

การพัฒนาเทคนิคในการประเมินเวลาที่สารอยู่ในระบบ
โดยใช้เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ซีเซียม-137/แบเรียม-137m

นายณัฐพัชร ภิรมย์กิจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR ESTIMATION OF RESIDENCE TIME
USING Cs-137/Ba-137m RADIONUCLIDE GENERATOR

Mr. Natthaphatch Piromkit

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

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาเทคนิคในการประเมินเวลาที่สารอยู่ในระบบ โดยใช้เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ซีเซียม-137/แบเรียม-137m

โดย

นายณัฐพัชร์ ภิรมย์กิจ

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ รัศมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ รัศมี)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.แสนสุข เวชชการัญย์)

ณัฐพัชร์ ภิรมย์กิจ : การพัฒนาเทคนิคในการประเมินเวลาที่สารอยู่ในระบบโดยใช้เรดิโอ
นิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ซีเซียม-137/แบเรียม-137m (DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE
FOR ESTIMATION OF RESIDENCE TIME USING Cs-137/Ba-137m RADIONU-
CLIDE GENERATOR)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. นเรศร์ จันทน์ขาว, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร.
สมบุญ รัศมี, 80 หน้า.

ได้ทำการศึกษาทดลองคุณภาพสมบัติของเรดิโอไอโซโทปเจเนอเรเตอร์ซีเซียม-137/
แบเรียม-137m สำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรม ซึ่งใช้ในการผลิตไอโซโทปรังสีแบเรียม-137m ที่มี
ครึ่งชีวิตสั้นเพื่อใช้เป็นสารรังสีติดตามในการหาอัตราไหล ระยะเวลาสั้นสุดในการผสม และ
ระยะเวลาที่สารอยู่ในระบบ เป็นต้น ไอโซโทปเจเนอเรเตอร์นี้ผลิตโดยสถาบันพลังงานปรมาณูของ
ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีนโดยใช้ซีเซียม-137 ความแรง 50 มิลลิวรี (1.85 กิกะเบคเคล) ดูด
ซับด้วยแคโทดออกไซด์ชนิด $KCoFC-SiO_2$ ซึ่งสามารถชะแบเรียม-137m ออกมาใช้งานด้วย
สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ที่มีโซเดียมคลอไรด์ 0.9 % จากการทดลอง
พบว่าต้องรอเวลาอย่างน้อย 6 นาที เพื่อให้แบเรียม-137m เกิดขึ้นจนถึงความแรงรังสีสูงสุดก่อนทำ
การชะครั้งต่อไปโดยใช้สารละลายที่มีปริมาตร 10 มล. ด้วยอัตราไหล 20 มล.ต่อนาที

จากนั้นได้ทำการทดลองหาระยะเวลาที่สารอยู่ในระบบโดยใช้ถังขนาด 157 ลิตรที่อัตรา
ไหลต่าง ๆ กัน คือ 0.12, 0.24 และ 0.83 ลิตรต่อวินาทีตามลำดับ ระบบวัดรังสีแกมมาที่ใช้
ประกอบด้วยหัววัดรังสีชนิดโซเดียมไอโอไดด์(ทัลเลียม) ขนาด 1.5 นิ้ว x 1.5 นิ้ว จำนวน 4 ชุดต่อ
กับเครื่องนับรังสี 12 ช่อง LUDLUM 4612 และไมโครคอมพิวเตอร์ เครื่องนับรังสีที่ใช้สามารถ
รองรับสัญญาณเข้าจากหัววัดรังสีได้ถึง 12 ชุด และแสดงผลเป็นกราฟบนจอได้ ผลการวิจัยพบว่ามี
ความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม DTS PRO Software Package
โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงตั้งแต่ 50 วินาทีเป็นต้นไปเมื่อสารรังสีติดตามผสมกับน้ำดีแล้ว
นอกจากนั้นได้ทำการทดลองกับถังผสมของเหลวขนาด 21.2 ลิตรที่มีตัวกีดกันโดยใช้ใบกวนชนิด
propellers และ paddies ที่อัตราไหล 0.04 และ 0.083 ลิตรต่อวินาทีตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่ามี
ความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม DTS PRO Software Package
โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงตั้งแต่ 100 วินาทีเป็นต้นไปเมื่อสารรังสีติดตามผสมกับน้ำดีแล้ว

ภาควิชา.....วิศวกรรมนิวเคลียร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2556.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5370320021: MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: RESIDENCE TIME / Cs-137/Ba-137m RADIONUCLIDE GENERATOR /

NATTHAPHATCH PIROMKIT: DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR ESTIMATION OF RESIDENCE TIME USING Cs-137/Ba-137m RADIONUCLIDE GENERATOR., 80 pp.

Characteristics of an industrial $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ radionuclide generator was experimentally investigated in production of short lived $^{137\text{m}}\text{Ba}$ for radiotracer experiments such as in measurement of flow rate, determination of minimum mixing time and residence time distribution (RTD). The generator was produced by China Institute of Atomic Energy by absorption of 50 mCi (1.85 GBq) ^{137}Cs onto KCoFC-SiO₂ cation resin. $^{137\text{m}}\text{Ba}$ could be eluted by using 0.1M HCl with 0.9% NaCl solution. To allow $^{137\text{m}}\text{Ba}$ to build-up to its maximum activity, it was found that the next elution could be done after 6 minutes using 10 ml eluting solution at a flow rate of 20 ml/min.

The experiment was then carried out in determining the RTD in a 157 L tank at varying flow rates i.e. 0.12, 0.24 and 0.83 L/s respectively. The detector system consisted of 4 sets of 2” x 2” NaI(Tl) detector connected to a LUDLUM 4612 12-channel counter and a microcomputer. The counter allowed up to 12 inputs and the outputs were displayed graphically on the microcomputer screen. The results were in good agreement with those obtained from the DTS PRO Software Package particularly after 50 s when the radiotracer was mixed thoroughly with water. The next experiment was carried out in a 21.2 L fluid mixer having 4 baffles using propellers and paddies at flow rates of 0.04 and 0.083 L/s respectively. The results were in good agreement with those obtained from those obtained from the software particularly after 100 s when the radiotracer was mixed thoroughly with water.

Department: Nuclear Engineering Student’s Signature.....
 Field of Study: Nuclear Technology Advisor’s Signature.....
 Academic Year: 2013 Co-advisor’s Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลาย ๆ ฝ่าย ดังนั้นจึงขอแสดงความขอบคุณทุกท่าน ดังมีรายนามต่อไปนี้

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาวและอาจารย์ ดร.สมบูรณ์ รัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้ทั้งความรู้ ความช่วยเหลือ คอยดูแล ชี้แนะ ส่งเสริม รวมทั้งให้หลักการและข้อคิดต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อศิษย์ นับตั้งแต่แนวคิดในการทำงานวิจัย การแก้ปัญหาในงานวิจัย ตลอดจนงานกระทั่งจบโครงการ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ และ ดร.แสนสุข เวชการันธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่า มาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ อีกทั้งยังได้ให้ข้อคิด ข้อเสนอแนะ รวมทั้งหลักการต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ชุดหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) พร้อมระบบวัดรังสีแบบ 12 ช่อง LUDLUM 4612 12- Channel Bench Top Counter)

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุญาตให้ใช้ถังผสมของเหลว โดยมีคุณสมบัติ บริบูรณ์ ให้คำแนะนำและดูแลในการดำเนินการทดลองโดยใช้ถังผสมของเหลว

ขอขอบคุณ คุณเฉลิมพงษ์ โพธิ์สี นิสิตปริญญาเอกภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณ คุณพลัง วัฒนพานิช คุณภานุวัฒน์ ศรีหมอก และเพื่อน ๆ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือในการทำการทดลอง ให้คำปรึกษาและคอยให้กำลังใจตลอดการทำงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ กราบขอบพระคุณ พันตรีสุรศักดิ์ ภิรมย์กิจ บิดา นางชญาดา ภิรมย์กิจ มารดา ตลอดจนครอบครัวทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้กำลังใจตลอดมาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 สารติดตาม (tracer) ^[6]	5
2.2 การเลือกชนิดสารรังสีติดตาม (Selection of radiotracer Types).....	6
2.3 แบเรียม-137m (Ba-137m).....	9
2.4 เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ ^[2]	11
2.5 เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m	12
2.5.1 เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m สำหรับใช้ในทาง อุตสาหกรรม ^[1]	12
2.5.2 การเตรียมสารละลาย Ba-137m จากใช้เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ Cs- 137/Ba-137m.....	13
2.6 ใช้สารรังสีติดตามในการวัดการไหล (Measurement of flow rate using radioactive tracers).....	14
2.6.1 Pulse Velocity Method หรือ Peak-to-Peak Method.....	14
2.6.2 Tracer Dilution Method	15

2.7	การหาเวลาการผสมน้อยที่สุด (Determination of minimum mixing time)	17
2.8	การตรวจสอบการรั่ว (Leak Test).....	18
2.8.1	การวัดการรั่วของทางผ่าน (Bypass)	18
2.8.2	การหารอยรั่วของท่อหรือถังที่ฝังไว้ใต้ดิน (Underground burried pipe or Tank)	19
2.9	Residence Time Distribution (RTD) ^[8]	20
บทที่ 3	วัสดุ อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย	21
3.1	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	21
3.2	สารเคมี	22
3.3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
3.3.1	การศึกษาคุณสมบัติเฉพาะเบื้องต้นของเจนอเรเตอร์ ¹³⁷ Cs/ ^{137m} Ba.....	22
3.3.1.1	การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้งานเจนอเรเตอร์อีกครั้ง	23
3.3.1.2	การหาปริมาณสารละลายที่เหมาะสมในการชะแต่ละครั้ง	24
3.3.1.3	การหาอัตราการไหลของสารละลายในการชะแต่ละครั้ง	25
3.3.2	การจัดระบบวัดรังสีแกมมาและประมวลผล.....	26
3.3.2.1	ระบบวัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีชนิด NaI(Tl)	26
3.3.2.2	ระบบวัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีชนิด BGO	27
3.3.3	การทดลองใช้ Ba-137m ในการหา RTD ในระบบของเหลว	27
3.3.3.1	การทดลองใช้ Ba-137m ในการหา RTD ในถังพัก	27
3.3.3.2	การทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m และ Tc-99m เพื่อหาค่า RTD ในถังกวน ชนิดที่ติดตัวกีดกัน (4-baffle tank) ใช้ใบกวนชนิด Propeller.....	29
3.3.3.3	การคำนวณผลการทดลอง ^[9]	31
3.3.3.4	การทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m เพื่อหาค่า RTD ในถังกวนชนิดที่ติดตัวกีดกัน (4-baffle tank) ใช้ใบกวนชนิด Propeller และ Paddies	31
3.3.3.5	การคำนวณการทดลองด้วยโปรแกรม DTS (Ideal mixing only).....	33

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	35
4.1 ผลการทดลองใช้ Ba-137m ในการหา RTD ในถังพัก.....	35
4.2 ผลการทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m และ Tc-99m เพื่อหาค่า RTD ในถัง กวน ชนิดที่ติดตัวกีดกัน (4-baffle tank) ใช้ใบกวนชนิด Propeller.....	37
4.3 ผลการทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m เพื่อหาค่า RTD ในถังกวนชนิดที่ติด ตัวกีดกัน (4-baffle tank) ใช้ใบกวนชนิด Propeller และ Paddies.....	40
4.3.1 ใบกวนชนิด Paddies	40
4.3.2 ใบกวนชนิด Paddies	43
4.4 การหา RTD จากโปรแกรม	46
4.4.1 ผลการทดลองหา RTD จากโปรแกรม DTS ในถังกวนที่อัตราการไหล 0.12 0.24 และ 0.38 ลิตร/วินาที	46
4.4.2 ผลการทดลองหา RTD จากโปรแกรม DTS ถึงกวนที่อัตราการไหล 0.04 และ 0.083 ลิตร/วินาที	49
4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง	51
4.5.1 ผลกระทบของอัตราการการไหลที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และ เวลา	51
4.5.2 ผลกระทบการใช้สารรังสีติดตามต่างชนิดกัน.....	53
4.5.3 ผลกระทบของอัตราการการไหลที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และ เวลา	53
4.5.4 ผลการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m ในถังกวนชนิดที่ติดตัวกีดกัน (4-baffle tank) ใช้ใบกวนชนิด Propeller และ Paddies ในห้องปฏิบัติการ ..	54
4.5.4.1 การเปรียบเทียบใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่ความเร็วรอบ (rpm) ต่างกัน	54
4.5.4.2 การเปรียบเทียบใช้ใบกวนชนิด Paddies ที่ความเร็วรอบ (rpm) ต่างกัน	56
4.5.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม DTS... 57	
4.5.5.1 ผลการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m ถึงพักใน ห้องปฏิบัติการ	57

4.5.5.2	ผลการทดลองสารรังสีติดตาม Ba-137m และ Tc-99 ที่อัตราการไหลคงที่ 0.04 และ 0.083 ลิตร/วินาที.....	59
4.5.5.3	ผลการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m ในถังกวนชนิดที่ติดตัวก็ดกั้น (4baffle tank) ใช้ใบกวนชนิด Propeller และ Paddies ในห้องปฏิบัติการ โดยสนใจความเร็วรอบใบกวน	61
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	65
5.1	สรุปผลงานวิจัย	65
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	67
	รายการอ้างอิง	69
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	71
	ภาคผนวก	Error! Bookmark not defined.

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สารรังสีติดตามทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรม ^[6]	7
ตารางที่ 2.2 แสดงสารรังสีติดตามทั่วไปในภาพที่ของสารอินทรีย์ ^[6]	8
ตารางที่ 2.3 แสดงพลังงานและความเข้มของรังสีแกมมา Cs-137 ^[7]	9
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba- 137m เพื่อหาค่า RTD ในถังพัก	28
ตารางที่ 3.2 การทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m และ Tc-99m ในการหาค่า RTD ในถังกวน ชนิดที่ติดตั้งกีดกัน (4-baffle tank) ที่ใช้ใบกวนชนิด Propeller	29
ตารางที่ 3.3 การทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m ใน ถังกวนชนิดที่ติดตั้งกีดกัน (4-baffle tank) เมื่อใช้ใบกวนชนิด Propeller และ Paddies	32

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	หลักการการใช้ Trace	5
ภาพที่ 2.2	ภาพที่การสลายตัวของ ¹³⁷ Cs	9
ภาพที่ 2.3	สเปกตรัมรังสีแกมมาของ ¹³⁷ Cs	10
ภาพที่ 2.4	หลักการเรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์	11
ภาพที่ 2.5	เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m.....	13
ภาพที่ 2.6	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย.....	13
ภาพที่ 2.7	การวัดอัตราการไหลด้วยวิธี pulse velocity หรือ peak to peak	15
ภาพที่ 2.8	การวัดอัตราการไหลด้วยวิธี Total Count	16
ภาพที่ 2.9	การหา Calibration factor, F	16
ภาพที่ 2.10	การวัดอัตราการไหลด้วยวิธี Constant-rate Inject	17
ภาพที่ 2.11	การหาเวลาการผสม (mixing time)	18
ภาพที่ 2.12	การวัดการรั่วของของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	19
ภาพที่ 2.13	การตรวจหารอยรั่วของท่อที่ฝังลึกใต้ดิน	19
ภาพที่ 2.14	การตรวจหารอยรั่วของถังที่ฝังลึกใต้ดิน	19
ภาพที่ 2.15	RTD curve.....	20
ภาพที่ 3.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย Ba-137m.....	22
ภาพที่ 3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในวัดสารรังสีติดตาม Ba-137m ที่ได้จากการชะ.....	23
ภาพที่ 3.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแรงรังสี (count rate) และเวลาที่ทิ้งไว้ก่อนนำมาใช้อีกครั้ง (refresh time).....	24
ภาพที่ 3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงรังสี (count rate) และปริมาตรสารละลายที่เหมาะสมในการชะแต่ละครั้ง (elution volume).....	25
ภาพที่ 3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงรังสี (count rate) และอัตราการไหลของสารละลายในการชะแต่ละครั้ง (elution flowrate).....	26
ภาพที่ 3.6	ระบบวัดอัตราการนับโดยใช้หัววัด NaI ในห้องปฏิบัติการ	26
ภาพที่ 3.7	ระบบวัดอัตราการนับโดยใช้หัววัด BGO ในห้องปฏิบัติการ	27
ภาพที่ 3.7	การจัดวางหัววัดสำหรับการทดลอง.....	28
ภาพที่ 3.9	ระบบวัดอัตราการนับโดยใช้หัววัด NaI ในห้องปฏิบัติการ	30

ภาพที่ 3.10	การจัดวางหัววัดสำหรับการทดลอง.....	30
ภาพที่ 3.11	ระบบวัดอัตราการนับโดยใช้หัววัด BGO ในห้องปฏิบัติการ	32
ภาพที่ 3.12	ระบบวัดอัตราการนับโดยใช้หัววัด BGO ในห้องปฏิบัติการ	33
ภาพที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่อัตราไหล 0.12 ลิตร/วินาที.....	35
ภาพที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่อัตราไหล 0.24 ลิตร/วินาที.....	36
ภาพที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่อัตราไหล 0.38 ลิตร/วินาที.....	37
ภาพที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่อัตราไหล 0.083 ลิตร/วินาที.....	38
ภาพที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่อัตราไหล 0.04 ลิตร/วินาที.....	39
ภาพที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่อัตราไหล 0.083 ลิตร/วินาที.....	40
ภาพที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาโดยใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่ ความเร็วรอบ 60 rpm	41
ภาพที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาโดยใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่ ความเร็วรอบ 110 rpm	42
ภาพที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาโดยใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่ ความเร็วรอบ 160 rpm	43
ภาพที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาโดยใช้ใบกวนชนิด Paddies ที่ ความเร็วรอบ 60 rpm	44
ภาพที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาโดยใช้ใบกวนชนิด Paddies ที่ ความเร็วรอบ 110 rpm	45
ภาพที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาโดยใช้ใบกวนชนิด Paddies ที่ ความเร็วรอบ 160 rpm	46
ภาพที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่คำนวณได้จากโปรแกรม DTS ที่อัตราไหล 0.12 ลิตร/วินาที	47
ภาพที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่คำนวณได้จากโปรแกรม DTS ที่อัตราไหล 0.24 ลิตร/วินาที	48
ภาพที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่คำนวณได้จากโปรแกรม DTS ที่อัตราไหล 0.38 ลิตร/วินาที	49
ภาพที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่คำนวณได้จากโปรแกรม DTS ที่อัตราไหล 0.04 ลิตร/วินาที	50

ภาพที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่คำนวณได้จากโปรแกรม DTS ที่อัตราไหล 0.83 ลิตร/วินาที.....	51
ภาพที่ 5.1	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลา ที่อัตราการไหล 0.12, 0.24 และ 0.38 ลิตร/วินาที.....	52
ภาพที่ 5.2	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลา ที่อัตราการไหล 0.12, 0.24 และ 0.38 ลิตร/วินาทีขยาย	52
ภาพที่ 5.3	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลา ในการทดลองที่มีการใช้สารรังสีติดตามต่างชนิดกัน	53
ภาพที่ 5.4	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลา ที่อัตราการไหล 0.04 และ 0.083 ลิตร/วินาที.....	54
ภาพที่ 5.5	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลา ที่ความเร็วรอบรอบต่าง ๆ ของใบกวนชนิด Propeller.....	55
ภาพที่ 5.6	การเปรียบเทียบใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่rpmต่างกันเทียบกับกันเมื่อทำการปรับเส้นโค้งให้เรียบด้วยเทคนิค moving average.....	55
ภาพที่ 5.7	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลา ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ของใบกวนชนิด Paddies.....	56
ภาพที่ 5.8	การเปรียบเทียบใช้ใบกวนชนิด Paddies ที่rpmต่างกันเทียบกับกันเมื่อทำการปรับเส้นโค้งให้เรียบด้วยเทคนิค moving average.....	57
ภาพที่ 5.9	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ ที่อัตราไหล 0.12 ลิตร/วินาที	58
ภาพที่ 5.10	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ ที่อัตราไหล 0.24 ลิตร/วินาที	58
ภาพที่ 5.11	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ ที่อัตราไหล 0.38 ลิตร/วินาที	59
ภาพที่ 5.12	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่อัตราการไหล 0.04 ลิตร/วินาที.....	60
ภาพที่ 5.13	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่อัตราการไหล 0.083 ลิตร/วินาที...60	
ภาพที่ 5.14	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณโปรแกรม DTS โดยใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่ความเร็วรอบ 60 rpm.....	61
ภาพที่ 5.15	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณโปรแกรม DTS โดยใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่ความเร็วรอบ 110 rpm.....	62
ภาพที่ 5.16	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณโปรแกรม DTS โดยใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่ความเร็วรอบ 160 rpm.....	62

ภาพที่ 5.17	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ โปรแกรมDTS โดยใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่ความเร็วรอบ 60 rpm	63
ภาพที่ 5.18	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ โดยใช้ใบกวนชนิด Paddies ที่ความเร็วรอบ 110 rpm	64
ภาพที่ 5.19	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ โดยใช้ใบกวนชนิด Paddies ที่ความเร็วรอบ 160 rpm	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันมีการนำสารรังสีมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งในทางการแพทย์ ทางเภสัชกรรม ทางการศึกษาวิจัย และทางอุตสาหกรรม การเลือกใช้สารกัมมันตรังสีนั้น จะแตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสมของสถานะ ประเภทของรังสี ค่าครึ่งชีวิต ระดับพลังงาน และ ลักษณะการใช้งาน ในทางอุตสาหกรรมมีการใช้สารรังสีติดตาม (radiotracer) ฉีดเข้าไปในระบบแล้วทำการวัดรังสีในส่วนต่าง ๆ ที่เวลาต่าง ๆ กันเพื่อนำไปประเมินหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ ได้แก่ ความเร็ว ทิศทางการกระจายตัว ระยะเวลาที่สารอยู่ในระบบ และความเข้มข้น เป็นต้น การใช้สารรังสีติดตามส่วนใหญ่ใช้ไอโซโทปที่ปลดปล่อยรังสีแกมมาเพื่อให้สามารถตรวจวัดได้ง่ายโดยไม่ต้องสุ่มตัวอย่าง ปัจจัยสำคัญในการเลือกก็คือพลังงานของรังสีแกมมาและค่าครึ่งชีวิต (half-life) ซึ่งพลังงานจะต้องสูงพอที่จะทะลุผ่านออกมาจากระบบตามความลึกและความหนาที่ต้องการได้ แต่ก็จะต้องไม่สูงเกินไปจนทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจวัดต่ำและมีความยุ่งยากเรื่องความปลอดภัยทางรังสี ส่วนค่าครึ่งชีวิตนั้น โดยทั่วไปต้องการใช้ไอโซโทปครึ่งชีวิตสั้นเพื่อมิให้มีกัมมันตภาพรังสีตกค้างอยู่นาน แต่จะต้องเหมาะสมกับระยะเวลาในการเดินทางและระยะเวลาที่ใช้ในการวัดรังสีด้วย การใช้งานโดยทั่วไปไม่สามารถใช้ไอโซโทปครึ่งชีวิตในช่วงเป็นนาทีถึงหนึ่งชั่วโมงได้เนื่องจากต้องใช้เวลาในการนำไอโซโทปครึ่งชีวิตจากแหล่งผลิตไปยังจุดที่ต้องการใช้งาน ด้วยเหตุนี้ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency, IAEA) จึงได้มีโครงการผลิตและใช้ประโยชน์เรดิโอไอโซโทปโคลด์เจนเนอเรเตอร์ (radionuclide generator) สำหรับงานอุตสาหกรรมขึ้น เพื่อสนับสนุนการใช้ไอโซโทปครึ่งชีวิตสั้นเป็นสารรังสีติดตามในงานอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเรดิโอไอโซโทปโคลด์เจนเนอเรเตอร์ชนิดซีเซียม-137/แบเรียม-137m ($^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ generator) จาก IAEA ที่สามารถนำไปใช้ผลิตไอโซโทปครึ่งชีวิตแบเรียม-137m ในภาคสนามสำหรับใช้เป็นสารรังสีติดตาม โดยมีครึ่งชีวิตเพียง 2.6 นาที และสลายตัวให้รังสีแกมมาที่มีพลังงานปานกลางคือ 661.6 keV ซึ่งจะช่วยให้มีการปนเปื้อนสารกัมมันตรังสีในระบบเพียงระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น

ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมมีหลายปัจจัยแต่มีสามปัจจัยที่สำคัญนั้นคือการประเมินเวลาที่สารอยู่ในระบบ(RTD) เวลาที่ใช้ในการผสมและอัตราการไหล ในทางวิศวกรรมเคมีใช้ RTD ใน

ลักษณะการผสมและการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์และเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์จริงกับทฤษฎี จึงมีประโยชน์เพิ่มประสิทธิภาพเวลาการผสมของวัสดุ ประหยัดพลังงานลดเวลาในการผลิตและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์รวมถึงการซ่อมแซมแก้ไขปัญหาเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอยู่ การประเมินอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่กำหนดและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ จึงใช้สารรังสีติดตามในการหาข้อมูลเพื่อนำมาดำเนินการวางแผนต่าง ๆ ในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น^[1]

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของเรดิโอไอโนวไคลด์เจเนอเรเตอร์ซีเซียม-137/แบเรียม-137m สำหรับงานอุตสาหกรรม

1.2.2 เพื่อพัฒนาเทคนิคในการประเมินเวลาที่สารอยู่ในระบบ (Residence time distribution, RTD) โดยประยุกต์ใช้เรดิโอไอโนวไคลด์เจเนอเรเตอร์ซีเซียม-137/แบเรียม-137m

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติเฉพาะเรดิโอไอโนวไคลด์เจเนอเรเตอร์ $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ ได้แก่ เวลาที่ทิ้งไว้แล้วจะกลับมาใช้ได้อีกครั้ง ปริมาตรแต่ละครั้งที่ชะ (elute) และอัตราการไหลในการชะ

1.3.2 พัฒนาเทคนิคในการประเมินเวลาที่สารรังสีติดตามอยู่ในท่อหรือถังพัก (RTD) โดยประยุกต์ใช้เรดิโอไอโนวไคลด์เจเนอเรเตอร์ซีเซียม-137/แบเรียม-137m

1.3.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการประเมินในข้อ 1.3.2 กับผลที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จภาพที่อื่น ๆ

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของเจเนอเรเตอร์ซีเซียม-137/แบเรียม-137m

1.4.3 พัฒนาเทคนิคในการประเมินเวลาที่สารรังสีติดตามอยู่ในท่อหรือถังพัก (RTD) โดยประยุกต์ใช้เรดิโอไอโนวไคลด์เจเนอเรเตอร์ซีเซียม-137/แบเรียม-137m

1.4.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการประเมินในข้อ 1.4.3 กับผลที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จภาพที่อื่น ๆ

1.4.5 สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เทคนิคในการประเมินเวลาที่สารอยู่ในระบบ โดยใช้เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ ซีเซียม-137/แบเรียม-137m

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- Li Jinfu Yang Guogu และ Wang Gang^[1] ได้ทำการศึกษาเรื่อง ศึกษาและพัฒนาเรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ สำหรับใช้ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม โดยใช้ KCoFC-SiO₂(potassium cobalt hexacyanoferrate inorganic ion-exchanger) เคลือบบน silica gel เป็นตัวจับ Cs-137 จะทำการฉีดสารละลาย 0.1 M HCl+0.9% NaCl ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เข้าไปในเจเนอเรเตอร์ $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาตัวเรซินที่เป็นตัวจับ ^{137}Cs โดยวิธีการนำ KCoFC-SiO₂(potassium cobalt hexacyanoferrate inorganic ion-exchanger) ไปเคลือบบน silica gel โดยจะใช้กล้อง SEM ส่องดูโครงสร้างของผลึกว่ามีองค์ประกอบตามที่ต้องการบน silica gel โดยศึกษาความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย NaCl ที่ฉีดเข้าไปความเป็นกรดเป็นด่างในปริมาณที่เหมาะสมในการชะเจเนอเรเตอร์ $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ ได้ทำให้เจเนอเรเตอร์มีประสิทธิภาพเหมาะสมที่สุด

- Ghiyas Ud Din และ คณะ^[2] ได้ทำการศึกษา เรื่องศึกษาการเคลื่อนที่ของของเหลวและแก๊สของสถานะ โดยใช้การรังสีติดตาม ทำการการเคลื่อนที่ของสถานะมักจะพบบ่อยในอุตสาหกรรมเช่นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของของไหล ในท่อที่มีน้ำเดือดและการไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมเคมี การเคลื่อนที่สองสถานะเป็นการบอกถึงความดันภายในท่อโดยดูจากการขยายตัวของฟองอากาศที่เคลื่อนที่ไปกับของเหลวภายในท่อถ้าฟองอากาศมีขนาดใหญ่แสดงว่าของเหลว นั้นมีการระเหยเป็นแก๊สมากความดันในท่อน้อย งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองศึกษาการเคลื่อนที่ของของเหลวและแก๊ส โดยนำสารรังสีติดตามและใช้หัววัด NaI(Tl) scintillation detector วัดอัตราการนับและนำมาวิเคราะห์อัตราการไหลของทั้งสองสถานะ โดยทำการศึกษาอัตราการไหลในท่อตรงปกติว่ามีอัตราการไหลคงที่และศึกษาการอัตราการไหลเมื่อผ่านท่อโค้งจะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล โดยผลการทดลองอัตราการไหลในท่อตรงเป็นไปตามทฤษฎี

- ธนศ ดวงตา^[3] ได้ทำการศึกษาเรื่อง การเตรียมโบรมีน-82 ในภาพที่ของโบโรโมเบนซีน สำหรับใช้เป็นสารรังสีติดตาม สารรังสีติดตามโบรมีน-82 (^{82}Br) ในภาพที่ของโบโรโมเบนซีนสามารถเตรียมได้ด้วยวิธีนิวตรอนแอคทีวชัน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาการไหลและการผสมในอุตสาหกรรมน้ำมัน สารอินทรีย์ ^{82}Br มีครึ่งชีวิต 35.30 ชั่วโมง เตรียมโดยการใช้พารา-ไดโบโรโมเบนซีนเป็นสารตั้งต้น นำไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มีนิวตรอนฟลักซ์

เท่ากับ $1012 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นละลายสารตั้งต้นที่อาบรังสีเสร็จแล้วด้วยก๊าซโซลีนเพื่อสำหรับใช้เป็นสารรังสีติดตาม โดยทำการฉีดสารรังสีติดตามเข้าไปในระบบน้ำมันที่มีการติดตั้งท่อและถังน้ำมัน ทำการตรวจวัดสารรังสีติดตามด้วยหัววัดรังสีแบบเรืองรังสีที่เชื่อมต่อกับระบบบันทึกข้อมูลและคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการบันทึกผลและประมวลผล จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้สารรังสีโบรมินที่เตรียมขึ้นในการศึกษาการไหลและศึกษาการผสมมีความน่าเชื่อถือ และมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารติดตามในกระบวนการทางอุตสาหกรรมน้ำมันและอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ตลอดจนอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้อีกด้วย

- Teruo Nagai และ Kazuo Watari^[4] ได้ศึกษาเรื่องเรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ โดยใช้ 6-tungstocerate column elution mode โดยวิธีการโดยเริ่มจาก load 6-tungstocerate gel 1.5 g ที่ผสมกับไอโซโทปรังสี ^{137}Cs 54 kBq ในการชะ $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ให้ได้ผลดี จะศึกษาสมบัติทางเคมีของตัวชะ อัตราการไหล ความถี่ในการชะ และอายุการใช้งานของเจเนอเรเตอร์เมื่อเปรียบเทียบกับตัวชะพบว่า $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ที่ชะด้วย 0.9%NaCl – 0.1MHCl จะมี elution yields และ radionuclidic สูงกว่า $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ที่ชะด้วย 0.1M $\text{NH}_4\text{-Cl}$ -0.1 M HCl เจเนอเรเตอร์ และ $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ที่ได้มี reproducible elution, chemical และ radionuclidic

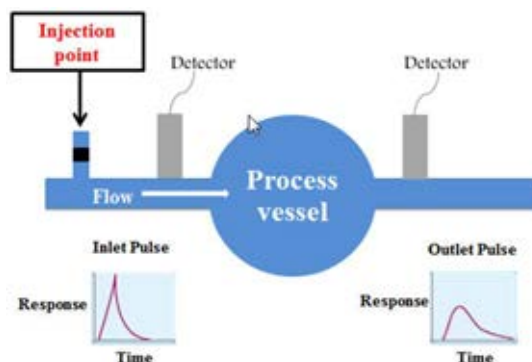
- H. Kasban และ คณะ^[5] ได้ทำการทดลองเรื่อง การสร้างแบบจำลองในการทดลองประยุกต์ใช้สารรังสีติดตามในอุตสาหกรรม ในการทดลองได้ใช้ โมลิบดีนัม-99(Mo-99) 300 มิลลิลิตรต่อลิตรเป็นสารรังสีติดตาม ฉีดเข้าไปในถังกวนผสมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร ภายในถังประกอบด้วยใบพัดผสมจำนวน 4 ใบพัด ต่อกับระบบควบคุมความเร็วในการหมุน จากนั้นทำการวัดความเข้มข้นของรังสี ณ ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของระบบ ด้วยหัววัดรังสีแบบเรืองแสง (collimated scintillation detector) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว จำนวน 2 หัววัด ที่เชื่อมต่อกับระบบบันทึกข้อมูล (data acquisition system) และคอมพิวเตอร์เพื่อทำการบันทึกข้อมูลและประมวลผล จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการใช้สารรังสีติดตามในการหาอัตราการไหล (Measurement of flow rate) เวลาการผสม (Mixing time) และ Residence time distribution (RTD) เป็นวิธีที่เชื่อถือได้สูง

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 สารติดตาม (tracer)^[6]

สารติดตาม (tracer) เป็นสารที่ใช้สำหรับการระบุและสังเกตพฤติกรรมของกระบวนการทางกายภาพต่าง ๆ เช่น การกระจาย การผสม กระบวนการทางจลศาสตร์ (Kinetics) และพลศาสตร์ (Dynamics) ในงานอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านอุตสาหกรรมเคมี โดยสารติดตามที่ใช้ใช้นั้นอาจจะเป็นสารเคมีที่มีเม็ดสีหรือสารที่มีความเรืองแสง รวมถึงสารติดตามที่มีไอโซโทปรังสีหรือที่เรียกว่าสารรังสีติดตามก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการใช้งานของสารนั้น ๆ กับกระบวนการหรือระบบที่จะนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 หลักการการใช้Tracer^[2]

ภาพที่ 2.1 แสดงหลักการทั่วไปของการใช้งานสารติดตามดังที่แสดงในภาพที่ 1 หลักการของการใช้สารติดตามที่มีสารไอโซโทปรังสี เมื่อมีการฉีดสารติดตามเข้าไปในระบบถังปฏิกรณ์ (Reactor) ที่มีท่อขาเข้าและท่อขาออก โดยมีการบรรจุของเหลวบางชนิดในถัง และมีการไหลผ่านของของเหลวทางขาเข้าและและมีการไหลออกของของเหลวทางท่อขาออกอย่างสมดุล เมื่อทำการฉีดสารติดตามเข้าไปในระบบท่อขาเข้า หากทำการตรวจวัดปริมาณความแรงของรังสีที่บริเวณขาเข้าของถังปฏิกรณ์ จะได้รับการตอบสนองเป็นลักษณะแท่งซึ่งมีความกว้างของสัญญาณที่สั้นหรือที่เรียกว่า สัญญาณพัลส์ (Pulse Signal) เนื่องจากสารติดตามยังมิได้กระจายตัวและรวมกันในบริเวณที่จำกัด แต่เมื่อสารติดตามผ่านเข้าไปยังถังปฏิกรณ์ และมีการผสมกับสารที่อยู่ในถังผสมและเกิดการกระจายตัว หากทำการตรวจวัดที่บริเวณขาออกจะได้สัญญาณที่มีลักษณะเส้นโค้งที่มียอดสูงสุด

(Peak Signal) ในช่วงแรกและค่อย ๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป เนื่องจากปริมาณของสารติดตามที่ผสมกับสารตั้งต้นในถังปฏิกรณ์ไหลไหลออกมาของไหลเป็นจำนวนมากในช่วงต้นและลดลงในเวลาถัดมา ดังนั้นภาพที่ร่างสัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับกระบวนการผสมในถังปฏิกรณ์ ซึ่งสามารถใช้หลักการดังกล่าวในการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติในการผสมในถังดังกล่าว

สำหรับการนำสารไอโซโทปรังสีมาประยุกต์ใช้เป็นสารติดตามนั้นมีข้อดีอยู่หลายประการ อาทิเช่น เราสามารถเลือกชนิดของสารติดตามที่มีคุณสมบัติเหมือนกันกับสารที่ต้องการศึกษาในระบบที่สนใจได้เพราะประเภทของสารติดตามที่มีไอโซโทปรังสีมีทั้งอยู่ในภาพที่ของแข็งของเหลว และ ก๊าซ นอกจากนี้การใช้สารติดตามที่มีไอโซโทปรังสี ไม่จำเป็นต้องหยุดการทำงานระบบขณะที่ทำการตรวจวัด โดยการตรวจวัดสามารถทำได้โดยสะดวกและได้ผลที่ต้องการวัดอย่างรวดเร็ว

2.2 การเลือกชนิดสารรังสีติดตาม (Selection of radiotracer Types)

การเลือกชนิดของสารรังสีให้เหมาะสำหรับใช้เป็นสารติดตามนั้นก็มีส่วนสำคัญต่อการตรวจวัดด้วยเช่นกัน สารรังสีติดตามมีทั้งชนิดที่ปล่อยรังสีแกมมาและรังสีบีตา แต่ส่วนใหญ่สารรังสีติดตามที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะเป็นชนิดที่ปล่อยรังสีแกมมา และจะต้องมีพลังงานสูงมากพอที่สามารถทะลุผ่านวัสดุหรือภาชนะที่จะทำการตรวจสอบได้ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาเลือกสารรังสีเพื่อใช้เป็นสารติดตาม ได้แก่

- คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ต้องมีลักษณะเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ เช่นเดียวกับสารในระบบที่ต้องการศึกษาและยังอยู่ในภาพที่ของสารเคมีที่สามารถผสมกับสารในระบบได้อย่างสมบูรณ์

- ค่าครึ่งชีวิต ($T_{1/2}$) ควรมีครึ่งชีวิตไม่ยาวเกินไปเพื่อมิให้มีการปนเปื้อนของไอโซโทปรังสีในระบบที่ทำการศึกษานาน แต่ก็ต้องมีครึ่งชีวิตยาวพอที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ในภาคสนาม และพอที่จะตรวจวัดได้สะดวก

- ชนิดและพลังงานของสารรังสี โดยทั่วไปนิยมใช้ไอโซโทปรังสีที่ปลดปล่อยรังสีแกมมา เนื่องจากสามารถตรวจวัดได้จากภายนอกภาชนะหรือท่อ โดยไม่ต้องสุ่มตัวอย่างไปวัดรังสีในห้องปฏิบัติการภายหลัง นอกจากนี้พลังงานของรังสีแกมมาจะต้องสามารถทะลุผ่านผนังภาชนะหรือท่อได้ อย่างไรก็ตามรังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ สามารถกำบังได้ง่าย และการวัดรังสีมีประสิทธิภาพสูงกว่า สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ พลังงานของรังสีแกมมามีผลต่อระดับความลึก

หรือความหนาของสารที่ทำการศึกษาค้นคว้า จึงต้องเลือกพลังงานของรังสีแกมมาตามระดับความลึก หรือความหนาของสารที่ต้องการศึกษาค้นคว้า ไม่เช่นนั้น ข้อมูลที่ได้ อาจทำให้การแปลผลผิดพลาดได้

- ความแรงรังสีจำเพาะสูง ทำให้ปริมาตรหรือน้ำหนักของสารกัมมันตรังสีใช้น้อยลงตาม สัดส่วน ซึ่งมีผลต่อการปฏิบัติในการฉีดหรือปล่อยสารกัมมันตรังสีเข้าสู่ระบบที่ศึกษา รวมทั้ง อุปกรณ์ป้องกันรังสีด้วย

- ง่ายและถูก

- การจัดการกากกัมมันตรังสีและการป้องกันอันตรายจากรังสี ส่วนใหญ่กากกัมมันตรังสี ไม่ใช่ปัญหาใหญ่ของการใช้สารรังสีติดตาม เพราะใช้ในปริมาณน้อยและมีค่าครึ่งชีวิตสั้น

ตารางที่ 2.1 สารรังสีติดตามทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรม^[6]

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

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Chemical form	Isotope	Half-life	Radiation and Energy (MeV)	Tracing of phase
potassium or sodium iodide iodobenzene	I-131	8.04 d	Gamma: 0.36 (80%) 0.64 (9%)	aqueous organic
sodium technetate	Tc-99m	6 h	Gamma: 0.14 (90%)	Aqueous
sodium molybdate	Mo-99	67 h	Gamma: 0.18 (4.5%) 0.74 (10%) 0.78 (4%)	Aqueous
scandium oxide	Sc-46	84 d	Gamma: 0.89 (100%) 1.84 (100%)	Solids (particles)
Xenon	Xe-133	5.27d	Gamma: 0.08 (100%)	Gases
Krypton	Kr-85	10.6 y	Gamma: 0.51 (0.7%)	Gases
Krypton	Kr-79	35 h	Gamma: 0.51 (15%)	Gases
Argon	Ar-41	110 min	Gamma: 1.29 (99%)	Gases

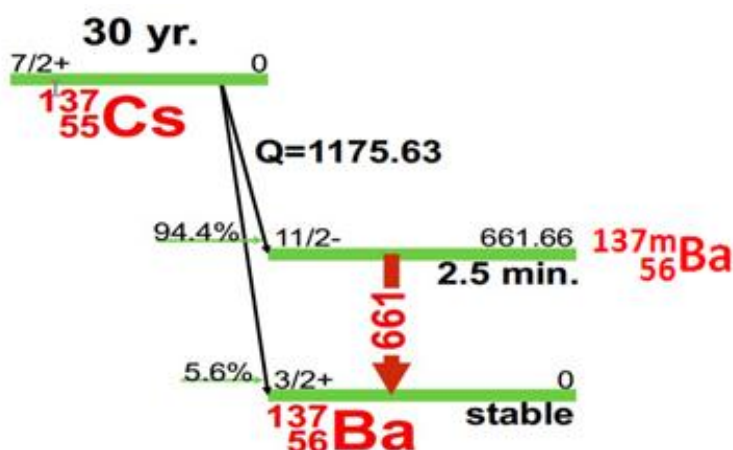
ตารางที่ 2.2 แสดงสารรังสีติดตามทั่วไปในภาพที่ของสารอินทรีย์^[6]

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

2.3 แบเรียม-137m (Ba-137m)

จากทฤษฎีการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสีทั่วไป Cs-137 ซึ่งเป็น Parent Isotope และมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 30 ปี สลายตัวให้ไอโซโทปรังสี Ba-137m 94.4% แล้วกลายเป็น Daughter Isotope Ba-137 ที่อยู่ในสถานะ metastable ดังภาพที่ 2.2 โดย Ba-137m นี้จะสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 661.66 keV โดยสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่สลายตัวดังกล่าวแสดงในภาพที่ 2.3 แล้วกลายเป็น ไอโซโทปเสถียร (Stable Isotope) คือ Ba-137 ด้วยค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 2.5 นาที เนื่องจากการเกิด internal conversion จึงทำให้รังสีแกมมาพลังงาน 661.66 keV นี้มีโอกาสปลดปล่อยออกมาเพียง 85.1%

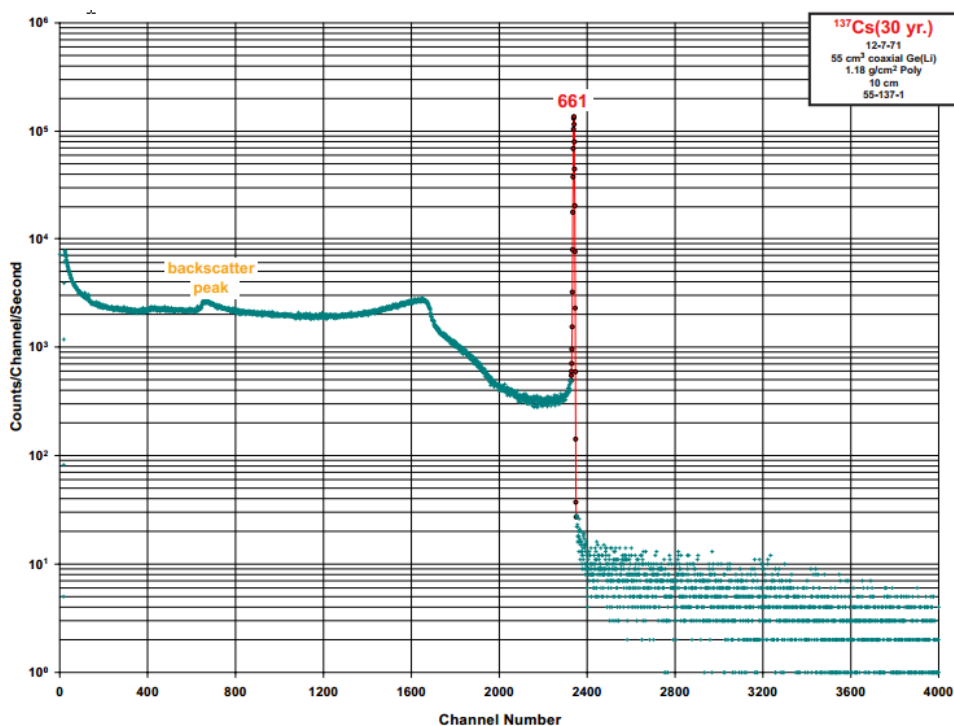
จากการสลายตัวดังกล่าวจึงได้มีการนำ Cs-137 มาผลิตเป็นเจนเนอเรเตอร์ของ Ba-137m ซึ่งจะทำให้มีอายุใช้งานที่ยาวนานกว่า และสามารถนำออกมาใช้งานได้ตลอดเวลา เนื่องจาก Ba-137m จะเกิดขึ้นใหม่จากการสลายตัวของ Cs-137



ภาพที่ 2.2 ภาพที่การสลายตัวของ ^{137}Cs [7]

ตารางที่ 2.3 แสดงพลังงานและความเข้มของรังสีแกมมา Cs-137 [7]

GAMMA-RAY ENERGIES AND INTENSITIES					
Nuclide ^{137}Cs			Half Life: 30.07(3) yr.		
Detector : 55 cm ³ coaxial Ge(Li)			Method of Production: U(n,f) chem.		
E_γ (KeV)[S]	σE_γ	$I_\gamma(\text{rel})$	$I_\gamma(\%)[E]$	σI_γ	S
283.5	0.1		0.0006	0.0001	4
661.657	0.003	100	85.1	0.2	1



ภาพที่ 2.3 สเปกตรัมรังสีแกมมาของ Cs-137^[7]

โดยความแรงรังสีของ Cs-137 ซึ่งเป็น Parent Isotope และ Ba-137m ซึ่งเป็น daughter isotope เป็นไปตามกฎการสลายตัวของทางกัมมันตรังสี (radioactive decay law) คือ

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

โดยให้

- A_0 = ความแรงรังสีเริ่มต้นของ Cs-137
- A = ความแรงรังสีที่เหลืออยู่ของ Cs-137 ที่เวลาใด ๆ
- λ = ค่าคงที่การสลายตัว (decay constant)
- t = เวลาของการสลายตัว

อย่างก็ตามเนื่องจาก Ba-137m ในเรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์เกิดขึ้นตลอดเวลาจาก Cs-137 ดังนั้น Activity ของ Ba-137m ทุกขณะสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2

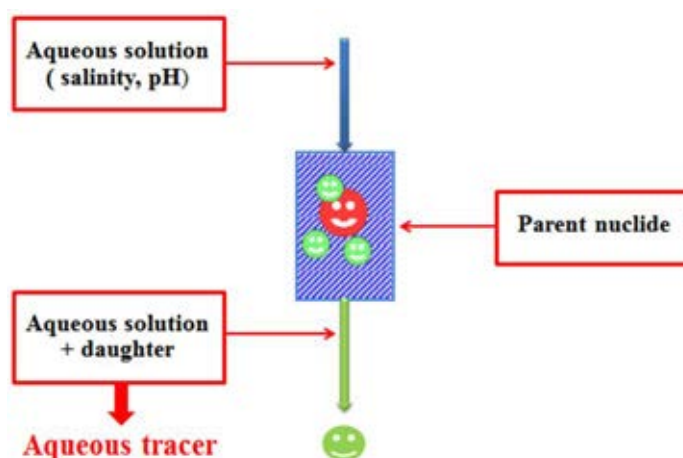
$$N_{Ba}(t) = \frac{\lambda_{Cs} N_{0,Cs}}{(\lambda_{Ba} - \lambda_{Cs})} \times [e^{-\lambda_{Cs}(t)} - e^{-\lambda_{Ba}(t)}] \quad (2)$$

เมื่อ $N_{Ba}(t)$ คือ จำนวนอะตอมของ Ba-137m ที่เวลาใด ๆ t , $N_{0,Cs}$ คือ จำนวนอะตอมของ Cs-137 ที่เวลาเริ่มต้น, λ_{Ba} คือ ค่าคงที่การสลายตัวของ Ba-137m และ λ_{Cs} คือ ค่าคงที่การ

สลายตัวของ Cs-137 เนื่องจาก Cs-137 มีครึ่งชีวิตยาวมากคือ 30 ปี เมื่อเทียบกับค่าครึ่งชีวิต 2.55 นาทีของ Ba-137m ทำให้ค่า $\lambda_{Ba} \gg \lambda_{Cs}$ ดังนั้นตามสมการที่ 2 เมื่อ t มีค่ามาก จะได้ $\lambda_{Ba} N_{Ba} = \lambda_{Cs} N_{Cs}$ ซึ่งหมายความว่าเกิดสมดุลทางกัมมันตรังสี (radioactive equilibrium) ทำให้ความเข้มรังสีของ Ba-137m จะเท่ากับความเข้มรังสีของ Cs-137 ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 5 เท่าของค่าครึ่งชีวิตของ Ba-137m คือประมาณ 13 นาทีขึ้นไป

2.4 เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์^[2]

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ผลิตสารรังสีติดตาม หรือที่เรียกว่า เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์นั้น ทำงานโดยอาศัยหลักการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสีทั่วไปซึ่งเป็น Parent Isotope ที่มีครึ่งชีวิตยาวที่สลายตัวให้ Daughter Isotope ที่อยู่ในสถานะ metastable โดย Daughter Isotope นี้สลายตัวให้รังสีแกมมา แล้วกลายเป็นไอโซโทปเสถียร (stable Isotope) ด้วยค่าครึ่งชีวิตที่สั้น เมื่อบรรจุ Parent isotope ไว้ใน ion exchange resin ที่ไม่ยอมให้ Parent isotope เล็ดลอดออกไปได้ แต่เมื่อใช้สารละลายเคมีที่เหมาะสมเข้าไปชะ (elute) จะเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) สามารถแยกเอา Daughter Isotope ออกมาโดยตัว Parent isotope ไม่สามารถผ่านออกมาได้ (ดังแสดงในแผนภาพในภาพที่ 2.4) ทำให้สามารถใช้ daughter isotope ที่มีครึ่งชีวิตสั้นเป็นสารรังสีติดตามได้ ตัวอย่างของเรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ได้แก่ $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, $^{58}\text{Ge}/^{58}\text{Ga}$ และ $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ เป็นต้น โดยสองชนิดแรกใช้งานกันกว้างขวางทางการแพทย์



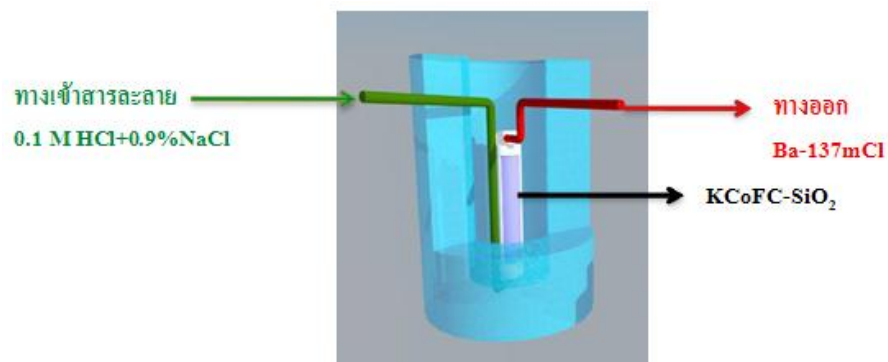
ภาพที่ 2.4 หลักการเรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์^[6]

2.5 เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m

2.5.1 เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m สำหรับใช้ในทางอุตสาหกรรม^[1]

เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m ขนาดเล็กที่มีความแรงรังสีต่ำในช่วงประมาณ 1 – 10 ไมโครคูรี (37 – 370 kBq) ผลิตขึ้นมาใช้ในการเรียนการสอนปฏิบัติการทางด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์รังสีมากกว่า 30 ปีแล้ว แต่ขนาดใหญ่ที่มีความแรงรังสีประมาณ 10 – 100 มิลลิคูรี (0.37 – 3.7 GBq) เพิ่งมีการผลิตขึ้นมาใช้งานในทางอุตสาหกรรมไม่นานแต่มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นทางทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency, IAEA) จึงได้มีโครงการผลิตเรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ราคาประหยัดสำหรับใช้งานในทางอุตสาหกรรมเพื่อส่งเสริมให้มีการใช้สารรังสีติดตามที่มีครึ่งชีวิตสั้นในการแก้ปัญหาในโรงงานอุตสาหกรรม ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีนซึ่งร่วมโครงการนี้ได้ผลิตเรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m ขึ้นมาและได้ผ่านการทดสอบเบื้องต้นในประเทศต่าง ๆ ที่ร่วมโครงการประเทศไทยโดยภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้รับเรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m เมื่อกลางปี พ.ศ. 2512 เพื่อนำมาทดสอบและใช้ประโยชน์ในการผลิตไอโซโทปรังสีแบเรียม-137m (^{137m}Ba) ซึ่งครึ่งชีวิตสั้นเพียง 2.55 นาทีในทางอุตสาหกรรมและด้านอื่น ๆ

เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m ที่ได้รับและใช้ในการวิจัยนี้มีความแรงรังสีของซีเซียม-137 50 ± 5 มิลลิคูรี (mCi) ประกอบด้วยตะกั่วหนา 5.5 เซนติเมตรเพื่อป้องกันรังสีแกมมาให้ลดลงเหลืออัตราการแผ่รังสีที่ระยะ 1 เมตรไม่เกิน 50 ไมโครซีเวิร์ดต่อชั่วโมง (50 μ SV/h) มีประสิทธิภาพในการชะ (elute) $50 \pm 5\%$ และจะลดลงตามเวลา ภายในเจเนอเรเตอร์จะมี KCoFC-SiO₂ (potassium cobalt hexacyanoferrate inorganic ion-exchanger supported on silica gel) เป็นตัวจับ Cs-137 ในการชะแบเรียม-137m ออกมาจะใช้สารละลาย 0.1 M HCl+0.9%NaCl เพื่อนำสารละลายแบเรียม-137m ในภาพที่ของคลอไรด์ (^{137m}BaCl₂) ออกมาใช้



ภาพที่ 2.5 เรดิโอไอวไคลด์เจเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m



ภาพที่ 2.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย

2.5.2 การเตรียมสารละลาย Ba-137m จากใช้เรดิโอไอวไคลด์เจเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m

การเตรียมสารละลาย Ba-137m จะทำโดยการฉีดสารละลาย 0.1 M HCl+0.9% NaCl เข้าไปในเรดิโอไอวไคลด์เจเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m ได้สารละลายแบเรียม-137m ในภาพที่ของคลอไรด์ ($^{137\text{m}}\text{BaCl}_2$) โดยใช้ปั๊มรีคท้อ (Peristaltic pump) เป็นตัวรีดสารละลายให้เคลื่อนที่ผ่านเรดิโอไอวไคลด์เจเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m ด้วยอัตราการไหลคงที่ผ่านปั๊มและไหลลงไปในขวดสุญญากาศที่เตรียมได้ดังภาพที่ 2.6

2.6 ใช้สารรังสีติดตามในการวัดการไหล (Measurement of flow rate using radioactive tracers)

การวัดอัตราการไหลเป็นการวัดค่าตัวแปรที่สำคัญค่าหนึ่งในกระบวนการทางอุตสาหกรรมแทบทุกชนิด ซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยที่การวัดของไหลเหล่านี้ อาจใช้เครื่องมือและวิธีการที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะของของไหลที่เป็นอยู่ขณะนั้น อย่างไรก็ตามการวัดการอัตราไหลอาจกล่าวได้ว่าจะต้องมีความถูกต้องและเที่ยงตรงกว่าการวัดปริมาณด้านอื่น ๆ เพราะว่าหากมีความผิดพลาดในการวัดเพียงเล็กน้อยก็อาจทำให้เกิดการเสียหายอย่างมากในกระบวนการผลิตในแง่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตนั้น ๆ ซึ่งจะนำไปสู่การสูญเสียค่าใช้จ่ายที่มากขึ้นนั่นเอง

การใช้สารรังสีติดตามในการวัดอัตราการไหลในกระบวนการทางอุตสาหกรรม สามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

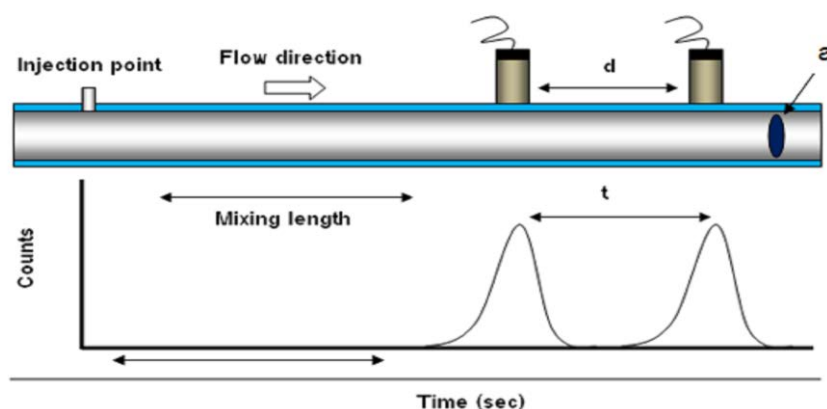
1. Pulse Velocity หรือ Peak-to-Peak Method
2. Tracer Dilution Method
 - Total Count Method
 - Constant-rate Injection Method

2.6.1 Pulse Velocity Method หรือ Peak-to-Peak Method

เป็นวิธีที่นำมาใช้ในการวัดอัตราการไหลของท่อส่งวิธีหนึ่งที่ใช้กันมากที่สุด เนื่องจากทำได้ง่ายและสะดวก ไม่ต้องทำการเก็บตัวอย่างและสามารถทำการตรวจวัดในพื้นที่ได้เลยด้วยเครื่องวัดชนิดแบบพกพา การวัดอัตราการไหลแบบ Pulse Velocity หรือ Peak-to-Peak สามารถทำได้โดยการฉีดสารรังสีติดตามเข้าไปในระบบภายในระยะเวลารวดเร็วและปล่อยสารรังสีติดตามให้ไหลไปตามกระแสของระบบพร้อมทำการตรวจวัดสัญญาณจากสารรังสีที่ผ่านหัววัดทั้งสองจากภายนอกของท่อ แสดงดังภาพที่ 2.7 โดยวางหัววัดตัวที่หนึ่งห่างจากตำแหน่งฉีดสารรังสีด้วยระยะทางที่สารรังสีติดตามกับตัวอย่างที่จะทำการตรวจสอบผสมกันอย่างสม่ำเสมอแล้ว (beyond the minimum mixing length) และทราบระยะห่างที่แน่นอนระหว่างหัววัดทั้งสอง (d) พื้นที่หน้าตัดของท่อ (a) และเวลา (T) ในการเคลื่อนที่ของสัญญาณระหว่างทั้งสองหัววัด จากนั้นคำนวณอัตราการไหล (Q) แสดงดังสมการที่ 3

$$Q = \frac{a \times d}{t} \quad (3)$$

เมื่อ	Q	= อัตราการไหล (flow rate), m^3/s
	a	= พื้นที่หน้าตัดของท่อ (cross-section area), m^2
	d	= ระยะห่างระหว่างหัววัดทั้งสอง (distance between the two detectors), m
	t	= เวลาของสัญญาณระหว่างหัววัดทั้งสอง (transit time), s



ภาพที่ 2.7 การวัดอัตราการไหลด้วยวิธี pulse velocity หรือ peak-to-peak^[3]

2.6.2 Tracer Dilution Method

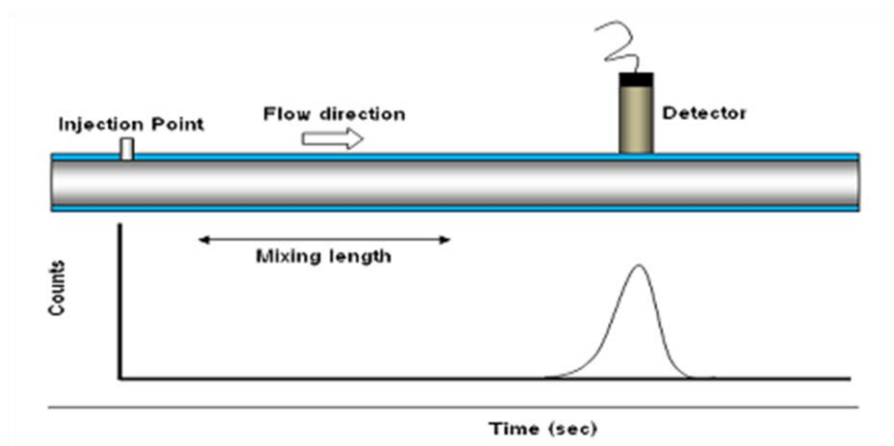
2.6.2 A Total Count Method

การวัดอัตราการไหลด้วยวิธี Total Count เป็นการวัดอัตราการไหลที่ใช้หัววัดเพียงหัวเดียว วางแนบติดบนผิวด้านนอกของท่อส่งห่างจากตำแหน่งฉีดสารรังสีติดตามด้วยระยะทางที่สารติดตามกับวัสดุที่จะทำการตรวจสอบผสมกันอย่างสม่ำเสมอแล้ว ทำการฉีดสารรังสีติดตามเข้าไปในท่อส่งอย่างรวดเร็วพร้อมกับการนับวัดรังสีทั้งหมดที่ผ่านหัววัด แสดงดังภาพที่ 2.8 ในการคำนวณอัตราการไหล ต้องทราบค่าความแรงรังสี (A) และปริมาตร (V) ของสารรังสีที่ฉีดเข้าไปในระบบ จึงจะสามารถคำนวณอัตราการไหลดังสมการที่ 4 ดังต่อไปนี้

$$Q = \frac{AF}{N} \quad (4)$$

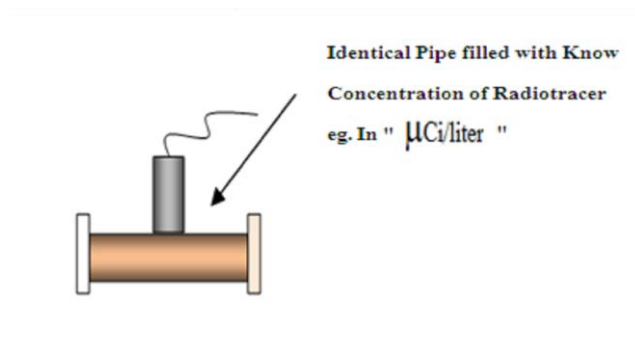
เมื่อ Q = อัตราการไหล (flow rate), liter/min

- A = ความแรงรังสี (activity injected), μCi
 F = ปัจจัยการปรับเทียบ (calibration factor), cpm per $\mu\text{Ci/liter}$
 N = อัตราการนับทั้งหมด (total counts) = พื้นที่ใต้ยอดกราฟทั้งหมด (total Area under the peak), s



ภาพที่ 2.8 การวัดอัตราการไหลด้วยวิธี Total Count^[3]

การหาค่า Calibration factor (F) ทำโดยการเติมสารรังสีติดตามที่ทราบความเข้มข้นใส่ในท่อที่ทราบปริมาตรที่แน่นอนและนับวัดรังสีแกมมาที่ปล่อยออกมาจากสารรังสีติดตามด้วยเวลาที่เหมาะสม โดยค่า F จะอยู่ในหน่วยของ cpm per $\mu\text{Ci/liter}$ เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 2.9



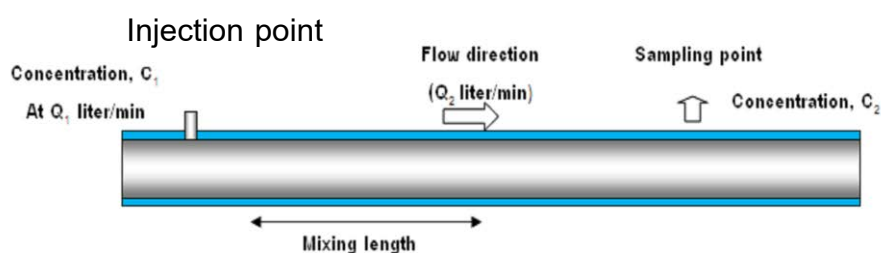
ภาพที่ 2.9 การวัดรังสีจากท่อบรรจุไอโซโทปรังสีที่ทราบค่าความแรงรังสีเพื่อการหาค่า Calibration factor, F ^[4]

2.6.2 B Constant-rate Injection Method

การวัดอัตราการไหลด้วยวิธีนี้จะต้องใช้สารรังสีติดตามปริมาณมากและต้องมีสถานีสำหรับเก็บตัวอย่าง การวัดอัตราการไหลแบบ Constant-rate Injection ทำโดยการฉีดสารรังสีติดตามที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนและมีอัตราการฉีดที่คงที่ เข้าในระบบและปล่อยให้ไหลไปตามกระแสของไหลในระบบ ทำการเก็บตัวอย่างที่ตำแหน่งที่สารติดตามกับสารที่จะทำการตรวจสอบผสมกันอย่างสม่ำเสมอแล้ว และนำตัวอย่างไปวัดความเข้มข้นของสารรังสีติดตามด้วยการวัดที่เหมาะสม พร้อมกับคำนวณอัตราการไหล ดังสมการที่ 5

$$Q_2 = Q_1 \times (C_1 / C_2) \quad (5)$$

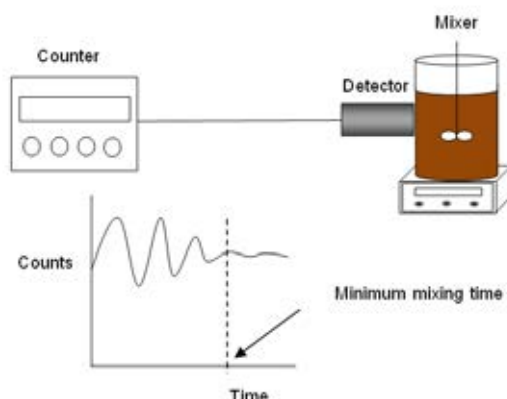
เมื่อ Q_2 = อัตราการฉีดสารรังสีติดตาม (flow rate), Liters/min
 C_1 = ความเข้มข้นของสารรังสีติดตามที่ฉีด ($\mu\text{Ci/liter}$)
 C_2 = ความเข้มข้นของสารรังสีติดตามในตัวอย่าง ($\mu\text{Ci/liter}$)



ภาพที่ 2.10 การวัดอัตราการไหลด้วยวิธี Constant-rate Inject^[3]

2.7 การหาเวลาการผสมน้อยที่สุด (Determination of minimum mixing time)

การใช้สารรังสีติดตามในการศึกษาการผสม (Mixing Study) เป็นวิธีที่ใช้เพื่อหาประสิทธิภาพการผสมของเครื่องผสม (blender) ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมเพื่อดูว่าเครื่องผสมมีความบกพร่องหรือมีประสิทธิภาพเป็นอย่างไร ซึ่งจะช่วยให้บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และกระบวนการในการผลิตได้ การวัดการผสมทำโดยการวางหัววัดรังสีแบบติดกับผิวด้านนอกของเครื่องผสม จากนั้นเติมสารรังสีติดตามลงไปในส่วนผสมในเครื่องผสมภายในระยะเวลารวดเร็ว พร้อมกับทำการนับวัดความเข้มข้นรังสีของสารรังสีติดตาม ทำการสังเกตค่าจำนวนนับรังสีจนมีค่าที่คงที่ ดังภาพที่ 2.11 แสดงเทคนิคการหาเวลาการผสม



ภาพที่ 2.11 การหาเวลาการผสม (mixing time)^[3]

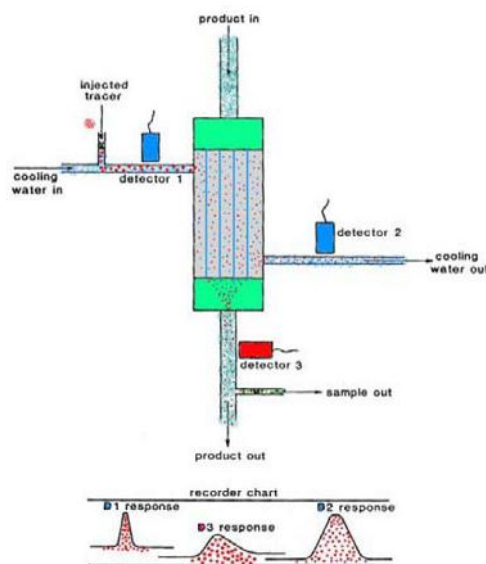
2.8 การตรวจสอบการรั่ว (Leak Test)

การตรวจสอบรอยรั่วเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้เพื่อตรวจสอบปัญหาของระบบในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น การหารอยตำหนิหรือรอยรั่วของท่อขนส่ง รอยรั่วของถังที่ฝังใต้ดิน หรือศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องแยกในการบวนการผลิต เป็นต้น เมื่อมีปัญหาเกิดขึ้นก็จะสามารถทำการแก้ไขได้ตรงจุดที่เกิดรอยรั่ว

2.8.1 การวัดการรั่วของทางผ่าน (Bypass)

การวัดทางผ่านเป็นการวัดประสิทธิภาพของระบบในกระบวนการทางอุตสาหกรรมวิธีหนึ่ง เพื่อตรวจสอบว่าขั้นตอนของกระบวนการเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการหรือไม่ โดยการผสมสารติดตามที่มีคุณสมบัติเหมือนกันกับวัสดุที่จะตรวจสอบเข้าไปในระบบและปล่อยให้ไหลตามกระแสของระบบ ทำการตรวจวัดรังสีบริเวณทางเข้าของผลิตภัณฑ์ตั้งต้น ทางผ่านและบริเวณทางออกของผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยสังเกตบริเวณทางผ่านใดมีความเข้มข้นของสารรังสีติดตามมากกว่าปกติ แสดงว่าระบบเกิดความผิดปกติหรือมีการรั่วไหลเกิดขึ้น เราจะได้หาวิธีแก้ไขต่อไป ดังภาพที่ 2.12 แสดงเทคนิคการวัดการรั่วของของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนการตรวจสอบระบบแลกเปลี่ยนความร้อนโดยเทคนิคทางรังสีติดตาม เป็นวิธีตรวจสอบแบบไม่ทำลายสามารถกระทำได้โดยไม่ต้องหยุดกระบวนการผลิต และให้ผลการตรวจสอบที่ถูกต้องแม่นยำโดยทันที โดยการฉีดสารรังสีแกมมาครึ่งชีวิตสั้น เช่น สารโบรมีน-82 เข้าไปในระบบการผลิตและวัดปริมาณความเข้มข้นรังสี ณ ทางเข้าและทางออกของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้ทราบว่าเกิดการรั่วไหลในระบบหรือไม่ ตรงตำแหน่งไหน และมากน้อยเพียงใด รวมทั้งคำนวณได้ว่าระบบแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพเพียงใด ตรงกับการออกแบบหรือไม่ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยวิธี

นี้ช่วยให้วิศวกรและผู้บริหารโรงงานสามารถตัดสินใจวางแผนแก้ไขปัญหาก็ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว สามารถลดระยะเวลาการซ่อมบำรุง สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพระบบการผลิตและคุณภาพผลผลิตให้ดีขึ้น นับเป็นการช่วยลดการสูญเสียทางเศรษฐกิจและเพิ่มคุณค่าผลผลิตได้

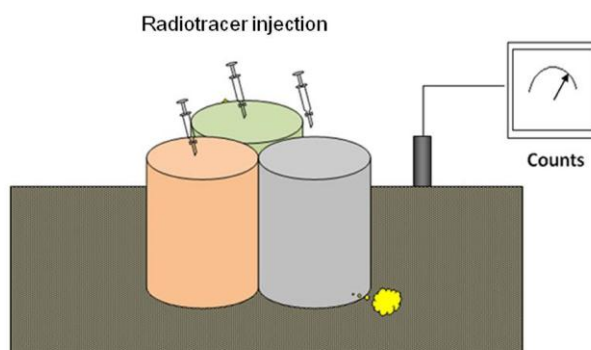


ภาพที่ 2.12 การวัดการรั่วของของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน^[3]

2.8.2 การหารอยรั่วของท่อหรือถังที่ฝังไว้ใต้ดิน (Underground buried pipe or Tank)

การใช้ไอโซโทปกัมมันตรังสีสำหรับตรวจหารอยรั่วของท่อขนส่งของเหลวที่ฝังใต้ดิน ทำโดยการผสมไอโซโทปกัมมันตรังสีกับของเหลวที่จะขนส่งเข้าไปตามท่อ แล้วทำการตรวจวัดการแผ่รังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี ถ้าบริเวณใดที่พบว่ามีค่าความเข้มข้นของรังสีมากกว่าปกติแสดงว่าบริเวณนั้นมีการรั่วเกิดขึ้น ดังภาพที่ 2.13 แผนภาพการตรวจหารอยรั่วของท่อที่ฝังใต้ดิน

การหารอยรั่วของถังที่ฝังไว้ใต้ดินทำได้โดยการฉีดรังสีติดตามที่มีคุณสมบัติกับสารที่บรรจุ

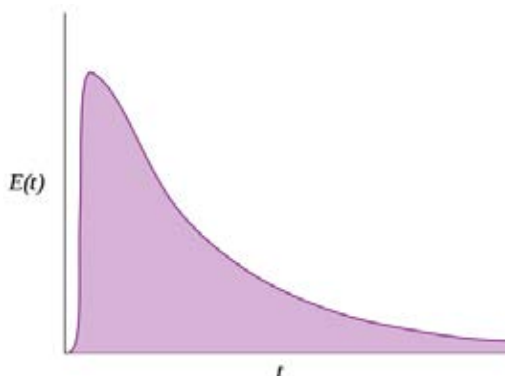


ภาพที่ 2.14 การตรวจหารอยรั่วของถังที่ฝังใต้ดิน^[3]

ในถัง ทำการสำรวจการแผ่รังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสีเพื่อค้นหาตำแหน่งรั่วไหล ถ้าตำแหน่งใดที่มีการรั่วไหลจะทำให้ตรวจพบความเข้มของรังสีมากกว่าปกติ หรือในกรณีที่มีหลาย ๆ ถังด้วยกันให้นิธีรังสีติดตามที่ต่างชนิดกันลงไปในแต่ละถังพร้อมกับตรวจสอบชนิดของรังสีที่รั่วไหลออกมาด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพาว่าเป็นรังสีของสารติดตามตัวไหน ซึ่งจะทำให้ทราบว่าเกิดการรั่วไหลมาจากถังใด ดังภาพที่ 2.14 แสดงเทคนิคการตรวจหารังสีของถังที่ฝังลึกใต้ดิน

2.9 Residence Time Distribution (RTD)^[8]

Residence Time Distribution (RTD) หมายถึง เป็นฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นที่อธิบายระยะเวลาที่องค์ประกอบของเหลวสามารถเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ ในทางวิศวกรรมเคมีใช้ RTD ในลักษณะการผสมและการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์จริงกับทฤษฎี จึงมีประโยชน์สำหรับการแก้ไขปัญหาเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอยู่ การประเมินอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่กำหนดและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ในอนาคต โดยลักษณะฟังก์ชัน RTD แสดงดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 RTD curve

สามารถทำได้โดยการฉีดสารรังสีติดตามที่เหมาะสมเข้าไปในระบบและการตรวจสอบความเข้มข้นของการติดตามโดยใช้เครื่องตรวจวัดรังสีวางไว้ที่ทางออกของถังผสมเก็บตัวอย่างจากสถานที่เดียวในช่วงเวลาปกติโดยฉีดสารรังสีติดตามอย่างรวดเร็วที่ โดยสมมติ $t = 0$ คือเวลาเริ่มต้นในการฉีด สามารถหาฟังก์ชัน RTD ได้จากสมการที่ 6

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} tC(t)dt} \quad (6)$$

เมื่อ $C(t)$ = ความเข้มข้นของสารรังสีติดตามที่ทางออกจากเครื่องปฏิกรณ์
 $E(t)$ = ฟังก์ชัน RTD

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้ในการเตรียมสารรังสีติดตามและใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วย สำหรับการทดลองครั้งนี้เลือกใช้สารละลาย Ba-137m และ Tc-99m

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เรดิโอไอโซโทปโคลด์เจนเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m
- 2) ปั๊มรีดท่อ (Peristaltic pump)
- 3) ชุดระบบวัดรังสี ประกอบด้วย
 - ชุดระบบวัดรังสี (Ludlum 4612 12-Channel bench top Counter)
 - หัววัดรังสีแกมมา NaI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1.5 นิ้ว จำนวน 5 ชุด
 - หัววัดรังสีแกมมา Bismuth germinate (BGO) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว จำนวน 1 ชุด
 - แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง (high voltage power supply)
 - อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier)
 - เครื่องวิเคราะห์สัญญาณช่องเดียว (Single channel analyzer)
 - เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง (Multichannel analyzer) ซึ่งสามารถใช้งานใน multichannel scaling (MCS) mode
 - ไมโครคอมพิวเตอร์
- 4) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 5) ถังพักทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ความสูง 50 เซนติเมตร
- 6) ระบบถังกวนชนิดที่ติดตัวกีดกัน (4-baffle tank) เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตรความสูง 30 เซนติเมตร
 - ใบกวนชนิด Propeller 2 ใบ
 - ใบกวนชนิด Paddies ขนาด 76 มม. x 70 มม. 2 ใบ
- 7) ไมโครปิเปต
- 8) บีกเกอร์

9) กระบอกฉีดยา (syringe)

3.2 สารเคมี

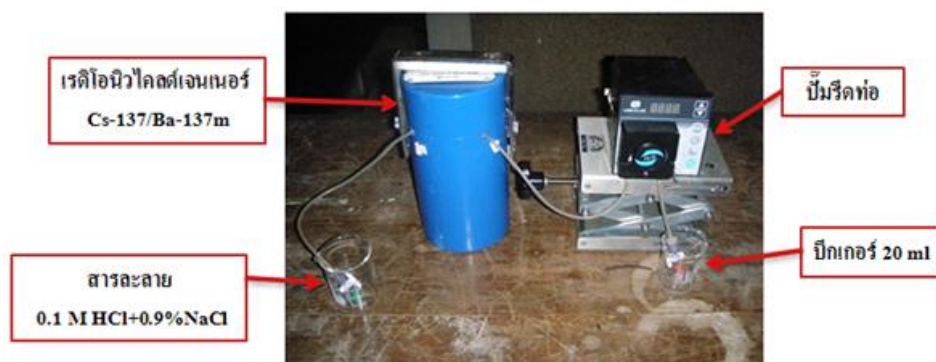
- 1) กรดไฮโดรคลอริก
- 2) โซเดียมคลอไรด์
- 3) สารกรองเรซิน (Ion Exchange Resin)

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของเจนเนอเรเตอร์ Ba-137m ในการผลิต Ba-137m มาใช้เป็นสารรังสีติดตาม ขั้นตอนที่สองเป็นการจัดระบบวัดรังสีแกมมา และขั้นตอนที่สามเป็นการทดลองใช้ Ba-137m เป็นสารรังสีติดตามเพื่อหาเวลาที่สารอยู่ในระบบ (residence time, RTD) ในถังของเหลวภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ กัน เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณ

3.3.1 การศึกษาคุณสมบัติเฉพาะเบื้องต้นของเจนเนอเรเตอร์ $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$

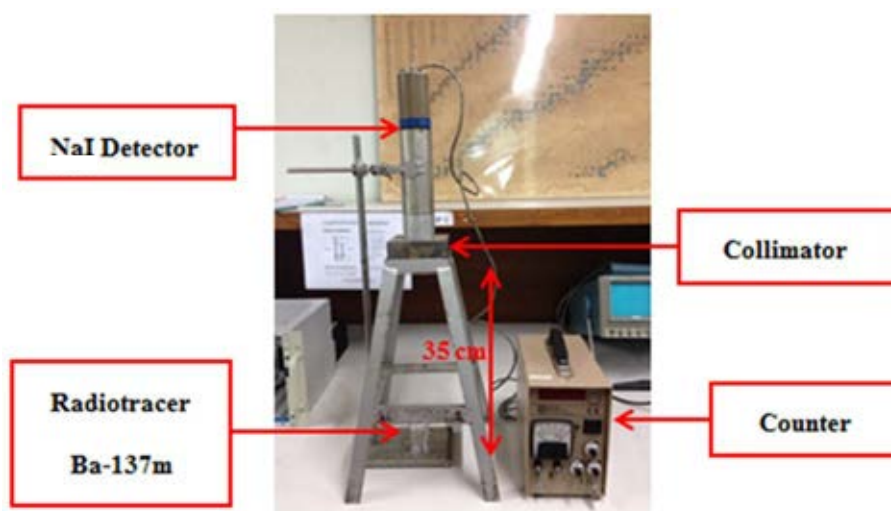
ในขั้นตอนแรกได้ศึกษาคุณสมบัติเฉพาะเบื้องต้นของเจนเนอเรเตอร์ $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ โดยใช้เรดิโอไอวไคลด์เจนเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m การเตรียมสารละลาย Ba-137m จะทำโดยการฉีดสารละลาย 0.1 M HCl+0.9%NaCl เข้าไปในเรดิโอไอวไคลด์เจนเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m ได้สารละลายแบเรียม-137m คลอไรด์ ($^{137\text{m}}\text{BaCl}_2$) โดยใช้ปั๊มรีดท่อ (Peristaltic pump) เป็นตัวรีดสารละลายให้เคลื่อนที่ผ่านเรดิโอไอวไคลด์เจนเนอเรเตอร์ Cs-137/Ba-137m ด้วยอัตราการไหลคงที่ผ่านปั๊มและไหลลงไปในขวดที่เตรียมได้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย Ba-137m

3.3.1.1 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้งานเจเนอเรเตอร์อีกครั้ง

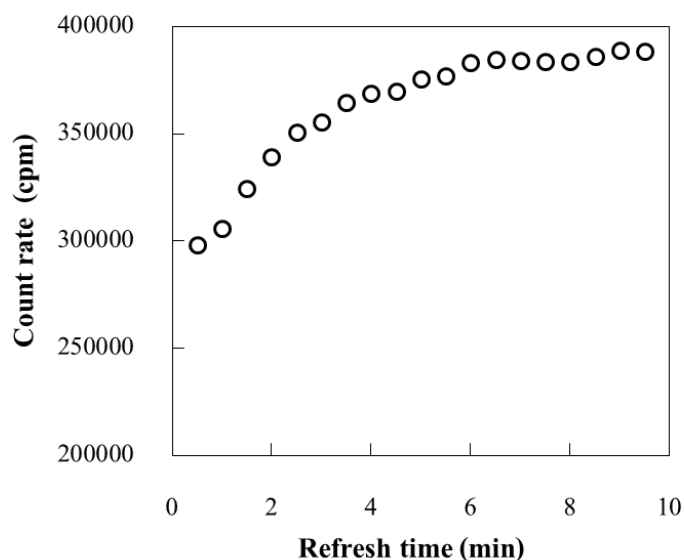
ทดลองทำการชะโดยใช้สารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตรทุกครั้ง โดยเว้นช่วงการชะครั้งต่อไปโดยเพิ่มเวลาขึ้นทีละ 30 วินาทีจากเวลาเดิมทุกครั้ง สารรังสีติดตาม Ba-137m ที่ได้จากการชะจะใช้ไมโครปิเปตดูดขึ้นมาในปริมาตร 1 มิลลิลิตรแล้วทำการวัดอัตราการนับกับหัววัดรังสี NaI ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 นิ้วที่ระยะห่าง 35 เซนติเมตรต่อกับตัวนับวัด (counter) ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในวัดสารรังสีติดตาม Ba-137m ที่ได้จากการชะ

-ผลการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้งานเจเนอเรเตอร์อีกครั้ง

จากการทดลองทำการชะที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตรทุกครั้ง โดยเว้นช่วงการชะครั้งต่อไปเพิ่มเวลาขึ้นทีละ 30 วินาทีจากเวลาเดิมทุกครั้ง จากภาพที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาที่ทิ้งไว้ตั้งแต่ 6 นาทีขึ้นไปอัตรานับรังสีจะเริ่มคงที่ ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการรอ (waiting time) ก่อนที่จะทำการชะอีกครั้งตั้งแต่ 6 นาทีขึ้นไป



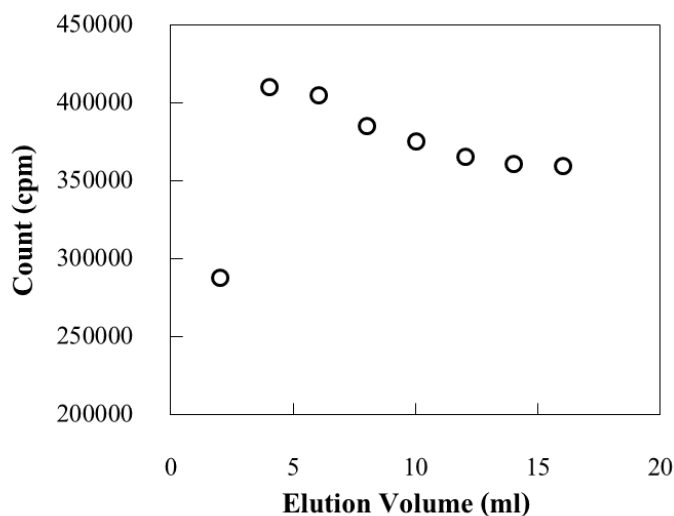
ภาพที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแรงรังสีและเวลาที่รอก่อนการชะครั้งถัดไป

3.3.1.2 การหาปริมาณสารละลายที่เหมาะสมในการชะแต่ละครั้ง

ทดลองทำการทิ้งเจเนอเรเตอร์ทิ้งไว้ 10 นาทีจึงการชะครั้งต่อไปทุกครั้งจากข้อ 3.3.1.1 ทดลองเพิ่มปริมาณสารละลายในการชะทีละ 2 มิลลิลิตร โดยปริมาณสารละลายที่ชะเริ่มต้นจาก 2, 4, 6 ไปจนถึง 16 มิลลิลิตรสารรังสีติดตาม Ba-137m ที่ได้จากการชะจะใช้ไมโครปิเปตดูดขึ้นมาในปริมาตร 1 มิลลิลิตรแล้วทำการวัดอัตราการนับกับหัววัดรังสี NaI เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 นิ้วที่ระยะห่าง 35 เซนติเมตรต่อกับตัวนับวัด (counter) ดังภาพที่ 3.2

-ผลการหาปริมาณสารละลายที่เหมาะสมในการชะ (elute) แต่ละครั้ง

จากการทดลองทำการทิ้งเจเนอเรเตอร์ทิ้งไว้ 10 นาทีซึ่งการชะครั้งต่อไปทุกครั้งจากข้อ 3.3.1.1 ทดลองเพิ่มปริมาณในการชะทีละ 2 มิลลิลิตร โดยปริมาณที่ชะจาก 2, 4, 6 ไปจนถึง 16 มิลลิลิตร จากภาพที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าปริมาณสารละลายตั้งแต่ 8 มิลลิลิตรขึ้นไปอัตราการนับรังสีจะเริ่มคงที่และลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากปริมาณในการชะมากก็จะใช้เวลามากขึ้น เมื่อเวลามาก ^{137m}Ba มีครึ่งชีวิตที่สั้นทำให้อัตราการนับลดลงด้วย ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมที่จะทำงานตั้งแต่ 8 มิลลิลิตรขึ้นไป



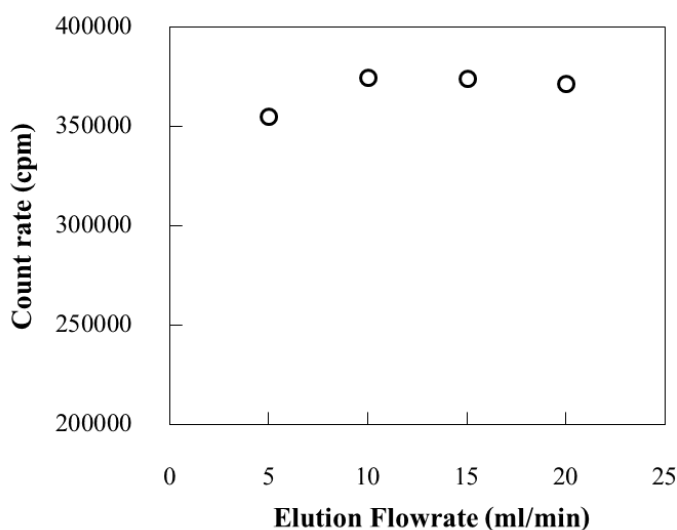
ภาพที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงรังสีและปริมาตรสารละลายที่เหมาะสมในการชะแต่ละครั้ง

3.3.1.3 การหาอัตราการไหลของสารละลายในการชะแต่ละครั้ง

ทดลองทำการทิ้งเจเนอเรเตอร์ทิ้งไว้ 10 นาทีและปริมาตรสารละลาย 10 มิลลิลิตรครั้งต่อไป ทุกครั้งจากข้อ 3.3.1.1 และข้อ 3.3.1.2 ทดลองปรับอัตราการไหลของปั๊มรีดท่อเป็น 5 10 15 และ 20 ml/min สารรังสีติดตาม Ba-137m ที่ได้จากการชะจะใช้ไมโครปิเปตดูดขึ้นมาในปริมาตร 1 มิลลิลิตรแล้วทำการวัดอัตราการนับกับหัววัดรังสี NaI ที่ระยะห่าง 35 เซนติเมตรต่อกับเครื่องนับ (counter) ดังแสดงในภาพที่ 3.2

-ผลการหาอัตราการไหลของสารละลายในการชะแต่ละครั้ง

จากการทดลองทำการทิ้งเจเนอเรเตอร์ทิ้งไว้ 10 นาทีและปริมาตร 10 มิลลิลิตรครั้งต่อไป ทุกครั้งจากข้อ 3.3.1.1 และข้อ 3.3.1.2 ทดลองปรับอัตราการไหลของปั๊มรีดท่อเป็น 5, 10, 15 และ 20 ml/min จากภาพที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าอัตราการไหล 10, 15 และ 20 ml/min อัตราการนับคงที่ ดังนั้น อัตราการไหลที่เหมาะสมนำมาใช้คือ 20 ml/min เนื่องจากอัตราการนับเท่ากันและใช้เวลาในการชำน้อยซึ่งมีผลต่อครึ่งชีวิต Ba-137m

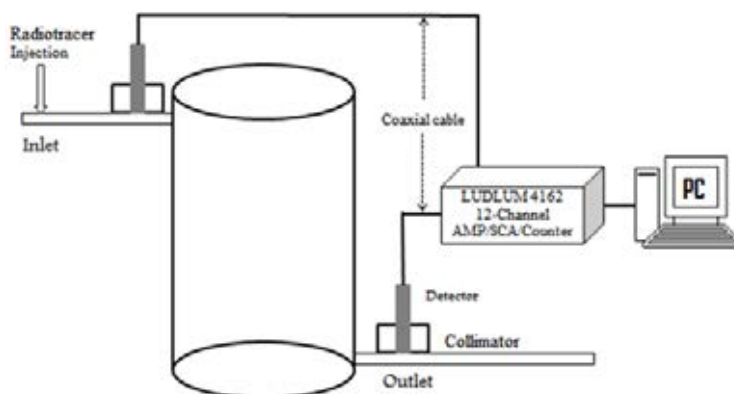


ภาพที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงรังสีและอัตราการไหลของสารละลายในการชะแต่ละครั้ง

3.3.2 การจัดระบบวัดรังสีแกมมาและประมวลผล

3.3.2.1 ระบบวัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีชนิด NaI(Tl)

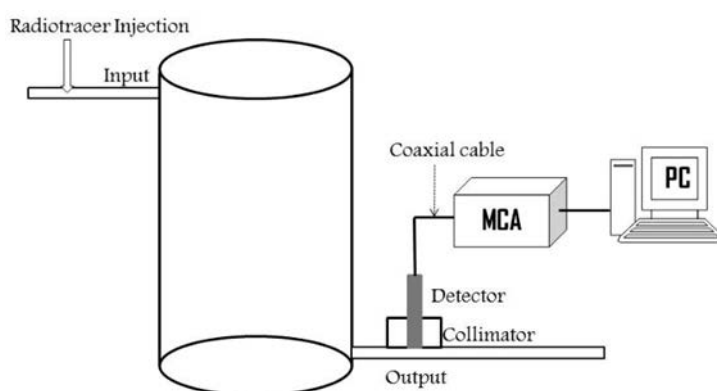
ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการเตรียมระบบวัดอัตราการนับรังสีที่ทางเข้าและทางออกของถังโดยใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) ได้สูงสุดถึง 12 หัววัด ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว หุ้มด้วย Collimator ทำจากตะกั่วภาพที่ทรงกระบอกหนา 1 นิ้ว เพื่อให้หัววัดรังสีแกมมาเฉพาะที่เข้าทางด้านหน้าเท่านั้น โดยหัววัดรังสีทั้งหมดสามารถต่อเข้ากับเข้ากับระบบวัดรังสีแบบ 12 ช่อง ที่แสดงผลเป็นกราฟบนจอไมโครคอมพิวเตอร์ได้แบบต่อเนื่อง และสามารถเก็บข้อมูลตัวเลขไปวิเคราะห์ผลได้ ภาพที่ 3.6 แสดงระบบวัดรังสีแกมมาที่ใช้หัววัดรังสี NaI(Tl) 2 ชุด



ภาพที่ 3.6 ระบบวัดรังสีแกมมาที่ใช้หัววัดรังสีชนิด NaI(Tl)

3.3.2.2 ระบบวัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดรังสีชนิด BGO

ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการเตรียมระบบวัดอัตราการนับรังสีที่ออกจากถังโดยใช้หัววัด Bismuth germinate (BGO) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้วหุ้มด้วย Collimator ทำจากตะกั่ว ทรงกระบอกหนา 1 นิ้ว เพื่อให้หัววัดรังสีแกมมาเฉพาะที่เข้าทางด้านหน้าเท่านั้น โดยต่อหัววัดเข้ากับ เครื่องวิเคราะห์หลายช่อง(Multichannel analyzer, MCA) ที่เชื่อมต่อกับ ไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บ บันทึกข้อมูลอัตราการนับรังสีที่เวลาต่าง ๆ จาก MCA



ภาพที่ 3.7 ระบบวัดรังสีแกมมาที่ใช้หัววัด BGO

3.3.3 การทดลองใช้ Ba-137m ในการหา RTD ในระบบของเหลว

ในการทดลองหา RTD โดยใช้สารละลาย Ba-137m ที่ผลิตจากเรดิโอไอโซโทปโคบอลต์-60 จะใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมสารละลาย Ba-137m จากหัวข้อที่ 3.3.1 และใช้ระบบวัดรังสีแกมมาที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2 ซึ่งการหา RTD ได้ทดลองกับถังพักขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร และถังผสมของเหลว (fluid mixer) ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร โดยมีรายละเอียดในการทดลองดังต่อไปนี้

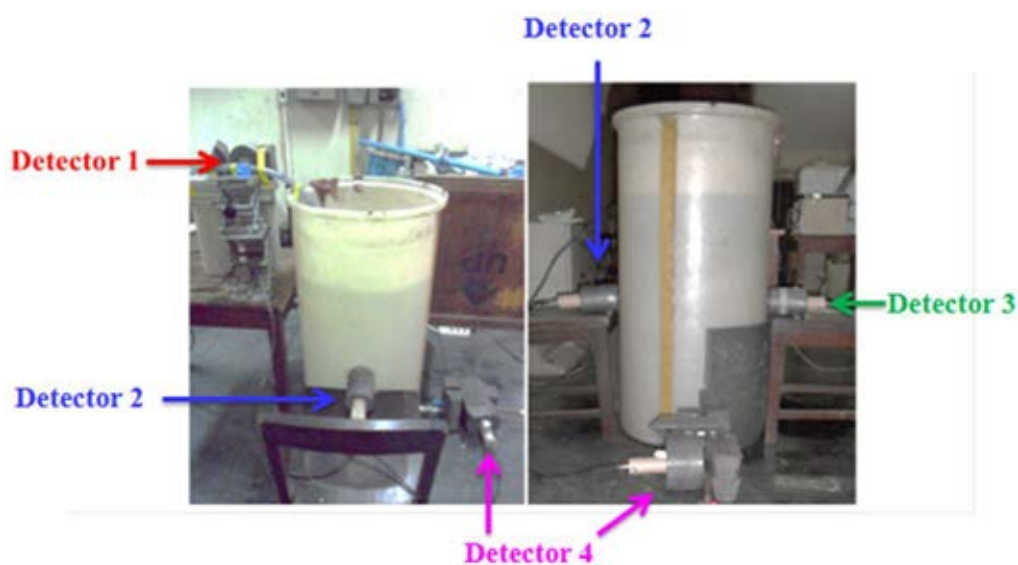
3.3.3.1 การทดลองใช้ Ba-137m ในการหา RTD ในถังพัก

ได้ทำการทดลองโดยการฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m ปริมาตร 4 มิลลิลิตรเข้าไปในถังพัก ภาพที่ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร ความสูง 80 เซนติเมตร โดยกำหนดให้อัตราน้ำ

ไหลเข้าคงที่และอัตราน้ำไหลออกคงที่ โดยได้การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่ 0.12 , 0.24 และ 0.83 ลิตร/วินาที เพื่อดูผลกระทบต่อ RTD ดังเงื่อนไขที่แสดงในตารางที่ 3.1 ภาพที่ 3.8 แสดงระบบการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m ในถังพัก โดยมีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าออกถังพักให้คงที่และทำการ วัดอัตราการนับรังสีที่ตำแหน่งทางออก(Outlet)ของถังพักเพื่อดู RTD โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) และใช้หัววัดรังสีชนิดเดียวกันอีก 1 หัว วัดรังสีที่ทางเข้าเพื่อ ดูลักษณะการกระจายของไอโซโทปรังสี Ba-137m ว่าการฉีดมีความสมบูรณ์ดีหรือไม่ นอกจากนี้ ยังใช้หัววัดรังสีอีก 2 หัววัดรังสีแกมมา ณ ตำแหน่งด้านข้างของถังสองจุดตรงกันข้ามกันเพื่อ ตรวจสอบไอโซโทปรังสีที่หลงเหลืออยู่ในถัง ดังแสดงในภาพที่ 3.8 โดยผลการทดลองแสดงเป็น กราฟในภาพที่ 3.8

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba- 137m เพื่อหาค่า RTD ในถังพัก

เงื่อนไขที่	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)	สารรังสีติดตาม	ชนิดใบกวน
1	0.12	Ba-137m	ไม่มี
2	0.24		
3	0.38		



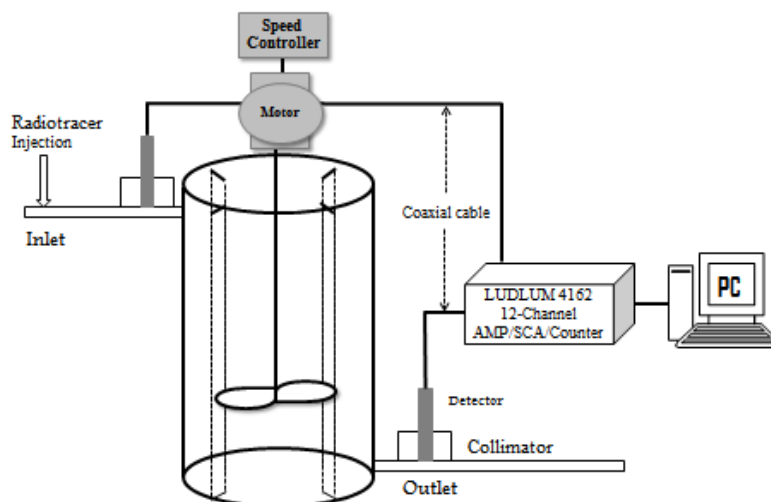
ภาพที่ 3.8 การจัดระบบสำหรับการทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba- 137m เพื่อหาค่า RTD ในถัง

3.3.3.2 การทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m และ Tc-99m เพื่อหาค่า RTD ในถังกวนชนิดที่ติดตัวกีดกัน (4-baffle tank) ใช้ใบกวนชนิด Propeller

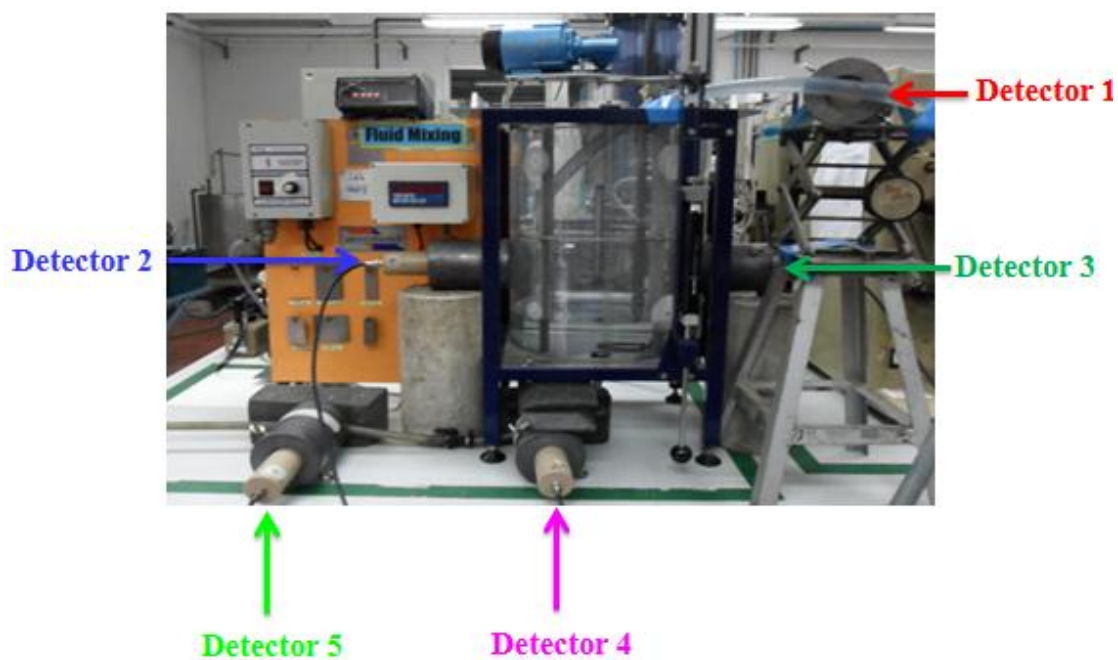
ได้ทำการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m และ Tc-99m ปริมาตร 1 มิลลิลิตรเข้าไปในถังกวนชนิดที่ติดตัวกีดกัน (4-baffle tank) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร โดยถังกวนใช้ใบกวนชนิดใบพัดเรือ (Propeller) ซึ่งมีลักษณะคล้ายใบพัดเรือขนาดความกว้าง 2.5 เซนติเมตรจำนวน 2 ใบโดยควบคุมให้อัตราน้ำไหลเข้าและออกคงที่ที่ 0.83 ลิตรต่อวินาที ความเร็วรอบของใบกวนไปที่ 160 รอบต่อนาที (rpm) เพื่อคู่ผลต่อ RTD ดังที่แสดงเงื่อนไขการทดลองในตารางที่ 3.2 การจัดระบบในภาพที่ 3.9 และ 3.10 ซึ่งได้ทำการวัดอัตราการนับรังสีที่ตำแหน่งทางเข้า (inlet) และทางออก(Outlet) ของถังกวนด้วยหัววัดรังสี NaI(Tl) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว นอกจากนี้ยังได้เพิ่มหัววัดรังสีอีกสองหัวเพื่อตรวจสอบรังสีในถังกวนอีกด้วย ในการทดลองนี้ได้ทดลองใช้สารรังสีติดตามสองชนิดคือ Tc-99m และ Ba-137m เนื่องจาก Tc-99m ให้รังสีแกมมาพลังงานต่ำคือ 140 keV สามารถกัมบังรังสีได้ง่าย หัววัดรังสีที่ตำแหน่งทางออกซึ่งใช้ในการดูลักษณะของกราฟ RTD จึงปราศจากการรบกวนของรังสีแกมมาจากตำแหน่งอื่น ๆ จึงใช้เพื่อทดสอบก่อนใช้ Ba-137m ซึ่งมีพลังงานสูง หากกัมบังรังสีไม่ดีพอลักษณะของกราฟ RTD จะแตกต่างกัน

ตารางที่ 3.2 การทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m และ Tc-99m ในการหาค่า RTD ในถังกวนชนิดที่ติดตัวกีดกัน (4-baffle tank) ที่ใช้ใบกวนชนิด Propeller

เงื่อนไขที่	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)	สารรังสีติดตาม	ชนิดใบกวน
1	0.083	Ba-137m	Propeller
2	0.04	Tc-99m	
3	0.083		



ภาพที่ 3.9 แผนภาพการจัดระบบเพื่อหาค่า RTD ในถังกวนที่มีติดตัวกีดกั้น (4-baffle tank) โดยใช้ใบกวนชนิด Propeller



ภาพที่ 3.10 ภาพการจัดระบบเพื่อหาค่า RTD ในถังกวนที่มีติดตัวกีดกั้น (4-baffle tank) โดยใช้ใบกวนชนิด Propeller

3.3.3.3 การคำนวณผลการทดลอง¹⁹⁾

นำค่าอัตรานับรังสีที่ได้จากผลการทดลองมาปรับค่าการสลายตัวรังสีจะได้อัตรานับรังสีจริง $C(t)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7

$$C(t) = C_{Ex}(t)e^{\frac{\ln 2}{T_{half}}t} \quad (7)$$

เมื่อ $C_c(t)$ = อัตรานับรังสีที่ได้จากการทดลอง
 T_{half} = ค่าครึ่งชีวิตของสารรังสีติดตาม
 t = เวลาในการทดลอง

จากนั้นนำค่า $C(t)$ ที่ได้มาคำนวณมา normalization โดยใช้สมการ(8)

$$C_0 = \int_0^{\infty} C(t)dt \quad (8)$$

เมื่อ C_0 = พื้นที่ใต้กราฟอัตราการนับต่อเวลา

นำค่า C_0 ที่ได้มาคำนวณหาฟังก์ชัน RTD คือ $E(t)$ โดยใช้สมการ (9)

$$E(t) = \frac{C(t)}{C_0} \quad (9)$$

3.3.3.4 การทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m เพื่อหาค่า RTD ในถังกวนชนิดที่ติดตัวกีดกัน (4-baffle tank) ใช้ใบกวนชนิด Propeller และ Paddies

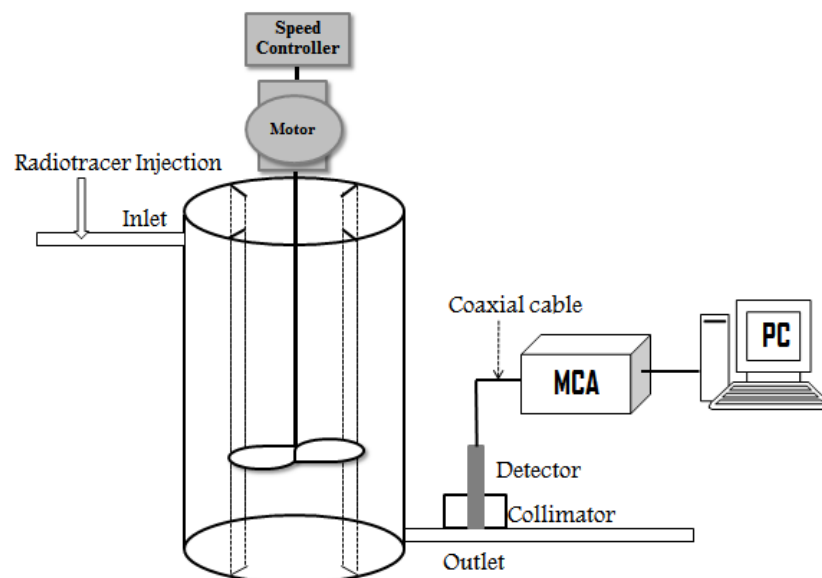
ได้ทำการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m ปริมาตร 4 มิลลิลิตรเข้าไปในถังกวนชนิดที่ติดตัวกีดกัน (4baffle tank) 2 ชนิด ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร โดยถังกวนชนิดแรกใช้ใบกวนชนิดใบพัดเรือ (Propeller) ซึ่งมีลักษณะคล้ายใบพัดเรือขนาดความกว้าง 2.5 เซนติเมตรจำนวน 2 ใบ และถังกวนชนิดที่สองใช้ใบกวนชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบน (Paddies) มีลักษณะแบนเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 7.6 เซนติเมตร x 7.0 เซนติเมตร จำนวน 2 ใบ

โดยควบคุมให้อัตราน้ำไหลเข้าและออกอยู่ที่ 0.83 ลิตรต่อวินาทีทำการตรวจวัดอัตราการนับรังสีที่ท่อขาออก และทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของใบกวนไปที่ 60, 110 และ 160 รอบต่อนาที (rpm) เพื่อตรวจสอบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและชนิดของใบกวนที่มีต่อ RTD ดังที่แสดงเงื่อนไขการทดลองในตารางที่ 3.3 ภาพที่ 3.10 และภาพที่ 3.11 ในการทดลอง

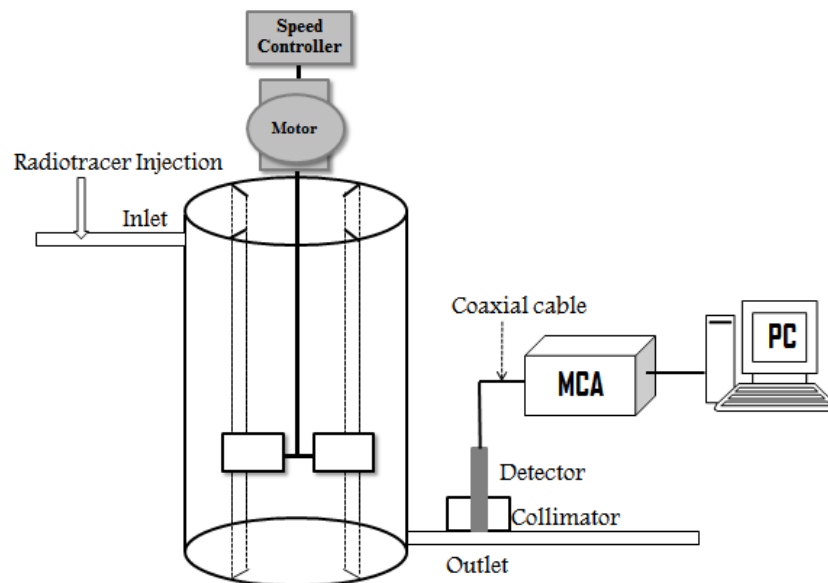
นี้ได้ทดลองใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิด Bismuth germinate (BGO) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว แทนหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl) เนื่องจากหัววัด BGO มีประสิทธิภาพสูงกว่าประมาณ 3 เท่าที่พลังงาน 662 keV ของ Ba-137m

ตารางที่ 3.3 การทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m ใน ถังกวนชนิดที่ติดตัวกีดกัน (4-baffle tank) เมื่อใช้ใบกวนชนิด Propeller และ Paddies

เงื่อนไขที่	ความเร็วรอบใบกวน (rpm)	สารรังสีติดตาม	ชนิดใบกวน
1	60	Ba-137m	Propeller
2	110		
3	160		
4	60		Paddies
5	110		
6	160		



ภาพที่ 3.11 แผนภาพการจัดระบบเมื่อใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m หาค่า RTD ในถังกวนชนิดที่ติดตัวกีดกัน (4-baffle tank) เมื่อใช้ใบกวนชนิด Propeller



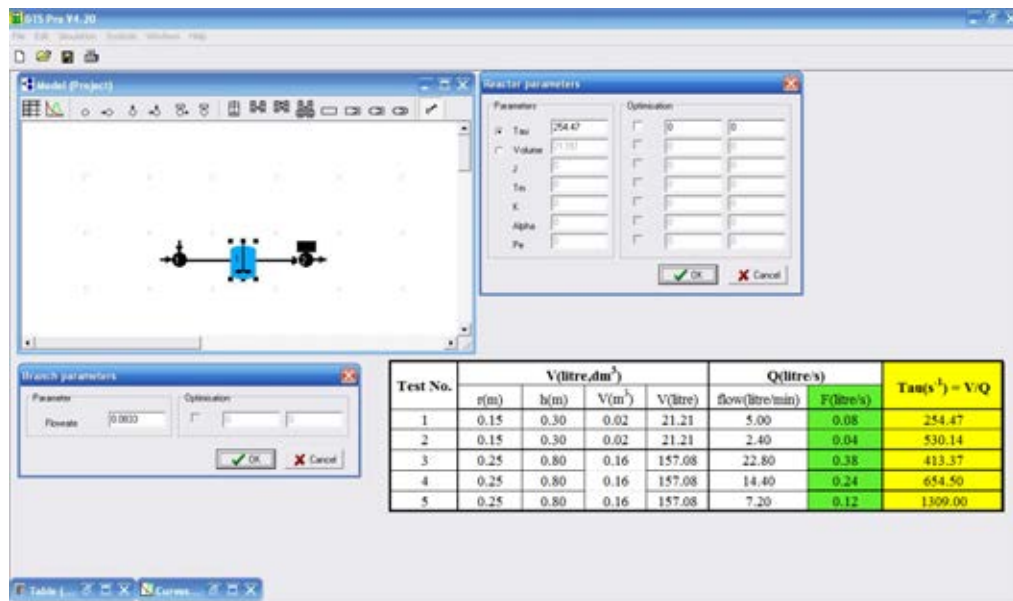
ภาพที่ 3.12 แผนภาพการจัดระบบเมื่อใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m หาค่า RTD ในถังกวนชนิดที่ติดตัวก็ดกัน (4-baffle tank) เมื่อใช้ใบกวนชนิด Paddies

3.3.3.5 การคำนวณการทดลองด้วยโปรแกรม DTS (Ideal mixing only)

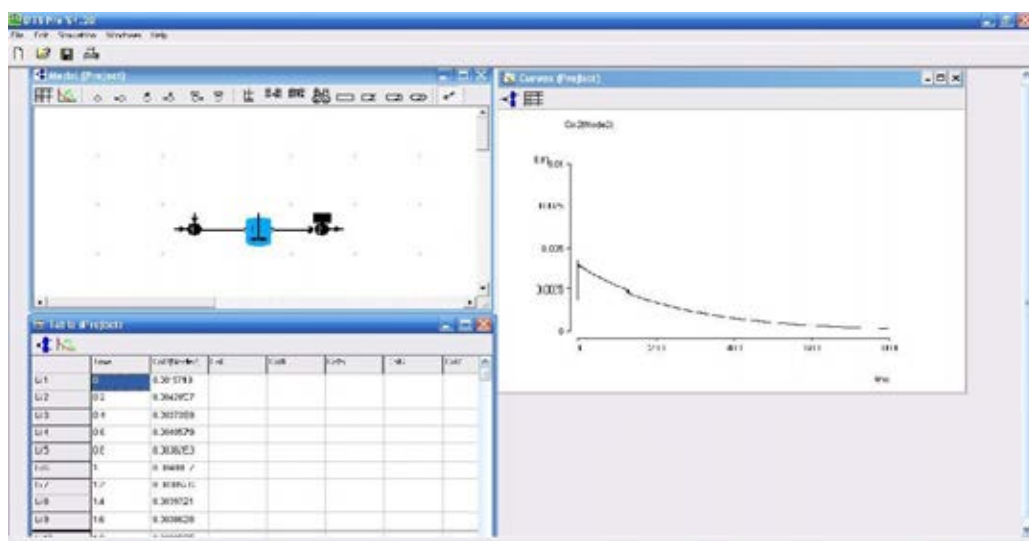
โปรแกรม DTS PRO SOFTWARE PACKAGE ได้รับความอนุเคราะห์จาก สทท. ซึ่งจัดทำโดยบริษัท PROGEPI เป็นโปรแกรมคำนวณ RTD โดยใช้ model เป็น perfect mixer in series ต้องทราบอัตราการไหลในท่อที่เข้าและออก ปริมาตรของถังทำการทดลองทางนั้นจึงนำมาคำนวณค่า Tau หาได้จากสมการที่ 10 นำค่า Tau และอัตราการไหลไปกรอกในโปรแกรม DTS ดังภาพที่ 3.13 จากนั้นจะได้กราฟ RTD และข้อมูลดังภาพที่ 3.14

$$Tau = \frac{V}{Q} \quad (10)$$

เมื่อ V = ปริมาตร (litre)
 Q = อัตราการไหล (litre/s)



ภาพที่ 3.13 หน้าจอของโปรแกรม DTS ที่ใช้ในการคำนวณค่า RTD



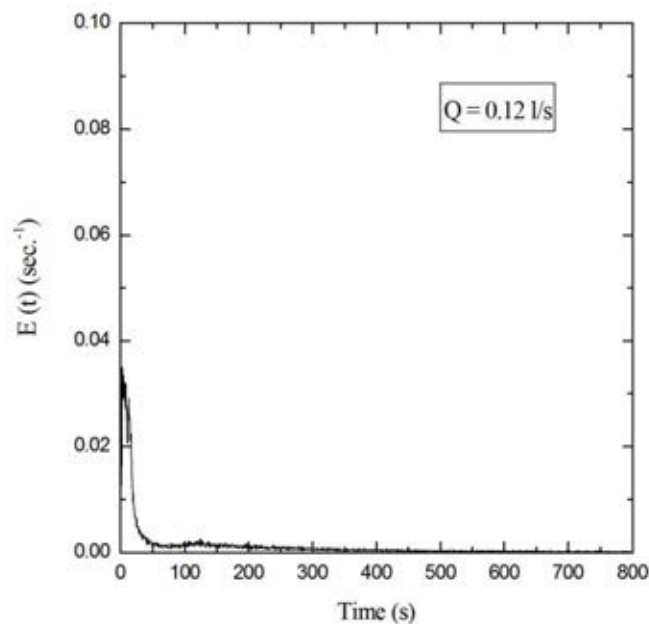
ภาพที่ 3.14 หน้าจอแสดงผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม DTS

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดลองใช้ Ba-137m ในการหา RTD ในถังพัก

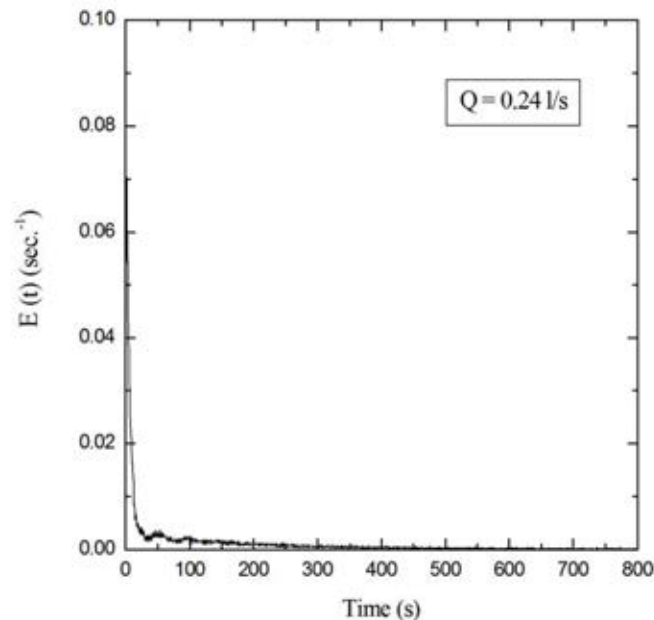
จากการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังพักตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในบทที่ 3 ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขที่ 1 ที่อัตราไหล 0.12 ลิตร/วินาที โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าในตอนเริ่มวัดอัตรานับวัดรังสีจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารละลายกับสารรังสีผสมกันจึงทำให้นับวัดได้สูงจากนั้นจะลดลงเนื่องจากสารละลายกับสารรังสีที่ผสมค่อย ๆ ออกจากระบบ จะลดลงต่ำสุดที่เวลา 50 วินาทีจากนั้นจึงเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่อัตราไหล 0.12 ลิตร/วินาที

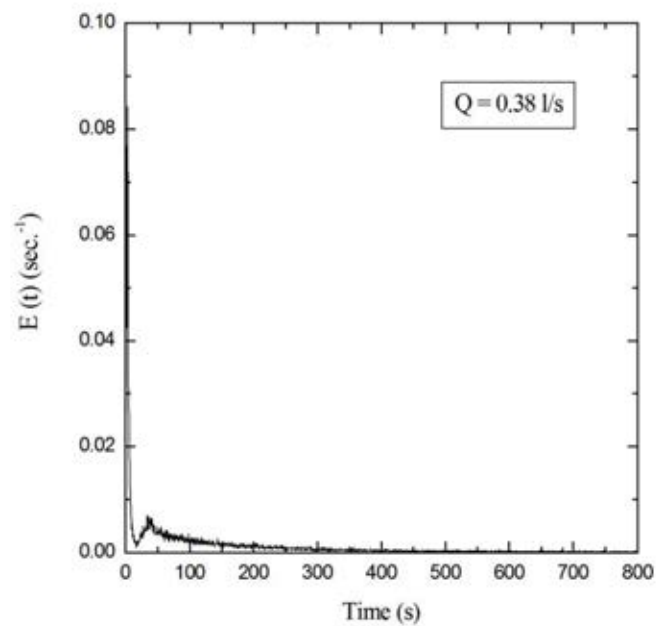
สำหรับการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังพักตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.1 เงื่อนไขที่ 2 อัตราไหล 0.24 ลิตร/วินาที โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าในตอนเริ่มวัดอัตรานับวัดรังสีจะเพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตรานับวัดรังสีของอัตรา

ไหล 0.04 ลิตร/วินาที และลดลงต่ำสุดที่เวลาต่ำกว่า 50 วินาที เล็กน้อยจากนั้นจึงเพิ่มสูงขึ้นที่เวลาประมาณ 50 วินาทีแล้วจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่อัตราไหล 0.24 ลิตร/วินาที

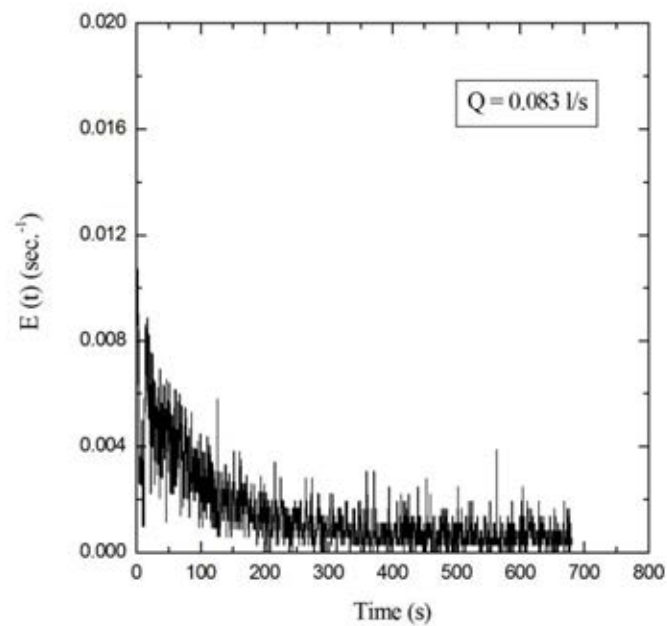
สำหรับการทดลองนิตสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังพักตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.1 เงื่อนไขที่ 3 อัตราไหล 0.38 ลิตร/วินาที โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าในตอนเริ่มวัดอัตรานับวัดรังสีจะเพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตรานับวัดรังสีของอัตราไหล 0.24 ลิตร/วินาทีและลดลงต่ำที่เวลาต่ำกว่า 25 วินาที เล็กน้อยจากนั้นจึงเพิ่มขึ้นที่เวลาเกือบ 50 วินาทีแล้วจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่อัตราไหล 0.38 ลิตร/วินาที

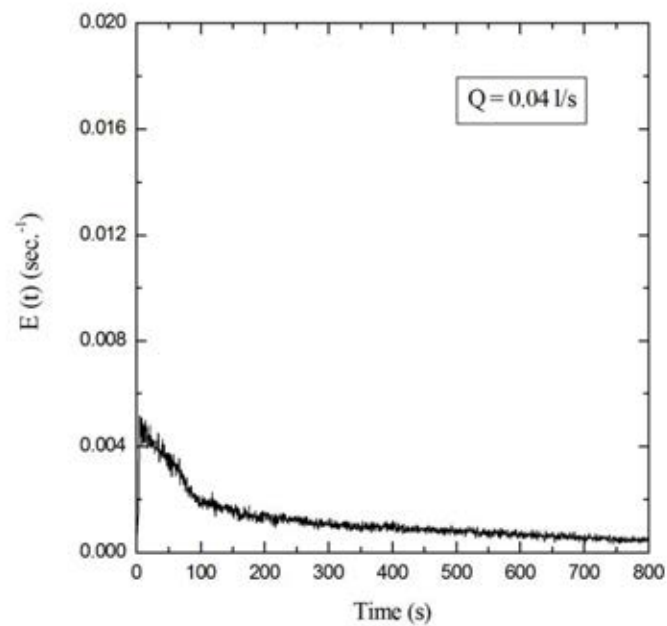
4.2 ผลการทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m และ Tc-99m เพื่อหาค่า RTD ในถังกวน ชนิดที่ ติดตัวกีดกัน (4-baffle tank) ใช้ใบกวนชนิด Propeller

จากการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังกวนตามเงื่อนไขการทดลอง ตามที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.2 เงื่อนไขที่ 1 อัตราไหล 0.083 ลิตร/วินาที โดยผลการทดลองแสดง ในภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าในตอนเริ่มวัดอัตรานับวัดรังสีจะเพิ่มขึ้นและจะลดลงต่ำลงที่เวลา 200 วินาที แล้วจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง



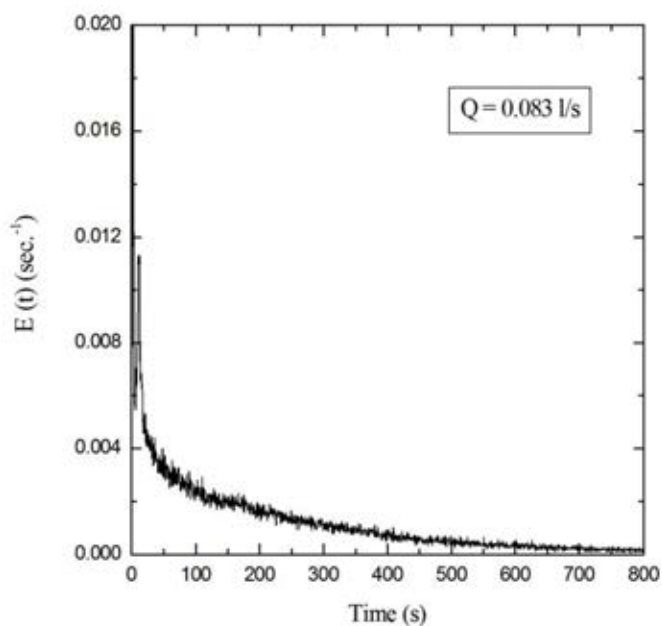
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่อัตราไหล 0.083 ลิตร/วินาที

สำหรับทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Tc-99m เข้าไปในถังกวนตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.2 เงื่อนไขที่ 2 อัตราไหล 0.04 ลิตร/วินาที โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าในตอนเริ่มวัดอัตรานับวัดรังสีจะเพิ่มขึ้นและจะลดลงต่ำลงที่เวลา 100 วินาที แล้วจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่อัตราไหล 0.04 ลิตร/วินาที

สำหรับทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Tc-99m เข้าไปในถังกวนตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.2 เงื่อนไขที่ 3 อัตราไหล 0.083 ลิตร/วินาที โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าในตอนเริ่มวัดอัตรานับวัดรังสีจะเพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตรานับวัดรังสีของอัตราไหล 0.04 ลิตร/วินาทีและจะลดลงต่ำลงที่เวลา 25 วินาที แล้วจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง

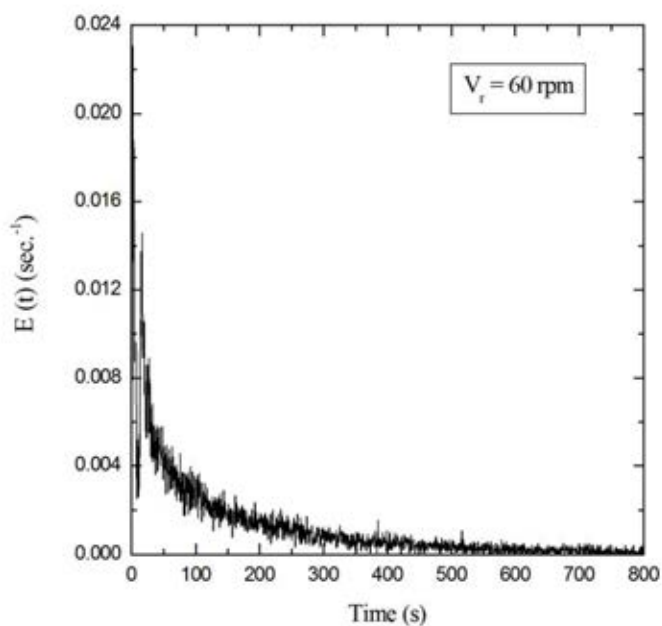


ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่อัตราไหล 0.083 ลิตร/วินาที

4.3 ผลการทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m เพื่อหาค่า RTD ในถังกวนชนิดที่ติดตั้งกีดกัน (4-baffle tank) ใช้ใบกวนชนิด Propeller และ Paddies

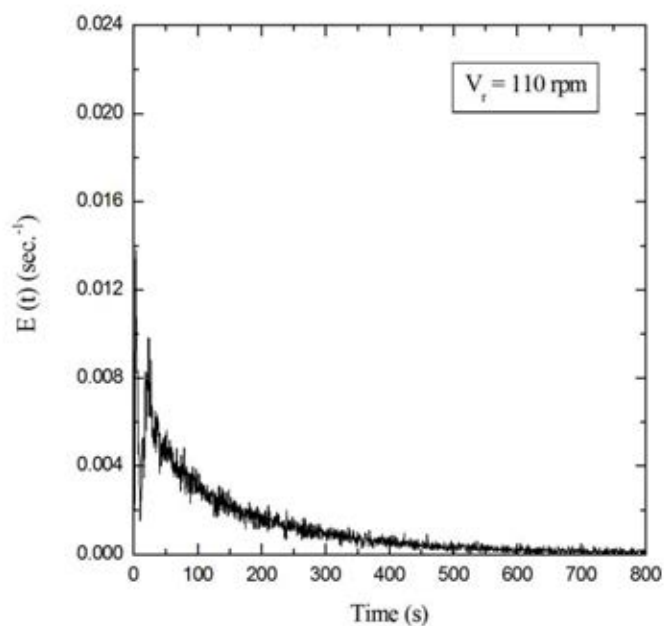
4.3.1 ใบกวนชนิด Paddies

จากการทดลองใช้สารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังกวนตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.3 เงื่อนไขที่ 1 ความเร็วรอบใบกวน 60 rpm โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 0 ถึง 25 วินาทีจะมีความแปรปรวนสูงในตอนเริ่มและอัตราการนับจะเพิ่มขึ้นสูงแล้วจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง



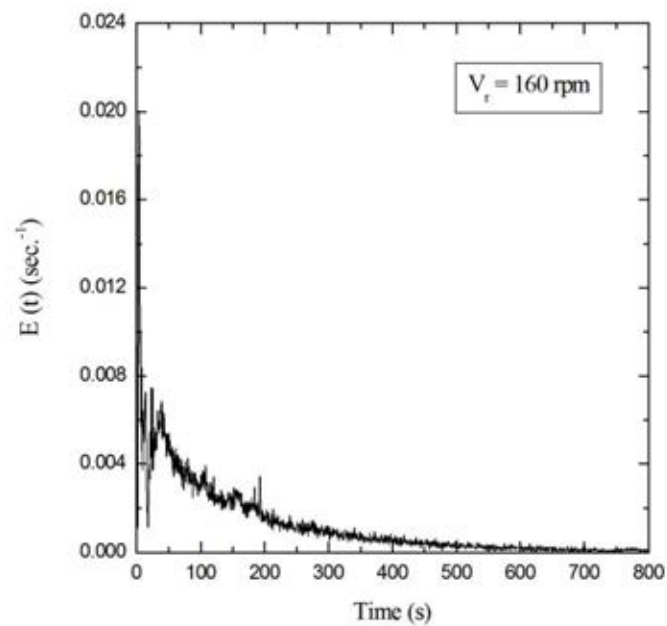
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาโดยใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่ความเร็วรอบ 60 rpm

สำหรับการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังกวนตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.3 เงื่อนไขที่ 2 ความเร็วรอบใบกวน 110 rpm โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 0 ถึง 40 วินาทีที่มีความแปรปรวนสูงในตอนเริ่มและอัตราการนับจะเพิ่มขึ้นสูงแต่ต่ำกว่าความเร็วรอบใบกวน 60 rpm แล้วจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาโดยใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่ความเร็วรอบ 110 rpm

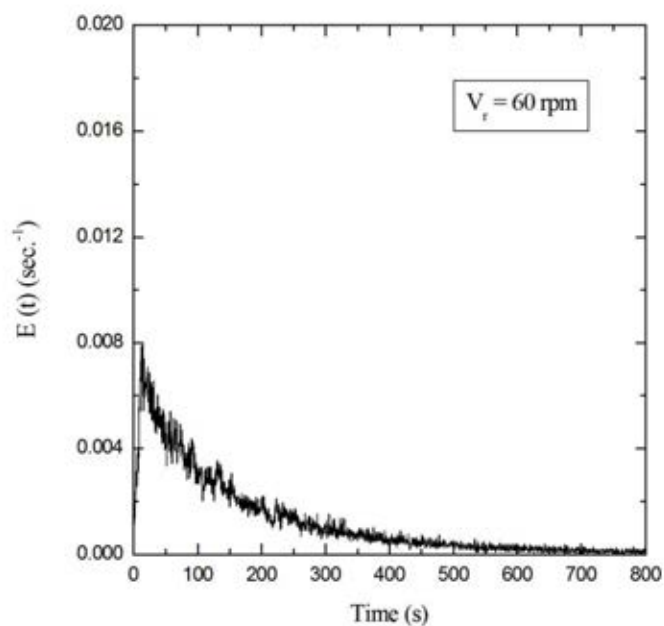
สำหรับการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังกวนตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.3 เงื่อนไขที่ 3 ความเร็วรอบใบกวน 160 rpm โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาทีที่มีความแปรปรวนสูงในตอนเริ่มและอัตราการนับจะเพิ่มขึ้นสูงแต่ต่ำกว่าความเร็วรอบใบกวน 110 rpm แล้วจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาโดยใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่ความเร็วรอบ 160 rpm

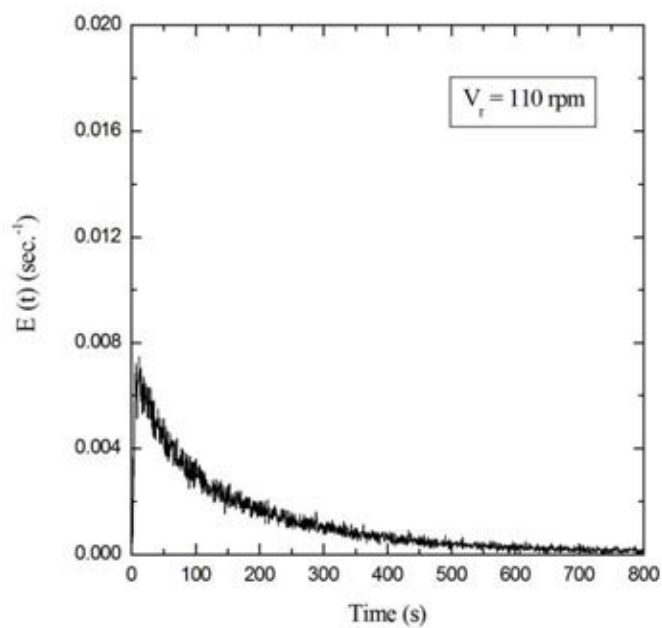
4.3.2 ใบกวนชนิด Paddies

จากการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังกวนตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.3 เงื่อนไขที่ 4 ความเร็วรอบใบกวน 60 rpm โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 0 ถึง 25 วินาทีจะมีอัตราการนับเพิ่มขึ้นสูงอย่างต่อเนื่องแล้วจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง



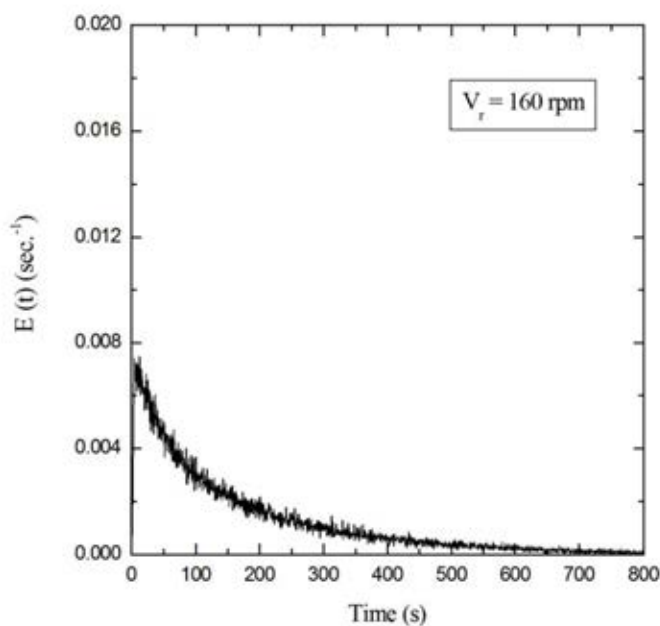
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาโดยใช้ใบกวนชนิด Paddies ที่ความเร็วรอบ 60 rpm

สำหรับการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังกวนตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.3 เงื่อนไขที่ 5 ความเร็วรอบใบกวน 110 rpm โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 0 ถึง 10 วินาทีจะมีอัตราการนับเพิ่มขึ้นสูงอย่างต่อเนื่องแล้วจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาโดยใช้ใบกวนชนิด Paddies ที่ความเร็วรอบ 110 rpm

สำหรับการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังกวนตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.3 เงื่อนไขที่ 6 ความเร็วรอบใบกวน 160 rpm โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าจะมีอัตราการนับเพิ่มขึ้นสูงเนื่องแล้วจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง

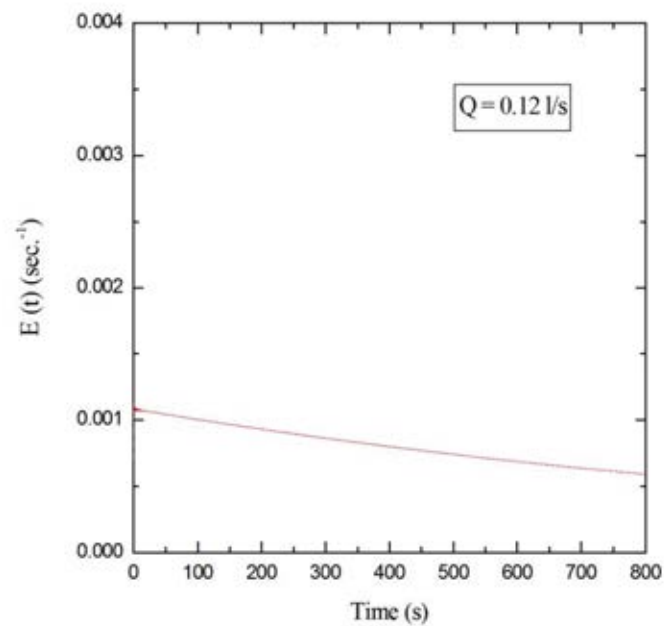


ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาโดยใช้ใบกวนชนิด Paddies ที่ความเร็วรอบ 160 rpm

4.4 การหา RTD จากโปรแกรม

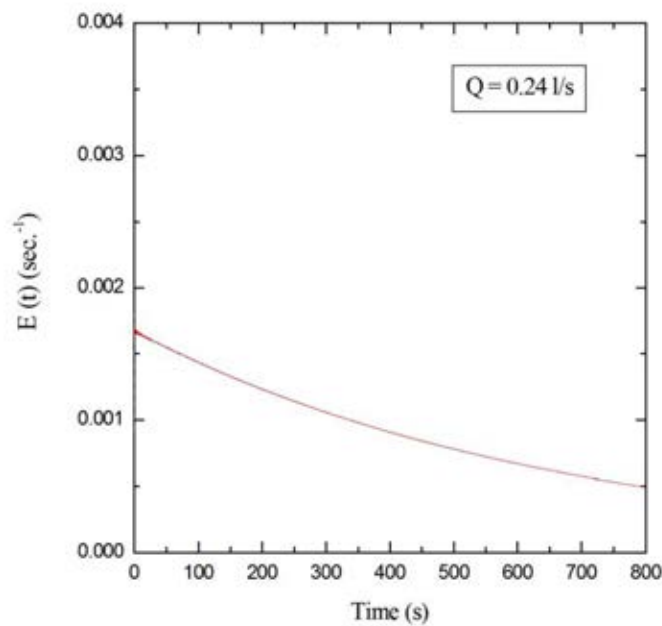
4.4.1 ผลการทดลองหา RTD จากโปรแกรม DTS ในถังกวนที่อัตราการไหล 0.12 0.24 และ 0.38 ลิตร/วินาที

การทดลองหา RTD จากโปรแกรม DTS ในถังกวนที่อัตราการไหล 0.12 ลิตร/วินาที โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าที่เวลา 0 วินาทีจะมีการผสมตามอุดมคติทำให้กราฟสูงขึ้นในแนวตั้งโดยสูงกว่า $0.001 \text{ (sec}^{-1}\text{)}$ แล้วจึงลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งที่เวลา 800 วินาที จะเหลือความสูงสูงกว่า $0.0005 \text{ (sec}^{-1}\text{)}$ เล็กน้อย



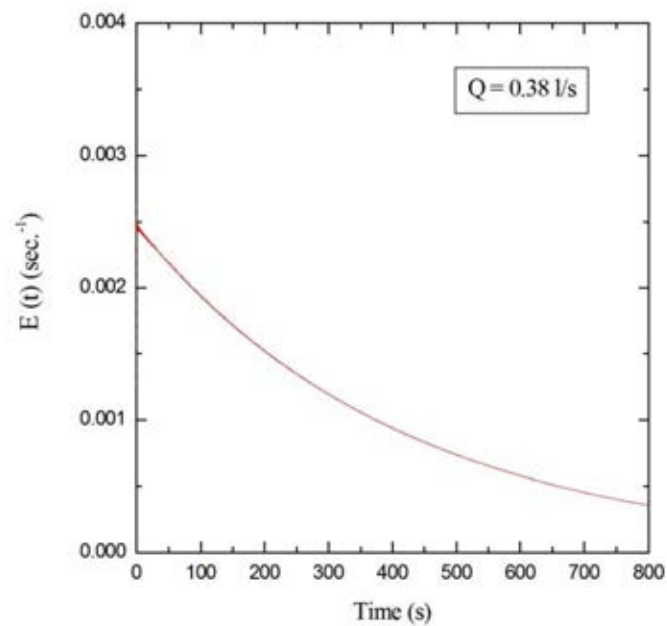
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่คำนวณได้จากโปรแกรม DTS ที่อัตราการไหล 0.12 ลิตร/วินาที

สำหรับการทดลองหา RTD จากโปรแกรม DTS ถึงกวนที่อัตราการไหล 0.24 ลิตร/วินาที โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าที่เวลา 0 วินาทีจะมีการผสมตามอุดมคติทำให้กราฟสูงขึ้นในแนวตั้งโดยสูงกว่า 0.0015 (sec.⁻¹) ซึ่งสูงกว่าอัตราการไหล 0.12 ลิตร/วินาที แล้วจึงลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งที่เวลา 800 วินาที จะเหลือความสูง 0.0005 (sec.⁻¹) ซึ่งต่ำกว่าอัตราการไหล 0.12 ลิตร/วินาที



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่คำนวณได้จากโปรแกรม DTS ที่อัตราไหล 0.24 ลิตร/วินาที

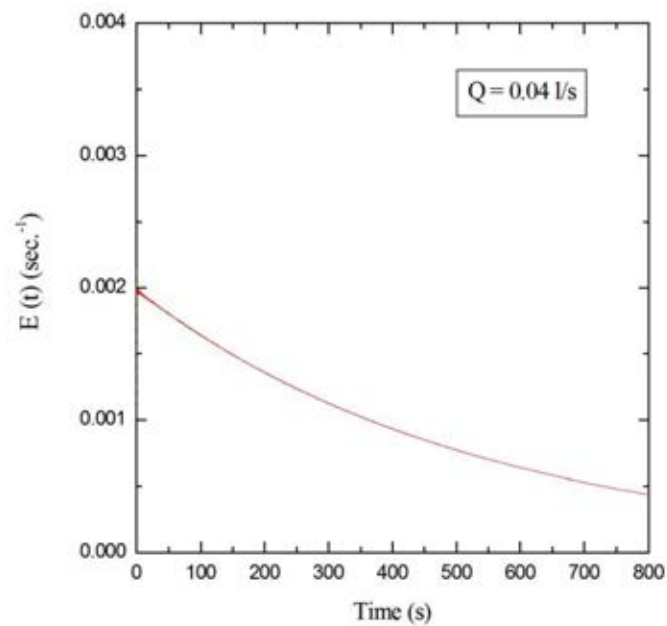
สำหรับการทดลองหา RTD จากโปรแกรม DTS ถึงเวลาที่อัตราการไหล 0.38 ลิตร/วินาที โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าที่เวลา 0 วินาทีจะมีการผสมตามอุดมคติทำให้กราฟสูงขึ้นในแนวตั้งโดยสูงกว่า 0.0025 (sec⁻¹) ซึ่งสูงกว่าอัตราการไหล 0.24 ลิตร/วินาที แล้วจึงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งที่เวลา 800 วินาที จะเหลือความสูงต่ำกว่า 0.0005 (sec⁻¹) ซึ่งต่ำกว่าอัตราการไหล 0.24 ลิตร/วินาที



ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่คำนวณได้จากโปรแกรม DTS ที่อัตราการไหล 0.38 ลิตร/วินาที

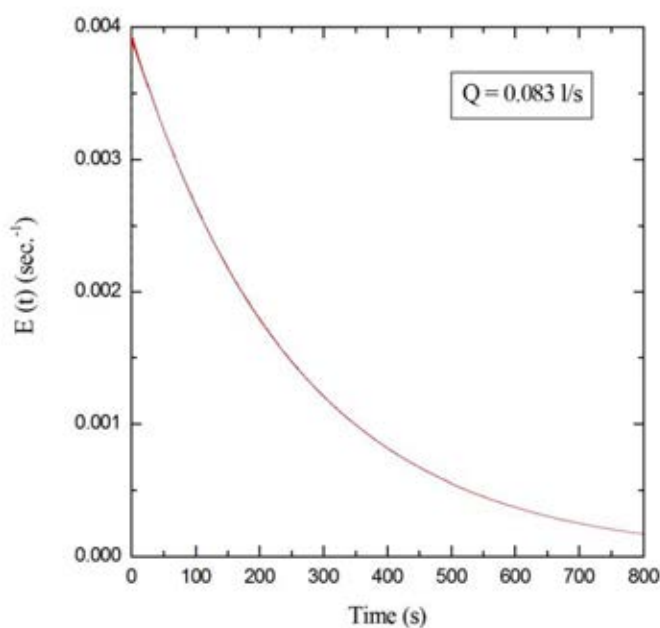
4.4.2 ผลการทดลองหา RTD จากโปรแกรม DTS ถึงเวลาที่อัตราการไหล 0.04 และ 0.083 ลิตร/วินาที

การทดลองหา RTD จากโปรแกรม DTS ถึงเวลาที่อัตราการไหล 0.04 ลิตร/วินาที โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าที่เวลา 0 วินาทีจะมีการผสมตามอุดมคติทำให้กราฟสูงขึ้นในแนวตั้งโดยสูง 0.002 (sec.⁻¹) แล้วจึงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งที่เวลา 800 วินาที จะเหลือความสูงต่ำกว่า 0.0005 (sec.⁻¹) เล็กน้อย



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่คำนวณได้จากโปรแกรม DTS ที่อัตราการไหล 0.04 ลิตร/วินาที

สำหรับการทดลองหา RTD จากโปรแกรม DTS ถึงกวนที่อัตราการไหล 0.083 ลิตร/วินาที โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าที่เวลา 0 วินาทีจะมีการผสมตามอุดมคติทำให้กราฟสูงขึ้นในแนวตั้งโดยสูงกว่า 0.004 (sec⁻¹) ซึ่งสูงกว่าอัตราการไหล 0.04 ลิตร/วินาที แล้วจึงลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งที่เวลา 800 วินาที จะเหลือความสูงต่ำกว่า 0.00025 (sec⁻¹) ซึ่งต่ำกว่าอัตราการไหล 0.04 ลิตร/วินาที

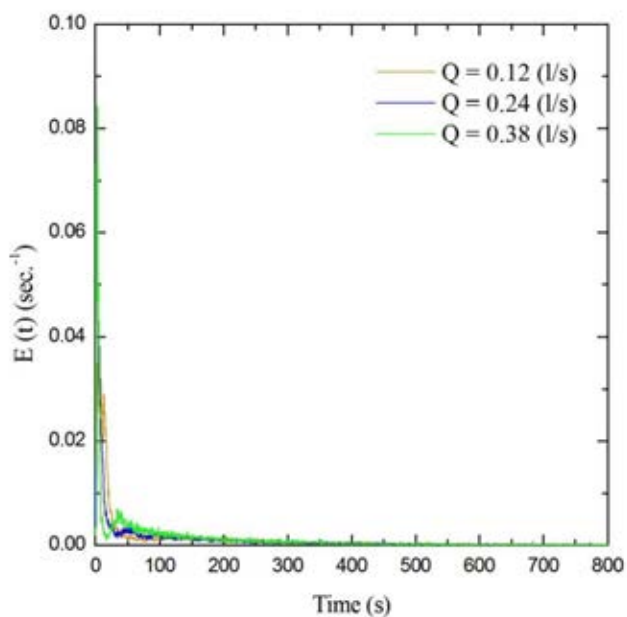


ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่คำนวณได้จากโปรแกรม DTS ที่อัตราการไหล 0.83 ลิตร/วินาที

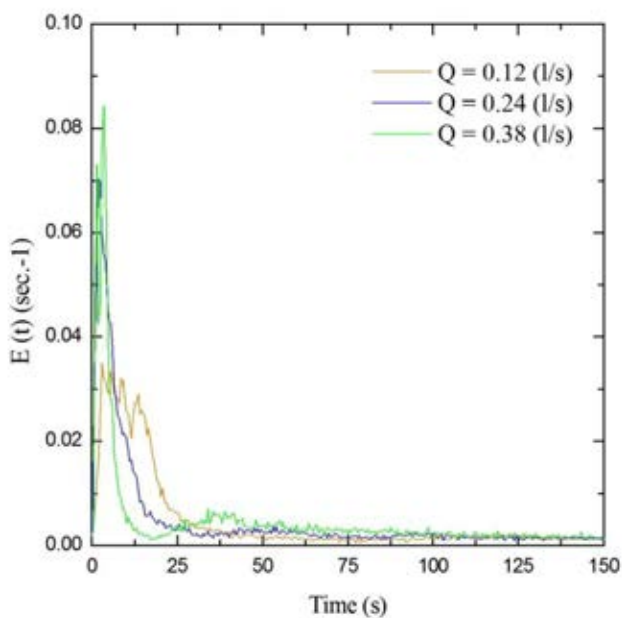
4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.5.1 ผลกระทบของอัตราการไหลที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลา

สำหรับการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังพัก ตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.3.1 ตารางที่ 3.1 เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลา เงื่อนไขที่ 1, 2 และ 3 ที่อัตราการไหล 0.12, 0.24 และ 0.38 ลิตร/วินาที ดังภาพที่ 4.18 เมื่อทำการขยายดังภาพที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าในตอนเริ่มวัดอัตรานับรังสีจะเพิ่มขึ้นโดยที่อัตราการไหลเร็วที่ 0.38 ลิตร/วินาทีกราฟก็จะสูงแต่เมื่ออัตราการไหลช้าลงความสูงของกราฟก็จะลดลงตามอัตราการไหลช้าลงด้วย จากนั้นกราฟจึงลดลงและที่อัตราการไหลเร็วกราฟก็จะลดลงที่เวลาที่สั้นกว่าอัตราการไหลช้า แสดงให้เห็นว่าที่อัตราการไหลเร็วสารละลายกับสารรังสีผสมกันได้ดีแล้วออกไปจากถังได้เร็วกว่าจึงสามารถวัดอัตรานับรังสีได้มากในเวลาที่สั้นกว่า อัตราการไหลช้าที่สามารถวัดอัตรานับรังสีได้น้อยและใช้เวลานานกว่า อัตราการไหลเร็วสามารถผสมได้ดีกว่าเนื่องจากการปั่นป่วนที่มากกว่าจึงทำให้สารละลายกับสารรังสีผสมกันดีกว่า



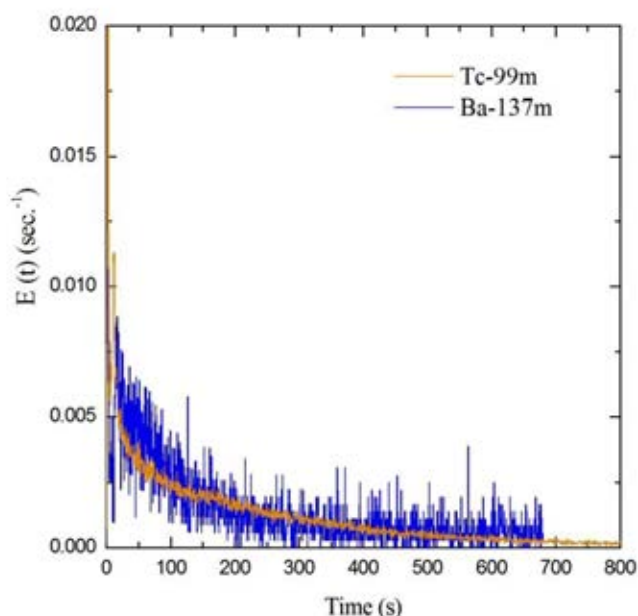
ภาพที่ 4.18 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลา ที่อัตราการไหล 0.12, 0.24 และ 0.38 ลิตร/วินาที



ภาพที่ 4.19 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลา ที่อัตราการไหล 0.12, 0.24 และ 0.38 ลิตร/วินาทีขยาย

4.5.2 ผลกระทบการใช้สารรังสีติดตามต่างชนิดกัน

สำหรับการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m และ Tc-99m เข้าไปในถังกวนที่ใช้ใบกวนชนิด Propeller ตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.3.2 ตารางที่ 3.2 เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาเฉื่อยที่ 1 กับ 3 ที่อัตราการไหล 0.083 ลิตร/วินาที โดยในการทดลองที่มีการใช้สารรังสีติดตามต่างชนิดกันแสดงดังภาพที่ 4.20 จากกราฟแนวโน้มของกราฟมีลักษณะไม่แตกต่างกันแต่สารรังสีติดตาม Ba-137m จะมีความแปรปรวนมากกว่าสารรังสีติดตาม Tc-99m เนื่องจากมีจำนวนนับรังสีต่ำกว่า Tc-99m มาก ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจึงสูง

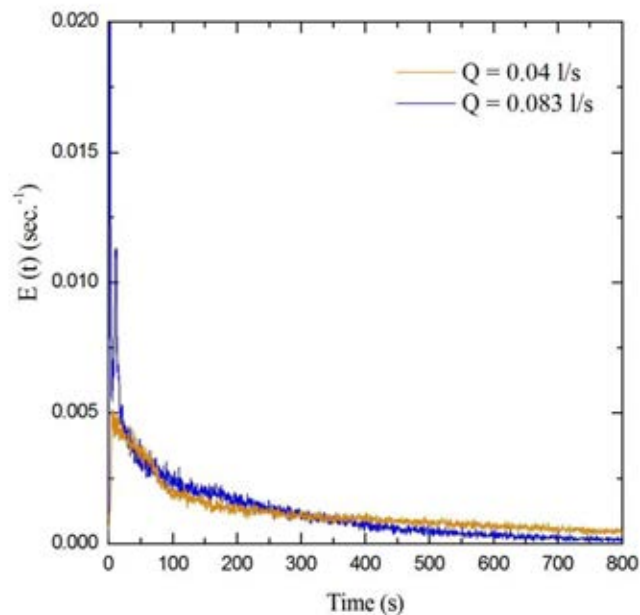


ภาพที่ 4.20 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลา ในการทดลองที่มีการใช้สารรังสีติดตามต่างชนิดกัน

4.5.3 ผลกระทบของอัตราการการไหลที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลา

สำหรับการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Tc-99m เข้าไปในถังกวนที่ใช้ใบกวนชนิด Propeller ตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.3.2 ตารางที่ 3.2 เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาเฉื่อยที่ 2 กับ 3 ที่อัตราการไหล 0.04 และ 0.083 ลิตร/วินาที แสดงดังภาพที่ 4.21 ที่ 0 ถึง 25 วินาที อัตราการไหล 0.083 ลิตร/วินาทีกราฟก็จะสูงกว่าอัตรา

การไหล 0.04 ลิตร/วินาที เนื่องจากสารละลายกับสารรังสีผสมกันได้ดีกว่า เมื่อเวลาผ่านไป อัตราการไหล 0.083 ลิตร/วินาที กราฟจะลดลงต่ำกว่าที่อัตราการไหล 0.04 ลิตร/วินาที เนื่องจากอัตราการไหลเร็วผสมกันแล้วออกไปจากถังกวนได้เร็วกว่าอัตราการไหลช้า

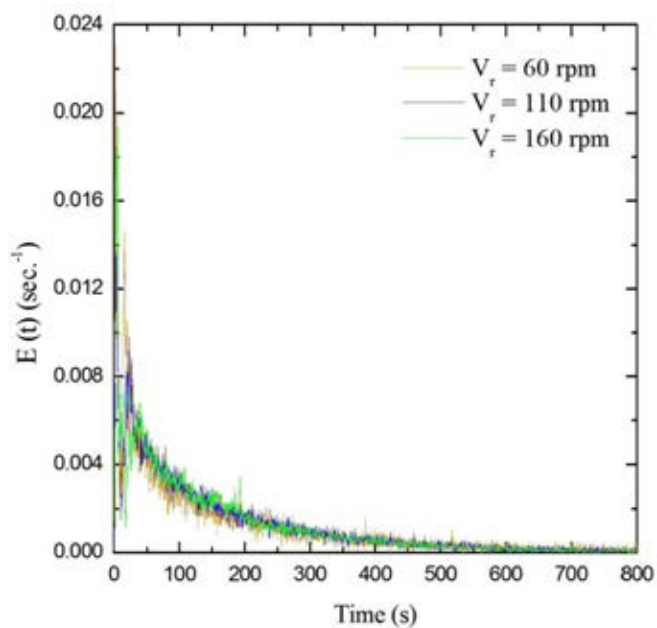


ภาพที่ 4.21 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลา ที่อัตราการไหล 0.04 และ 0.083 ลิตร/วินาที

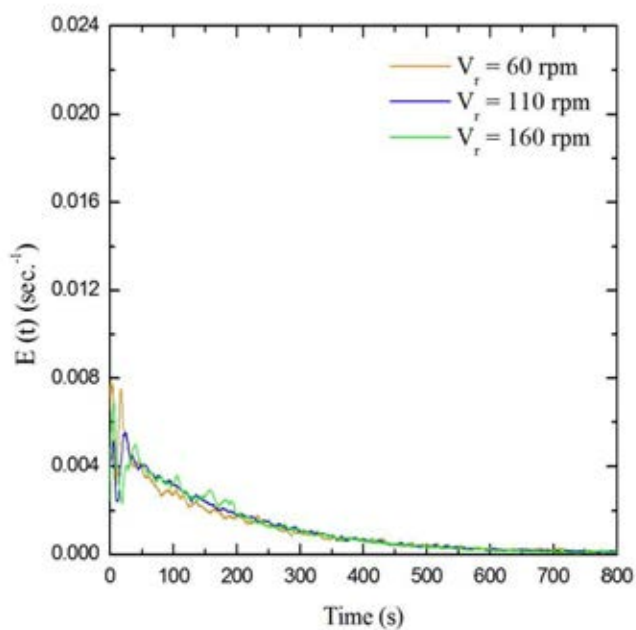
4.5.4 ผลการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m ในถังกวนชนิดที่ติดตั้งกีดกัน (4-baffle tank) ใช้ใบกวนชนิด Propeller และ Paddies ในห้องปฏิบัติการ

4.5.4.1 การเปรียบเทียบใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่ความเร็วรอบ (rpm) ต่างกัน

สำหรับการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังกวนที่ใช้ใบกวนชนิด Propeller ตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้บทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.3.4 ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขที่ 1, 2 และ 3 ที่ความเร็วรอบ 60, 110 และ 160 rpm โดยการแสดงในภาพที่ 4.22 และเมื่อทำการปรับเส้นโค้งให้เรียบด้วยเทคนิค moving average เพื่อให้เห็นความแตกต่างได้ชัดเจนแสดงในภาพที่ 4.23 จากผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นว่า ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาที กราฟมีการกวัดแกว่งทั้งความเร็วรอบ 60, 110 และ 160 rpm แล้วจึงมีการลดลงใกล้เคียงกันทุกเงื่อนไขความเร็วรอบมีการลดลงใกล้เคียง



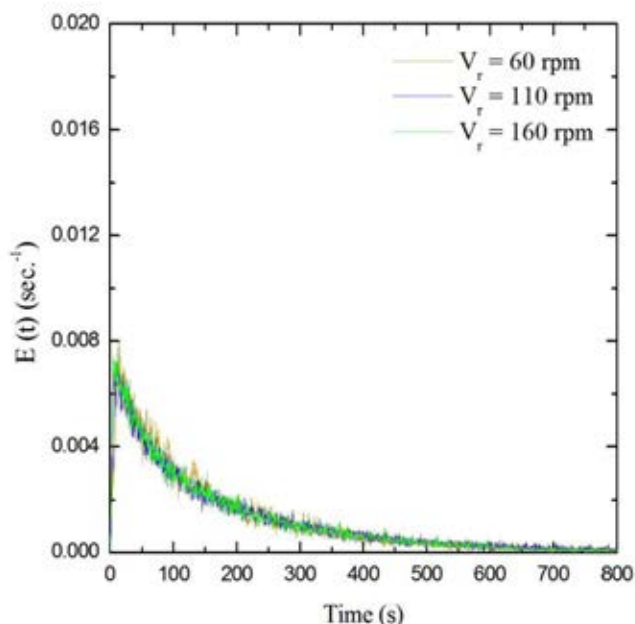
ภาพที่ 4.22 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลาที่ความเร็วรอบรอบต่างของใบกวนชนิด Propeller



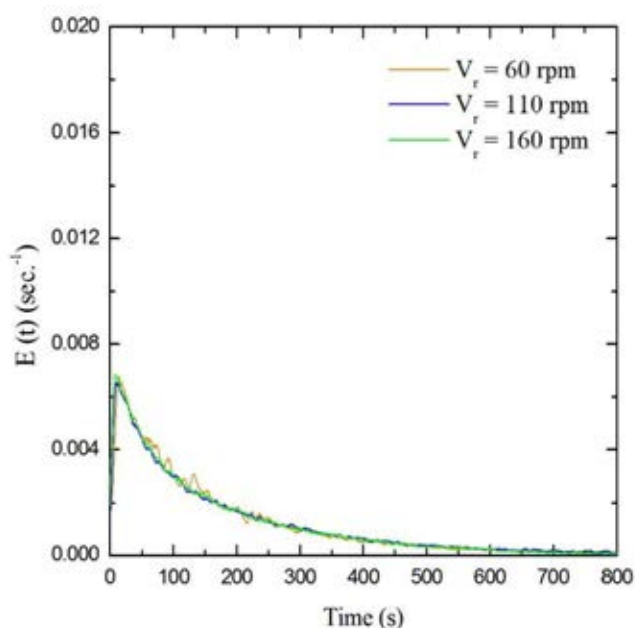
ภาพที่ 4.23 การเปรียบเทียบใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่rpmต่างกันเทียบกับกันเมื่อทำการปรับเส้นโค้งให้เรียบด้วยเทคนิค moving average

4.5.4.2 การเปรียบเทียบใช้ใบกวนชนิด Paddies ที่ความเร็วรอบ (rpm) ต่างกัน

สำหรับการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังกวนที่ใช้ใบกวนชนิด Paddies ตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้บทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.3.4 ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขที่ 4, 5 และ 6 ที่ความเร็วรอบ 60, 110 และ 160 rpm โดยการแสดงในภาพที่ 4.24 และเมื่อทำการปรับเส้นโค้งให้เรียบด้วยเทคนิค moving average เพื่อให้เห็นความแตกต่างได้ชัดเจนแสดงในภาพที่ 4.25 จากผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นว่าที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ของใบกวนชนิด Paddies ซึ่งเห็นได้จากกราฟที่เงื่อนไขการทดลองที่ความเร็วรอบต่างกันมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการนับรังสีในช่วงแรกและลดลงในช่วงถัดมาที่ใกล้เคียงกันทุกเงื่อนไขความเร็วรอบมีการลดลงใกล้เคียง



ภาพที่ 4.24 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง RTD และเวลา ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ของใบกวนชนิด Paddies

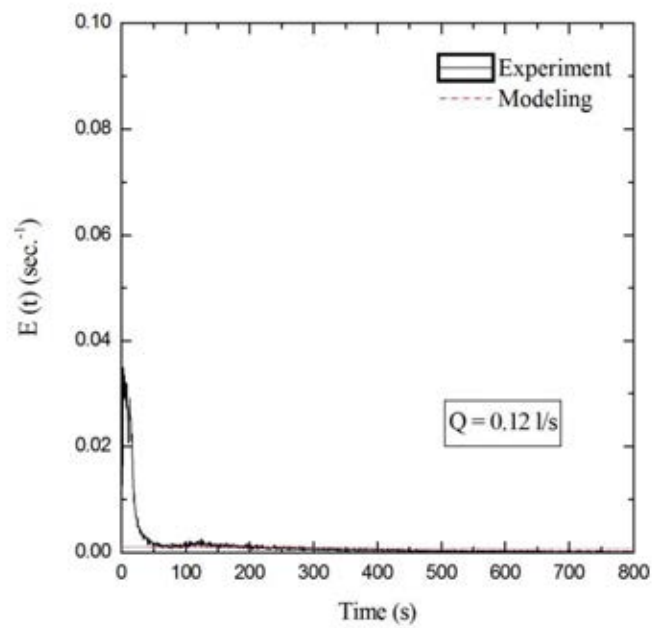


ภาพที่ 4.25 การเปรียบเทียบใช้ใบกวนชนิด Paddies ที่rpmต่างกันเทียบกันเมื่อทำการปรับเส้นโค้งให้เรียบด้วยเทคนิค moving average

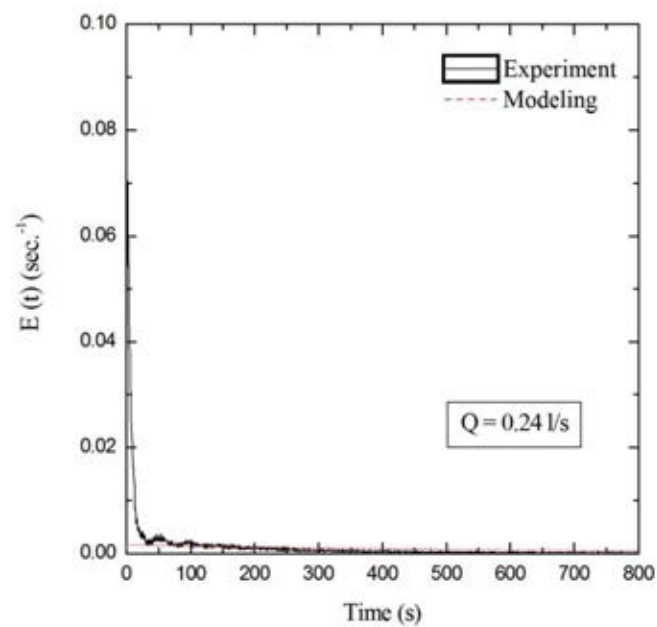
4.5.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม DTS

4.5.5.1 ผลการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m ถึงพักในห้องปฏิบัติการ

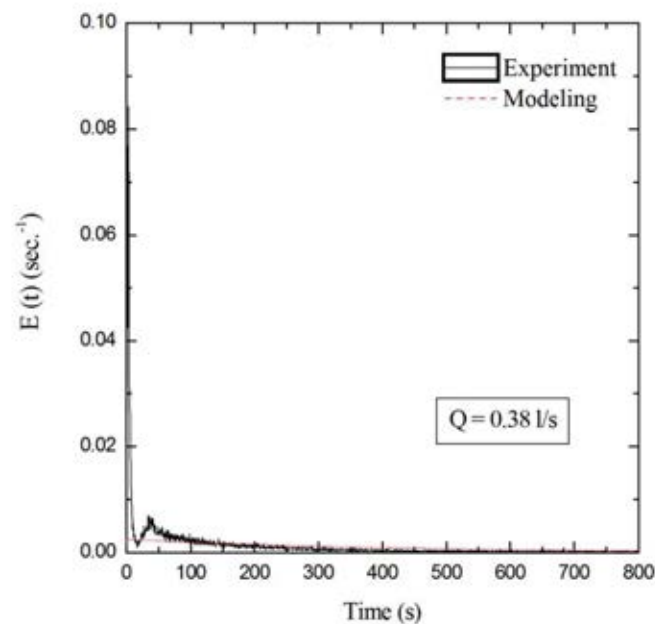
สำหรับการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังพัก ตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.3.1 ตารางที่ 3.1 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม DTS ที่อัตราการไหล 0.12, 0.24 และ 0.38 ลิตร/วินาที ดังภาพที่ 4.26, 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม DTS แสดงให้เห็นว่าทั้งสามอัตราการไหลในช่วงแรกจะกวัดแกว่งเกิดจากการผสมกันไม่ดี ตั้งแต่เวลา 50 วินาทีเป็นต้นไป จึงใกล้เคียงกับโปรแกรม DTS เนื่องจากการผสมในถังพักซึ่งเกิดจากการหมุนเวียนของของไหลในถังพักที่อัตราการไหล 0.12 ถึง 0.38 ลิตร/วินาที นี้อาจจะไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหลซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการผสม



ภาพที่ 4.26 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ ที่อัตราไหล 0.12 ลิตร/วินาที



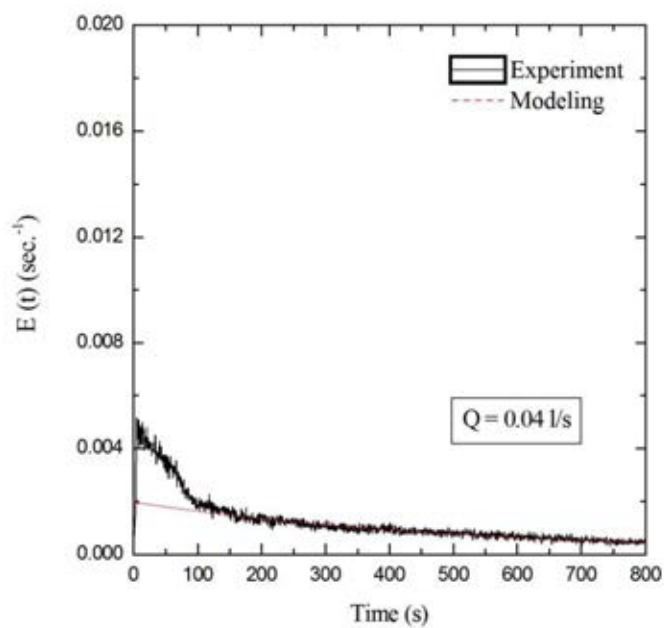
ภาพที่ 4.27 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ ที่อัตราไหล 0.24 ลิตร/วินาที



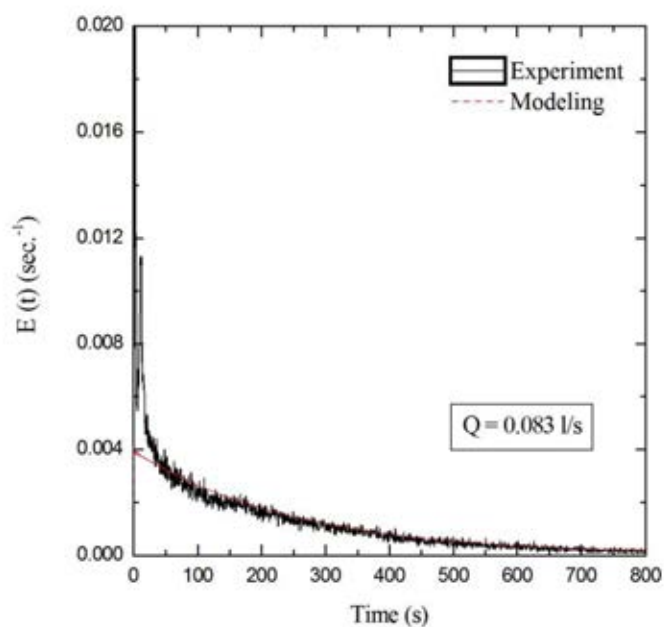
ภาพที่ 4.28 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ ที่อัตราการไหล 0.38 ลิตร/วินาที

4.5.5.2 ผลการทดลองสารรังสีติดตาม Ba-137m และ Tc-99 ที่อัตราการไหลคงที่ 0.04 และ 0.083 ลิตร/วินาที

สำหรับการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Tc-99m เข้าไปในถังพัก ตามเงื่อนไขการทดลอง ตามที่ได้ระบุไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.3.2 ตารางที่ 3.2 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม DTS ที่อัตราการไหล 0.04 และ 0.083 ลิตร/วินาที แสดงดังภาพที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม DTS แสดงให้เห็นว่า ในช่วงแรกทั้งสองอัตราการไหลจะสูงกว่าผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม DTS แต่ที่อัตราการ 0.083 ลิตร/วินาที จะลงกลับมาใกล้เคียงกับโปรแกรม DTS ที่เวลา 50 วินาทีแต่อัตราการไหล 0.04 ลิตร/วินาทีจะลงกลับมาใกล้เคียงกับโปรแกรม DTS ที่เวลา 100 วินาที อัตราการไหลมีผลต่อการผสมอัตราการไหล 0.083 ลิตร/วินาทีจะผสมได้ดีกว่าอัตราการไหล 0.04 ลิตร/วินาทีเมื่อเทียบกับ โปรแกรม DTS



ภาพที่ 4.29 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่อัตราการไหล 0.04 ลิตร/วินาที

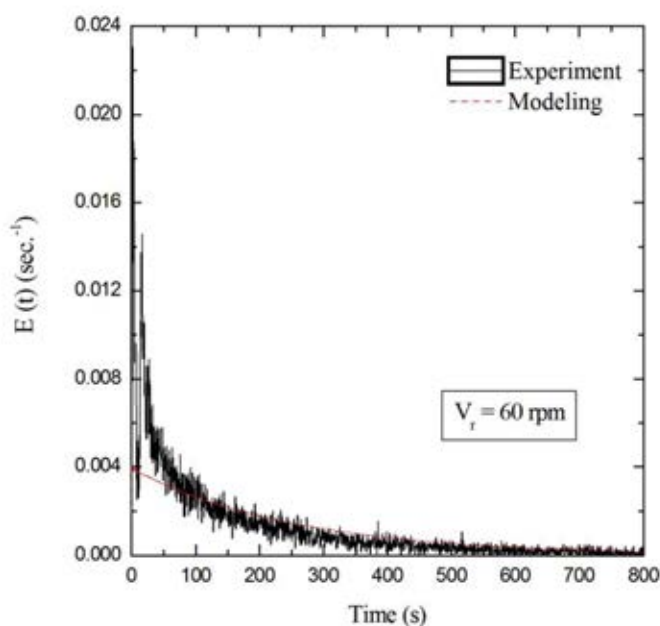


ภาพที่ 4.30 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่อัตราการไหล 0.083 ลิตร/วินาที

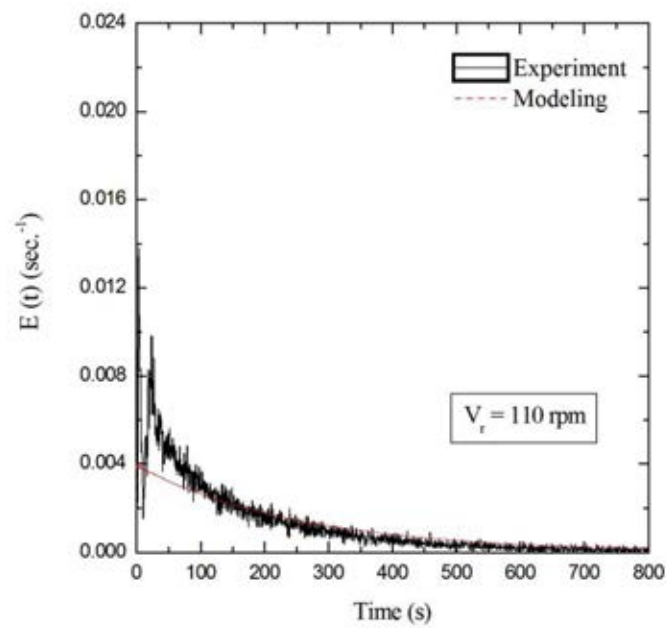
4.5.5.3 ผลการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m ในถังกวนชนิดที่ติดตั้งตัวกีดกัน (4baffle tank) ใช้ใบกวนชนิด Propeller และ Paddies ในห้องปฏิบัติการโดยสนใจความเร็วรอบใบกวน

- ใบกวนชนิด Propeller

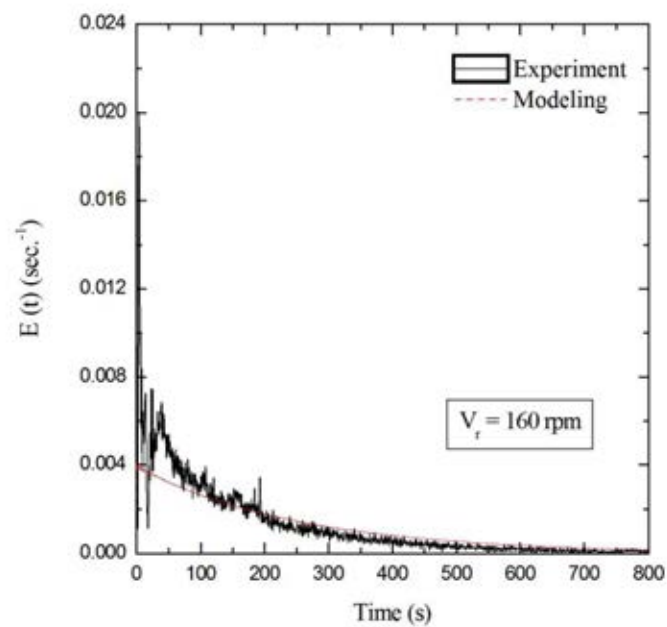
สำหรับการทดลองฉีดสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังกวน ตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้ไว้บทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.3.4 ตารางที่ 3.3 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม DTS ที่ที่ความเร็วรอบ 60, 110 และ 160 rpm โดยการทดลองแสดงในภาพที่ 4.31, 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม DTS แสดงให้เห็นว่าทั้งสามความเร็วรอบในช่วงแรกจะกวัดแกว่งเกิดจากการผสมกันไม่ได้ดีจากที่เวลา 100 วินาที จึงใกล้เคียงกับโปรแกรม DTS เนื่องจากการถังใบกวนชนิด Propeller มีการผสมที่ไม่ดีในช่วงแรกเมื่อที่เวลา 100 วินาที จึงผสมดีขึ้น



ภาพที่ 4.31 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณโปรแกรม DTS โดยใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่ความเร็วรอบ 60 rpm



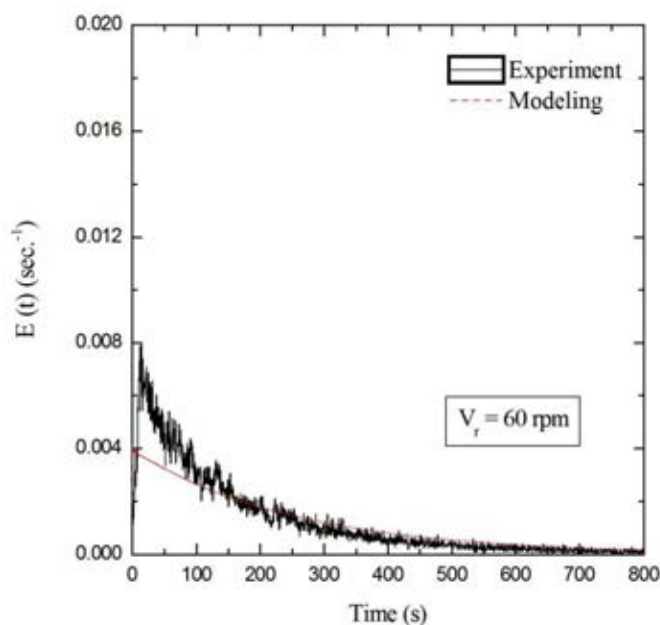
ภาพที่ 4.32 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณโปรแกรม DTS โดยใช้ใบ
กวนชนิด Propeller ที่ความเร็วรอบ 110 rpm



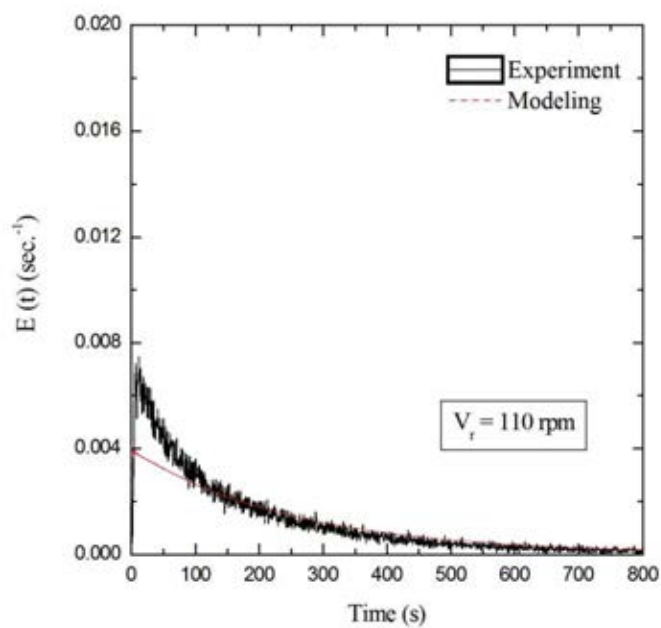
ภาพที่ 4.33 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณโปรแกรม DTS โดยใช้ใบ
กวนชนิด Propeller ที่ความเร็วรอบ 160 rpm

- ใบกวนชนิด Paddies

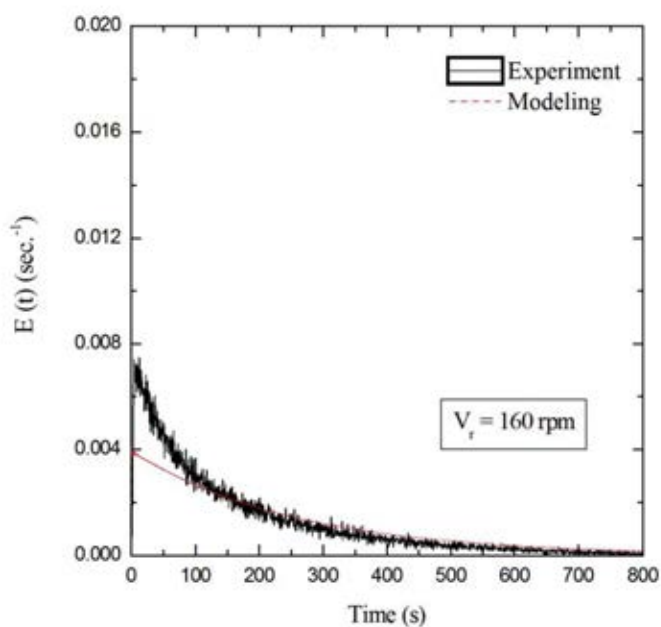
สำหรับการทดลองนี้ดสารรังสีติดตาม Ba-137m เข้าไปในถังพัก ตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้ระบุไว้บทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.3.4 ตารางที่ 3.3 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม DTS ที่ที่ความเร็วรอบ 60, 110 และ 160 rpm โดยการทดลองแสดงในภาพที่ 4.34, 4.35 และ 4.36 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม DTS แสดงให้เห็นว่าทั้งสามความเร็วรอบในช่วงแรกจะสูงกว่าผลจากโปรแกรม DTS เกิดจากการผสมกันได้ไม่ดีจากที่เวลา 100 วินาที จึงใกล้เคียงกับโปรแกรม DTS แสดงให้เห็นว่าใบกวนชนิด Paddies ทั้งสามความเร็วรอบมีการผสมดีไม่ว่าจะเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบก็ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 4.34 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณโปรแกรม DTS โดยใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่ความเร็วรอบ 60 rpm



ภาพที่ 4.35 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ โดยใช้ใบกวนชนิด Paddies ที่ความเร็วรอบ 110 rpm



ภาพที่ 4.36 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ โดยใช้ใบกวนชนิด Paddies ที่ความเร็วรอบ 160 rpm

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ซีเซียม-137/แบเรียม-137m ที่นำมาทดสอบและใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถผลิตแบเรียม-137m ออกมาใช้เป็นสารรังสีติดตามได้สะดวก การชะเอาแบเรียม-137m ออกมาใช้ในเงื่อนไขที่เหมาะสมทำให้ได้ความแรงรังสีสูงมากพอที่จะนำไปใช้ในระบอบใหญ่ ซึ่งจากข้อมูลทางเทคนิคจากผู้ผลิตประสิทธิภาพในการชะสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 50 % แต่ในการวิจัยนี้ไม่ได้ทำการวัดความแรงรังสีที่ชะออกมาเนื่องจากมีความแรงรังสีสูงมากและทางภาควิชาไม่มีสารมาตรฐานซีเซียม-137 ที่เหมาะสมที่จะใช้เปรียบเทียบเนื่องจากแบเรียม-137m ที่ชะออกมาอยู่ในรูปของของเหลว หากจะทำให้แห้งเพื่อวัดเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานซีเซียม-137 ที่เป็นต้นกำเนิดรังสีแบบจาน (disc source) หรือแบบจุด (point source) ก็ไม่สามารถทำได้ทันเวลาเนื่องจากแบเรียม-137m มีครึ่งชีวิตสั้นเพียง 2.55 นาทีเท่านั้น ในการนำไปใช้งานในภาคสนามหรือในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถนำเรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ไปใช้ได้โดยสะดวก ซึ่งจะทำการชะเอาแบเรียม-137m ออกมาใช้ได้ทุก ๆ 6 นาที แต่เมื่อชะออกมาแล้วจะต้องรีบทำการฉีดเข้าไปในระบบก่อนที่ความแรงรังสีจะเหลือต่ำเกินไป และในการตรวจวัดรังสีแกมมาจะต้องมีการแก้ค่าที่เกิดจากการสลายตัวของแบเรียม-137m โดยตลอด อย่างไรก็ตามการที่มีครึ่งชีวิตสั้นย่อมมีข้อดีในแง่ของการทำให้ระบบมีการปนเปื้อนสารกัมมันตรังสีเพียงระยะเวลาสั้น ๆ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่ง นอกจากนี้การที่พลังงานของรังสีแกมมาที่สลายตัวจากแบเรียม-137m ก่อนข้างสูงคือ 662 keV ประสิทธิภาพในการวัดรังสีจึงต่ำกว่ารังสีแกมมาพลังงาน 140 keV จากเทคนิคเซียม-99m ที่นิยมใช้กัน การเลือกใช้หัววัดรังสี NaI(Tl) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือใช้หัววัดรังสีชนิด BGO จะทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการที่รังสีแกมมามีพลังงานสูงก็มีข้อดีในด้านอำนาจการทะลุทะลวงสูง ทำให้ไม่ถูกลดทอนมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อผนังท่อหรือภาชนะโลหะมีความหนา

ระบบวัดรังสีที่ใช้ในการวิจัยนี้มี 2 ระบบคือ ระบบที่ใช้กับหัววัดรังสีแกมมาที่ต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องในโหมด MCS (multichannel scaling mode) โดยใช้หัววัดรังสีเพียงหัวเดียว อันที่จริงแล้วมี summing network ที่สามารถต่อหัววัดรังสีได้ถึง 6 หัววัด โดยค่าที่วัดได้เป็นสัญญาณรวมของทั้ง 6 หัววัด แต่สามารถใช้ดูความเข้มรังสีแต่ละตำแหน่งได้ 6 ตำแหน่งที่เวลาต่างกัน เช่น การวัดความเร็วที่สารรังสีติดตามเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวยาวของท่อ ซึ่ง

สารรังสีติดตามไปถึงตำแหน่งต่างๆ ไม่พร้อมกัน ในการวิจัยนี้ได้ทดลองใช้หัววัดรังสีชนิด BGO แทน NaI(Tl) ด้วย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่าประมาณ 4 เท่าที่พลังงาน 662 keV ของรังสีแกมมาจากแบเรียม-137m หัววัดรังสีชนิด BGO นี้จึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการวัดรังสีแกมมาพลังงานสูงที่ไม่ต้องการความสามารถในการแยกพลังงานดีนักแต่มีประสิทธิภาพสูง การใช้หัววัดรังสีที่มีประสิทธิภาพสูงมีผลดีในแง่สถิติในการนับรังสีที่ดีกว่า และยังสามารถลดความแรงรังสีที่ฉีดเข้าไปในระบบได้ด้วย ซึ่งมีผลดีทั้งในด้านความปลอดภัยและปริมาณรังสีตกค้างในระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้สารรังสีติดตามมีครึ่งชีวิตยาว ระบบวัดรังสีแกมมาหลายตำแหน่งพร้อมกัน ที่นำมาใช้คือ LUDLUM 4612 ซึ่งต่อเข้ากับหัววัดรังสี NaI(Tl) ได้สูงสุดถึง 12 หัววัด โดยได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) หรือ สทท. พร้อมทั้งโปรแกรมแสดงผลเป็นกราฟ 12 เส้นทางจอไมโครคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาโดย สทท. และใช้งานกันแพร่หลายในกลุ่มวิจัยด้านสารรังสีติดตามที่ได้รับการสนับสนุนจาก IAEA แต่ในงานวิจัยนี้ใช้จำนวนหัววัดรังสีสูงสุดเพียง 4 หัววัด เพื่อใช้ในการตรวจวัดสารรังสีติดตามที่ทางเข้า และที่อยู่ในถึง นอกจากนี้ที่ต้องทำการวัดตรงทางออกแล้ว ระบบวัดชุดนี้มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการวัดรังสีในตำแหน่งต่างๆ ได้พร้อมกันถึง 12 ตำแหน่งทั้งในด้านการใช้สารรังสีติดตาม การวัดการกระจายของรังสีหรือสารกัมมันตรังสี และในด้านการควบคุมความปลอดภัยทางรังสี เป็นต้น

สำหรับการทดลองใช้แบเรียม-137m เป็นสารรังสีติดตามโดยการฉีดเข้าไปในถังพักที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน สามารถเห็นความแตกต่างของค่า RTD ที่ได้เปรียบเทียบกับการใช้เทคนิคเซียม-99m พบว่าใช้ได้ผลดีเช่นเดียวกัน แต่เมื่อใช้แบเรียม-137m จะต้องมีการกำบังรังสีให้หัววัดรังสีแต่ละหัวดีพอ ไม่เช่นนั้นค่าที่นับได้จะถูกรบกวนจากรังสีแกมมาที่มาจากตำแหน่งอื่น ๆ ด้วย จนทำให้เกิดความผิดพลาดในการตีความ ในการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบกับถังน้ำที่ไหลตามแรงโน้มถ่วง และระบบผสมของเหลวที่มีใบกวน พบว่าในถังน้ำที่ไหลตามแรงโน้มถ่วงเมื่อปรับให้อัตราไหลออกต่างกันมี RTD ต่างกันชัดเจน ส่วนในถังผสมของเหลวที่มีใบกวนพบว่าเมื่อทดลองฉีดสารรังสีติดตามเทคนิคเซียม-99m เข้าไปในถังกวนที่ใช้ใบกวนชนิด Propeller ที่อัตราการไหล 0.04 และ 0.083 ลิตร/วินาที อัตราการไหลเร็วผสมกันแล้วออกไปจากถังกวนได้เร็วกว่าอัตราการไหลช้า และเมื่อทดลองฉีดสารรังสีติดตามแบเรียม-137m เข้าไปในถังกวนที่ใช้ใบกวนชนิด Propeller และ Paddies ที่ความเร็วรอบ 60, 110 และ 160 rpm เห็นได้ว่าสำหรับใบกวนชนิด Propeller ความเร็วรอบมีผลต่อ RTD ส่วนใบกวนชนิด Paddies ความเร็วรอบไม่มีผลต่อ RTD เนื่องจากที่ความเร็วรอบต่ำสามารถผสมกันได้เต็มที่แล้วเมื่อเพิ่มความเร็วรอบจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อนำผลการทดลองเปรียบกับการคำนวณด้วยโปรแกรม DTS พบว่าในช่วงประมาณ 50 – 100 วินาทีแรก กราฟที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณมีความแตกต่างกัน แต่หลังจากนั้น

ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เป็นเพราะโปรแกรม DTS ได้ถูกออกแบบให้อัดผสมเป็นแบบ excellent mixing จึงแสดงผลเป็นกราฟที่ของเหลวผสมกันดีแล้วจึงไหลออกจากระบบ ส่วนการทดลองแสดงให้เห็นการผสมตามความเป็นจริงมีความแปรปรวนในช่วงแรก ๆ

โดยสรุปการศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำให้สามารถทราบถึงคุณสมบัติเฉพาะของเรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ซีเซียม-137/แบเรียม-137m และเงื่อนไขที่เหมาะสมในส่วนของเวลาที่นำเจเนอเรเตอร์ซีเซียม-137/แบเรียม-137m กลับมาใช้อีกครั้ง ปริมาตรในการชะ และอัตราการไหลของสารละลายในการชะ ที่จะนำไปใช้ในการทำวิจัยหรืออุตสาหกรรมต่อไป

นอกจากนั้นได้ทำการพัฒนาเทคนิคในการประเมินเวลาที่สารอยู่ในระบบ (Residence time distribution, RTD) โดยใช้เทคนิคสารรังสีติดตามที่ได้จากเรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ซีเซียม-137/แบเรียม-137m ในส่วนการเตรียมสารรังสีติดตาม การออกแบบระบบวัด และการแปลงผลข้อมูลข้อที่ได้เป็นค่า RTD

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากประสบการณ์ที่ผู้วิจัยได้รับการวิจัยนี้ ทำให้ทราบว่ายังมีประเด็นที่สามารถพัฒนางานวิจัยลักษณะนี้ให้ดีขึ้นได้ ซึ่งสามารถสรุปหัวข้อที่สำคัญได้ดังนี้

- เนื่องจากแบเรียม-137m มีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารรังสีติดตาม เพราะมีครึ่งชีวิตสั้น จึงควรใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เช่น การหาอัตราการไหล การหาเวลาที่ใช้ในการผสมสาร การตรวจสอบรอยรั่ว การกระจายตัวของสาร เป็นต้น
- เรดิโอนิวไคลด์เจเนอเรเตอร์ซีเซียม-137/แบเรียม-137m มีประโยชน์ในการผลิตแบเรียม-137m สำหรับใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าครึ่งชีวิต โดยไม่ต้องอาศัยไอโซโทปรังสีที่ผลิตจากการอบรังสีนิวตรอน
- ระบบวัดรังสีที่ใช้หัววัดรังสีขนาดใหญ่ ไม่สามารถใช้ในการดูการกระจายในลักษณะเป็นภาพได้ละเอียด หากใช้หัววัดรังสีแบบเรียงแถว (linear detector) จะทำให้สามารถเก็บข้อมูลความเข้มรังสีที่จุดต่าง ๆ ได้พร้อมกันหลายจุดซึ่งขึ้นอยู่กับความละเอียด เช่น 128, 256, 512 และ 1024 จุด จึงทำให้นำมาสร้างเป็นภาพแสดงการกระจายตามความเข้มรังสีได้ และหากมีหัววัดรังสีแบบเรียงแถวหลายชุดก็สามารถวัดรังสีในมุมต่าง ๆ แล้วนำไปสร้างเป็นภาพตัดขวางแบบ emission computed tomography ได้

- การใช้สารรังสีติดตามจากเรดิโอไอโนวไคลด์เจเนอเรเตอร์ชนิดอื่น เช่น Ge-58/Ga-58 ซึ่งให้รังสีแกมมาหลายพลังงาน การเลือกวัดพลังงานที่แตกต่างกันจะทำให้ได้ข้อมูลที่สามารถตีความได้ละเอียดและแม่นยำมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] Li Jinfu, Yang Guogu, and Wang Gang. Development and Evaluation of ^{68}Ge - ^{68}Ga and ^{137}Cs - $^{137\text{m}}\text{Ba}$ Radionuclide Generator for Industrial Tracer Applications, Evaluation and Validation of Radionuclide Generator-based Radiotracers for Industrial Application, Austria: 2011
- [2] Ghiyas Ud, Din Iqbal Hussain Khan, Samar Gul, Riffat Mahmood Qureshi, and Tariq Javed. Liquid phase axial dispersion study of Taylor bubble flow in a horizontal tube using $^{137\text{m}}\text{Ba}$ as radiotracer, Evaluation and Validation of Radionuclide Generator-based Radiotracers for Industrial Application, Austria: 2011
- [3] ชเนศ ดวงตา. การเตรียมโบรมีน-82 ในภาพที่ของโบรมโมเบนซีนสำหรับใช้เป็นสารรังสีติดตาม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชานิวเคลียร์ เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553
- [4] Teruo Nagai and Kazuo Watari. Radionuclide Generator $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ using 6-tungstocerate column elution mode. *Journal of Nuclear Medicine*. Vo.95. No.12: 608-609
- [5] 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.
- [6] International Atomic Energy Agency. Leak Detection in Heat Exchangers and Underground Pipelines Using Radiotracers. Training Course Series No. 38 IAEA, VIENNA, 2009
- [7] R.H. Heath, Gamma ray Spectrometry. Idaho National Engineering Laboratory [Online]. 2013. Available from : http://www.inl.gov/gammaray/catalogs/ge/catalog_ge.shtml [2013, April 1]
- [8] H. Scott Fogler, M. Nihat Gurmen. Elements of Chemical reaction Engineering [Online]. 2008. Available from : <http://www.umich.edu/~elements/index.htm> [2013, August 28]

- [9] Seungkwon Shin, Jongbum Kim, Sunghee Jung, and Joonha Jin. The RTD Measurement on a Submerged Bio-Reactor using a Radioisotope Tracer and the RTD Analysis; International Journal of Control, Automation, and Systems Vol. 1, No.2, June 2003

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐพัชร์ ภิรมย์กิจ เกิดเมื่อวันที่ 22 เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดนนทบุรี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวัดบวรนิเวศ สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2553 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมนิเวศศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2553