

การพัฒนาเทคนิคการตรวจวัดปริมาณเรดอนในก๊าซธรรมชาติ

นายพลพิพัฒน์ แผ้วพาลชน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF TECHNIQUE FOR DETERMINATION OF RADON IN NATURAL GAS

Mr. Pholphiphat Paewpanchon



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเทคนิคการตรวจวัดปริมาณเรดอนในก๊าซธรรมชาติ
โดย	นายพลพิพัฒน์ แผ้วพาลชน
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา จันทโรยธา

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา จันทโรยธา)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. พงษ์แพทย์ เพ่งวานิชย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

พลพิพัฒน์ แฝ้วพาลชน : การพัฒนาเทคนิคการตรวจวัดปริมาณเรดอนในก๊าซธรรมชาติ  
(DEVELOPMENT OF TECHNIQUE FOR DETERMINATION OF RADON IN NATURAL  
GAS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. สุพิชชา จันทโรยธา, 67 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาเทคนิคการตรวจวัดเรดอนในก๊าซธรรมชาติ  
โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวกและมีประสิทธิภาพสูงมากในการตรวจวัดเรดอน  
ในอากาศ ในงานวิจัยชิ้นนี้พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์แปรผกผันกับ  
อุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ สัดส่วนของมีเทน และความชื้นของก๊าซธรรมชาติ ดังนั้นการเก็บถ่านกัม  
มันต์ไว้ในที่เย็นประมาณ 5 -10 องศาเซลเซียส การใช้สารดูดความชื้นประเภทแคลเซียมซัลเฟต จะ  
ช่วยให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์สามารถเพิ่มขึ้นได้ นอกจากนี้ในงานวิจัย  
ชิ้นนี้ยังทำการศึกษาผลของการเพิ่มความเข้มข้นของเรดอนโดยใช้เทคนิคกับดักความเย็น ซึ่งเมื่อติดตั้ง  
เข้าไปในกระบวนการตรวจวัดจะทำให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์มีค่าอยู่  
ระหว่าง 87 – 95% และเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการวัดเดิมค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอน  
ในก๊าซธรรมชาติของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น 10 -20%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5470293821 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: RADON / NATURAL GAS / CHARCOAL ADSORPTION / COLD TRAP / ADSORPTION EFFICIENCY

PHOLPHIPHAT PAEWPANCHON: DEVELOPMENT OF TECHNIQUE FOR DETERMINATION OF RADON IN NATURAL GAS. ADVISOR: ASST. PROF. SUPITCHA CHANYOTHA, Ph.D., 67 pp.

The aim of this study is to develop a technique for the determination of radon in natural gas using charcoal adsorption. This is one of the simple and effective methods for measuring radon in air. In this study, it is found that the adsorption of radon on activated charcoal varies inversely with the temperature of charcoal, the methane concentration and the humidity of natural gas.

The adsorption efficiency of activated charcoal can be increased by removal of moisture from the sampling air using calcium sulfate as a desiccant, and by cooling the charcoal to 5 – 10 °c. The radon concentration can also be increased by cold trap method. The efficiency obtained from this study is between 87% and 95%. The developing technique can increase the efficiency by 10 - 20% comparing with the conventional method.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Nuclear Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Nuclear Technology

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร. สุพิชชา จันทโรยธา ที่กรุณาให้คำปรึกษา อบรมสั่งสอน ชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย เป็นกำลังใจ รวมทั้งคอยมอบโอกาสในการแสวงหาความรู้และประสบการณ์อันมีค่า จนถึงวันทำงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รศ. นเรศร์ จันทน์ขาว ที่กรุณาให้คำปรึกษา และแนะนำในการเขียนงานวิจัยอย่างถูกต้อง อีกทั้งแบ่งปันประสบการณ์ที่มีส่วนสำคัญต่อการวิจัย

ขอขอบคุณ ดร. ชุติมา กรานรอด และ คุณพงษ์ยุทธ ศรีพลอย สำหรับความช่วยเหลือทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติซึ่งมีส่วนสำคัญที่ทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์ข้อมูลสถานที่และอุปกรณ์เพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณมนัสวีร์ เรืองเดช คุณภูมิพงศ์ แพรกทอง และ คุณมานพ มาสระ สำหรับการอำนวยความสะดวกและประสานงานกับทาง ปตท.สผ.

ขอขอบคุณ ทน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้ความรัก กำลังใจ ทุนทรัพย์ ตลอดจนการสนับสนุนในทุกๆด้าน จนกระทั่งจบการศึกษา

ขอขอบพระคุณ ครู อาจารย์ ในทุกระดับการศึกษา ที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชาและองค์ความรู้ต่างๆ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณาจารย์ ทีมนักวิจัย เพื่อนนิสิต และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ยังมิได้เอ่ยนาม ที่ช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	8
2.1 ความรู้พื้นฐานการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี .....	8
2.1.1 การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี (Radioactive Decay) .....	8
2.1.2 กัมมันตภาพ .....	9
2.1.3 ค่าครึ่งชีวิต ค่าอายุเฉลี่ย และหน่วยวัดกัมมันตภาพรังสี.....	10
2.1.4 สมดุลกัมมันตภาพรังสี.....	11
2.2 ก๊าซเรดอน.....	15
2.2.1 คุณสมบัติทั่วไป .....	16
2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ .....	16

2.2.3 คุณสมบัติของอะตอม .....	16
2.2.4 คุณสมบัติอื่นๆ.....	16
2.3 NORM ในแหล่งน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ.....	17
2.4 ก๊าซธรรมชาติ .....	22
2.4.1 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติ .....	23
2.5 การวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน .....	24
2.5.1 AC - Activated Charcoal Adsorption .....	24
2.5.2 AT - Alpha Track Detection (filtered).....	24
2.5.3 UT - Unfiltered Track Detection .....	24
2.5.4 LS - Charcoal Liquid Scintillation .....	25
2.5.5 CR - Continuous Radon Monitoring.....	25
2.5.6 EL - Electret Ion Chamber: Long-Term .....	25
2.5.7 GC - Grab Radon/Activated Charcoal .....	25
2.5.8 GB - Grab Radon/Pump-Collapsible Bag.....	26
2.5.9 GS - Grab Radon/Scintillation Cell .....	26
2.5.10 SC - Three-Day Integrating Evacuated Scintillation Cell.....	26
2.5.11 PB - Pump-Collapsible Bag (1-day) .....	26
2.6 เทคนิคการตรวจวัดเรดอนด้วยฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 .....	27
2.7 ถังปรับเทียบก๊าซเรดอน.....	28
บทที่ 3     แผนการดำเนินงานวิจัย .....	29
3.1 หลักการวิจัยเบื้องต้น.....	29
3.2 กระบวนการวัดเบื้องต้น.....	29
3.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการวัด.....	30



3.4	กระบวนการวัดที่ออกแบบสำหรับงานวิจัย .....	30
บทที่ 4	วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย .....	32
4.1	วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี .....	32
4.2	การแบ่งชุดการทดลอง.....	33
4.3	การทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่อค่าประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.....	34
4.4	การออกแบบกระบวนการและชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.....	37
4.5	การนำกระบวนการเก็บตัวอย่างที่ออกแบบใหม่ไปใช้ในพื้นที่จริง .....	42
4.6	การใช้ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ทดสอบกระบวนการวัด .....	44
บทที่ 5	ผลการดำเนินงานวิจัย .....	47
5.1	การทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่อค่าประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.....	47
5.2	การทดสอบกระบวนการเก็บตัวอย่างใหม่และการนำไปใช้งานในพื้นที่จริง .....	52
5.3	การใช้ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ทดสอบกระบวนการวัด .....	56
บทที่ 6	สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัย .....	58
6.1	การทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่อค่าประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.....	58
6.2	การทดสอบกระบวนการเก็บตัวอย่างใหม่และการนำไปใช้งานในพื้นที่จริง .....	59
6.3	การใช้ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ทดสอบกระบวนการวัด .....	61
6.4	ข้อจำกัดของการดำเนินงานวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	61
	รายการอ้างอิง .....	63
	ภาคผนวก.....	65
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	67

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1-1 อัตราเสี่ยงมะเร็งปอดต่อความเข้มข้นของก๊าซเรดอน.....	2
ตารางที่ 1-2 แสดงจุดเดือดขององค์ประกอบต่างๆในก๊าซธรรมชาติ ที่ความดันปกติ.....	5
ตารางที่ 2-1 ความเข้มข้นของยูเรเนียม ทอเรียม และเรเดียมในชั้นหินต่างๆ .....	18
ตารางที่ 2-2 รูปแบบของ NORM ที่พบในกระบวนการผลิตปิโตรเลียม.....	21
ตารางที่ 2-3 ความเข้มข้นของเรดอนในก๊าซธรรมชาติ (Natural gas, NG) และในก๊าซธรรมชาติ เหลว .....	21
ตารางที่ 2-3 ความเข้มข้นของเรดอนในก๊าซธรรมชาติ (Natural gas, NG) และในก๊าซธรรมชาติ เหลว (ต่อ).....	22
ตารางที่ 2-4 ตัวอย่างองค์ประกอบก๊าซธรรมชาติของประเทศไทยจากกรมทรัพยากรธรณี.....	23
ตารางที่ 5-1 แสดงค่าผลการทดสอบกระบวนการวัดเดิมในห้องปฏิบัติการ .....	47
ตารางที่ 5-2 แสดงผลของมีเทนต่อค่าประสิทธิภาพของระบบวัดเดิมในห้องทดลอง.....	48
ตารางที่ 5-3 แสดงผลการทดสอบระบบวัดเดิมในพื้นที่จริง .....	48
ตารางที่ 5-4 แสดงผลของอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ที่ 50 °C ต่อค่าประสิทธิภาพการดูดซับ.....	49
ตารางที่ 5-5 แสดงผลของอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ที่ 30 °C ต่อค่าประสิทธิภาพการดูดซับ.....	49
ตารางที่ 5-6 แสดงผลของอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ที่ 15 °C ต่อค่าประสิทธิภาพการดูดซับ.....	50
ตารางที่ 5-7 แสดงผลของอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ที่ 5 °C ต่อค่าประสิทธิภาพการดูดซับ.....	50
ตารางที่ 5-8 แสดงผลของความชื้นของก๊าซตัวอย่างที่ 80% ต่อค่าประสิทธิภาพในการดูดซับ.....	51
ตารางที่ 5-9 แสดงผลของความชื้นของก๊าซตัวอย่างที่ 60% ต่อค่าประสิทธิภาพในการดูดซับ.....	51
ตารางที่ 5-10 แสดงผลของความชื้นของก๊าซตัวอย่างที่ 30% ต่อค่าประสิทธิภาพในการดูดซับ.....	51
ตารางที่ 5-11 แสดงผลของความชื้นของก๊าซตัวอย่างที่ 30% ต่อค่าประสิทธิภาพในการดูดซับ.....	51
ตารางที่ 5-12 แสดงผลการทดสอบระบบควบแน่นเพื่อเก็บก๊าซตัวอย่างแบบต่อเนื่อง.....	52

ตารางที่ 5-13 แสดงผลการทดสอบระบบควบแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยน้ำแข็งแห้งและ  
 หลอดแก้ว ..... 53

ตารางที่ 5-14 แสดงผลการทดสอบระบบควบแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยไนโตรเจนเหลวผสม  
 เมทานอล ..... 53

ตารางที่ 5-15 แสดงผลการทดสอบระบบควบแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยไนโตรเจนเหลวและ  
 หลอดแก้ว ..... 54

ตารางที่ 5-16 แสดงผลการทดสอบระบบควบแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยน้ำแข็งแห้งและ  
 ท่อทองแดง ..... 55

ตารางที่ 5-17 แสดงผลการทดลองโดยใช้ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ..... 56



## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 สัดส่วนการรับรังสีนิวเคลียร์ของมนุษย์จากแหล่งกำเนิดรังสีธรรมชาติและแหล่งรังสีที่มนุษย์ทำขึ้น .....	1
รูปที่ 1.2 แหล่งก๊าซธรรมชาติในซีเรียที่ทำการสำรวจแก๊สเรดอน.....	4
รูปที่ 2.1 การสลายตัวของ UX ซึ่งเป็นนิวไคลด์แม่ และการเพิ่มค่ากัมมันตภาพของ U ซึ่งเป็นนิวไคลด์ลูก ซึ่งมีลักษณะเป็นเอ็กซีโปแนนเชียล .....	8
รูปที่ 2.2 ค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์แม่ (A) นิวไคลด์ลูก (B) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่ากัมมันตภาพของแม่ เมื่อเกิดสมดุลเชคูลาร์ .....	13
รูปที่ 2.3 กัมมันตภาพของนิวไคลด์แม่ (A) นิวไคลด์ลูก (B) และค่ากัมมันตภาพรวม (A+B) เมื่อเกิดสมดุลทรานเซียนต์ .....	15
รูปที่ 2.4 แสดงอนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม 238 หรืออนุกรมยูเรเนียม ซึ่งมีเรดอน-222 อยู่ในลำดับที่ 7 .....	18
รูปที่ 2.5 แสดงอนุกรมการสลายตัวของทอเรียม ซึ่งมีโธรอนหรือเรดอน-220 อยู่ในลำดับที่ 6 .....	19
รูปที่ 2.6 แผนผังแสดงอุปกรณ์สำคัญที่เกิดการสะสมของ NORM ในกระบวนการผลิตปิโตรเลียม .	20
รูปที่ 2.7 แสดงทิศทางการละลายและการเคลื่อนที่ของเรเดียมและเรดอนในแหล่งผลิตปิโตรเลียม .....	20
รูปที่ 2.8 (ซ้าย) ภาพแสดงลักษณะการเกิดรอยบนพลาสติก CR-39 (400 X) จากการตรวจวัดเรดอน .....	27
รูปที่ 2.9 (ขวา) แผ่นพลาสติก CR-39 ขนาด 1 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร มีสัญลักษณ์แสดงรหัสของแผ่น .....	27
รูปที่ 2.10 เรดอนแชมเบอร์และการติดตั้งแหล่งกำเนิดเรดอนมาตรฐาน.....	28
รูปที่ 3.1 กระบวนการตรวจวัดเรดอนจากท่อส่งก๊าซธรรมชาติ.....	30
รูปที่ 4.1 แผนผังอุปกรณ์แสดงระบบวัดเดิมในห้องทดลอง .....	34
รูปที่ 4.2 แผนผังอุปกรณ์ Gamma spectrometry ในระบบ Canberra .....	35
รูปที่ 4.3 แผนผังการอุปกรณ์เพื่อศึกษาผลของมีเทนในระบบวัดเดิมในห้องทดลอง .....	35

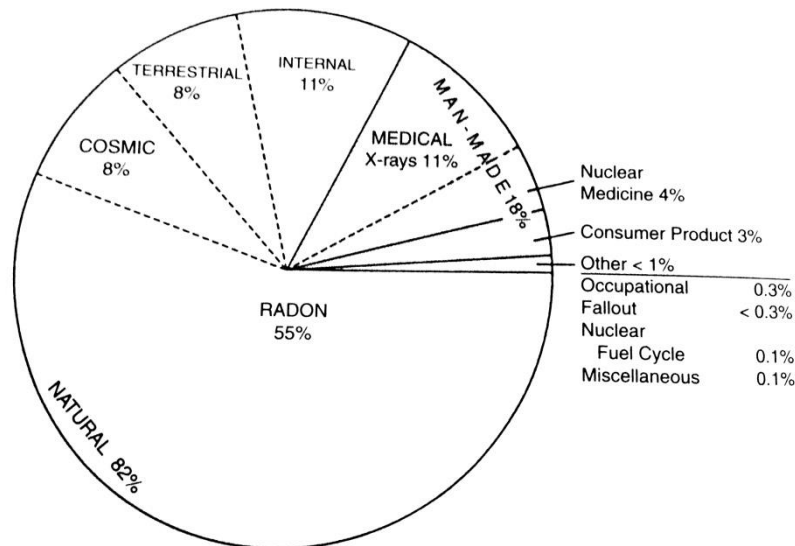
รูปที่ 4.4 แผนผังอุปกรณ์ในการศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับด้วย ถ่านกัมมันต์.....	37
รูปที่ 4.5 แผนผังอุปกรณ์กระบวนการวัดใหม่ที่ติดตั้งระบบควบคุมแน่นก๊าซแบบต่อเนื่อง.....	38
รูปที่ 4.6 แผนผังอุปกรณ์กระบวนการวัดใหม่ที่ติดตั้งกับดักความเย็นเพื่อดักจับเรดอนก่อนดูดซับ ด้วยถ่านกัมมันต์.....	40
รูปที่ 4.7 แผนผังอุปกรณ์ระบบวัดที่ติดตั้งกับดักความเย็นจากน้ำแข็งแห้งและท่อทองแดง.....	42
รูปที่ 4.8 แผนผังอุปกรณ์ในการเก็บก๊าซตัวอย่างจากท่อส่งก๊าซธรรมชาติในพื้นที่จริง.....	43
รูปที่ 4.9 แผนผังอุปกรณ์ในการทดลองโดยใช้ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39.....	46
รูปที่ 5.1 แผนภูมิเปรียบเทียบผลทดสอบของระบบวัดเดิม.....	48
รูปที่ 5.2 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ใน ระบบวัดเดิม.....	49
รูปที่ 5.3 แผนภูมิเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฯ.....	50
รูปที่ 5.4 แผนภูมิเปรียบเทียบผลของความชื้นของก๊าซตัวอย่างต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฯ.....	51
รูปที่ 5.5 แผนภูมิเปรียบเทียบผลการทดสอบระบบการเก็บก๊าซตัวอย่างที่ออกแบบใหม่.....	55
รูปที่ 5.6 ภาพถ่ายฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ตัวอย่างที่ Air tight #1 sheet 1 ....	57
รูปที่ 5.7 ภาพถ่ายฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ตัวอย่างที่ Air tight #3 sheet 3 ....	57
รูปที่ 5.8 ภาพถ่ายฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ตัวอย่างที่ Air tight #3 sheet 2 ....	57

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมนุษย์มีความตื่นตัวและให้ความสำคัญกับผลกระทบของรังสีมากขึ้น ทำให้มีงานวิจัย รวมทั้งกรณีศึกษาต่าง ๆ ถูกตีพิมพ์ออกมาเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้รังสีที่มนุษย์ได้รับส่วนใหญ่มาจากธรรมชาติ จากรูปที่ 1.1 ซึ่งแสดงผลการสำรวจในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่ารังสีเกินกว่า 80% ที่มนุษย์ได้รับมาจากธรรมชาติ และปรากฏว่ารังสีที่ส่งผลต่อมนุษย์ถึง 55% มาจากก๊าซเรดอน ซึ่งการได้รับก๊าซเรดอนของมนุษย์เกิดจากหลายสาเหตุและมีแหล่งกำเนิดที่ต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะชีวิตประจำวันและอาชีพที่แตกต่างกัน



รูปที่ 1.1 สัดส่วนการรับรังสีนิวเคลียร์ของมนุษย์จากแหล่งกำเนิดรังสีธรรมชาติและแหล่งรังสีที่มนุษย์ทำขึ้น (จาก NCRP. 1987. Radiation exposure of the population of the United States. อ้างอิงใน Turner, J.E. 1995. Atom, radiation protection)[1]

ก๊าซเรดอนจัดอยู่ในกลุ่ม NORM หรือธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติ (Naturally Occurring Radioactive Materials) ซึ่งกระจายตัวอยู่ทั่วโลก โดย NORM[2] เกิดขึ้นมาพร้อม ๆ กับโลก ซึ่งถ้าดูจากอายุโลกซึ่งมีอายุประมาณ 4,500 ล้านปีนั้น จะเท่ากับค่าครึ่งชีวิตของยูเรเนียมที่ถือเป็นธาตุแม่ของอนุกรมการสลายตัวและมีค่าครึ่งชีวิตยาวนานที่สุดในอนุกรมยูเรเนียมอีกด้วย ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีธาตุที่อยู่ในอนุกรมนี้เกิดขึ้นในโลกครบทุกตัวแล้ว ซึ่งปริมาณของธาตุกัมมันตรังสีจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับภูมิประเทศและภูมิอากาศที่เอื้อต่อการสะสมตัวของธาตุกัมมันตรังสี แต่

อย่างไรก็ดีแม้ธาตุกัมมันตรังสีกลุ่มนี้จะพบได้ในปริมาณที่ไม่มากนักแต่ก็สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือตรวจวัดทางรังสี ซึ่งไอโซโทปรังสีในกลุ่ม NORM ที่มนุษย์ได้รับมากที่สุด คือ ไอโซโทปของเรดอน 222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นก๊าซเฉื่อย อยู่ในลำดับที่ 7 ของอนุกรมการสลายตัวยูเรเนียม [3]

ปกติมนุษย์จะอาศัยอยู่ในระดับพื้นดินซึ่งเรามักพบก๊าซเรดอนในระดับนี้ เนื่องจากก๊าซเรดอนฟุ้งขึ้นมาจากพื้นดินและมีน้ำหนักมากกว่าอากาศประมาณ 7.67 เท่า ดังนั้นยิ่งสูงจากพื้นดินปริมาณเรดอนก็ยิ่งน้อยลง ทั้งนี้ด้วยค่าครึ่งชีวิตของเรดอนคือ 3.8 วัน และคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี ถ้ามนุษย์อาศัยอยู่ในบริเวณที่มีการขุดเจาะหรือนำเอาสารต่าง ๆ เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ หรือน้ำใต้ดิน เป็นต้น ขึ้นมาใช้ในปริมาณมาก ก็จะมีโอกาสได้รับก๊าซเรดอนได้มากกว่ามนุษย์ที่อาศัยอยู่ในบริเวณอื่น ๆ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการผลิตน้ำมันปิโตรเลียมและก๊าซธรรมชาติในประเทศตะวันออกกลางมีปริมาณการปนเปื้อนของเรดอนในบางพื้นที่สูง[4] (ซีเรีย 2007  $15.4 \text{ Bq.m}^{-3}$  ถึง  $1141 \text{ Bq.m}^{-3}$ ) ซึ่งอาจส่งผลต่อสุขภาพร่างกายเมื่อเปรียบกับตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 อัตราเสี่ยงมะเร็งปอดต่อความเข้มข้นของก๊าซเรดอน

(จาก EPA 625/5-89-019, Radon reduction techniques for detached homes)

เบคเคอเรล/ลบ.ม.	ความเสี่ยง*
74,000	>75
7,400	75
1,480	30
740	15
148	3

\* เป็น “เท่า” ของอุบัติการณ์เฉลี่ยของมะเร็งปอดในผู้ที่ไม่สูบบุหรี่

ในประเทศไทยมีอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับน้ำมัน ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ อยู่หลายแหล่ง ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะพบการปนเปื้อนของก๊าซเรดอน ดังนั้นการตรวจวัดปริมาณก๊าซเรดอนในแต่ละพื้นที่เป็นเรื่องสำคัญต่อการวินิจฉัยความปลอดภัยของมนุษย์ในพื้นที่นั้น ๆ จึงได้มีการพัฒนาระบบการตรวจวัดก๊าซเรดอนอย่างต่อเนื่อง ทั้งการใช้ฟิล์มวัดรังสี เครื่องมือวัดก๊าซเรดอนแบบต่อเนื่อง การใช้ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น แต่ก็ยังมีข้อโต้แย้งของบางกลุ่มเกี่ยวกับการปรับเทียบของระบบวัดก๊าซเรดอน เพราะส่วนใหญ่จะทำการปรับเทียบระบบวัดก๊าซเรดอนกับอากาศ ซึ่งในพื้นที่การผลิตปิโตรเลียมจริงนั้น อากาศเป็นเพียงส่วนหนึ่งของพื้นที่ผลิตปิโตรเลียมเท่านั้น ส่วนที่อยู่ในกระบวนการผลิตซึ่งประกอบด้วยก๊าซธรรมชาติที่อยู่ในท่อหรือที่ขุดเจาะขึ้นมา ซึ่งมีองค์ประกอบของก๊าซต่างๆที่ไม่เหมือนกับในอากาศที่ใช้หายใจ ก๊าซเหล่านี้ยังคงไม่ได้มีการนำมาปรับเทียบระบบวัดก๊าซเรดอน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระบบการวัดก๊าซเรดอนที่ใช้งานในกระบวนการการผลิตน้ำมันและก๊าซธรรมชาติที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อนำมาพัฒนากระบวนการและปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมกับการปรับเทียบกระบวนการวัดดังกล่าวด้วยก๊าซตัวอย่างที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงกับก๊าซธรรมชาติในกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์มากที่สุด เพื่อที่จะนำกระบวนการปรับเทียบที่พัฒนาขึ้นไปตรวจวัดก๊าซเรดอนจากกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติได้อย่างถูกต้อง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาเทคนิคการตรวจวัดเรดอนในก๊าซธรรมชาติโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 พัฒนาการปรับเทียบและเทคนิคการตรวจวัดเรดอนสำหรับก๊าซตัวอย่างที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และวัดรังสีแกมมา

1.3.2 นำผลการตรวจวัดก๊าซเรดอนจากระบบที่พัฒนาขึ้นไปเปรียบเทียบกับผลการวัดจากการตรวจวัดเรดอนด้วยฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39

1.3.3 นำระบบปรับเทียบที่พัฒนาขึ้นไปตรวจวัดเรดอนในกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติในพื้นที่จริง

## 1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้างานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาการปรับเทียบและเทคนิคการตรวจวัดเรดอนโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

1.4.3 ศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิในการดูดซับ องค์ประกอบของก๊าซ เป็นต้น

1.4.4 ทำการปรับเทียบเทคนิคการตรวจวัดเรดอนโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

1.4.5 พัฒนาอุปกรณ์ในการดูดซับความชื้นและอุปกรณ์แยกองค์ประกอบก๊าซ

1.4.6 ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆและทำการจัดระบบการตรวจวัดและปรับเทียบเทคนิคการตรวจวัดเรดอนในก๊าซธรรมชาติโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่

1.4.7 นำเทคนิคการตรวจวัดเรดอนที่ได้ปรับเทียบแล้วไปตรวจวัดเรดอนในก๊าซตัวอย่างและเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดเรดอนด้วยฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39

1.4.8 สรุปผลการวิจัย



## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้เทคนิคการตรวจวัดเรดอนโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และวัดรังสีแกมมาที่มีการปรับเทียบด้วยก๊าซที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับก๊าซธรรมชาติในแหล่งผลิต

1.5.2 ได้ผลการตรวจวัดเรดอนในก๊าซธรรมชาติในแหล่งผลิตในประเทศไทยที่มีความน่าเชื่อถือ

## 1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ.2007 M.S. Al-Masri และ R. Shwiekani[4] ได้ทำการสำรวจการกระจายตัวของก๊าซเรดอนที่อยู่ในพื้นที่การผลิตก๊าซธรรมชาติของประเทศซีเรีย ซึ่งได้ทำการตรวจสอบในโรงงานผลิตก๊าซธรรมชาติทั้งหมด 4 แห่ง ซึ่งจากผลสำรวจพบว่าอุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่มีการสัมผัสกับกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาตินั้นมีระดับความแรงรังสีก๊าซเรดอนในระดับที่ไม่เป็นอันตราย ยกเว้นส่วนของ reflex pump ที่มีการสะสมของก๊าซเรดอนสูงกว่าจุดอื่นคือมีค่า Dose rate ประมาณ  $3 \text{ mSv.h}^{-1}$  ซึ่งเมื่อทราบก็จะต้องหาวิธีการเพื่อป้องกันต่อไป นอกจากนี้ยังมีผลสำรวจต่อไปว่าปริมาณก๊าซเรดอนที่อยู่ในส่วนการผลิตก๊าซธรรมชาติในซีเรียนั้นมีอยู่ประมาณ  $15.4 \text{ Bq.m}^{-3}$  ถึง  $1141 \text{ Bq.m}^{-3}$  ซึ่งในกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติที่มีการสัมผัสกับชั้นน้ำหรือน้ำมันจะมีปริมาณของเรดอนที่สูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้สัมผัสกับชั้นน้ำมัน งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าเรดอนถูกพบในกระบวนการผลิตมากกว่าบริเวณหัวเจาะ ซึ่งเกิดจากการกระบวนการผลิตที่ทำให้ความสามารถในการละลายของเรดอนสูงขึ้น อีกทั้งยังมีธาตุลูกของเรดอนอีกด้วยทำให้เพิ่มค่ากัมมันตรังสีขึ้นไปอีก เมื่อก๊าซธรรมชาติผ่านกระบวนการแยกก๊าซจะสังเกตเห็นได้ว่าการสะสมของเรดอนสูงในกลุ่มของ NGL ซึ่งประกอบด้วยบิวเทนและโพรเพนเป็นหลักซึ่งจากข้อมูลทำให้สามารถสรุปได้ว่าเรดอนมีความคล้ายคลึงและสามารถละลายปนเปื้อนมากับ NGL ได้มากกว่าองค์ประกอบอื่นๆของก๊าซธรรมชาติ

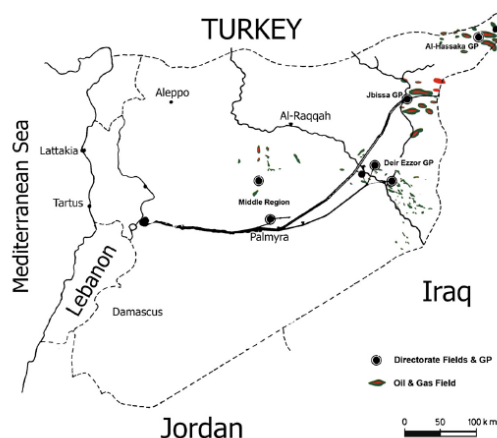


Fig. 1. Distribution of oil and gas fields and gas plants (GP) in Syria.

รูปที่ 1.2 แหล่งก๊าซธรรมชาติในซีเรียที่ทำการสำรวจแก๊สเรดอน[4]

ในปี ค.ศ.2003 M.S. Hamlat, H. Kadi, S. Djeflal และ H. Brahimi[5] สำรวจปริมาณก๊าซเรดอนในอุตสาหกรรมการผลิตก๊าซธรรมชาติและน้ำมันในแอลจีเรีย ที่มิจัยได้ทำการสำรวจปริมาณก๊าซเรดอนที่ปนเปื้อนมากับน้ำ (Produced water) และน้ำมัน ซึ่งใช้กระบวนการตรวจวัด 2 กระบวนการเพื่อเปรียบเทียบผลกัน คือ scintillation cell techniques (Lucas cells) และ electret ion chamber (EIC) ซึ่งจากผลการสำรวจพบว่ามีปริมาณก๊าซเรดอนในน้ำ (Produced water) อยู่ในช่วง 0.98 – 18.50 Bq/L ในน้ำมันดิบ (crude oil) อยู่ในช่วง 0.02 – 0.3 Bq/g ในก๊าซธรรมชาติ (NG) อยู่ในช่วง 40 – 1000 Bq/m<sup>3</sup> และในก๊าซธรรมชาติชนิดเหลว (NGL) จะมีเรดอนอยู่ในปริมาณ 300 – 2500 Bq/m<sup>3</sup> ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณเรดอนในประเทศอื่น ๆ ได้ จากฐานข้อมูล มีการสำรวจพบว่าคุณสมบัติรังสีส่วนใหญ่มาจากโพแทสเซียมแต่ก็ยังสามารถพบไอโซโทปกัมมันตรังสีที่อยู่ในอนุกรมยูเรเนียมและทอเรียมได้ด้วย ซึ่งธาตุลูกของอนุกรมนี้ที่พบว่าเป็นอันตรายและสะสมอยู่ในกระบวนการผลิตทั้งติดมากับผลิตภัณฑ์และค้างอยู่ในอุปกรณ์นั้นได้แก่ <sup>222</sup>Rn (เรดอน) และ <sup>220</sup>Rn (โธรอน) ด้วยค่าครึ่งชีวิตของเรดอนทำให้ก๊าซเรดอนสามารถไหลผ่านสายการผลิตใต้พื้นดินได้เป็นไมล์ก่อนที่จะเริ่มสลายตัวเกิดเป็นธาตุลูกในสายการผลิตก๊าซธรรมชาติ ซึ่งจะเกิดการสะสมในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น reflex pump และเกิดชั้นตะกอนของ <sup>210</sup>Pb อีกด้วย จากการศึกษาพบว่าก๊าซเรดอนมีจุดเดือดอยู่ระหว่างอีเทนและโพรเพนดังตารางที่ 1-2 ดังนั้นจึงพบก๊าซเรดอนในกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติดังกล่าวด้วย

ตารางที่ 1-2 แสดงจุดเดือดขององค์ประกอบต่างๆ ในก๊าซธรรมชาติ ที่ความดันปกติ[5]

Fraction	Temperature(°C)
Methane(C1)	-164.0
Ethane(C2)	-89.0
Radon	-61.7
Propylene(C3)	-47.6
Propane(C3)	-42.0
Butane(C4)	-0.5

ในปี พ.ศ. 2542 นายวิฑิต ผึ้งกัน[6] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาเทคนิคเพื่อหาปริมาณเรดอน-222 ในอาคารโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นวิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาคศึกษานิเวศวิทยาเทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 กระบวนการ ได้แก่ การพัฒนาการเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ปนเปื้อนมากับอากาศที่เก็บภายในอาคาร กระบวนการที่ 2 คือการพัฒนาเทคนิคการแปลงก๊าซเรดอนที่เพิ่มความเข้มข้นกลับเป็นแก๊สอีกครั้งเพื่อใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับ และกระบวนการที่ 3 คือ การวัดรังสีแกมมาพลังงาน 609 keV จากบิสมัท-214 และใช้หัตถวิธีโซเดียมไอโอไดด์ ซึ่งในกระบวนการแรกนั้นมีการจัดระบบวัดให้อากาศ

ไหลผ่านท่อทองแดงที่หล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวทำให้ก๊าซของค์ประกอบควบแน่นเป็นของเหลว โดยจะสามารถแยกก๊าซไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ออกมาได้ ดังนั้นเมื่อนำมาเข้ากระบวนการที่ 2 ก็จะได้ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนต่อปริมาตรของก๊าซของค์ประกอบที่เหลืออยู่เพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นนำก๊าซดังกล่าวมาผ่านถ่านกัมมันต์โดยใช้ก๊าซนะบรรจุถ่านกัมมันต์ต่อกัน 2 ชั้น เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของกระบวนการวัด และสุดท้ายทำการหาปริมาณเรดอนที่เก็บมาด้วยถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคการวัดรังสีแกมมา ซึ่งเมื่อนำระบบดังกล่าวไปวัดปริมาณก๊าซเรดอนในอาคารของภาควิชานิวเคลียร์ ได้ผลการวัดมีค่าอยู่ระหว่าง  $0.059 \pm 0.046$  ถึง  $1.400 \pm 0.218$  พิโคคูรีต่อลิตร ซึ่งจากการคำนวณจะได้ขีดจำกัดในการวัดปริมาณ เรดอน-222 ในอากาศ 500 ลิตร มีค่าประมาณ  $0.1 \text{ pCi/L}$  โดยใช้เวลานับรังสี 5,000 วินาที

ในปี พ.ศ. 2548 นางสาวทิพย์ลดา พิษยศาสตร์กุล[7] ได้ทำวิทยานิพนธ์ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร ะดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีหัวข้อการศึกษาถึงการตรวจวัดอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 จากแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอริยิปซัมเป็นองค์ประกอบ โดยมีกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตแผ่นยิปซัม ซึ่งได้มีการจัดระบบการวัดให้เป็นระบบปิดและทำการตรวจวัดปริมาณเรดอนด้วยการใช้ถ่านกัมมันต์และเครื่องมือตรวจวัดก๊าซเรดอนแบบต่อเนื่อง RAD7 ซึ่งจากตัวอย่างแผ่นยิปซัมที่นำมาศึกษาจะมีปริมาณของฟอสฟอริยิปซัมต่างกันควรให้ปริมาณก๊าซเรดอนที่ปลดปล่อยออกมาในปริมาณที่ต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอริยิปซัมเป็นองค์ประกอบ 30%, 35% และ 38% เมื่อนำมาตรวจวัดปริมาณเรดอนจากระบบวัดที่พัฒนาขึ้น ได้ค่าเท่ากับ  $21.707 \pm 3.45$ ,  $38.34 \pm 6.10$  และ  $23.213 \pm 3.59 \text{ } \mu\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งเมื่อได้ค่าที่ทำการวัดแล้วก็นำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือตรวจวัดเรดอนแบบต่อเนื่อง RAD7 ซึ่งค่าที่ได้จากเครื่องมือดังกล่าวจะสูงกว่าค่าที่ได้จากเทคนิคถ่านกัมมันต์ประมาณ 14.5 – 15% จากนั้นทำการศึกษาอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากเรเดียมทั้งหมดที่อยู่ในแผ่นยิปซัม ปรากฏว่าแผ่นยิปซัมที่มีสัดส่วนของฟอสฟอริยิปซัมผสมอยู่ 30% ให้ค่าดังกล่าวสูงที่สุดคือ 11%

ในปี พ.ศ. 2551 นางสาวบรรทม โสลา[8] ได้ทำวิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เรื่องการปรับปรุงกระบวนการเปรียบเทียบสำหรับการวัดก๊าซเรดอนด้วยฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการปรับปรุงระบบการตรวจวัดเพื่อหาวิธีการต่างๆ เพื่อให้ประสิทธิภาพของการตรวจวัดก๊าซเรดอนด้วยฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งได้ทำการปรับปรุงตั้งแต่การจัดเก็บฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ก่อนการตรวจวัด การจัดเก็บฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ในกระบวนการจัดส่งเพื่อนำไปตรวจวัดก๊าซเรดอนในพื้นที่ศึกษา การปรับปรุงและจัดสร้างถังเปรียบเทียบซึ่งมีระบบที่ต่อเชื่อมกับ

เครื่องวัดก๊าซเรดอนแบบไอออนเซชัน (ATMOS 12 dpx) ปรับปรุงกระบวนการกัตรอยและ การอ่าน รอยเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซเรดอน โดยจากการศึกษาพบว่าควรเก็บฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟา ชนิด CR-39 ไว้ในช่องแช่แข็งที่มีอุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  และเมื่อนำมาบรรจุในตลับวัดควรเก็บไว้ใน โถดูดความชื้นซึ่งภายในเป็นสุญญากาศ จะทำให้เกิดรอยพื้นหลังน้อยที่สุด เมื่อทำการขนส่งและต้อง บรรจุให้หลีกเลี่ยงการใช้บรรจุตลับวัดลงในถุงพลาสติกหนา 0.2 มิลลิเมตร ทำเป็นสุญญากาศและห่อด้วย ถุงซิโพลีเอทิลีน หลังจากนั้นทำการพัฒนาถึงปรับเทียบจากเดิมที่ใช้เป็นภาชนะอะคลิคลิสี่เหลี่ยม เมื่อนำฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ไปรับรังสีจากก๊าซเรดอน แล้วนำมากัตรอยให้หลีกเลี่ยง ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6.25 โมลาร์ อุณหภูมิที่ใช้คือ 98 องศาเซลเซียส เวลา กัตรอย 1.5 ชั่วโมง ซึ่งจะเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอ่านรอยด้วยโปรแกรม Image J จากนั้นได้นำผลการวัดปริมาณเรดอนที่ได้จากเทคนิคฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ไป เปรียบเทียบกับการใช้เครื่อง ATMOS 12 ซึ่งผลที่ได้ต่างกันประมาณร้อยละ 1 จากนั้นนำผลไป เปรียบเทียบการวัดกับ NIRS ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งได้ผลต่างกันไม่เกินร้อยละ 20 ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่รับได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

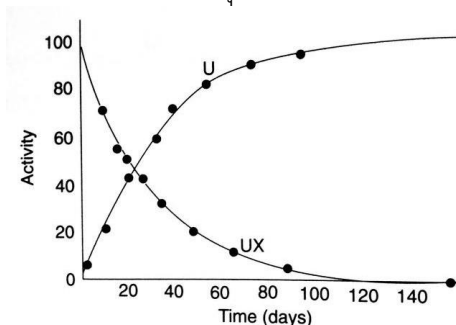
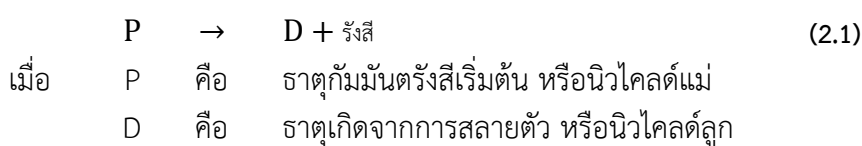
#### 2.1 ความรู้พื้นฐานการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี

มีรายละเอียดพื้นฐานมากมายที่จำเป็นต่อการทำงานวิจัยชิ้นนี้ การศึกษาพื้นฐานของการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีจึงมีความสำคัญ ซึ่งในหัวข้อนี้จะแสดงทฤษฎีเรื่องการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี กัมมันตภาพ ค่าคงที่การสลายตัว ค่าครึ่งชีวิต อนุกรมการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี หน่วยวัดปริมาณรังสี และสมดุลทางรังสี[1]

##### 2.1.1 การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี (Radioactive Decay)

เนื่องจากธาตุกัมมันตรังสีประกอบด้วยนิวไคลด์ที่ไม่เสถียรจึงมีการสลายตัวเพื่อปรับเสถียรภาพของตัวมันเองโดยจะมีการปล่อยรังสีออกมา ซึ่งแต่ละธาตุกัมมันตรังสีจะสมบัติทางรังสีในกลุ่มสมบัติของการสลายตัวต่างกัน เช่น อัตราการสลายตัว ชนิดของรังสี รวมถึงปริมาณรังสีที่ต่างกัน

ในปี ค.ศ. 1900 ครูกซ์ (Crookes) ได้ทำการศึกษาตะกอนของเกลือยูเรเนียม (uranium, U) ซึ่งพบว่ามีค่ากัมมันตภาพ (activity) สูง ซึ่งให้ชื่อว่า ยูเรเนียมเอกซ์ (uranium X, UX) หลังจากนั้นแบ็กเคอเรลก็ได้ทำการศึกษาต่อไปอีกโดยมีการแยก UX ออกจาก U ได้สำเร็จ และพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปค่ากัมมันตภาพของ UX มีค่าลดลง ส่วนค่ากัมมันตภาพของ U กลับเพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์แม่อย่าง UX และการเพิ่มขึ้นของค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์ลูกอย่าง U จะมีลักษณะเป็นเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) ดังรูปที่ 2.1 โดยมีสมการการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีดังสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.1 การสลายตัวของ UX ซึ่งเป็นนิวไคลด์แม่ และการเพิ่มค่ากัมมันตภาพของ U ซึ่งเป็นนิวไคลด์ลูก ซึ่งมีลักษณะเป็นเอกซ์โพเนนเชียล

อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีจะแปรผันตามจำนวนนิวไคลด์ของธาตุกัมมันตรังสี ณ ขณะนั้น โดยเมื่อเราให้  $N$  เป็นจำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลา  $t$  ใดๆ จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้ง 2 ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 -\frac{dN}{dt} &\propto N \\
 -\frac{dN}{dt} &= \lambda N \\
 \frac{dN}{N} &= -\lambda dt \\
 \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} &= -\lambda \int_0^t dt \\
 \ln \frac{N}{N_0} &= -\lambda t \\
 \frac{N}{N_0} &= e^{-\lambda t} \\
 N &= N_0 e^{-\lambda t}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

เมื่อ	$N_0$	คือ	จำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลาเริ่มต้น ( $t = 0$ )
	$N$	คือ	จำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลา $t$ ใดๆ
	$t$	คือ	ระยะเวลาของการสลายตัว
	$\lambda$	คือ	ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant)

### 2.1.2 กัมมันตภาพ

ดังที่กล่าวในหัวข้อข้างต้นว่าอัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีมีค่าแปรผันกับจำนวนนิวไคลด์ของธาตุกัมมันตรังสี ณ ขณะนั้นและพิสูจน์จนได้ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนิวไคลด์กับเวลาดังแสดงในสมการที่ (2.2) ซึ่งค่ากัมมันตภาพ (activity,  $A$ ) ก็คืออัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี หรือจำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีต่อเวลามีหน่วยเป็นแบคเคอเรล (Becquerel, Bq) โดยค่ากัมมันตรังสีขนาด 1 Bq จะมีค่าเท่ากับการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี 1 ครั้งต่อวินาที (disintegration per sec, dps)

หน่วยสำคัญที่ได้รับความนิยมในการบ่งบอกอัตราการสลายตัวหรือค่ากัมมันตภาพคือหน่วยที่ชื่อว่า คูรี (curie, Ci) โดยกำหนดมาจากการสลายตัวของ  $^{226}\text{Ra}$  หนัก 1 กรัม ซึ่งมีอัตราการสลายตัวเท่ากับ  $3.7 \times 10^{10}$  dps เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์จะเห็นว่ากัมมันตภาพแปรผันตามจำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสี ดังนี้

$$A \propto N$$

$$A = \lambda N \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.2) เมื่อคูณด้วย  $\lambda$  จะได้

$$\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

เมื่อ	$A_0$	คือ	กัมมันตภาพที่เวลาเริ่มต้น ( $t = 0$ )
	$A$	คือ	กัมมันตภาพที่เวลา $t$ ใดๆ
	$t$	คือ	ระยะเวลาของการสลายตัว
	$\lambda$	คือ	ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant)

ซึ่งเมื่อเราทราบความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.2) แล้ว ค่า  $N_D$  คือ จำนวนนิวไคลด์ที่เกิดขึ้นใหม่หรือจำนวนนิวไคลด์ที่สลายตัวไปในเวลา  $t$  สามารถหาได้จาก

$$N_D = N_0 - N$$

$$N_D = N_0 - N_0 e^{-\lambda t}$$

$$N_D = N_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.5)$$

ดังนั้นการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีจะมีลักษณะสำคัญคือมีจำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีและค่ากัมมันตภาพลดลงเรื่อย ๆ ตามเวลาแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังสมการที่ (2.2) และสมการที่ (2.4) แต่จะมีนิวไคลด์ที่เกิดใหม่จากการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลเช่นกันตามสมการที่ (2.5)

### 2.1.3 ค่าครึ่งชีวิต ค่าอายุเฉลี่ย และหน่วยวัดกัมมันตภาพรังสี

เมื่อเวลาผ่านไปและมีการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีจะทำให้จำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีนั้นมีค่าลดลง ซึ่งเมื่อระยะเวลาที่ทำให้จำนวนอะตอมลดลงครึ่งหนึ่งนั้นเราเรียกว่าค่าครึ่งชีวิต (half-life,  $t_{1/2}$ ) โดยจะมีค่าเฉพาะเจาะจงของแต่ละไอโซโทป จากสมการที่ (2.2) เมื่อจำนวนอะตอมลดลงครึ่งหนึ่ง นั่นคือค่า  $N = N_0/2$  จะได้ว่า

$$\text{จาก } N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\text{เมื่อ เวลา } t = t_{1/2}$$

$$\frac{N}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{2} &= e^{-\lambda t_{1/2}} \\
 \ln \frac{1}{2} &= -\lambda t_{1/2} \\
 -0.693 &= -\lambda t_{1/2} \\
 t_{1/2} &= \frac{0.693}{\lambda}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

ค่าอายุเฉลี่ย (mean life,  $\tau$ ) ของอะตอมของธาตุกัมมันตรังสี คือ ผลรวมของเวลาที่ทุกๆ นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีชีวิตอยู่ต่อจำนวนนิวไคลด์ทั้งหมด เนื่องจากการสลายตัวเป็นแบบสุ่มทำให้แต่ละนิวไคลด์กัมมันตรังสีอาจมีชีวิตอยู่ได้ตั้งแต่ 0 จนถึงอนันต์ ซึ่งเมื่อทำการหาความสัมพันธ์และอินทิเกรต จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 \tau &= \int_0^{\infty} \frac{\lambda t N_0 e^{-\lambda t}}{N_0} dt \\
 \tau &= \frac{1}{\lambda}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

อย่างที่กล่าวแล้วว่ากัมมันตภาพ หรือความแรงของสารกัมมันตรังสี คือ ค่าที่แสดงอัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี หน่วยวัดค่ากัมมันตภาพที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีหลายหน่วย ได้แก่ คูรี (curie, Ci) และรัทเทอร์ฟอร์ด (Rutherford) เมื่อ

1 คูรี หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้กัมมันตภาพ  $3.7 \times 10^{10}$  ครั้งต่อวินาที

$$1 \text{ curie} = 3.7 \times 10^{10} \text{ disintegration per second (dps)}$$

1 รัทเทอร์ฟอร์ด คือ ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้กัมมันตภาพ  $10^6$  ครั้งต่อวินาที

$$1 \text{ rutherford} = 10^6 \text{ dps}$$

สำหรับหน่วยสากล (International System Units, SI units) กำหนด แบคเคอเรล (becquerel, Bq) เป็นหน่วยของกัมมันตภาพ เมื่อ

1 แบคเคอเรล หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้กัมมันตภาพ 1 ครั้งต่อวินาที

$$1 \text{ becquerel} = 1 \text{ dps}$$

#### 2.1.4 สมดุลกัมมันตภาพรังสี

การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีอาจเกิดแบบต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ ซึ่งหากมีระยะเวลาของการสลายตัวที่นานมากพอก็อาจจะเกิดสภาวะสมดุลกัมมันตภาพของนิวไคลด์แม่และนิวไคลด์ลูกซึ่งเป็นไปได้ 2 กรณี คือ สมดุลเซคูลาร์ (secular equilibrium) และสมดุลทรานเซียนต์ (transient equilibrium)[1]



ภาวะสมดุลแบบเชอูลาร์ นั้นเกิดธาตุกัมมันตรังสีสลายตัวต่อเนื่องโดยค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์แม่ยาวนานมาก มากกว่าค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์ลูกไม่น้อยกว่า 10 เท่า ดังนั้นจึงดูคล้ายกับว่าค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์แม่ไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่าจะมีการสลายตัวไปนาน



จากสมการที่ (2.8) หากจะเกิดสมดุลเชอูลาร์ได้จะต้องมีค่า  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของ B จะเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการสลายตัวของ B ไปเป็น C เพิ่มมากขึ้นด้วย ในที่สุดอัตราการเกิด B จะเท่ากับอัตราการเกิด C ซึ่งตัวอย่างของสมดุลแบบนี้ได้แก่ การเกิดสมดุลของเรเดียม-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) กับเรดอน-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) โดยเรเดียมมีค่าครึ่งชีวิต 1600 ปี เรดอนมีค่าครึ่งชีวิต 3.82 วัน เมื่อเราจะหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอะตอมของเรเดียมและเรดอนในสมดุลจะได้ว่า

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A - \lambda_B N_B \quad (2.9)$$

ถ้าเริ่มต้นมีจำนวนอะตอมของ A เป็น  $N_0$  ที่เวลา  $t$  เป็นศูนย์ จากสมการที่ (2.2) จะได้

$$N_A(t) = N_0 e^{-\lambda_A t} \quad (2.10)$$

เมื่อนำ สมการที่ (2.10) แทนลงในสมการที่ (2.9) จะได้ว่า

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_0 e^{-\lambda_A t} - \lambda_B N_B \quad (2.11)$$

ซึ่งจะแก้สมการเพื่อหาจำนวนอะตอม B ในเทอมเวลา  $t$  ด้วย Explicit Function ได้ว่า

$$N_B = N_A^0 (h_A e^{-\lambda_A t} + h_B e^{-\lambda_B t}) \quad (2.12)$$

นำสมการที่ (2.12) แทนในสมการที่ (2.11) เพื่อหาค่า  $h_A$  และ  $h_B$  จะได้

$$e^{-\lambda t} (-h_A \lambda_A - \lambda_A + h_B \lambda_B) = 0 \quad (2.13)$$

ค่า  $e^{-\lambda t}$  จะมีค่าเป็นศูนย์ไม่ได้ เพราะเวลา  $t$  ของการสลายตัวเกิดขึ้นตลอดเวลาจึงมีค่าเสมอ

$$-h_A \lambda_A - \lambda_A + h_B \lambda_B = 0$$

$$h_A (\lambda_B - \lambda_A) = \lambda_A$$

$$h_A = \frac{\lambda_A}{(\lambda_B - \lambda_A)}$$

ค่า  $h_B$  ถูกกำหนดโดยจำนวนอะตอมของ B ที่เวลา  $t$  เป็น 0 จะได้จากสมการที่ (2.12) ว่า

$$h_A + h_B = 0$$

$$h_A = -h_B \quad (2.14)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.12) จะได้จำนวนอะตอม B ( $N_B$ ) ดังนี้

$$N_B = \frac{N_A^0 \lambda_A}{(\lambda_B - \lambda_A)} (e^{-\lambda_A t} + e^{-\lambda_B t}) \quad (2.15)$$

ดังนั้นจำนวนกัมมันตภาพรังสี คือ

$$N_B \lambda_B = \frac{N_A^0 \lambda_A \lambda_B}{(\lambda_B - \lambda_A)} (e^{-\lambda_A t} + e^{-\lambda_B t})$$

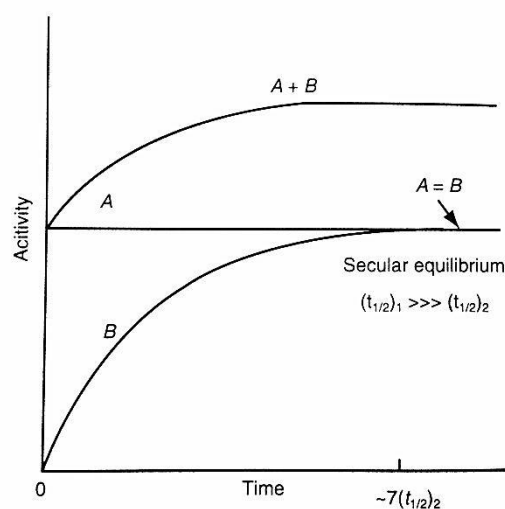
หรือ

$$N_B \lambda_B = \frac{(N_A \lambda_A) \lambda_B}{(\lambda_B - \lambda_A)} (1 + e^{-(\lambda_B - \lambda_A)t}) \quad (2.16)$$

จากการแก้สมการข้างต้นจะทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของจำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีในสมดุลเซคูลาร์ได้ ซึ่งการเกิดสมดุลระหว่างเรเดียม-226 และเรดอน-222 ก็สามารถทำได้เช่นกัน เมื่อทราบจำนวนอะตอมของเรเดียม-226 โดยกำหนดให้มีค่าเป็น  $N_A$  และค่าครึ่งชีวิต  $T_A$  ส่วนจำนวนอะตอมของเรดอน-222 มีค่าเป็น  $N_B$  และค่าครึ่งชีวิต  $T_B$  จะสามารถหาอัตราส่วนของกัมมันตภาพรังสีของเรดอน-222 ต่อเรเดียม-226 ในเทอมของค่าครึ่งชีวิตจากสมการที่(2.16) ได้เป็น

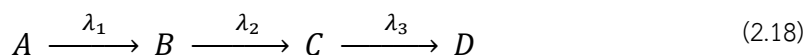
$$\frac{N_B \lambda_B}{N_A \lambda_A} = \frac{T_A \left[ 1 - \left( e^{-\left(\frac{T_A - T_B}{T_A}\right) \lambda_B t} \right) \right]}{T_A - T_B} \quad (2.17)$$

จากสมการที่(2.17) เราเรียกอัตราส่วนนี้ว่า Build up factor เริ่มจากเรเดียม-226 สลายตัวเป็นเรดอน-222 ซึ่งจะเกิดสมดุลเซคูลาร์ใช้เวลาประมาณ 28 วัน หรือประมาณ 7 เท่าของค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์ลูก



รูปที่ 2.2 ค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์แม่ (A) นิวไคลด์ลูก (B) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่ากัมมันตภาพของแม่ และค่ากัมมันตภาพรวม (A+B) เมื่ออยู่ในสภาพสมดุลเซคูลาร์

สภาวะสมดุลทรานเซียนต์ (Transient equilibrium) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการสลายตัวแบบต่อเนื่องของธาตุกัมมันตรังสีโดยค่าครึ่งชีวิตของธาตุแม่และธาตุลูกไม่ต่างกันมากนัก โดยเมื่อเข้าสู่สมดุลทรานเซียนต์กัมมันตภาพรังสีของ B จะลดลงด้วยค่าครึ่งชีวิตของ A ตัวอย่างของสมดุลแบบนี้ ได้แก่ การสลายตัวของเรดอน-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $t_{1/2} = 3.82$  วัน) และมีนิวไคลด์ลูกค่าครึ่งชีวิตสั้นเป็นพอโลเนียม-218 ( $^{218}\text{Po}$ ,  $t_{1/2} = 3$  นาที), ตะกั่ว-214 ( $^{214}\text{Pb}$ ,  $t_{1/2} = 26.8$  นาที), บิสมัท-214 ( $^{214}\text{Bi}$ ,  $t_{1/2} = 19.7$  นาที) และพอโลเนียม-210 ( $^{210}\text{Po}$ ) ลำดับตามสมการที่ (2.18)



เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 4 ชั่วโมงจะเกิดสมดุลตามสมการการสลายตัวของ Bateman ซึ่งมีเงื่อนไขว่า เมื่อเวลาเริ่มต้น  $t = 0$  จะมีแต่อะตอมของธาตุแม่นั้นคืออะตอมของ  $A_0$  ส่วนอะตอมของธาตุอื่นๆ ได้แก่ A,B,C,...,M,N เป็นศูนย์หมด และกำหนดให้  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C, \dots, \lambda_M, \lambda_N$  เป็นค่าคงที่ของการสลายตัวของธาตุ A,B,C,...,M,N ตามลำดับ เมื่อเวลา  $t$  ใดๆ จำนวนอะตอมของ N จะหาได้จากการอินทิเกรตสมการ

$$\frac{dN}{dt} = M\lambda_M - N\lambda_N \quad (2.19)$$

ซึ่ง M ถูกกำหนดค่ามาจาก สมการการสลายตัวแบบอนุกรมเหมือนสมการที่ (2.19) สำหรับผลบวกของผลผลิตทั้งหมด N ได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (2.19) เป็น

$$N = A_0(h_a e^{-\lambda_a t} + h_b e^{-\lambda_b t} + \dots + h_m e^{-\lambda_m t} + h_n e^{-\lambda_n t}) \quad (2.20a)$$

และค่าคงที่ของสมการที่ (2.20a) หาได้จากค่าคงที่ของการสลายตัว ดังนี้

$$\begin{aligned} h_a &= \frac{\lambda_a}{(\lambda_n - \lambda_a)} \times \frac{\lambda_b}{(\lambda_b - \lambda_a)} \times \frac{\lambda_c}{(\lambda_c - \lambda_a)} \times \dots \times \frac{\lambda_m}{(\lambda_m - \lambda_n)} \\ h_b &= \frac{\lambda_a}{(\lambda_a - \lambda_b)} \times \frac{\lambda_b}{(\lambda_n - \lambda_b)} \times \frac{\lambda_c}{(\lambda_c - \lambda_b)} \times \dots \times \frac{\lambda_m}{(\lambda_m - \lambda_b)} \\ h_m &= \frac{\lambda_a}{(\lambda_a - \lambda_m)} \times \frac{\lambda_b}{(\lambda_b - \lambda_m)} \times \frac{\lambda_c}{(\lambda_c - \lambda_m)} \times \dots \times \frac{\lambda_m}{(\lambda_n - \lambda_m)} \\ h_n &= \frac{\lambda_a}{(\lambda_n - \lambda_n)} \times \frac{\lambda_b}{(\lambda_b - \lambda_n)} \times \frac{\lambda_c}{(\lambda_c - \lambda_n)} \times \dots \times \frac{\lambda_m}{(\lambda_m - \lambda_n)} \end{aligned} \quad (2.20b)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขต เมื่อ  $N = 0$  ที่  $t = 0$  ค่าคงที่ในสมการที่ (2.20b) มีผลรวมเป็นศูนย์จะได้ว่า

$$h_a + h_b + h_c + \dots + h_m + h_n = 0 \quad (2.20c)$$

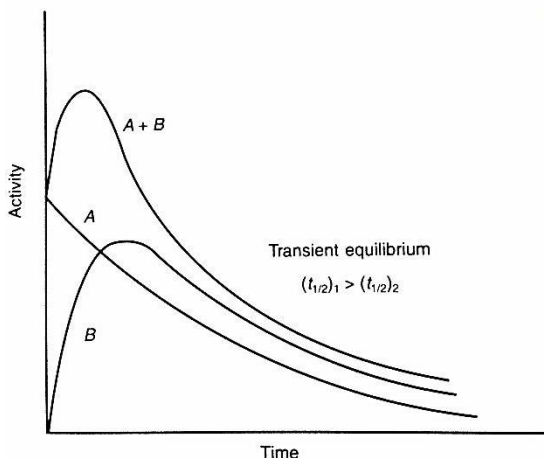
ซึ่งจากสมการที่ (2.20a) จะเป็นสมการในรูปทั่วไป ซึ่งจากตัวอย่างการสลายตัวของ เรดอน-222 ไปเป็นผลผลิตที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้นดังที่กล่าว จะสามารถหาค่าจำนวนอะตอม D ในทอม เอกซ์โพเนนเชียลของเวลาได้ดังนี้

$$D = \frac{\lambda_a}{(\lambda_d - \lambda_a)} \times \frac{\lambda_b}{(\lambda_b - \lambda_a)} \times \frac{\lambda_c}{(\lambda_c - \lambda_a)} \times A_0 e^{-\lambda_a t} \quad (2.21)$$

หากต้องการหาระยะเวลาที่บิสมัท-214 จะเข้าสู่สมดุลกับเรดอน-222 สามารถหาได้จาก อัตราส่วนระหว่างค่ากัมมันตรังสีของ D คือ  $N_d \lambda_d$  และของ A คือ  $N_a \lambda_a$  จะสามารถเขียนสมการที่ (2.21) ใหม่ ได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{N_d \lambda_d}{N_a \lambda_a} &= \frac{\lambda_b}{(\lambda_b - \lambda_a)} \times \frac{\lambda_c}{(\lambda_c - \lambda_a)} \times \frac{\lambda_d}{(\lambda_d - \lambda_a)} \\ &= \frac{T_a}{(T_a - T_b)} \times \frac{T_a}{(T_a - T_c)} \times \frac{T_a}{(T_a - T_d)} \\ &= 1.0089 \end{aligned} \quad (2.22)$$

โดยเมื่อเวลาผ่านไปอัตราส่วนระหว่างค่ากัมมันตรังสีของบิสมัท-214 และเรดอน-222 จะลู่เข้าหา 1.0089 และเข้าสู่สมดุลทรานเซียนต์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 3 ชั่วโมง[7]



รูปที่ 2.3 กัมมันตภาพของนิวไคลด์แม่ (A) นิวไคลด์ลูก (B) และค่ากัมมันตภาพรวม (A+B) เมื่อเกิด สมดุลทรานเซียนต์

## 2.2 ก๊าซเรดอน

เมื่อต้องการตรวจวัดก๊าซเรดอน สิ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการพัฒนาระบบการตรวจวัด และการเปรียบเทียบคือการทำความเข้าใจในคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและสมบัติของอะตอม ซึ่งจะสามารถทำให้การตรวจวัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ เช่น จุดเดือดและจุดหลอมเหลวจะช่วยให้ระบุได้ว่า ก๊าซเรดอนควรติดอยู่กับก๊าซกลุ่มใด เป็นต้น[9]

### 2.2.1 คุณสมบัติทั่วไป

สัญลักษณ์, เลขอะตอม :	Rn , 86
อนุกรมเคมี :	ก๊ากมีตระกูล
หมู่, คาบ, บล็อก :	18, 6, p
สี :	ไม่มีสี
มวลอะตอม :	222.02 กรัม/โมล
การจัดเรียงอิเล็กตรอน :	$4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^6$
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน :	2, 8, 18, 32, 18, 8

### 2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

สถานะ :	แก๊ส
จุดหลอมเหลว :	202 K (-71 °C)
จุดเดือด :	211.3 K (-61.7 °C)
ความร้อนของการหลอมเหลว :	3.247 kJ/mol
ความร้อนของการกลายเป็นไอ :	18.10 kJ/mol
ความร้อนจำเพาะ :	(25 °C) 20.786 J/(mol·K)

### 2.2.3 คุณสมบัติของอะตอม

โครงสร้างผลึก :	cubic face centered
สถานะออกซิเดชัน :	0
พลังงานไอออไนเซชัน (ระดับที่ 1) :	1037 kJ/mol
รัศมีอะตอม (คำนวณ) :	120 pm
รัศมีโควาเลนต์ :	145 pm

### 2.2.4 คุณสมบัติอื่นๆ

การจัดเรียงทางแม่เหล็ก :	ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน :	(300 K) 3.61 W/(m·K)
ค่าครึ่งชีวิต :	3.824 วัน
การสลายตัว :	อนุภาคแอลฟา
พลังงานการสลายตัว :	5.590 MeV
ผลิตภัณฑ์ของการสลายตัว :	$^{218}\text{Po}$

เรดอนมีสัญลักษณ์ทางเคมี Rn และมีเลขอะตอม 86 เป็นสารกัมมันตรังสีที่ไม่มีสี กลิ่น หรือ รส แต่ในกรณีที่มีการลดอุณหภูมิลงจะปรากฏสีขึ้น อยู่ในอนุกรมการสลายตัวหลายอนุกรมแต่ส่วนใหญ่จะพบไอโซโทป  $^{222}\text{Rn}$  ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 3.82 วัน ซึ่งปกติแล้วจะมีสถานะเป็นแก๊สและมี

อันตรายมากหากเข้าสู่ร่างกายเพราะสามารถปลดปล่อยอนุภาคอัลฟาได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็ง เรดอนจัดอยู่ในกลุ่มของก๊าซเฉื่อยแต่ก็ยังมีสารประกอบที่สมบูรณ์อย่างเรดอนพลูออไรด์ ทั้งนี้เรดอนอีกไอโซโทปหนึ่งที่พบมากเช่นกันคือโทรอนหรือเรดอน-220 ซึ่งอยู่ในอนุกรมทอเรียม

## 2.3 NORM ในแหล่งน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ

[10]ช่วงทศวรรษที่ 1980 ได้มีการพบกัมมันตรังสีในกระบวนการผลิตน้ำมันและก๊าซธรรมชาติในทะเลเหนือต่อมาในปี ค.ศ. 1986 ได้มีรายงานพบว่าธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติหรือ NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) ในท่อที่ผ่านกระบวนการผลิตจากหลุมเจาะที่มลรัฐมิสซิสซิปปี สหรัฐอเมริกา จากนั้นในหลายๆแหล่งผลิตในสหรัฐอเมริกาก็ได้ทำการสำรวจรังสีในกระบวนการผลิตของตนเอง และพบว่าในหลายๆตำแหน่งได้มีการตรวจพบ NORM กระจายอยู่ทั่วไป โดยมีอยู่ในปริมาณและระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกันไป

NORM หรือธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาตินั้นเกิดขึ้นมาพร้อมกับโลกโดยมีปรากฏพบแล้วประมาณ 60 ชนิด ซึ่งจัดแบ่งอยู่ในอนุกรมการสลายตัวทั้ง 4 โดยเราจะให้ความสำคัญกับอนุกรมยูเรเนียมและอนุกรมทอเรียมเป็นพิเศษเพราะจะมีการสลายตัวให้เรดอนออกในซึ่งในอนุกรมยูเรเนียมจะสลายให้เรเดียม-226 ซึ่งเป็นธาตุแม่ของเรดอน-222 ส่วนอนุกรมทอเรียมจะสลายตัวให้โทรอนหรือเรดอน-220 ซึ่งเรดอนทั้ง 2 ตัว จะมีการสลายตัวให้อนุภาคอัลฟาออกมาซึ่งนับได้ว่าเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์อย่างร้ายแรงกรณีที่เรดอนเข้าสู่ร่างกายมนุษย์แล้ว ซึ่งมีโอกาสเป็นไปได้เนื่องจากเรดอนดังกล่าวมีสถานะเป็นก๊าซซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตปิโตรเลียมพบก๊าซเรดอนสะสมอยู่ที่มาของ NORM ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมมีสาเหตุดังต่อไปนี้

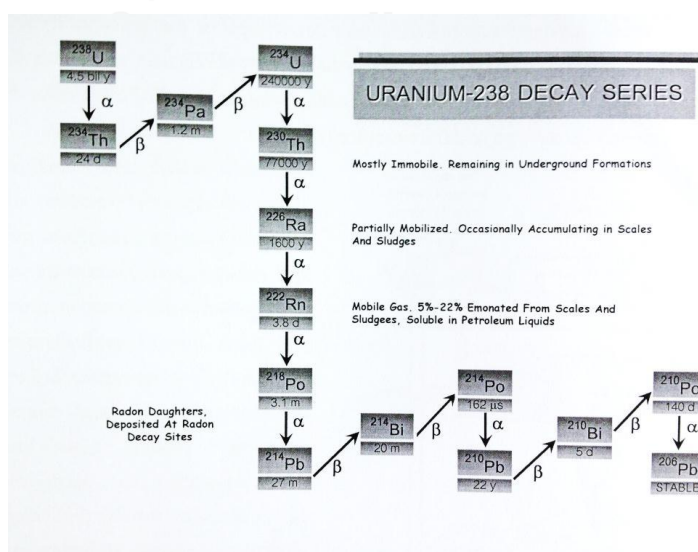
โดยปกติในชั้นหินหรือแหล่งกำเนิดปิโตรเลียมจะพบ NORM ในความเข้มข้นแตกต่างกันชั้นหิน shale จะพบธาตุกัมมันตรังสีในปริมาณที่สูงกว่าค่าเฉลี่ยทั่วไป ธาตุเหล่านี้สะสมอยู่ในแหล่งผลิตจึงมีการแทรกตัวเข้าสู่กระบวนการผลิตได้ตามความสามารถในการละลายของมัน อย่างไรก็ตามลักษณะทางกายภาพและเคมีของแหล่งปิโตรเลียมมีแนวโน้มที่จะเพิ่มความสามารถในการละลายของธาตุเหล่านี้เข้าสู่กระบวนการผลิตได้ ธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตน้ำมันหรือก๊าซที่มีอยู่แล้วในเปลือกโลก คือ ธาตุโพแทสเซียม ธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุลูกของมัน ซึ่งการสลายตัวในอนุกรมยูเรเนียมและทอเรียม มีธาตุที่งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญคือ เรเดียม (ธาตุตั้งต้นก่อนเป็นก๊าซเรดอน) และก๊าซเรดอน เนื่องจากธาตุยูเรเนียมและทอเรียมมีความสามารถในการละลายในน้ำและน้ำมันต่ำจึงคงอยู่ในชั้นหิน ส่วนเรเดียมมีความสามารถในการละลายในน้ำได้สูงกว่า โดยเฉพาะน้ำใต้ดินที่มีสภาพเค็มหรือมีสารละลายคลอไรด์ (chloride) ปนอยู่ ดังนั้นจึงตรวจพบธาตุเรเดียมในน้ำของกระบวนการผลิต ส่วนเรดอนเป็นนิวไคลด์ลูกของเรเดียมมีสถานะเป็นก๊าซและ

ละลายได้ในน้ำและน้ำมัน จึงสามารถแพร่เข้าสู่อุปกรณ์ต่างๆได้โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติเพราะก๊าซเรดอนก็ยังสามารถปะปนในก๊าซมากกว่าในน้ำ

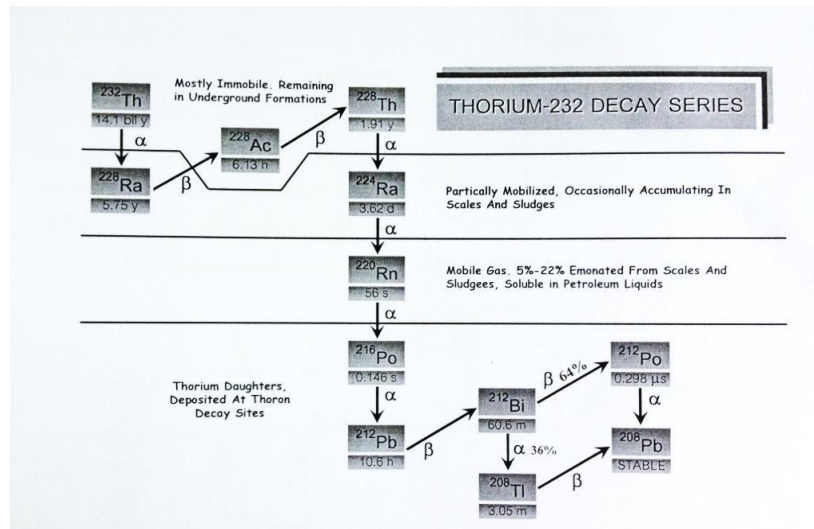
ตารางที่ 2-1 ความเข้มข้นของยูเรเนียม ทอเรียม และเรเดียมในชั้นหินต่างๆ[11]

Type of sample		<sup>238</sup> U		<sup>232</sup> Th		<sup>226</sup> Ra	
		ppm	mBq/g	ppm	mBq/g	Ppm	mBq/g
Igneous	Granite	2-10	25-120	5-30	20-120	0.5-4	25-120
	Gabbros	0.5-2	5-25	2-6	5-25	0.1-0.5	5-25
	Basalt	0.1-1	1-10	0.3-4	1-15	0.02-0.5	1-10
	Ultramafics	<0.02	<0.02	<0.05	<0.2	<0.01	<0.2
Sedimentary	Shale	2-4	25-50	5-15	20-120	0.05-1	25-50
	Limestone	1-3	10-40	0-3	0-10	0.2-1	10-40
	Speleothem	1-3	10-40	0-3	0-10	0.2-1	10-40
	Coral	2-4	25-40	<0.01	<0.04	0.5-1	25-50
	Clay	1-4	10-50	1-15	5-60	0.2-1	10-50

ในกระบวนการผลิตปิโตรเลียมเมื่อน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติรวมทั้งน้ำใต้ดินถูกสูบขึ้นมาจากใต้ดิน ความดันในบ่อน้ำมันจะลดลงเรื่อยๆ น้ำที่อยู่บริเวณโดยรอบบ่อน้ำมันจึงซึมเข้าสู่บ่ออยู่ตลอดเวลาและชะเอา NORM ที่อยู่รอบบริเวณนั้นมาด้วย บ่อน้ำมันที่มีอายุการใช้งานมานานจะมีสัดส่วนของน้ำที่ปนมากับน้ำมันปริมาณสูงกว่าบ่อที่มีอายุการใช้งานน้อย ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะพบธาตุเรเดียมปะปนในน้ำในปริมาณที่สูงกว่า



รูปที่ 2.4 แสดงอนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม 238 หรืออนุกรมยูเรเนียม ซึ่งมีเรดอน-222 อยู่ในลำดับที่ 7

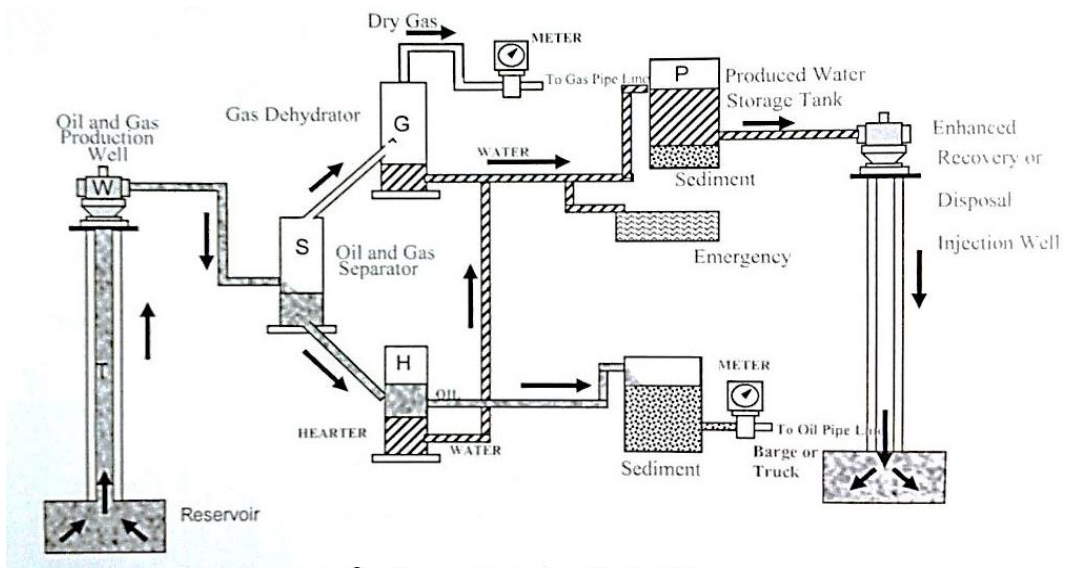


รูปที่ 2.5 แสดงอนุกรมการสลายตัวของทอเรียม ซึ่งมีทอรอนหรือเรดอน-220 อยู่ในลำดับที่ 6

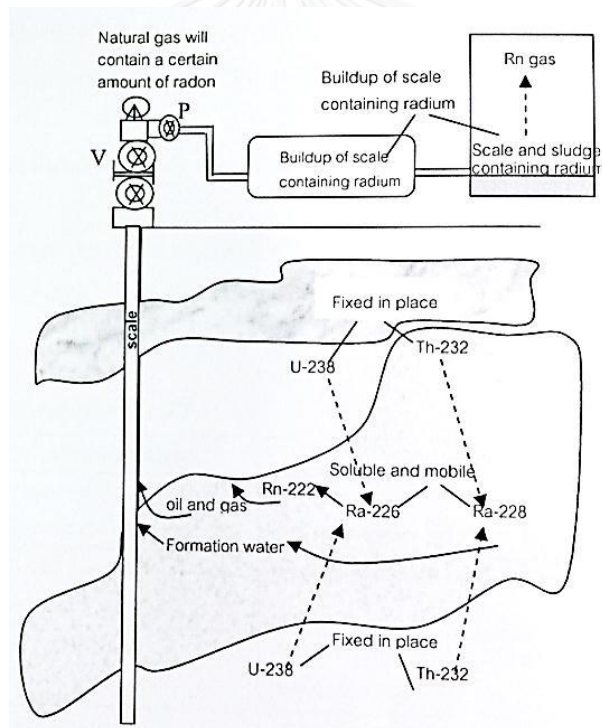
นอกจากนี้ขณะที่น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และน้ำใต้ดินถูกสูบขึ้นมา จะมีการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิและความดัน ซึ่งส่งผลให้อิออนของธาตุหมู่ที่สองของตารางธาตุได้แก่ เรเดียม แบริียม แคลเซียม และสตรอนเทียมซึ่งละลายอยู่ในน้ำเกิดการรวมตกตะกอน (co-precipitate) ในรูปของ สารประกอบซิลเฟต หรือ คาร์บอเนต ซึ่งเป็นคราบของแข็งหรือตะกรัน (hard scale) เกาะติดตามผิวด้านในของท่อส่งน้ำมัน (Tubular, T) หัวบ่อ (Well head, W) และปลอกในของอุปกรณ์ Valve (VX, Pump(P) หรือตกตะกอนร่วมกับ silicate และคาร์บอเนต ในรูปของ Sludge ตามอุปกรณ์แยก (Separators, S) , Heater/treatment(G) ถังเก็บน้ำ (Storage tank, P) หรือตามอุปกรณ์ต่างๆในกระบวนการผลิตที่น้ำ (produced water หรือ formation water) ไหลผ่านดัง โดย ค่ากัมมันตภาพของเรเดียมในน้ำและคราบที่เกาะในท่อนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณเรเดียมที่มีอยู่ในแหล่งน้ำมันและโครงสร้างธรณีวิทยาบริเวณนั้น[10]

นอกจากนี้ในแหล่งน้ำมันและก๊าซธรรมชาติมักพบธาตุเรดอน (Radon, Rn) ซึ่งเป็นนิวไคลด์ลูกของธาตุเรเดียมมีสถานะเป็นก๊าซเฉื่อยซึ่งละลายได้ทั้งในน้ำและในสารอินทรีย์ ดังนั้นในการผลิตน้ำมันและก๊าซธรรมชาติจึงพบก๊าซเรดอนปะปนขึ้นมากับน้ำและก๊าซด้วยเสมอ เนื่องจากสถานะที่เป็นก๊าซทำให้เรดอนจึงเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซธรรมชาติได้ง่าย ก๊าซเรดอนมีค่าครึ่งชีวิตสั้น (3.82 วัน) จะสลายตัวกลายเป็นผงอนุภาค  $^{210}\text{Pb}$  เคลือบติดภายในท่อที่ใช้ขนส่งก๊าซ (gas line) และติดไปกับก๊าซธรรมชาติหรือผลิตภัณฑ์ซึ่งแต่ละแหล่งได้มีการบันทึกไว้





รูปที่ 2.6 แผนผังแสดงอุปกรณ์สำคัญที่เกิดการสะสมของ NORM ในกระบวนการผลิตปิโตรเลียม



รูปที่ 2.7 แสดงทิศทางการละลายและการเคลื่อนที่ของเรเดียมและเรดอนในแหล่งผลิตปิโตรเลียม

วิธีที่ดีที่สุดที่จะทราบได้ว่าแหล่งผลิตนั้น ๆ มีปริมาณ NORM หรือปริมาณรังสีสูงมากน้อยหรือไม่คือ ทำการตรวจวัดปริมาณรังสีในแต่ละส่วนของกระบวนการผลิต โดยรูปแบบของ NORM ที่พบในกระบวนการผลิตปิโตรเลียม นอกจากนี้อาจพบ NORM ปนเปื้อนในดินและน้ำ บริเวณที่มีการกำจัดของเสีย หรือบริเวณที่ปล่อยทิ้งของ Produced water

ตารางที่ 2-2 รูปแบบของ NORM ที่พบในกระบวนการผลิตปิโตรเลียม[12]

Type	Radionuclides	Characteristics	Occurrence
<b>Ra scales</b>	Ra-226, Ra-228, Ra-224 and their progeny	Hard deposits of Ca, Sr, Ba sulphates and carbonates	Wet parts of production installations. Well completions
<b>Ra sludge</b>	Ra-226, Ra-228, Ra-224 and their progeny	Sand, clay, paraffin, heavy metals	Separators, skimmer tanks
<b>Pb deposits</b>	Pb-210 and its progeny	Stable lead deposits	Wet parts of gas production installations. Well completions
<b>Pb films</b>	Pb-210 and its progeny	Very thin films	Oil and gas treatment and transport
<b>Po films</b>	Po-210	Very thin films	Condensates treatment facilities
<b>Condensates</b>	Po-210	Unsupported	Gas production
<b>Natural gas</b>	Rn-222, Pb-210, Po-210	Noble gas, Plated on surfaces	Consumers domain, Gas Treatment and Transport systems
<b>Produced water</b>	Ra-226, Ra-228, Ra-224 and/or Pb-210	More or less saline, large volumes in oil production	Each production facility

ตารางที่ 2-3 ความเข้มข้นของเรดอนในก๊าซธรรมชาติ (Natural gas, NG) และในก๊าซธรรมชาติเหลว (Natural gas liquids, NGL) ในประเทศต่าง ๆ [5]

Sample description	Country/location	Reported range $^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )	Reference
NG	Africa		
	Algeria	40-1,200	Hamlet et al(2003)
	Nigeria	37-111	UNSCEAR(1977)
	Europe		
	UK	39-360	Holland(1998)
		40-3,400	Dixon(2001)
	Netherlands	5-200,000	Jonkers et al.
		40-1,600	Dixon(2001)
	Elsewhere	0-5,000	SIMP(1993)
	Germany	37-370	UNSCEAR(1977)
	40-360	Dixon(2001)	
North Sea	74-148	UNSCEAR(1977)	
Borneo	37-111	UNSCEAR(1977)	
Canada			
Alberta	370-7,585	UNSCEAR(1977)	
	370-7,600	Dixon(2001)	

ตารางที่ 2-3 (ต่อ) ความเข้มข้นของเรดอนในก๊าซธรรมชาติ (Natural gas, NG) และในก๊าซธรรมชาติเหลว (Natural gas liquids, NGL) ในประเทศต่าง ๆ [5]

Sample description	Country/location	Reported range 222Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	Reference
NG	Ontario	248-29,600	UNSCEAR(1977)
		150-3,400	Dixon(2001)
	British Columbia	14,430-19,980	UNSCEAR(1977)
	USA		
	Colorado, N. Mexico	37-5,920	UNSCEAR(1977)
	Texas, Kansas,	37-52,650	UNSCEAR(1977)
	Texas, Kansas	190-54,000	Dixon(2001)
	Texas, Panhandle	370-1,924	UNSCEAR(1977)
	Colorado	470-1,665	UNSCEAR(1977)
	Colorado	410-1,670	Dixon(2001)
California	37-3,700	UNSCEAR(1977)	
		40-4,000	Dixon(2001)
	Asia		
	China Beijing	49-88	RCA report(2001)
NGL - C2	Algeria	300-2,650	Hamat et al.(2003)
	UK	522	Holland(1998)
	Netherlands	300-18,000	Jonkers et al(1997)
NGL - C3	Algeria	1,085-5,800	Hamat et al.(2003)
	UK	940	Holland(1998)
	Netherlands	150,000-380,000	Jonkers et al(1997)

## 2.4 ก๊าซธรรมชาติ

ก๊าซธรรมชาติ (อังกฤษ: Natural gas) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งจะประกอบด้วย อะตอมไฮโดรเจนและคาร์บอน เกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์ที่หลายร้อยล้านปี ซึ่งสามารถแยกส่วนประกอบได้เป็นมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทน เพนเทน เป็นต้น หรือหมายถึงปิโตรเลียมที่มีสภาพเป็นก๊าซ ณ อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน ในแหล่งธรรมชาติอาจมีเฉพาะมีเทนหรืออีเทน แต่ในบางแหล่งอาจมีโพรเพน และบิวเทนเจือปนอยู่ ซึ่งถ้าแยกโพรเพนและบิวเทนออกมาบรรจุลงในถังแก๊ส เรียกว่าแก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas, LPG) หรือแก๊สหุงต้ม[13]

ก๊าซธรรมชาติไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีสารพิษ ถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัยสูงสุดผลิตภัณฑ์หนึ่งในปัจจุบัน เมื่อเผาไหม้แล้วจะเป็นเชื้อเพลิงสะอาดและส่งผลกระทบบกแกสิ่งแวดล้อมน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเตาและถ่านหิน ด้วยเหตุนี้หลายประเทศจึงนิยมใช้ก๊าซธรรมชาติกันอย่างแพร่หลาย อุตสาหกรรมการผลิตก๊าซธรรมชาติจึงมีการพัฒนาขึ้น ทั้งการเจาะสำรวจ การผลิต และการขนส่ง โดยประเทศที่มีแหล่งสำรองก๊าซธรรมชาติมากที่สุดคือ รัสเซีย อิหร่าน และกาตาร์

### 2.4.1 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติ

เนื่องจากก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงที่เกิดจากซากพืชซากสัตว์ (fossil fuel) จึงมักพบอยู่ร่วมกับแหล่งน้ำมันดิบซึ่งจะมีองค์ประกอบโดยทั่วไปดังนี้

- สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbons) หรือพาราฟินิก ไฮโดรคาร์บอน (paraffinic hydrocarbons) โดยเฉพาะมีเทน (C1) และอีเทน (C2)
- ก๊าซเจือปน (impurities) ที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ COS, CS<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S
- ก๊าซเฉื่อย (inert and permanent gases) ได้แก่ He, Ar, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>
- ความชื้น (moisture) ซึ่งมักมีเกลือของโซเดียมเจือปน

นอกจากนี้อาจพบโลหะหนักและก๊าซเฉื่อยปนอยู่ด้วย เช่น แอมโมเนีย โปรท สารหนู เซเลเนียม ยูเรเนียม คริปตัน นีออน ซีนอน และเรดอน เป็นต้น[14]

ถ้าแหล่งก๊าซธรรมชาติอยู่ร่วมกับแหล่งน้ำมัน จะพบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 3 อะตอมขึ้นไป (C3+) ปนอยู่ด้วย เรียกว่าก๊าซเปียก (wet gas) และก๊าซที่ไม่มีมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักหรือเกือบทั้งหมดเป็นมีเทนจะถูกเรียกว่าก๊าซแห้ง (dry gas) เพราะไม่มีไฮโดรคาร์บอนควบแน่นเมื่อลดอุณหภูมิหรือเพิ่มความดัน ในประเทศไทยมีการสำรวจองค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติในแต่ละแหล่งไว้ตามตารางที่ 2-4 [13]

ตารางที่ 2-4 ตัวอย่างองค์ประกอบก๊าซธรรมชาติของประเทศไทยจากกรมทรัพยากรธรณี

องค์ประกอบ % โดยโมล	เอราวัณ	ยูเนี่ยน ออยส์	เทกซัส แปซิฟิก	บงกช	สิริกิติ์	น้ำพอง
Methane	65.79	69.35	58.39	65.71	73.46	94.8
Ethane	8.9	9.65	4.98	5.03	11.65	0.61
Propane	4.77	3.67	2.45	2.48	8.08	0.07
i-Butane	1.17	0.8	0.5	0.62	1.7	0.02
n-Butane	1.04	0.67	0.52	0.58	2.36	0.01
i-Pentane	0.34	0.21	0.17	0.24	0.67	0
n-Pentane	0.22	0.13	0.11	0.14	0.54	0
n-Hexane	0.16	0.23	0.08	0.15	0.27	0
n-Heptane	0.14	0.12	0.01	0.17	0.04	0
n-Octane	-	0.05	-	-	-	0
Nitrogen	2.32	0.23	0.79	0.91	0.4	2.84
CO <sub>2</sub>	15.15	14.89	32	23.97	0.83	1.65

## 2.5 การวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน

ระบบการตรวจวัดก๊าซเรดอนมีอยู่ด้วยกันหลายแบบแตกต่างกันที่รังสีที่ทำการตรวจวัด และอุปกรณ์ในการวัด ซึ่งมาตรฐานที่คณะกรรมการป้องกันสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกาได้ระบุไว้ทั้งหมด 11 กระบวนการ โดยมีตัวอย่างของกระบวนการตรวจวัดดังนี้[15]

### 2.5.1 AC - Activated Charcoal Adsorption

เป็นกระบวนการตรวจวัดก๊าซเรดอนโดยนำภาชนะบรรจุถ่านกัมมันต์ไปเปิดในพื้นที่ที่จะเก็บตัวอย่างและเรดอนในอากาศจะถูกดูดซับบนเม็ดถ่านกัมมันต์ เมื่อเก็บตัวอย่างเสร็จตัวจึงปิดผนึกภาชนะและอาจส่งไปยังห้องปฏิบัติการในการวิเคราะห์การสลายตัวของแก๊มาจากเรดอนที่สะสมในถ่านกัมมันต์ จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วย scintillation ทำการคำนวณบนพื้นฐานข้อมูลการสอบเทียบเพื่อคำนวณความเข้มข้นเรดอนจากตัวอย่าง ชุดอุปกรณ์การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จะถูกออกแบบให้สามารถใช้เวลาในการดูดซับได้ถึง 7 วัน การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อใช้งานในที่มีความชื้นสูง

### 2.5.2 AT - Alpha Track Detection (filtered)

สำหรับวิธีการนี้จะใช้พลาสติกพิเศษขึ้นเล็กๆหรือฟิล์มบรรจุในภาชนะขนาดเล็ก อากาศที่ทำการทดสอบจะแพร่เข้าสู่ภาชนะทางรูอากาศผ่านแผ่นกรอง เมื่ออนุภาคแอลฟาจากเรดอนและผลิตภัณฑ์ที่สลายตัวออกมาจะเข้ากระทบพื้นผิวของแผ่นพลาสติกหรือฟิล์ม เมื่อตรวจวัดเสร็จจะทำการปิดผนึกภาชนะ ส่งกลับมาที่ห้องทดสอบเพื่อทำการอ่านรอยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์หรือเครื่องอ่านรอย ทำการวิเคราะห์รอยเพื่อคำนวณปริมาณของเรดอน ปกติจะทำการติดอุปกรณ์วัดไว้ 3 - 12 เดือนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเรดอน

### 2.5.3 UT - Unfiltered Track Detection

การตรวจวัดวิธีนี้ใช้หลักการเดียวกับวิธี AT จะต่างกันที่วิธีนี้จะไม่มีการปิดหรือตัวกรองเพื่อลดกัมมันตรังสีที่สลายตัวจากผลิตภัณฑ์ของเรดอน เมื่อไม่มีตัวกรองจะทำให้ช่วง "striking range" ที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับสมมูลระหว่างก๊าซเรดอนและผลิตภัณฑ์จากการสลายตัว โดยตัวตรวจจับรังสีที่เป็นลักษณะฟิล์มที่ไม่มีตัวกรองนั้นทำมาจากเซลลูโลสในเตรท โดยอาศัยหลักการของพลังงานการสลายตัว ซึ่งจะไม่ตรวจจับสัญญาณจากการสลายตัวของธาตูลูก แต่ก็ไม่ทั้งหมดดังนั้นจึงต้องชดเชยด้วยปัจจัยของการสอบเทียบและอัตราส่วนของสมมูล ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบัน EPA แนะนำว่าอุปกรณ์เหล่านี้ไม่สามารถนำมาใช้เมื่ออัตราส่วนสมมูลมีค่าน้อยกว่า 0.35 หรือมากกว่า 0.60 ในขณะที่ยังไม่ได้ปรับค่าด้วยปัจจัยการสอบเทียบ

#### 2.5.4 LS - Charcoal Liquid Scintillation

กระบวนการนี้อาศัยไวโอลหรือขวดพลาสติกขนาดเล็กสำหรับบรรจุผงถ่านกัมมันต์เหลวเพื่อการตรวจนับเรดอน หลังจากเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 2 - 7 วัน (ขึ้นอยู่กับการออกแบบ) ไวโอลดังกล่าวจะถูกปิดผนึกและส่งกลับห้องทดลองเพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณเรดอนที่จับมาได้จากผงถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการเดียวกับ AC

#### 2.5.5 CR - Continuous Radon Monitoring

ในกลุ่มกระบวนการนี้จะมีการนำเอาอุปกรณ์ที่บันทึกค่าแบบ real-time เข้ามาใช้ด้วย ซึ่งเป็นการตรวจวัดเรดอนแบบต่อเนื่อง อากาศจะถูกปั๊มเข้ามาและแพร่สู่หัววัด หัววัดจะเป็น scintillation cell หรือ ionization chamber ซึ่งจะทำให้การบันทึกค่าด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์และความเข้มข้นของก๊าซเรดอนสำหรับช่วงเวลาที่กำหนดไว้จะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำของเครื่องหรือส่งโดยตรงไปยังเครื่องพิมพ์

#### 2.5.6 EL - Electret Ion Chamber: Long-Term

สำหรับวิธีการนี้เครื่องตรวจนับจะมีลักษณะเป็นแผ่นดิสก์ไฟฟ้าสถิตเรียกว่า electret บรรจุอยู่ในภาชนะขนาดเล็ก (ion chamber) ในระหว่างช่วงเวลาการวัด ก๊าซเรดอนจะแพร่กระจายผ่านเข้าไปในภาชนะผ่านตัวกรองที่ ซึ่งการสลายตัวของเรดอนและธาตุลูกจะทำให้เกิดการลดลงของค่าไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจากการไอออนในเซชัน ซึ่งค่าปัจจัยของการสอบเทียบอุปกรณ์นั้นก็จะเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงและปริมาณความเข้มข้นของเรดอน การออกแบบ electret จะมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับวิธีการตรวจนับที่มีความเหมาะสมสำหรับการวัดระยะยาวหรือระยะสั้น เครื่องตรวจนับ EL อาจจะนำไปใช้สำหรับ 1-12 เดือน ซึ่งถ้านำไปใช้กับพื้นที่ที่มีปริมาณเรดอนสูงก็จะใช้ระยะเวลาน้อยลง

#### 2.5.7 GC - Grab Radon/Activated Charcoal

วิธีนี้ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการเก็บตัวอย่างเรดอนโดยใช้ปั๊มหรือพัดลมที่จะดึงอากาศผ่านตลับที่บรรจุด้วยถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้การออกแบบตลับและการระบบการไหลเวียนอากาศขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง ซึ่งจะใช้เวลาจาก 15 นาทีถึง 1 ชั่วโมง ตลับที่เก็บตัวอย่างแล้วจะถูกวางในภาชนะที่ปิดสนิทและถูกนำตัวไปยังห้องปฏิบัติการเช่นเดียวกับวิธีการ AC หรือ LS

### 2.5.8 GB - Grab Radon/Pump-Collapsible Bag

วิธีนี้จะใช้ถุงตัวอย่างทำจากวัสดุที่ป้องกันการหลุดรอดของเรดอน การเก็บตัวอย่างในพื้นที่นั้นอาศัยผู้เชี่ยวชาญซึ่งจะใช้ปั๊มแบบพกพาดูดอากาศใส่ในถุงแล้วขนส่งไปยังห้องปฏิบัติการในการวิเคราะห์ โดยปกติวิธีการวิเคราะห์คือการถ่ายโอนอากาศจากถุงไปยัง scintillation cell และดำเนินการวิเคราะห์ในลักษณะ grab radon/scintillation cell (GS) ที่อธิบายในหัวข้อถัดไป

### 2.5.9 GS - Grab Radon/Scintillation Cell

สำหรับวิธีการนี้ผู้ชำนาญการจะดึงอากาศผ่านตัวกรองเพื่อเอาธาตุลูกของเรดอนออกแล้วผ่านเข้าไปในลงใน scintillation cell และยังมีเปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดอากาศที่ผ่านเข้ามาในเซลล์ก่อนหน้าออกมาด้วยจนกว่าจะเกิดสมดุลกัน เซลล์ที่อยู่ในภาวะสมดุลกับอากาศที่ถูกทดลองจะถูกปิดผนึกแล้วนำมาวิเคราะห์ตัวอย่างอากาศที่มี window ของเซลล์วางอยู่บนหลอด photomultiplier เพื่อทำการนับ scintillations (light pulses) ของอนุภาคอัลฟาจากการสลายตัวของเรดอนที่พุ่งชนสารประกอบสังกะสีที่เคลือบภายในเซลล์ การคำนวณจะแปลงจำนวนที่นับได้มาเป็นความเข้มข้นเรดอน

### 2.5.10 SC - Three-Day Integrating Evacuated Scintillation Cell

สำหรับวิธีการนี้ scintillation cell จะถูกติดตั้งวาล์วควบคุมปริมาณและมาตรวัด negative pressure สิ่งที่สำคัญก่อนทำการจัดระบบวัดคือต้องทำให้ scintillation cell เป็นสุญญากาศ ที่พื้นที่ทำการเก็บตัวอย่างผู้เชี่ยวชาญจะบันทึกค่าแรง negative pressure และอัตราการเปิดของวาล์ว อัตราการไหลผ่านวาล์วจะเป็นไปอย่างช้า ๆ พอที่จะเติมเซลล์ได้ใน 3 วัน เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเจ้าหน้าที่ทำการปิดวาล์วและอ่าน negative pressure จากนั้นส่งเซลล์ไปยังห้องปฏิบัติการ ขั้นตอนการวิเคราะห์จะเป็นเช่นเดียวกับวิธี GS ความหลากหลายของวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับการบริหารวาล์วที่ทำการเก็บตัวอย่างอากาศ

### 2.5.11 PB - Pump-Collapsible Bag (1-day)

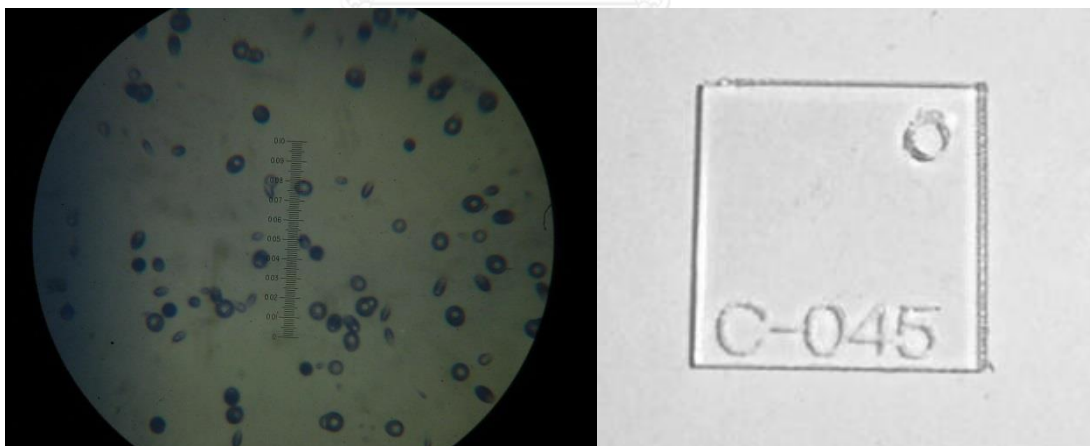
สำหรับวิธีการนี้จะใช้ถุงเก็บตัวอย่างที่ป้องกันการหลุดรอดของเรดอนโดยใช้ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง 24 ชั่วโมง โดยจะมีการตั้งค่าปั๊มดูดอากาศให้ดูดอากาศเข้ามาในปริมาณที่ไม่มากเพื่อให้พอดีกับถุงเก็บในระยะเวลาที่กำหนดไว้ กระบวนการหลังจากนั้นจะเหมือนกับวิธี GB

## 2.6 เทคนิคการตรวจวัดเรดอนด้วยฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39

เป็นการใช้เทคนิคตรวจวัดก๊าซเรดอนด้วยอุปกรณ์บันทึกรอย (Solid-state nuclear track detector – SSNTD) ด้วยฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ซึ่งเป็นวิธีการวัดเรดอนแบบแทรก-เอตช์ (Track Etch Method) นั้น เป็นการนับรอยอนุภาคอัลฟาที่เกิดจากการสลายตัวของเรดอนและธาตุลูก[10]

ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ทำจากพลาสติกชนิดโพลีอัลลิลไดกลีคอลคาร์บอเนต (Polyallyldiglycol carbonate, PAD CR-39) ซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1993 ปัจจุบันได้ถูกมาใช้เป็นเลนส์แว่นตา ในปี ค.ศ.1987 นักฟิสิกส์ที่มหาวิทยาลัย Berkeley แคลิฟอร์เนีย ได้รายงานว่า CR-39 สามารถวัดอนุภาคที่เป็นประจุได้ดี ต่อมาจึงมีบริษัทต่าง ๆ ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ในการตรวจวัดก๊าซเรดอน

หลักการในการตรวจวัดเรดอนด้วยฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 เป็นเทคนิคการวัดรังสีโดยอาศัยหลักการที่อนุภาคที่มีประจุ (อัลฟา) ชนกับฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 (เนื่องจากอนุภาคถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในอะตอมของวัตถุ) ทำให้จุดที่ถูกชนกับอนุภาคมีโครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนไป เกิดเป็นรอยที่เสียหายขนาดเล็กมาก เมื่อนำไปกัดด้วยสารเคมีที่เหมาะสมจะทำให้รอยขยายใหญ่ขึ้น จากนั้นทำการประเมินความหนาแน่นของรอยบนแผ่นพลาสติก โดยการนับรอยอนุภาคที่เข้าชนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์หรือโปรแกรมอ่านรอย



รูปที่ 2.8 (ซ้าย) ภาพแสดงลักษณะการเกิดรอยบนพลาสติก CR-39 (400 X) จากการตรวจวัดเรดอน

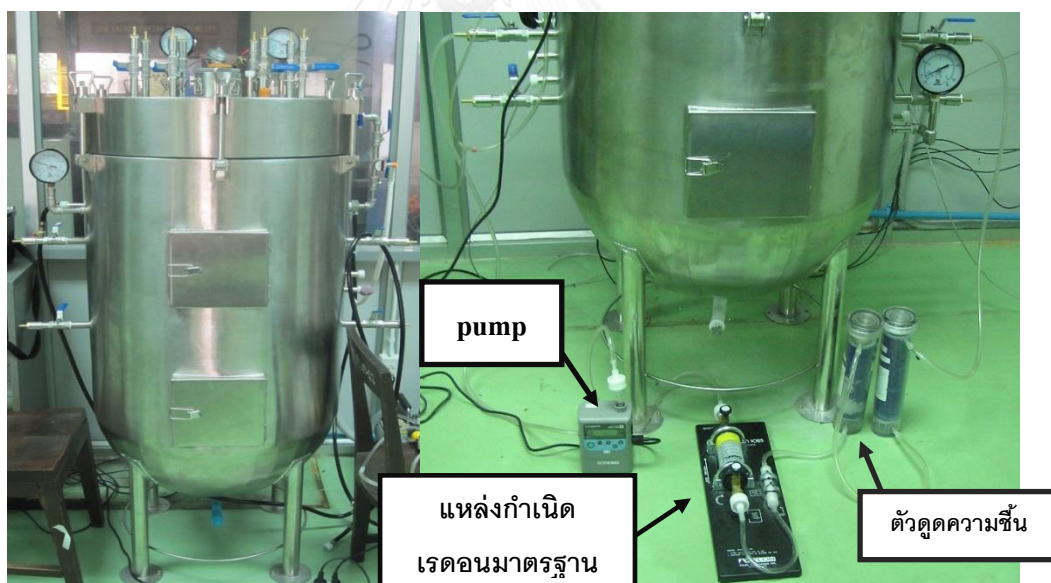
รูปที่ 2.9 (ขวา) แผ่นพลาสติก CR-39 ขนาด 1 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร มีสัญลักษณ์แสดงรหัสของแผ่น



## 2.7 ถังปรับเทียบก๊าซเรดอน

ระบบปรับเทียบแบบ exposure chamber ได้ถูกการออกแบบและจัดสร้างแชมเบอร์ขนาด 100 ลิตร ใช้ในการปรับเทียบก๊าซเรดอน ภายในแชมเบอร์จะมีระบบควบคุมอุณหภูมิ และระบบหมุนเวียนอากาศ โดยระบบควบคุมอุณหภูมิจะมีฮีทเตอร์ (Heater) และกัตัว쿨เลอร์ (Cooler) ทำหน้าที่ควบคุมและปรับอุณหภูมิภายในแชมเบอร์ให้เท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการ ส่วนระบบหมุนเวียนอากาศ จะติดตั้งพัดลมภายในแชมเบอร์ จำนวน 2 ตัว โดยพัดลมนี้จะเป็นตัวช่วยในการผสมก๊าซเรดอนภายในแชมเบอร์ให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ[10]

สำหรับการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อการตรวจวัดก๊าซเรดอน เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความดัน และปริมาณของ unattached progeny นั้น มีระบบควบคุมอุณหภูมิอยู่ภายในแชมเบอร์ สำหรับระบบควบคุมความชื้นนั้นจะติดตั้งอยู่ด้านนอกแชมเบอร์และเชื่อมต่อเข้าวาล์วที่ติดตั้งไว้กับตัวแชมเบอร์ โดยรอบ ๆ แชมเบอร์ได้ติดตั้งวาล์วไว้หลายจุด เพราะต้องทำการเชื่อมต่อกับระบบอื่น ๆ เข้ากับแชมเบอร์ด้วย เช่น ระบบของแหล่งกำเนิดเรดอน และระบบตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซเรดอน



รูปที่ 2.10 เรดอนแชมเบอร์และการติดตั้งแหล่งกำเนิดเรดอนมาตรฐาน

## บทที่ 3

### แผนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 หลักการวิจัยเบื้องต้น

หัวข้อของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาเทคนิคการตรวจวัดเรดอนในก๊าซธรรมชาติโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะมุ่งเน้นในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการวัดและการปรับเทียบระบบวัดเพื่อสร้าง Calibration Curve สำหรับการหาปริมาณเรดอนในก๊าซธรรมชาติ

การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการวัดนั้นทำได้หลายวิธีซึ่งมีคำถามนำร่อง 3 ข้อ คือ

1. กระบวนการวัดเบื้องต้นประกอบด้วยขั้นตอนใดบ้าง
2. มีขั้นตอนใดบ้างที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบวัดได้
3. ทดลองติดตั้งขั้นตอนหรืออุปกรณ์เข้าไปเพิ่มและเปรียบเทียบผลการทดลองกับขั้นตอนเดิม จากนั้นเปรียบเทียบกับกระบวนการวัดมาตรฐาน

#### 3.2 กระบวนการวัดเบื้องต้น

ก๊าซธรรมชาติจากหลุมขุดเจาะหรือแท่นผลิตจะถูกส่งเข้าสู่โรงแยกก๊าซด้วยท่อขนส่งซึ่งมีอุณหภูมิและความดันค่อนข้างสูง กระบวนการวัดปริมาณเรดอนในก๊าซธรรมชาติด้วยถ่านกัมมันต์เบื้องต้นจะนำเอาก๊าซธรรมชาติที่ต้องการตรวจวัดจากท่อส่งก๊าซ ไหลผ่านวาล์วลดความดันและผ่าน Regulator เพื่อควบคุมปริมาณก๊าซให้ได้ตามต้องการ จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างก๊าซด้วยถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์จะถูกบรรจุในภาชนะปิด ตัวอย่างก๊าซจะไหลผ่านถ่านกัมมันต์และปล่อยก๊าซส่วนที่เหลือออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยเรดอนที่ปนเปื้อนอยู่ในก๊าซธรรมชาติจะถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ดังกล่าว เมื่อเก็บตัวอย่างเสร็จจะต้องทำการปิดผนึกภาชนะบรรจุถ่านกัมมันต์ให้มิดชิดเพื่อป้องกันการหลุดรอดของเรดอนซึ่งจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ จากนั้นนำตัวอย่างส่งไปยังห้องทดลอง การตรวจวัดปริมาณเรดอนจะต้องทิ้งให้เรดอนสลายตัวเป็นธาตุลูกและเข้าสู่สมดุลอย่างน้อย 3 ชั่วโมง ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำตัวอย่างมาทำการวัดด้วยเทคนิคการวัดรังสีแกมมา (Gamma Spectrometry) และเปรียบเทียบกับ Calibration Curve หรือค่าปรับเทียบเพื่อหาปริมาณเรดอนในตัวอย่างก๊าซธรรมชาติ



รูปที่ 3.1 กระบวนการตรวจวัดเรดอนจากท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

### 3.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการวัด

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญ พบว่าการเก็บตัวอย่างก๊าซธรรมชาติเพื่อหาปริมาณเรดอนโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์นั้นมีปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการวัดได้หลายปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ ชนิด องค์ประกอบของก๊าซ เวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง ความชื้น เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้สามารถนำมาศึกษาและกำหนดเงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสมที่จะทำให้ค่าประสิทธิภาพในการวัดสูงที่สุดได้ แต่หากต้องควบคุมมากเกินไปจะทำให้เสียงบประมาณและระบบวัดจะยุ่งยากเกินความจำเป็น ดังนั้นเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการวัดในงานวิจัยนี้คือหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดก๊าซเรดอนในก๊าซธรรมชาติด้วยถ่านกัมมันต์และนำระบบวัดดังกล่าวมาสร้างเส้นแนวโน้มเพื่อใช้อ้างอิงในการตรวจวัดตัวอย่างก๊าซธรรมชาติในพื้นที่ต่าง ๆ ต่อไป

### 3.4 กระบวนการวัดที่ออกแบบสำหรับงานวิจัย

จากคำถามนำร่องทั้ง 3 ข้อ นำไปสู่การออกแบบกระบวนการวัดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในหัวข้อนี้จะระบุถึงการจัดลำดับอุปกรณ์และการวางแผนการทดลองเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของกระบวนการตรวจวัดเรดอนในก๊าซธรรมชาติโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ในขั้นตอนแรกของการออกแบบ คือ การทดสอบกระบวนการวัดเบื้องต้นโดยใช้อากาศเป็นตัวอย่งก๊าซในการทำการเปรียบเทียบเพื่อศึกษาการใช้งานของกระบวนการวัดด้วยการปฏิบัติจริง จากนั้นจะเป็นขั้นตอนการเลือกตัวอย่งก๊าซที่จะนำมาเปรียบเทียบ ซึ่งต้องมีองค์ประกอบใกล้เคียงกับก๊าซธรรมชาติมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ก๊าซมีเทนเพื่อนำมาผสมกับเรดอนมาตรฐานเพื่อเป็นก๊าซตั้งต้นสำหรับงานวิจัย

ในขั้นตอนที่ 2 คือการผสมก๊าซเรดอนที่รู้ความเข้มข้นจากแหล่งกำเนิดเรดอนมาตรฐานโดยใช้ถังผสมที่มีอยู่ในห้องวิจัยและการออกแบบระบบถังผสมเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ปริมาณก๊าซผสมตามที่ต้องการเพื่อให้ตรงตามเงื่อนไขงานวิจัยที่ทำการศึกษา

ขั้นตอนที่ 3 คือการตรวจวัดปริมาณเรดอนโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ก่อนการติดตั้งชุดอุปกรณ์เพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการวัดที่จะทำการออกแบบใหม่เพื่อให้ทราบค่าประสิทธิภาพของกระบวนการวัดเดิมเพื่อเป็นค่าอ้างอิงต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 คือการนำก๊าซที่ผสมแล้วไหลผ่านชุดอุปกรณ์เพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการวัดที่ออกแบบใหม่และทำการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาปริมาณเรดอนด้วยเทคนิคการวัดรังสีแกมมาเพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพกับการดูดซับเรดอนในขั้นตอนที่ 3

ปัจจัยจากองค์ประกอบของก๊าซเป็นเรื่องสำคัญ เนื่องจากก๊าซธรรมชาติประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอน C1 - C4 เป็นหลัก ยกเว้นบางแหล่งที่จะมีองค์ประกอบต่างกันไปบ้าง ในไทยก๊าซธรรมชาติจะมีองค์ประกอบของมีเทนอยู่มาก ซึ่งจุดเดือดของเรดอนจะอยู่ระหว่างอีเทนและโพรเพนตามตารางที่ 1-2 จากสมบัติดังกล่าวสามารถนำมาแยกเอามีเทนและอีเทนออกได้โดยหลักการของการควบแน่นด้วย Dry-ice ที่มีอุณหภูมิ  $-78^{\circ}\text{C}$

ทำการออกแบบอุปกรณ์เพื่อควบแน่นก๊าซธรรมชาติด้วย Cool Trap โดยนำก๊าซธรรมชาติไหลผ่านชุดอุปกรณ์สำหรับควบแน่น เช่น แท่งแก้วควบแน่น หรือ ท่อทองแดงที่ต่อกับภาชนะกักเก็บของเหลวที่ควบแน่นแล้ว โดยมีการติดตั้งระบบควบคุมความชื้นเพื่อป้องกันความชื้นแข็งตัวในหลอดหรือท่อควบแน่น เรดอนที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิกลับจะทำให้ของเหลวกลับมาเป็นก๊าซอีกครั้งและถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์อย่างช้า ๆ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการตรวจวัดรังสีแกมมา จากการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวจะทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับของถ่านกัมมันต์สูงขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ

## บทที่ 4

### วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 4.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี

1. หัววัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง HPGe ที่มีประสิทธิภาพ 30% ของ Canberra
2. เครื่องมือวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง รุ่น Inspector 2000 ของ Canberra
3. เครื่องคอมพิวเตอร์ พร้อมโปรแกรม Genie-2000 ของ Canberra, โปรแกรม Image J
4. เครื่องมือตรวจวัดเรดอนแบบต่อเนื่อง RAD-7
5. ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ขนาด 1 x 1 เซนติเมตร
6. กล้องจุลทรรศน์ ติดตั้งกล้องวิดีโอแบบ Real time
7. เครื่องบันทึกอนุกรมวิทยารุ่น Testo 480 พร้อมชุดอุปกรณ์วัดความชื้นและอุณหภูมิ
8. ถ่านกัมมันต์ Calgon Carbon PCB-6x16 mesh
9. แหล่งกำเนิดเรดอนมาตรฐาน Pyron electronics (RN-1025)
10. ก๊าซมีเทน 99.99%
11. ไนโตรเจนเหลว
12. น้ำแข็งแห้ง (คาร์บอนไดออกไซด์) ขนาด 1 กิโลกรัม/ก้อน
13. เมทานอล 99%
14. น้ำกลั่น
15. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดเม็ด
16. ครอบสำหรับบรรจุถ่านกัมมันต์ PVC (Charcoal Canister) ขนาด สูง 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร
17. ครอบกวดูดความชื้นที่บรรจุสารดูดความชื้นแคลเซียมซัลเฟต
18. ปีกเกอร์ ขนาด 500 และ 5,000 มิลลิลิตร
19. Flask ขนาด 250 มิลลิลิตร พร้อมจุกยางและท่อนำก๊าซ 2 ท่อ
20. อุปกรณ์ยึดจับเครื่องมือ
21. หลอดแก้วควบแน่น
22. ครอบกเก็บความเย็นทรงสูง สูง 42 เซนติเมตร
23. ถังบรรจุไนโตรเจนเหลว taylor-wharton รุ่น LD10
24. ถังเก็บความเย็นสี่เหลี่ยมขนาด 20 ลิตร
25. ถังเก็บความเย็นขนาด 50 ลิตร แบบล้อลาก

26. ถังเก็บความเย็นทรงกระบอก ขนาด 16 ลิตร 2 ถัง
27. กล่องพลาสติกชนิด absolute air tight ขนาด 7 ลิตร 8.7 ลิตร และ 16 ลิตร
28. วาล์วทองเหลืองขนาด 3 หุน
29. ท่อทองแดง ขนาด 3 หุน ยาว 3 เมตร
30. Regulator หรือ วาล์วลดแรงดันก๊าซ พร้อมท่อนำก๊าซ
31. ชุดอุปกรณ์ควบคุมความชื้นในก๊าซตัวอย่าง
32. สายยางสำหรับนำก๊าซขนาด 3 หุน
33. ถัง stainless steel สำหรับปรับเทียบเรดอนขนาด 100 ลิตร
34. ปุ่มอากาศรุ่น  $\Sigma 500$  siebeta
35. Flow meter ขนาด 5 ลิตรต่อนาที
36. อ่างน้ำร้อน
37. เตารีดไฟฟ้า
38. ผ้าใบบังแดดขนาดใหญ่

#### 4.2 การแบ่งชุดการทดลอง

เพื่อให้เป็นไปตามขอบเขตของงานวิจัย จึงได้มีการแบ่งชุดการทดลองไว้ดังนี้

1. การทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่อค่าประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์
  - 1.1. ชุดการทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของกระบวนการวัดเดิม
  - 1.2. ชุดการทดลองเพื่อศึกษาผลของมีเทนที่มีต่อกระบวนการวัด
  - 1.3. ชุดการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์
  - 1.4. ชุดการทดลองเพื่อศึกษาผลของความชื้นของก๊าซตัวอย่าง
2. การออกแบบกระบวนการเก็บตัวอย่างใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์
  - 2.1. การออกแบบระบบควบคุมแน่นเพื่อการเก็บตัวอย่างแบบต่อเนื่อง
  - 2.2. การออกแบบระบบควบคุมแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยน้ำแข็งแห้งและหลอดแก้ว
  - 2.3. การออกแบบระบบควบคุมแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยไนโตรเจนเหลวผสมเมทานอลและหลอดแก้วควบคุมแน่น
  - 2.4. การออกแบบระบบควบคุมแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยไนโตรเจนเหลว
  - 2.5. การออกแบบระบบควบคุมแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยน้ำแข็งแห้งและท่อทองแดง
3. การนำกระบวนการเก็บตัวอย่างใหม่ทั้ง 5 แบบ ในข้อ 2. ไปใช้งานในพื้นที่จริง
4. การใช้ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ทดสอบกระบวนการวัดที่ให้ผลดีที่สุด

### 4.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่อค่าประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

#### 4.3.1 ชุดการทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของกระบวนการวัดเดิม

4.3.1.1 ใช้เรดอนจากแหล่งกำเนิดเรดอนมาตรฐาน Pyron electronics (RN-1025) ที่มีกัมมันตภาพรังสี  $98.138 \text{ kBq.m}^{-3}$  (6 กันยายน ค.ศ.2006) อัดเข้าสู่ถังปรับเทียบเรดอนขนาด 100 ลิตร

4.3.1.2 ใช้เครื่องมือตรวจวัดเรดอนแบบต่อเนื่อง RAD-7 วัดค่ากัมมันตภาพรังสีของเรดอนในถังปรับเทียบเพื่อเป็นค่ามาตรฐานในการปรับเทียบอุปกรณ์อื่นๆ

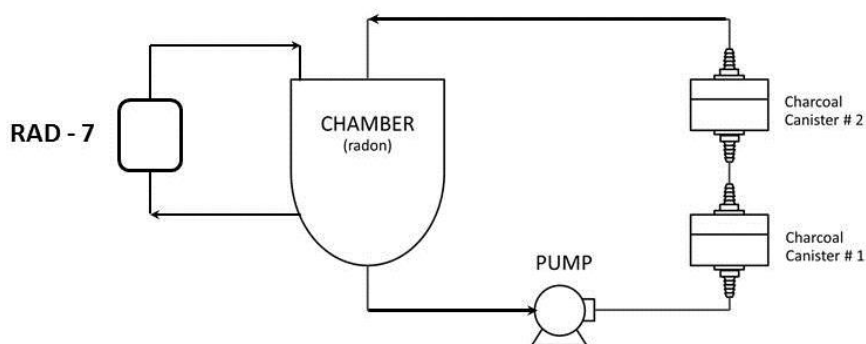
4.3.1.3 เตรียมกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วน้ำหนัก 80 กรัม จำนวน 2 กระบอก

4.3.1.4 ต่อบั๊มอากาศรุ่น  $\Sigma 500$  siebeta และกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ต่ออนุกรมกันในแนวตั้ง จากนั้นต่อเข้ากับถังปรับเทียบ แล้วจึงเปิดวาล์วถังปรับเทียบ

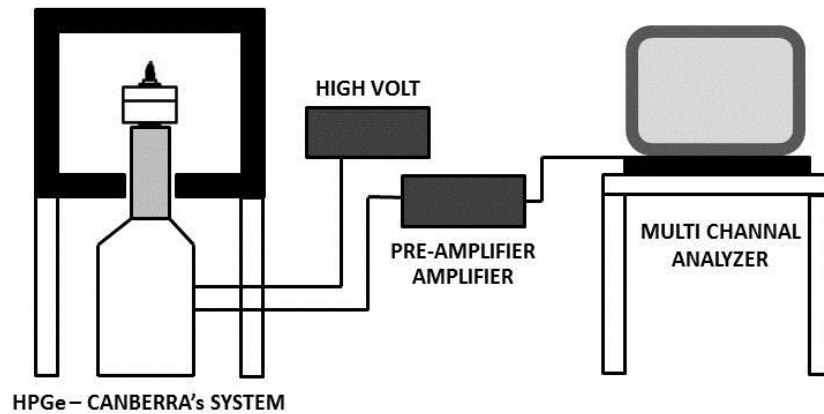
4.3.1.5 ปรับอัตราการไหลที่ 2 ลิตรต่อนาที จากนั้นเปิดบั๊ม ให้อากาศที่มีเรดอนที่ทราบค่ากัมมันตภาพรังสีไหลผ่านกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ เป็นเวลา 15 นาที

4.3.1.6 ปิดอุปกรณ์ทั้งหมด แยกกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ออกจากระบบ ทำการฉีกกระบอกด้วยเทปผ้าและจุกยาง นำใส่ในถุงซิปล็อคป้องกันการไหลเวียนอากาศและทิ้งไว้ให้เรดอนเข้าสู่สมดุลเป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง

4.3.1.7 นำกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 กระบอกไปตรวจวัดเรดอนด้วยหัววัด HPGe ในระบบ Canberra ใช้เวลานับวัด 3,600 วินาที โดยอ่านค่าพื้นที่ภายใต้ค่าพลังงานที่ 609.3 keV หลังจากนั้นนำค่าพื้นที่จากโปรแกรมไปคำนวณประสิทธิภาพของการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ต่อไป



รูปที่ 4.1 แผนผังอุปกรณ์แสดงระบบวัดเดิมในห้องทดลอง



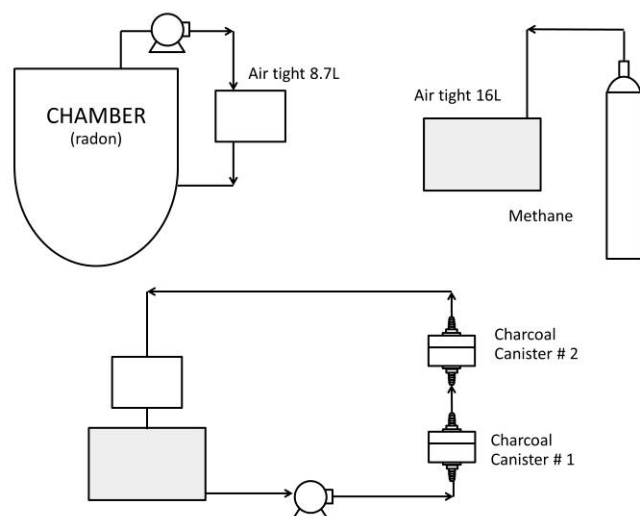
รูปที่ 4.2 แผนผังอุปกรณ์ Gamma spectrometry ในระบบ Canberra

#### 4.3.2 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาผลของมีเทนที่มีต่อกระบวนการวัด

##### 4.3.2.1 เตรียมการทดลองเช่นเดียวกับ 4.3.1.1 – 4.3.1.3

4.3.2.2 ชุดการทดลองนี้จะทำการศึกษาโดยใช้ก๊าซผสมระหว่างมีเทนและเรดอนในอากาศ โดยการใช้ปั๊มอากาศรุ่น  $\Sigma 500$  siebeta ทำการดูดเอาอากาศที่มีเรดอนที่ทราบค่ากัมมันตภาพรังสีใส่ในกล่อง air tight ขนาด 8.7 ลิตร ส่วนมีเทนเตรียมได้จากการปล่อยมีเทน 99.99% จากถังบรรจุเข้าสู่กล่อง air tight ขนาด 16 ลิตร จากนั้นต่อสายยางเข้ากับวาล์วใช้ปั๊มดูดก๊าซทั้ง 2 กล่อง หมุนวนผสมกันด้วยอัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที

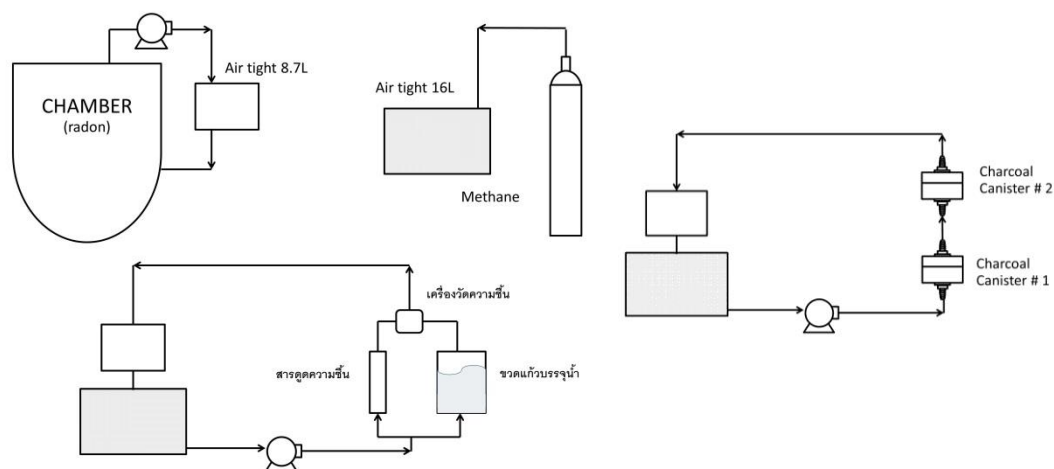
4.3.2.3 ปิดปั๊ม ปิดวาล์ว นำกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ที่เตรียมไว้ทั้ง 2 กระบอกต่ออนุกรมกัน จากนั้น เปิดปั๊มและทำตามขั้นตอนที่ 4.3.1.5 – 4.3.1.7



รูปที่ 4.3 แผนผังการอุปกรณ์เพื่อศึกษาผลของมีเทนในระบบวัดเดิมในห้องทดลอง



- 4.3.3 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์
- 4.3.3.1 เตรียมการทดลองเช่นเดียวกับ 4.3.1.1 – 4.3.1.2
- 4.3.3.2 เตรียมก๊าซผสมเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 4.3.2.2
- 4.3.3.3 เตรียมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้ว โดยจะเตรียมทั้งหมด 4 อุณหภูมิ คือ 50, 30, 15, 5 องศาเซลเซียส โดยถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิสูงเตรียมได้จากการนำไปอบแล้วทิ้งไว้จนได้อุณหภูมิที่ต้องการ และถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่ำเตรียมได้จากการทดลองนำถ่านกัมมันต์บรรจุใส่กระบอก PVC และแช่ในตู้แช่เย็นเป็นระยะเวลาที่ต่างๆและนำมาวัดอุณหภูมิเมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการทำการบันทึกเวลาที่แช่เย็น จากนั้นทำการเตรียมถ่านกัมมันต์บรรจุใส่กระบอกและปิดผนึกป้องกันความชื้นและนำไปแช่เย็นตามเวลาที่กำหนด เมื่อได้ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิตามที่ต้องการแล้วทำตามขั้นตอน 4.3.1.3
- 4.3.3.4 ต่อมัอากาศรุ่น  $\Sigma 500$  siebeta และกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ต่ออนุกรมกันในแนวตั้ง จากนั้นต่อเข้ากับกล่อง air tight บรรจุก๊าซผสมที่ต่อกันทั้ง 2 กล่อง แล้วเปิดวาล์วที่กล่องบรรจุก๊าซผสม
- 4.3.3.5 ทำตามขั้นตอนที่ 4.3.1.5 – 4.3.1.7
- 4.3.4 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาผลของความชื้นของก๊าซตัวอย่าง
- 4.3.4.1 เตรียมการทดลองเช่นเดียวกับ 4.3.1.1 – 4.3.1.3
- 4.3.4.2 เตรียมก๊าซตัวอย่างตามขั้นตอนที่ 4.3.2.2
- 4.3.4.3 ชุดการทดลองนี้จะใช้อุปกรณ์ควบคุมความชื้นที่ประดิษฐ์ขึ้นในห้องทดลอง ก๊าซตัวอย่างจะถูกดูดด้วยปั๊มอากาศแล้วแยกเป็น 2 ทาง คือ ผ่านลงในน้ำเป็นสายเปียก และผ่านอุปกรณ์ดูดความชื้นเป็นสายแห้ง มีการปรับอัตราการไหลของก๊าซตัวอย่างทั้ง 2 สาย เพื่อควบคุมความชื้นผ่านเครื่องวัดความชื้นที่ติดไว้ โดยจะควบคุมความชื้นทั้งหมด 4 ค่า คือ 80%, 60%, 30%, 10%
- 4.3.4.4 เมื่อได้ระดับความชื้นของก๊าซตัวอย่างตามที่ต้องการแล้ว ปิดวาล์วที่กล่องบรรจุก๊าซผสม แยกเอาอุปกรณ์ควบคุมความชื้นออก แล้วนำกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 กระบอก ต่ออนุกรมเข้ากับปั๊มดูดอากาศและกล่องบรรจุก๊าซตัวอย่าง เปิดวาล์ว และทำตามขั้นตอนที่ 4.3.1.5 – 4.3.1.7



รูปที่ 4.4 แผนผังอุปกรณ์ในการศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

#### 4.4 การออกแบบกระบวนการและชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

##### 4.4.1 การออกแบบระบบควบคุมแน่นเพื่อเก็บก๊าซตัวอย่างแบบต่อเนื่อง

เนื่องจากการตรวจวัดเรดอนจากก๊าซธรรมชาติโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และเทคนิคการวัดรังสีแกมมาแบบเดิมนั้นจะเก็บตัวอย่างโดยตรงจากท่อก๊าซ ดังนั้นการออกแบบกระบวนการวัดใหม่แบบแรกจึงออกแบบให้เป็นแบบเก็บตัวอย่างต่อเนื่อง (Continuous Process) เพื่อให้สะดวกต่อการเก็บตัวอย่าง โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ดูดความชื้นและอ่างเย็น (Cooling bath) เข้าไปเพื่อควบคุมอุณหภูมิของก๊าซธรรมชาติให้เป็นของเหลวและไหลเข้าสู่กระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ส่วนมีเทนที่เป็นก๊าซก็จะถูกปล่อยทิ้งไป

การออกแบบอ่างเย็นจะใช้ถังเก็บความเย็นขนาด 20 ลิตร ใส่ด้วยเมทานอล 99% ปริมาณ 1,750 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำแข็งแห้งที่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดแข็ง ที่มีอุณหภูมิ  $-78^{\circ}\text{C}$  จนสารหล่อเย็นที่เป็นของผสมของทั้ง 2 ชนิดมีอุณหภูมิคงที่ซึ่งวัดด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิจาก Testo 480 ได้  $-74^{\circ}\text{C}$

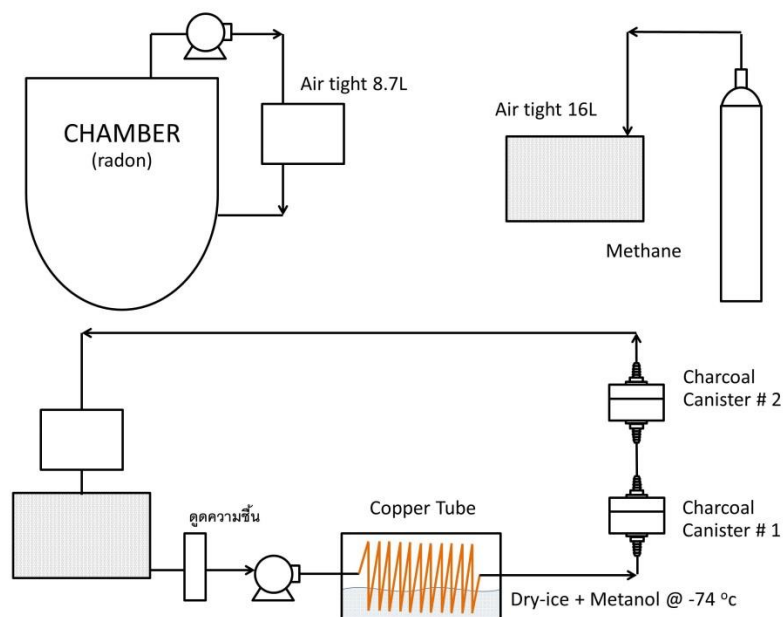
อุปกรณ์ควบคุมแน่นก๊าซจะใช้ท่อทองแดงขนาด 3 หุน ยาว 3 เมตร ขดเป็นเกลียว เส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวประมาณ 15 เซนติเมตรซ้อนกันลงมา โดยวางขดท่อทองแดงในอ่างเย็น การทดลองในห้องทดลองทำดังต่อไปนี้

4.4.1.1 เตรียมการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 4.3.1.1 – 4.3.1.3

4.4.1.2 เตรียมก๊าซตัวอย่างเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 4.3.2.2

4.4.1.3 ต่อปั๊มดูดอากาศ กล่องบรรจุก๊าซตัวอย่าง อุปกรณ์ดูดความชื้น เข้ากับท่อทองแดงที่เชื่อมต่อในสารหล่อเย็นผสมระหว่างเมทานอลและน้ำแข็งแห้ง จากนั้นต่อกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 กระบอก อนุกรมกับทุกอุปกรณ์ การทดลองนี้เป็นการทดลองแบบปิด (Closed loop)

4.4.1.4 เปิดปั๊มและทำการทดลองเช่นเดียวกับ 4.3.1.5 – 4.3.1.7



รูปที่ 4.5 แผนผังอุปกรณ์กระบวนการวัดใหม่ที่ติดตั้งระบบควบแน่นก๊าซแบบต่อเนื่อง

#### 4.4.2 การออกแบบระบบดักจับเรดอนด้วยน้ำแข็งแห้งและหลอดแก้วควบแน่น

จากการทดลองในห้องทดลองและนำไปใช้ตรวจวัดในพื้นที่จริงทำให้พบจุดอ่อนบางประการโดยเฉพาะเรื่องการแข็งตัวของก๊าซธรรมชาติในท่อทองแดงทำให้พบว่าการเก็บก๊าซแบบต่อเนื่อง (Continuous Process) โดยยังผ่านก๊าซเข้าสู่อ่างเย็นนั้นทำได้ยาก จึงเป็นที่มาของการออกแบบในรุ่นที่ 2 โดยยังยึดหลักการในการควบแน่นเรดอนออกจากก๊าซธรรมชาติแต่เปลี่ยนอุปกรณ์ในการควบแน่นและใช้กับดักความเย็น (Cold Trap) แทน ทำให้กระบวนการเก็บก๊าซตัวอย่างเปลี่ยนเป็น 2 ขั้นตอนต่อเนื่อง หรือ Batch Process

การออกแบบกับดักความเย็นนั้นจะใช้อุปกรณ์หลัก 2 ชุด คือ อ่างเย็นที่บรรจุสารหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิตามที่ต้องการ และชุดอุปกรณ์ควบแน่นและกักเก็บสารที่ควบแน่นไว้ภายใน อ่างเย็นที่ใช้จะเป็นกระบอกเก็บความเย็นที่ทำจาก Stainless steel หุ้มชั้นเรซินหนา 1.5 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร ภายในบรรจุสารหล่อเย็นเช่นเดียวกับแบบที่ 4.4.1 คือ เมทานอลและน้ำแข็งแห้งที่อุณหภูมิผสม  $-74^{\circ}\text{C}$  ส่วน

อุปกรณ์ควบแน่นและกักเก็บสารที่ควบแน่นทำจากแก้ว ลักษณะเป็นหลอดแก้ว สำหรับควบแน่น ขนาด ยาว 42 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่หน้าก้าชขนาด 1 เซนติเมตร โดยชุดหลอดแก้วนี้จะเชื่อมต่อในสารหล่อเย็นที่บรรจุในกระบอกเก็บความเย็น

หลังจากที่ก๊าซธรรมชาติหรือก๊าซตัวอย่างไหลผ่านหลอดแก้วควบแน่นที่เชื่อมต่อในสารหล่อเย็นอยู่นั้น องค์กรประกอบก๊าซบางส่วนที่มีจุดเดือดสูงกว่าอุณหภูมิของสารหล่อเย็นจะควบแน่นเป็นของเหลวและถูกกักเก็บไว้ในหลอดแก้วควบแน่น และองค์กรประกอบที่มีจุดเดือดต่ำกว่าอุณหภูมิของสารหล่อเย็นก็จะถูกปล่อยเป็นก๊าซออกทางท่อหน้าก้าชด้านบนของหลอดแก้ว

เมื่อได้ผ่านก้าชตัวอย่างตามที่ปริมาณที่ต้องการ แล้วจึงทำการแยกหลอดแก้วควบแน่นออกจากระบบ และยกหลอดแก้วควบแน่นออกจากกระบอกบรรจุสารหล่อเย็น จากนั้นนำหลอดแก้วใสในกระบอกเก็บความเย็นอีกอันหนึ่ง ต่อปลายสายยางขาออกของหลอดแก้วควบแน่นเข้ากับกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ อุณหภูมิของเหลวที่ควบแน่นภายในหลอดแก้วจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ของเหลวเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นแก๊สอีกครั้งหนึ่งทำให้ความดันภายในเพิ่มขึ้นและดันก้าชที่มีองค์กรประกอบของเรดอนออกสู่กระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ได้ การทดลองในห้องทดลองทำดังต่อไปนี้

4.4.2.1 เตรียมการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 4.3.1.1 – 4.3.1.3

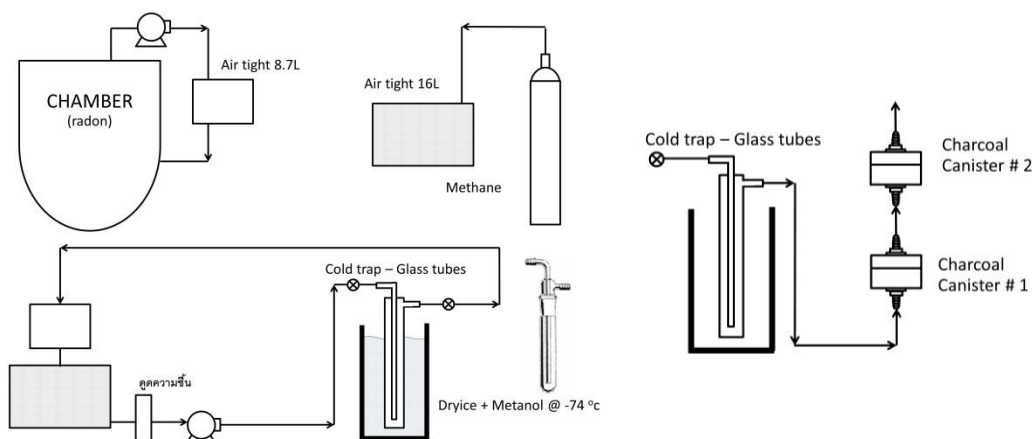
4.4.2.2 เตรียมก้าชตัวอย่างเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 4.3.2.2

4.4.2.3 ต่อปั๊มดูดอากาศ อุปกรณ์ดูดความชื้น ถังบรรจุก้าชตัวอย่าง เข้ากับสายยางของหลอดแก้วควบแน่นที่แช่ในสารหล่อเย็นทั้งขาเข้าและขาออกเป็นระบบปิด

4.4.2.4 เปิดปั๊มที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

4.4.2.5 ปิดปั๊ม ปิดวาล์วขาเข้าของหลอดแก้วควบแน่น และนำกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 กระบอกต่อเข้ากับปลายสายยางขาออกของหลอดแก้วควบแน่น

4.4.2.6 นำหลอดแก้วควบแน่นออกจากสารหล่อเย็นและใส่ลงในกระบอกเก็บความเย็นอีกอันหนึ่งเพื่อเพิ่มอุณหภูมิลบอย่างช้าๆ รอจนของเหลวกลายเป็นแก๊สจนหมด หลังจากนั้นทำตามขั้นตอนที่ 4.3.1.6 -4.3.1.7



รูปที่ 4.6 แผนผังอุปกรณ์กระบวนการวัดใหม่ที่ตั้งดัดกับวัดความชื้นเพื่อกักจับเรดอนก่อนดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

#### 4.4.3 การออกแบบระบบควบคุมความชื้นเพื่อกักจับเรดอนด้วยไนโตรเจนเหลวผสมเมทานอลและหลอดแก้วควบคุมความชื้น

จากการทดลองในห้องทดลองและการใช้งานจริงในพื้นที่ทำให้พบว่าการกักจับเรดอนโดยใช้ชุดอุปกรณ์แบบที่ 4.4.2. ยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร จึงเป็นที่มาของการพัฒนาชุดอุปกรณ์ในรุ่นที่ 3 โดยมีเป้าหมายในการลดอุณหภูมิของสารหล่อเย็นให้ต่ำกว่าเดิมโดยการเปลี่ยนชนิดสารหล่อเย็นจากเดิมที่ใช้เมทานอลผสมกับน้ำแข็งแห้งซึ่งให้อุณหภูมิที่  $-74^{\circ}\text{C}$  เป็นเมทานอลผสมกับไนโตรเจนเหลว ซึ่งไนโตรเจนเหลวมีอุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$  เมื่อผสมกับเมทานอลจะทำให้เมทานอลกลายเป็นของเหลวหนืดเหนียวที่มีอุณหภูมิประมาณ  $-86$  ถึง  $-96^{\circ}\text{C}$  จากนั้นทำการทดลองหาค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ โดยใช้อุปกรณ์และวิธีการเช่นเดียวกับแบบ 4.4.2

#### 4.4.4 การออกแบบระบบควบคุมความชื้นเพื่อกักจับเรดอนด้วยไนโตรเจนเหลว

จากการทดลองในห้องทดลองและการใช้งานจริงในพื้นที่ทำให้พบว่าการกักจับเรดอนโดยใช้ชุดอุปกรณ์แบบที่ 4.4.3 ยังมีข้อจำกัด ทำให้เกิดการออกแบบชุดอุปกรณ์ในรุ่นที่ 4 ซึ่งยังคงใช้หลอดแก้วควบคุมความชื้นเช่นเดิม แต่จะเปลี่ยนสารหล่อเย็นเป็นไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$  และใช้ถังบรรจุไนโตรเจนเหลว Taylor-wharton รุ่น LD10 ขนาด 10 ลิตร สูง 60 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางวัดที่ปากถัง 5 เซนติเมตร เป็นถังบรรจุสารหล่อเย็นแทนกระบอกเก็บความชื้นในรุ่นก่อน ๆ วิธีการทดลองในห้องทดลองทำเช่นเดียวกันกับแบบที่ 4.4.2 และ 4.4.3

#### 4.4.5 การออกแบบระบบควบแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยน้ำแข็งแห้งและท่อทองแดง

จากการทดลองในห้องทดลองและการทำงานในพื้นที่จริงพบว่ามีข้อจำกัดในการทำงานในการเก็บตัวอย่างก๊าซธรรมชาติจากแหล่งผลิต ซึ่งนำไปสู่การออกแบบในรุ่นสุดท้าย โดยการเลือกใช้สารหล่อเย็นเป็นน้ำแข็งแห้งผสมกับเมทานอล และใช้ชุดท่อทองแดงเหมือนในแบบที่ 4.4.1 แต่ออกแบบอุปกรณ์ การจัดเรียงอุปกรณ์และอ่างเย็นใหม่เพื่อลดการแข็งตัวในท่อ และปรับกระบวนการเก็บตัวอย่างก๊าซธรรมชาติเป็นแบบ 2 ขั้นตอนต่อเนื่อง หรือ Batch Process

อ่างเย็นแบบใหม่ที่นำมาบรรจุสารหล่อเย็นเพื่อดักจับเรดอนนั้นทำจากถังเก็บความเย็นทรงกระบอกขนาด 16 ลิตร จำนวน 2 ถัง จัดเรียงถังไว้ด้านบนและอีกถังหนึ่งต่ออยู่ข้างล่าง โดยถังแรกบรรจุชุดท่อทองแดงขนาด 3 หุน ยาว 3 เมตร ขดเป็นเกลียวเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร วางตัวในแนวตั้งเพื่อทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความเย็นและควบแน่นเรดอนออกจากมีเทน และอีกถังหนึ่งบรรจุ Flask ขนาด 250 มิลลิลิตรที่ปิดด้วยจุกยางพร้อมท่อนำก๊าซเข้าและขาออกเพื่อใช้ในการกักเก็บเรดอนและองค์ประกอบอื่นๆที่ควบแน่นแล้ว โดยมีวาล์ว 2 ตัว ที่ก่อนเข้าท่อทองแดง และหลังจากออกจากท่อนำก๊าซขาออกของ Flask ทำหน้าที่แยกและติดตั้งชุดอุปกรณ์ดักจับเรดอนเข้ากับท่อนำก๊าซของระบบวัดหลักและกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ การทดลองในห้องทดลองทำดังนี้

4.4.5.1 เตรียมการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 4.3.1.1 – 4.3.1.3

4.4.5.2 เตรียมก๊าซตัวอย่างเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 4.3.2.2

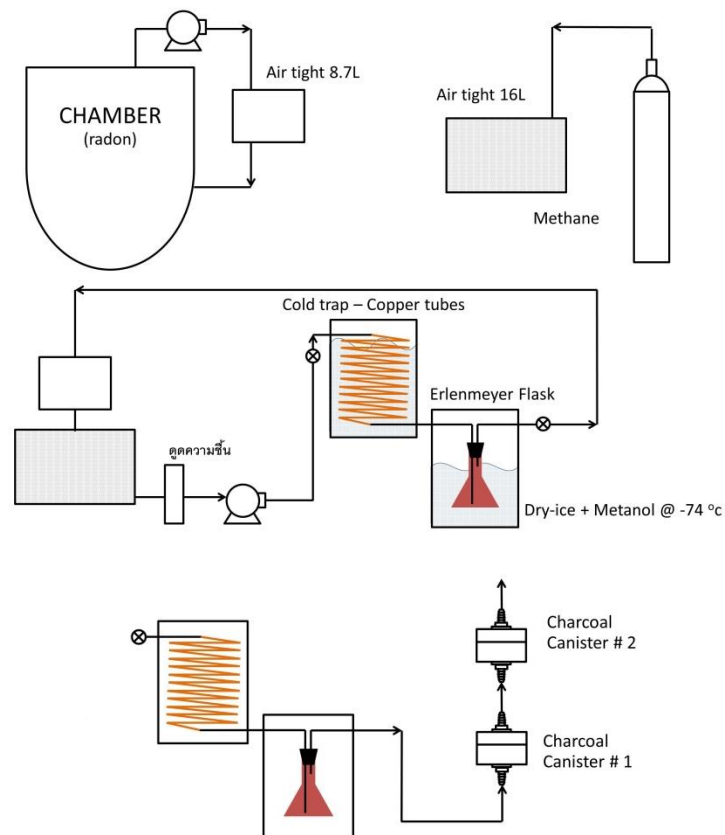
4.4.5.3 ต่อบัมดูดอากาศ กล่องบรรจุก๊าซตัวอย่าง อุปกรณ์ดูดความชื้น เข้ากับวาล์วที่ต่อกับท่อทองแดงที่แช่อยู่ในสารหล่อเย็นผสมระหว่างเมทานอลและน้ำแข็งแห้ง และต่อปลายสายยางที่ต่อกับวาล์วขาออกจาก Flask เข้าสู่กล่องบรรจุก๊าซตัวอย่างเป็นระบบปิด

4.4.5.4 เปิดวาล์ว เปิดบัมที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที

4.4.5.5 ปิดบัม ปิดวาล์วขาเข้า จากนั้นต่อกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 กระบอกอนุกรมเข้ากับปลายสายยางที่ต่อกับวาล์วขาออกของ Flask

4.4.5.6 เทสารหล่อเย็นออกจากถังเก็บความเย็นทั้ง 2 ถัง ของเหลวที่ควบแน่นจะค่อยๆเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นแก๊ส

4.4.5.7 ทำตามขั้นตอนที่ 4.3.1.5 – 4.3.1.7



รูปที่ 4.7 แผนผังอุปกรณ์ระบบวัดที่ติดตั้งกับดักความชื้นจากน้ำแข็งแห้งและท่อทองแดง

#### 4.5 การนำกระบวนการเก็บตัวอย่างที่ออกแบบใหม่ไปใช้ในพื้นที่จริง

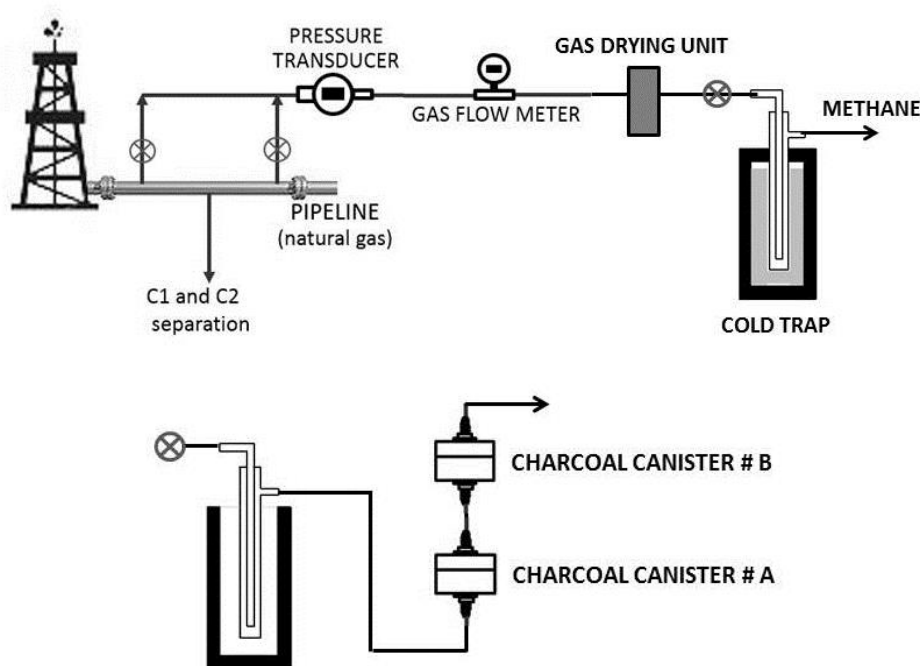
การนำกระบวนการเก็บตัวอย่างที่ออกแบบใหม่ไปใช้งานในพื้นที่จริง จำเป็นต้องทำการติดต่อขอเข้าพื้นที่ล่วงหน้า หลังจากได้รับการตอบรับแล้วจึงจะสามารถเข้าทำการเก็บตัวอย่างก๊าซธรรมชาติได้ โดยมีขั้นตอนการเก็บก๊าซดังนี้

##### 4.5.1 ขั้นตอนเตรียมออกภาคสนาม

4.5.1.1 เตรียมถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 80 กรัม ที่อบไล่ความชื้นแล้วบรรจุลงในกระบอกร PVC และปิดผนึกรอยต่อต่างๆด้วยเทปพลาสติกกันซึม จากนั้นใส่ในถุงซิปล็อคเพื่อป้องกันการปนเปื้อนและความชื้น เก็บไว้ในถังเก็บความเย็นซึ่งมีน้ำแข็งแห้งบรรจุอยู่ด้วยโดยใช้แผ่นพลาสติกแยกส่วนที่เก็บกระบอกร PVC และส่วนที่เป็นน้ำแข็งแห้งออกจากกันเพื่อป้องกันไม่ให้ถ่านกัมมันต์เย็นเกินไป

4.5.1.2 เตรียมวัสดุ อุปกรณ์ สารเคมีอื่นๆ ให้พร้อม

##### 4.5.2 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างก๊าซ



รูปที่ 4.8 แผนผังอุปกรณ์ในการเก็บก๊าซตัวอย่างจากท่อส่งก๊าซธรรมชาติในพื้นที่จริง

- 4.5.2.1 หลังจากเดินทางถึงพื้นที่แหล่งผลิตก๊าซธรรมชาติและลำเลียงวัสดุ อุปกรณ์ไปยังพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างก๊าซ ให้ทำการติดตั้งผ้าใบบังแดดเพื่อให้ วัสดุ อุปกรณ์ทุกชิ้นอยู่ในที่ร่มและป้องกันหากเกิดฝนตก
- 4.5.2.2 ติดตั้ง Regulator หรือวาล์วลดแรงดันเข้ากับท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ทำการต่อสายยางเข้ากับ Flow meter อุปกรณ์วัดความชื้น และชุดอุปกรณ์ดักจับเรดอนด้วยความเย็นที่ทำการออกแบบใหม่
- 4.5.2.3 ทำการผสมสารหล่อเย็นจนถึงอุณหภูมิเป้าหมาย
- 4.5.2.4 เปิดวาล์วจากท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ปรับอัตราการไหลของก๊าซจนค่าที่ Flow Meter เป็น 2 ลิตรต่อนาที
- 4.5.2.5 เทสารหล่อเย็นลงในถังหรือกระบอกสำหรับใส่สารหล่อเย็นของก๊าดักความเย็น หากสารหล่อเย็นเป็นไนโตรเจนเหลวเพียงอย่างเดียวให้ใช้ถังที่บรรจุไนโตรเจนเหลวต่อกับหลอดแก้วควบแน่นได้เลย จากนั้นเริ่มจับเวลา
- 4.5.2.6 ใช้เวลาในการเก็บตัวอย่างก๊าซ 20 นาที จะได้ปริมาตรก๊าซตัวอย่าง 40 ลิตร
- 4.5.2.7 ปิดวาล์วที่ท่อส่งก๊าซ และวาล์วขาเข้าของชุดอุปกรณ์ดักจับเรดอน
- 4.5.2.8 นำกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์จำนวน 2 กระบอก ต่อนุกรมเข้ากับปลายสายยางขาออกจากชุดอุปกรณ์ดักจับเรดอน



4.5.2.9 แยกภาชนะกักเก็บเรดอนที่ควบแน่นออกจากสารหล่อเย็นและเพิ่มอุณหภูมิกลับอย่างช้าๆตามขั้นตอนที่ทำการออกแบบในหัวข้อ 4.4 รอจนสารที่ควบแน่นเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นแก๊ส (เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเกินกว่า  $0^{\circ}\text{C}$  นำภาชนะกักเก็บเรดอนที่ควบแน่นออกมาเพิ่มอุณหภูมิโดยไม่ต้องใช้ถังหรือกระบอกเก็บความเย็น สังเกตเห็นชั้นของเหลวที่เป็น Condensate ให้ปิดวาล์วขาออก)

4.5.2.10 ทำตามขั้นตอนที่ 4.3.1.5 – 4.3.1.7 โดยเดินทางกลับมาทำการวัดรังสีแกมมาในห้องทดลอง

#### 4.6 การใช้ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ทดสอบกระบวนการวัด

เลือกกระบวนการวัดที่ออกแบบใหม่ในหัวข้อที่ 4.4.4 คือการดักจับเรดอนด้วยไนโตรเจนเหลวมาทำการศึกษเปรียบเทียบผลกับเทคนิคการใช้ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 โดยมีขั้นตอนดังนี้

4.6.1 เตรียมเรดอนในถังปรับเทียบตามขั้นตอนที่ 4.3.1.1 – 4.3.1.2

4.6.2 แยกชุดการทดลองออกเป็น 2 ชุด ทำการทดลองพร้อมกัน

4.6.2.1 ชุดการทดลองที่ 1 ทดสอบเทคนิคการใช้ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 กับก๊าซตัวอย่างที่เป็นอากาศผสมเรดอนโดยตรง

4.6.2.1.1 จัดเรียงอุปกรณ์ โดยต่อปั๊มดูดอากาศเข้ากับวาล์วของถังปรับเทียบเรดอน ต่อด้วยกล่อง air tight ขนาด 7 ลิตร ซึ่งภายในติดตั้งฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ไว้ และต่อสายยางย้อนกลับเข้าสู่ถังปรับเทียบ

4.6.2.1.2 เปิดวาล์ว และเปิดปั๊มดูดอากาศที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

4.6.2.1.3 ปิดวาล์ว และแยกกล่อง air tight ออกจากระบบ ทิ้งไว้ 4 วัน จากนั้นนำฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ไปกัตรอย

4.6.2.1.4 การกัตรอยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 120 กรัม ผสมน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์แช่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยแอลกอฮอล์และน้ำกลั่น

4.6.2.1.5 นำฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ที่กัตรอยแล้วมาอ่านรอยด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า และใช้

โปรแกรม Image J ในการนับรอย นำผลการทดลองไป  
เปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ 2

4.6.2.2 ชุดการทดลองที่ 2 ทดสอบเทคนิคการใช้ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด  
CR-39 กับก๊าซตัวอย่างที่เป็นอากาศผสมเรดอนที่ผ่านอุปกรณ์ดักจับเรดอน

4.6.2.2.1 จัดเรียงอุปกรณ์ โดยต่อปั๊มดูดอากาศเข้ากับวาล์วของถังปรับเทียบ  
เรดอน ต่อด้วยกล่อง air tight ขนาด 7 ลิตร ซึ่งภายในติดตั้งฟิล์ม  
บันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ไว้ และต่อสายยางย้อนกลับ  
เข้าสู่ถังปรับเทียบ

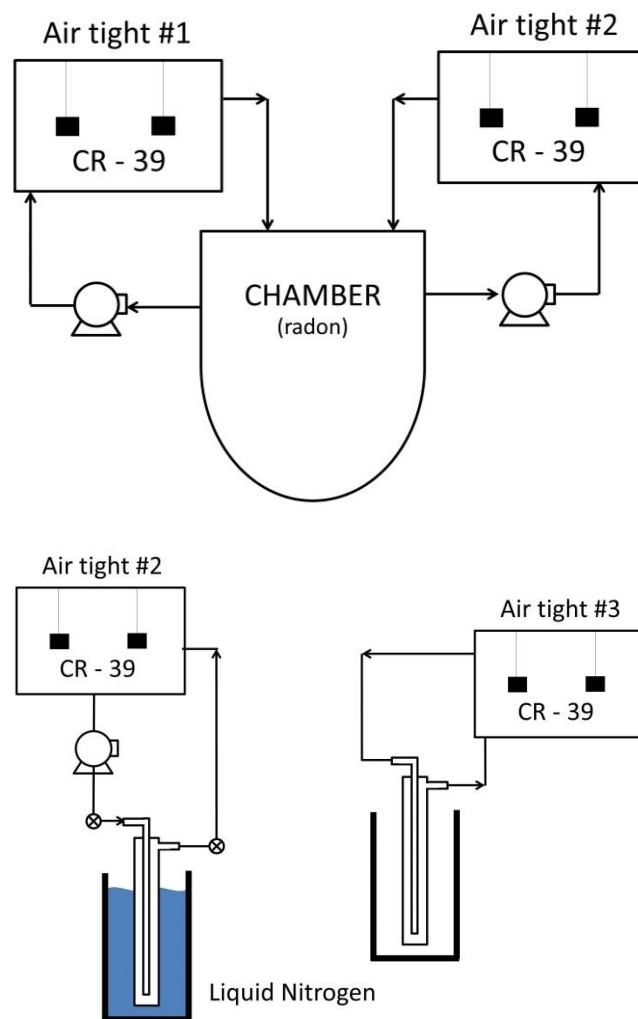
4.6.2.2.2 เปิดวาล์ว และเปิดปั๊มดูดอากาศที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที  
เป็นเวลา 10 นาที

4.6.2.2.3 ปิดวาล์ว และแยกกล่อง air tight ออกจากระบบ นำมาจัดเรียง  
อุปกรณ์ใหม่ โดยต่อกล่อง air tight เข้ากับอุปกรณ์ดูดความชื้น  
และชุดอุปกรณ์ดักจับเรดอนด้วยไนโตรเจนเหลว และปั๊มดูดอากาศ

4.6.2.2.4 เปิดวาล์ว เปิดปั๊มดูดอากาศที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที เป็น  
เวลา 10 นาที จากนั้นปิดปั๊ม ปิดวาล์วขาเข้าและขาออกของ  
หลอดแก้วควบแน่น แยกกล่อง air tight ออกจากระบบ และนำ  
กล่อง air tight ขนาด 7 ลิตร ซึ่งภายในติดตั้งฟิล์มบันทึกรอย  
อนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 อันใหม่มาต่อแทน

4.6.2.2.5 เปิดวาล์วของชุดอุปกรณ์ดักจับเรดอน และวาล์วกล่อง air tight  
จากนั้นเทของเหลวที่ควบแน่นเข้าสู่กล่อง air tight ทิ้งไว้ 4 วัน

4.6.2.2.6 นำฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ไปกัตรอยและ  
อ่านรอยตามขั้นตอนที่ 4.6.2.1.4 – 4.6.2.1.5



รูปที่ 4.9 แผนผังอุปกรณ์ในการทดลองโดยใช้ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39

## บทที่ 5

### ผลการดำเนินงานวิจัย

#### 5.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่อค่าประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

##### 5.1.1 ชุดการทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของกระบวนการวัดเดิม

ในการทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของกระบวนการวัดเดิม เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์ โดยทำการตรวจวัดโดยใช้เรดอนผสมกับกับอากาศ ผลที่ได้จะเป็นค่าสำหรับอ้างอิงในการพัฒนาระบบวัด และนำกระบวนการนี้ไปทำการทดสอบกับมีเทนทั้งในห้องทดลองและพื้นที่แหล่งผลิตก๊าซธรรมชาติจริง หลังจากทำการทดลองทั้ง 3 การทดลองแล้ว จะได้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์ในกระบวนการวัดแบบเดิม

จากการทดลองพบว่าค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์สำหรับก๊าซตัวอย่างที่เป็นอากาศผสมเรดอนมีค่าประมาณ 99% ดังแสดงในตารางที่ 5-1 สำหรับค่า Area #A และ Area #B คือ ค่าพื้นที่ภายใต้พลังงาน 609.3 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่อ่านได้จากเทคนิคการวัดรังสีแกมมา (Gamma spectrometry) ในระบบ Canberra ของเรดอนจากก๊าซตัวอย่างที่ถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์กระบอกที่ 1 และ 2

ตารางที่ 5-1 แสดงค่าผลการทดสอบกระบวนการวัดเดิมในห้องปฏิบัติการ

ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
ระบบเดิม air – lab ครั้งที่ 1	4216 ±132.6	72 ±18.4	99.0
ระบบเดิม air – lab ครั้งที่ 2	3672 ±115.5	64 ±16.3	99.1
ระบบเดิม air – lab ครั้งที่ 3	3256 ±102.4	68 ±17.3	98.9
ระบบเดิม air - lab (ค่าเฉลี่ย)			99.0

##### 5.1.2 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาผลของมีเทนที่มีต่อกระบวนการวัด

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของมีเทนที่มีต่อกระบวนการวัดหรือค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์จะแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองในห้องปฏิบัติการและในพื้นที่จริงในแหล่งผลิตก๊าซธรรมชาติ ซึ่งจากผลการทดลองตามตารางที่ 5-2 และ 5-3 เมื่อนำระบบวัดเดิมไปใช้ในพื้นที่จริงจะได้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 64.4% ซึ่งต่ำกว่าในห้องปฏิบัติการที่มีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์อยู่ที่ 84.6%

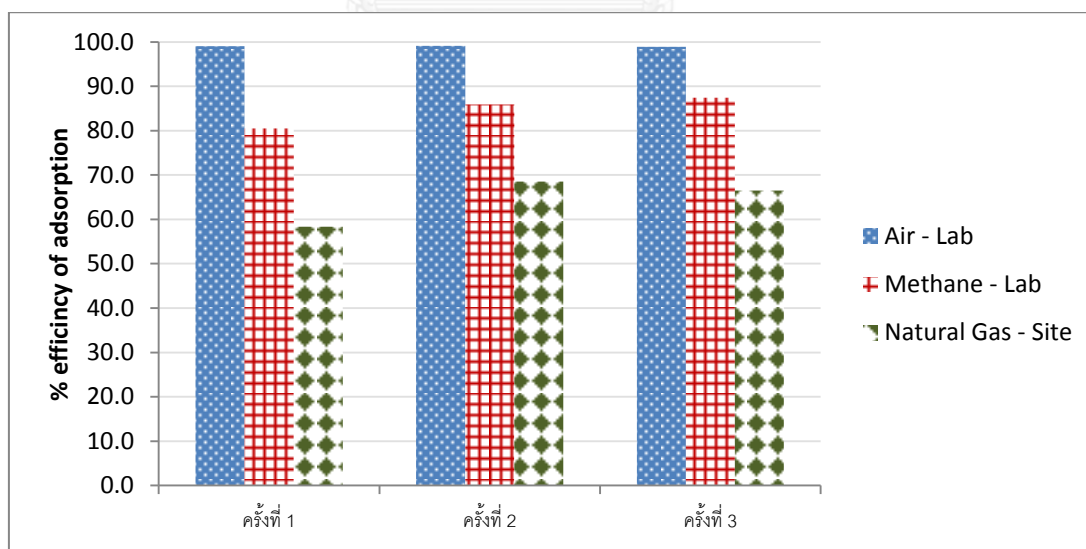
ตารางที่ 5-2 แสดงผลของมีเทนต่อค่าประสิทธิภาพของระบบวัดเดิมในห้องทดลอง

ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
methane lab ครั้งที่ 1	2041 ±64.2	427 ±68.1	80.5
methane lab ครั้งที่ 2	1987 ±62.5	310 ±49.4	85.9
methane lab ครั้งที่ 3	1840 ±57.4	259 ±36.7	87.4
methane lab (ค่าเฉลี่ย)			84.6

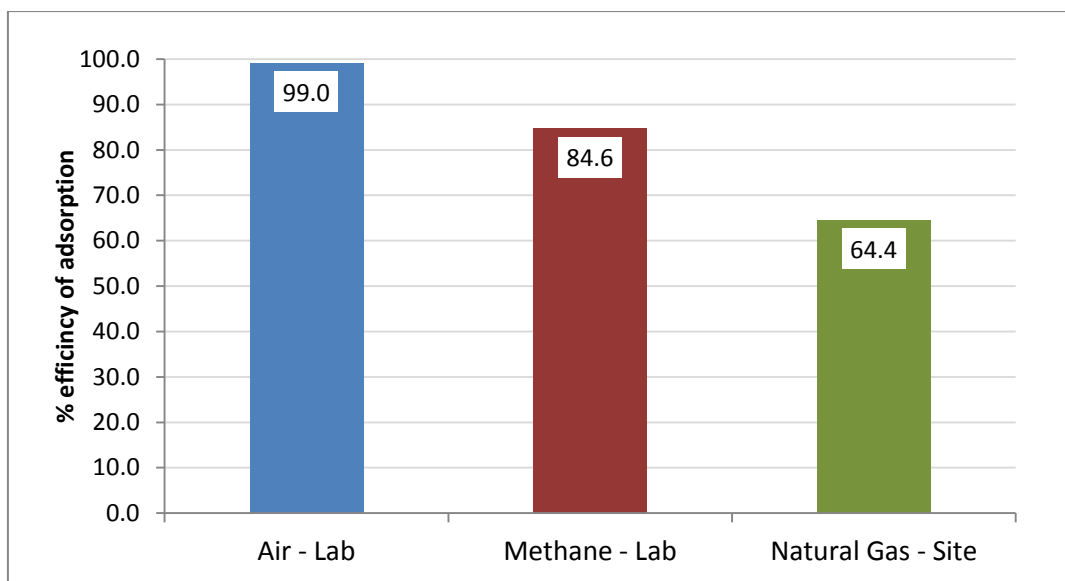
ตารางที่ 5-3 แสดงผลการทดสอบระบบวัดเดิมในพื้นที่จริง

ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
ระบบเดิม พื้นที่จริง ครั้งที่ 1	313 ±9.8	152 ±38.8	58.3
ระบบเดิม พื้นที่จริง ครั้งที่ 2	425 ±13.4	158 ±40.3	68.5
ระบบเดิม พื้นที่จริง ครั้งที่ 3	354 ±11.1	142 ±36.2	66.5
ระบบเดิม พื้นที่จริง (ค่าเฉลี่ย)			64.4

เมื่อนำผลจากการทดลองหาค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์ด้วยระบบวัดแบบเดิมจากทั้ง 3 การทดลองมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่ามีเทนมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพลดลง โดยในพื้นที่แหล่งผลิตก๊าซธรรมชาติจะมีสัดส่วนของมีเทนในก๊าซธรรมชาติสูงกว่าในห้องปฏิบัติการมากทำให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ลดลงต่ำกว่าในห้องปฏิบัติการมากเช่นกัน ผลการเปรียบเทียบเป็นไปตามรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 แผนภูมิเปรียบเทียบผลทดสอบของระบบวัดเดิม



รูปที่ 5.2 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ในระบบวัดเดิม

### 5.1.3 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์

จากการทดลองเพื่อศึกษาหาผลกระทบของอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ต่อค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนจากก๊าซตัวอย่างนั้น ทำให้ทราบว่ายิ่งอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์สูงขึ้นจะทำให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 5-4 ถึง 5-7 และนำผลมาเปรียบเทียบกันในรูปแบบของกราฟตามรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5-4 แสดงผลของอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ที่ 50 °c ต่อค่าประสิทธิภาพการดูดซับ

ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
high temp 50°c ครั้งที่ 1	788 ±24.8	213 ±45.2	76.4
high temp 50°c ครั้งที่ 2	1518 ±47.8	425 ±58.4	73.8
high temp 50°c ครั้งที่ 3	1327 ±41.7	330 ±48.2	77.2
high temp 50°c (ค่าเฉลี่ย)			75.8

ตารางที่ 5-5 แสดงผลของอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ที่ 30 °c ต่อค่าประสิทธิภาพการดูดซับ

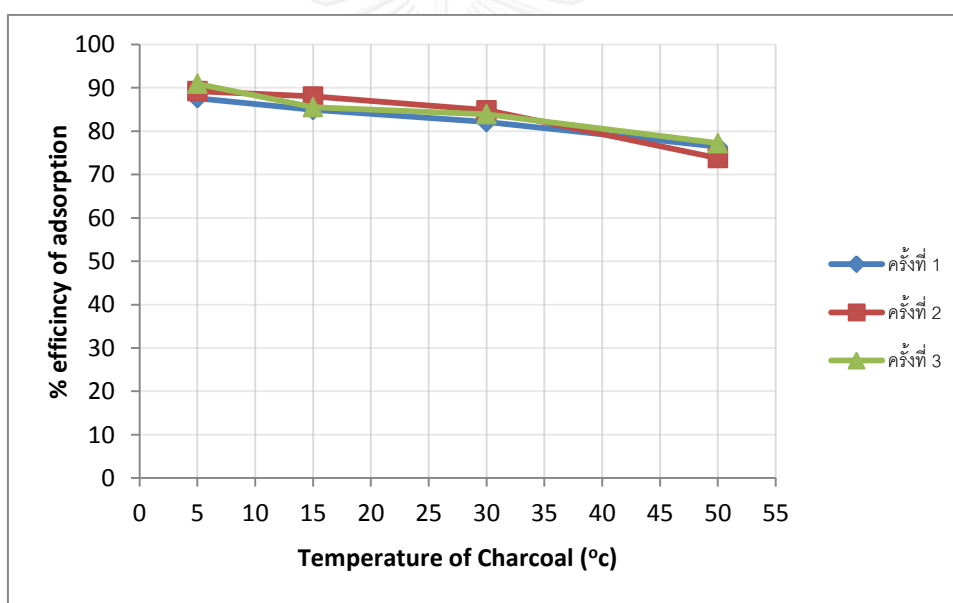
ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
normal temp 30°c ครั้งที่ 1	516 ±16.2	120 ±30.2	82.1
normal temp 30°c ครั้งที่ 2	1259 ±39.6	220 ±56.1	84.8
normal temp 30°c ครั้งที่ 3	1055±33.2	198 ±32.5	83.9
normal temp 30°c ครั้งที่ 4			83.6

ตารางที่ 5-6 แสดงผลของอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ที่ 15 °c ต่อค่าประสิทธิภาพการดูดซับ

ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
low temp 15°c ครั้งที่ 1	791 ±24.9	148 ±37.7	84.9
low temp 15°c ครั้งที่ 2	957 ±30.1	144 ±36.7	88
low temp 15°c ครั้งที่ 3	753 ±23.7	138 ±35.2	85.5
low temp 15°c (ค่าเฉลี่ย)			86.1

ตารางที่ 5-7 แสดงผลของอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ที่ 5 °c ต่อค่าประสิทธิภาพการดูดซับ

ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
very low temp 5°c ครั้งที่ 1	430 ±13.5	82 ±20.9	87.6
very low temp 5°c ครั้งที่ 2	841 ±26.5	120 ±30.6	89.2
very low temp 5°c ครั้งที่ 3	688 ±21.6	92 ±23.5	90.9
very low temp 5°c (ค่าเฉลี่ย)			89.2



รูปที่ 5.3 แผนภูมิเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

#### 5.1.4 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาผลของความชื้นของก๊าซตัวอย่าง

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของความชื้นของก๊าซตัวอย่างที่มีต่อค่าประสิทธิภาพของการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์ ทำให้ทราบว่ายิ่งความชื้นสูงขึ้นค่าประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ยิ่งลดลง ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5-8 ถึง 5-11 และนำผลการทดลองมาทำกราฟเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5-8 แสดงผลของความชื้นของก๊าซตัวอย่างที่ 80% ต่อค่าประสิทธิภาพในการดูดซับ

ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
very high humid 80% ครั้งที่ 1	1542 ±48.5	563 ±74.3	65.2
very high humid 80% ครั้งที่ 2	958 ±30.1	372 ±65.1	63.7
very high humid 80% ครั้งที่ 3	869 ±27.3	347 ±58.5	62.8
very high humid 80% (ค่าเฉลี่ย)			63.9

ตารางที่ 5-9 แสดงผลของความชื้นของก๊าซตัวอย่างที่ 60% ต่อค่าประสิทธิภาพในการดูดซับ

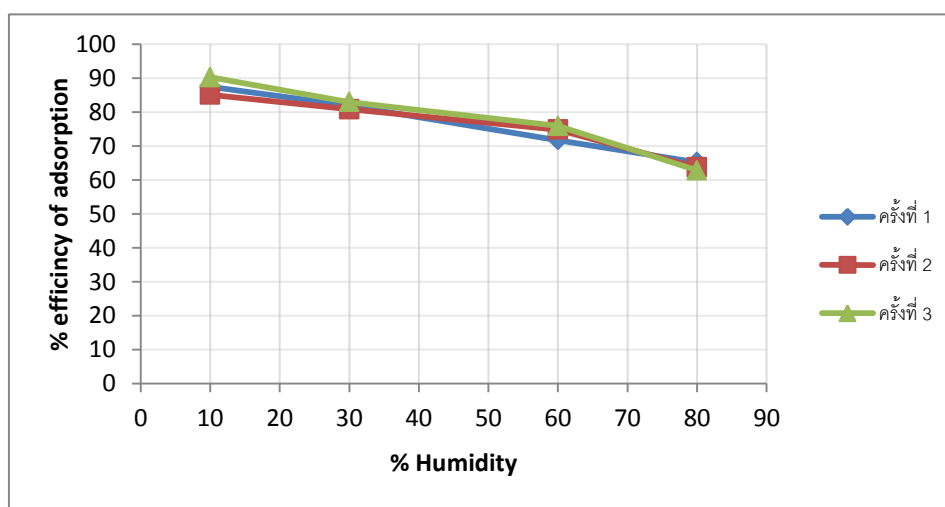
ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
high humid 60% ครั้งที่ 1	1258 ±39.6	383 ±77.7	71.7
high humid 60% ครั้งที่ 2	748 ±23.5	215 ±54.8	74.8
high humid 60% ครั้งที่ 3	651 ±20.5	183 ±46.7	75.9
high humid 60% (ค่าเฉลี่ย)			74.1

ตารางที่ 5-10 แสดงผลของความชื้นของก๊าซตัวอย่างที่ 30% ต่อค่าประสิทธิภาพในการดูดซับ

ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
low humid 30% ครั้งที่ 1	1035 ±32.6	216 ±55.1	81.9
low humid 30% ครั้งที่ 2	1952 ±61.4	405 ±66.9	80.8
low humid 30% ครั้งที่ 3	1837 ±57.8	343 ±48.5	82.9
low humid 30% (ค่าเฉลี่ย)			81.9

ตารางที่ 5-11 แสดงผลของความชื้นของก๊าซตัวอย่างที่ 10% ต่อค่าประสิทธิภาพในการดูดซับ

ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
very low humid 10% ครั้งที่ 1	802 ±25.2	130 ±33.1	87.4
very low humid 10% ครั้งที่ 2	1602 ±50.4	268 ±45.3	85.1
very low humid 10% ครั้งที่ 3	1596 ±50.2	187 ±36.7	90.2
very low humid 10% (ค่าเฉลี่ย)			87.6



รูปที่ 5.4 แผนภูมิเปรียบเทียบผลของความชื้นของก๊าซตัวอย่างต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ



## 5.2 การทดสอบกระบวนการเก็บตัวอย่างใหม่และการนำไปใช้งานในพื้นที่จริง

### 5.2.1 การออกแบบระบบควบแน่นเพื่อเก็บก๊าซตัวอย่างแบบต่อเนื่อง

ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ การพัฒนากระบวนการวัดและออกแบบระบบการเก็บก๊าซตัวอย่างขึ้นใหม่เพื่อเพิ่มค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์ ในรุ่นแรกนี้ได้ทดลองออกแบบระบบควบแน่นก๊าซเพื่อให้เรดอนกลายเป็นของเหลวและถูกดักจับในกระบอกถ่านกัมมันต์แรกได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งผลการวิจัยในห้องทดลองทำให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ใกล้เคียงกับผลการทดลองของระบบเดิมที่ทำกับก๊าซตัวอย่างที่เป็นมีเทนผสมกับเรดอน และเมื่อนำไปใช้ในพื้นที่จริงซึ่งมีองค์ประกอบของก๊าซต่างออกไปจากในห้องปฏิบัติการนั้นไม่สามารถดักจับเรดอนได้เลย เนื่องจากมีการแข็งตัวภายในท่อทองแดงทำให้เกิดการอุดตันจนก๊าซตัวอย่างไม่สามารถไหลไปถึงกระบอกถ่านกัมมันต์ได้ ผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 5-12

ตารางที่ 5-12 แสดงผลการทดสอบระบบควบแน่นเพื่อเก็บก๊าซตัวอย่างแบบต่อเนื่อง

ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
dryice (copper) ครั้งที่ 1	1328 ±41.8	226 ±57.6	85.2
dryice (copper) ครั้งที่ 2	1147 ±36.1	214 ±54.6	83.8
Dryice/Metanol - Copper tube (ค่าเฉลี่ย)			84.5
dryice (copper) พื้นที่จริง ครั้งที่ 1	35 ±8.4	11 ±5.6	-*
dryice (copper) พื้นที่จริง ครั้งที่ 2	21 ±12.1	9 ±4.2	-*
Dryice/Metanol - Copper tube พื้นที่จริง (ค่าเฉลี่ย)			-*

\* หมายเหตุ: ค่าที่ได้ต่ำกว่าขีดจำกัดของเครื่องมือวัด

### 5.2.2 การออกแบบระบบควบแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยน้ำแข็งแห้งและหลอดแก้ว

การออกแบบในรุ่นที่ 2 ได้ทำการพัฒนากระบวนการตรวจวัดเรดอนโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากรุ่นแรกโดยการเปลี่ยนจากการเก็บตัวอย่างในกระบวนการเดียวเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการดักจับเรดอนด้วยกับดักความเย็นโดยใช้น้ำแข็งแห้งละลายในเมทานอลเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคมิวอย่างสม่ำเสมอ ใช้กระบอกเก็บความเย็นทรงสูงเป็นภาชนะบรรจุสารหล่อเย็นและใช้หลอดแก้วควบแน่นเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและกักเก็บเรดอนที่ควบแน่นลงมา จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ต่อไป จากตารางที่ 5-13 จะสังเกตได้ว่าผลการทดลองในห้องปฏิบัติการให้ค่าประสิทธิภาพของการดูดซับของถ่านกัมมันต์สูงกว่าระบบเดิมเล็กน้อย และเมื่อนำไปใช้งานในพื้นที่จริงก็ให้ค่าประสิทธิภาพไม่แตกต่างจากการตรวจวัดเรดอนด้วยระบบเดิม

ตารางที่ 5-13 แสดงผลการทดสอบระบบควบแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยน้ำแข็งแห้งและหลอดแก้ว

ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
dryice (tube) ครั้งที่ 1	843 ±26.5	92 ±23.5	92.7
dryice (tube) ครั้งที่ 2	1066 ±33.5	137 ±34.9	89.9
Dryice/Metanol - Glass tube (ค่าเฉลี่ย)			91.3
dryice (tube) พื้นที่จริง ครั้งที่ 1	327 ±19.3	159 ±20.5	57.9
dryice (tube) พื้นที่จริง ครั้งที่ 2	224 ±37.0	97 ±24.7	67.1
Dryice/Metanol - Glass tube พื้นที่จริง (ค่าเฉลี่ย)			62.5

### 5.2.3 การออกแบบระบบควบแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยไนโตรเจนเหลวผสมเมทานอลและหลอดแก้วควบแน่น

การออกแบบระบบการเก็บก๊าซตัวอย่างในรุ่นที่ 3 ใช้วัสดุอุปกรณ์เหมือนในรุ่นที่ 2 คือให้หลอดแก้วควบแน่นชุดเดิมเพียงแต่เปลี่ยนสารหล่อเย็นจากเดิมที่เป็นน้ำแข็งแห้งละลายในเมทานอลเป็นการใช้ในไนโตรเจนเหลวผสมกับเมทานอลที่สามารถลดอุณหภูมิของสารหล่อเย็นลงได้ แต่ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของสารหล่อเย็นให้หนึ่งได้ทำให้อุณหภูมิของสารหล่อเย็นลดลงตลอดเวลา ทดลองวัดอุณหภูมิของสารหล่อเย็นจะอยู่ในช่วง -86 ถึง -96 °C หากต้องการลดอุณหภูมิกลับไปให้ต่ำลงในระหว่างการทดลองต้องทำการเติมไนโตรเจนเหลวลงไปซึ่งก็จะเกิดการแข็งตัวของเมทานอลที่สัมผัสกับไนโตรเจนเหลวและทำให้ความเย็นกระจายตัวได้ไม่ทั่วถึง จากผลการทดลองในตารางที่ 5-14 จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบระบบในห้องปฏิบัติการได้ค่าประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ใกล้เคียงกับรุ่นที่ 2 แต่ผลของการนำไปใช้ในพื้นที่จริงให้ผลที่ดีกว่าเล็กน้อย

ตารางที่ 5-14 แสดงผลการทดสอบระบบควบแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยไนโตรเจนเหลวผสมเมทานอล

ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
N <sub>2</sub> Metanol (tube) ครั้งที่ 1	2755 ±286.7	316 ±80.6	89.7
N <sub>2</sub> Metanol (tube) ครั้งที่ 2	2432 ±276.5	260 ±86.3	90.6
N <sub>2</sub> /Metanol - Glass tube (ค่าเฉลี่ย)			90.2
N <sub>2</sub> Metanol (tube) พื้นที่จริง ครั้งที่ 1	259 ±52.5	108 ±30.6	67.4
N <sub>2</sub> Metanol (tube) พื้นที่จริง ครั้งที่ 2	328 ±68.4	125 ±31.9	69.2
N <sub>2</sub> /Metanol - Glass tube พื้นที่จริง (ค่าเฉลี่ย)			68.3

### 5.2.4 การออกแบบระบบควบแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยไนโตรเจนเหลวและหลอดแก้ว

การออกแบบระบบในรุ่นที่ 4 นั้นเปลี่ยนสารหล่อเย็นเป็นไนโตรเจนเหลวซึ่งเป็นสารหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดในการทดลองและสะดวกในการทำงานเนื่องจากไม่ต้องผสมกับสารชนิดอื่น ที่สำคัญยังสามารถใช้งานในขณะที่ยังอยู่ในถังบรรจุไนโตรเจนเหลวได้เลยทำให้

ลดการสูญเสียไนโตรเจนเหลวระหว่างการเก็บตัวอย่างอีกด้วย อุปกรณ์ที่ใช้เป็นกับดักความเย็นยังคงใช้หลอดแก้วควบแน่นเหมือนในรุ่นที่ 2 และ 3 จากการทดสอบระบบในห้องปฏิบัติการได้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์ในระดับที่ดีมาก โดยเพิ่มขึ้นจาก 84.6% จากระบบวัดเดิมเป็น 95.7% ตามตารางที่ 5-15

แต่เมื่อนำไปใช้ในพื้นที่จริงพบปัญหาเรื่องการแข็งตัวของภาชนะเก็บสารที่ควบแน่นแล้วเนื่องจากมีเทนบางส่วนของที่สัมผัสกับผนังหลอดแก้วควบแน่นโดยตรงถูกควบแน่นเป็นของเหลวอยู่ภายในและ Condensate ที่เป็นองค์ประกอบบางส่วนของก๊าซธรรมชาติกลายเป็นของแข็ง แต่ในช่วงที่ทำการเพิ่มอุณหภูมิกลับ มีเทนจะเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สก่อน สารชนิดอื่นทำให้ผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพไม่มาก แต่ผลการทดสอบระบบในพื้นที่จริงก็ยังคงให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไม่สูงเท่าที่ควรโดยเพิ่มเป็น 71.8% จากระบบวัดเดิมที่ 64.4

ตารางที่ 5-15 แสดงผลการทดสอบระบบควบแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยไนโตรเจนเหลวและหลอดแก้ว

ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
N <sub>2</sub> pure (tube) ครั้งที่ 1	2273 ±71.5	169 ±38.4	93.9
N <sub>2</sub> pure (tube) ครั้งที่ 2	1667 ±52.4	43 ±15.2	99.3
N <sub>2</sub> pure (tube) ครั้งที่ 3	900 ±25.2	58 ±21.8	93.6
N <sub>2</sub> Pure - Glass tube (ค่าเฉลี่ย)			95.7
N <sub>2</sub> Pure (tube) พื้นที่จริง ครั้งที่ 1	305 ±9.6	120 ±23.6	68.5
N <sub>2</sub> Pure (tube) พื้นที่จริง ครั้งที่ 2	284 ±8.9	96 ±24.5	75.2
N <sub>2</sub> Pure (tube) พื้นที่จริง ครั้งที่ 3	423 ±13.3	145 ±27.0	71.6
N <sub>2</sub> Pure - Glass tube พื้นที่จริง (ค่าเฉลี่ย)			71.8

### 5.2.5 การออกแบบระบบควบแน่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยน้ำแข็งแห้งและท่อทองแดง

ในการออกแบบระบบรุ่นที่ 5 ซึ่งเป็นรุ่นสุดท้ายของงานวิจัยชิ้นนี้ ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อดีและข้อเสียของระบบการตรวจวัดที่ได้ออกแบบในรุ่นก่อนหน้าและทำการเลือกสารหล่อเย็นโดยใช้น้ำแข็งแห้งละลายในเมทานอล และกลับมาใช้ท่อทองแดงในรุ่นที่ 1 ซึ่งมีข้อดีในคือมีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนมาก โดยปรับปรุงกระบวนการเก็บตัวอย่างก๊าซเป็น 2 กระบวนการเช่นเดียวกับรุ่นที่ 2 – 4 และออกแบบอุปกรณ์กักเก็บเรดอนและสารที่ควบแน่นแล้วโดยใช้ Flask ขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งออกแบบให้อยู่ในถังบรรจุสารหล่อเย็นอีกใบหนึ่งและเรียงตัวอยู่ต่ำกว่าถังบรรจุสารหล่อเย็นใบแรกเพื่อให้สารที่ควบแน่นแล้วไหลลงสู่ Flask ตามแรงโน้มถ่วงได้ดียิ่งขึ้น จะทำให้ลดการอุดตันภายในท่อทองแดง จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ค่าประสิทธิภาพสูงถึง 92.5% ซึ่งใกล้เคียงกับรุ่นที่ 4 และเมื่อ

นำไปใช้ตรวจวัดเรดอนในพื้นที่จริงให้ค่าประสิทธิภาพสูงถึง 87% ซึ่งสูงที่สุดในระบบที่ทำการออกแบบใหม่ทุกรุ่น

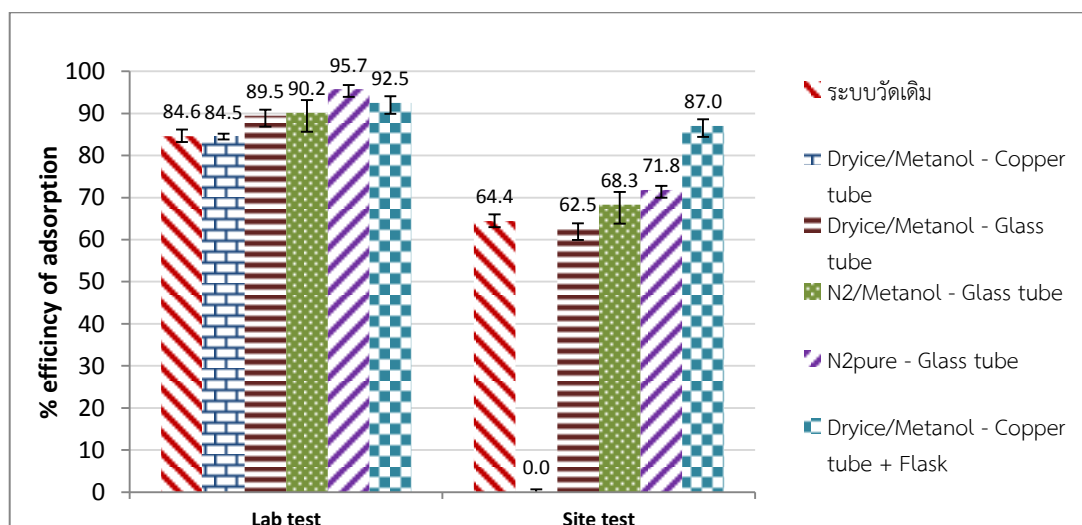
แต่จากการทดลองนำกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ต่อเข้ากับปลายสายยางขาออกจาก Flask ในช่วงที่ทำการควั่นพบว่ามิเรดอนบางส่วนหลุดติดมากับมีเทนที่ปล่อยทิ้งไป ดังแสดงในตารางที่ 5-16

ตารางที่ 5-16 แสดงผลการทดสอบระบบควั่นเพื่อดักจับเรดอนด้วยน้ำแข็งแห้งและท่อทองแดง

ชุดการทดลอง	Area #A	Area #B	% efficiency
dryice flask ครั้งที่ 1	1800 ±56.6	125 ±31.9	94.8
dryice flask ครั้งที่ 2	1540 ±48.4	194 ±49.5	89.4
dryice flask ครั้งที่ 3	1225 ±38.5	113 ±28.8	93.3
Dryice/Metanol - Copper tube + Flask (ค่าเฉลี่ย)			92.5
dryice flask พื้นที่จริง ครั้งที่ 1	297.0 ±29.5	65 ±16.6	87.7
dryice flask พื้นที่จริง ครั้งที่ 2	281.0 ±24.6	63 ±16.1	87.8
dryice flask พื้นที่จริง ครั้งที่ 3	303.0 ±30.1	72 ±18.4	85.5
Dryice/Metanol - Copper tube + Flask พื้นที่จริง (ค่าเฉลี่ย)			87.0
พื้นที่จริง สายบน ครั้งที่ 1	180 ±15.3	.*	.*
พื้นที่จริง สายบน ครั้งที่ 2	136 ±14.7	.*	.*
พื้นที่จริง สายบน (ค่าเฉลี่ย)			158 ±15.0

\*หมายเหตุ: ทำการทดลองเพิ่มโดยใช้กระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์เพียง 1 อัน ไม่คำนวณค่าประสิทธิภาพ

จากผลการทดสอบกระบวนการวัดและระบบการเก็บตัวอย่างก๊าซที่ออกแบบใหม่ทั้ง 5 รุ่นในห้องปฏิบัติการและพื้นที่จริง จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับกระบวนการวัดเดิมได้ แผนภูมิเปรียบเทียบดังแสดงใน รูปที่ 5.5



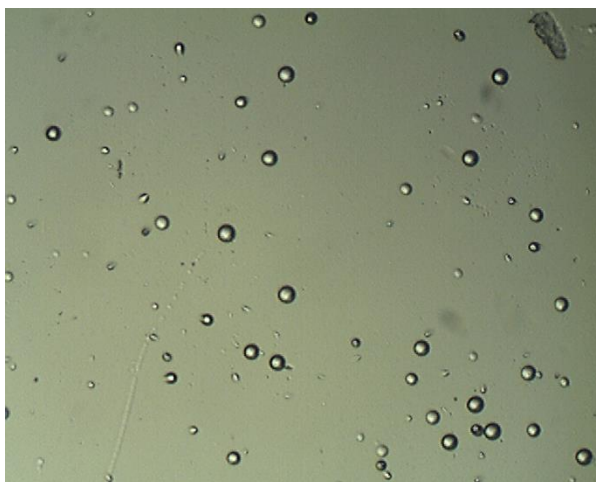
รูปที่ 5.5 แผนภูมิเปรียบเทียบผลการทดสอบระบบการเก็บตัวอย่างก๊าซที่ออกแบบใหม่

### 5.3 การใช้ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ทดสอบกระบวนการวัด

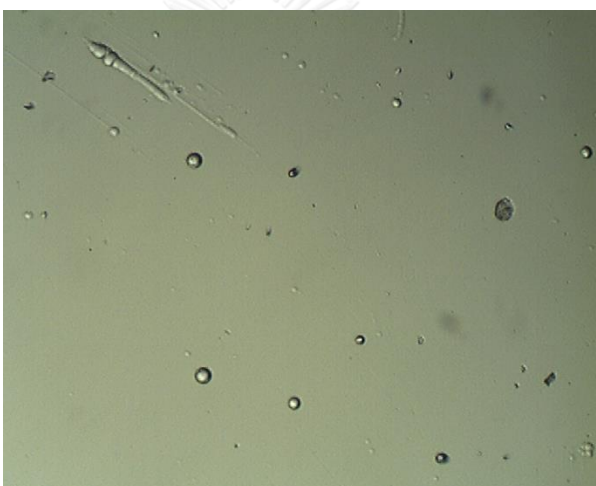
จากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการวัดที่ออกแบบใหม่ที่เลือกระบบรุ่นที่ 4 ที่ใช้สารหล่อเย็นเป็นไนโตรเจนเหลวเพราะได้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์ในห้องปฏิบัติการสูงที่สุดกับกระบวนการตรวจวัดเรดอนแบบเดิมโดยการใช้ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ซึ่งบรรจุในกล่อง Air tight ขนาด 7 ลิตร จำนวน 3 กล่อง ทำจัดเรียงอุปกรณ์ตามรูปที่ 4.9 และทำการอ่านรอยด้วยโปรแกรม ImageJ ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 5-17 สังเกตได้ว่า ผลรวมจำนวนรอยที่บันทึกได้จากฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ที่บรรจุในกล่อง Air tight #2 และ Air tight #3 จะมีค่าใกล้เคียงกับจำนวนรอยที่บันทึกได้จากฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ที่บรรจุในกล่อง Air tight #1 แสดงว่ากระบวนการวัดที่ออกแบบใหม่โดยใช้กับटकความเย็นที่ใช้สารหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวสามารถดักจับเรดอนออกจากก๊าซตัวอย่างได้เกือบทั้งหมด

ตารางที่ 5-17 แสดงผลการทดลองโดยใช้ฟิล์มบันทึกรอยอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39

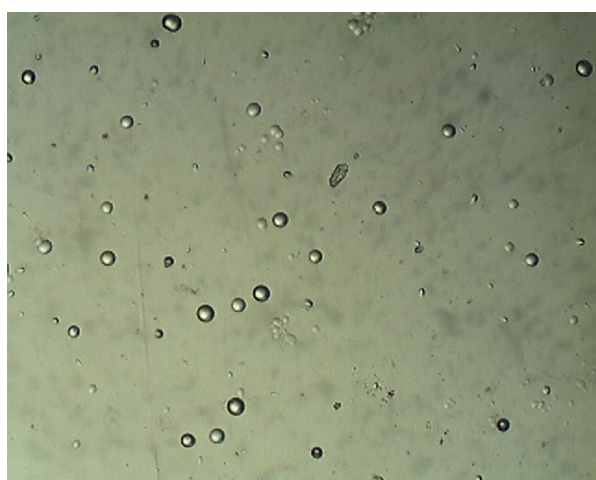
ชุดการทดลอง	จำนวนรอยต่อพื้นที่ 59.86 ตารางมิลลิเมตร					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
Air tight #1 sheet 1	65	48	80	75	73	68.2
Air tight #1 sheet 2	66	72	83	68	71	72
Air tight #1 sheet 3	68	65	73	73	71	70
Air tight #1 (ค่าเฉลี่ย)						70.1
Air tight #2 sheet 1	9	11	11	13	10	10.8
Air tight #2 sheet 2	11	9	10	10	12	10.4
Air tight #2 sheet 3	12	11	13	10	11	11.4
Air tight #2 (ค่าเฉลี่ย)						10.9
Air tight #3 sheet 1	56	47	39	57	60	51.8
Air tight #3 sheet 2	59	55	48	59	42	52.6
Air tight #3 sheet 3	58	49	54	51	54	53.2
Air tight #3 (ค่าเฉลี่ย)						52.5



รูปที่ 5.6 ภาพถ่ายฟิล์มบันทึกรอยอนุภาพอัลฟาชนิด CR-39 ตัวอย่างที่ Air tight #1 sheet 1



รูปที่ 5.7 ภาพถ่ายฟิล์มบันทึกรอยอนุภาพอัลฟาชนิด CR-39 ตัวอย่างที่ Air tight #3 sheet 3



รูปที่ 5.8 ภาพถ่ายฟิล์มบันทึกรอยอนุภาพอัลฟาชนิด CR-39 ตัวอย่างที่ Air tight #3 sheet 2

## บทที่ 6

### สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัย

#### 6.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่อค่าประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

การทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของกระบวนการวัดเดิมนั้นแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง เพื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เพื่อตรวจปริมาณเรดอนที่ผสมอยู่ในอากาศ ก๊าซผสมที่มีมีเทนเป็นองค์ประกอบ และก๊าซธรรมชาติจากแหล่งผลิต จากผลการทดลองพบว่าเทคนิคการตรวจวัดเรดอนโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพสูงมาก เมื่อนำมาตรวจวัดเรดอนที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศที่มีไนโตรเจนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ โดยสามารถให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับมากถึง 99% ในขณะที่เดียวกันเมื่อนำเทคนิคดังกล่าวไปตรวจวัดเรดอนที่ผสมอยู่ในก๊าซที่มีองค์ประกอบต่างไป เช่น มีปริมาณมีเทนสูงขึ้น หรือ ก๊าซธรรมชาติจากแหล่งผลิตปิโตรเลียม ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนก็จะลดต่ำลงจากเดิมเหลือ 84.6% สำหรับการตรวจวัดเรดอนในก๊าซตัวอย่างที่ผสมมีเทนในห้องปฏิบัติการ และ 64.4% สำหรับการใช้งานในการตรวจวัดปริมาณเรดอนจากก๊าซธรรมชาติในพื้นที่จริง ทั้งนี้ในก๊าซธรรมชาติจากแหล่งผลิตมีปริมาณมีเทนมากกว่า 90% ทำให้สรุปได้ว่าปริมาณมีเทนที่มากขึ้นมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง

ทำการศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพในการดูดซับของเรดอนของถ่านกัมมันต์อีก 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ที่ใช้เก็บตัวอย่างก๊าซ และ ระดับความชื้นของก๊าซตัวอย่าง จากการทดลองพบว่าทั้ง 2 ตัวแปรนี้มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนจริง โดยยิ่งอุณหภูมิของถ่านกัมมันต์สูงขึ้นค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์ก็จะลดต่ำลง ดังนั้นการนำเทคนิคนี้ไปใช้งานในพื้นที่จริงซึ่งส่วนใหญ่แหล่งผลิตปิโตรเลียมจะตั้งอยู่กลางแจ้งทำให้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและพื้นที่การเก็บตัวอย่างก๊าซสูงตามไปด้วย การเก็บตัวอย่างก๊าซในพื้นที่จริงจึงควรทำในที่ร่มหรือเตรียมผ้าใบเพื่อเป็นที่กำบังความร้อนในบริเวณที่วางอุปกรณ์ รวมทั้งควรเก็บกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ไว้ในถังเก็บควมเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำไว้เสมอ ส่วนอีกตัวหนึ่งคือ ความชื้นของก๊าซตัวอย่างมีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนในทิศทางเดียวกับอุณหภูมิ คือ ยิ่งความชื้นของก๊าซตัวอย่างมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์มีค่าลดต่ำลง จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่อค่าประสิทธิภาพจะสังเกตได้ว่าตัวแปรความชื้นมีผลต่อค่าประสิทธิภาพมากกว่าตัวแปรอุณหภูมิ ซึ่งเมื่อความชื้นของก๊าซตัวอย่างสูงถึง 80% ค่าประสิทธิภาพจะลดต่ำลงกว่า 65% ดังนั้นในระบบการเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อตรวจวัดปริมาณเรดอนจึงควรมีอุปกรณ์ดูดความชื้นติดตั้งในระบบด้วย และที่สำคัญการเลือกช่วงเวลาที่จะเก็บตัวอย่างก๊าซจึงไม่ควรทำในฤดูฝนที่มีปริมาณความชื้นทั้งในอากาศและในดินสูง

อนึ่งจากการศึกษาเพิ่มเติมทำให้ทราบว่ากระบวนการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับทางฟิสิกส์ คือ ไม่อาศัยปฏิกิริยาทางเคมีในการดูดซับ โดยการดูดซับจะเกิดขึ้นบริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งพื้นที่ผิวแปรผันตรงกับความร้อนของถ่านกัมมันต์ รูพรุนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาถ่านนั้นมีขนาดต่างกัน ในขณะที่ก๊าซผ่านถ่านกัมมันต์ องค์ประกอบของก๊าซซึ่งมี Heat of adsorption ต่างกันจะถูกดูดซับที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้ไม่เท่ากัน อีกทั้งปริมาณก๊าซที่ผ่านเข้ามามาก (จำนวนโมเลกุลหรืออัตราการไหลของก๊าซสูง) ก็ย่อมทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากผลของ Heat of adsorption บนผิวของถ่านกัมมันต์นั่นเอง

การนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการดูดซับเรดอนที่ปนอยู่ในก๊าซธรรมชาติซึ่งมีมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงเมื่อเทียบกับการดูดซับเรดอนที่ปนในอากาศ เนื่องจาก Heat of adsorption ของมีเทนค่าประมาณ 15 – 18 kJ/mol[16] มีเทนจึงรบกวนการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์เพราะมีค่าใกล้เคียงกับ Heat of adsorption ของเรดอน (17 kJ/mol)

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ยังเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิด้วยซึ่งถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการสูญเสียเรดอนที่ดักจับได้ก็จะสูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนลดลงดังที่แสดงในผลการทดลอง ปัจจัยความชื้นมีผลต่อความร้อนซึ่งเมื่อความชื้นสูงขึ้นรูพรุนลดลงพื้นที่ผิวในการดูดซับก็จะลดลงด้วย ลักษณะเช่นนี้เป็นเช่นเดียวกับหลักการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นที่อาศัยสมบัติของความพรุนเช่นกัน[17]

## 6.2 การทดสอบกระบวนการเก็บตัวอย่างใหม่และการนำไปใช้งานในพื้นที่จริง

การออกแบบกระบวนการวัดและระบบในการเก็บตัวอย่างก๊าซใหม่ในงานวิจัยนี้มีอยู่ด้วยกัน 5 รุ่น ซึ่งพัฒนาต่อเนื่องกันโดยการใช้จุดบกพร่องของรุ่นก่อนหน้าเป็นตัวแปรตั้งต้นเพื่อพัฒนาให้ได้ค่าประสิทธิภาพของการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์สูงขึ้น โดยทำการออกแบบและทดลองในห้องทดลองจากนั้นจึงไปใช้จริงในพื้นที่การผลิตปิโตรเลียมจากนั้นนำผลมาวิเคราะห์และปรับปรุงระบบและอุปกรณ์ในรุ่นถัดไป โดยระบบเบื้องต้นได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดูดความชื้นและเก็บกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ที่จะนำมาเก็บตัวอย่างก๊าซไว้ในที่เย็นตามตัวแปรที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าแล้ว แต่อีกปัจจัยหนึ่งคือการลดปริมาณมีเทนจากก๊าซตัวอย่างลงเพื่อทำให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นระบบที่ออกแบบใหม่ทั้ง 5 รุ่น จึงมุ่งเน้นในการเพิ่มขีดความสามารถในการแยกเรดอนออกจากตัวอย่างก๊าซธรรมชาติหรือลดผลกระทบจากมีเทนต่อค่าประสิทธิภาพให้ได้มากที่สุด

ในระบบรุ่นที่ 1 ออกแบบให้การเก็บก๊าซตัวอย่างทำในขั้นตอนเดียวเหมือนระบบวัดเดิม โดยเพิ่มระบบควบแน่นเรดอนด้วยอย่างเย็นที่บรรจุสารหล่อเย็นจากน้ำแข็งแห้งที่ละลายในเมทานอลเพื่อกระจายความเย็นให้ทั่วถึงและใช้ชุดท่อทองแดงเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่ง



จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการยังไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจวัดได้โดยยังคงมีค่าประมาณ 84% เช่นเดิม และเมื่อนำไปใช้งานในพื้นที่จริงกลับพบว่าเกิดการแข็งตัวภายในท่อทองแดงอีกด้วยซึ่งผลเกิดจากปริมาณ Condensate ที่ปนอยู่ในก๊าซธรรมชาติของแหล่งผลิตที่ไปเก็บก๊าซตัวอย่างมีสูง ดังนั้นในรุ่นที่ 2 จึงทำการเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้ทำการควบแน่นเรดอนจากท่อทองแดงมาเป็นหลอดแก้วควบแน่นที่มีพื้นที่ภายในกว้างกว่าท่อทองแดงซึ่งจะช่วยลดปัญหาการอุดตันในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนได้โดยยังใช้สารหล่อเย็นตัวเดิม และเปลี่ยนกระบวนการตรวจวัดโดยแยกขั้นตอนการเก็บก๊าซตัวอย่างออกเป็น 2 กระบวนการ คือ การดักจับเรดอนด้วยความเย็น และการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์จากเรดอนที่ควบแน่น ซึ่งเมื่ออุณหภูมิกลับเรดอนที่ควบแน่นจะเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สและมีความดันสูงขึ้นทำให้เรดอนถูกดันออกสู่กระบอกถ่านกัมมันต์ จากผลการทดลองพบว่าสามารถลดปัญหาการอุดตันได้จริงแต่ยังไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับเรดอนของถ่านกัมมันต์จากเดิมที่ 64.4% เมื่อนำไปใช้งานในพื้นที่จริง สาเหตุมาจากบริเวณกึ่งกลางของหลอดแก้วควบแน่นไม่เย็นมากพอที่จะทำให้เรดอนควบแน่นลงมา จึงทำการเปลี่ยนสารหล่อเย็นในระบบรุ่นที่ 3 โดยทดลองใช้ในโตรเจนเหลวผสมกับเมทานอลซึ่งให้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าน้ำแข็งแห้ง แต่มีข้อเสียคืออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเร็วทำให้ไม่สามารถรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ได้ แต่จากผลการทดลองพบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จากระบบการดักจับเรดอนในรุ่นนี้ดีกว่าในรุ่นก่อนเล็กน้อย โดยค่าประสิทธิภาพที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการอยู่ที่ 90.2% และในพื้นที่จริงได้ค่าประสิทธิภาพประมาณ 68.2%

ในการพัฒนาระบบการเก็บตัวอย่างก๊าซในรุ่นที่ 4 ผู้วิจัยลองใช้ในโตรเจนเหลวเป็นสารหล่อเย็นเนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำที่สุดในสารหล่อเย็นที่ใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาคุณผลที่มีต่อค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ โดยตั้งสมมติฐานว่าถ้าอุณหภูมิมียิ่งต่ำลงจนถึงค่าที่เหมาะสมก็จะทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการวิธีนี้ให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 95.7% และเมื่อนำไปใช้ในพื้นที่จริงพบว่ามีอาการแข็งตัวของสารที่ควบแน่นในหลอดแก้วควบแน่นซึ่งเกิดจากมีเทนบางส่วนควบแน่นและกลายเป็นของแข็งด้วย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิลบเพื่อเปลี่ยนสถานะสารที่ควบแน่นเป็นสถานะแก๊สมีเทนซึ่งมีจุดเดือดต่ำที่สุดจะเปลี่ยนสถานะและถูกดันออกมาก่อน ทำให้ผลการทดลองในพื้นที่จริงได้ค่าประสิทธิภาพของการดูดซับสูงขึ้นเป็น 71.8%

ในการพัฒนาระบบการเก็บตัวอย่างในรุ่นสุดท้ายของงานวิจัยได้วางแนวคิดในการออกแบบใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยเลือกสารหล่อเย็นชนิดน้ำแข็งที่ละลายในเมทานอลโดยมีอุณหภูมิที่ -74 องศาเซลเซียส และออกแบบถังบรรจุสารหล่อเย็นใหม่โดยแยกออกเป็น 2 ถัง ในถังแรกทำหน้าที่ควบแน่นเรดอนให้เปลี่ยนสถานะโดยใช้ชุดท่อทองแดงที่วางตัวในแนวตั้งเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จากนั้นเรดอนจะไหลมาตามสายยางเข้าสู่ Flask ที่แช่อยู่ในสารหล่อเย็นในถังเก็บที่วางอยู่

ด้านล่างของถังใบแรกทำหน้าที่เก็บกักสารที่ควบแน่น การทำเช่นนี้จะลดการแข็งตัวภายในท่อทองแดงได้ ซึ่งได้ผลการทดลองที่ดี คือ ค่าประสิทธิภาพของการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการอยู่ที่ 92.5% และในพื้นที่จริงเท่ากับ 87% แต่ก็ยังมีข้อจำกัดเมื่อนำกระบอกถ่านกัมมันต์ไปลองเก็บตัวอย่างก๊าซที่ปล่อยทิ้งจากกัปดักความเย็น พบว่ามีเรดอนบางส่วนหลุดรอดติดออกมาบ้างมีเหนด้วย

### 6.3 การใช้ฟิล์มบันทึกเรดอนอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ทดสอบกระบวนการวัด

การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างกระบวนการวัดเดิมและกระบวนการวัดที่ออกแบบใหม่โดยใช้ฟิล์มบันทึกเรดอนอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 นั้นเลือกใช้ระบบที่ออกแบบในรุ่นที่ 4 คือ ระบบที่ใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นสารหล่อเย็นในการควบแน่นเรดอนของกัปดักความเย็นซึ่งจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการมีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์สูงสุด ซึ่งจากผลการทดลองโดยการนับเรดอนอนุภาคอัลฟาด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่าไนโตรเจนเหลวสามารถดักจับเรดอนไว้ได้จริงแต่ยังมีเรดอนบางส่วนที่ค้างอยู่ในกล่องบรรจุก๊าซตัวอย่างที่ผ่านการดักจับเรดอนไปแล้ว ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลเวียนของก๊าซตัวอย่างในกล่องบรรจุทำไม่ได้ดีมากพอ โดยเฉพาะบริเวณมุมของกล่องทำให้เรดอนยังคงอยู่ในกล่องบรรจุก๊าซและแสดงผลออกมาผ่านรอยที่ได้บันทึกได้จากฟิล์มวัดเรดอนอนุภาคอัลฟาชนิด CR-39 ที่ทำการทดลอง

### 6.4 ข้อจำกัดของการดำเนินงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากมีเหนเป็นก๊าซที่ติดไฟได้ ทำให้มีข้อจำกัดการเลือกใช้อุปกรณ์และหัววัดต่างๆ
2. การเก็บกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์โดยเฉพาะไนที่เย็นจำเป็นต้องฉนวนกันความร้อนและเก็บไว้ในถุงฉนวนอย่างน้อย 3 ชั้นเพื่อป้องกันความชื้นจากภายนอกเข้าไปในกระบอกบรรจุถ่านกัมมันต์ โดยผู้วิจัยแนะนำว่าไม่ควรเก็บไว้ในที่เย็นจนเกินไป
3. เนื่องจากปริมาณเรดอนในก๊าซธรรมชาติจากแหล่งผลิตบางแหล่งมีปริมาณไม่มาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวางแผนการเก็บก๊าซตัวอย่างและการเดินทางกลับเพื่อนำตัวอย่างมาวัดในห้องปฏิบัติการให้รอบคอบ มิเช่นนั้นจะปริมาณรังสีจะต่ำกว่าปริมาณรังสีพื้นหลัง และทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้
4. การเก็บตัวอย่างในพื้นที่ที่มี Condensate ปนอยู่มากหรือมีแรงดันก๊าซต่ำ หากใช้ระบบวัดที่ติดตั้งกับดักความเย็น (Cold trap) ไม่ควรใช้เวลาในการเก็บตัวอย่างนานเกินไป เพราะจะเกิดการอุดตันภายในท่อนำก๊าซได้
5. งานวิจัยชิ้นนี้ศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพของการตรวจวัดเรดอนโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และทำการปรับปรุงกระบวนการเก็บตัวอย่างก๊าซซึ่ง

กระบวนการต่างๆ เหล่านี้ยุ่งยากกว่าระบบวัดเดิมมาก และด้วยขีดจำกัดในการทดลองที่มีอยู่พอสมควร ดังนั้นหากไม่สามารถนำสารหล่อเย็นรวมทั้งอุปกรณ์จำนวนมากไปด้วย ผู้วิจัยยังคงแนะนำให้ใช้ระบบเดิมในการตรวจวัดเรดอนจากแหล่งผลิตบางแหล่งได้



## รายการอ้างอิง

1. รุ่งธนเกียรติ น., วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2545.
2. Ridge, P.E.a.O. *Introduction to Naturally Occurring Radioactive Materials*. in *42nd Annual Meeting of the Health Physics Society*. 1997.
3. สมชัย บวรกิตติ, พ.พ. อันตรายจากรังสีในสิ่งแวดล้อม. [cited 2556 15 มกราคม]; Available from: <http://healthcarethai.com/อันตรายจากรังสี>.
4. M.S. Al-Masri, R.S., *Radon gas distribution in natural gas processing facilities and workplace air environment*. Department of Protection and Safety, Atomic Energy Commission of Syria(AECS), 2007.
5. M.S. Hamlat, H.k., S. Djeflal, and H. Brahimi, *Radon concentrations in Algerian Oil and Gas industry*. *Applied Radiation and Isotopes*, 2003(58): p. 6.
6. ผึ้งกัน ว., การพัฒนาเทคนิคเพื่อหาปริมาณเรดอน-222 ในอาคารโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์, in *สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์*. 2542, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร.
7. พิทยศาสตร์วุฒิกุล ท., การตรวจวัดอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 จากยิปซัมที่มีโพสฟอริบซัมเป็นองค์ประกอบ:กรณีศึกษาโรงงานยิปซัม, in *สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์*. 2548, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร.
8. โสลา บ., การปรับปรุงกระบวนการเปรียบเทียบสำหรับการวัดก๊าซเรดอนด้วยพลาสติก CR-39, in *สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์*. 2551, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร.
9. เรดอน. [cited 2555 29 กันยายน]; Available from: <http://th.wikipedia.org/wiki/เรดอน>.
10. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี, การหาปริมาณธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติในเครื่องมือและกากจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม. 2549.
11. JostEikenberg, *Radium Isotope Systematics in Nature: Applications Geochronology and Hydrogeochemistry*, in *Earth Science Department*. 2002, Swiss Federal Institute of Technology (ETH): Zurich.
12. IAEA., *Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry*, in *Safety Report Series*. 2003.
13. กัญญา บุญเกียรติ, ช.ง., เทคโนโลยีแก๊สธรรมชาติ. 2551.

14. ก๊าซธรรมชาติ. [cited 2555 29 กันยายน]; Available from: <http://th.wikipedia.org/wiki/ก๊าซธรรมชาติ>.
15. EPA, U.S., *National Radon Proficiency Program Handbook*. 1996. p. 70-74.
16. Rodovic L.R., *Chemistry and Physics of carbom*. Vol. 27. 2001, NY: Marcel Dekker.
17. Stephen I.S., D.R., Charles G.P. , *A study of radon adsorption on activated carbon as a function of temperature*, in *The 1993 International Radon Conference*. 1993: Bedford, MA. p. VP 12 - 18.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### การคำนวณค่าประสิทธิภาพของการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์

ค่าประสิทธิภาพของการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์จำเป็นต้องทราบค่าความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสี ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากผลการทดลองและนำมาคำนวณตามสมการ[5]

$$A = \frac{N_L}{\epsilon \times P_\gamma \times V \times t} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ  $A$  = ค่าความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสี ( $\text{Bq.m}^{-3}$ )

$N_L$  = จำนวนนับรังสีทั้งหมดภายใต้ในช่วงพลังงาน(photo peak)

$\epsilon$  = ค่าประสิทธิภาพในการนับวัดรังสีของเครื่องมือวัด

$P_\gamma$  = ค่า absolute transition probability การสลายตัวให้แกมมาในช่วงพลังงานที่เลือก

$V$  = ปริมาตรของตัวอย่าง (ลูกบาศก์เมตร)

$T$  = ระยะเวลา นับวัด (วินาที)

และคำนวณค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ได้จากสมการที่ 2

$$\% \text{Efficiency} = \left(1 - \frac{\text{activity of radon in charcoal canister \#2}}{\text{activity of radon in charcoal canister \#1}}\right) \times 100 \quad (\text{ก.2})$$

### ตัวอย่างการคำนวณ

ในการทดสอบระบบวัดรุ่นที่ 4 ที่ใช้ในโตรเจนเหลวเป็นสารหล่อเย็นสำหรับกับดักความเย็นในครั้งที่ 3 ในห้องปฏิบัติการ ปริมาตรก๊าซตัวอย่างทั้งหมด 24.7 ลิตร เวลาในการนับวัดเท่ากับ 3600 วินาที ได้ค่าพื้นที่ภายใต้พลังงานที่ 609.3 keV ของ Charcoal canister #1 และ Charcoal canister #2 เท่ากับ 900 และ 58 ตามลำดับ โดยที่ค่า  $\epsilon$  ของหัววัด HPGe ในระบบ Canberra มีค่าเท่ากับ 80% และ absolute transition probability ที่พลังงาน 609.3 keV มีค่าเท่ากับ 41.2%

จากสมการ ( ก.1 ) หาค่า  $A_1$  ของ Charcoal canister #1 จะได้ว่า

$$A_1 = \frac{900}{0.80 \times 0.412 \times 0.0247 \times 3600} = 37.9 \text{ Bq.m}^{-3} \quad (\text{ก.3})$$

จากสมการ ( ก.1 ) หาค่า  $A_2$  ของ Charcoal canister #2 จะได้ว่า

$$A_2 = \frac{58}{0.80 \times 0.412 \times 0.0247 \times 3600} = 2.44 \text{ Bq.m}^{-3} \quad (\text{ก.4})$$

จากสมการ ( ก.2 ) แทนค่า  $A_1$  และ  $A_2$  จากสมการ ( ก.3 ) และ ( ก.4 ) จะได้ว่า

$$\% \text{Efficiency} = \left(1 - \frac{2.44}{37.9}\right) \times 100 = 93.6\%$$

ดังนั้น ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับเรดอนด้วยถ่านกัมมันต์ของการตรวจวัดเรดอนด้วยกระบวนการวัดที่ออกแบบใหม่ในรุ่นที่โดยใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นสารหล่อเย็นสำหรับกับดักความเย็นมีค่าเท่ากับ 93.6%

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพลพิพัฒน์ แก้วพาลชน เกิดวันที่ 29 สิงหาคม พ.ศ. 2530 ที่กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนหอวัง ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2551 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต ในปี 2554 สาขาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

