววัดแบบเรืองแสงและชุดประมวลผลข้อมูลสำหรับวัดอัตราการไหล** ที่วิจัยได้ออกแบบชุดอุปกรณ์หัววัดรังสี ที่ประกอบด้วย หัววัดซีเซียมไอโอไดต์ (CsI) ต่อกับ Si PIN photodiodes Amplifier Unit analogue-to-digital interface และ สายเคเบิลยาว 30 เมตร นำมาใช้ทดสอบการวัดอัตราการไหลของระบบ โดยวางหัววัดทั้งสองให้ห่างกันด้วยระยะทาง 34.5 เมตร หัววัดที่หนึ่งวางห่างจากตำแหน่งฉีดสารรังสีเข้าระบบประมาณ 5 เมตร ทำการฉีด Br-82 ในรูปของโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ความแรง 26 MBq เข้าไปในระบบพร้อมทำการตรวจวัดรังสี จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ชุดเครื่องมือที่ประดิษฐ์ขึ้นเหมาะสำหรับใช้ในการวัดอัตราการไหลของระบบในอุตสาหกรรม และสามารถทำงานในภาคสนาม (in situ) ได้ ซึ่งทำได้ง่าย สะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งมีประสิทธิภาพที่ดี

V.N. Yelaonkar และ คณะ⁽⁶⁾ ได้ทำการทดลองเรื่อง **การใช้สารรังสีชนิดปิดผนึกร่วมกันกับการใช้สารรังสีติดตามสำหรับตรวจสอบระบบในโรงงานผลิตสารเคมี** จากการทดลองได้ใช้ Co-60 ความแรง 5 มิลลิคูรี เป็นสารรังสีชนิดปิดผนึกสำหรับทำการตรวจสอบคุณลักษณะภายในของท่อโดยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสี (Radiographic Testing) ร่วมกับการใช้เทคนิคสารรังสีติดตาม ที่ใช้ Br-82 ความแรง 5 มิลลิคูรี ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เป็นสารติดตามฉีดและป้อนเข้าไปในระบบพร้อมกับการวัดรังสีด้วยหัววัดแบบเรืองรังสี ทำการเก็บข้อมูลและประมวลผล จากการทดลองจะเห็นได้ว่า Mean Residence Time (MRT) ของระบบ เท่ากับ 470 วินาที ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าทางทฤษฎีที่คำนวณได้เท่ากับ 102 วินาที

H.J. plant และคณะ⁽⁷⁾ ได้ทำการทดลองเรื่อง การตรวจสอบพฤติกรรมของ
ถ่านหินในเครื่องแยกก๊าซโดยใช้สารรังสีติดตาม ในการทดลองได้ใช้ผงถ่านหินติดฉลากกับ
La-140 ในรูปของ La_2Cl_3 ความแรงรังสีที่ใช้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 50-110 MBq และ Au-198 ในรูปของ
 AuCl_4 ความแรงรังสีที่ใช้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 80-200 MBq ตามลำดับ เป็นสารรังสีติดตาม นำสารรังสี
ติดตามไปปนเข้าไปในระบบพร้อมทำการตรวจวัดรังสีด้วยหัววัดแบบเรืองรังสี (collimated
scintillation detector) ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลและประมวลผลด้วยระบบ common computer
controlled data acquisition system (CCDAS) จากการทดลองจะเห็นว่า การใช้เทคนิคสารรังสี
ติดตามเหมาะสำหรับการอธิบายพฤติกรรมของถ่านหินในระบบแยกก๊าซ และสามารถทำการ
ตรวจวัดที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียสได้ รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้งานใน
อุตสาหกรรมด้านพลังงานอื่น ๆ ได้อีกด้วย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 สารรังสีติดตาม (Radiotracer)

สารติดตาม (tracer) มีการใช้ในอุตสาหกรรมมานานแล้ว แต่มักจะเป็นพวกสารเคมีสีหรือสารเรืองแสง ซึ่งสารเหล่านี้มักจะมีกรรมวิธีในการตรวจวัดที่ค่อนข้างยุ่งยาก ค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงได้มีการนำไอโซโทปรังสีมาประยุกต์ใช้แทน เนื่องจากเราสามารถเลือกชนิดของสารติดตามที่มีคุณสมบัติเหมือนกันกับสารที่ต้องการศึกษาได้ ไม่ถูกรบกวนจากสารตัวอื่นที่ไม่ใช่สารรังสี ไม่ต้องหยุดการทำงานระบบขณะที่ทำการตรวจวัด การตรวจวัดทำได้ง่ายและเร็ว ทั้งการวัดในพื้นที่ (in situ) หรือการเก็บตัวอย่างมาวัดในห้องปฏิบัติการด้วยการวัดที่เหมาะสม จะทำให้เราสามารถทราบเส้นทาง (pathway) ที่สารติดตามเคลื่อนที่ไปได้

เทคนิคสารรังสีติดตามสามารถทำโดยการผสมไอโซโทปรังสีที่มีพฤติกรรมเหมือนกันกับสารในระบบที่จะทำการศึกษาเข้าไปในระบบ และปล่อยให้ไหลไปตามกระแสของระบบ พร้อมกับทำการตรวจวัดรังสีที่ปล่อยออกมาจากสารรังสีติดตามด้วยระบบวัดรังสีที่ประกอบด้วย หัววัดรังสีแบบเรืองรังสีพร้อมหน่วยขยายส่วนหน้า (NaI(Tl) scintillation detector with preamplifier tube base) แหล่งจ่ายกำลังความต่างศักย์สูง (High voltage power supply) หน่วยขยายสัญญาณ (Amplifier) หน่วยแสดงผล (Ratemeter/Scaler) เครื่องวิเคราะห์สัญญาณช่องเดียว (Single channel analyzer) หรือเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง (Multichannel analyzer) และคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการบันทึกข้อมูลและประมวลผลการตรวจวัด ซึ่งข้อดีของการใช้สารรังสีติดตาม มีดังนี้

- 1) มีสัญญาณรบกวนต่ำ
- 2) สารรังสีติดตามที่มีครึ่งชีวิตที่สั้น ทำให้มีการเปราะเปื้อนในระยะเวลาดำเนิน
- 3) รังสีแกมมาสามารถตรวจวัดได้จากภายนอกของระบบปิดหรือท่อได้โดยตรง จึงไม่ต้องทำการเก็บตัวอย่าง
- 4) สามารถทำการตรวจวัดในพื้นที่ได้ง่ายด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดแบบพกพา

2.2 ลักษณะที่ต้องการของสารรังสีติดตาม (Basic requirements of a radiotracer)

- 1) ต้องมีพฤติกรรมเหมือนกันกับวัสดุที่จะทำการตรวจสอบ
- 2) สามารถตรวจวัดได้ที่ระดับความเข้มข้นต่ำๆ

- 3) การตรวจวัดจะต้องให้ผลที่ชัดเจน
- 4) การตรวจวัด จะต้องไม่รบกวนต่อการทำงานของระบบ
- 5) มีการเปราะเปื้อนในผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด

2.3 การเลือกสารรังสีติดตาม (Selection of radiotracer)

การเลือกชนิดของสารรังสีให้เหมาะสำหรับใช้เป็นสารติดตามนั้นก็มีส่วนสำคัญต่อการตรวจวัดด้วยเช่นกัน สารรังสีติดตามมีทั้งชนิดที่ปล่อยรังสีแกมมาและรังสีบีตา แต่ส่วนใหญ่สารรังสีติดตามที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะเป็นชนิดที่ปล่อยรังสีแกมมา และจะต้องมีพลังงานสูงมากพอที่สามารถทะลุผ่านวัสดุหรือภาชนะที่จะทำการตรวจสอบได้ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาเลือกสารรังสีเพื่อใช้เป็นสารติดตาม ได้แก่

- 1) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ต้องมีลักษณะเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ เช่นเดียวกับสารในระบบที่ต้องการศึกษาและยังอยู่ในรูปของสารเคมีที่สามารถผสมกับสารในระบบได้อย่างสมบูรณ์
- 2) ค่าครึ่งชีวิต ($T_{1/2}$) ควรมีครึ่งชีวิตไม่ยาวเกินไปเพื่อมิให้มีการปนเปื้อนของไอโซโทปรังสีในระบบที่ต้องการศึกษานาน แต่ก็ต้องมีครึ่งชีวิตยาวพอที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ในภาคสนาม และพอที่จะตรวจวัดได้สะดวก
- 3) ชนิดและพลังงานของสารรังสี โดยทั่วไปนิยมใช้ไอโซโทปรังสีที่ปลดปล่อยรังสีแกมมา เนื่องจากสามารถตรวจวัดได้จากภายนอกภาชนะหรือท่อ โดยไม่ต้องสัมผัสตัวอย่างไปวัดรังสีในห้องปฏิบัติการภายหลัง นอกจากนี้พลังงานของรังสีแกมมาจะต้องสามารถทะลุผ่านผนังภาชนะหรือท่อได้ อย่างไรก็ตามรังสีแกมมาพลังงานต่ำสามารถกำบังได้ง่าย และการวัดรังสีมีประสิทธิภาพสูงกว่าสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ พลังงานของรังสีแกมมามีผลต่อระดับความลึกหรือความหนาของสารที่ต้องการศึกษาด้วย จึงต้องเลือกพลังงานของรังสีแกมมาตามระดับความลึกหรือความหนาของสารที่ต้องการศึกษา ไม่เช่นนั้น ข้อมูลที่ได้ อาจทำให้การแปรผลผิดพลาดได้
- 4) ความแรงรังสีจำเพาะสูง ทำให้ปริมาตรหรือน้ำหนักของสารกัมมันตรังสีใช้น้อยลงตามสัดส่วน ซึ่งมีผลต่อการปฏิบัติในการฉีดหรือปล่อยสารกัมมันตรังสีเข้าสู่ระบบที่ศึกษา รวมทั้งอุปกรณ์ป้องกันรังสีด้วย
- 5) หาง่ายและถูก
- 6) การจัดการกากกัมมันตรังสีและการป้องกันอันตรายจากรังสี ส่วนใหญ่กากกัมมันตรังสีไม่ใช่ปัญหาใหญ่ของการใช้สารรังสีติดตาม เพราะใช้ในปริมาณน้อยและมีครึ่งชีวิตสั้น

อย่างไรก็ตามสารรังสีติดตามหลายชนิดมีครึ่งชีวิตยาว เช่น คริปทอน-85 (Krypton-85 Kr-85) มีครึ่งชีวิต 10.6 ปี แต่การเจือจางในระบบทำให้ระดับความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีลดลงจนไม่สามารถวัดได้ ส่วนการป้องกันอันตรายจากรังสีขึ้นอยู่กับชนิดของรังสีดังได้กล่าวมาแล้วใน (3)

ตารางที่ 2.1 สารรังสีติดตามทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรม (COMMONLY USED RADIOTRACER IN INDUSTRY) ^[9]

| Isotope | Half-life | Radiation and Energy (MeV) | Chemical form | Tracing of phase |
|---------|-----------|--|---|--|
| H-3 | 12.6 y | Beta: 0.018 (100%) | Tritiated water | Aqueous |
| Na-24 | 15 h | Gamma: 1.37 (100%) 2.75 (100%) | Sodium carbonate | Aqueous |
| Br-82 | 36 h | Gamma: 0.55 (70%) 1.32 (27%) | Ammonium bromide p-dibrom-benzene Dibrobiphenyl CH ₃ Br, C ₂ H ₅ Br | Aqueous Organic Organic Gases |
| La-140 | 40 h | Gamma: 1.16 (95%) 0.92 (10%) 0.82 (27%) 2.54 (4%) | Lanthanum chloride Lanthanum oxide | Aqueous/Solids (absorbed) |
| Au-198 | 2.7 d | Gamma: 0.41 (99%) | Chloroauric acid | Aqueous/Solids (absorbed) |
| Cr-51 | 28 d | Gamma: 0.32 (9.8%) | Cr-EDTA, CrCl ₃ | Aqueous |
| Hg-197 | 2.7 d | Gamma: 0.077 (19%) | Mercury metal | Mercury |
| Hg-203 | 46.6 d | Gamma: 0.28 (86%) | Mercury metal | Mercury |
| I-131 | 8.04 d | Gamma: 0.36 (80%) 0.64 (9%) | potassium or sodium iodide iodobenzene | aqueous organic |
| Tc-99m | 6 h | Gamma: 0.14 (90%) | sodium technetate | Aqueous |

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

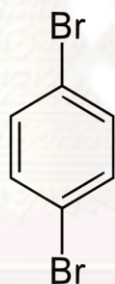
| Isotope | Half-life | Radiation and Energy (MeV) | Chemical form | Tracing of phase |
|---------|-----------|---|------------------|--------------------|
| Mo-99 | 67 h | Gamma: 0.18 (4.5%) 0.74 (10%) 0.78 (4%) | sodium molybdate | Aqueous |
| Sc-46 | 84 d | Gamma: 0.89 (100%) 1.84 (100%) | scandium oxide | Solids (particles) |
| Xe-133 | 5.27d | Gamma: 0.08 (100%) | Xenon | Gases |
| Kr-85 | 10.6 y | Gamma: 0.51 (0.7%) | Krypton | Gases |
| Kr-79 | 35 h | Gamma: 0.51 (15%) | Krypton | Gases |
| Ar-41 | 110 min | Gamma: 1.29 (99%) | Argon | Gases |

ตารางที่ 2.2 สารรังสีติดตามทั่วไปในรูปของสารอินทรีย์ (COMMON RADIOTRACERS FOR ORGANIC PHASES)^[9]

| Radiotracer | Labelled compound and its chemical form | Boiling point (°C) |
|-------------|---|--------------------|
| Br-82 | p-dibromobenzene, C ₆ H ₄ ⁸² Br ₂ | 219 |
| Br-82 | Ammonium bromide, NH ₄ ⁸² Br | 235 |
| Br-82 | Bromododecane, C ₁₂ H ₂₅ ⁸² Br | 240 |
| Br-82 | Bromonaphthol, ⁸² BrC ₁₀ H ₆ OH | 130 |
| I-131 | Iodobenzene, C ₆ H ₅ ¹³¹ I | 188 |
| I-131 | Ammonium iodide, NH ₄ ¹³¹ I | 220 |

2.4 โบรมีน-82 (Br-82)

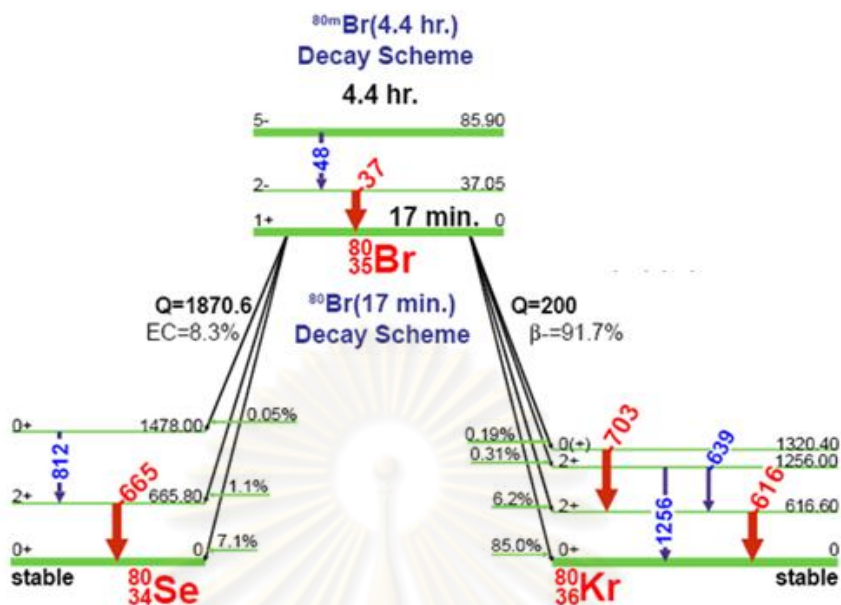
โบรมีนเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 35 และสัญลักษณ์ที่ใช้คือ Br โบรมีนมาจากคำในภาษากรีกว่า Bromos แปลว่า กลิ่นเหม็น อยู่ในกลุ่มธาตุฮาโลเจนมีลักษณะเป็นของเหลวสีแดง ระเหยง่ายที่อุณหภูมิห้อง มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมี โบรมีนเป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อมนุษย์ ไอระเหยสามารถทำให้ระคายเคืองต่อตาและคอถ้าอยู่ใกล้ได้ ปกติโบรมีนในธรรมชาติจะมีอยู่ 2 ไอโซโทปที่เสถียร คือ Br-79 (50.69 %) และ Br-81 (49.31%) ดังนั้น เมื่อเราใช้โบรมีนธรรมชาติในรูปของพารา-ไดโบรโมเบนซีนแสดงดังรูปที่ 2.1 เป็นสารตั้งต้นนำไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาหลัก ๆ 2 ปฏิกิริยาดังกล่าว คือ Br-79(n,γ)Br-80 โดย Br-80 จะสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 511, 617 และ 666 KeV แล้วได้ Kr-80 ที่เสถียร มี $T_{1/2}$ 18.0 นาที แสดงดังรูปที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 และปฏิกิริยา Br-81(n, γ) Br-82 ซึ่ง Br-82 จะสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงานสูงหลายพลังงานด้วยกัน ได้แก่ 554, 619, 698, 776, 827, 1043, 1317 และ 1474 KeV เป็นต้น แล้วได้ Kr-82 ที่เสถียร มี $T_{1/2}$ 35.30 ชั่วโมง แสดงดังรูปและตารางที่ 2.4 ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพารา-ไดโบรโมเบนซีน ($C_6H_4^{82}Br_2$)

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติเบื้องต้นของโบรมีนก่อนและหลังอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

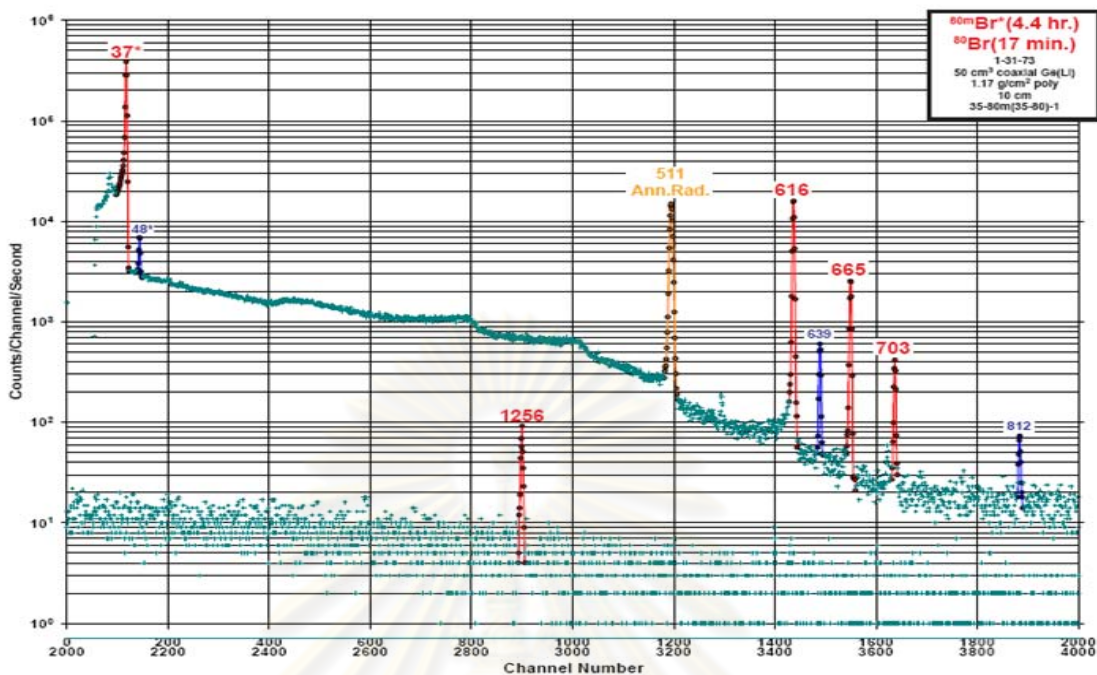
| Isotope | Z(p) | N(n) | Isotopic mass (u) | Half-life | Decay mode | Daughter Isotope |
|-----------|------|------|-------------------|-----------|---|------------------------|
| ^{79}Br | 35 | 44 | 78.9183371 | | Stable | |
| ^{80}Br | 35 | 45 | 79.9185293 | 17.68 min | β^- (91.7 %) β^+ (8.3 %) | ^{80}Kr ^{80}Se |
| ^{81}Br | 35 | 46 | 80.9162906 | | Stable | |
| ^{82}Br | 35 | 47 | 81.9168041 | 35.282 h | β^- (100 %) | ^{82}Kr |



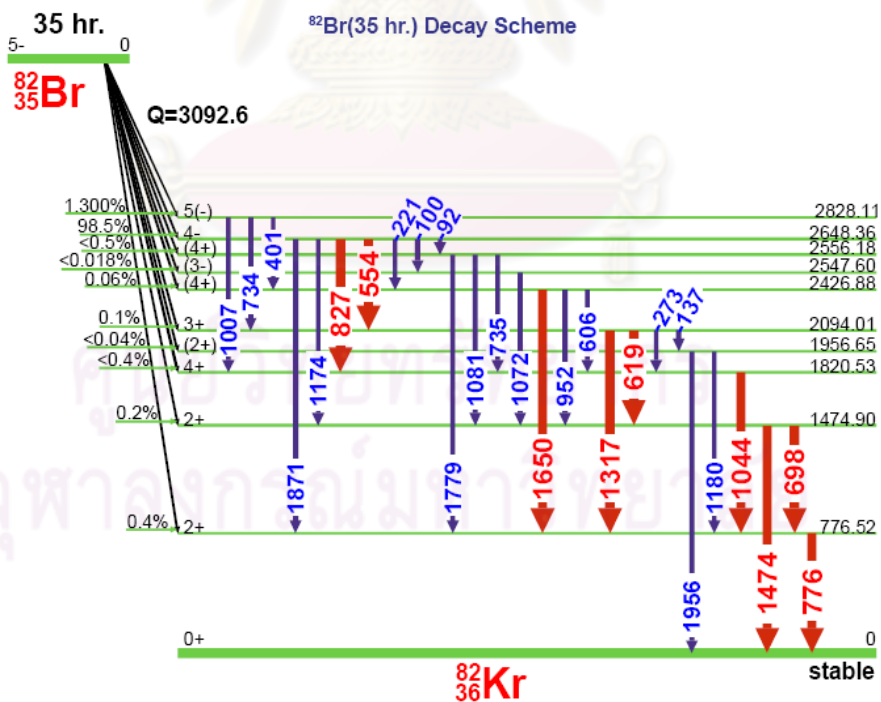
รูปที่ 2.2 รูปแบบการสลายตัวของ Br-80^[10]

ตารางที่ 2.4 พลังงานและความเข้มของรังสีแกมมาของ Br-80^[10]

| GAMMA-RAY ENERGIES AND INTENSITIES | | | | | |
|------------------------------------|---------|--|-------|---------|---|
| Nuclide ⁸⁰ Br | | Half Life 17.68 MIN | | | |
| Detector 3" X 3" NaI-2 | | Method of Production: Br ⁷⁹ (n,γ) | | | |
| 37.052 | ± 0.002 | 39.1 | | ± 0.8 | 2 |
| 511.006 | | 100 | | ± 5.0 | 1 |
| 616.847 | ± 0.08 | 93.45 | 6.7 | ± 0.7 | 1 |
| 639.795 | ± 0.07 | 3.23 | 0.28 | ± 0.03 | 2 |
| 666.317 | ± 0.08 | 15.41 | 1.1 | ± 0.1 | 1 |
| 704.564 | ± 0.06 | 2.64 | 0.19 | ± 0.02 | 1 |
| 812.662 | ± 0.06 | 0.58 | 0.040 | ± 0.004 | 2 |
| 1232.98 | ± 0.10 | 0.03 | | ± 0.01 | 4 |
| 1256.607 | ± 0.05 | 1.25 | 0.19 | ± 0.02 | 1 |



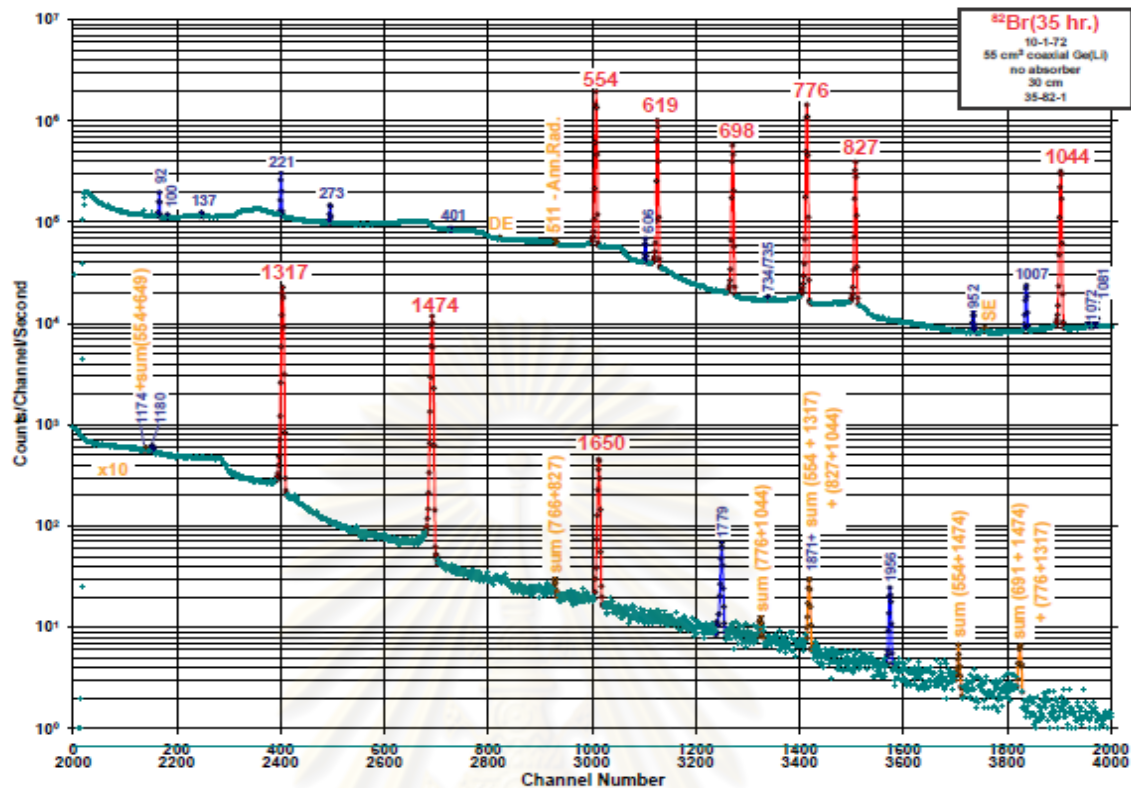
รูปที่ 2.3 แกมมาสเปกตรัมของ Br-80 [10]



รูปที่ 2.4 รูปแบบการสลายตัวของ Br-82 [10]

ตารางที่ 2.5 พลังงานและความเข้มของรังสีแกมมาของ Br-82^[10]

| GAMMA-RAY ENERGIES AND INTENSITIES | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|--|-----------------------|-----------------|---|
| Nuclide ⁸² Br | | Half Life 35.30(2) hr. | | | |
| Detector 3" X 3" NaI-2 | | Method of Production: Br ⁸¹ (n,γ) | | | |
| E _γ (KeV)[S] | ΔE _γ | I _γ (rel) | I _γ (%)[E] | ΔI _γ | S |
| 92.183 | ± 0.008 | 0.825 | 0.72 | ± 0.045 | 4 |
| 100.899 | ± 0.035 | 0.075 | 0.07 | ± 0.010 | 5 |
| 129.45 | ± 0.25 | 0.025 | 0.030 | ± 0.006 | 5 |
| 137.23 | ± 0.04 | 0.115 | 0.152 | ± 0.010 | 5 |
| 221.476 | ± 0.005 | 2.72 | 2.26 | ± 0.008 | 3 |
| 273.475 | ± 0.025 | 0.95 | 0.80 | ± 0.05 | 4 |
| 333.2 | ± 0.3 | 0.012 | 0.09 | ± 0.008 | 5 |
| 401.15 | ± 0.08 | 0.179 | | ± 0.028 | 5 |
| 554.334 | ± 0.012 | 84.4 | 70.8 | ± 1.5 | 1 |
| 606.332 | ± 0.023 | 1.47 | 1.2 | ± 0.10 | 4 |
| 619.088 | ± 0.013 | 52.1 | 43.4 | ± 1.0 | 1 |
| 698.359 | ± 0.016 | 33.91 | 28.5 | ± 0.60 | 1 |
| 735.65 | ± 0.18 | 0.087 | 0.1 | ± 0.018 | 5 |
| 776.502 | ± 0.016 | 100 | 83.5 | ± 1.2 | 1 |
| 827.809 | ± 0.019 | 29.03 | 24.03 | ± 0.35 | 1 |
| 951.950 | ± 0.035 | 0.46 | 0.4 | ± 0.05 | 4 |
| 1007.542 | ± 0.034 | 1.57 | 1.27 | ± 0.08 | 3 |
| 1043.973 | ± 0.022 | 33.21 | 27.2 | ± 0.60 | 1 |
| 1072.63 | ± 0.12 | 0.079 | 0.079 | ± 0.012 | 5 |
| 1081.288 | ± 0.030 | 0.78 | 0.618 | ± 0.07 | 4 |
| 1173.30 | ± 0.25 | 0.131 | 0.02 | ± 0.006 | 5 |



รูปที่ 2.5 แกมมาสเปกตรัมของ Br-82^[10]

2.5 การเตรียม Br-82 ในรูปของโบรมобенซีน (Bromobenzene)

การผลิตสารไอโซโทปรังสีมีอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ การผลิตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactors) และการการผลิตใช้เครื่องเร่งอนุภาค (accelerators) การผลิตไอโซโทปรังสีด้วยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์นั้นจะสัดส่วนการใช้ที่มากกว่า เนื่องจากประหยัดและสามารถผลิตสารไอโซโทปรังสีได้หลากหลายชนิด มีสารไอโซโทปรังสีมากกว่า 50 ชนิดที่ผลิตได้จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งส่วนใหญ่เหมาะสำหรับที่จะใช้เป็นสารรังสีติดตาม ส่วนเครื่องเร่งอนุภาคมีการใช้ที่ค่อนข้างน้อยส่วนมากจะใช้ในทางการแพทย์ โดยเฉพาะเครื่อง PET (positron emission tomography) ที่ใช้ในการวินิจฉัยทางการแพทย์ เครื่องเร่งอนุภาคโดยทั่วไปแล้วจะใช้ผลิตสารไอโซโทปรังสีที่เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ไม่สามารถทำได้หรือไอโซโทปรังสีมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป เช่น ฟลูออรีน-18 (F-18) , Ge-66/Ga-66, Ge-68/Ga-68 เรดิโอไอโซโทปเจเนอเรเตอร์ (Radioisotope Generator) เป็นต้น

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างนิวไคลด์รังสีที่ผลิตด้วยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

Reactor Produced Isotopes

Some Reactor-produced Radionuclides Used in Nuclear Medicine and Radiotracer Kinetics

| Radionuclide | Decay Mode | Production Reaction | Natural Abundance of Target Isotope (%) | σ_c (b)* |
|------------------|-----------------------|---|---|-----------------|
| ^{14}C | β^- | $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ | 99.6 | 1.81 |
| ^{24}Na | (β^-, γ) | $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$ | 100 | 0.53 |
| ^{32}P | β^- | $^{31}\text{P}(n,\gamma)^{32}\text{P}$ | 100 | 0.19 |
| | | $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ | 95.0 | — |
| ^{35}S | β^- | $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$ | 75.5 | — |
| ^{42}K | (β^-, γ) | $^{41}\text{K}(n,\gamma)^{42}\text{K}$ | 6.8 | 1.2 |
| ^{51}Cr | (EC, γ) | $^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$ | 4.3 | 17 |
| ^{59}Fe | (β^-, γ) | $^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$ | 0.3 | 1.1 |
| ^{75}Se | (EC, γ) | $^{74}\text{Se}(n,\gamma)^{75}\text{Se}$ | 0.9 | 30 |
| ^{125}I | (EC, γ) | $^{124}\text{Xe}(n,\gamma)^{125}\text{Xe} \xrightarrow{\text{EC}} ^{125}\text{I}$ | 0.1 | 110 |
| ^{131}I | (β^-, γ) | $^{130}\text{Te}(n,\gamma)^{131}\text{Te} \xrightarrow{\beta^-} ^{131}\text{I}$ | 34.5 | 0.24 |

*Thermal neutron capture cross-section, in barns, for (n, γ) reactions

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างนิวไคลด์รังสีที่ผลิตด้วยเครื่องเร่งอนุภาค

Cyclotron Produced Isotopes

Some Cyclotron-produced Radionuclides Used in Nuclear Medicine

| Product | Decay Mode | Common Production Reaction | Natural Abundance of Target Isotope (%) |
|-------------------|-----------------------|---|---|
| ^{11}C | β^+ | $^{10}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$ | 19.7 |
| | | $^{11}\text{B}(p,n)^{11}\text{C}$ | 80.3 |
| ^{13}N | β^+ | $^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$ | 98.9 |
| ^{15}O | β^+ | $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$ | 99.6 |
| ^{18}F | β^+, EC | $^{20}\text{Ne}(d,\alpha)^{18}\text{F}$ | 90.9 |
| ^{22}Na | β^+, EC | $^{23}\text{Na}(p,2n)^{22}\text{Na}$ | 100 |
| ^{43}K | (β^-, γ) | $^{40}\text{Ar}(\alpha,p)^{43}\text{K}$ | 99.6 |
| ^{67}Ga | (EC, γ) | $^{68}\text{Zn}(p,2n)^{67}\text{Ga}$ | 18.6 |
| ^{111}In | (EC, γ) | $^{109}\text{Ag}(\alpha,2n)^{111}\text{In}$ | 48.7 |
| | | $^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$ | 12.8 |
| ^{123}I | (EC, γ) | $^{122}\text{Te}(d,n)^{123}\text{I}$ | 2.5 |
| | | $^{124}\text{Te}(p,3n)^{123}\text{I}$ | 4.6 |
| ^{201}Tl | (EC, γ) | $^{201}\text{Hg}(d,2n)^{201}\text{Tl}$ | 13.2 |

การเตรียมไอโซโทปปรังสี Br-82 ในรูปของโบรมเบนซีน จึงสามารถเตรียมได้จากการใช้ พารา-ไดโบรมเบนซีน (*p*-dibromobenzene) เป็นสารตั้งต้นนำไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ เคลียร์ที่มีฟลักซ์ประมาณ 10^{12} n/cm².s เป็นเวลา 10 - 12 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้สลายตัว 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารตั้งต้นที่อบนิวตรอนเสร็จแล้วมาละลายในก๊าซโซลีน (gasoline) ให้ได้ความเข้มข้น พารา-ไดโบรมเบนซีนตามที่ต้องการสำหรับการใช้งาน ความแรงของรังสีที่ได้จากการอบรังสีใน เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แสดงดังสมการ^[11]

$$A = N_T \sigma \phi [1 - e^{-\lambda t_i}] e^{-\lambda t_d} \dots \dots \dots (1)$$

- เมื่อ
- A = ความแรงรังสีของไอโซโทปปรังสีที่เกิดขึ้น (Bq)
 - σ = cross section ของปฏิกิริยานิวเคลียร์ (the thermal neutron reaction cross section in barn = 1×10^{-24} cm²)
 - ϕ = เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ (the neutron flux, n/cm²·sec)
 - N_T = จำนวนอะตอมของไอโซโทปที่ใช้เป็นสารตั้งต้น (the number of target atoms in the target used)
 - λ = ค่าคงตัวการสลายของไอโซโทปปรังสี (decay constant)
 - t_i = ระยะเวลาที่ใช้อบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (irradiation time in the nuclear reactor)
 - t_d = เวลาทิ้งไว้หลังจากการอบรังสี (cooling time after reactor irradiation (manipulation in the hot cells for preparing the appropriate radiotracer compound, transport to the experimental site) till injection in the radiotracer)

โดยที่ N_T สามารถคำนวณได้จาก

$$N_T = \frac{W_C \times N_A \times N_E \times I_N}{M_C \times 100} \dots \dots \dots (2)$$

- เมื่อ
- W_C = น้ำหนักสารตั้งต้นในหน่วยกรัม (Weight of target compound used in g)
 - N_A = เลขอะโวกาโดร (Avogadro's number = 6.023×10^{23} atoms)

- N_E = Number of equivalents of the target element in the target compound
 I_N = ร้อยละในธรรมชาติ (natural abundance of the target nuclide in the target element (in %) ของไอโซโทปนั้นๆ
 M_c = น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight of the target compound)

เมื่อแทน (2) ใน (1) จะได้

$$A = \frac{W_C \times N_A \times N_E \times I_N \times \sigma \times \phi}{M_c \times 100} [1 - e^{-\lambda t_i}] e^{-\lambda t_d} \dots \dots \dots (3)$$

2.6 การประยุกต์ใช้สารรังสีติดตามในอุตสาหกรรม

ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีนิวเคลียร์มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย ทั้งในกระบวนการผลิตโดยตรงและเพื่อสนับสนุนการผลิต เทคนิคสารรังสีติดตามเป็นวิธีการหนึ่งที่น่ามาใช้ตรวจสอบปฏิกิริยา เงื่อนไขปัจจัยการผลิตและสาเหตุข้อบกพร่องต่างๆ ในกระบวนการผลิต เพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงระบบการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการฉีดไอโซโทปรังสีเข้าไปในระบบการผลิตและวัดปริมาณความเข้มข้นรังสีแกมมา ณ ตำแหน่งต่างๆจะทำให้ทราบข้อมูลสภาวะการผลิตที่กำลังดำเนินอยู่ เช่น อัตราการไหล (Flow rate) ของของเหลว ก๊าซ หรือของแข็ง ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา (Residence Time) อัตราการผสมของเครื่องผสม (blender หรือ mixer) เพื่อหาประสิทธิภาพการผสมของเครื่องผสม ปริมาตรถังอุปกรณ์ (Effective volume) การประเมินประสิทธิภาพของระบบการผลิตโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling) และการรั่ว (Leakage) ปริมาณเล็กน้อยในระบบที่ซับซ้อน เช่น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในโรงไฟฟ้า หรือท่อส่งน้ำมันของโรงงาน ตัวอย่างการใช้ประโยชน์เทคนิคสารรังสีติดตามในอุตสาหกรรม เช่น การตรวจสอบเพื่อปรับมาตรฐานอัตราการไหลในระบบการผลิตน้ำมันหล่อลื่น บริษัทปิโตรเคมีคัลไทย จำกัด การตรวจสอบการรั่วไหลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในระบบการกลั่นน้ำมันดีเซล บริษัทไทยออยล์ จำกัด และการตรวจสอบการรั่วของอุปกรณ์และเปลี่ยนความร้อนในระบบผลิตสารแนฟทา บริษัท อัลลายแอนซ์ไฟนิ่ง จำกัด เป็นต้น

เทคโนโลยีนิวเคลียร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะเป็นการนำคุณสมบัติการทะลุทะลวงผ่านตัวกลางของรังสีมาใช้ เพื่อที่จะสามารถทำการตรวจวัดโดยตรงจากภายนอกของวัสดุโดยไม่ต้องทำการเก็บตัวอย่าง จึงไม่ต้องทำการหยุดระบบขณะที่ทำการตรวจวัด สามารถทำการตรวจวัด

ในพื้นที่ได้ จึงช่วยให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้ลดต้นทุนการผลิต รวมถึงประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายของผู้ประกอบการ ที่ต้องเสียไปในการตรวจสอบและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตได้

2.6.1 การใช้สารรังสีติดตามในการวัดการไหล (Measurement of flow using radioactive tracers)

การวัดอัตราการไหลเป็นการวัดค่าตัวแปรที่สำคัญค่าหนึ่งในกระบวนการทางอุตสาหกรรมแทบทุกชนิด ซึ่งเกี่ยวข้องกับการไหลของของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยที่การวัดของไหลเหล่านี้อาจใช้เครื่องมือและวิธีการที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะของไหลที่เป็นอยู่ขณะนั้น อย่างไรก็ตามการวัดการอัตราไหลอาจกล่าวได้ว่าจะต้องมีความถูกต้องและเที่ยงตรงกว่าการวัดปริมาณด้านอื่นๆ เพราะว่าหากมีความผิดพลาดในการวัดเพียงเล็กน้อยก็อาจทำให้เกิดการเสียหายอย่างมากมายขึ้นได้ กล่าวคือเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตนั้น ๆ ซึ่งจะนำไปสู่การสูญเสียค่าใช้จ่ายที่มากเกินไปนั่นเอง

การใช้สารรังสีติดตามในการวัดอัตราการไหลในกระบวนการทางอุตสาหกรรมสามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

- ก. Pulse Velocity หรือ Peak-to-Peak Method
- ข. Tracer Dilution Method
 - Total Count Method
 - Constant-rate Injection Method

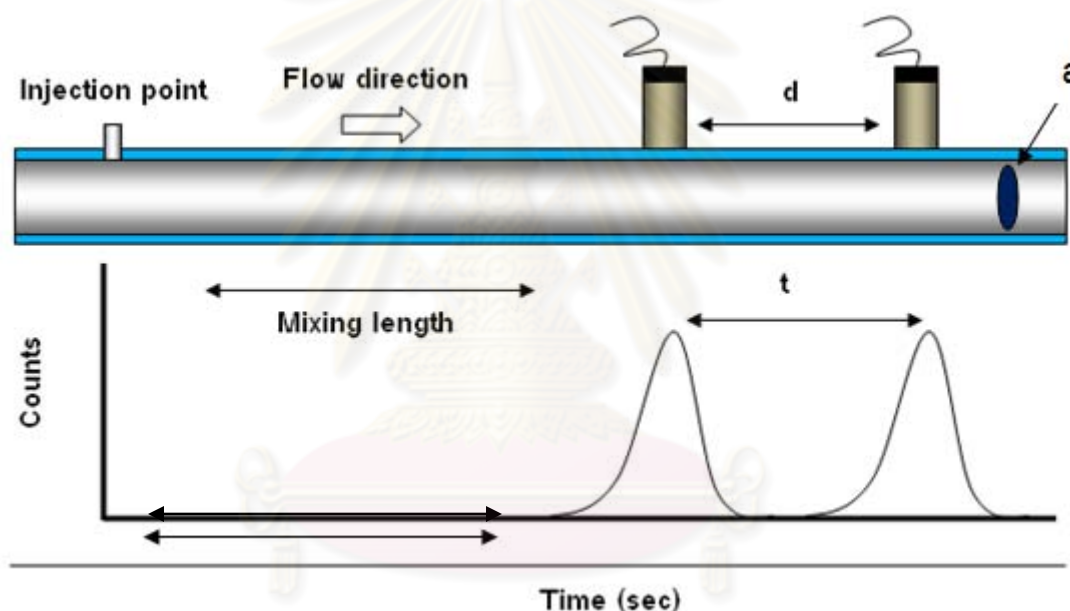
2.6.1.1 Pulse Velocity Method หรือ Peak-to-Peak Method

เป็นวิธีที่นำมาใช้ในวัดอัตราการไหลของท่อส่งวิธีหนึ่งที่ใช้กันมากที่สุด เนื่องจากทำได้ง่ายและสะดวก ไม่ต้องทำการเก็บตัวอย่างและสามารถทำการตรวจวัดในพื้นที่ได้เลยด้วยเครื่องวัดชนิดแบบพกพา การวัดอัตราการไหลแบบ Pulse Velocity หรือ Peak-to-Peak สามารถทำได้โดยการฉีดสารรังสีติดตามเข้าไปในระบบภายในระยะเวลารวดเร็วและปล่อยสารรังสีติดตามให้ไหลไปตามกระแสของระบบพร้อมทำการตรวจวัดสัญญาณจากสารรังสีที่ผ่านหัววัดทั้งสองจากภายนอกของท่อแสดงดังรูปที่ 2.6 โดยวางหัววัดตัวที่หนึ่งห่างจากตำแหน่งฉีดสารรังสีด้วยระยะทางที่สารรังสีติดตามกับตัวอย่างที่จะทำการตรวจสอบผสมกันอย่างสม่ำเสมอแล้ว (beyond the minimum mixing

length) และทราบระยะห่างที่แน่นอนระหว่างหัววัดทั้งสอง (d) พื้นที่หน้าตัดของท่อ (a) และเวลา (T) ในการเคลื่อนที่ของสัญญาณระหว่างทั้งสองหัววัด จากนั้นคำนวณอัตราการไหล (Q) แสดงดังสมการ

$$\text{อัตราการไหล} \quad Q = \frac{a \times d}{T} \quad \dots\dots\dots (4)$$

- เมื่อ
- a = พื้นที่หน้าตัดของท่อ (cross-section area)
 - d = ระยะห่างระหว่างหัววัดทั้งสอง (distance between the two detectors)
 - T = เวลาของสัญญาณระหว่างหัววัดทั้งสอง (transit time)



รูปที่ 2.6 การวัดอัตราการไหลด้วยวิธี pulse velocity หรือ peak to peak

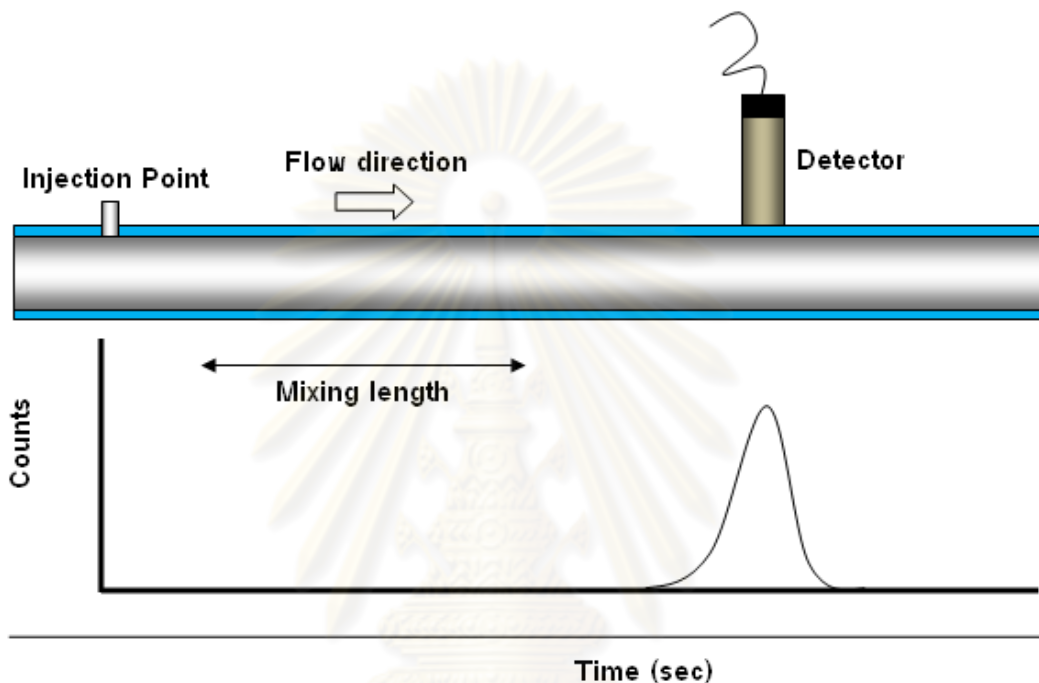
2.6.1.2 Tracer Dilution Method

2.6.1.2.1 Total Count Method

การวัดอัตราการไหลด้วยวิธี Total Count เป็นการวัดอัตราการไหลที่ใช้หัววัดเพียงหัวเดียววางแนบติดบนผิวด้านนอกของท่อส่งห่างจากตำแหน่งฉีดสารรังสีติดตามด้วยระยะทางที่สารติดตามกับวัสดุที่จะทำการตรวจสอบผสมกันอย่างสม่ำเสมอแล้ว ทำการฉีดสารรังสีติดตามเข้าไปในท่อส่งอย่างรวดเร็วพร้อมกับทำการนับวัดรังสีทั้งหมดที่ผ่านหัววัด คำนวณอัตราการไหล โดยต้องทราบค่าความแรงรังสี (A) และปริมาตร (V) ของสารรังสีที่ฉีดเข้าไปในระบบ จะได้ความสัมพันธ์แสดงดังสมการ

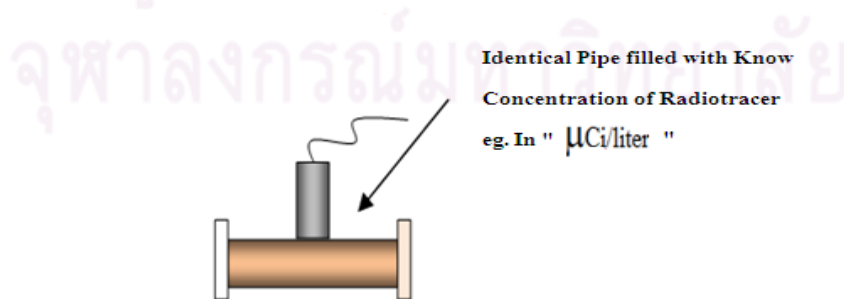
อัตราการไหล, $Q = \frac{AF}{N}$ (liter/minute) (5)

- เมื่อ A = activity injected (μCi),
- F = calibration factor (cpm/ μCi /liter)
- N = total counts (counts) = total Area under the peak



รูปที่ 2.7 การวัดอัตราการไหลด้วยวิธี Total Count

การหาค่า Calibration factor (F) ทำโดยการเติมสารรังสีติดตามที่ทราบความเข้มข้นได้ในท่อที่ทราบปริมาตรที่แน่นอนและนับวัดรังสีแกมมาที่ปล่อยออกมาจากสารรังสีติดตามด้วยเวลาที่เหมาะสม โดยค่า F จะอยู่ในหน่วยของ cpm/ μCi /liter เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.8



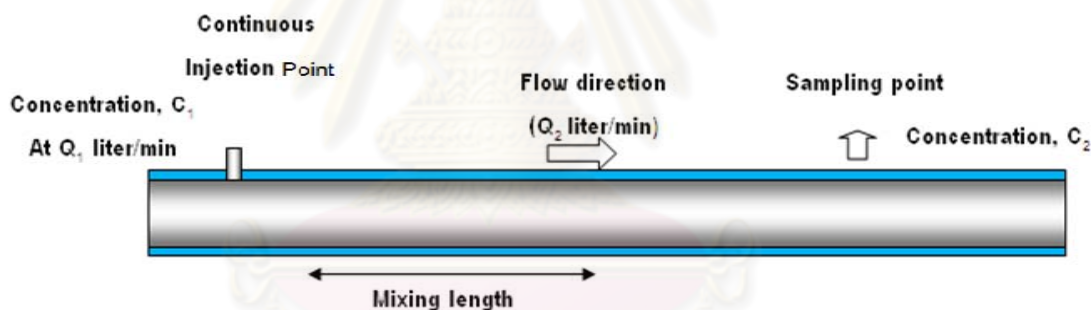
รูปที่ 2.8 การหา Calibration factor, F

2.6.1.2.2 Constant-rate Injection Method

การวัดอัตราการไหลด้วยวิธีนี้จะต้องใช้สารรังสีติดตามปริมาณมากและต้องมีสถานีสำหรับเก็บตัวอย่าง การวัดอัตราการไหลแบบ Constant-rate Injection ทำโดยการฉีดสารรังสีติดตามที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนและมีอัตราการฉีดที่คงที่ เข้าในระบบและปล่อยให้ไหลไปตามกระแสของระบบ ทำการเก็บตัวอย่างที่ตำแหน่งที่สารติดตามกับสารที่จะทำการตรวจสอบผสมกันอย่างสม่ำเสมอแล้ว และนำตัวอย่างไปวัดความเข้มข้นของสารรังสีติดตามด้วยการวัดที่เหมาะสมพร้อมกับคำนวณอัตราการไหล ดังสมการ

$$\text{อัตราการไหล} \quad Q_2 = Q_1(C_1/C_2) \text{ (Liters /minute)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

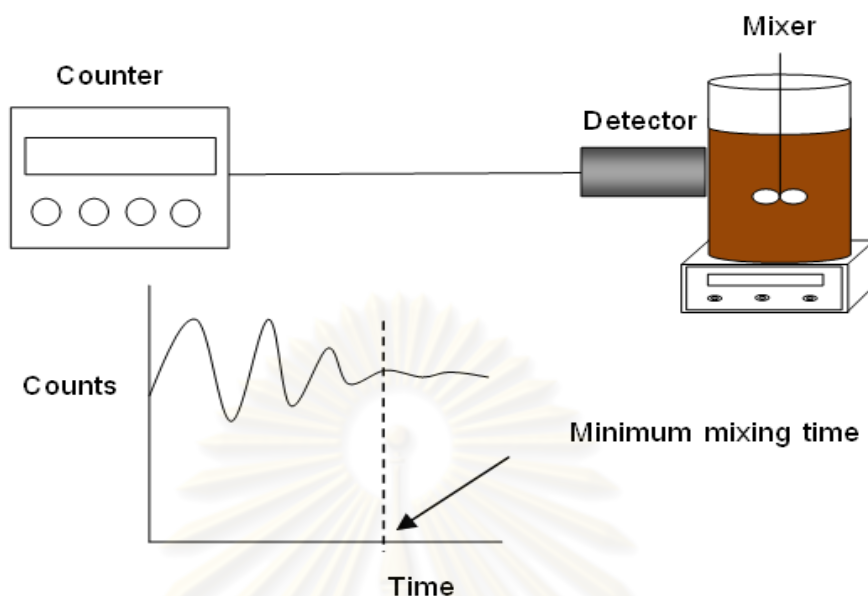
- เมื่อ Q_1 = อัตราการฉีดสารรังสีติดตาม (Liters/min)
 C_1 = ความเข้มข้นของสารรังสีติดตามที่ฉีด ($\mu\text{Ci/liter}$)
 C_2 = ความเข้มข้นของสารรังสีติดตามในตัวอย่าง ($\mu\text{Ci/liter}$)



รูปที่ 2.9 การวัดอัตราการไหลด้วยวิธี Constant-rate Inject

2.6.2 การหาเวลาการผสมน้อยที่สุด (Determination of minimum mixing time)

การใช้สารรังสีติดตามในการศึกษาการผสม (Mixing Study) เป็นวิธีที่ใช้เพื่อหาประสิทธิภาพการผสมของเครื่องผสม (blender) ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมเพื่อดูว่าเครื่องผสมมีความบกพร่องหรือมีประสิทธิภาพเป็นอย่างไร ซึ่งจะทำให้บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และกระบวนการในการผลิตได้ การวัดการผสมทำโดยการวางหัววัดรังสีแนบติดกับผิวด้านนอกของเครื่องผสม จากนั้นเติมสารรังสีติดตามลงไปในส่วนผสมในเครื่องผสมภายในระยะเวลารวดเร็วพร้อมกับการนับวัดความเข้มข้นรังสีของสารรังสีติดตาม ทำการสังเกตค่าจำนวนนับรังสีจมีค่าที่คงที่ แสดงดังรูปที่ 2.9



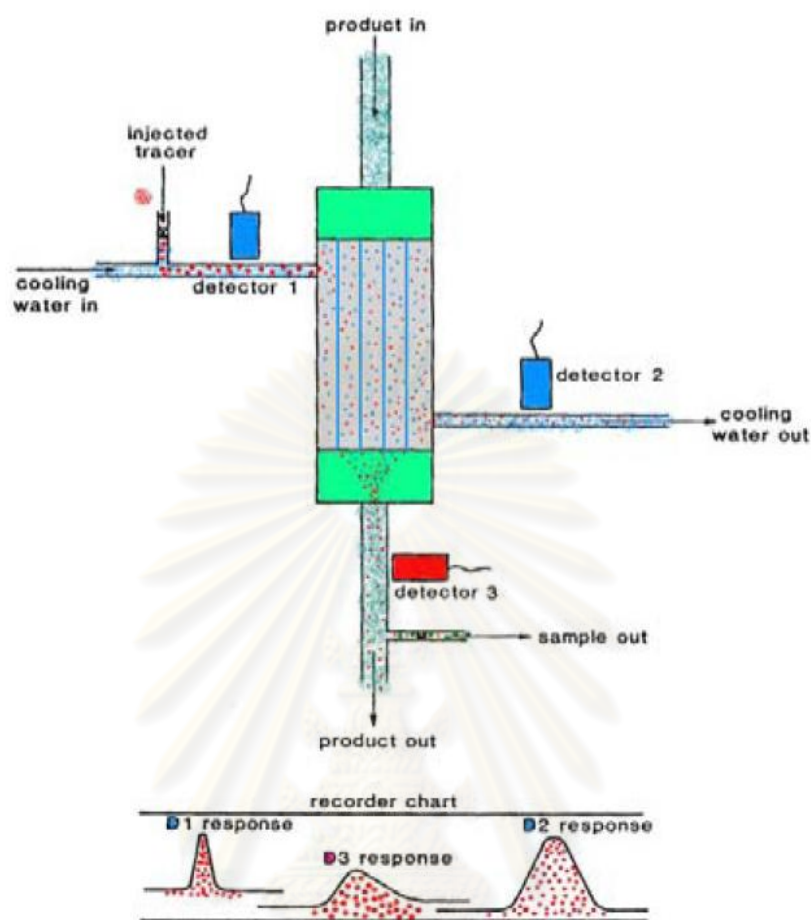
รูปที่ 2.10 การหาเวลาการผสม (mixing time)

2.6.3 การตรวจสอบการรั่ว (Leak Test)

การตรวจสอบรอยรั่วเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้เพื่อตรวจสอบปัญหาของระบบในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น การหารอยตำหนิหรือรอยรั่วของท่อขนส่ง รอยรั่วของถังที่ฝังลึกใต้ดิน หรือศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องแยกในการบวนการผลิต เป็นต้น เมื่อมีปัญหาเกิดขึ้นก็จะสามารถทำการแก้ไขได้ตรงจุดที่เกิดรอยรั่ว

2.6.3.1 การวัดการรั่วของทางผ่าน (By Pass)

การวัดทางผ่านเป็นการวัดประสิทธิภาพของระบบในกระบวนการทางอุตสาหกรรมวิธีหนึ่ง เพื่อตรวจสอบว่าขั้นตอนของกระบวนการเป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือไม่ โดยการผสมสารติดตามที่มีคุณสมบัติเหมือนกันกับวัสดุที่จะตรวจสอบเข้าไปในระบบและปล่อยให้ไหลตามกระแสของระบบ ทำการตรวจวัดรังสีบริเวณทางเข้าของผลิตภัณฑ์ตั้งต้น ทางผ่านและบริเวณทางออกของผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยสังเกตบริเวณทางผ่านใดมีความเข้มข้นของสารรังสีติดตามมากกว่าปกติ แสดงว่าระบบเกิดความผิดปกติหรือมีการรั่วไหลเกิดขึ้น เราจะได้หาวิธีแก้ไขต่อไปแสดงดังรูปที่ 2.11

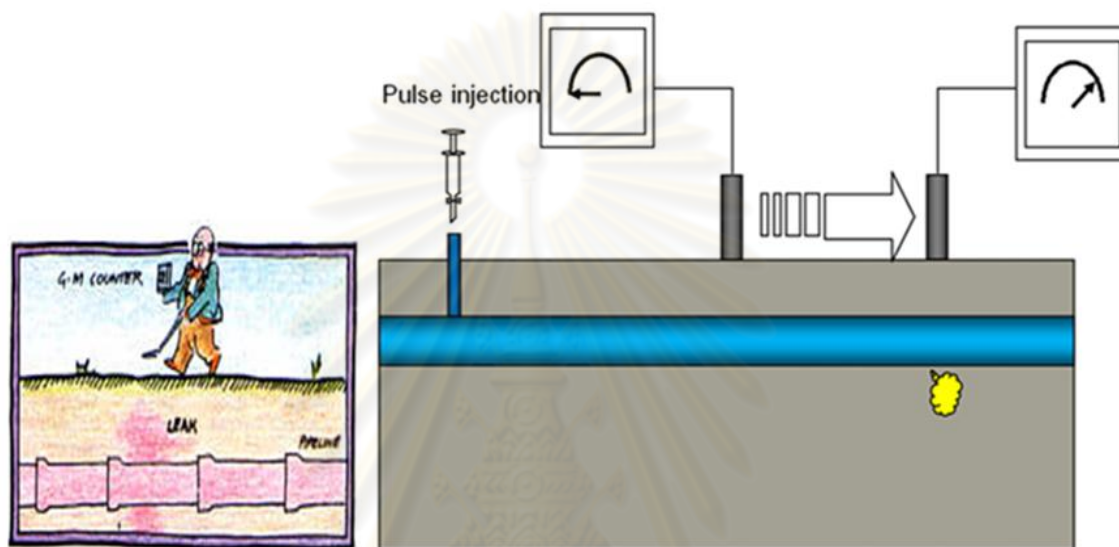


รูปที่ 2.11 การวัดการรั่วของของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การตรวจสอบระบบแลกเปลี่ยนความร้อนโดยเทคนิคทางรังสีติดตาม เป็นวิธีตรวจสอบแบบไม่ทำลายสามารถทำได้โดยไม่ต้องหยุดกระบวนการผลิต และให้ผลการตรวจสอบที่ถูกต้องแม่นยำโดยทันที โดยการฉีดสารรังสีแกมมาครึ่งชีวิตสั้น เช่น สารโบรมีน-82 เข้าไปในระบบการผลิตและวัดปริมาณความเข้มรังสี ณ ทางเข้าและทางออกของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้ทราบว่าเกิดการรั่วไหลในระบบหรือไม่ ตรงตำแหน่งไหน และมากน้อยเพียงใด รวมทั้งคำนวณได้ว่าระบบแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพเพียงใด ตรงกับการออกแบบหรือไม่ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยวิธีนี้ช่วยให้วิศวกรและผู้บริหารโรงงานสามารถตัดสินใจวางแผนแก้ไขปัญหาได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว สามารถลดระยะเวลาการซ่อมบำรุง สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพระบบการผลิตและคุณภาพผลผลิตให้ดีขึ้น นับเป็นการช่วยลดการสูญเสียทางเศรษฐกิจและเพิ่มคุณค่าผลผลิตได้

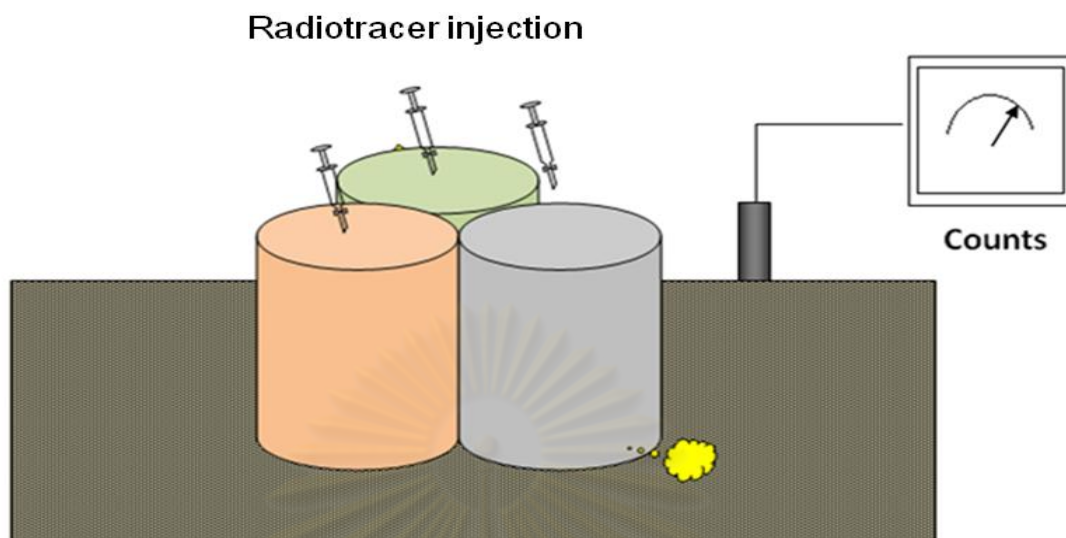
2.6.3.2 การหารอยรั่วของท่อหรือถังที่ฝังไว้ใต้ดิน (Underground buried pipe or Tank)

การใช้ไอโซโทปกัมมันตรังสีสำหรับตรวจหารอยรั่วของท่อขนส่งของเหลวที่ฝังลึกลงใต้ดิน ทำโดยการผสมไอโซโทปกัมมันตรังสีกับของเหลวที่จะขนส่งเข้าไปตามท่อ แล้วทำการตรวจวัดการแผ่รังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี ถ้าบริเวณใดที่พบว่ามีความเข้มข้นของรังสีมากกว่าปกติแสดงว่าบริเวณนั้นมีการรั่วเกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การตรวจหารอยรั่วของท่อที่ฝังลึกลงใต้ดิน

การหารอยรั่วของถังที่ฝังไว้ใต้ดินทำได้โดยการฉีดรังสีติดตามที่มีสมบัติกับสารที่บรรจุในถัง ทำการสำรวจการแผ่รังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสีเพื่อค้นหาตำแหน่งรั่วไหล ถ้าตำแหน่งใดที่มีการรั่วไหลจะทำให้ตรวจพบความเข้มของรังสีมากกว่าปกติ หรือในกรณีที่มีหลาย ๆ ถังด้วยกันให้ฉีดรังสีติดตามที่ต่างชนิดกันลงไปในแต่ละถังพร้อมกับตรวจสอบชนิดของรังสีที่รั่วไหลออกมาด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพาว่าเป็นรังสีของสารติดตามตัวไหน ซึ่งจะทำให้ทราบว่าการรั่วไหลมาจากถังใด แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การตรวจหารากรั่วของถังที่ฝังลึกใต้ดิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/1 (Thailand Nuclear Research Reactor-1/1)
- 2) ตู้ปฏิบัติการรังสีสูง (Hot Cell)
- 3) เครื่องแกมมาสเปกโทรมิเตอร์ (Gamma spectrometer, HPGe & MCA ORTEC Model: GEM20P4-70)
- 4) 4π ไอออนไนเซชันแชมเบอร์ (Electrometer Keithley, Ion Chamber Centronic Product Type: IG11 A20)
- 5) ชุดระบบวัดรังสี (Ludlum 4612 12 Channel bench top Counter) ประกอบด้วย
 - โซเดียมไอโอไดด์ (ทาลเลียม) ซินทิลเลชัน ดีเทคเตอร์ ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว พร้อมหน่วยขยายส่วนหน้า
 - แหล่งจ่ายกำลังความต่างศักย์สูง
 - หน่วยขยายสัญญาณ
 - หน่วยแสดงผล
 - เครื่องวิเคราะห์สัญญาณช่องเดียว (Single channel analyzer)
 - เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง (Multichannel analyzer capable of operating in the multichannel scaling mode, MCS mode)
 - คอมพิวเตอร์
- 6) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 7) ระบบน้ำมันที่ประกอบด้วยถังและท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ยาว 4 เมตร
- 8) ตู้อบความร้อน
- 9) ควอรทซ์ (Quartz) \varnothing 6 มม.
- 10) ชุดเครื่องมือสำหรับเป่าแก้ว
- 11) กระจกอะลูมิเนียมความบริสุทธิ์สูง
- 12) เครื่องอัดแรงดันสูง

- 13) ไมโครปิเปต
- 14) Planchet
- 15) Magnetic stirrer
- 16) Magnetic bar
- 17) บีกเกอร์

3.2 สารเคมี

- 1) พารา-ไดโบรมิเบนซีน (*p*-dibromobenzene 98% Aldrich)
- 2) ก๊าซโซลีน (Gasoline)
- 3) ต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน Co-60, Sb-125, Cs-137, Eu-154 และ Eu-125
- 4) น้ำมันดีเซล (High Speed Deisel)

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์สำหรับอบรังสีในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

- ควอรทซ์ (Quartz)

ควอรทซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ทำการตัดให้มีความยาวประมาณ 5 เซนติเมตร ปิดปลายด้านหนึ่งของควอรทซ์และล้างควอรทซ์ด้วยน้ำกลั่นให้สะอาดประมาณ 2 – 3 ครั้ง จากนั้นนำควอรทซ์ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นเพื่อรอสำหรับนำไปบรรจุตัวอย่าง

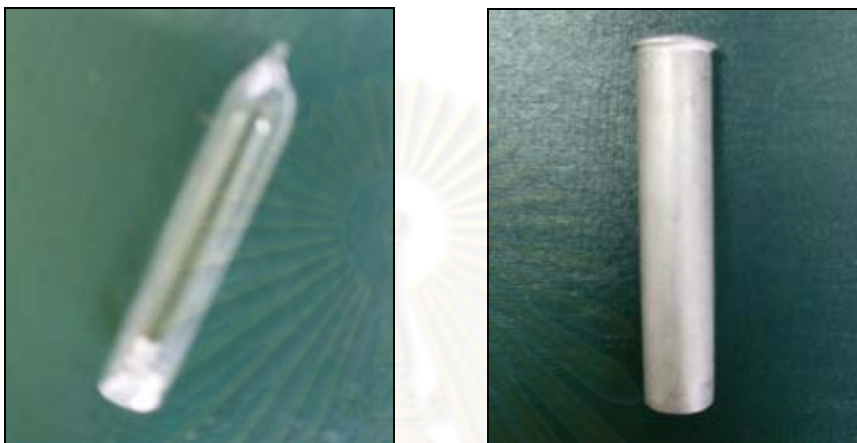
- กระจกอะลูมิเนียม

กระจกอะลูมิเนียมบริสุทธิ์สูงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ยาวประมาณ 12 เซนติเมตร พร้อมฝาปิดล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นและนำไปอบให้แห้ง ทิ้งไว้ให้เย็นเพื่อรอสำหรับการใช้งาน

3.3.2 การเตรียมสารรังสี Br-82 ในรูปของโบรมิเบนซีน (bromobenzene)

ซึ่งพารา-ไดโบรมิเบนซีนมา 45 มิลลิกรัม พร้อมบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน และบรรจุใส่ในควอรทซ์ที่เตรียมไว้ ทำการปิดผนึกปลายควอรทซ์ด้านที่เหลือให้สนิท บรรจุควอรทซ์ใส่ในกระจกอะลูมิเนียมที่เตรียมไว้พร้อมกับปิดฝาหลอดอะลูมิเนียมให้สนิทอีกทีด้วยเครื่องอัดแรงดันสูง นำตัวอย่างที่เตรียมแสดงดังรูปที่ 3.1 ไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มีนิวตรอนฟลักซ์เท่ากับ $8.95 \times$

10^{12} n/cm².s เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่ทำให้สลายตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่อาบนิวตรอนเสร็จแล้วใส่ในกระปุกตะกั่วเข้าในตู้ปฏิบัติการรังสีสูง ทำการตัดกระบอกอะลูมิเนียมและควอartz ตามลำดับ ละลายตัวอย่างด้วยก๊าซไฮลีนปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร นำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติทางรังสี ได้แก่ ความบริสุทธิ์ของรังสี ความแรงแรงรังสี และความสามารถในการผสมกับน้ำมัน



หลอดควอartzบรรจุฟารา-ไดโบรมเบนซีน กระบอกอะลูมิเนียมบรรจุหลอดควอartz

รูปที่ 3.1 ลักษณะของตัวอย่างก่อนนำไปอาบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของ Br-82

3.3.3.1 การหาความบริสุทธิ์ทางนิวไคลด์รังสีของ Br-82 (Radionuclidic purity)

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารไอโซโทปรังสี Br-82 สามารถทำโดยการใช้ไมโครปิเปตดูดตัวอย่าง Br-82 ที่เตรียมได้มา 5 ไมโครลิตร หยดลงใน planchet และ ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที นำตัวอย่างไปวัดด้วยเครื่องแกมมาสเปกโทรมิเตอร์ที่ทำการสอบเทียบพลังงานด้วยต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Co-60, Sb-125, Eu-125, Cs-137 และ Eu-154 เป็นเวลา 1000 วินาที ตั้งค่าช่วงพลังงานที่วัดให้ครอบคลุมที่ 0 - 2000 keV ทำการวิเคราะห์แกมมาสเปกตรัมที่ได้เทียบกับข้อมูลจาก Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF Database) โดยพีคพลังงานของ Br-82 จะปรากฏที่ตำแหน่งประมาณ 92, 273, 221, 554, 619, 698, 777, 828, 1044, 1317, และ 1475 keV ตามลำดับ ส่วนพีคพลังงานของ Br-80 จะอยู่ที่ตำแหน่งประมาณ: 511, 617 และ 666 keV ตามลำดับ เก็บตัวอย่างทิ้งไว้สลายตัวเป็นเวลา 10 วัน จากนั้นนำตัวอย่างที่ทิ้งไว้มาทำการวัดซ้ำอีกครั้งเพื่อยืนยันผลอีกครั้งว่าไม่มีไอโซโทปอื่นเจือปน และพีคพลังงานต่างๆของ Br-80 และ Br-83 หายไป



รูปที่ 3.2 เครื่องแกมมาสเปกโทรมิเตอร์

3.3.3.2 การหาความแรงรังสีของ Br-82

ซึ่งพารา-ไดโบรมเบนซีนมาประมาณ 45 มิลลิกรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน (จากการประมาณค่าโดยการคำนวณพารา-ไดโบรมเบนซีนน้ำหนัก 1 กรัม จะได้ความแรงรังสีหลังการอาบนิวตรอนประมาณ 200 มิลลิคูรี) บรรจุใส่ในควออร์ทที่เตรียมไว้ จำนวน 4 หลอดตัวอย่าง ทำการปิดผนึกปลายควออร์ทที่เหลือให้สนิทและนำควออร์ทบรรจุใส่ในหลอดอะลูมิเนียมพร้อมปิดฝาครอบอะลูมิเนียมด้วยเครื่องอัดแรงดันสูงให้สนิทอีกที นำแต่ละตัวอย่างไปอาบนิวตรอนที่ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มีนิวตรอนฟลักซ์เท่ากับ $8.95 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้สลายตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ Br-80 และ Br-83 สลายตัวให้หมดก่อน จากนั้นนำตัวอย่างที่อาบรังสีเสร็จแล้วใส่ในกระปุกตะกั่วนำเข้าตู้ปฏิบัติการรังสีสูง ทำการตัดครอบอะลูมิเนียมพร้อมนำตัวอย่างที่ได้ไปวัดความแรงรังสีด้วยหัววัดแบบ 4π ไอออนไนเซชันแชมเบอร์ เพื่อหาความแรงรังสีที่ได้หลังจากการอาบนิวตรอนเทียบกับการคำนวณจากสูตร

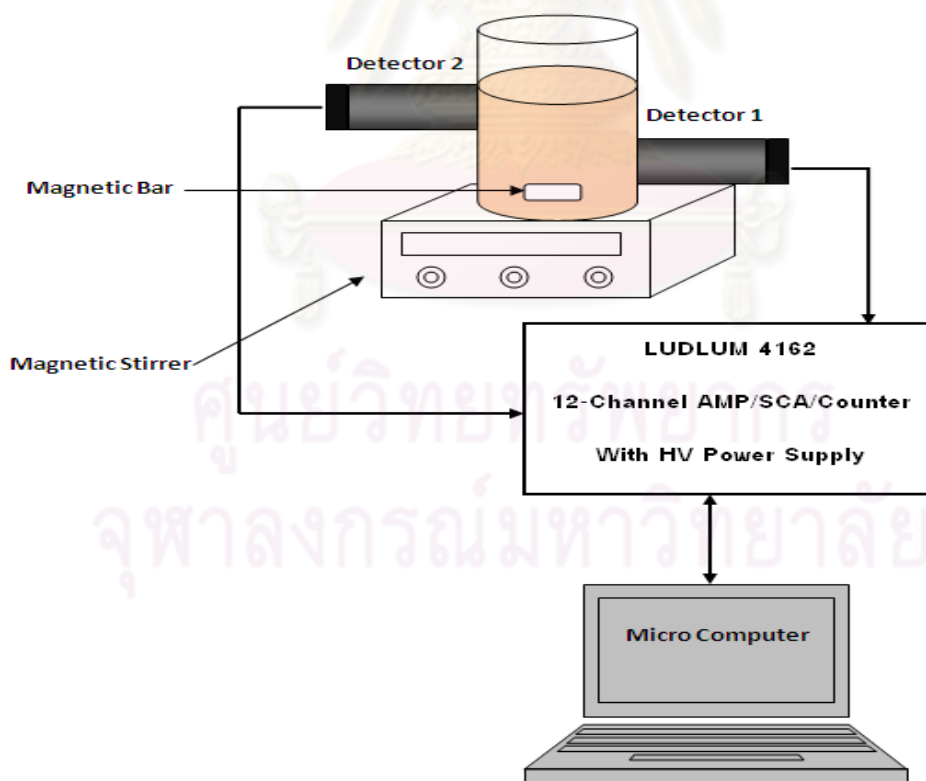
3.3.3.3 การทดสอบความสามารถในการผสมกับน้ำมัน

นำบีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร พร้อม Magnetic bar วางบน Magnetic stirrer เติมน้ำมันดีเซลลงไปประมาณ 1.8 ลิตร วางหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว ทั้งสองแนบติดกับผิวด้านนอกของบีกเกอร์ โดยหัววัดตัวที่หนึ่งวางที่ตำแหน่งด้านบนและหัววัดตัวที่สองวางแนบติดตำแหน่งด้านล่างของบีกเกอร์แสดงดังรูปที่ 3.4 ตั้งค่า LLD, window และ dwell time ที่ค่า 100 mV ,

3300 mV และ 0.01 วินาที ตามลำดับ ทำการปั่นกวนด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที และฉีดสารรังสีติดตาม Br-82 ในรูปของโบรโมเบนซีนความแรง 5 ไมโครคูรี ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในปีกเกอร์พร้อมกับการนับวัดรังสี จากนั้นหยุดการปั่นกวนและสังเกตค่านับวัดรังสี ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนปริมาตรของ Br-82 เป็น 10 และ 20 มิลลิลิตร และเปลี่ยนสารรังสีติดตามจาก Br-82 ในรูปของโบรโมเบนซีนเป็น Tc-99m รูปของน้ำแทนเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ



รูปที่ 3.3 การจัดวางหัววัดสำหรับการทดสอบการผสมกับน้ำมัน

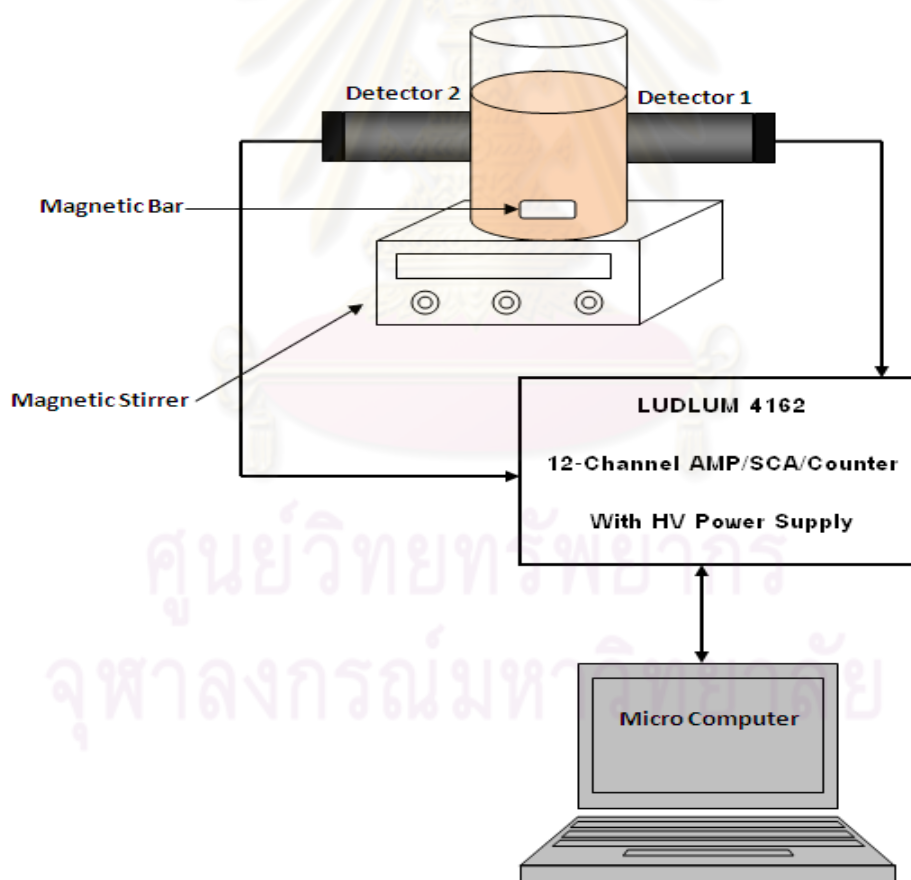


รูปที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบการผสม Br-82 ในรูปของโบรโมเบนซีน กับ น้ำมัน

3.3.4 การทดลองในห้องปฏิบัติการทดลอง

3.3.4.1 การทดลองการหาเวลาน้อยที่สุดในการผสม

นำบีกเกอร์ขนาด 3 ลิตร พร้อม magnetic bar วางบน magnetic stirrer ใส่น้ำมันลงในบีกเกอร์ปริมาตร 2.5 ลิตร ติดตั้งชุดระบบวัดรังสี โดยวางหัววัดทั้งสองแนบติดกับผิวด้านนอกของบีกเกอร์ แสดงดังรูปที่ 3.5 ตั้งค่า LLD, window และ dwell time ที่ค่า 100 mV , 3300 mV และ 0.01 วินาที ตามลำดับ ทำการปั่นกวนด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที และฉีดสารรังสีติดตาม Br-82 ความแรงรังสี 5 ไมโครคูรี ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์อย่างรวดเร็วพร้อมกับทำการนับวัดความเข้มข้นของรังสี จากนั้นสังเกตค่านับวัดรังสีจนมีค่านับวัดที่คงที่ ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยน dwell time เป็น 0.03 และ 0.05 วินาที ความเร็วในการปั่นกวนเป็น 100 และ 200 รอบต่อนาที ตามลำดับ ทำการประมวลผลจากการทดลอง



รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับหาเวลาในการผสม

3.3.4.2 การทดลองการหาอัตราการไหล

ติดตั้งชุดระบบวัดรังสีโดยวางหัววัดรังสีแนบกับผิวด้านนอกของท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ยาว 4 เมตร โดยระยะห่างระหว่างหัววัดเท่ากับ 1 เมตร หัววัดตัวที่หนึ่งวางห่างจากตำแหน่งฉีดสารรังสี 0.5 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.7 ตั้งค่า LLD, window และ dwell time ที่ค่า 100 mV , 3300 mV และ 0.005 วินาที ตามลำดับ ทำการทดสอบระบบวัดโดยนำสารรังสี Br-82 ที่เตรียมได้เคลื่อนที่ผ่านหัววัดที่ 1, 2 และ 3 และสังเกตอัตราการนับจะเพิ่มขึ้นเมื่อสารรังสีเคลื่อนที่ผ่านหัววัดทั้งสาม จากนั้นทำการเปิดระบบและฉีดสารรังสีติดตาม Br-82 ความแรง 5 ไมโครคูรี ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เข้าในระบบภายในระยะเวลารวดเร็วพร้อมกับการทำกรานับวัดรังสี สังเกตสัญญาณที่เคลื่อนที่ผ่านหัววัดทั้งสาม ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตั้งค่า dwell time เป็น 0.01, 0.03 และ 0.05 วินาที คำนวณอัตราการไหลจากข้อมูลการทดลองพร้อมประมวลผลการทดลอง

อัตราการไหล

$$Q = \frac{a \times d}{t}$$

เมื่อ

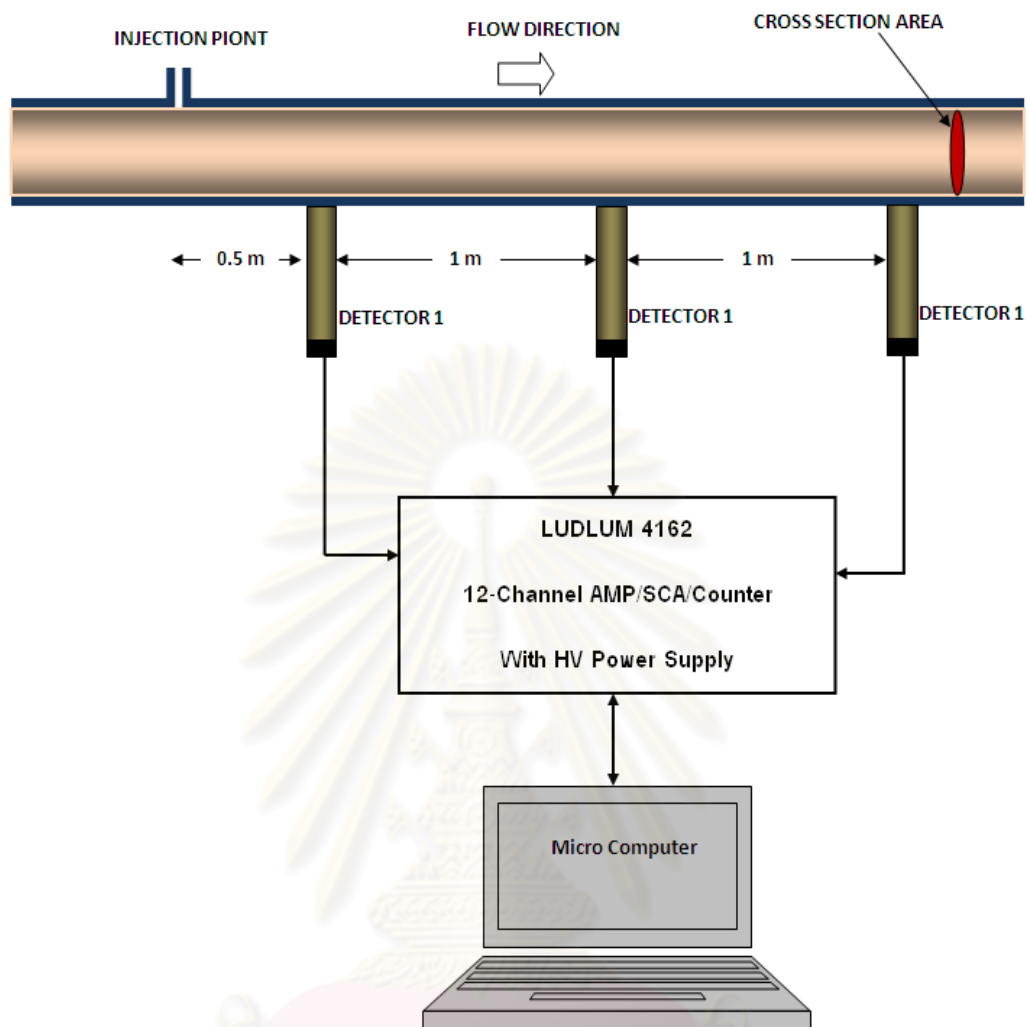
a = Cross section area

d = Distance of between two detector

t = Transit time



รูปที่ 3.6 การจัดวางหัววัดสำหรับการวัดอัตราการไหล



รูปที่ 3.7 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการวัดอัตราการไหล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 ผลเตรียมสารรังสี Br-82 ในรูปของโบรโมเบนซีน

จากการทดลอง เมื่อนำพารา-ไดโบรโมเบนซีน 45 มิลลิกรัม บรรจุใส่ควอทซ์นำไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่นิวตรอนฟลักซ์เท่ากับ 8.95×10^{12} n/cm².s เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ให้ง่ายตัวและสลายตัว 24 ชั่วโมง พบว่าสารตั้งต้นจะหลอมละลายเนื่องจากนำพารา-ไดโบรโมเบนซีนมีจุดเดือดที่ค่อนข้างต่ำและจะจับตัวเป็นก้อนหลังจากที่ตั้งทิ้งไว้ให้สลายตัว จากนั้นเมื่อนำพารา-ไดโบรโมเบนซีน มาละลายด้วยก๊าซไซลีน 0.5 มิลลิลิตร จะได้สารละลายที่มีสีแดงโดยปกติจะมีลักษณะเป็นผงสีขาว เพราะเนื้อพารา-ไดโบรโมเบนซีนจะดูดกลืนนิวตรอนเอาไว้และจะถ่ายเทพลังงานให้กับเนื้อสาร จึงเกิดปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับเนื้อสาร ทำให้โมเลกุลของสารตั้งต้นมีการเปลี่ยนแปลงไปในตัวเอง แสดงดังรูปที่ 4.1



ก่อนอบนิวตรอน



หลังอบนิวตรอน

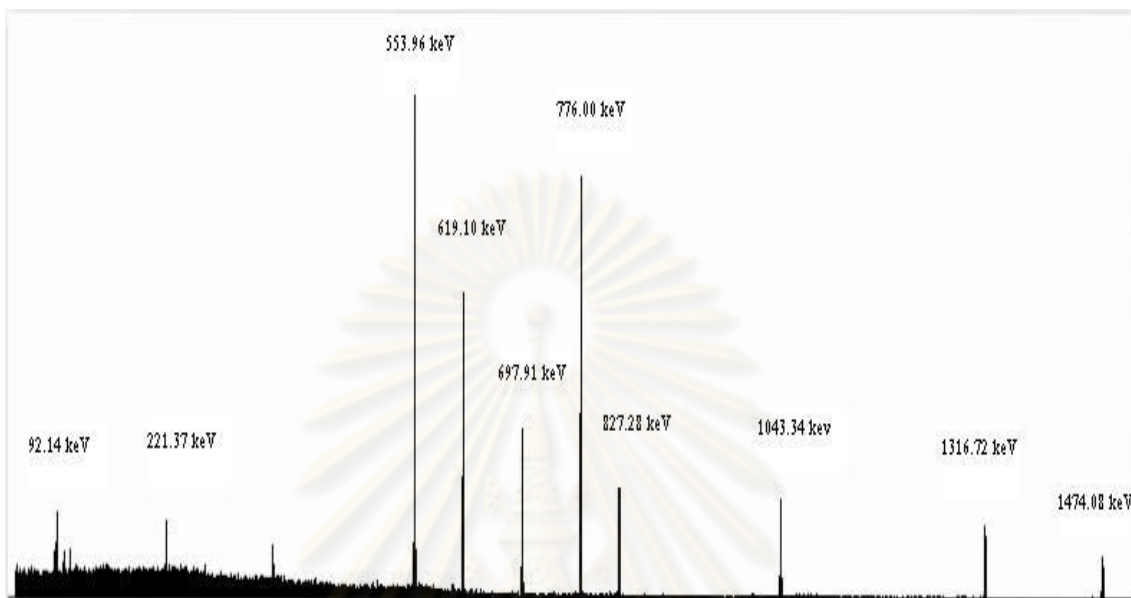
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างโบรมีนก่อนและหลังอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

4.2 ผลทดสอบคุณสมบัติของสารละลายอินทรีย์ Br-82

4.2.1 ผลการหาความบริสุทธิ์ทางนิวไคลด์ของ Br-82

จากการทดลองเมื่อนำ Br-82 ที่เตรียมได้ในรูปของโบรโมเบนซีนมาทำการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเครื่องแกมมาสเปกโทรมิเตอร์นั้น พบว่าจะปรากฏพีคพลังงานที่ตำแหน่ง 92.14 (2.358%), 221.37 (5.956%), 553.96 (80.668%), 605.90 (1.211%), 619.10 (43.539%), 697.91 (25.810%), 776.00 (69.108%), 827.28 (19.160%), 1043.34 (17.519%), 1316.72 (14.106%) และ 1474.08 (7.730%) keV ตามลำดับ ซึ่งจะไม่พบพีคพลังงานของ Br-80 เนื่องจาก Br-80 มีครึ่ง

ชีวิตเพียง 18 นาที เท่านั้นทำให้สลายตัวหมดก่อนหลังจากตั้งที่ทิ้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง และเมื่อนำสเปกตรัมที่ได้เทียบกับสเปกตรัมของโบรมีน-82 มาตรฐานจะเห็นว่าโบรมีนที่เตรียมได้มีความบริสุทธิ์ทางนิวไคลด์ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แกมมาสเปกตรัมของ Br-82 ที่วัดด้วยเครื่องแกมมาสเปกโทรมิเตอร์

จากตารางพบว่าตำแหน่งของพีคพลังงานค่อนข้างตรงกันกับสเปกตรัมมาตรฐานแต่ความเข้มของพลังงานไม่เท่ากัน เนื่องจากหัววัดรังสีที่ใช้เป็นคนละชนิดกันและประสิทธิภาพของแต่ละหัววัดก็ไม่เท่ากัน

ตารางที่ 4.1 พลังงานและความเข้มรังสีแกมมาของ Br-82 ที่เตรียมได้เทียบกับค่าจาก ENSDF

| Element | ENSDF | | EXPERIMENT | |
|---------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| | Energy (keV) | Intensity (%) | Energy (keV) | Intensity (%) |
| Br-82 | 92.190 | 0.726 | 92.14 | 2.36 |
| | 221.480 | 2.26 | 221.37 | 5.96 |
| | 554.348 | 70.8 | 553.96 | 80.67 |
| | 606.106 | 1.47 | 605.90 | 1.21 |
| | 619.106 | 52.1 | 619.10 | 43.54 |
| | 698.374 | 33.91 | 697.91 | 25.81 |

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

| Element | ENSDF | | EXPERIMENT | |
|---------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| | Energy (keV) | Intensity (%) | Energy (keV) | Intensity (%) |
| Br-82 | 776.517 | 83.5 | 776.00 | 69.11 |
| | 827.828 | 24.0 | 827.28 | 19.16 |
| | 1044.002 | 27.2 | 1043.34 | 17.52 |
| | 1317.473 | 26.5 | 1316.72 | 14.11 |
| | 1474.880 | 16.32 | 1474.08 | 7.73 |

*ENSDF = Evaluated Nuclear Structure Data File ^[10]

4.2.2 ผลการหาการหาความแรงรังสี

เมื่อนำตัวอย่าง Br-82 หลังจากอบนิวตรอนและทิ้งไว้ให้สลายตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ว นำไปวัดความแรงรังสีด้วยเครื่องวัดรังสี 4π ไอออนไนเซชันแชมเบอร์ เทียบกับการคำนวณจากสูตรความแรงรังสีที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

ตัวอย่างการคำนวณ

นิวเคลียร์ เมื่อนำพารา-ไดโบรมเบนซีน ($C_6H_4Br_2$) น้ำหนัก 45 มิลลิกรัม ไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่นิวตรอนฟลักซ์เท่ากับ 8.95×10^{12} n/cm².s เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้สลายตัว 24 ชั่วโมง จะได้ความแรงรังสีของโบรมีน-82 ?

จากสูตร

$$A = \frac{W_C \times N_A \times N_E \times I_N \times \sigma \times \emptyset}{M_C \times 100} [1 - e^{-\lambda t_i}] e^{-\lambda t_d}$$

เมื่อ A = ความแรงรังสีของไอโซโทปรังสีที่ได้หลังจากการอบ (Bq)

σ = cross section ของปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Br-82 = 2.6×10^{-24} cm²)

\emptyset = เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์

λ = ค่าคงที่การสลายตัว

t_i = เวลาในการอบรังสี

t_d = เวลาที่ทิ้งไว้หลังจากอบรังสีรวมถึงเวลาในการเตรียมและการทดลอง

W_C = น้ำหนักของสารตั้งต้นในหน่วยกรัม

N_A = เลขอะโวกาโดร (6.023×10^{23})

N_E = number of equivalents of the target element in the target compound

I_N = ร้อยละในธรรมชาติของไอโซโทปนั้นๆ (49.31 %)

M_c = น้ำหนักโมเลกุลของสารตั้งต้น (238)

$$A = \frac{0.045 \times 6.02 \times 10^{23} \times 2 \times 4.31}{238 \times 100} \times 2.6 \times 10^{-24} \times 8.95 \times 10^{12} \left[1 - e^{-\frac{\ln 2}{36} \times 12} \right] e^{-\frac{\ln 2}{36} \times 24}$$

ดังนั้น ความแรงรังสีของ Br-82 ที่ได้ประมาณ 9 มิลลิคูรี

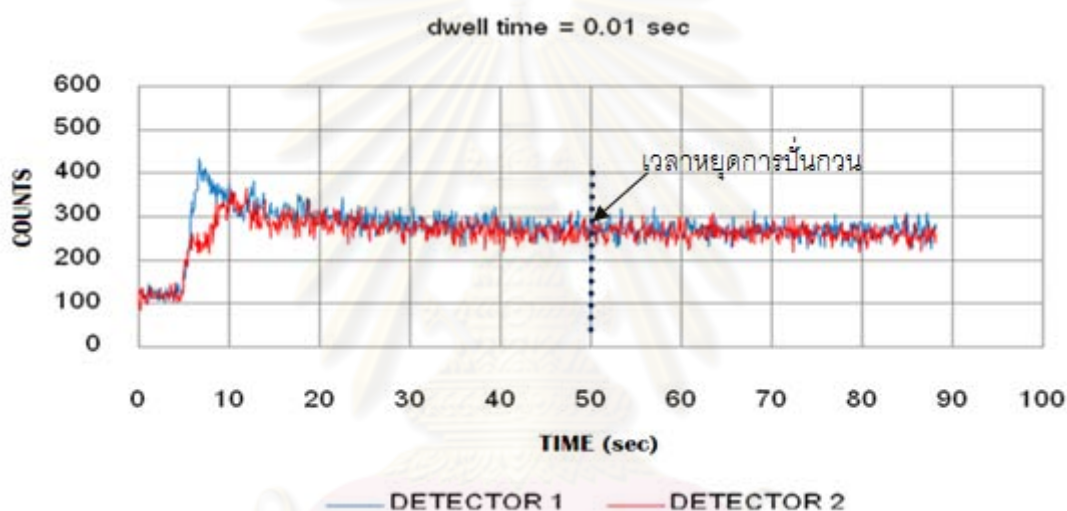
ตารางที่ 4.2 ความแรงรังสีของของ Br-82 ที่ได้หลังจากอบรังสีเสร็จและทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
เทียบกับการคำนวณจากสูตร

| weight of target (mg) | Irradiate time (hours) | Decay time (hours) | Activity (mCi) | |
|-----------------------|------------------------|--------------------|----------------|------------|
| | | | Calculation | Experiment |
| 45.0 | 12 | 24 | 9.32 | 4.31 |
| 47.1 | 12 | 24 | 9.75 | 4.20 |
| 48.1 | 12 | 24 | 9.96 | 4.44 |
| 44.7 | 12 | 24 | 9.25 | 4.00 |

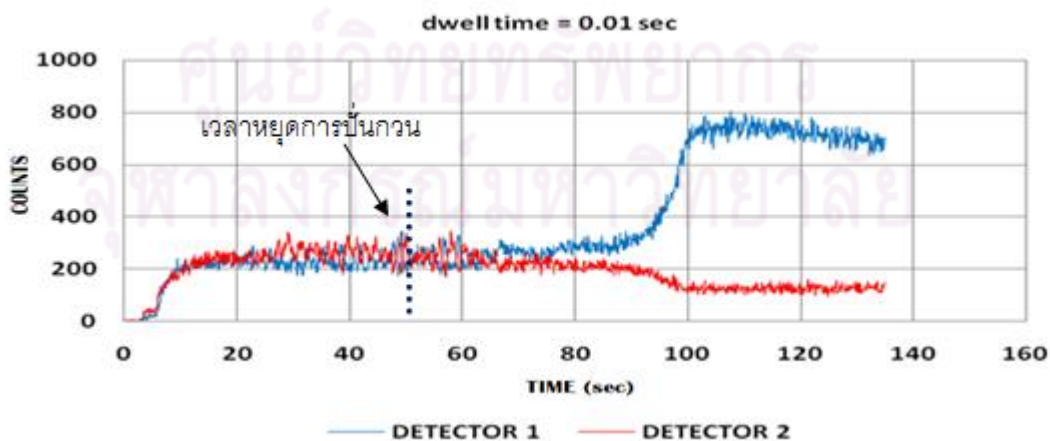
จากตารางการทดลองเมื่อใช้พารา-ไดโบรมเบนซีนน้ำหนัก 45.0, 47.1, 48.1 และ 44.1 มิลลิกรัม นำไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีนิวตรอนฟลักซ์ประมาณ 8.95×10^{12} n/cm².s เป็นเวลา 12 โมง และทิ้งให้สลายตัว 24 ชั่วโมง พบว่าหลังจากอบนิวตรอนเสร็จแล้วจะได้ความแรงรังสีเท่ากับ 4.31, 4.20, 4.44 และ 4.00 มิลลิคูรี ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับการคำนวณจากสูตรจะได้ความแรงรังสีเท่ากับ 9.32, 9.75, 9.96 และ 9.25 มิลลิคูรี ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ความแรงของรังสีที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าจากการคำนวณ เนื่องจากสารตั้งต้นบรรจุอยู่ในควอทซ์และอะลูมิเนียมพร้อมตัวถ่วงอีกชั้นหนึ่ง นิวตรอนที่จะทำปฏิกิริยาส่วนหนึ่งจึงถูกดูดกลืนในเนื้อของควอทซ์อะลูมิเนียมและตัวถ่วง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับพารา-ไดโบรมเบนซีนจึงน้อยกว่าค่าความเป็นจริง ดังนั้นความแรงรังสีที่ได้จากการทดลองจึงน้อยกว่าค่าจากการคำนวณ

4.2.3 ผลการทดสอบการผสมกับน้ำมัน

จากกราฟการทดสอบคุณสมบัติการผสมกับน้ำมันของตัวอย่าง Br-82 ที่เตรียมรูปของโบรมีนเบนซีนพบว่า Br-82 ที่เตรียมได้สามารถผสมกับน้ำมันได้อย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลาสั้นๆ ประมาณ 15 วินาที แสดงดังกราฟที่ 4.3 และไม่มีการแยกชั้นหลังจากหยุดการปั่นกวน ส่วนการนำ Tc-99m ในรูปของน้ำมาทดสอบการผสมกับน้ำมันเพื่อทำการเปรียบเทียบกันนั้นจะเห็นว่า Tc-99m ไม่สามารถผสมกับน้ำมันได้และเมื่อตั้งทิ้งไว้หลังจากหยุดการปั่นกวนจะมีการแยกชั้นเกิดขึ้น โดย Tc-99m จะอยู่ด้านล่างของน้ำมันเนื่องจากความหนาแน่นของน้ำมากกว่าน้ำมัน ทำให้หัววัดตัวที่ 1 ที่อยู่ตำแหน่งด้านล่างจึงนับวัดรังสีได้มากกว่าหัววัดตัวที่ 2 ที่อยู่ด้านบน แสดงดังกราฟที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบการผสม Br-82 ในรูปของโบรมีนเบนซีนกับน้ำมัน



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการผสม Tc-99m ในรูปของน้ำกับน้ำมัน



รูปที่ 4.5 ผลการนำ Tc-99m ผสมกับน้ำมัน

4.3 ผลการหาเวลาผสม (Mixing time)

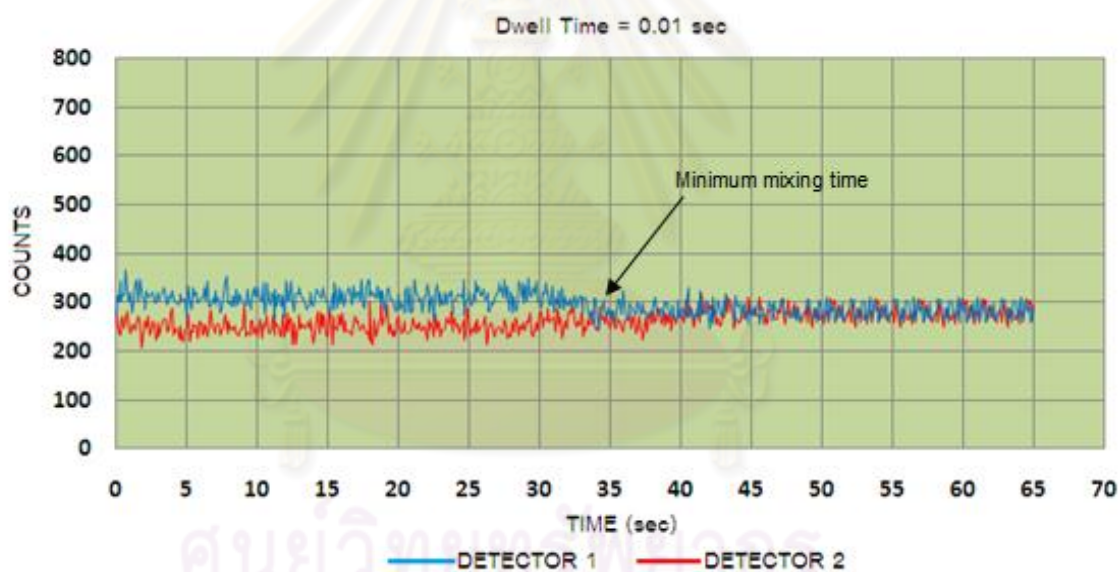
จากการทดลองการหาเวลาผสมที่น้อยที่สุด (Minimum mixing time) โดยการใช้ Br-82 ในรูปของโบรมเบนซีนความแรง 5 ไมโครคูรี ผสมลงในน้ำมันพร้อมกับการวัดความเข้มข้นของรังสีและสังเกตค่านับวัดรังสี พบว่า ที่ความเร็วในการปั่นกวน 50 รอบต่อนาที dwell time 0.01, 0.02 และ 0.03 วินาที จะได้ค่า minimum mixing time เท่ากับ 35.1, 35.1 และ 35.5 วินาที ที่ความเร็วในการปั่นกวน 100 รอบต่อนาที dwell time 0.01, 0.02 และ 0.03 วินาที จะได้ค่า minimum mixing time เท่ากับ 16.8, 16.3 และ 17.5 วินาที และที่ความเร็วในการปั่นกวน 200 รอบต่อนาที dwell time 0.01, 0.02 และ 0.03 วินาที จะได้ค่า minimum mixing time เท่ากับ 10.2, 10.8 และ 11.5 วินาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า อัตราการผสมของระบบจะเร็วขึ้นเมื่อความเร็วของการปั่นกวนเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วในการปั่นกวน 200 รอบต่อนาที จะมีค่า minimum mixing time น้อยที่สุด แสดงผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ผลการหาเวลาผสมที่น้อยที่สุด

| ความเร็วในการปั่นกวน (รอบต่อนาที) | dwell time (sec) | Minimum mixing time (sec) |
|--------------------------------------|----------------------|------------------------------|
| 50 | 0.01 | 35.1 |
| | 0.03 | 35.1 |
| | 0.05 | 35.5 |

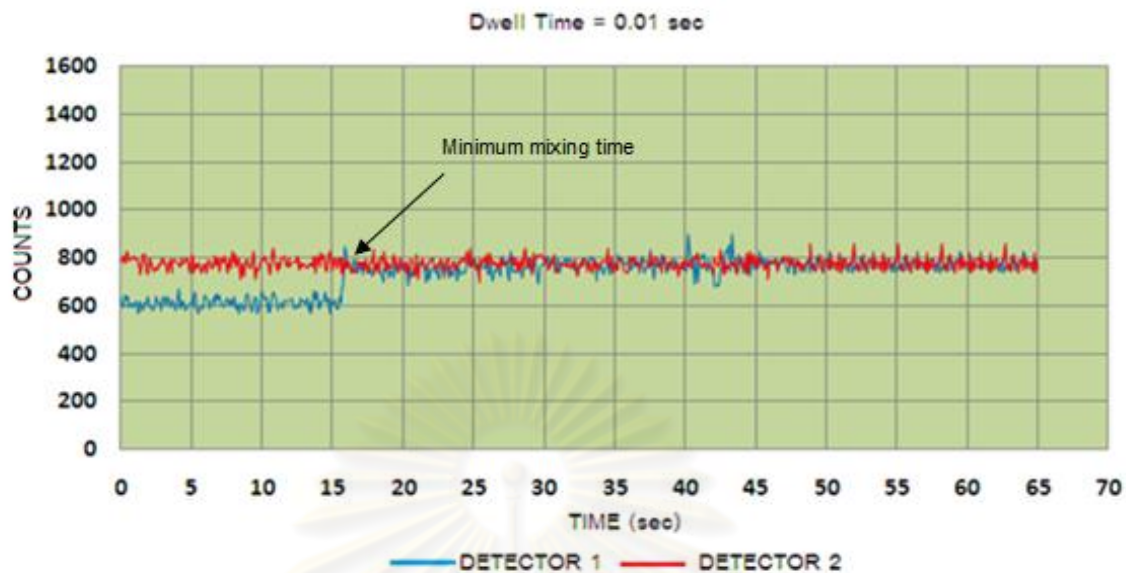
ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

| ความเร็วในการปั่นกวน (รอบต่อนาที) | dwel time (sec) | Minimum mixing time (sec) |
|--------------------------------------|---------------------|------------------------------|
| 100 | 0.01 | 16.8 |
| | 0.03 | 16.3 |
| | 0.05 | 17.5 |
| 200 | 0.01 | 10.2 |
| | 0.03 | 10.8 |
| | 0.05 | 11.5 |



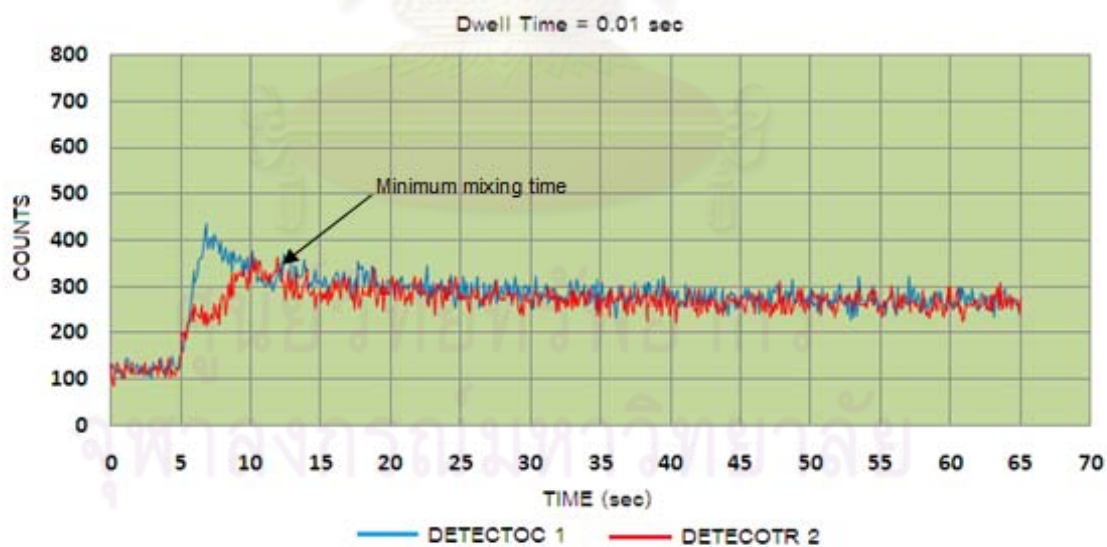
รูปที่ 4.6 ผลการหา Minimum mixing time ที่ความเร็วในการปั่นกวน 50 รอบต่อนาที

จากกราฟการทดลองจะเห็นว่า ที่ Dwell time 0.01, 0.03 และ 0.05 วินาที ความเร็วในการปั่นกวน 50 รอบต่อนาที จะได้เวลาการผสมที่น้อยที่สุดประมาณ 35 วินาที



รูปที่ 4.7 ผลการหา Minimum mixing time ที่ความเร็วในการปั่นกวน 100 รอบต่อนาที

จากกราฟการทดลองจะเห็นว่า ที่ Dwell time 00.01, 0.03 และ 0.05 วินาที ความเร็วในการปั่นกวน 100 รอบต่อนาที จะได้เวลาการผสมที่น้อยที่สุดประมาณ 16 วินาที



รูปที่ 4.8 ผลการหา Minimum mixing time ที่ความเร็วในการปั่นกวน 200 รอบต่อนาที

จากกราฟการทดลองจะเห็นว่า ที่ Dwell time 00.01, 0.03 และ 0.05 วินาที ความเร็วในการปั่นกวน 200 รอบต่อนาที จะได้เวลาการผสมที่น้อยที่สุดประมาณ 10 วินาที

4.4 ผลการหาอัตราการไหล

จากการทดลองการหาอัตราการไหลด้วยวิธี Pulse Velocity หรือ Peak-to-Peak โดยใช้โบรโมเบนซีน ความแรง 5 ไมโครคูรี ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ฉีดเข้าไปในระบบน้ำมันที่ประกอบด้วยท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ยาว 4 เมตร พร้อมทำการตรวจวัดรังสีด้วยหัววัดรังสีแบบเรอองรังสีขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว โดยหัววัดทั้งสามวางห่างกันด้วยระยะทาง 1 เมตร และหัววัดตัวที่ 1 วางห่างจากตำแหน่งฉีด 0.5 เมตร และสังเกตสัญญาณที่เคลื่อนที่ผ่านหัววัดทั้งสาม จากนั้นทำการคำนวณอัตราการไหลค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตัวอย่างการคำนวณ

ระบบประกอบด้วยท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างหัววัดเท่ากับ 3 เมตร และเวลาทั้งหมดในการเคลื่อนที่ของสัญญาณระหว่างหัววัดเท่ากับ 5 วินาที

จากสูตร

$$\text{อัตราการไหล} \quad Q = \frac{a \times d}{T}$$

เมื่อ a = พื้นที่หน้าตัดของท่อ (cross-section area) = $\pi r^2 = 3.14 \times (1 \text{ เซนติเมตร})^2$

d = ระยะห่างระหว่างหัววัด (distance between the two detectors = 3 เมตร)

T = เวลาในการเคลื่อนที่ของสัญญาณระหว่างหัววัดทั้งสอง (transit time = 3.69 วินาที)

แทนค่าในสูตร จะได้

$$Q = \frac{3.14 \times (1 \text{ cm})^2 \times 300 \text{ cm}}{3.69 \text{ sec}}$$

$$= 255.4 \text{ cm}^3/\text{sec}$$

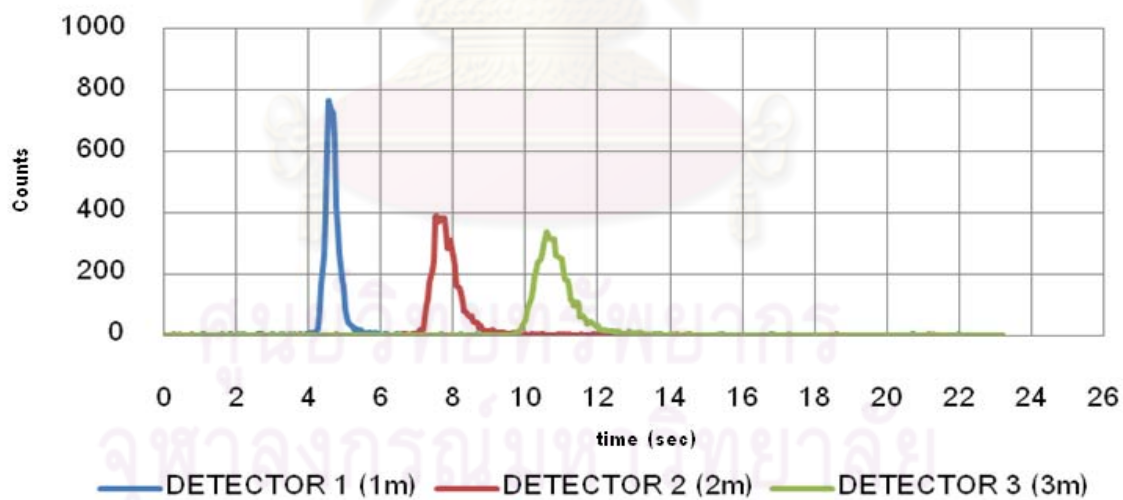
ตารางที่ 4.4 ผลการวัดอัตราการไหลด้วยวิธี pulse velocity หรือ peak to peak

| Dwell time (s) | Pluse1 (s) | Pluse2 (s) | Pluse3 (s) | Average transit time (s) | Flow rate (ml/s) |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------------|---------------------|
| 0.005 | 4.55 | 7.65 | 10.60 | 3.69 | 255.4 |
| | 7.70 | 11.00 | 13.98 | | |
| | 8.10 | 13.00 | 17.90 | | |

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

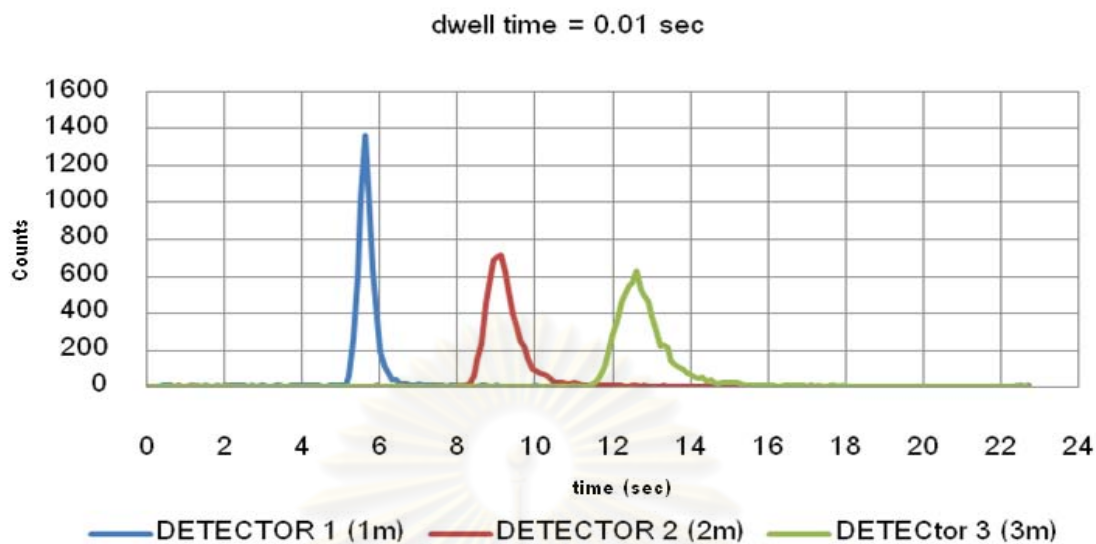
| Dwell time (s) | Pluse1 (s) | Pluse2 (s) | Pluse3 (s) | Average transit time (s) | Flow rate (ml/s) |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------------|---------------------|
| 0.01 | 5.6 | 9.1 | 12.6 | 3.80 | 248.0 |
| | 9.8 | 14.1 | 18.0 | | |
| | 5.2 | 8.6 | 12.8 | | |
| 0.03 | 4.8 | 8.7 | 12.3 | 3.70 | 254.7 |
| | 5.1 | 9 | 12.3 | | |
| | 4.8 | 8.7 | 12.3 | | |
| 0.05 | 7.0 | 11 | 14.5 | 3.58 | 263.3 |
| | 6.5 | 10 | 13.5 | | |
| | 6.5 | 11 | 13.5 | | |

dwell time = 0.005 sec



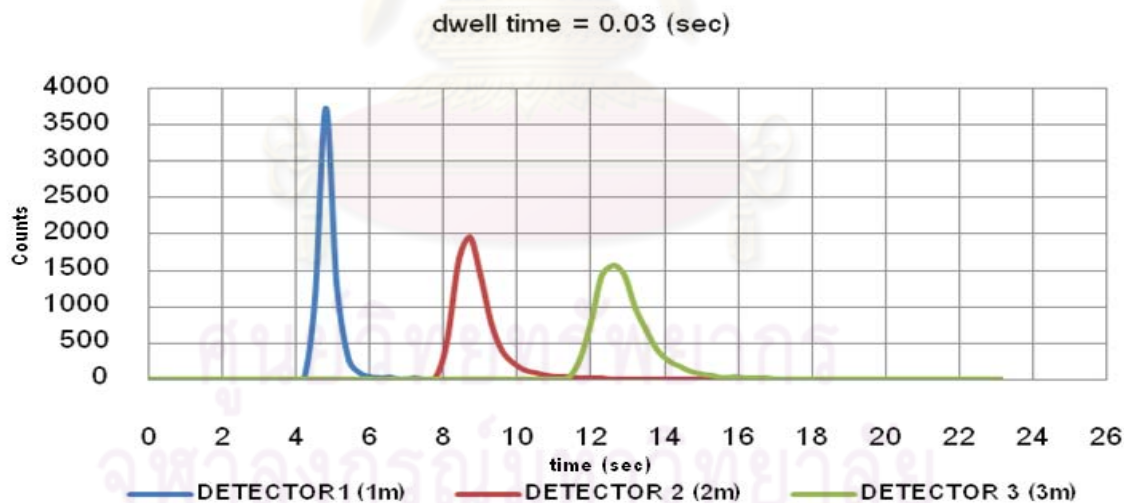
รูปที่ 4.9 ผลการหาอัตราการไหลที่ค่า dwell time เท่ากับ 0.005 วินาที

จากกราฟการทดลอง ที่ Dwell time เท่ากับ 0.005 วินาที จะได้ค่า Transit time เฉลี่ยระหว่างหัววัดทั้งสามประมาณ 3.69 วินาที ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณอัตราการไหลของระบบ จะมีอัตราการไหลเท่ากับ 248.0 มิลลิลิตรต่อวินาที



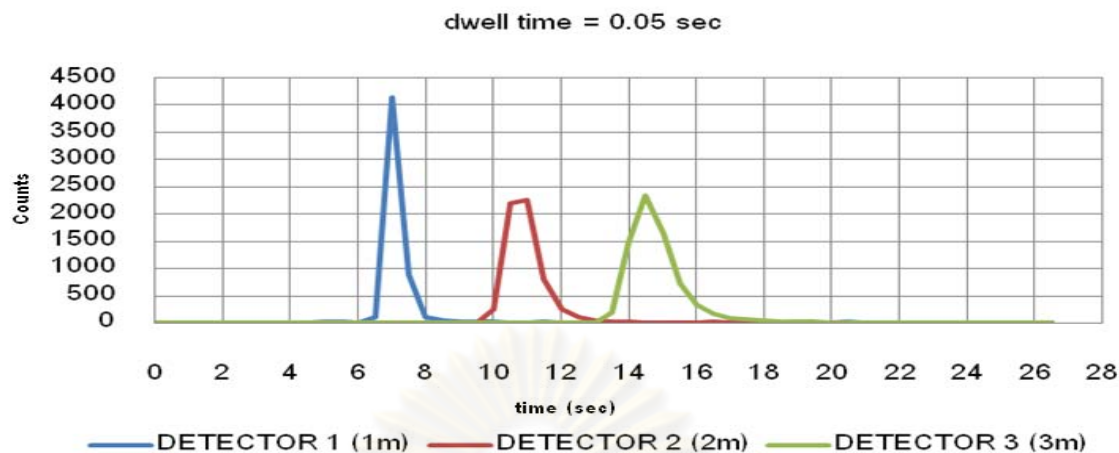
รูปที่ 4.10 ผลการหาอัตราการไหลที่ค่า dwell time เท่ากับ 0.01 วินาที

จากกราฟการทดลอง ที่ Dwell time เท่ากับ 0.01 วินาที จะได้ค่า Transit time เฉลี่ยระหว่างหัววัดทั้งสามประมาณ 3.80 วินาที ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณอัตราการไหลของระบบจะมีอัตราการไหลเท่ากับ 255.4 มิลลิลิตรต่อวินาที



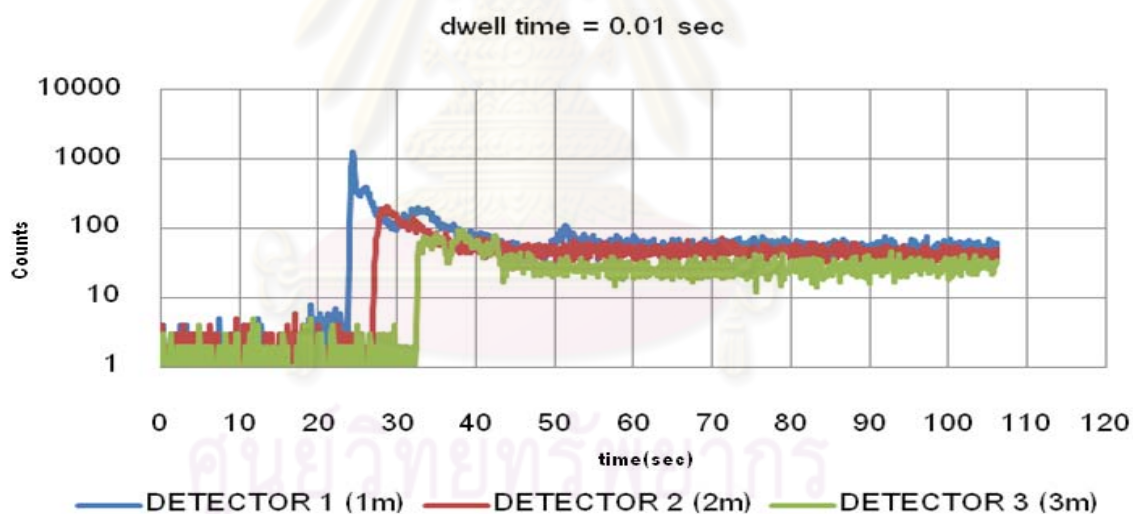
รูปที่ 4.11 ผลการหาอัตราการไหลที่ค่า dwell time เท่ากับ 0.03 วินาที

จากกราฟการทดลอง ที่ Dwell time เท่ากับ 0.03 วินาที จะได้ค่า Transit time เฉลี่ยระหว่างหัววัดทั้งสามประมาณ 3.70 วินาที ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณอัตราการไหลของระบบจะมีอัตราการไหลเท่ากับ 254.7 มิลลิลิตรต่อวินาที



รูปที่ 4.12 ผลการหาอัตราการไหลที่ค่า dwell time เท่ากับ 0.05 วินาที

จากกราฟการทดลอง ที่ Dwell time เท่ากับ 0.05 วินาที จะได้ค่า Transit time เฉลี่ยระหว่างหัววัดทั้งสามประมาณ 3.58 วินาที ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณอัตราการไหลของระบบจะมีอัตราการไหลเท่ากับ 263.3 มิลลิลิตรต่อวินาที



รูปที่ 4.13 ผลการใช้ Tc-99m ในการหาอัตราการไหลของระบบน้ำมัน

จากกราฟการทดลองการใช้ Tc-99m ในรูปของ Sodium technetate หาอัตราการไหลของระบบน้ำมัน จะเห็นได้ Tc-99m ไม่ผสมกับน้ำมัน ทำให้เกิดการติดที่ผิวผนังภายในของท่อจึงไม่สามารถทำการประเมินค่า Transit time ได้ยาก ดังนั้นในการเลือกใช้สารรังสีติดตามจึงต้องเลือกชนิดที่สามารถผสมกับสารที่ทำการตรวจได้อย่างสมบูรณ์ เพื่อให้ได้ผลการตรวจสอบมีความถูกต้องและชัดเจน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 การเตรียม Br-82 ในรูปของโบรมเบนซีน

จากการทดลองในการเตรียม Br-82 จะเห็นได้ว่า เมื่อนำพารา-ไดโบรมเบนซีนไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ จะทำให้พารา-ไดโบรมเบนซีนเกิดการหลอมหลอมละลายและจับตัวเป็นก้อนหลังจากทิ้งไว้ให้เย็น เพราะว่าพารา-ไดโบรมเบนซีนมีจุดหลอมเหลวที่ค่อนข้างต่ำ จากนั้นเมื่อนำพารา-ไดโบรมเบนซีนที่อบรังสีเสร็จแล้วมาละลายด้วยก๊าซไซลีนจะได้สารละลายที่มีสีแดง เนื่องจากเนื้อของพารา-ไดโบรมเบนซีนจะดูดกลืนพลังงานของนิวตรอนเอาไว้และจะถ่ายเทพลังงานให้กับเนื้อสาร จึงเกิดปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสารทำให้โมเลกุลของพารา-ไดโบรมเบนซีนมีการเปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง

5.2 การทดสอบคุณสมบัติของ Br-82

5.2.1 การหาความบริสุทธิ์ทางนิวไคลด์ของ Br-82

จากการทดลองนำตัวอย่าง Br-82 ที่เตรียมได้ในรูปของโบรมเบนซีนมาทำการวัดด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์และทำการวิเคราะห์สเปกตรัม พบว่าจะปรากฏพีคพลังงานที่ตำแหน่ง 92.14 (2.358 %), 221.37 (5.956 %), 553.96 (80.668 %), 605.90 (1.221 %), 619.10 (43.539 %), 697.91 (25.810 %), 776.00 (69.108 %), 827.28 (19.610 %), 1043.34 (17.519 %), 136.72 (14.160 %) และ 1474.08 (7.730 %) ซึ่งเป็นพีคพลังงานของ Br-82 แสดงให้เห็นว่า สารรังสี Br-82 ที่เตรียมได้ในรูปของโบรมเบนซีน มีความบริสุทธิ์ทางนิวไคลด์รังสีที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับข้อมูลจากสเปกตรัมมาตรฐาน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำสารรังสี Br-82 ในรูปของโบรมเบนซีนที่เตรียมได้ ไปประยุกต์ใช้เป็นสารรังสีติดตามในอุตสาหกรรมน้ำมัน อุตสาหกรรมปิโตรเคมี รวมทั้งอุตสาหกรรมด้านอื่นๆ ได้อีกด้วย

5.2.2 การหาความแรงรังสีของ Br-82

จากการนำพารา-ไดโบรมเบนซีนที่อบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แล้ว มาวัดหาความแรงรังสีโดยวัดด้วยเครื่อง 4π ไอออนเซชันแชมเบอร์ พบว่าเมื่อใช้พารา-ไดโบรมเบนซีนน้ำหนัก 45.0, 47.1, 48.1 และ 44.7 มิลลิกรัม จะได้ความแรงรังสีเท่ากับ 9.32, 9.75, 9.96 และ 9.25 มิลลิคูรี ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความแรงของรังสีที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าจากการคำนวณ เนื่องจากสารตั้งต้นบรรจุอยู่ในแก้วและอะลูมิเนียมพร้อมตัวถ่วงอีกชั้นหนึ่ง ทำให้นิวตรอนที่จะทำปฏิกิริยาถูกดูดกลืนในเนื้อของควอทซ์อะลูมิเนียมและตัวถ่วง ทำให้

อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับพารา-ไดโบรมเบนซีนจึงน้อยกว่าค่าความเป็นจริง ทำให้ความแรงรังสีที่ได้จากการทดลองน้อยกว่าค่าจากการคำนวณ ดังนั้นเมื่อจะทำการเตรียมสำหรับการใช้งานจริง เราควรเผื่อน้ำหนักของสารตั้งต้นอีก เพื่อให้ได้ความแรงของรังสีหลังจากการเตรียมเพียงพอสำหรับการใช้งาน

5.2.3 การทดสอบการผสมกับน้ำมัน

จากการทดสอบคุณสมบัติการผสมกับน้ำมันของตัวอย่าง Br-82 ที่เตรียมได้ในรูปของโบรมเบนซีน พบว่าตัวอย่างที่เตรียมสามารถผสมกับน้ำมันได้ดีภายในระยะเวลาที่รวดเร็ว โดยสังเกตจากค่านับวัดรังสีจากกราฟของการทดลองที่มีค่าค่อนข้างคงที่ภายในระยะเวลาสั้น ๆ และเมื่อตั้งทิ้งไว้นานๆ ก็ไม่มีการแยกชั้น เมื่อเทียบกับการนำ Tc-99m ในรูปของ Sodium technetate ผสมกับน้ำมันจะเห็นการแยกชั้นได้อย่างชัดเจนหลังจากที่หยุดการปั่นกวนและตั้งทิ้งไว้ ดังนั้นตัวอย่าง Br-82 ที่เตรียมได้ในรูปของโบรมเบนซีนจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้เป็นสารรังสีติดตามเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมัน รวมทั้งอุตสาหกรรมเคมีอื่น ๆ เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตได้

5.3 การหาเวลาการผสม

จากการทดลองการหาเวลาที่น้อยที่สุดในการผสม โดยการใช้ Br-82 ในรูปของโบรมเบนซีนความแรง 5 ไมโครคูรีต่อมิลลิลิตร ผสมลงในน้ำมันพร้อมกับทำการนับวัดรังสี จากการสังเกตค่านับวัดรังสี พบว่า ที่ความเร็วในการปั่นกวน 50 100 และ 200 รอบต่อนาที เวลาที่น้อยที่สุดในการผสมเท่า 35 16 และ 10 วินาที ตามลำดับ โดยประมาณ แสดงให้เห็นว่า อัตราการผสมของระบบจะเร็วขึ้นเมื่อความเร็วในการปั่นกวนเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วในการปั่นกวน 200 รอบต่อนาที จะใช้เวลาที่น้อยที่สุดในการผสม

5.4 การหาอัตราไหล

จากการทดลองการหาอัตราการไหลของระบบน้ำมันในห้องปฏิบัติการ พบว่าที่ Dwell time เท่า 0.005, 0.01, 0.03 และ 0.05 วินาที จะได้อัตราการไหลเท่ากับ 255.4, 248.0, 254.7 และ 263.3 มิลลิลิตรต่อวินาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้ Br-82 ที่เตรียมขึ้นในรูปของโบรมเบนซีนในการวัดอัตราการไหลมีความน่าเชื่อถือ และมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้เป็นสารรังสีติดตามสำหรับวัดอัตราการไหลของระบบในอุตสาหกรรมน้ำมัน อุตสาหกรรมปิโตรเคมีรวมทั้งประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านอื่นๆ ได้จริง

5.5 ข้อเสนอแนะ

5.5.1 การเตรียมตัวอย่างสารตั้งต้นในการอบรังสี

การเลือกสารตั้งต้นที่ใช้ควรเลือกให้เหมาะสำหรับงานที่ทำ ไม่ควรใช้สารตั้งต้นที่มีกระบวนการเตรียมยุ่งยากเกินไป เพื่อลดเวลาและขั้นตอนการทำงานหลังจากอบรังสีเสร็จแล้ว เนื่องจากเป็นสารรังสี และควรมีตัวถ่วงควอทซ์ไว้จะช่วยให้ตัวอย่างไม่ลอยขึ้นหรือขยับเขยื้อนขณะทำการอบเพราะทำให้นิวตรอนฟลักซ์ที่อบไม่สม่ำเสมอ สารตั้งต้นที่ใช้ควรอยู่ในรูปของแข็ง เพราะขณะอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะทำให้เกิดแก๊สภายในควอทซ์ เมื่อตัดทำการตัดควอทซ์จะทำให้เกิดการระเบิดได้ ซึ่งทำให้เป็นอันตรายและเกิดการเปราะเปื้อนบริเวณทำงาน ตัวอย่างที่ใช้ควรจะมีคุณสมบัติสูงเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดไอโซโทปรังสีที่เราไม่ต้องการหรือไอโซโทปรังสีที่มีครึ่งชีวิตยาวๆ จึงไม่เหมาะที่นำไปเป็นสารติดตามในอุตสาหกรรมเพราะจะทำให้เกิดการเปราะเปื้อนของผลิตภัณฑ์ได้

5.5.2 การเตรียม Br-82 ในรูปของโบรมีนเบนซีน

ในการเตรียมสารรังสี Br-82 จะต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างมากเนื่องจาก Br-82 จะปล่อยรังสีแกมมาพลังงานสูง สามารถระเหยได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง และในระหว่างการเตรียมก็ควรมีเครื่องกำบังรังสีที่เหมาะสม ดังนั้นการเตรียมจึงจำเป็นต้องทำในตู้ปฏิบัติการรังสีสูง มีระบบกรองที่มีประสิทธิภาพเพื่อไม่ให้สารกัมมันตรังสีหลุดลอดออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ อุปกรณ์ที่ใช้ทดลองควรทำจากวัสดุที่ทนต่อน้ำมัน เพราะจะทำให้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างถูกกัดกร่อน จะทำให้เกิดการเปราะเปื้อนได้ เนื่องจากสารรังสีติดตามที่เตรียมจะอยู่ในรูปของน้ำมัน

5.5.3 การทดสอบคุณสมบัติของ Br-82

5.5.3.1 การหาคุณสมบัติของ Br-82

- สารตั้งต้นที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์สูง เพื่อป้องกันการเกิดนิวไคลด์รังสีตัวอื่น ๆ
- ควรจัดหาตู้ปฏิบัติการรังสีสูง (Hot Cell) เพื่อใช้ในการเตรียมสารรังสี
- หลังจากวัดด้วยเครื่องแกมมาสเปกโทรมิเตอร์แล้วเราควรเก็บตัวอย่างทิ้งไว้ประมาณ 15 วัน และทำการวัดซ้ำอีกครั้ง เป็นการยืนยันผลอีกทางหนึ่งเพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีการปะปนของนิวไคลด์รังสีอื่น ๆ ที่มีครึ่งชีวิตที่ยาว

5.5.3.2 การทดสอบความแรงของ Br-82

- ปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ต้องทราบค่าที่แน่นอน
- ต้องทราบค่านิวตรอนฟลักซ์ที่ใช้ออบสารตั้งต้น

5.5.3.3 การทดสอบการผสมกับน้ำมัน

- การจัดวางหัววัดรังสีจะต้องมีลักษณะที่เหมือนกัน
- ควรทดลองกับตัวอย่างน้ำมันชนิดอื่น ๆ เช่น ไบโอดีเซล

5.5.4 การหาเวลาการผสม

- การจัดวางหัววัดรังสีจะต้องแนบติดกับผิวของเครื่องผสมที่จะทำการตรวจวัด
- การขีดสารรังสีติดตามลงในเครื่องผสมต้องทำการขีดทันทีทันใด
- การนับรังสีจะต้องนับวัดจนกว่าค่านับวัดมีค่าคงที่ทางสถิติ
- การหาค่า Minimum Mixing Time จะต้องได้จากค่าเฉลี่ยของ Minimum Mixing Time และต้องพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมาตรฐานของแต่ละช่วงเวลาด้วย

5.5.5 การอัตราการไหลของน้ำมัน

- ปริมาตรของท่อระหว่างหัววัดต้องทราบค่าที่แน่นอน
- การจัดวางหัววัดต้องมีลักษณะที่เหมือนกัน
- สามารถประยุกต์ใช้ได้กับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดที่สม่ำเสมอ
- การวัดค่าที่ถูกต้องไม่จำเป็นต้องทราบค่าความแรงรังสี
- ในการประยุกต์ใช้ในการหาอัตราการไหลของตัวอย่างที่เป็นก๊าซ จะต้องทราบอุณหภูมิและความดันที่แน่นอน เพื่อที่จะนำไปใช้คำนวณหาอัตราการไหลได้อย่างถูกต้อง

รายการอ้างอิง

- [1] Pant, H. J., Yelgoankar, V. N. Radiotracer investigations in aniline production reactors. Applied Radiation and Isotopes 57 (2002): 319–325.
- [2] Sugiharto, S., Su'ud, Z., Kurniadi, R., Wibisono, W., Abidin, Z. Radiotracer method for residence time distribution study in multiphase flow system. Applied Radiation and Isotopes 67 (2009): 1445–1448.
- [3] Behin, J., Aghajari, M. Influence of water level on oil–water separation by residence time distribution curves investigations. Separation and Purification Technology 64 (2008): 48–55.
- [4] Kasban, H., Zahran, O., Arafa, H., El-Kordy, M., Elaraby, S.M.S., Abd El-Samie, F.E. Laboratory experiments and modeling for industrial radiotracer applications. Applied Radiation and Isotopes 68 (2010): 1049–1056.
- [5] Fabio E. da Costa, Hamada, M. Mamada. Development of a scintillator detector set with counter and data acquisition for flow measurements. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 486 (2002): 150–155.
- [6] Yelgaonkar, V.N., Jayakumar, T.K., Singh, S., Sharma, M.K. Combination of sealed source and radiotracer technique to understand malfunctioning in a chemical plant. Applied Radiation and Isotopes 67 (2009): 1244–1247.
- [7] Pant, H. J., Sharma, V.K., Vidya Kamudu, M., Prakash, S.G., Krishnamoorthy, S., Anandam, G., Seshubabu Rao, P., Ramani, N.V.S., Gursharan Singh, and Sonde, R.R. Investigation of flow behaviour of coal particles in a pilot-scale fluidized bed gasifier (FBG) using radiotracer technique. Applied Radiation and Isotope 67 (2009): 1600-1615.
- [8] Charlton, J.S. Radioisotope techniques for problem-solving in industrial process plants. Leonard Hill, Glasgow and London, 1986

- [9] International Atomic Energy Agency. Leak Detection in Heat Exchangers and Underground Pipelines Using Radiotracers. Training Course Series No. 38
IAEA, VIENNA, 2009
- [10] R.H. Heath, Gamma ray Spectrometry, Idaho National Engineering Laboratory.
Published 3-29-1999.
http://www.inl.gov/gammaray/catalogs/ge/catalog_ge.shtml
- [11] International Atomic Energy Agency. Radiotracer Residence Time Distribution Method for Industrial and Environmental Applications. Training Course Series No. 31
IAEA, VIENNA, 2008

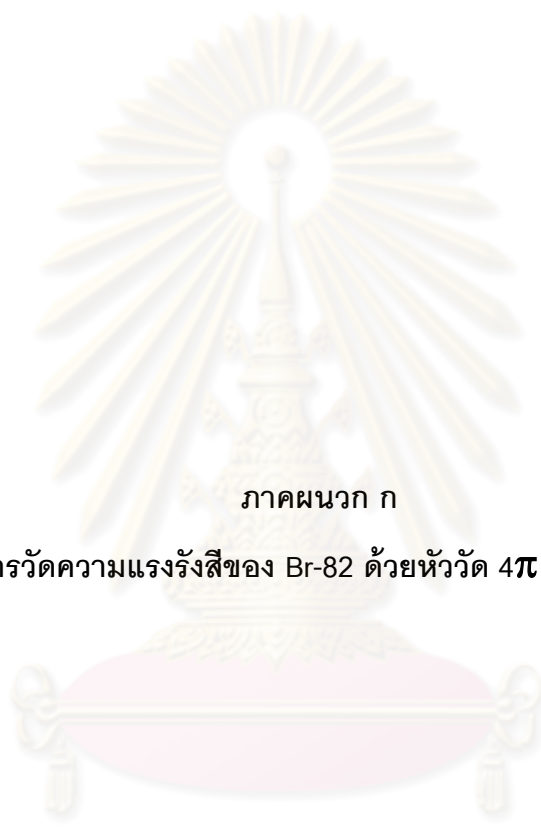


ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ใบรับรองผลการการวัดความแรงรังสีของ Br-82 ด้วยหัววัด 4 π ไอออนแชมเบอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TELEPHONE : OFFICE 0-2596-7600
 : NSRL 0-2596-7600 ext 1428, 0-2562-0096
 CABLE : ATENPEA BANGKOK 10900
 E-MAIL : NSRL@OAEPMAIL.GO.TH
 FACSIMILE : 0-2562-0093



NATIONAL STANDARD RADIOACTIVITY LABORATORY
 OFFICE OF ATOMS FOR PEACE (NSRL-OAP)
 16 VIBHAVADI RANGSIT ROAD, CHATUCHAK
 BANGKOK 10900 THAILAND

Reference No: 2011RM0005

Date: Tuesday, 19 April, 2011

CERTIFICATE

Bromine 82

| | |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| Radionuclide | Bromine 82 |
| Source Identification | Br-82-001/11 |
| Source Description | P-dibromobenzene in quartz |
| Total Activity | 814 μ Ci |
| Reference Time | 31 January 2011, 13:58 (GMT+7) |
| Relative expanded uncertainty (k=2) | 4 percent |
| Reference System | 4 π Ion Chamber System |
| Half Life | 35.3 hours |

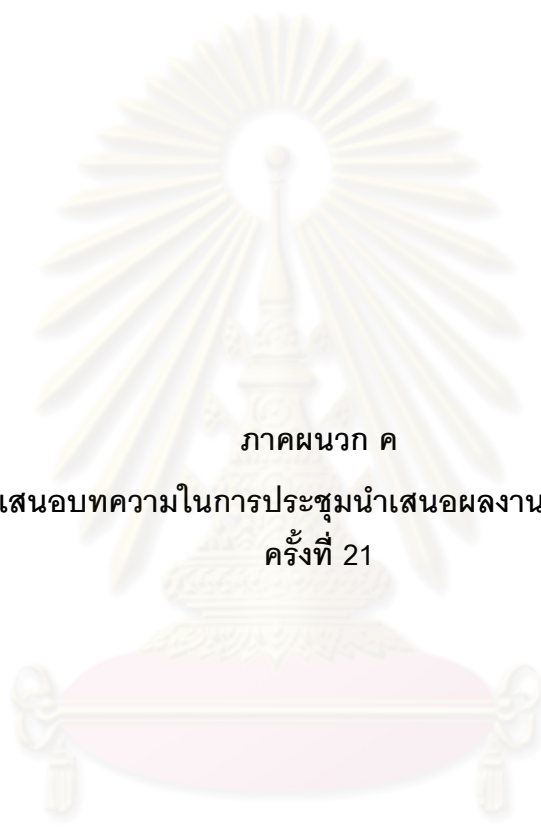
This reference system was traceable to the Primary Standard NMJ/AIST, Japan(ETL) in April 2000, and stabilized by Ho-166m sealed stainless capsule No.99-104.

Calibrated by

(Mr. Paphon Phaukkachane)

(Mr. Thongchai Soodprasert)

Responsible Physicist of the NSRL



ภาคผนวก ค

ผลการคัดเลือกนำเสนอบทความในการประชุมนำเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ
ครั้งที่ 21

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิต
GRADUATE STUDIES, RANGSIT UNIVERSITY

52/347 เมืองทอง อ.พหลโยธิน ต.พหลโยธิน 5 เมือง รังสิต ปทุมธานี 12000
 52/347 Mungakke, Phaholyothin Road, Tombol Lakhok, Amper Muang, PathumThani, 12000

ที่ บว 6800/324

5 เมษายน 2554

เรื่อง แจ้งผลการคัดเลือกนำเสนอบทความในการประชุมนำเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 21

เรียน นาย ธนศ คงคา

- สิ่งที่ส่งมาด้วย 1. ข้อเสนอแนะการประเมินบทความวิจัย
 2. ข้อกำหนดในการจัดทำโปสเตอร์เพื่อนำเสนอผลงาน

ตามที่ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิต ได้รับเกียรติจากสภาคณบดีบัณฑิตวิทยาลัยแห่งประเทศไทย (สบท.) ให้เป็นเจ้าภาพในการจัดการประชุมนำเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 21 ในวันที่พฤหัสบดี ที่ 26 พฤษภาคม 2554 ณ มหาวิทยาลัยรังสิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเวทีเผยแพร่ผลงานวิจัย และเปิดโอกาสให้ผู้สำเร็จการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ได้นำเสนอผลงานวิจัยต่อสังคมและผู้สนใจนั้น

ทางบัณฑิตวิทยาลัย ขอเรียนให้ทราบว่าบทความของ นาย ธนศ คงคา ได้ผ่านการพิจารณาและคัดเลือกจากผู้เชี่ยวชาญ (Reviewer) และคณะกรรมการของบัณฑิตวิทยาลัย ได้นำเสนอในการประชุมดังกล่าว ในรูปแบบโปสเตอร์ โดยให้ปรับปรุงบทความวิจัยตามข้อเสนอแนะดังกล่าวแบบ 1) ดังนั้น ขอให้ท่านดำเนินการปรับปรุงบทความฉบับสมบูรณ์ ในรูปแบบไฟล์ Microsoft Word 2003 ส่งมาที่ e-mail: gradcon21@gmail.com ภายในวันจันทร์ที่ 11 เมษายน พ.ศ. 2554 เพื่อกองบรรณาธิการเอกสารประกอบการประชุมนำเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 21 จะดำเนินการรวบรวมและตีพิมพ์บทความวิจัยของท่านในเอกสารประกอบการประชุมฯ เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยต่อสังคมต่อไป

และเพื่อให้การนำเสนอผลงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ขอให้ท่านจัดทำโปสเตอร์ตามรายละเอียดที่กำหนดในเอกสารแบบ 2) และดำเนินการติดตั้งโปสเตอร์นำเสนอผลงาน ตามวัน เวลา และสถานที่ที่กำหนด เพื่อใช้ในการเตรียมการนำเสนอผลงานของท่านต่อไป หากมีข้อสงสัยกรุณาติดต่อ ผศ.ดร.เพ็ญจันทร์ ธีระจิตร หรือ คุณสุพร ทวีแฉวีญู โทรศัพท์ 02-997-2222 ต่อ 4001 ถึง 4005

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ และดำเนินการ

ศ.ดร.เพ็ญจันทร์ ธีระจิตร

ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยฯ ร.ศ.หญิง ดร.วรวรรณี สุขสาคร
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

สำนักงานเลขานุการบัณฑิตวิทยาลัย
 โทรศัพท์ 0-2997-2222 ต่อ 4001 ถึง 4005
 โทรสาร 0-2997-2222 ต่อ 4000

ศูนย์วิทยพักรังสิต
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนนธ เศรษฐา เกิดวันที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในระดับ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552 ได้รับทุนสนับสนุนในโครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปัจจุบันทำงานที่ ศูนย์ไอโซโทปรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย