



การพัฒนาระบบการวัดการกระจายขนาด เพื่อประเมินอัตราการได้รับรังสี  
จากละอองฝุ่นขนาดนาโนเมตรของลูกหลานเรดอนและทอรอนใน  
อุตสาหกรรมแร่ ระยะ 2 ปีที่ 2

Development of Size Distribution System for Dose Assessment Based on  
Nanosize Radon and Thoron Progeny Aerosols in Mineral Industry (Year II)

โดย

สุพิชชา จันทโรโยธา

อรรถพร ภัทรสุมันต์

Shinji Tokonami

ชุติมา กรานรอด

นภาพกาญจน์ สุวรรณคช

พงษ์ยุทธ ศรีพลอย

ทุนวิจัยร่วมภาครัฐกับภาคเอกชน ปี 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ ฯ

กันยายน 2553

การพัฒนากระบวนการวัดการกระจายขนาด เพื่อประเมินอัตราการได้รับรังสีจาก  
ละอองฝุ่นขนาดนาโนเมตรของลูกหลานเรดอนและโธรอนในอุตสาหกรรมแร่  
Development of Size Distribution System for Dose Assessment Based on  
Nanosize Radon and Thoron Progeny Aerosols in Mineral Industry

โดย

สุพิชชา จันทโรโยธา Ph.D. (The University of Arizona)

อรรถพร ภัทรสุมันต์ วศ.ม. (จุฬา)

Shinji Tokonami D.Eng. (Waseda University)

ชุตติมา กรานรอด วท.ม. (จุฬา)

นภากาญจน์ สุวรรณคช วท.ม. (จุฬา)

พงษ์ยุทธ ศรีพลอย วท.ม. (จุฬา)

ทุนวิจัยร่วมภาครัฐกับภาคเอกชน ปี 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพฯ ฯ

กันยายน 2553

## บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้เป็นรายงานฉบับสมบูรณ์ของการวิจัย เรื่อง“การพัฒนากระบวนการวัดการกระจายขนาดเพื่อประเมินอัตราการได้รับรังสีจากละอองฝุ่นขนาดนาโนเมตรของลูกหลานเรดอนและโทรอนในอุตสาหกรรมแร่” โดยการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อ 1) พัฒนาระบบคัดแยกขนาดและระบบวัดรังสี 2) นำระบบที่พัฒนาขึ้นไปทำการตรวจวัดขนาดของละอองฝุ่นของลูกหลานเรดอนและโทรอนในพื้นที่เป้าหมาย 3) ประเมินการได้รับปริมาณรังสีจากก๊าซเรดอนและโทรอนในพื้นที่เป้าหมาย คือ บริษัท ไทยแลนด์สเมลตติ้งแอนด์รีไฟนิง จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานถลุงแร่ดีบุก ตั้งอยู่ที่จังหวัดภูเก็ต งานวิจัยนี้มีระยะเวลาวิจัย 1.5 ปี และงานวิจัยนี้ได้รับการช่วยเหลือจาก National Institute of Radiological Science (NIRS) จากประเทศญี่ปุ่น ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 4 ระบบย่อย ดังต่อไปนี้ ระบบการตรวจวัดก๊าซเรดอน ( $^{222}\text{Rn}$ ) และโทรอน ( $^{220}\text{Rn}$ ), ระบบการตรวจวัดรังสีลูกหลานเรดอนและโทรอน, ระบบการจัดเก็บฝุ่นเพื่อคัดแยกขนาด, ระบบการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละออง สามารถคัดแยกขนาดอนุภาค ของฝุ่นได้ในช่วง 1-10 ไมโครเมตร คณะวิจัยได้นำระบบทั้งหมดที่พัฒนาขึ้นเข้าตรวจวัด ณ พื้นที่เป้าหมาย 2 ครั้ง โดยในครั้งแรกได้เข้าสำรวจเมื่อวันที่ 3 - 5 มีนาคม 2552 และครั้งที่ 2 เมื่อวันที่ 16-18 กุมภาพันธ์ 2553 โดยทำการตรวจวัดแบบระยะสั้นและระยะยาว การตรวจวัดในช่วงระยะสั้นทั้ง 2 ครั้ง พบว่า บริเวณที่มีความเข้มข้นของเรดอนสูงสุด คือ ห้องทำงาน (ครั้งที่ 1:  $34.6 \pm 11.3 \text{ Bq/m}^3$ , ครั้งที่ 2:  $22.11 \pm 10.23 \text{ Bq/m}^3$ ) ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดสำหรับที่อยู่อาศัยที่  $148 \text{ Bq/m}^3$  ส่วนบริเวณที่มีความเข้มข้นโทรอนสูงสุด คือ โรงซักตัวอย่าง (ครั้งที่ 1:  $58.4 \pm 47.4 \text{ Bq/m}^3$ , ครั้งที่ 2:  $53.4 \pm 46.1 \text{ Bq/m}^3$ ) แต่บริเวณที่พบว่ามีค่าความเข้มข้นของลูกหลานโทรอนสูงสุด คือ ห้องทำงาน (ครั้งที่ 1:  $0.43 \pm 0.02 \text{ Bq/m}^3$ , ครั้งที่ 2:  $0.46 \pm 0.05 \text{ Bq/m}^3$ ) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองครั้ง ทั้งนี้เป็นเพราะเป็นห้องปิดที่มีสิ่งแวดล้อมภายในไม่แตกต่างกัน ซึ่งต่างจากบริเวณอื่นที่เป็นบริเวณโล่งกว้างและมีกิจกรรมในแต่ละวันไม่เหมือนกัน รวมทั้งมีการเคลื่อนย้ายวัสดุอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้ค่าที่วัดได้ทั้ง 2 ครั้งในบริเวณอื่นมีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม พบว่า เกือบทุกพื้นที่ที่มีปริมาณลูกหลานโทรอนสูงเกินกว่าที่พบจากการตรวจวัดครั้งที่ 1 สำหรับผลการตรวจวัดความเข้มข้นของ attached และ unattached และการกระจายขนาดของลูกหลานเรดอนและโทรอนในอากาศ พบว่า บริเวณห้องทำงาน เป็นบริเวณที่มีค่า unattached ของธาตุลูกหลานของเรดอนมากที่สุด มีค่าเท่ากับ  $2.71 \pm 0.94 \text{ Bq/m}^3$  และนอกจากนี้ยังเป็นบริเวณที่มีการกระจายขนาดของลูกหลานเรดอนมีขนาดเล็กสุด เท่ากับ 340 nm แต่บริเวณที่มีค่า attached ของธาตุลูกหลานของเรดอนสูงสุด คือ โรงซักตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ  $3.66 \pm 0.75 \text{ Bq/m}^3$

ผลการตรวจวัดความเข้มข้นของเรดอนและโทรอนในระยะยาว ในพื้นที่เดียวกับการตรวจวัดระยะสั้น และเพิ่มอีก 1 พื้นที่ คือ โรงเก็บหางแร่ ด้วยเทคนิค SSNTD โดยทำการแขวนหัววัดชนิดฟิล์ม CR-39 ไว้ในพื้นที่

ข้างต้นเป็นเวลา 9 เดือน จากการตรวจวัด พบว่า ความเข้มข้นของเรดอนและโทรอนโดยทั่วไปมีความสอดคล้องกับการตรวจวัดในช่วงเวลาสั้น ๆ แต่พบบางช่วงเวลาที่มีความไม่สอดคล้องกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความแตกต่างของกิจกรรม ปริมาณวัสดุ และอิทธิพลของพารามิเตอร์อื่น (อุณหภูมิ, ความดันบรรยากาศ และความชื้น) ที่มีผลต่อการฟุ้งกระจายของก๊าซเรดอนและโทรอนในบริเวณที่ตรวจวัด

จากการประเมินอัตราการได้รับรังสี พบว่า บริเวณที่มีอัตราการได้รับรังสีสูงสุด คือ บริเวณห้องทำงาน รองลงมา คือ บริเวณโรงเก็บแร่แทนทาลัม และบริเวณต่ำสุด คือ บริเวณโรงชกตัวอย่าง (4.22 mSv/y, 1.76 mSv/y และ 0.78 mSv/y) ซึ่งปริมาณรังสีรวมที่ประชาชนทั่วไปควรได้รับมีค่าไม่เกิน 2.4 mSv/y และประมาณ 50 % เป็นการได้รับรังสีเนื่องจากการหายใจเอาลูกหลานเรดอนและโทรอนเข้าสู่ร่างกาย (1.26 mSv/y) จะเห็นได้ว่า อัตราการปริมาณรังสีที่ได้รับจากก๊าซเรดอนจากบริเวณห้องทำงานสูงกว่าโรงเก็บแร่แทนทาลัม และทั้งสองแห่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ประชาชนทั่วไปควรได้รับ ดังนั้น บุคคลที่ทำงานอยู่ในบริเวณนั้น ๆ ควรสวมหน้ากากป้องกันฝุ่นละออง

ในการวิจัยนี้ คณะวิจัยได้ใช้เครื่อง WLx ซึ่งเป็นเครื่องมือทางการค้ามาใช้ตรวจวัดเปรียบเทียบหาความเข้มข้นของเรดอนและโทรอนในหน่วยของ Working Level ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการตรวจวัดที่ได้จากเครื่องมือที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า ระบบการตรวจวัดและอุปกรณ์ที่ทางคณะวิจัยได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้นนั้น สามารถใช้งานได้จริง และให้ผลที่น่าเชื่อถือ

## Abstract

This is a final report of *“Development of Size Distribution System for Dose Assessment Based on Nanosize Radon and Thoron Progeny Aerosols in Mineral Industry.”* The research objectives are to 1) develop the size distribution and radiation measurement system, 2) implement the developed system in field work for determining the size distribution of aerosol of radon and thoron progenies, and 3) assess the radiation dose from receiving radon and thoron gas. The target area in this study is the Tin smelting located in Phuket province, Thailand, namely Smelting and Refining Company Limited. Research duration is 1.5 years. This research received the technical assistant and some equipment from National Institute of Radiological Science (NIRS), Japan. The research results can be summaries as follows.

The following 4 sub- systems were developed: 1) Radon-Thoron measurement system, 2) Radon-Thoron progeny system, 3) aerosol particle collection system for size distribution and 4) particle size testing system which can distinguish of the 1-10  $\mu\text{m}$  particle size. All developed system was implemented for short-term and long-term measurement in target area in March 3-5, 2009 and February 16-18, 2010. The measurement areas include HSE office, ore storage, ore sample, tantalum storage, and Slag Bay.

For short-term measurement, the highest radon concentration was found in HSE office ( $34.6 \pm 11.3 \text{ Bq/m}^3$  for 1<sup>st</sup> measurement and  $22.11 \pm 10.23 \text{ Bq/m}^3$  for 2<sup>nd</sup> measurement). However, these values are still lower than the action level of  $148 \text{ Bq/m}^3$  for the dwelling concentration. The highest thoron concentration was found at ore sampling area ( $58.4 \pm 47.4 \text{ Bq/m}^3$  for 1<sup>st</sup> measurement and  $53.4 \pm 46.1 \text{ Bq/m}^3$  for 2<sup>nd</sup> measurement). There has no action level for thoron established yet. Thoron progenies were found about the same level in HSE office for both investigations,. The HSE office is a close room and daily activity about the same during the period of measurement. Others measurement areas are large, open to air, and daily activities depend on the movement of ore materials.

However, in the second measurement, it was found that the thoron progeny concentration in all measurement area increased. The highest unattached and smallest size distributions of radon progeny were found at HSE office ( $2.71 \pm 0.94 \text{ Bq/m}^3$  and 340 nm, respectively) but the highest attached radon progeny was found at sampling area ( $3.66 \pm 0.75 \text{ Bq/m}^3$ ).

For long-term measurement, SSNDT CR-39 type was used for determination of radon and thoron concentrations. The measurement was carried on for every 3 months over the period of 9 months. The results agreed with the result of short-term measurement in almost areas for the whole measurement period. However, there are some parameters that effect to the emanation of radon and thoron from their sources during the period of measurement such as the local activities, ore quantity, temperature, pressure and humidity.

The assessment of effective dose in the study areas found to be 4.22 mSv/y, 1.76 mSv/y, 0.78 mSv/y in HSE office, tantalum storage area and sampling area, respectively. The annual effective dose recommend for public should not higher than 2.4 mSv/y, which 50 % of this value come from the inhalation of radon and thoron progenies (1.26 mSv/y). The results shows that the effective doses at HSF office and tantalum storage are higher than the recommended annual effective dose for public. Therefore, workers who are working in these areas should wear mask to protect themselves.

In this study, WLx monitor was also used to validate our development system by measuring radon and thoron concentration in unit of working level. The results agree and consistent with our results. Therefore, it can be said that our designed and developed system of radon and thoron measurement is reliable system.

## คำนำ

รายงานฉบับนี้เป็น **รายงานฉบับสมบูรณ์** สำหรับโครงการวิจัยร่วมภาครัฐกับเอกชน เรื่อง “การพัฒนาระบบการวัดการกระจายขนาดเพื่อประเมินอัตราการได้รับรังสีจากละอองฝุ่นขนาดนาโนเมตรของลูกหลานเรดอนและทอรอนในอุตสาหกรรมแร่” เนื้อหาของรายงานฉบับนี้ประกอบด้วยบทต่าง ๆ รวม 8 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ ความเป็นมาของโครงการ วัตถุประสงค์ ขอบข่ายของการศึกษา แผนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่ได้รับ

บทที่ 2 ระบบการตรวจวัดในภาคสนาม และการจัดเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อคัดแยกขนาด

บทที่ 3 การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อคัดแยกขนาด

บทที่ 4 การดำเนินการวิจัย สำหรับการเข้าสำรวจพื้นที่

บทที่ 5 ผลการเข้าสำรวจภาคสนาม ครั้งที่ 1

บทที่ 6 ผลการเข้าสำรวจภาคสนาม ครั้งที่ 2

บทที่ 7 การประเมินอัตราการได้รับรังสีเนื่องจากก๊าซเรดอนและทอรอน

บทที่ 8 สรุปผลการวิจัย

ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณค่าการกระจายตัวของธาดูลูกหลานเรดอน

ภาคผนวก ข Worksheet

ภาคผนวก ค หนังสือแสดงความอนุเคราะห์อุปกรณ์การตรวจวัดจาก สถาบัน NIRS

คณะผู้วิจัย

รศ. ดร. สุพิชชา จันทโรยธา

ผศ. อรรถพร ภัทรสุมันต์

Dr. Shinji Tokonami

นางสาวชุตติมา กรานรอด

นางสาวนภากาญจน์ สุวรรณคช

นายพงษ์ยุทธ ศรีพลอย

## กิตติกรรมประกาศ

ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีขอขอบคุณเป็นอย่างสูงยิ่งต่อบริษัท ไทยแลนด์สแมลติ้งแอนดรีไฟนิง จำกัด (ไทยซาร์โก) ที่ได้สนับสนุนงบประมาณในโครงการวิจัยร่วมภาครัฐกับเอกชน เรื่อง “การพัฒนากระบวนการกระจายขนาดเพื่อประเมินอัตราการได้รับรังสีจากละอองฝุ่นขนาดนาโนเมตรของลูกหลานเรดอนและโธรอนในอุตสาหกรรมแร่” เป็นจำนวน 200,000.- (สองแสนบาทถ้วน) พร้อมทั้งให้ความอนุเคราะห์อำนวยความสะดวกในการเข้าสำรวจพื้นที่จนทำงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ในระหว่างการทำเนิงานของโครงการ คณะผู้วิจัยได้รับความร่วมมือและสนับสนุนเป็นอย่างดีจาก คุณสมชัย ชูไชยชนะ และเจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้องในพื้นที่ที่ศึกษาในความอนุเคราะห์อำนวยความสะดวก ให้ข้อมูลเอกสาร การติดต่อประสานงาน รวมทั้งในการให้การช่วยเหลือในการจัดเก็บตัวอย่างเป็นอย่างดี

ท้ายสุดนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานงบประมาณที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการจัดซื้อเครื่องมือวัดรังสีและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการให้กับโครงการนี้



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	iii
คำนำ.....	v
กิตติกรรมประกาศ.....	vi
สารบัญ.....	vii
สารบัญตาราง.....	x
สารบัญรูป.....	xi
บทที่ 1 บทนำ.....	1-1
1.1 ชื่อโครงการ.....	1-1
1.2 คณะผู้ดำเนินการวิจัย.....	1-1
1.3 หน่วยงานที่รับผิดชอบ.....	1-1
1.4 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1-2
1.5 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1-5
1.6 ขอบข่ายของการศึกษา.....	1-5
1.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	1-5
1.8 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	1-5
1.9 ระเบียบวิธีวิจัย.....	1-6
1.10 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ.....	1-6
1.11 ผลงานวิจัยในต่างประเทศ.....	1-6
บทที่ 2 ระบบการตรวจวัดในภาคสนาม และการจัดเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อคัดแยกขนาด.....	2-1
2.1 การออกแบบระบบวัด และการจัดเก็บตัวอย่างฝุ่น.....	2-1
2.1.1 การออกแบบระบบวัดเรดอนและทอรอนในอากาศ.....	2-1
2.1.2 ระบบการตรวจวัดรังสีลูกหลาน และทอรอนในอากาศ.....	2-3
2.1.3 ระบบการจัดเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อคัดแยกขนาด.....	2-5

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....	3-1
3.1 รายละเอียดของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นละออง.....	3-1
3.2 ระบบทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อคัดแยก ขนาด.....	3-1
3.3 ขั้นตอนการทดสอบ.....	3-2
3.4 ผลการทดสอบ.....	3-3
3.5 สรุปผลการทดสอบ.....	3-5
3.6 การหาประสิทธิภาพการจับฝุ่นแต่ละขนาดของอุปกรณ์จับตัวอย่างฝุ่น.....	3-5
3.7 ผลการหาประสิทธิภาพการจับฝุ่นแต่ละขนาดของอุปกรณ์จับตัวอย่างฝุ่น.....	3-7
3.8 สรุปผลการทดลองการหาประสิทธิภาพการจับฝุ่น.....	3-8
บทที่ 4 การดำเนินการวิจัย สำหรับการเข้าสำรวจพื้นที่.....	4-1
4.1 แผนการดำเนินงาน.....	4-2
4.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	4-3
4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด.....	4-4
บทที่ 5 ผลการเข้าสำรวจภาคสนาม ครั้งที่ 1.....	5-1
5.1 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโพลอน ณ พื้นที่ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ.....	5-1
5.1.1 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโพลอนโดยตรงด้วยเครื่องมือวัด ที่มีชื่อว่า RAD 7.....	5-1
5.1.2 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโพลอนโดยทางอ้อมจากความ เข้มข้นของธาตุลูกหลานของเรดอนและโพลอน.....	5-4
5.1.3 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโพลอนในหน่วยของ Working Level.....	5-7
5.2 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโพลอน ณ พื้นที่ในช่วงระยะเวลายาว.....	5-9
บทที่ 6 ผลการเข้าสำรวจภาคสนาม ครั้งที่ 2.....	6-1
6.1 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโพลอน ณ พื้นที่ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ.....	6-1
6.1.1 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโพลอนโดยตรงด้วยเครื่องมือวัด ที่มีชื่อว่า RAD 7.....	6-1

## สารบัญ

	หน้า
6.1.2 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโพรอนโดยทางอ้อมจากความ เข้มข้นของธาตุลูกหลานของเรดอนและโพรอน.....	6-4
6.1.3 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโพรอนในหน่วยของ Working Level.....	6-8
6.2 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโพรอน ณ พื้นที่ในช่วงระยะเวลายาว .....	6-11
บทที่ 7 การประเมินอัตราการได้รับรังสีเนื่องจากก๊าซเรดอนและโพรอน.....	7-1
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัย.....	8-1
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	8-1
8.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	8-4
8.3 ข้อเสนอแนะ.....	8-4
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณค่าการกระจายตัวของธาตุลูกหลานเรดอน.....	ก-1
ภาคผนวก ข work sheet.....	ข-1
ภาคผนวก ค หนังสือแสดงความอนุเคราะห์อุปกรณ์การตรวจวัดจากสถาบัน NIRS.....	ค-1

## สารบัญตาราง

หน้า

### ตารางที่

3.1 ความเข้มข้นของลูกหลานของโทรอน.....	3-4
3.2 ความเข้มข้นเฉลี่ยของไอโซทอปตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่างวัด โดยเครื่อง SMPS.....	3-5
4.1 สรุปขั้นตอนที่เข้าตรวจวัดในพื้นที่เป้าหมาย.....	4-3
5.1 ความเข้มข้นของเรดอนและโทรอนที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง RAD 7 ในบริเวณต่าง ๆ.....	5-2
5.2 ค่า EETC ของ โทรอนในพื้นที่ทำการตรวจวัด.....	5-4
5.3 ความเข้มข้นของธาตุลูกหลานเรดอนที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง WLx ในบริเวณต่าง ๆ.....	5-7
6.1 ความเข้มข้นของเรดอนและโทรอนที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง RAD 7 ในบริเวณต่าง ๆ.....	6-2
6.2 ค่า EETC ของ โทรอนในพื้นที่ทำการตรวจวัด.....	6-4
6.3 ค่า attached และ unattached fraction ของธาตุลูกหลานเรดอนในพื้นที่ทำการตรวจวัด.....	6-6
6.4 การกระจายตัวของธาตุลูกหลานเรดอนที่ตรวจวัดได้ในพื้นที่ต่าง ๆ.....	6-7
6.5 ความเข้มข้นของธาตุลูกหลานเรดอนที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง WLx ในบริเวณต่าง ๆ.....	6-9
6.6 ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนและโทรอนเฉลี่ยตลอดช่วงระยะเวลา 9 เดือน.....	6-12
7.1 $DCF_{ac}$ จากการคำนวณด้วยโปรแกรม LUDEP.....	7-1
7.2 ค่า DCF ที่ได้จากการคำนวณ.....	7-2
7.3 ค่า equilibrium factor (F) ที่ได้จากการตรวจวัดในแต่ละพื้นที่.....	7-3
7.4 ผลการประเมินอัตราการได้รับรังสีเนื่องจากก๊าซเรดอนของพนักงานในพื้นที่ต่าง ๆ.....	7-3

## สารบัญญรูป

	หน้า
<b>รูปที่</b>	
1.1 อนุกรมการสลายตัวของ U-238.....	1-4
1.2 อนุกรมการสลายตัวของ Th-232.....	1-4
2.1 ส่วนประกอบ และรายละเอียดระบบต่าง ๆ ในตัวเครื่อง RAD 7.....	2-2
2.2 a) ระบบเก็บตัวอย่างอากาศ b) ระบบวัดรังสีที่ใช้ในการตรวจวัดลูกหลานของเรดอน.....	2-4
2.3 a) ระบบเก็บตัวอย่างอากาศ b) ระบบวัดรังสี ที่ใช้ในการตรวจวัดลูกหลานของโพรตอน.....	2-5
2.4 ภาพตัดขวางของ impactor.....	2-6
2.5 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละออง (Impactor sampler).....	2-7
2.6 a) ระบบเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสี b) ระบบวัดรังสี สำหรับการวิเคราะห์การกระจายขนาด ของอนุภาคฝุ่นละอองรังสี.....	2-8
3.1 ระบบทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสี.....	3-2
3.2 เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ.....	3-3
3.3 การกระจายตัวของอนุภาคของฝุ่นละอองของลูกหลานโพรตอน.....	3-4
3.4 ความเข้มข้นเฉลี่ยของไอโซทอปตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่างวัดโดยเครื่อง SMPS.....	3-5
3.5 เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพการแยกแยะขนาดของฝุ่น.....	3-6
3.6 ประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่นละอองของชั้นที่ 3 (1µm) ที่ฝุ่นขนาดต่าง ๆ กัน.....	3-7
4.1 แผนที่ตั้งและภาพถ่ายดาวเทียมของพื้นที่เป้าหมายการวิจัย.....	4-1
4.2 ผังการดำเนินงานวิจัยและประเด็นหลักการศึกษา.....	4-2
5.1 ความเข้มข้นของเรดอนและโพรตอนที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์วัดชื่อ RAD 7 ในพื้นที่ศึกษา.....	5-3
5.2 ระบบเก็บตัวอย่าง และระบบวัดสำหรับการหาความเข้มข้นของ attached และ Unattached fraction ของ ธาตุลูกหลานเรดอนและโพรตอน.....	5-5
5.3 ระบบเก็บตัวอย่าง และระบบการตรวจวัดการกระจายตัวของ ธาตุลูกหลานเรดอนและโพรตอน.....	5-6
5.4 ความเข้มข้นของธาตุลูกหลานเรดอนที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์วัดชื่อ WLx ในพื้นที่ศึกษา.....	5-8
6.1 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนเรดอนและโพรตอนโดยตรงด้วยเครื่อง RAD 7 ณ พื้นที่เป้าหมาย.....	6-1
6.2 ความเข้มข้นของเรดอนและโพรตอนที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์วัดชื่อ RAD 7 ในพื้นที่ศึกษา.....	6-3
6.3 ระบบเก็บตัวอย่างและระบบวัดสำหรับการหาความเข้มข้นของ attached และ unattached fraction ของธาตุลูกหลานเรดอนและโพรตอน.....	6-5

## สารบัญญรูป

หน้า

### รูปที่

6.4	ไดอะแกรมระบบเก็บตัวอย่างและระบบวัดสำหรับการหาความเข้มข้นของ attached และ unattached fraction ของธาตุลูกหลานเรดอนและโพรตอน.....	6-6
6.5	ระบบเก็บตัวอย่างและระบบการตรวจวัดการกระจายตัวของธาตุลูกหลานเรดอนและโพรตอน.....	6-8
6.6	การตรวจวัดความเข้มข้นของเรดอนและโพรตอน โดยวัดทางอ้อมจากความเข้มข้นของธาตุด้วยเครื่องวัดเครื่อง WLx ณ บริเวณโรงซักตัวอย่างแร่.....	6-9
6.7	ความเข้มข้นของธาตุลูกหลานเรดอนที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์วัดชื่อ WLx ในพื้นที่ศึกษา.....	6-10
6.8	ระบบการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโพรตอน ณ พื้นที่ในช่วงระยะเวลายาว.....	6-11
6.9	ความเข้มข้นกัมมันตภาพ a) ก๊าซเรดอน b) ก๊าซโพรตอน ตลอดช่วงระยะเวลา 9 เดือน ที่ทำการติดตั้ง.....	6-12
ก-1	การสร้างกราฟแบบ Log-Normal Distribution.....	ก-1
ก-2	worksheet ที่ใช้ในการคำนวณค่า AMAD และ $\sigma_g$ .....	ก-2

---

## บทที่ 1 บทนำ

---

1.1 ชื่อโครงการ.....	1-1
1.2 คณะผู้ดำเนินการวิจัย.....	1-1
1.3 หน่วยงานที่รับผิดชอบ.....	1-1
1.4 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1-2
1.5 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1-5
1.6 ขอบข่ายของการศึกษา.....	1-5
1.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	1-5
1.8 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	1-5
1.9 ระเบียบวิธีวิจัย.....	1-6
1.10 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ.....	1-6
1.11 ผลงานวิจัยในต่างประเทศ.....	1-6

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ชื่อโครงการ

การพัฒนาระบบการวัดการกระจายขนาดเพื่อประเมินอัตราการได้รับรังสีจากละอองฝุ่นขนาดนาโนเมตร  
ของลูกหลานเรดอนและโธรอนในอุตสาหกรรมแร่  
(Development of Size Distribution System for Dose Assessment Based on Nanosize Radon  
and Thoron Progeny Aerosols in Mineral Industry)

#### 1.2 คณะดำเนินการ ผู้วิจัย

- 1.2.1 หัวหน้าโครงการวิจัย รศ. ดร. สุพิชชา จันทโรยธา ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 1.2.2 ผู้วิจัย ผศ. อรรถพร ภัทรสุมันต์ ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 1.2.3 Dr. S. Tokonami ผู้เชี่ยวชาญจาก National Institute for Radiological Science (NIRS)  
ประเทศญี่ปุ่น
- 1.2.4 ผู้ช่วยวิจัย  
นางสาวชุตติมา กรานรอด  
นางสาวนภากาญจน์ สุวรรณคช  
นายพงษ์ยุทธ ศรีพลอย

#### 1.3 หน่วยงานที่รับผิดชอบ

หน่วยปฏิบัติการวิจัยนิวเคลียร์เทคโนโลยีประยุกต์ในงานอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม  
ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการนี้มีความร่วมมือกับหน่วยงาน

- สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ
- อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง เช่น โรงถลุงแร่ดีบุก
- National Institute for Radiological Science (NIRS) ประเทศญี่ปุ่น



#### 1.4 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในระหว่างปีงบประมาณ 2546-2548 ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐกับเอกชน ให้ทำการศึกษา “การหาปริมาณธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติในผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์พลอยได้ และ กากที่ได้จากอุตสาหกรรมแร่หนัก แร่หินอุตสาหกรรม และกากจากการผลิตน้ำประปา” โดยมีภาคอุตสาหกรรมที่เข้าร่วมโครงการ ดังนี้ บริษัท ปตท.สผ จำกัดมหาชน, บริษัท ปตท สยาม จำกัด (บริษัท ไทยเชลล์เดิม), บริษัท ไทยสมเผลดิงแอนดรีไฟนิง จำกัด (ถลุงแร่ดีบุก) และบริษัทเอกชนที่ไม่ประสงค์จะออกนาม 2 บริษัท และภาครัฐคือ การประปานครหลวงและส่วนภูมิภาค ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ผลิตภัณฑ์และกากบางชนิดของภาคอุตสาหกรรมและภาครัฐที่เข้าร่วมโครงการข้างต้นมีระดับปริมาณความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีสูง และ พบว่า ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมบางแห่ง มีสภาวะแวดล้อมที่มีฝุ่นละอองฟุ้งกระจายซึ่งอาจมีผลต่อระบบหายใจ โดยเฉพาะฝุ่นละอองที่ปนเปื้อนนิวไคลด์กัมมันตรังสีจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีเรดอนและโพรตอนซึ่งฟุ้งกระจายออกมาจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ดังนั้นในอากาศที่มีเรดอนหรือโพรตอนปะปนอยู่จึงมีฝุ่นละอองรังสีที่เป็นธาตุลูกของเรดอนและโพรตอนซึ่งมีขนาดเล็กมากในลำดับนาโนเมตรปะปนอยู่ด้วยเสมอ เมื่อฝุ่นละอองมีประจุบวกเหล่านี้จะเกาะติดกับอนุภาคฝุ่นละอองอื่น ๆ ในอากาศได้ง่าย ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นในลำดับไมโครเมตร ซึ่งในการสำรวจครั้งนั้นไม่ได้ทำการตัดแยกขนาดของอนุภาคเพราะในการประเมินการได้รับปริมาณรังสีจากก๊าซเรดอนและโพรตอนที่ถูกต้อง ต้องอาศัยอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการตัดแยก ขนาดของอนุภาคธาตุลูกหลานเรดอน-โพรตอนที่ฟุ้งกระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมนั้น ๆ ซึ่งในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาและไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถทำการตัดแยกขนาดและตรวจวัดปริมาณรังสีได้พร้อมกันในขณะที่ทำการเก็บตัวอย่างอากาศในพื้นที่ จึงเป็นที่มาของโครงการนี้

ในปีงบประมาณปี 2551-2552 คณะวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐและเอกชนอีกครั้ง เพื่อทำการออกแบบและจัดซื้อครุภัณฑ์ที่ใช้เพื่อการพัฒนาแบบคัดแยกขนาดและระบบวัดรังสี ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ ทางคณะวิจัยได้ประสานความร่วมมือกับสถาบัน National Institute for Radiological Science (NIRS) ของประเทศญี่ปุ่นซึ่งเป็นสถาบันระดับชาติและนานาชาติที่มีความเชี่ยวชาญทางด้าน การตรวจวัดปริมาณเรดอนในสิ่งแวดล้อม ในการให้คำปรึกษาเกี่ยวกับระบบที่จะพัฒนาขึ้นในโครงการวิจัยนี้ ซึ่งทางสถาบัน NIRS ได้ตอบรับที่จะให้ความร่วมมือในการพัฒนาระบบคัดแยกขนาดและยีนดีที่จะส่งผู้เชี่ยวชาญมาให้ความช่วยเหลือในการศึกษา และร่วมมือในการปรับเทียบและสอบเทียบค่าที่วัดได้จากระบบวัดที่จะพัฒนาขึ้นจากการวิจัยนี้ ซึ่งคณะวิจัยเห็นว่าการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการศึกษาศาสตร์และวิจัยและต่อภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น ในการทำวิจัยนี้ คณะวิจัยจึงได้ทำข้อเสนอโครงการส่งไปตามอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในการขอความสนับสนุนและความร่วมมือกับภาคเอกชนและเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของแหล่งทุนวิจัยนี้ด้วย และในปีงบประมาณ 2552 นี้ คณะวิจัยได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากบริษัท ไทย

แลนดิสแมลติงแอนดรีไฟนิง จำกัด (ไทยซาร์โก) ในการสนับสนุนการวิจัยในภาคสนาม และให้งบประมาณสนับสนุนเป็นจำนวน 200000.- (สองแสนบาทถ้วน)

รายงานฉบับนี้เป็นการนำเสนอผลการเข้าศึกษาในภาคสนามของ บริษัท ไทยซาร์โก จำกัด โดยใช้ระบบวัดการกระจายขนาดของอนุภาคที่พัฒนาขึ้น

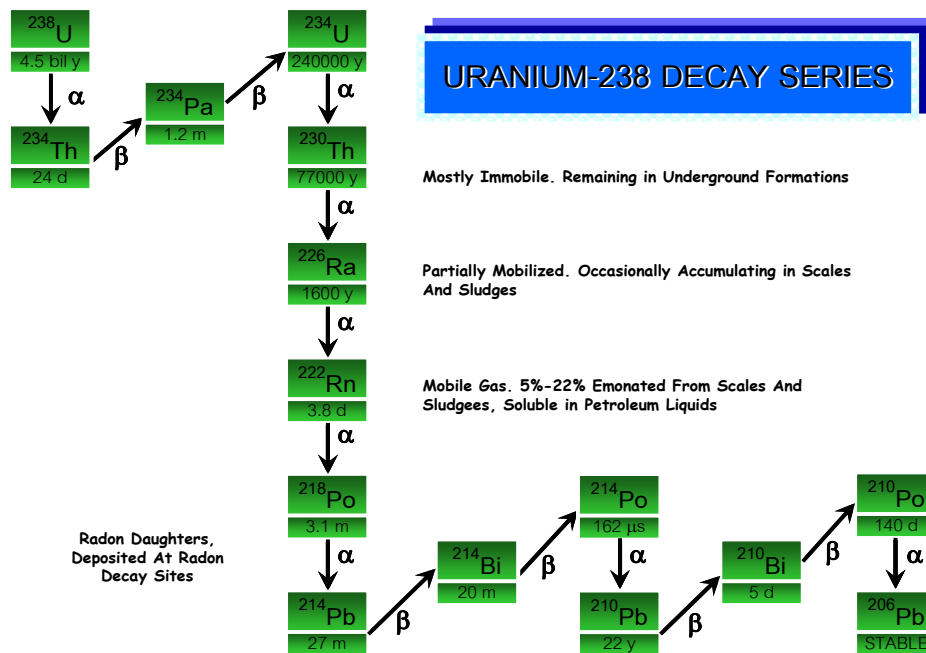
## เหตุผลทางวิชาการ

เป็นที่ทราบกันดีว่าครึ่งหนึ่งของปริมาณรังสีรวมต่อปีที่มนุษย์เราได้รับจากแหล่งกำเนิดรังสีตามธรรมชาติ นั้นเป็นผลเนื่องจากการหายใจเอาธาตุลูกหลานของกัมมันตรังสีเรดอน ( $^{222}\text{Rn}$ ) ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตสั้น อัน ได้แก่ โพลเนียม-218, ตะกั่ว-214, บิสมัท-214 และ โพลเนียม-214 (Nero, 1988) สำหรับอนุกรมการสลายตัวของเรดอนและโทรอนแสดงดังรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2 ตามลำดับ โดยธาตุกัมมันตรังสีต่าง ๆ เหล่านี้จะมียุอยู่ในอากาศทั้งภายในและภายนอกที่อยู่อาศัย โดยธาตุลูกหลานของเรดอนที่แผ่ออกมานั้นมีประจุบวกจึงจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับโมเลกุลของอากาศ, ไอน้ำ และก่อตัวเป็นกลุ่มก้อนซึ่งอาจมีประจุหรือไม่มีประจุและมีขนาดเฉลี่ย (activity median aerodynamic diameter, AMAD) น้อยกว่า 10 nm ฝุ่นละอองนี้จะถูกเรียกว่า unattached decay products ซึ่งถ้าฝุ่นละอองนี้ไปเกาะติดกับอนุภาคฝุ่นละอองในอากาศก่อตัวเป็นละอองกัมมันตรังสีที่มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยมีขนาดตั้งแต่ 10-1000 nm เราจะเรียกกลุ่มนี้ว่า attached decay product

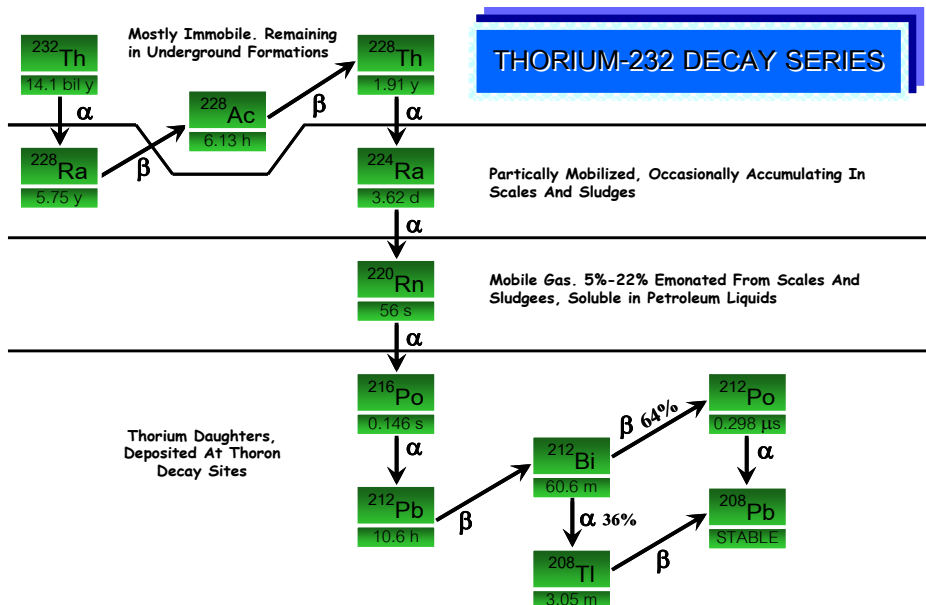
เนื่องจากการประเมินการได้รับปริมาณรังสีจากเรดอน โทรอน และลูกหลานนั้นไม่สามารถทำการวัดได้จากการตรวจสอบทางชีววิทยา (bioassay) ของบุคคลได้ จึงจำเป็นต้องทำการตรวจวัดในพื้นที่และนำมาประเมินปริมาณรังสีดูดกลืนที่ปอดได้รับเนื่องจากธาตุลูกหลานของเรดอน-โทรอน ดังนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงขนาดและปริมาณของ Unattached decay products เนื่องจากอนุภาคกัมมันตรังสีกลุ่มนี้เมื่อหายใจเข้าไปจะสะสมอยู่ตามระบบทางเดินหายใจ ตั้งแต่หลอดลมจนถึงเยื่อปอด บริเวณสะสมจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคกัมมันตรังสีในอากาศที่หายใจเข้าไป ถึงแม้การศึกษาอื่น ๆ พบว่า 80% ของ attached decay product ที่หายใจเข้าจะถูกหายใจออกมาโดยไม่ถูกสะสมภายใน แต่ความแรงรังสีที่ได้รับจาก unattached decay products นั้นจะสูงถึง 10 % ของความแรงรังสีรวมในอากาศ หรือประมาณ 50% ของปริมาณรังสีรวมที่ได้รับ (Butterweck-Dempewolf et al., 1997) ในการตรวจวัดขนาดของธาตุลูกหลานของเรดอนนั้นวิธีการที่นิยมใช้มี 3 วิธี ได้แก่

1. Screen diffusion batteries (Chu and Liu, 1996)
2. Low-pressure cascade impactors (Yamasaki and Suzuki 1992)
3. Graded screen array (GSA) method (Tokonami et al. 2005)

สำหรับการศึกษานี้จะใช้วิธีที่ 3 เนื่องจาก สถาบัน National Institute for Radiological Science (NIRS) ได้อนุญาตให้ใช้ GSA 1 ชุด ให้กับทางภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อใช้ในการประกอบระบบคัดแยกขนาดในการตรวจวัดขนาดธาตุลูกหลานของเรดอน ในการศึกษา



รูปที่ 1.1 อนุกรมการสลายตัวของ U-238



รูปที่ 1.2 อนุกรมการสลายตัวของ Th-232

## 1.5 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อพัฒนาระบบต้นแบบการวัดการกระจายขนาดและทำการประเมินอัตราการได้รับรังสีจากฝุ่นละออง  
รังสีขนาดนาโนเมตรของลูกหลานเรดอนและโพลอนในอุตสาหกรรมแร่ และในสภาพพื้นที่ทั่วไป

## 1.6 ขอบข่ายของการศึกษา

- 1.6.1 ระบบที่พัฒนาขึ้นจะเป็นระบบต้นแบบของระบบการคัดแยกขนาดของฝุ่นละอองลูกหลานเรดอน  
และโพลอน โดยจะทำการเปรียบเทียบและทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น  
ละอองให้เป็นไปตามมาตรฐาน ใน Exposure Chamber ที่มีการควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ  
เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

## 1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.7.1 ได้ระบบต้นแบบของการคัดแยกขนาดของอนุภาครังสีของลูกหลานเรดอนและโพลอนในระดับ  
นาโนเมตร
- 1.7.2 เป็นหน่วยงานแรกในประเทศที่ทำการพัฒนาการคัดแยกขนาดของอนุภาครังสีของลูกหลานเรดอน  
และโพลอนในระดับนาโนเมตร เพื่อใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เป็นประโยชน์ทางความปลอดภัย  
ทางรังสี
- 1.7.3 สามารถประเมินอัตราปริมาณรังสีจากการหายใจฝุ่นละอองรังสีของพนักงานในโรงงานอุตสาหกรรม  
ที่เกี่ยวข้องได้อย่างถูกต้องจากระบบที่พัฒนาขึ้น
- 1.7.4 สามารถประยุกต์ใช้ระบบและเทคนิคที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการประเมินค่าสมมูลทางรังสีของลูกหลาน  
เรดอนและโพลอนในระดับประเทศต่อไป ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปจัดพิมพ์ลงในวารสารระดับ  
นานาชาติหรือเอกสารของคณะกรรมการวิทยาศาสตร์ของสหประชาชาติด้านผลกระทบของ  
รังสี (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR)
- 1.7.5 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดและประเมินอัตราปริมาณรังสีจากลูกหลานของเรดอน  
และโพลอนในสภาพพื้นที่ทั่วไปอื่น ๆ นอกเหนือจากพื้นที่ในอุตสาหกรรมในโครงการ

## 1.8 ระยะเวลาการวิจัย

2 ปี (2551-2552)

## 1.9 ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัยในระยะเวลากาการวิจัย 24 เดือน ประกอบด้วย

- 1.9.1 รวบรวมข้อมูลการวิจัยและจัดซื้อครุภัณฑ์ ติดต่อประสานงานกับอุตสาหกรรมแร่ต่าง ๆ
- 1.9.2 วางแผนงานการวิจัยในพื้นที่เป้าหมายต่าง ๆ
- 1.9.3 ออกแบบ และจัดระบบและทดสอบอุปกรณ์
- 1.9.4 สอบเทียบอุปกรณ์ และประเมิน-ปรับปรุง-แก้ไขสิ่งบกพร่อง
- 1.9.5 เข้าทำการตรวจวัดปริมาณฝุ่นและรังสีในพื้นที่เป้าหมาย
- 1.9.6 วิเคราะห์ข้อมูล สรุป และ เขียนรายงาน

โดยในการศึกษาระยะที่ 2 นี้ อยู่ในขั้นตอน 1.9.5 การนำเอาระบบที่ได้พัฒนาขึ้นในปีงบประมาณ 2551 มาทำการตรวจวัดปริมาณฝุ่นและรังสีในพื้นที่เป้าหมาย

## 1.10 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

กิจกรรม	ระยะปฏิบัติการ (เดือนที่)							
	3	6	9	12	15	18	21	24
1. รวบรวมข้อมูลการวิจัยและจัดซื้อครุภัณฑ์ ติดต่อประสานงานกับอุตสาหกรรมแร่ต่าง ๆ								
2. วางแผนงานการวิจัยในพื้นที่เป้าหมายต่าง ๆ								
3. ออกแบบ และจัดระบบและทดสอบอุปกรณ์								
4. สอบเทียบอุปกรณ์ และประเมิน-ปรับปรุง-แก้ไขสิ่งบกพร่อง								
5. เข้าทำการตรวจวัดปริมาณฝุ่นและรังสีในพื้นที่เป้าหมาย						←→		
6. วิเคราะห์ข้อมูล สรุป						←→	←→	
7. จัดทำรายงาน								←→

△ = รายงาน

## 1.11 ผลงานวิจัยในต่างประเทศ

1. J. Vaupotic และคณะ (2006) ได้ทำการหาค่า equilibrium factor, unattached fractions ของธาตุลูกหลานเรดอน และความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคและความถี่ขึ้นกับการตรวจวัดขนาดของอนุภาคลูกหลานของเรดอน ในโรงเรียนในชิลวาเนีย เพื่อใช้ค่าต่าง ๆ เหล่านี้ในการประเมินค่าปริมาณรังสี โดยพบว่าค่าความแรงรังสีของธาตุลูกหลานเรดอนเท่ากับ  $441 \text{ Bq m}^{-3}$  และค่า Geometric mean diameter ของธาตุลูกหลานของเรดอนเท่ากับ  $0.12 \text{ nm}$

2. S. Tokonami และคณะ (2005) ได้ทำการตรวจวัดขนาดของอนุภาคลูกหลานของเรดอนโดยใช้ graded screen array ในบริเวณเหมืองแร่ใต้ดิน ใน Gifu prefecture ของญี่ปุ่น พบว่าค่า Geometric mean diameter ของ attached fraction และ unattached fraction ของธาตุลูกหลานของเรดอนมีค่าเท่ากับ 162 nm และ 0.8 nm ตามลำดับ
3. H. Naomi และคณะ (2000) ได้ทำการตรวจวัดขนาดของอนุภาคลูกหลานของเรดอนในพื้นที่ชานเมืองของรัฐนิวยอร์ก โดยใช้ ตะกั่ว-210 เป็นตัวตรวจวัดและใช้เครื่องเก็บตัวอย่างอนุภาคลูกหลานที่พัฒนาขึ้นเอง (NYU School of Medicine (NYUSM) ultrafine particle size sampler) จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า median particle size ของ ตะกั่ว-210 มีค่าเท่ากับ 0.8 nm. และความเข้มข้นของ ตะกั่ว-210 ที่ตรวจวัดได้นั้นไม่ขึ้นกับฤดูกาลที่ทำการตรวจวัด
4. S. Michikuni และคณะ (2000) ได้ทำการตรวจวัดขนาดของการกระจายตัวของอนุภาคลูกหลานของเรดอน โดยใช้เทคนิค diffusion batteries โดยวัดทั้งภายในและภายนอกที่อยู่อาศัย ที่เมือง Chubu ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่า peak radii ของธาตุลูกหลานของเรดอนสำหรับภายในอาคารบ้านเรือนอยู่ในช่วง 0.08-0.20  $\mu\text{m}$  และภายนอกอาคารบ้านเรือนอยู่ในช่วง 0.07-0.23  $\mu\text{m}$  และพบว่า ช่วงเวลาเก็บตัวอย่างที่ค่อนข้างยาวนานมีผลต่อความถูกต้องของการหาค่าการกระจายตัวของอนุภาคลูกหลานของเรดอน

---

## บทที่ 2 ระบบการตรวจวัดในภาคสนาม และการจัดเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อ คัดแยกขนาด

---

2.1 การออกแบบระบบวัด และการจัดเก็บตัวอย่างฝุ่น.....	2-1
2.1.1 การออกแบบระบบวัดเรดอนและโทรอนในอากาศ.....	2-1
2.1.2 ระบบการตรวจวัดรังสีลูกลานเรดอน และโทรอนในอากาศ.....	2-3
2.1.3 ระบบการจัดเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อคัดแยกขนาด.....	2-5

## บทที่ 2

### ระบบการตรวจวัดในภาคสนาม และการจัดเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อคัดแยกขนาด

#### 2.1 การออกแบบระบบวัด และจัดเก็บตัวอย่างฝุ่น

คณะวิจัยได้ออกแบบระบบต้นแบบการวัดการกระจายขนาดเพื่อประเมินอัตราการได้รับรังสีจาก  
ละอองฝุ่นขนาดนาโนเมตรของลูกหลานเรดอนและโทรอน ที่ประกอบระบบย่อย ๆ ดังนี้

2.1.1 ระบบการตรวจวัดก๊าซเรดอน ( $^{222}\text{Rn}$ ) และโทรอน ( $^{220}\text{Rn}$ ) ในอากาศ

2.1.2 ระบบการตรวจวัดรังสีลูกหลานเรดอน และโทรอนในอากาศ

2.1.3 ระบบการจัดเก็บฝุ่นเพื่อคัดแยกขนาด

2.1.4 ระบบทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละออง  
ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละระบบดังนี้

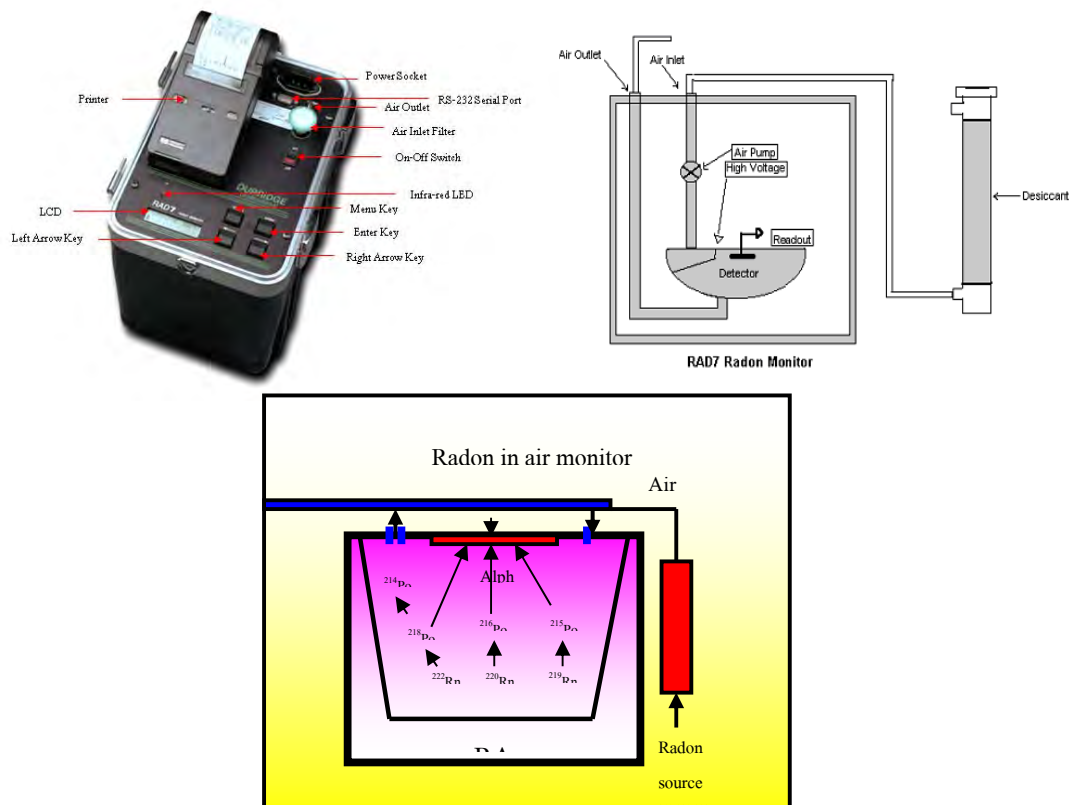
##### 2.1.1 การออกแบบระบบตรวจวัดเรดอนและโทรอนในอากาศ

ระบบตรวจวัดก๊าซเรดอน ( $^{222}\text{Rn}$ ) และโทรอน ( $^{220}\text{Rn}$ ) ในอากาศ จะแบ่งออกเป็น 3 ระบบ ดังนี้

2.1.1.1 ระบบการตรวจวัดแบบสุ่มปริมาณความเข้มข้น  $^{222}\text{Rn}$  และ  $^{220}\text{Rn}$  ในอากาศ มี  
วัตถุประสงค์เพื่อคัดกรองพื้นที่ที่จะทำการตรวจวัดในรายละเอียด ซึ่งในการวิจัยนี้จะใช้เครื่องวัดก๊าซเรดอนที่มี  
ชื่อว่า RAD 7 ของบริษัท Durridge (รูปที่ 2.1) ที่ภาควิเศษ ได้จัดซื้อมาจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐกับเอกชน  
ในปีงบประมาณ 2546-2548 เครื่อง RAD 7 เป็นเครื่องมือตรวจวัดก๊าซเรดอนที่ใช้หัววัดแบบกึ่งตัวนำ และม  
ีความสามารถแยกแยะระดับพลังงานของอนุภาคแอลฟาที่แผ่ออกมาจากนิวไคลด์ลูกหลานของก๊าซเรดอน คือ  
 $^{218}\text{Po}$  และ  $^{214}\text{Po}$  ได้เป็นอย่างดี และสามารถตั้งฟังก์ชันการตรวจวัดได้หลากหลายเคลื่อนย้ายได้สะดวกเพราะมี  
แบตเตอรี่ในตัวจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการสำรวจเบื้องต้นเพื่อคัดกรองหาพื้นที่ที่จะทำการศึกษาใน  
รายละเอียดต่อไป

ในการศึกษาจะทำการตรวจวัดในโหมด sniff โดยเครื่อง จะดูดอากาศที่ผ่านแผ่นกรองอากาศ เพื่อ  
กรองลูกเรดอนที่มีในอากาศออก จะมีแต่อากาศที่มีเรดอนอยู่เท่านั้นที่สามารถเข้าไปถึง chamber ในหัววัดได้  
(เครื่องจะทำการดูดอากาศทุกๆ 15 นาที) เมื่อเรดอนสลายตัวในแฮมเบอร์หัววัด ลูกหลานเรดอนในอนุกรม  
เรดอนจะปล่อยรังสีแอลฟาเข้าชนหัววัดซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ สามารถที่จะแยกแยะพลังงานของอนุภาคแอลฟา  
ของ Po-218 และ Po-214 ได้ รวมทั้ง Po-216 ได้ด้วยซึ่งค่านับวัดจะถูกบันทึกไว้ในหน้าต่างพลังงาน ทำให้เรา  
สามารถทราบค่าความเข้มข้นของเรดอนและโทรอนในบริเวณต่าง ๆ ในระยะเวลาสั้น ๆ ได้ดี





รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบ และรายละเอียดระบบต่าง ๆ ในตัวเครื่อง RAD 7

2.1.1.2 ระบบตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของ  $^{222}\text{Rn}$  และ  $^{220}\text{Rn}$  เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ  $^{222}\text{Rn}$  และ  $^{220}\text{Rn}$  ในระยะสั้นตั้งแต่ช่วงเวลา 8 ชั่วโมง หรือ 24 ชั่วโมง หรือ 1 สัปดาห์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่ ซึ่งในการวิจัยนี้ จะใช้เครื่องวัดก๊าซเรดอนที่มีชื่อว่า RAD 7 ของบริษัท DurrIDGE ซึ่งสามารถตั้งเวลาการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องตามที่ต้องการได้

2.1.1.3 ระบบตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของ  $^{222}\text{Rn}$  และ  $^{220}\text{Rn}$  ที่เปลี่ยนแปลงในระยะยาว โดยรวมเป็นระยะเวลา 1 ปี เนื่องจากฤดูกาล ความดันและอุณหภูมิ เน้นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อปริมาณเรดอนและโทรอนในแต่ละพื้นที่ และเนื่องจากต้องทำการตรวจวัดเป็นเวลานาน ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกใช้หัววัดที่ไม่ต้องใช้ไฟฟ้า คือ Solid state nuclear track detector (SSNTD) หรือที่เรียกว่า Alpha track-etch film มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มพลาสติกซึ่งจะเกิดรอยบนแผ่นฟิล์มเมื่ออนุภาคแอลฟาวิ่งเข้าชน จากนั้นจะนำมาปรับเทียบกลับเป็นปริมาณก๊าซเรดอนหรือโทรอน การวิจัยนี้จะทำการติดตั้งหัววัด SSNTD ในบริเวณที่พบว่า มีปริมาณของ  $^{222}\text{Rn}$  หรือ  $^{220}\text{Rn}$  สูงซึ่งได้จากการสำรวจในข้อ 2.1.1 เป็นระยะเวลารวม 1 ปี โดยจะทำการเปลี่ยนและติดตั้งหัววัดใหม่ทุก ๆ 3 เดือน เป็นฟิล์มที่จะถูกนำมาคัดรอยด้วยสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจะได้ค่าความเข้มข้นของเรดอนและโทรอนได้

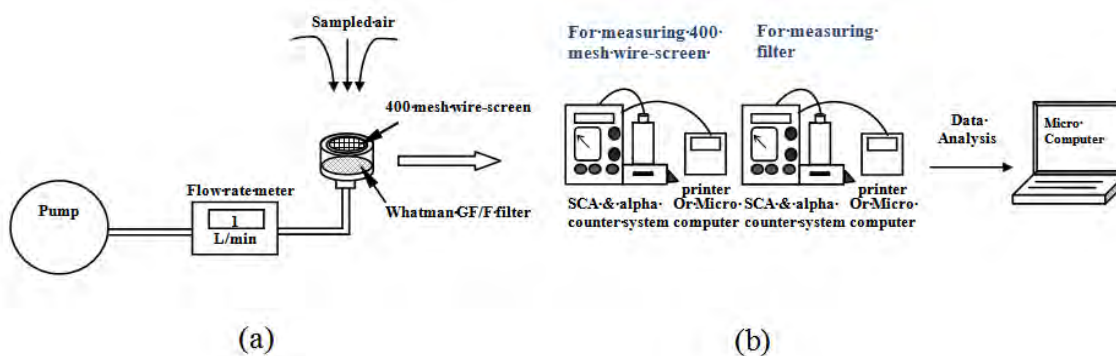
## 2.1.2 ระบบการตรวจวัดรังสีลูกหลานเรดอน และโธรอนในอากาศ แบ่งออกเป็น

2.1.2.1 ระบบตรวจวัดลูกหลานเรดอน เพื่อประเมินปริมาณ unattached fraction radon progeny ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งที่จะนำไปใช้ในการประเมินถึงอัตราการได้รับรังสีจากเรดอน ระบบนี้จะประกอบด้วยระบบเก็บตัวอย่างอากาศ และระบบวัดรังสี ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบดังต่อไปนี้

- บั๊มดูดอากาศที่มีอัตราการไหลสูงสุด 30 ลิตรต่อนาที (suction pump) และมาตรวัดอัตราการไหลอากาศ (Flow meter) เพื่อการเก็บตัวอย่างอากาศ
- ชุดใส่กระดาษกรองอากาศ (Open face filter holder) แบบสองชั้น เพื่อใช้ในการเก็บตัวอย่างลูกหลานเรดอน
- wire screen ขนาด 400 mesh เพื่อใช้เก็บตัวอย่างลูกหลานเรดอนชนิด Unattached radon progeny
- Glass filter เพื่อใช้เก็บตัวอย่างลูกหลานเรดอนชนิด Attached progeny radon
- ชุดหัววัดรังสีแอลฟาที่ประกอบด้วย เครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดี่ยว (Scaler/rate meter single channel Analyzer (SCA)) จำนวน 2 ชุด เพื่อใช้ในการตรวจวัดลูกหลานเรดอน
- แผ่นพลาสติกเคลือบ ZnS(Ag)

### ขั้นตอนการตรวจวัด

1. นำกระดาษกรอง และ 400 mesh wire screen ขนาด 47 mm ใส่ในชุดใส่กระดาษกรองอากาศแบบสองชั้น ในชั้นที่สอง และชั้นที่หนึ่งตามลำดับ และนำไปต่อเข้ากับบั๊มอากาศ ที่ตั้งอัตราการบั๊มอากาศที่ 10 ลิตร ต่อนาที
2. ทำการเก็บตัวอย่างอากาศเป็นเวลานาน 10-20 นาที
3. หลังจากเก็บตัวอย่างอากาศเสร็จ ให้รีบนำกระดาษกรอง และ 400 mesh wire screen เข้าตรวจวัดพร้อมกันด้วยชุดหัววัดรังสีแอลฟา โดยตั้งเวลาในการวัดครั้งละ 1 นาที จนครบ 40 นาที
4. นำผลการตรวจวัดที่ได้ในข้อ 3 ไปคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นรังสีของลูกหลานเรดอน เพื่อประเมินถึงปริมาณ unattached fraction radon progeny



รูปที่ 2.2 a) ระบบเก็บตัวอย่างอากาศ b) ระบบวัดรังสี  
ที่ใช้ในการตรวจวัดลูกหลานของเรดอน

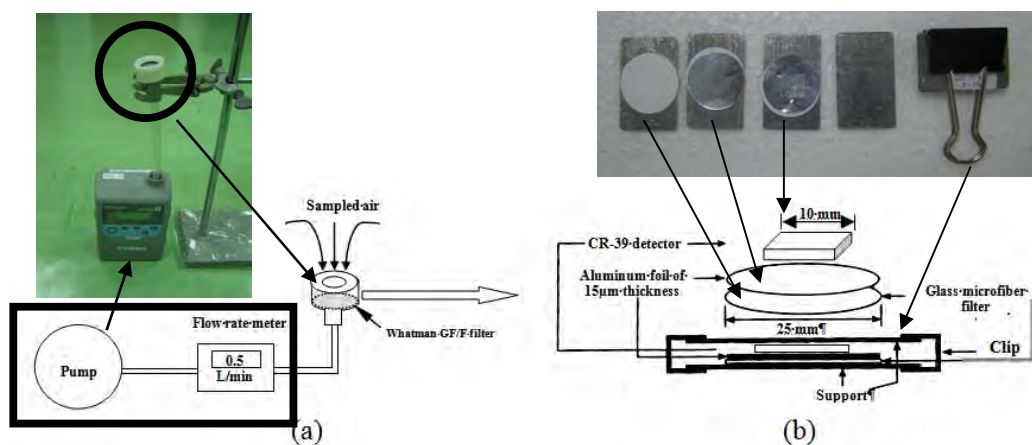
2.1.2.2 ระบบการตรวจวัดลูกหลานโทรอน เพื่อใช้ในการประเมินค่า equilibrium equivalent thoron concentration (EETC) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่จะใช้ในการประเมิน อัตราการได้รับรังสีจากโทรอน ระบบนี้จะประกอบด้วย ระบบเก็บตัวอย่างอากาศ และระบบวัดรังสี แสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งมีอุปกรณ์ในระบบดังต่อไปนี้

- ปั๊มดูดอากาศ (Low flow rate pump) เพื่อการเก็บตัวอย่างอากาศ
- ชุดใส่กระดาษกรองอากาศ (Open face filter holder) แบบชั้นเดียว เพื่อใช้ในการเก็บตัวอย่างลูกหลานโทรอนบนกระดาษกรอง
- Solid State Nuclear Track detector ซึ่งจะใช้ CR-39

#### ขั้นตอนการตรวจวัด

1. นำกระดาษกรอง ขนาด 25 mm ใส่ในชุดใส่กระดาษกรองอากาศ และนำไปต่อเข้ากับปั๊มอากาศ ที่ตั้งอัตราการปั๊มอากาศที่ 0.5 ลิตร ต่อนาที
2. ทำการเก็บตัวอย่างอากาศเป็นเวลานาน 6-24 ชั่วโมง
3. หลังจากเก็บตัวอย่างอากาศเสร็จ ให้พักกระดาษกรองไว้ 6 ชั่วโมงก่อนทำการตรวจวัด ทั้งนี้เพื่อให้ลูกหลานของเรดอนสลายตัวไปจนหมด
4. นำกระดาษกรองในข้อ 3 วางลงบนแผ่นอะลูมิเนียมเหนียว และนำแผ่นฟิล์มอะลูมิเนียมบาง 15  $\mu\text{m}$  วางทับบนกระดาษกรอง เพื่อลดพลังงานของอนุภาคแอลฟาจาก Po-212 ซึ่งเป็นลูกหลานของโทรอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการวัดด้วย CR-39
5. นำ CR-39 วางลงบนแผ่นฟิล์มอะลูมิเนียมในข้อ 4 เพื่อทำการตรวจวัด

6. นำแผ่นอะลูมิเนียมวางบน CR-39 ในข้อ 5 และใช้คลิปหนีบประกบแผ่นอะลูมิเนียมทั้งสองด้าน เพื่อยึดตำแหน่งของตัวอย่าง และ CR-39 ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (b)
7. ทำการวัดตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
8. นำแผ่น CR-39 ที่ทำการตรวจวัดไปกัดรอยด้วยสารละลายไฮเดรียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 6 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
9. นำ CR-39 ที่ได้ในข้อ 8 ไปทำการอ่านค่าด้วยกล้องจุลทรรศน์
10. นำผลการตรวจวัดที่ได้ในข้อ 9 ไปคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นรังสีของลูกหลานโธรอน เพื่อใช้ในการประเมินค่า equilibrium equivalent thoron concentration (EETC)



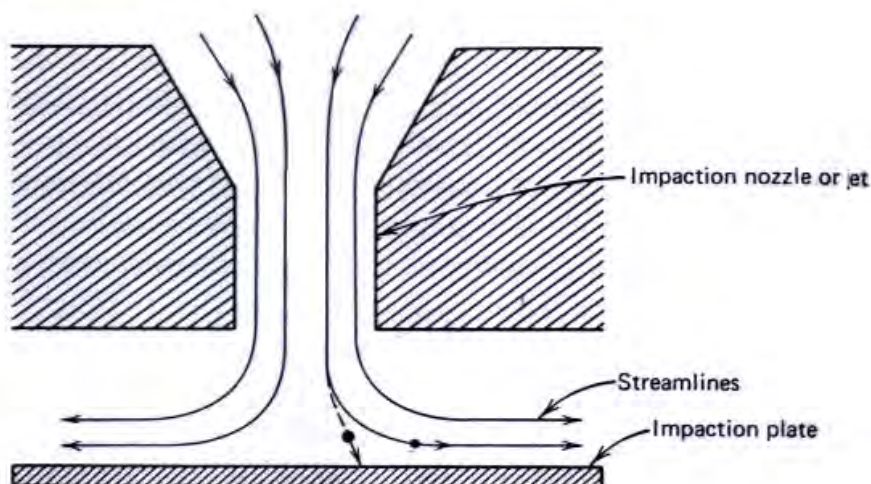
รูปที่ 2.3 a) ระบบเก็บตัวอย่างอากาศ b) ระบบวัดรังสี ที่ใช้ในการตรวจวัดลูกหลานของโธรอน

### 2.1.3 ระบบการจัดเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อคัดแยกขนาด

คณะวิจัยได้ออกแบบระบบจัดเก็บฝุ่นละอองรังสี เพื่อทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองรังสีของลูกหลานเรดอนและโธรอน โดยจะเก็บตัวอย่างในบริเวณพื้นที่ทำงาน หรือในบริเวณที่ตรวจพบว่า มีปริมาณของ  $^{222}\text{Rn}$  หรือ  $^{220}\text{Rn}$  สูง ซึ่งได้จากการสำรวจในข้อ 2.1.1 ระบบการจัดเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่ออกแบบนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองรังสีของลูกหลานเรดอนและโธรอน โดยมีรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ ดังนี้

2.1.3.1 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่ออกแบบขึ้นนี้ใช้หลักการของ  $PM_{2.5}$  และ  $PM_{10}$  ของ United States National Ambient Air Quality Standard (NAAQS) (Ruzer and Harley, 2004) เพื่อทำการคัดแยกขนาดของอนุภาคฝุ่นขนาดเล็ก (Fine particles) และฝุ่นขนาดใหญ่ (Coarse particles) โดยใช้เทคนิค impactor (ดังแสดงในรูปที่ 2.4 : ฝุ่นละอองและอากาศจะผ่าน nozzle หลังจากนั้นกระแสการไหลของอากาศจะถูกหักเหเมื่อผ่านข้อต่อที่หักมุม  $90^\circ$  ทำให้อนุภาคฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่กว่า aerodynamic size และมีความเฉื่อยไม่สามารถไหลไปกับกระแสอากาศได้ จึงตกลงบน impactor plate ส่วนอนุภาคขนาดเล็กกว่าจึงไหลไปกับกระแสอากาศ) อุปกรณ์ชุดนี้ทำจากอะลูมิเนียม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6.4 เซนติเมตร สูง 116 เซนติเมตร ประกอบด้วย 4 ชั้น (ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ระบบการจัดเก็บฝุ่นละอองรังสี โดยประกอบขึ้นจากครุภัณฑ์รายการที่ 2-3) โดยสามารถคัดแยกขนาดอนุภาคของฝุ่นในช่วง 1-10 ไมโครเมตร โดยในชั้นที่ 1, 2, 3 และ 4 สามารถเก็บตัวอย่างฝุ่นได้ในช่วงมากกว่า 10, 10-2.5, 2.5-1 และน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ตามลำดับ อนุภาคฝุ่นในชั้นที่ 1 – ชั้นที่ 3 จะถูกเก็บลงบนกระดาษกรอง (GF/F, whatman) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ส่วนในชั้นที่ 4 จะถูกเก็บลงบนกระดาษกรองขนาด 4.7 เซนติเมตร (GF/F, whatman)

**หมายเหตุ** กระดาษกรองในชั้นที่ 4 ทำหน้าที่เป็น backup filter เก็บอนุภาคฝุ่นละอองที่เหลือทั้งหมดจากการคัดแยกจาก ชั้นที่ 1-3 ดังนั้นขนาดของกระดาษกรองในชั้นที่ 4 จึงไม่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่น



รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางของ impactor



รูปที่ 2.5 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละออง (Impactor sampler)

**หมายเหตุ** ระบบคัดกรองอนุภาคนี้อยู่ร่วมกันพัฒนาขึ้นระหว่างคณะนักวิจัยร่วมกับนักวิจัยญี่ปุ่น

2.1.3.2 ระบบวัดรังสีของอนุภาคฝุ่นละอองรังสีของลูกหลานเรดอนและโพลอนที่ผ่านการคัดแยก  
ขนาดแล้ว ระบบวัดรังสีนี้จะประกอบด้วย

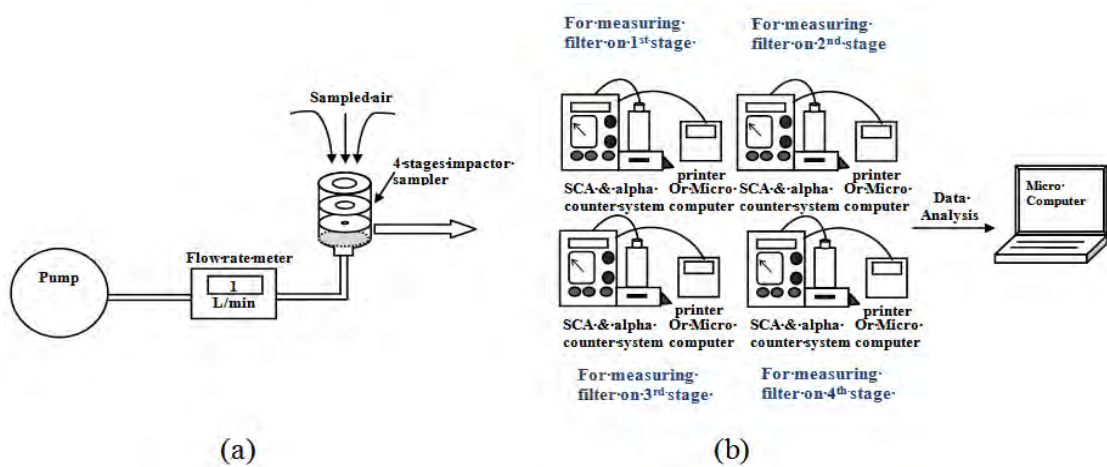
- ชุดหัววัดรังสีแอลฟา
- เครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดี่ยว (Scaler / ratemeter single channel Analyzer (SCA))  
จำนวน 4 ชุดเพื่อใช้ในการตรวจวัดลูกหลานเรดอนและโพลอนเกาะติดมากับฝุ่น
- แผ่นพลาสติกเคลือบ ZnS(Ag)

ขั้นตอนการตรวจวัด

1. นำอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่ใส่กระดาษกรองแล้ว ต่อเข้ากับปั๊มอากาศ และทำการเก็บตัวอย่างอากาศที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที
2. ทำการเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 8-24 ชั่วโมง
3. นำกระดาษกรองที่ผ่านการเก็บตัวอย่างในข้อ 2 เข้าตรวจวัดพร้อมกันด้วยชุดหัววัดรังสีแอลฟา โดยตั้งเวลาในการวัดครั้งละ 1 นาที จนครบ 40 นาที
4. นำผลการตรวจวัดที่ได้ในข้อ 3 ไปคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นรังสีของลูกหลานเรดอน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของลูกหลานเรดอน
5. นำกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัดในข้อ 4 มาพักไว้ประมาณ 6 ชั่วโมง ก่อนทำการตรวจวัดอีกครั้ง ทั้งนี้เพื่อให้ลูกหลานของเรดอนสลายตัวไปจนหมด

6. ทำการตรวจวัดกระตาศกรองในข้อ 5 ด้วยชุดหัววัดรังสีแอลฟา โดยตั้งเวลาในการวัดครั้งละ 5 นาที จนครบ 4 ชั่วโมง
7. นำผลการตรวจวัดที่ได้ในข้อ 6 ไปคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นรังสีของลูกหลานทอรอน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของลูกหลานทอรอน

สำหรับภาพรวมของระบบเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองและระบบวัดรังสีดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 a) ระบบเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสี b) ระบบวัดรังสี สำหรับการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองรังสี

---

### บทที่ 3 การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อคัด แยกขนาด

---

3.1 รายละเอียดของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นละออง.....	3-1
3.2 ระบบทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อคัด แยกขนาด.....	3-1
3.3 ขั้นตอนการทดสอบ.....	3-2
3.4 ผลการทดสอบ.....	3-3
3.5 สรุปผลการทดสอบ.....	3-5
3.6 การหาประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่นแต่ละขนาดของอุปกรณ์จับเก็บตัวอย่าง ฝุ่น (collection efficiency).....	3-5
3.7 ผลการหาประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่นแต่ละขนาดของอุปกรณ์จับเก็บ ตัวอย่างฝุ่น.....	3-7
3.8 สรุปผลการทดลองการหาประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่น.....	3-8



### บทที่ 3

## การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อคัดแยกขนาด

### 3.1 รายละเอียดของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นละออง (Impactor Sampler)

อุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองทำจากอะลูมิเนียมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6.4 เซนติเมตร สูง 116 เซนติเมตร ประกอบด้วย 4 ชั้น ซึ่งจะสามารถคัดแยกขนาดอนุภาคของฝุ่นในช่วง 1-10 ไมโครเมตร โดยในชั้นที่ 1, 2, 3 และ 4 สามารถเก็บตัวอย่างฝุ่นได้ในช่วงมากกว่า 10, 10-2.5, 2.5-1 และ น้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ตามลำดับ อนุภาคฝุ่นในชั้นที่ 1 ถึง ชั้นที่ 3 จะถูกเก็บลงบนกระดาษกรอง (GF/F, whatman) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ส่วนในชั้นที่ 4 จะถูกเก็บลงบนกระดาษกรอง (GF/F, whatman) ขนาด 4.7 เซนติเมตร

**หมายเหตุ** กระดาษกรองในชั้นที่ 4 ทำหน้าที่เป็น backup filter เก็บอนุภาคฝุ่นละอองที่เหลือทั้งหมดจากการคัดแยกจาก ชั้นที่ 1-3 ดังนั้นขนาดของกระดาษกรองในชั้นที่ 4 จึงไม่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่น

### 3.2 ระบบทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อคัดแยกขนาดเบื้องต้น

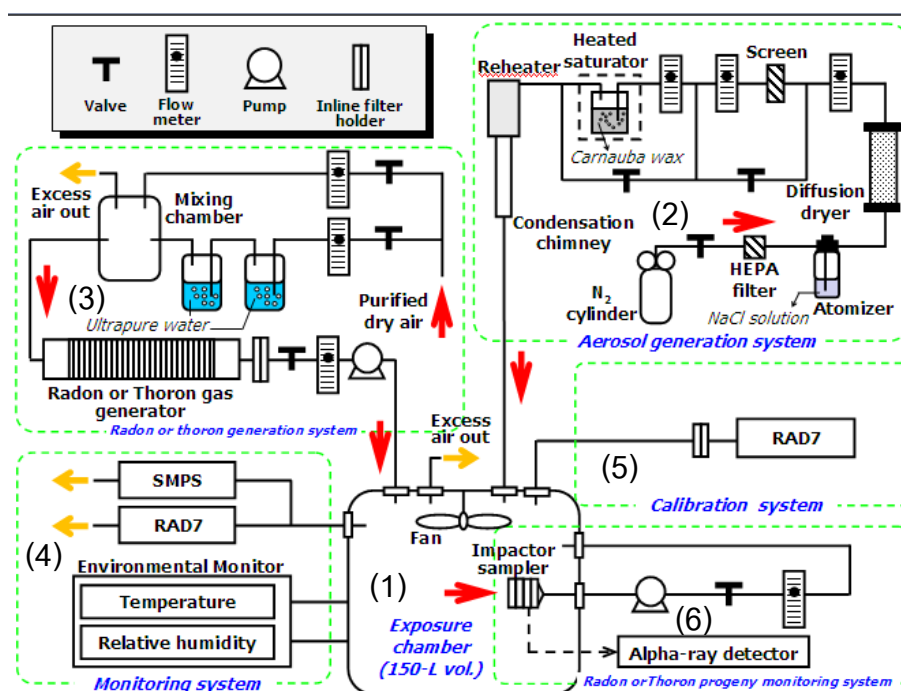
คณะวิจัยได้ออกแบบระบบที่จะใช้ในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีที่ออกแบบไว้ในบทที่ 2 ข้อ 2.3.3 เพื่อให้ในการปรับเทียบและทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองให้เป็นไปตามมาตรฐาน โดยผังของระบบทดสอบที่ออกแบบ แสดงในรูปที่ 3.1 จะประกอบด้วยระบบหลักที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

1. Exposure Chamber ทรงกระบอก ขนาดประมาณ 150 ลิตร
2. Aerosol generation system ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ เครื่องกำเนิดอนุภาคฝุ่น โดยระบบที่วางแผนไว้จะ ใช้ Carnuba wax เป็นตัวกลางในการสร้างอนุภาค โดยระบบนี้จะสามารถสร้างอนุภาคได้ในช่วง 0.01 – 4  $\mu\text{m}$
3. Radon or Thoron generation system ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ เครื่องกำเนิดก๊าซเรดอน และก๊าซโธรอน และระบบควบคุมความชื้น
4. Monitoring system ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle sizers), เครื่องวัดความเข้มข้นอนุภาค (Particle Counters and Detectors), เครื่องวัดความ

เข้มข้นของเรดอนและโธรอนแบบต่อเนื่อง (continuous measurement) และอุปกรณ์วัด  
อุณหภูมิ และความชื้น

5. Calibration system ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ เครื่องวัดความเข้มข้นของเรดอนและโธรอน
6. Radon or Thoron progeny monitoring system ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักซึ่งจะได้แสดงไว้  
ในบทที่ 4 ข้อ 4.3.1

อย่างไรก็ตาม โดยระบบสอบเทียบที่ออกแบบนี้ ไม่สามารถดำเนินการได้ภายใต้งบประมาณที่  
ได้รับจึงต้องขอความร่วมมือกับทางสถาบัน NIRS ให้ทำการสอบเทียบให้



รูปที่ 3.1 ระบบทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสี

### 3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

สำหรับการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นที่ขนาดมากกว่า 10, 10 - 2.5, 2.5 - 1 และ  
น้อยกว่า 1 ไมโครเมตรนั้น ทดสอบโดยการสร้างแอโรซอลจากเครื่องกำเนิด (condensation, Monodisperse  
Aerosol) โดยใช้ carnuuba wax เป็นวัสดุในการสร้าง โดยสร้างแอโรซอล ขนาด 0.1 ไมโครเมตร ภาพถ่าย  
เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยแอโรซอลที่สร้างขึ้นถูกผสมกับอากาศ  
(อุณหภูมิ : ~30 C, ความชื้นสัมพัทธ์ : ~ 20 %) ในแชมเบอร์ขนาด 150 ลิตรที่มีก๊าซโธรอนความแรงรังสี  
ประมาณ 400 เบคเคอเรลต่อลูกบาศก์เมตรผสมอยู่ จากนั้นทำการวัดขนาดของแอโรซอลและความแรงรังสี

ของก๊าซโทรอนด้วยเครื่อง SMPS (Scanning Mobility Particle size, TSI Model 3934) และ RAD 7 ตามลำดับ

สำหรับการเก็บตัวอย่างอากาศในแฮมเบอร์ผ่านอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่พัฒนาขึ้นนั้นทำได้โดยการเก็บตัวอย่างด้วยปั๊มอากาศขนาดเล็กที่ flow rate 1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง และหลังจากเก็บตัวอย่างเสร็จ ได้นำกระดาศกรองเข้าวัดรังสีแอลฟาพร้อมด้วยหัววัดซิงค์ซัลไฟด์ซิลิลิลเลชั่น (Ludlum Instrument Inc., Texas) พร้อมกัน เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง และทำการคำนวณค่าความเข้มข้นของลูกหลานของโทรอน (ตะกั่ว-212 และบิสมัท-212) ด้วยวิธี Decay methods.

**หมายเหตุ** เครื่อง SMPS ไม่สามารถวัดขนาดของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 800 นาโนเมตรได้



รูปที่ 3.2 เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

### 3.4 ผลการทดสอบ

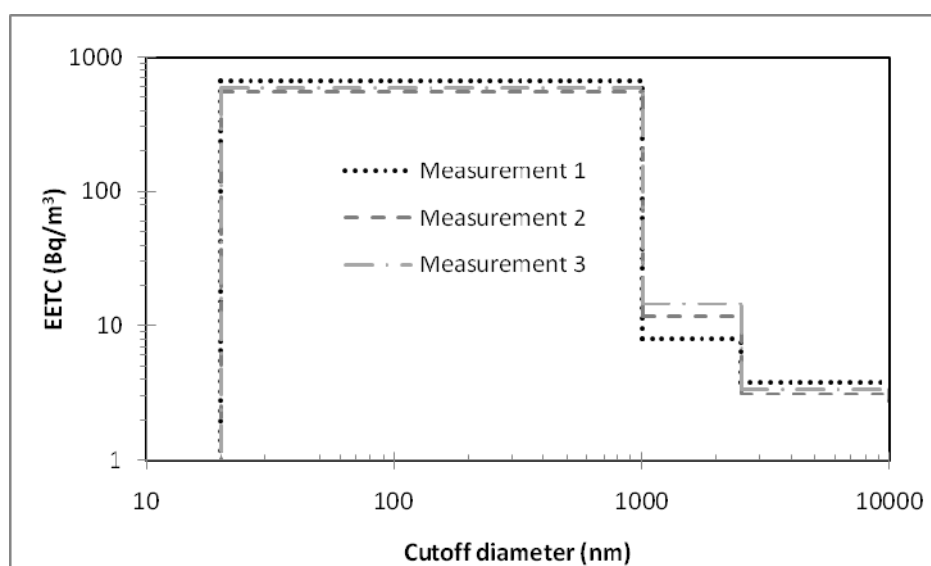
จากการทดสอบอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองจำนวน 3 ครั้ง ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตาราง ที่ 3.1 และ รูปที่ 3.3 โดยในรูปที่ 3.3 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นละอองของลูกหลานโทรอนในหน่วยของความเข้มข้นสมมูลของโทรอน (Equilibrium Equivalent Thoron Concentration, EETC) ซึ่งพบว่าปริมาณของฝุ่นละอองส่วนใหญ่ที่ตรวจวัดได้นั้นมาจากฝุ่นละอองที่มีตะกั่ว-212 เกาะติดอยู่ และฝุ่นละอองส่วนใหญ่ได้ถูกเก็บลงบนกระดาศกรองในชั้นที่สี่ (น้อยกว่า 1 ไมโครเมตร) ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการตรวจวัดความเข้มข้นของแอโรซอล ด้วยเครื่อง SMPS ซึ่งมีความเข้มข้นเฉลี่ยของแอโรซอลสูงสุด

อยู่ที่ขนาดแอโรซอลประมาณ 0.1 ไมโครเมตร ในการทดสอบครั้งที่ 1 และประมาณ 0.07 ไมโครเมตร ในการทดสอบครั้งที่ 2 และ 3 (ดังแสดงในรูปที่ 3.4)

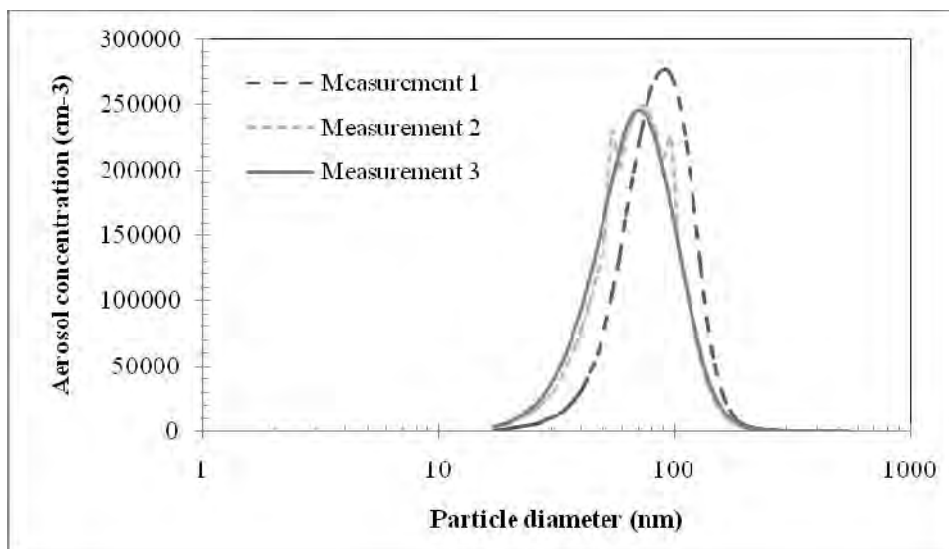
ตารางที่ 3.1 ปริมาณความเข้มข้นของลูกหลานของโธรอน

Particles Diameter Cutpoint ( $\mu\text{m}$ )	Measurement 1			Measurement 2			Measurement 3		
	Thoron Progeny Concentration		EETC	Thoron Progeny Concentration		EETC	Thoron Progeny Concentration		EETC
	Bi-212 ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )	Pb-212 ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )		Bi-212 ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )	Pb-212 ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )		Bi-212 ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )	Pb-212 ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )	
>10	6.33±26.021	2.47±0.05	2.81±2.25	0±1.82	3.04±0.05	2.77±0.16	0±1.85	3.17±0.05	2.90±0.17
10-2.5	4.61±33.80	3.73±0.07	3.81±2.93	0.95±2.01	3.32±0.05	3.11±0.18	2.12±2.08	3.53±0.05	3.41±0.19
2.5-1	0.08±50.21	8.80±0.1	8.04±4.35	1.05±3.83	12.84±0.10	11.82±0.34	3.07±4.25	15.76±0.11	14.66±0.38
< 1	1385.54±401.28	596.21±0.79	664.57±34.76	97.86±25.30	596.39±0.67	553.22±2.27	138.21±25.86	622.77±0.68	580.81±2.32

**หมายเหตุ** การหาค่า EETC จะคำนวณโดยสมการ  $\text{EETC}(\text{Bq}/\text{m}^3) = 0.9134 \times (C_{\text{Pb-212}}) + 0.0866 \times (C_{\text{Bi-212}})$   
โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของลูกหลานของโธรอน



รูปที่ 3.3 การกระจายตัวของอนุภาคของฝุ่นละอองของลูกหลานโธรอน



รูปที่ 3.4 ความเข้มข้นเฉลี่ยของแอโรซอลตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่างวัดโดยเครื่อง SMPS

### 3.5 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบเบื้องต้นนี้ พบว่า อุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นนี้สามารถคัดแยกขนาดของอนุภาคในช่วงที่ต้องการได้ ดังนั้นสามารถนำไปใช้ในการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองในสิ่งแวดล้อม เพื่อหาค่าการกระจายตัวของฝุ่นละออง ที่มีลูกหลานของเรดอนและโธรอนเกาะติดอยู่ได้

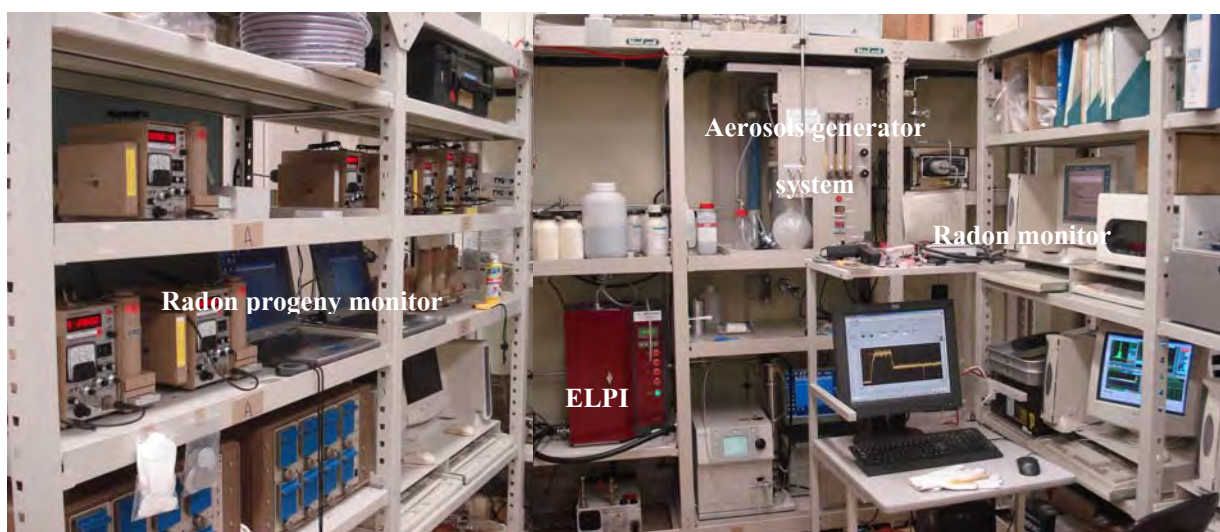
### 3.6 การหาประสิทธิภาพการจับฝุ่นแต่ละขนาดของอุปกรณ์จับตัวอย่างฝุ่น (collection efficiency)

โดยการสร้างแอโรซอลจากเครื่องกำเนิด (condensation, Monodisperse Aerosol) โดยใช้ carnuba wax เป็นวัสดุในการสร้าง โดยสร้างแอโรซอลขนาด 0.1, 0.3, 0.5 และ 1 ไมโครเมตร ตามลำดับสำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยแอโรซอลที่สร้างขึ้นถูกผสมกับอากาศ (อุณหภูมิ :  $\sim 30^{\circ}\text{C}$ , ความชื้นสัมพัทธ์ :  $\sim 60\%$ ) ในแชมเบอร์ขนาด 25 ลูกบาศก์เมตร ที่มีก๊าซเรดอนความแรงรังสีประมาณ 5000 เบคเคอเรลต่อลูกบาศก์เมตรผสมอยู่ จากนั้นทำการวัดขนาดของแอโรซอลภายในแชมเบอร์ ด้วยเครื่อง ELPI (Electrical Low Pressure Impactor ของบริษัท DEKATI)

สำหรับการเก็บตัวอย่างอากาศในแชมเบอร์ผ่านอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่พัฒนาขึ้นนั้น ทำได้โดยการเก็บตัวอย่างด้วยปั๊มอากาศขนาดเล็กที่ flow rate 1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลานาน 20 นาที

และหลังจากเก็บตัวอย่างเสร็จ ได้นำกระดาศกรองเข้าวัดรังสีแอลฟา รวมของลูกหลานของเรดอน ด้วยหัววัดซิงค์ซัลไฟด์ซิลิลิลเลชั่น (Ludlum Instrument Inc., Texas) พร้อมกัน เป็นเวลา 40 นาที จากนั้นคำนวณค่าความเข้มข้นสมมูลของเรดอน ด้วยวิธี Decay methods แล้วจึงนำค่าที่ได้ ไปหาประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่นของอุปกรณ์จับเก็บฝุ่นในแต่ละชั้น

**หมายเหตุ** carnuba wax ที่ใช้เป็นตัวกลางในการผลิตแอโรซอล สามารถผลิตแอโรซอลขนาดใหญ่สุดได้ ประมาณ 1.34 ไมโครเมตร



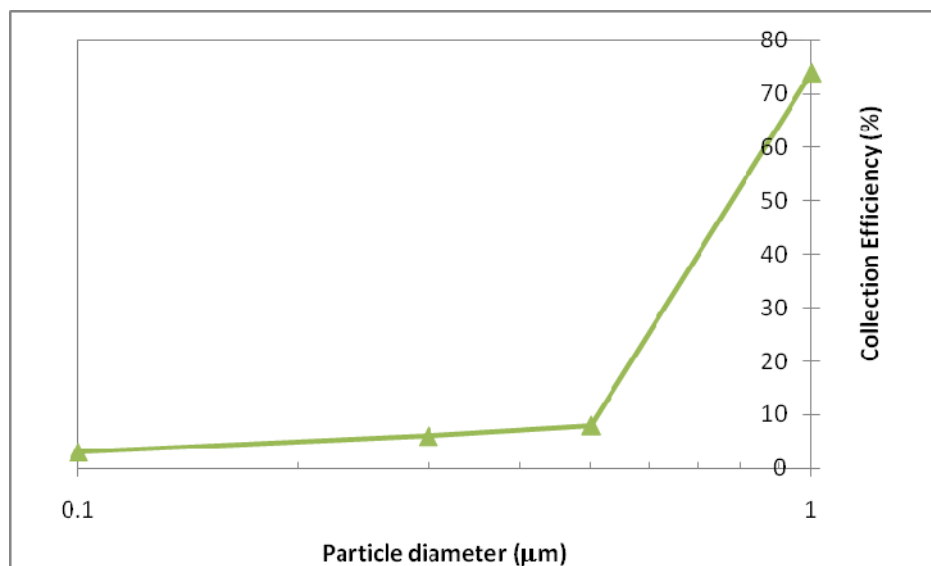
รูปที่ 3.5 เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพการแยกแยะขนาดของฝุ่น

### 3.7 ผลการหาประสิทธิภาพการจับฝุ่นแต่ละขนาดของอุปกรณ์จับตัวอย่างฝุ่น

ผลการหาประสิทธิภาพการจับฝุ่นแต่ละขนาดของอุปกรณ์จับตัวอย่างละอองฝุ่น ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.6 แสดงประสิทธิภาพการจับฝุ่นละอองของชั้นที่ 3 (1  $\mu\text{m}$ ) ที่ฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 3.2 ประสิทธิภาพการจับตัวอย่างฝุ่นแต่ละขนาดของอุปกรณ์จับตัวอย่างฝุ่น

Particle diameter ( $\mu\text{m}$ )	Collection Efficiency (%)			
	Stage1(10 $\mu\text{m}$ )	Stage 2 (2.5 $\mu\text{m}$ )	Stage3(1 $\mu\text{m}$ )	Stage4(< 1 $\mu\text{m}$ )
0.1	2	1	3	94
0.3	2	1	6	91
0.5	3	4	8	85
1	3	9	74	14



รูปที่ 3.6 แสดงประสิทธิภาพการจับฝุ่นละอองของชั้นที่ 3 (1  $\mu\text{m}$ ) ที่ฝุ่นละอองขนาดต่าง ๆ กัน

### 3.8 สรุปผลการทดลองการหาประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่น

จากการหาประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่นละอองของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น พบว่า ประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่นละอองในชั้นที่ 3 ( $1\ \mu\text{m}$ ) และ 4 ( $<1\ \mu\text{m}$ ) สามารถแยกแยะขนาดของอนุภาคฝุ่นตามขนาดที่ได้ทำการออกแบบไว้จริง แต่เนื่องจากระบบที่ใช้ในการผลิตแอโรซอลที่ใช้่นั้นสามารถผลิตขนาดอนุภาคฝุ่นได้ใหญ่สุดเพียงประมาณ  $1\ \mu\text{m}$  เท่านั้น ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้นี้ ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความเชื่อมั่นว่า อุปกรณ์ที่ใช้เก็บตัวอย่างฝุ่นสำหรับงานวิจัยนี้สามารถแยกแยะขนาดของอนุภาคฝุ่นตามขนาดที่ได้ออกแบบไว้จริง



---

## บทที่ 4 การดำเนินการวิจัย สำหรับการเข้าสำรวจพื้นที่

---

4.1 แผนการดำเนินงาน.....	4-2
4.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	4-3
4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด.....	4-4

## บทที่ 4

### การดำเนินการวิจัย สำหรับการเข้าสำรวจพื้นที่

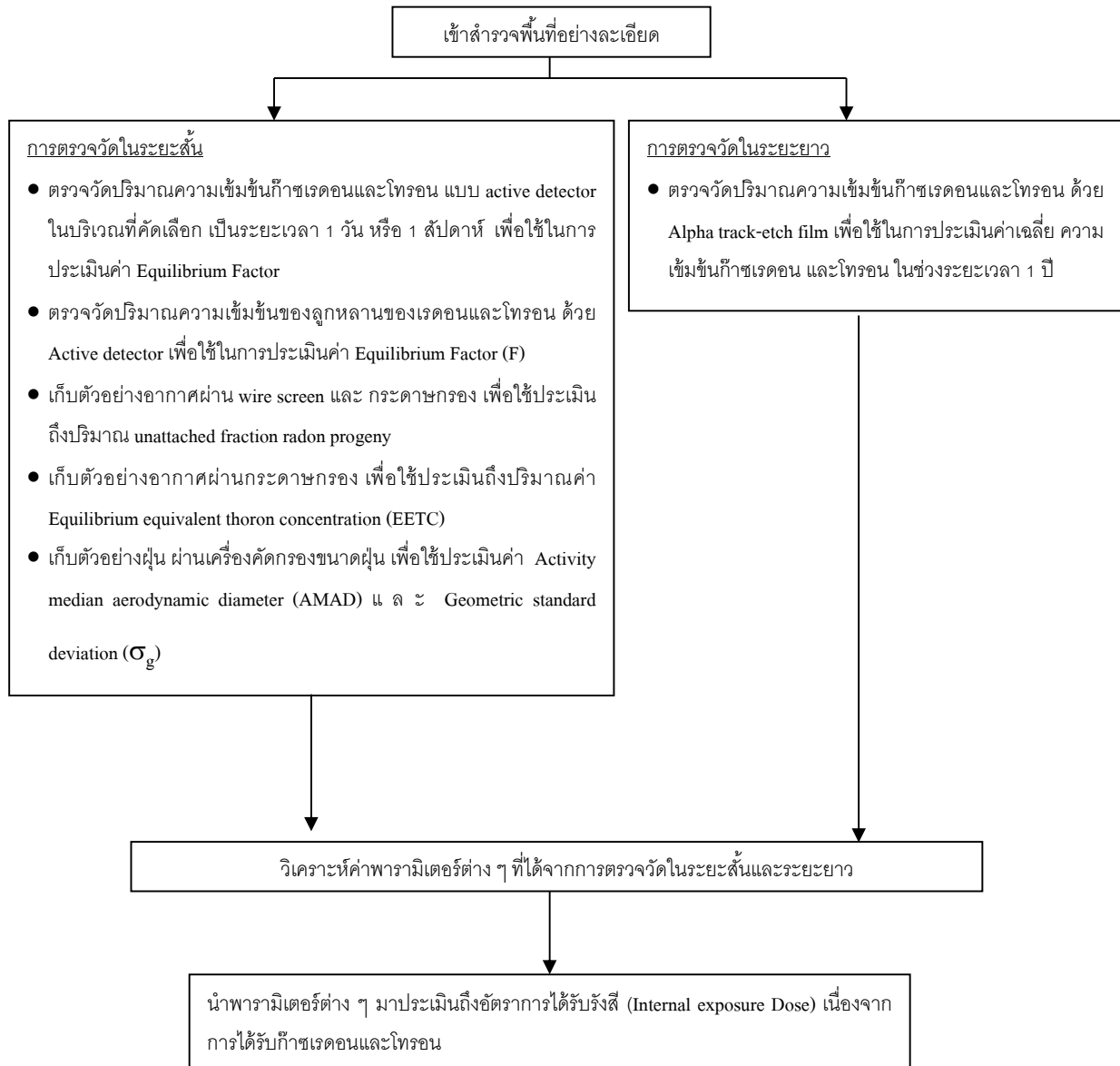
คณะวิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามระเบียบวิธีวิจัยที่ระบุไว้ในบทที่ 1 ซึ่งได้พัฒนาอุปกรณ์และเปรียบเทียบระบบตรวจวัดปริมาณรังสีจากฝุ่นขึ้น และได้รับการตอบตกลงจากทางบริษัท ไทยแลนด์สแมลติ้งแอนดิรีไฟนิง จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานถลุงแร่ดีบุก ตั้งอยู่ที่ตำบลวิจิตร อำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต ให้เข้าทำการสำรวจพื้นที่ให้กับทางบริษัทจำนวน 2 ครั้ง ในครั้งแรกเมื่อวันที่ 3 - 5 มีนาคม 2552 เนื่องจากระบบการเก็บตัวอย่าง และการตรวจวัดในการเข้าสำรวจให้กับทางบริษัทในครั้งแรกนั้นไม่เหมาะสม ทางคณะวิจัยจึงได้แก้ไข และปรับปรุงอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น ตลอดจนระบบเก็บตัวอย่างเพื่อให้เหมาะสมกับการตรวจวัดในพื้นที่ของทางบริษัท ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงได้ขอความอนุเคราะห์จากทางบริษัทเพื่อเข้าทำการสำรวจอีกครั้งในวันที่ 16-18 กุมภาพันธ์ 2553 สำหรับการทำการตรวจวัดปริมาณฝุ่นและรังสีในพื้นที่เป้าหมาย มีรายละเอียดของการดำเนินงานดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 แผนที่ตั้งและภาพถ่ายดาวเทียมของพื้นที่เป้าหมายการวิจัย

#### 4.1 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานแสดงในผังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผังการดำเนินงานวิจัยและประเด็นหลักการศึกษา

## 4.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

- 4.2.1 ทำการตรวจวัดอัตราปริมาณก๊าซเรดอน โธรอน และปริมาณรังสีลูกหลานเรดอนและโธรอนในอากาศแบบระยะสั้น (24 ชั่วโมง) ด้วยเครื่องวัดแบบ active detectors และแบบระยะยาว (ทุก ๆ 3 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี) ด้วยเครื่องวัดแบบ passive detectors
- 4.2.2 เก็บตัวอย่างฝุ่นเพื่อวิเคราะห์ปริมาณของ Unattached fraction radon progeny, Equilibrium equivalent thoron concentration (EETC) และการกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองรังสีของลูกหลานเรดอนและโธรอน โดยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น
- 4.2.3 ประเมินอัตราปริมาณรังสีที่พนักงานได้รับเนื่องจากการหายใจเอาฝุ่นละอองรังสีเข้าสู่ร่างกาย

ตารางที่ 4.1 สรุปขั้นตอนที่เข้าตรวจวัดในพื้นที่เป้าหมาย

วัตถุประสงค์	วิธีการ	กิจกรรม และอุปกรณ์ที่ใช้ในการปฏิบัติงาน (วัน/เดือนปีที่ตรวจวัด)
1. ตรวจวัดปริมาณก๊าซเรดอน โธรอน และนิวไคลด์ลูกในอากาศบริเวณที่มีการปฏิบัติงานแบบ ณ พื้นที่	เก็บตัวอย่างฝุ่นในอากาศ	<ol style="list-style-type: none"> <li>ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน และก๊าซโธรอน ณ พื้นที่ ด้วยเครื่องมือวัดก๊าซเรดอน RAD 7 โดยทำการตรวจวัดทั้งหมด 3 จุด</li> <li>ตรวจวัดปริมาณธาตุลูกหลานเรดอนและโธรอนในหน่วยของ Working Level, WL ด้วยเครื่อง WLx หัววัดแบบ solid state detector โดยทำการตรวจวัดทั้งหมด 3 จุด</li> <li>ตรวจวัดปริมาณธาตุลูกหลานโธรอนในหน่วยของ Equilibrium Equivalent Thoron Concentration (EETC) ด้วยแผ่นฟิล์ม Solid-state Nuclear Track Detector (SSNTD) โดยทำการตรวจวัดทั้งหมด 4 จุด</li> <li>ตรวจวัดปริมาณสัดส่วนของ attached และ unattached ของลูกหลานเรดอนและโธรอน โดยตรวจวัดทั้งหมด 3 จุด</li> <li>ตรวจวัดการกระจายตัวของธาตุลูกหลานเรดอนและโธรอน โดยตรวจวัดทั้งหมด 3 จุด (16-18/02/53)</li> </ol>
2. ตรวจวัด effective dose จากเรดอนและโธรอนในอากาศที่พนักงานอาจได้รับในระยะยาว	อ่านรอยอนุภาคแอลฟา ที่ปรากฏบน SSNTD	<ol style="list-style-type: none"> <li>ติดตั้งชุดอุปกรณ์การตรวจวัดปริมาณเรดอนและโธรอน SSNTD ตลอดระยะเวลา 1 ปี โดยเก็บมาวิเคราะห์เป็นระยะ ๆ (5/03/52-5/03/53)</li> </ol>

## 4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

### 4.3.1 การตรวจวัดในระยะสั้น มีอุปกรณ์ที่ใช้งานดังนี้

4.3.1.1 อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นก๊าซเรดอนและโธรอน แบบ Active detectors เพื่อตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนและโธรอนในพื้นที่ โดยจะนำมาใช้ในการสำรวจเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกหาพื้นที่ที่จะทำการศึกษาแบบละเอียด

4.3.1.2 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างอากาศและระบบวัด เพื่อใช้ประเมินถึงปริมาณ Unattached fraction radon progeny ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งที่จะนำไปใช้ในการประเมินถึงอัตราการได้รับรังสีจากเรดอน

4.3.1.3 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างอากาศและระบบวัด เพื่อใช้ประเมินค่า Equilibrium equivalent thoron concentration (EETC) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งที่จะใช้ในการประเมินถึงอัตราการได้รับรังสีจากโธรอน

4.3.1.4 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างอากาศ เพื่อคัดแยกขนาดฝุ่นรังสีและระบบวัด เพื่อทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองรังสีของลูกหลานเรดอนและโธรอน

### 4.3.2 การตรวจวัดในระยะยาว มีอุปกรณ์ที่ใช้งานดังนี้

อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นก๊าซเรดอนและโธรอน แบบ Alpha track-etch film เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซเรดอนและโธรอนในพื้นที่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยรวม อันเนื่องมาจากฤดูกาล ความชื้น และอุณหภูมิ ทุก ๆ 1 เดือน หรือ 3 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี

หมายเหตุ 1. สำหรับการประเมินผลอัตราการได้รับรังสีเนื่องจากเรดอนและโธรอนนั้น ในการตรวจวัดระยะสั้น จะเป็นการตรวจวัดหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการประเมินผลและเพื่อหาตำแหน่งสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดก๊าซเรดอนและโธรอน ในระยะยาวเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโดยรวมของก๊าซเรดอน โธรอน และลูกหลานของเรดอนและโธรอน

---

## บทที่ 5 ผลการเข้าสำรวจภาคสนาม ครั้งที่ 1

---

5.1 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและทอรอน ณ พื้นที่ ในช่วง ระยะเวลาสั้น ๆ.....	5-1
5.1.1 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและทอรอนโดยตรง ด้วยเครื่องมือวัดที่มีชื่อว่า RAD 7 .....	5-1
5.1.2 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและทอรอนโดยวัด ทางอ้อมจากความเข้มข้นของธาตุลูกหลานของเรดอนและทอรอน .....	5-4
5.1.3 เทคนิคการหาความเข้มข้นของเรดอนและทอรอนในหน่วยของ Working Level.....	5-7
5.2 ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและทอรอน ณ พื้นที่ ในช่วง ระยะเวลายาว.....	5-9

## บทที่ 5

### ผลการเข้าสำรวจภาคสนาม ครั้งที่ 1

คณะวิจัยได้เข้าสำรวจและตรวจวัดปริมาณรังสีอย่างละเอียดให้แก่ บริษัท ไทยแลนด์สแมลติงแอนดรีไฟนิ่ง จำกัด ซึ่งตั้งอยู่ที่ ตำบลวิเชียร อำเภอมือง จังหวัดภูเก็ต ซึ่งตอบตกลงให้ทำการเข้าสำรวจเป็นบริษัทแรก เมื่อวันที่ 3-5 มีนาคม 2552 โดยคณะวิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามกิจกรรมที่แสดงไว้บทที่ 4 และผลการดำเนินการวิจัยสามารถสรุปได้ ดังนี้

#### การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอน,โทรอนและธาตุลูกหลาน ในอากาศ บริเวณที่มีการปฏิบัติงาน แบบ ณ พื้นที่

เนื่องจากในกระบวนการถลุงดีบุกส่วนใหญ่ใช้น้ำวัตถุบิทที่ใช้เป็นธาตุกัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียมและทอเรียม ซึ่งธาตุที่มีสำคัญในอนุกรมเหล่านี้ คือ เรดอนและโทรอนซึ่งมีสถานะเป็นก๊าซจึงฟุ้งกระจายได้ ซึ่งบุคคลที่ทำงานสามารถได้รับเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจ ทำให้ต้องให้ความสำคัญต่อธาตุกัมมันตรังสีทั้ง 2 ชนิดนี้อย่างมาก เนื่องจากเมื่อธาตุทั้ง 2 ชนิดนี้เมื่อสลายตัวจะได้อนุภาคกัมมันตรังสีลูกหลานที่มีประจุสามารถไปยึดติดอยู่กับฝุ่นในอากาศ เมื่อเข้าไปในระบบหายใจจะไปเกาะติดกับเนื้อเยื่อปอดได้ มีรายงานทางการแพทย์ กล่าวว่า บุคคลที่ทำงานในด้านการขนย้ายและเกี่ยวข้องกับวัสดุที่เป็นฝุ่นละอองจะมีโอกาสเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอด เนื่องจากมีโอกาสได้รับรังสีและฝุ่นมากกว่าบุคคลที่ทำงานด้านอื่น

การศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นของ เรดอน โทรอน และลูกหลานของเรดอนและโทรอนในอากาศ โดยทำการตรวจวัด ณ พื้นที่ แบบระยะสั้นและแบบระยะยาวโดยติดตั้งอุปกรณ์วัดทิ้งไว้ในพื้นที่ ดังนี้

#### 5.1 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโทรอน ณ พื้นที่ ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ

ในการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโทรอน ณ พื้นที่ ในช่วงระยะสั้นมีเทคนิคที่ใช้แตกต่างกัน 2 วิธี นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคอื่นเพิ่มเติมเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบกับการตรวจวัดด้วยเทคนิคต่าง ๆ ที่ทางคณะวิจัยได้ออกแบบขึ้น ดังนี้

5.1.1 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนและโทรอนโดยตรงด้วยเครื่องวัดที่มีชื่อว่า RAD 7 ซึ่งเป็นเครื่องวัดก๊าซเรดอนและโทรอนในอากาศที่ถูกบ่มเข้าไปใน chamber ของเครื่องวัด (ธาตุลูกหลานจะถูกกรองกันไว้ไม่ให้เข้าสู่ chamber) ซึ่งมีหัววัดแอลฟาแบบกึ่งตัวนำติดตั้งอยู่ โดยจะนับวัดอนุภาคแอลฟาที่ปลดปล่อยจากเรดอน และโทรอนในอากาศที่ดูดเข้าไปเป็นระยะ ๆ ตลอด 24 ชั่วโมง โดยได้ทำการตรวจวัด 4 บริเวณด้วยกัน คือ

1. ห้องทำงาน (HSE Office)
2. โรงเก็บแร่เดิม
3. โรงชั่งตัวอย่าง
4. โรงเก็บแร่แทนทาลัม



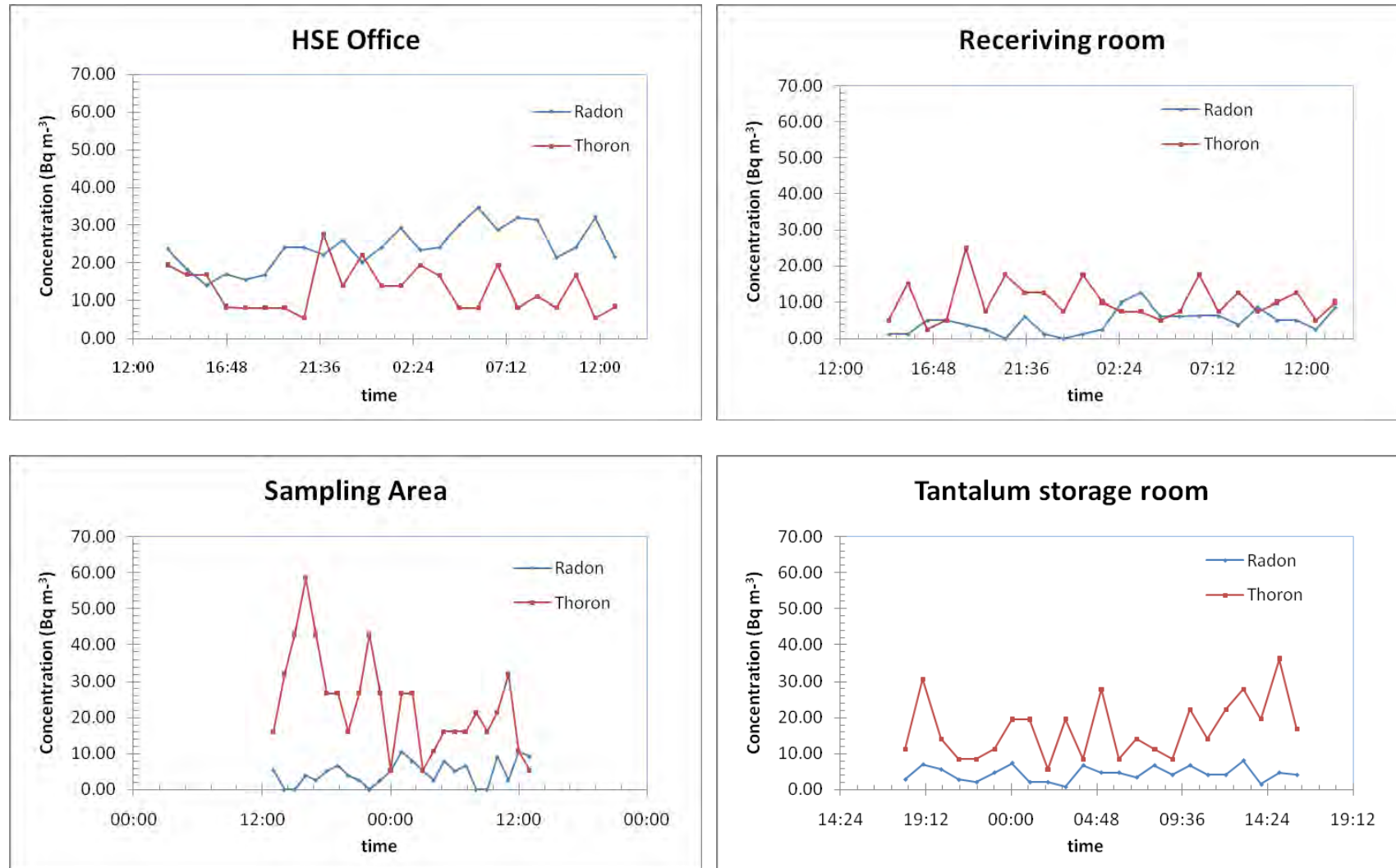
ได้ทำการตรวจวัดเป็นเวลา 24 ชม. ในแต่ละพื้นที่ ผลการตรวจวัดแสดงในตารางที่ 5.1 และ รูปที่ 5.1 ซึ่งพบว่า ในบริเวณโรงเก็บแร่เดิม โรงชั่งตัวอย่าง และโรงเก็บแร่แทนทาลัม พบปริมาณความเข้มข้นของโธรอนสูงกว่า เรดอนและความเข้มข้นสูงสุดของโธรอนที่วัดได้ จะพบอยู่ในช่วงกลางวัน ซึ่งน่าจะเป็นผลจากแร่และ วัสดุดิบที่เก็บไว้ในบริเวณดังกล่าว ปัจจุบันยังไม่มีเกณฑ์กำหนดปริมาณความเข้มข้นรังสีสำหรับก๊าซโธรอน เนื่องจากก๊าซโธรอนมีค่าครึ่งชีวิตสั้นมาก (55.6 วินาที) และยังไม่มีการศึกษาอย่างกว้างขวางถึงผลกระทบต่อ สุขภาพ สำหรับในบริเวณห้องทำงาน พบว่า มีปริมาณเรดอนสูงกว่าโธรอน และปริมาณเรดอนสูงสุดพบอยู่ ในช่วงก่อนเที่ยง ซึ่งเป็นเวลาทำงานในช่วงเช้า ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่อง มาจากบริเวณดังกล่าวเป็นห้องทำงาน และไม่มีอากาศถ่ายเทในตอนกลางคืน จึงทำให้มีการสะสมของก๊าซ เรดอน โดยมีปริมาณความเข้มข้นของ เรดอนสูงสุดเท่ากับ  $34.6 \pm 11.3 \text{ Bq/m}^3$  เมื่อเวลาประมาณ 05.00 น. ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ศึกษาเดียวที่ เป็นห้องปิดมิดชิดไม่มีอากาศถ่ายเท อย่างไรก็ตาม ค่าความเข้มข้นของเรดอนสูงสุดที่ตรวจวัดได้นั้นยังต่ำกว่า 4 เท่าของเกณฑ์กำหนดโดยหน่วยงาน Environmental Protection Agency ของประเทศสหรัฐอเมริกา (US.EPA) สำหรับที่อยู่อาศัยที่กำหนดค่าไว้ว่าไม่ควรเกิน  $148 \text{ Bq/m}^3$  หรือ  $4 \text{ pCi/L}$

**ตารางที่ 5.1** ปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโธรอนที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง RAD 7 ในบริเวณต่าง ๆ

Location	Radon Activity Concentration ( $\text{Bq/m}^3$ )			Thoron Activity Concentration ( $\text{Bq/m}^3$ )		
	Low	High	Mean	Low	High	Mean
1.ห้องทำงาน (HSE Office)	$13.9 \pm 12.0$	$34.6 \pm 11.3$	$24.0 \pm 5.7$	$5.5 \pm 15.1$	$27.6 \pm 23.8$	$13.0 \pm 1.16$
2.โรงเก็บแร่เดิม	$0 \pm 6.8$	$12.5 \pm 10.8$	$10.3 \pm 5.3$	$2.5 \pm 12.0$	$24.9 \pm 21.5$	$4.60 \pm 3.3$
3. โรงชั่งตัวอย่าง	$0 \pm 14.6$	$10.4 \pm 11.6$	$4.6 \pm 3.3$	$5.3 \pm 25.8$	$58.4 \pm 47.4$	$23.5 \pm 13.2$
4.โรงเก็บแร่แทนทาลัม	$0.7 \pm 5.1$	$8.1 \pm 6.5$	$4.3 \pm 2.1$	$5.6 \pm 15.2$	$36.1 \pm 26.4$	$16.7 \pm 8.3$

หมายเหตุ ปริมาณความเข้มข้นรังสีของโธรอนเป็นการวัดโดยประมาณเท่านั้น





รูปที่ 5.1 ปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโธรอนที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์วัดชื่อ RAD 7 ในพื้นที่ศึกษา

5.1.2 การหาปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโธรอน โดยวัดทางอ้อมจากของธาตูลูกหลานมี 3 เทคนิคที่ใช้ คือ

5.1.2.1 เทคนิคการหาความเข้มข้นของโธรอนในหน่วยของ Equilibrium Equivalent Thoron Concentration, EETC ซึ่ง EETC หมายถึง ค่าของผลคูณของความเข้มข้นของเรดอนหรือโธรอนกับค่าเฟคเตอร์สมดุลของลูกหลาน (equilibrium factor, F) ถ้าสัดส่วนของ EEC ต่อ F เท่ากับ 1 หมายความว่า นิวไคลด์ลูกหลานอยู่ในสมดุลทางการสลายตัวทางรังสีนั้นหมายถึง แต่ละนิวไคลด์ลูกหลานมีความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีเท่ากัน หรือ  $EETC = F \times C_{th}$

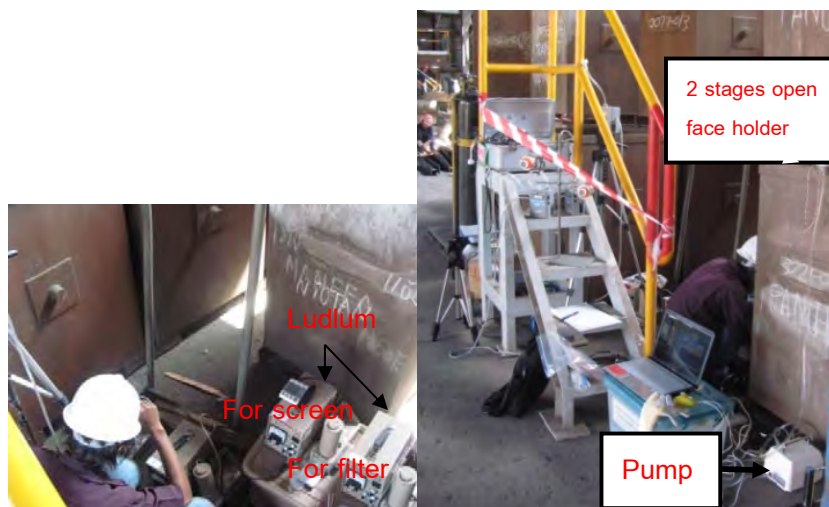
วิธีการตรวจวัดทำโดยใช้แผ่นฟิล์มแบบ SSNTD (Solid-State Nuclear Track Detector) ชนิด CR-39 สำหรับเทคนิคนี้ได้เลือกพื้นที่ศึกษาจำนวน 4 พื้นที่ คือ 1. ห้องทำงาน (HSE office), 2. โรงซักตัวอย่าง, หน้าบริเวณระหว่าง bay 5 และ 6 และโรงเก็บแร่แทนทาลัม โดยทำการดูดอากาศในพื้นที่ศึกษาด้วยปั๊มขนาดเล็กด้วยอัตราการไหลของอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผ่านกระดาษกรอง (GF/F filter) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร เพื่อเก็บธาตูลูกหลานของเรดอนและโธรอนในอากาศบนกระดาษกรอง หลังจากนั้นปล่อยให้ธาตูลูกหลานของเรดอนที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้นกว่าลูกหลานของโธรอนบนกระดาษกรองสลายตัวไปจนหมดซึ่งใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมงแล้วจึงนำกระดาษกรองไปทำการวัดด้วย SSNTD โดยต้องวางแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ 1 แผ่น ทับบนกระดาษกรองเพื่อลดทอดพลังงานแอลฟาหลงก่อนวางหัววัด โดยใช้เวลาในการวัดประมาณ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำหัววัดไปทำการกักรอย และทำการอ่านค่าความเข้มของรอยอนุภาคแอลฟาของลูกหลานของโธรอน คือ Pb-212 และ Bi-212 บนแผ่นฟิล์ม เพื่อนำไปคำนวณหาความเข้มข้นของธาตูลูกหลานของโธรอน จากนั้นนำค่าที่ได้ไปทำการคำนวณให้อยู่ในหน่วย EETC ผลการวิเคราะห์ในหน่วย EETC แสดงในตารางที่ 5.3 ซึ่งพบว่าปริมาณลูกหลานของโธรอนสูงสุดที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคนี้อยู่บริเวณห้องทำงาน (HSE office) ซึ่งอาจเป็นเพราะบริเวณดังกล่าวเป็นห้องปิด

ตารางที่ 5.2 ค่า EETC ของ โธรอนในพื้นที่ทำการตรวจวัด

Location	EETC (Bq.m <sup>-3</sup> )
1.ห้องทำงาน (HSE office)	0.43 ± 0.02
2.โรงซักตัวอย่าง	0.14 ± 0.01
3.บริเวณระหว่าง Bay 5,6	0.07 ± 0.01
4.โรงเก็บแร่แทนทาลัม	0.09 ± 0.01

5.1.2.2 เทคนิคหาความเข้มข้นของ attached และ Unattached fraction ของธาตูลูกหลานเรดอนและโธรอนซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญตัวหนึ่งที่ใช้ในการประเมินปริมาณรังสีที่เราได้รับเนื่องจากการหายใจเอาธาตูลูกหลานของเรดอนและโธรอนเข้าสู่ร่างกาย โดยจะทำการตรวจวัดปริมาณของธาตูลูกหลานเรดอน

หรือโพรตอนที่มีความยาวน้อยกว่า 0.5-3 นาโนเมตร (unattached) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอะตอมอิสระที่มีประจุของธาตุ  $^{218}\text{Po}$  และ  $^{214}\text{Po}$  ที่สลายตัวจากเรดอนและโพรตอนตามลำดับ และที่มีความยาวมากกว่า 3 นาโนเมตร (attached) ซึ่งเกิดจากการที่ธาตุลูกหลานของเรดอนและโพรตอนเกาะติดกับฝุ่นละอองในอากาศ สำหรับเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัด คือ การดูดอากาศที่อัตราการไหลของอากาศ 15 ลิตรต่อนาที ผ่าน 2 stages open-face filter holder โดยในขั้นแรกจะเป็นชั้นของ wire screen ขนาด 400 mesh สำหรับเก็บตัวอย่าง unattached และชั้นที่สองเป็นกระดาษกรอง (GF/F) สำหรับเก็บตัวอย่าง attached และทำการเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจะนำตัวอย่างไปทำการวัดรังสีแอลฟาจากการสลายตัวของนิโคลด์ลูก ด้วยเครื่องวัดที่มีชื่อว่า Ludlum ซึ่งเป็นหัววัดแบบ ZnS(Ag) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการตรวจวัดอีกครั้งหลังจากเก็บตัวอย่างเป็นเวลาประมาณ 8 ชั่วโมง ทั้งนี้เพื่อให้ธาตุลูกหลานของเรดอนสลายตัวจนหมด และทำการวัดธาตุลูกหลานเรดอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเช่นกัน (ระบบเก็บตัวอย่างและระบบวัดดังแสดงในรูปที่ 5.3) จากนั้นทำการคำนวณหาความเข้มข้นของธาตุลูกหลานของก๊าซเรดอน ( $\text{Po-218}$ ,  $\text{Pb-214}$ ,  $\text{Bi-214}$ ) และโพรตอน ( $\text{Pb-212}$  และ  $\text{Bi-212}$ ) แต่เนื่องจากเทคนิคการเก็บตัวอย่างไม่เหมาะสมจึงทำให้ไม่สามารถรายงานผลการวิเคราะห์ได้ในการตรวจวัดครั้งที่ 1 นี้



รูปที่ 5.2 แสดงระบบเก็บตัวอย่างและระบบวัดสำหรับการหาความเข้มข้นของ attached และ Unattached fraction ของธาตุลูกหลานเรดอนและโพรตอน

5.1.2.3 เทคนิคการตรวจวัดการกระจายตัวของธาตุลูกหลานเรดอนและโพรตอนที่เกาะติดอยู่กับฝุ่นในอากาศ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ใช้ในการประเมินปริมาณรังสีที่เราได้รับ เนื่องจากการหายใจเอาธาตุลูกหลานของเรดอนและโพรตอนเข้าสู่ร่างกาย โดยจะทำการตรวจวัดการกระจายตัวของธาตุลูกหลานเรดอนหรือโพรตอนที่มีความยาวของฝุ่นในช่วง 1-10 ไมโครเมตร โดยอุปกรณ์ที่มีชื่อว่า 4 stages impactor

sampler ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทางคณะวิจัยได้พัฒนาขึ้น โดยจะทำการเก็บตัวอย่างอากาศผ่าน impactor ด้วยอัตราการไหลของอากาศ 1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง โดยลักษณะของ impactor ประกอบด้วยชั้นเก็บตัวอย่างสี่ชั้น ในชั้นที่ 1, 2, 3 และ 4 สามารถเก็บตัวอย่างฝุ่นได้ในช่วงมากกว่า 10, 10-2.5, 2.5-1 และน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ตามลำดับอนุภาคฝุ่น ในชั้นที่ 1-ชั้นที่ 3 จะถูกเก็บลงบนกระดาษกรอง (GF/F, whatman) ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ส่วนในชั้นที่สี่จะถูกเก็บลงบนกระดาษกรองขนาด 4.7 เซนติเมตร หลังจากนั้นจะนำตัวอย่างไปทำการวัดรังสีแอลฟาจากการสลายตัวของนิโคลด์ลูกด้วยเครื่องวัดที่มีชื่อว่า Ludlum ซึ่งเป็นหัววัดแบบ ZnS(Ag) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการตรวจวัดอีกครั้งหลังจากเก็บตัวอย่างเป็นเวลาประมาณ 8 ชั่วโมง ทั้งนี้ เพื่อให้ธาตุลูกหลานของเรดอนสลายตัวจนหมด และทำการวัดธาตุลูกหลานเรดอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเช่นกัน (ระบบเก็บตัวอย่างและระบบวัดดังแสดงในรูปที่ 5.3) จากนั้นทำการคำนวณหาความเข้มข้นของธาตุลูกหลานของก๊าสเรดอน (Po-218, Pb-214, Bi-214) และโธรอน (Pb-212 และ Bi-212) ในหน่วย EERC และ EETC และจากนั้นจึงนำค่า EERC และ EETC ที่ได้จากการคำนวณไปทำการหาค่าการกระจายตัวของธาตุลูกหลานเรดอนและโธรอน (Particle size distribution of radon and thoron progeny) ในหน่วยของ Activity median diameter (AMD), และ the geometric standard deviation ( $\sigma_g$ ) เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณรังสีที่เราได้รับต่อไป แต่เนื่องจากเทคนิคการเก็บตัวอย่างไม่เหมาะสมจึงทำให้ไม่สามารถรายงานผลการวิเคราะห์จากการตรวจวัดครั้งที่ 1 นี้ได้



รูปที่ 5.3 แสดงระบบเก็บตัวอย่างและระบบการตรวจวัดการกระจายตัวของธาตุลูกหลานเรดอนและโธรอน

5.1.3 เทคนิคการหาความเข้มข้นของเรดอนและโพรตอนในหน่วยของ Working Level (โดย 1 WL หมายถึง นิวไคลด์รังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้นทั้งหมดที่เป็นลูกหลานของเรดอนและโพรตอนในอากาศปริมาตร 1 ลิตร ปลดปล่อยพลังงานจากอนุภาคแอลฟาออกมาเท่ากับ  $1.3 \times 10^5$  MeV ( $2.08 \times 10^{-5}$  J/m<sup>3</sup>) ซึ่ง US.EPA กำหนดเกณฑ์ว่าถ้ามีความสมดุลทางรังสีระหว่างเรดอนและนิวไคลด์ลูก 50 % ดังนั้น เกณฑ์กำหนดที่ให้ความเข้มข้นของเรดอนสำหรับอยู่อาศัยว่าไม่ควรเกิน 148 Bq/m<sup>3</sup> หรือ 4 pCi/L จะมีค่า WL = 0.02) ด้วยเครื่องวัดที่มีชื่อว่า WLx ซึ่งเป็นเครื่องวัดธาตุลูกหลานของเรดอนและโพรตอนในอากาศ โดยจะปั๊มอากาศผ่านกระดาษกรองซึ่งกระดาษกรองจะอยู่ตรงข้ามกับหัววัดแอลฟาแบบกึ่งตัวนำติดตั้งอยู่ โดยจะนับวัดอนุภาคแอลฟาที่ปลดปล่อยจากลูกหลานเรดอน และโพรตอนในอากาศที่อยู่บนกระดาษกรองเป็นระยะ ๆ ตลอด 24 ชั่วโมง โดยได้ทำการตรวจวัด 3 บริเวณด้วยกัน คือ

1. ห้องทำงาน (HSE Office)
2. โรงชักรั่วอย่างแร่
3. โรงเก็บแร่แทนทาลัม



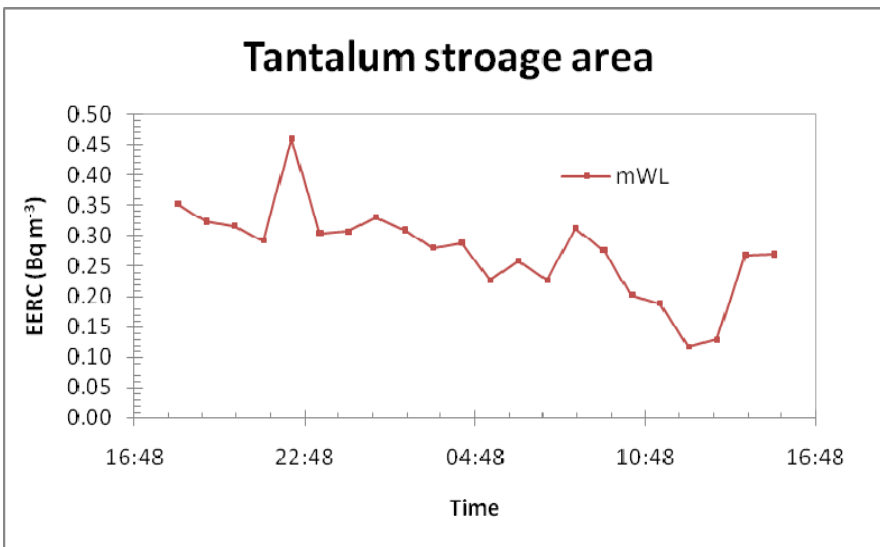
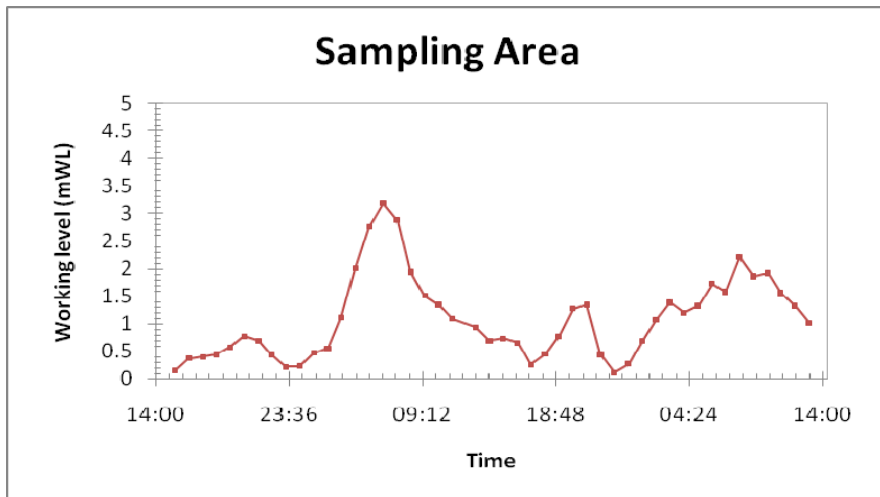
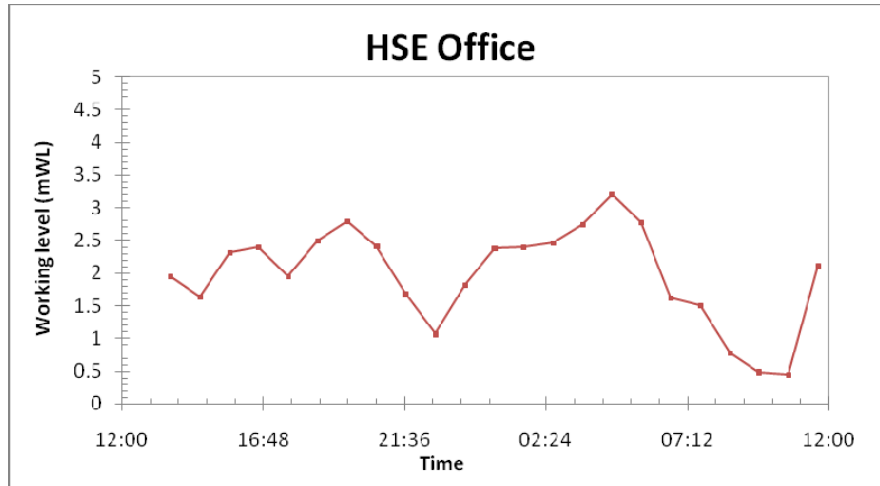
ได้ทำการตรวจวัดเป็นเวลา 24 ชม. ในแต่ละพื้นที่ ผลการตรวจวัดแสดงในตารางที่ 5.3 และ รูปที่ 5.4 พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของลูกหลานเรดอนที่ตรวจวัดได้สูงสุดของทุกพื้นที่อยู่ในช่วงเวลาประมาณ 10:00-6:00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่ไม่ได้มีการทำงาน และค่าสูงสุดที่วัดได้อยู่ที่พื้นที่ห้องทำงาน (HSE Office) มีค่าเท่ากับ  $3.20 \pm 0.38$  mWL ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่า เกณฑ์กำหนดมาก ส่วนความเข้มข้นของโพรตอนมีค่าต่ำมากจนเครื่องไม่สามารถตรวจวัดได้

สำหรับเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ทางคณะวิจัยได้ทำเพิ่มเติมจากเทคนิคต่าง ๆ ที่ได้ออกแบบมา โดยเทคนิคนี้ได้รับการอนุเคราะห์เครื่องมือที่ชื่อว่า เครื่อง WLx มาจากสถาบัน NIRS จากประเทศญี่ปุ่นเพื่อมาทำการตรวจวัดความเข้มข้นของเรดอนและโพรตอน ณ พื้นที่ โดยตรวจวัดทางอ้อมจากธาตุลูกหลานของเรดอนและโพรตอน แต่เครื่องจะทำการรายงานผลเป็นความเข้มข้นเป็นความเข้มข้นของเรดอนและโพรตอนในหน่วยของ Working Level ทั้งนี้เพื่อยืนยันผลที่ตรวจวัดได้จากเทคนิคอื่น ๆ ซึ่งผลจากการตรวจวัดความเข้มข้นของเรดอนที่ได้นี้ พบว่า สอดคล้องกับการตรวจวัดความเข้มข้นของเรดอนโดยตรงด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า RAD 7

ตารางที่ 5.3 ปริมาณความเข้มข้นของธาตุลูกหลานเรดอนที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง WLx ในบริเวณต่าง ๆ

Location	Radon Working Level (mWL)		
	Low	High	Mean
1. ห้องทำงาน (HSE Office)	$0.44 \pm 0.05$	$3.20 \pm 0.38$	$1.97 \pm 0.76$
2. โรงชักรั่วอย่างแร่	$0.12 \pm 0.06$	$3.18 \pm 0.55$	$1.09 \pm 0.75$
3. โรงเก็บแร่แทนทาลัม	$0.12 \pm 0.01$	$0.46 \pm 0.06$	$0.27 \pm 0.07$

หมายเหตุ ปริมาณความเข้มข้นรังสีของลูกหลานโพรตอนไม่สามารถตรวจวัดได้เนื่องจากต่ำกว่าขีดจำกัดในการวัดของเครื่องมือ



รูปที่ 5.4 ปริมาณความเข้มข้นของธาตุลูกหลานเรดอนที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์วัดชื่อ WLx ในพื้นที่ศึกษา

## 5.2 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโทรอน ณ พื้นที่ ในช่วงระยะเวลายาว

เทคนิคนี้ได้ใช้ SSNTD ชนิดฟิล์ม CR-39 แขนงไว้ในบริเวณพื้นที่ที่ภายในโรงงานที่มีกิจกรรมตลอดเวลา จำนวน 4 จุด ได้แก่ ห้องทำงาน (HSE office), โรงซักตัวอย่างแร่, บริเวณ slag area ระหว่าง Bay 5-Bay 6, และโรงเก็บแร่แทนทาลัม นอกจากนี้ยังได้ทำการติดตั้งบริเวณนอกพื้นที่ของโรงงานอีกหนึ่งพื้นที่เพื่อใช้เปรียบเทียบ โดยได้ทำการติดตั้งไว้ที่บ้านคุณสมชัย โดยจะแขวนทิ้งไว้เป็นช่วงเวลา 3 เดือนตลอดระยะเวลา 1 ปี เพื่อประเมินถึงค่า annual effective dose ที่บุคคลที่ทำงานทางด้านรังสีจะได้รับจากเรดอน โทรอน และธาตุลูกหลานเรดอนและโทรอนตลอดระยะเวลา 1 ปี ซึ่งในแต่ละช่วงจะเก็บมาทำการกักรอยและอ่านรอย เช่นเดียวกับข้อ 5.1.2.1 ข้างต้น เพื่อนับความหนาแน่นของรอยที่เกิดจากอนุภาคแอลฟาจากเรดอน โทรอน และธาตุลูกหลานเรดอนและโทรอนที่อยู่ในบริเวณนั้น ซึ่งการติดตั้งครั้งแรกนี้คณะผู้เข้าสำรวจได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวไว้ขณะเข้าทำการสำรวจอย่างละเอียด ในวันที่ 5 มีนาคม 2552

---

## บทที่ 6 ผลการเข้าสำรวจภาคสนาม ครั้งที่ 2

---

6.1 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโธรอน ณ พื้นที่ ในช่วง ระยะเวลาสั้น ๆ.....	6-1
6.1.1 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโธรอนโดยตรง ด้วยเครื่องมือวัดที่มีชื่อว่า RAD 7 .....	6-1
6.1.2 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโธรอนโดยวัด ทางอ้อมจากความเข้มข้นของธาตุลูกหลานของเรดอนและโธรอน .....	6-4
6.1.3 เทคนิคการหาความเข้มข้นของเรดอนและโธรอนในหน่วยของ Working Level.....	6-8
6.2 ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโธรอน ณ พื้นที่ ในช่วง ระยะเวลายาว.....	6-11



## บทที่ 6 ผลการเข้าสำรวจภาคสนาม ครั้งที่ 2

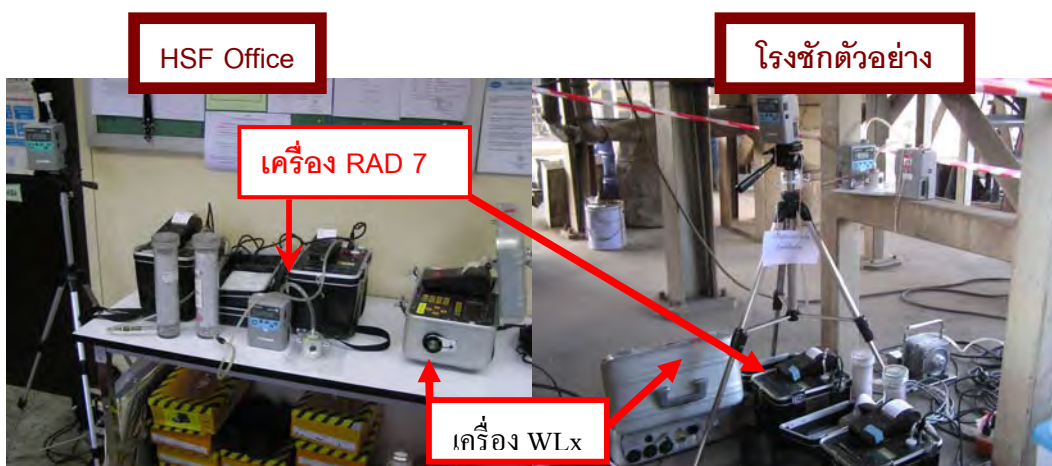
ผลการสำรวจและตรวจวัดปริมาณรังสีอย่างละเอียดของบริษัท ไทยแลนด์สเมลดั้งแอนดรีไฟนิง จำกัด เมื่อวันที่ 16-18 กุมภาพันธ์ 2553 ด้วยอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นร่วมกับอุปกรณ์อื่น โดยมีผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

### 6.1 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโทรอน ณ พื้นที่ ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ

ในการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโทรอน ณ พื้นที่ ในช่วงระยะสั้นมีเทคนิคที่ใช้แตกต่างกัน 2 วิธี ดังนี้

6.1.1 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนและโทรอนโดยตรงด้วยเครื่องวัดที่มีชื่อว่า RAD 7 ซึ่งเป็นเครื่องวัดก๊าซเรดอนและโทรอนในอากาศที่ถูกปั๊มเข้าไปใน chamber ของเครื่องวัด (ธาตุลูกหลานจะถูกกรองกันไว้ไม่ให้เข้าสู่ chamber) ซึ่งมีหัววัดแอลฟาแบบกึ่งตัวนำติดตั้งอยู่ โดยจะนับวัดอนุภาคแอลฟาที่ปลดปล่อยจากเรดอนและโทรอนในอากาศที่ดูดเข้าไปเป็นระยะ ๆ ตลอด 24 ชั่วโมง โดยได้ทำการตรวจวัด 4 บริเวณด้วยกัน คือ

1. ห้องทำงาน (HSE Office)
2. โรงชักตัวอย่าง
3. โรงเก็บแร่แทนทาลัม



รูปที่ 6.1 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโทรอนโดยตรงด้วยเครื่อง RAD 7 ณ พื้นที่เป้าหมาย

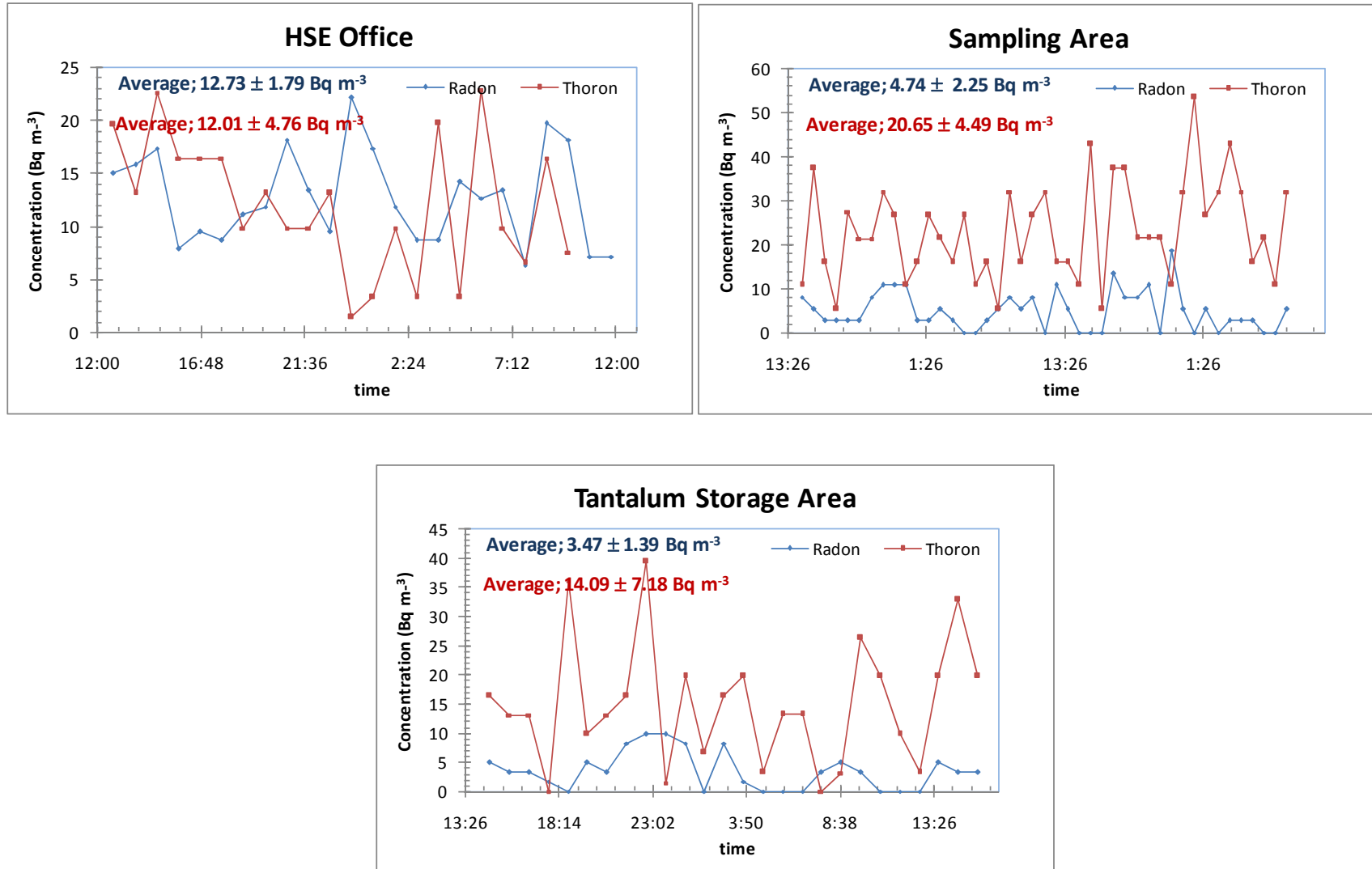
ได้ทำการตรวจวัดในแต่ละพื้นที่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการตรวจวัดแสดงในตารางที่ 6.1 และรูปที่ 6.1 พบว่า ในบริเวณโรงชกตัวอย่างแร่และบริเวณโรงเก็บแร่แทนทาลัมจะพบปริมาณความเข้มข้นของโธรอนสูงกว่าเรดอน โดยที่ความเข้มข้นสูงสุดของโธรอนที่ตรวจวัดได้จะพบอยู่ในช่วงกลางคืน ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากแร่และวัสดุดิบที่เก็บไว้ในบริเวณดังกล่าว ปัจจุบันยังไม่มีเกณฑ์กำหนดปริมาณความเข้มข้นรังสีสำหรับก๊าซโธรอน เนื่องจากก๊าซโธรอนมีค่าครึ่งชีวิตสั้นมาก (55.6 วินาที) และยังไม่มีการศึกษาอย่างกว้างขวางถึงผลกระทบต่อสุขภาพ สำหรับในบริเวณห้องทำงาน พบว่า มีปริมาณเรดอนและโธรอนไม่แตกต่างกันมากนัก และปริมาณเรดอนที่ตรวจวัดได้ในครั้งนี้มีปริมาณน้อยกว่าที่ตรวจวัดได้จากการเข้าสำรวจในครั้งที่ 1 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากได้มีการติดตั้งพัดลมดูดอากาศ ทำให้ภายในห้องมีการไหลเวียนของอากาศตลอดเวลา จึงการสะสมของก๊าซเรดอนและโธรอนไม่สูงนัก อย่างไรก็ตามค่าความเข้มข้นของเรดอนที่ตรวจวัดได้นั้นยังต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดโดยหน่วยงาน Environmental Protection Agency ของประเทศสหรัฐอเมริกา (US.EPA) สำหรับที่อยู่อาศัยที่กำหนดค่าไว้ว่า ไม่ควรเกิน  $148 \text{ Bq/m}^3$  หรือ  $4 \text{ pCi/L}$

สำหรับผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซโธรอน พบว่า ทุกบริเวณที่มีการเก็บแร่จะมีปริมาณโธรอนสูงกว่าเรดอน โดยบริเวณที่มีความเข้มข้นของโธรอนสูงสุดคือ บริเวณโรงชกตัวอย่าง มีความเข้มข้นโธรอนเท่ากับ  $53.4 \pm 46.1 \text{ Bq/m}^3$  โดยจะพบอยู่ในช่วงบ่าย เวลาประมาณ 0.42 น.

เนื่องจากทางคณะวิจัยได้เคยทำการตรวจวัดปริมาณเรดอนและโธรอนในพื้นที่เป้าหมายด้วยวิธีนี้ เมื่อวันที่ 3-5 มีนาคม 2552 เมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกัน พบว่า ผลการสำรวจเรดอนให้ผลสอดคล้องกัน โดยบริเวณที่มีปริมาณเรดอนสูงสุด คือ บริเวณห้องทำงาน เช่นเดียวกัน สำหรับผลของการสำรวจโธรอนก็มีความสอดคล้องกัน นั่นคือ บริเวณที่มีการเก็บแร่จะมีความเข้มข้นของโธรอนสูงกว่าเรดอน

ตารางที่ 6.1 ปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโธรอนที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง RAD 7 ในบริเวณต่าง ๆ

Location	Radon Activity Concentration ( $\text{Bq/m}^3$ )			Thoron Activity Concentration ( $\text{Bq/m}^3$ )		
	Low	High	Mean	Low	High	Mean
1.ห้องทำงาน (HSE Office)	$7.10 \pm 7.69$	$22.11 \pm 10.23$	$12.73 \pm 1.79$	$1.42 \pm 2.60$	$19.60 \pm 23.9$	$12.01 \pm 4.76$
3. โรงชกตัวอย่าง	$0 \pm 14.6$	$18.76 \pm 22.31$	$4.74 \pm 2.25$	$5.34 \pm 25.8$	$53.4 \pm 46.1$	$20.65 \pm 4.49$
4. โรงเก็บแร่แทนทาลัม	$0 \pm 10.63$	$9.85 \pm 13.67$	$3.47 \pm 1.39$	$0 \pm 13.1$	$39.4 \pm 30.2$	$14.09 \pm 7.18$



รูปที่ 6.2 ปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโธรอนที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์วัดชื่อ RAD 7 ในพื้นที่ศึกษา

6.1.2 การหาปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโธรอน โดยวัดทางอ้อมจากความเข้มข้นของธาตุลูกหลานของเรดอนและโธรอนด้วยเทคนิค 3 เทคนิค ดังนี้

6.1.2.1 เทคนิคการหาความเข้มข้นของโธรอนในหน่วยของ Equilibrium Equivalent Thoron Concentration, EETC ซึ่ง EETC หมายถึง ค่าของผลคูณของความเข้มข้นของโธรอน ( $C_{Th}$ ) กับค่าเฟคเตอร์สมดุลของลูกหลาน (equilibrium factor, F)

วิธีการตรวจวัดทำโดยใช้แผ่นฟิล์มแบบ Solid-State Nuclear Track Detector (SSNTD) ชนิด CR-39 สำหรับเทคนิคนี้ได้เลือกพื้นที่ศึกษาจำนวน 4 พื้นที่ คือ HSE office, โรงชักตัวอย่าง, บริเวณ slag area ระหว่าง bay 5 และ 6 และโรงเก็บแร่แทนทาลัม โดยทำการดูดอากาศในพื้นที่ศึกษาด้วยปั๊มขนาดเล็กด้วยอัตราการไหลของอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผ่านกระดาษกรอง (GF/F filter) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร เพื่อเก็บธาตุลูกหลานของเรดอนและโธรอนในอากาศบนกระดาษกรอง หลังจากนั้นปล่อยให้ธาตุลูกหลานของเรดอนที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้นกว่าลูกหลานของโธรอนบนกระดาษกรองสลายตัวไปจนหมดซึ่งใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมงแล้วจึงนำกระดาษกรองไปทำการวัดด้วย SSNTD โดยต้องวางแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ 1 แผ่น ทับบนกระดาษกรองเพื่อลดทอนพลังงานแอลฟาของกัมมันตรังสีที่จะวางหัววัด โดยใช้เวลาในการวัดประมาณ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำหัววัดไปทำการกัดรอยและทำการอ่านค่าความเข้มของรอยอนุภาคแอลฟาของลูกหลานของโธรอนคือ Pb-212 และ Bi-212 บนแผ่นฟิล์ม เพื่อนำไปคำนวณหาความเข้มข้นของธาตุลูกหลานของโธรอน จากนั้นนำค่าที่ได้ไปทำการคำนวณให้อยู่ในหน่วย EETC ผลการวิเคราะห์ในหน่วย EETC แสดงในตารางที่ 6.2 ซึ่งพบว่าปริมาณลูกหลานของโธรอนที่ตรวจวัดด้วยเทคนิคนี้ในบริเวณห้องทำงาน และ โรงชักตัวอย่างมีค่าสูงสุดและเป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน

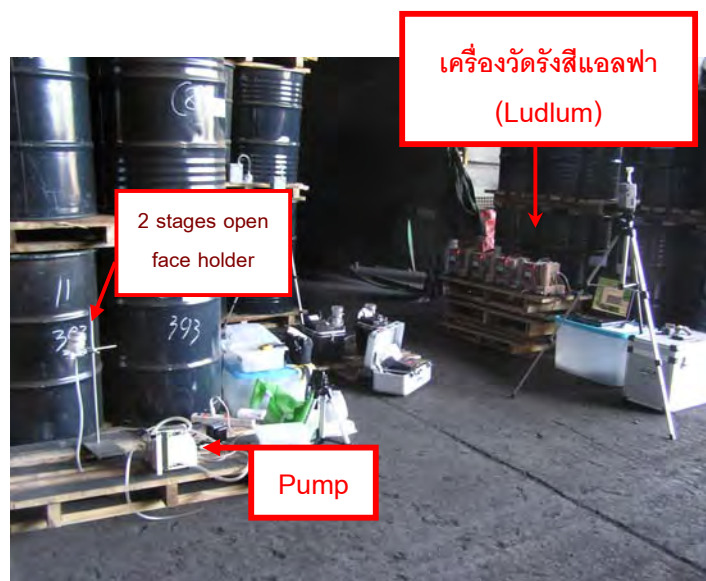
ตารางที่ 6.2 ค่า EETC ของ โธรอนใน พื้นที่ทำการตรวจวัด

Location	EETC (Bq.m <sup>-3</sup> )
1.HSE office (ห้องทำงาน)	0.46 ±0.05
2.โรงชักตัวอย่าง	0.45 ±0.04
3.โรงเก็บแร่แทนทาลัม	0.20± 0.03

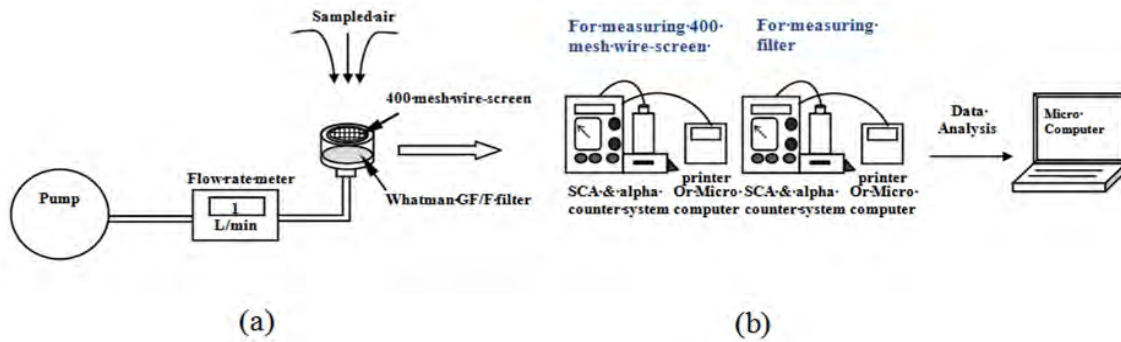
หมายเหตุ ได้เคยทำการตรวจวัดบริเวณโรงชักตัวอย่างเมื่อวันที่ 5-7 มีนาคม 2552 พบว่าได้ค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันคือ 0.27 Bq/m<sup>3</sup>

6.1.2.2 เทคนิคหาความเข้มข้นของ attached และ Unattached fraction ของธาตุลูกหลานเรดอนและโธรอน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญตัวหนึ่งที่ใช้ในการประเมินปริมาณรังสีที่เราได้รับจากการหายใจเอาธาตุลูกหลานของเรดอนและโธรอนเข้าสู่ร่างกาย เทคนิคนี้ได้ทำการตรวจวัดปริมาณของธาตุลูกหลานเรดอนหรือโธรอนที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5-3 นาโนเมตร (unattached) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอะตอมอิสระมีประจุของธาตุ <sup>218</sup>Po และ <sup>214</sup>Po ที่สลายตัวจากเรดอน และโธรอน ตามลำดับ และอนุภาคที่ใหญ่กว่า 3 นาโนเมตร (attached) ซึ่งเกิดจากการที่ธาตุลูกหลานของเรดอนและโธรอนเกาะติดกับฝุ่นละอองในอากาศ โดยทำการดูด

อากาศที่อัตราการไหลของอากาศ 15 ลิตรต่อนาที ผ่าน 2 stages open-face filter holder โดยในขั้นแรกจะเป็นชั้นของ wire screen ขนาด 400 mesh สำหรับเก็บตัวอย่าง unattached และชั้นที่สองเป็นชั้นของกระดาษกรอง (GF/F) สำหรับเก็บตัวอย่าง attached และทำการเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจะนำตัวอย่างไปทำการวัดรังสีแอลฟาจากการสลายตัวของนิวไคลด์ลูกด้วยเครื่องมือวัดที่เรียกว่า Ludlum ที่มีหัววัดแบบ ZnS(Ag) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการตรวจวัดอีกครั้งหลังจากเก็บตัวอย่างเป็นเวลาประมาณ 8 ชั่วโมง ทั้งนี้เพื่อให้ธาตุลูกหลานของเรดอนสลายตัวไปจนหมด และทำการวัดตัวอย่างอีกครั้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ระบบเก็บตัวอย่างและระบบวัดแสดงดังรูปที่ 6.3) จากนั้นทำการคำนวณหาความเข้มข้นของธาตุลูกหลานของเรดอน (Po-218, Pb-214 และ Bi-214) และโทรอน (Pb-212 และ Bi-212) จากการตรวจวัดในครั้งนี้พบว่า บริเวณที่ทำการตรวจวัดมีเฉพาะปริมาณธาตุลูกหลานเรดอนเป็นส่วนใหญ่ โดยผลการตรวจวัดดังแสดงในตารางที่ 6.3 ซึ่งจากการผลการตรวจวัด พบว่า บริเวณห้องทำงานมีปริมาณ unattached ของลูกหลานเรดอนสูงกว่า บริเวณชักตัวอย่างแร่ และบริเวณที่เก็บแร่แทนทาลัม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะบริเวณห้องทำงานเป็นห้องปิด ทำให้มีการถ่ายเทของอากาศภายในห้องน้อยกว่า ถึงแม้จะมีพัดลมดูดอากาศก็ตามที่ จึงทำให้มีการสะสมตัวของธาตุลูกหลานเรดอนมากกว่าในบริเวณอื่น



รูปที่ 6.3 แสดงระบบเก็บตัวอย่างและระบบวัดสำหรับการหาความเข้มข้นของ attached และ unattached fraction ของธาตุลูกหลานเรดอนและโทรอน



รูปที่ 6.4 ไดอะแกรมระบบเก็บตัวอย่างและระบบวัดสำหรับการหาความเข้มข้นของ attached และ unattached fraction ของธาตุลูกหลานเรดอนและโทรอน a) ระบบเก็บตัวอย่างอากาศ b) ระบบวัดรังสีที่ใช้ในการตรวจวัดลูกหลานของเรดอน

ตารางที่ 6.3 ค่า attached และ unattached fraction ของธาตุลูกหลานเรดอนในพื้นที่ที่ทำการตรวจวัด

Location	Calculation Results (Average)		Average ( $f_{U/Rn}$ )
	unattached	attached	
	EERC (Bq/m <sup>3</sup> )		
1.ห้องทำงาน (HSE office)	2.71±0.94	1.89±0.61	0.59
2.Ore Sampling Area	2.04±0.86	3.66±0.75	0.36
3.Tantalum Storage area	1.37±0.44	3.24±1.02	0.30

6.1.2.2 เทคนิคการตรวจวัดการกระจายตัวของธาตุลูกหลานเรดอนและโทรอนที่เกาะติดอยู่กับฝุ่นในอากาศ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ใช้ในการประเมินปริมาณรังสีที่เราได้รับเนื่องจากการหายใจเอาธาตุลูกหลานของเรดอนและโทรอนเข้าสู่ร่างกาย โดยเทคนิคนี้จะทำการตรวจวัดการกระจายตัวของธาตุลูกหลานของเรดอนและโทรอนที่มีขนาดของฝุ่นอยู่ในช่วง 1-10 ไมโครเมตร ด้วยอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นที่มีชื่อว่า 4 stages impactor sampler ซึ่งประกอบด้วย ชั้นเก็บตัวอย่าง 4 ชั้น โดยในชั้นที่ 1, 2, 3 และ 4 จะสามารถเก็บตัวอย่างฝุ่นในช่วง มากกว่า 10, 10-2.5, 2.5-1 และน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ตามลำดับ อนุภาคฝุ่นในชั้นที่ 1-ชั้นที่ 3 จะเก็บลงบนกระดาษกรอง (GF/F, whatman) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ส่วนในชั้นที่ 4 จะเก็บตัวอย่างลงบนกระดาษกรองขนาด 4.7 เซนติเมตร โดยจะทำการเก็บตัวอย่างอากาศผ่าน impactor ด้วยอัตราการไหลของอากาศ 1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะนำตัวอย่างไปวัดรังสีแอลฟาจากการสลายตัวของนิวไคลด์ลูกด้วยเครื่องมือวัดที่มีชื่อว่า Ludlum ที่มีหัววัดแบบ ZnS(Ag) เป็นเวลา

1 ชั่วโมง และจะนำมาทำการตรวจวัดอีกครั้งหลังจากเก็บตัวอย่างไว้เป็นเวลาประมาณ 8 ชั่วโมง ทั้งนี้เพื่อให้ ภาตูลูกหลานของเรดอนสลายตัวจนหมด โดยใช้เวลาในการวัดประมาณ 1 ชั่วโมงเช่นกัน (ระบบเก็บตัวอย่าง และระบบวัดแสดงดังรูปที่ 6.7) จากนั้นทำการคำนวณหาความเข้มข้นของภาตูลูกหลานของก๊าซเรดอน (Po-218, Pb-214 และ Bi-214) และโธรอน (Pb-212 และ Bi-212) ในหน่วย EERC และ EETC และทำการ คำนวณหาค่าการกระจายตัวของภาตูลูกหลานเรดอนและโธรอน (Particle size distribution of radon and thoron progeny) ในหน่วย Activity median diameter (AMD) และ the geometric standard deviation ( $\sigma_g$ ) เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณรังสีที่เราได้รับต่อไป แต่จากการตรวจวัดในครั้งนี้พบว่า บริเวณที่ทำการ ตรวจวัดมีเฉพาะการกระจายตัวของภาตูลูกหลานเรดอน ผลจากการตรวจวัดดังแสดงในตารางที่ 6.4 ซึ่งจากการ ตรวจวัดพบว่า ค่า AMAD ของลูกหลานเรดอน ที่บริเวณห้องทำงานมีขนาดเล็กกว่าที่บริเวณโรงชักตัวอย่างแร่ และบริเวณโรงเก็บแร่แทนทาลัม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ในบริเวณห้องทำงานเป็นห้องปิด และไม่มีแหล่งกำเนิด ฝุ่นจากภายนอกเหมือนอย่างในบริเวณอื่น ๆ

ตารางที่ 6.4 ค่าการกระจายตัวของภาตูลูกหลานเรดอนที่ตรวจวัดได้ในพื้นที่ต่าง ๆ

Location	Number of measurement	Average AMAD (nm)	Average $\sigma_g$
1.HSE office	2	340	3.93
2.Ore sampling area	3	453	4.80
3.Tantalum storage area	3	468	4.49

หมายเหตุ: ตัวอย่างการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ก.



รูปที่ 6.5 แสดงระบบเก็บตัวอย่างและระบบการตรวจวัดการกระจายตัวของธาดูกลูกหลานเรดอนและโพรตอน

6.1.3 เทคนิคการหาความเข้มข้นของเรดอนและโพรตอนในหน่วยของ Working Level เทคนิคนี้จะใช้เครื่องวัดที่มีชื่อว่า WLx เป็นเครื่องวัดธาดูกลูกหลานของเรดอนและโพรตอนในอากาศ โดยจะปั๊มอากาศในพื้นที่ศึกษาผ่านกระดาศกรอง ซึ่งวางอยู่ตรงข้ามกับหัววัดแอลฟาแบบกึ่งตัวนำ ซึ่งจะนับวัดอนุภาคแอลฟาในอากาศที่ปลดปล่อยมาจากลูกหลานเรดอนและโพรตอนที่เกาะติดอยู่บนกระดาศกรองเป็นระยะ ๆ ตลอด 24 ชั่วโมง โดยได้ทำการตรวจวัดใน 3 บริเวณด้วยกัน คือ

1. ห้องทำงาน (HSE Office)
2. โรงซักตัวอย่าง
3. โรงเก็บแร่แทนทาลัม

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ทางคณะวิจัยได้นำมาตรวจวัดเพิ่มเติมจากเทคนิคที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งในการเข้าสำรวจก็ได้ทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคนี้เช่นกัน สำหรับการตรวจวัดในครั้งนี้ ทางสถาบัน NIRS ประเทศญี่ปุ่นก็ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่อง WLx มาทำการตรวจวัด ณ พื้นที่อีกครั้ง ซึ่งการตรวจวัดในครั้งนี้ พบว่า ค่าความ



เข้มข้นของเรดอนมีความสอดคล้องกับการตรวจวัดด้วยเครื่อง RAD 7 รวมทั้งสอดคล้องกับการตรวจวัดจากการเข้าสำรวจครั้งแรก จึงทำให้ผลการตรวจวัดจากระบบวัดที่คณะวิจัยได้ออกแบบมานั้นมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น สำหรับผลการตรวจวัดแสดงในตารางที่ 6.5 และ รูปที่ 6.6 ซึ่งพบว่า ค่าสูงสุดที่วัดได้อยู่ที่พื้นที่ โรงซักแร่มีค่า  $7.49 \pm 1.10$  mWL ที่เวลาประมาณ 12:29 น. อย่างไรก็ตามค่าที่วัดได้นั้นต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดมาก

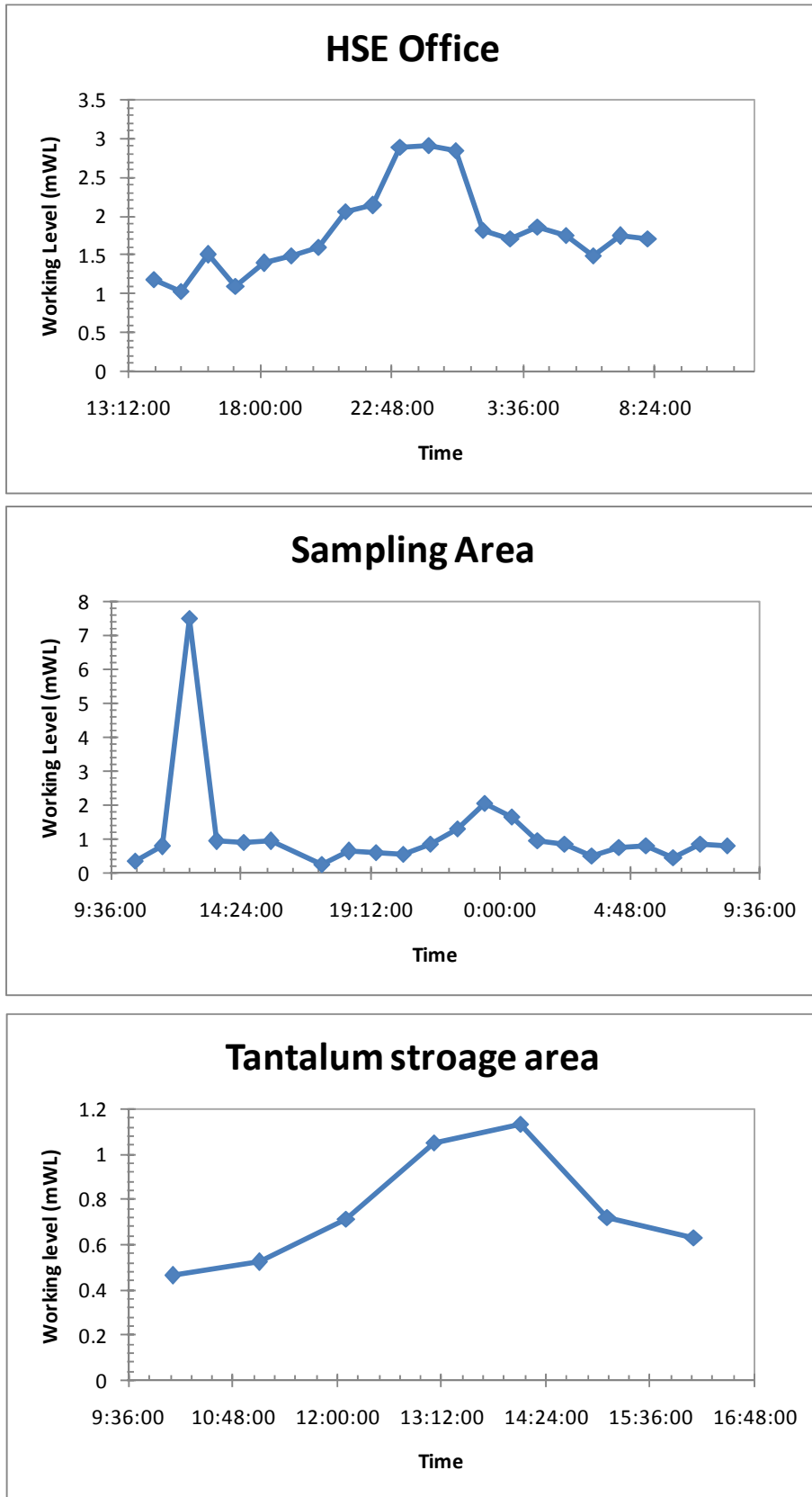


รูป 6.6 การตรวจวัดความเข้มข้นของเรดอนและโทรอน โดยวัดทางอ้อมจากความเข้มข้นของธาตุ ด้วยเครื่องวัดเครื่อง WLx ณ บริเวณโรงซักตัวอย่างแร่

ตารางที่ 6.5 ปริมาณความเข้มข้นของธาตุลูกหลานเรดอนที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง WLx ในบริเวณต่าง ๆ

Location	Radon Working Level (mWL)		
	Low	High	Mean
1.HSE Office (ห้องทำงาน)	$1.03 \pm 0.25$	$2.90 \pm 0.49$	$1.80 \pm 0.29$
2. โรงซักตัวอย่างแร่	$0.26 \pm 0.12$	$7.49 \pm 1.10$	$1.15 \pm 0.20$
3. โรงเก็บแร่แทนทาลัม	$0.46 \pm 0.17$	$1.13 \pm 0.28$	$0.75 \pm 0.04$

หมายเหตุ ปริมาณความเข้มข้นของลูกหลานโทรอนไม่สามารถตรวจวัดได้เนื่องจากต่ำกว่าขีดจำกัดในการวัดของเครื่องมือ



รูปที่ 6.7 ปริมาณความเข้มข้นของธาตุลูกหลานเรดอนที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์วัดชื่อ WLx ในพื้นที่ศึกษา

## 6.2 การตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโทรอน ณ พื้นที่ในช่วงระยะเวลายาว

เทคนิคนี้ได้ใช้ SSNTD ชนิดฟิล์ม CR-39 แขนงไว้ในบริเวณพื้นที่ภายในโรงงานที่มีกิจกรรมตลอดเวลาจำนวน 5 จุด ได้แก่ HSE office, โรงเก็บแร่, slag area ระหว่าง Bay 5-Bay 6, โรงชักตัวอย่าง และโรงเก็บแร่แทนทาลัม, บ้านพักคุณสมชัย โดยจะแขวนทิ้งไว้เป็นช่วงเวลา 3 เดือนตลอดระยะเวลา 1 ปี เพื่อประเมินถึงค่า annual effective dose ที่บุคคลที่ทำงานทางด้านรังสีจะได้รับจากเรดอน โทรอน และธาตุลูกหลานเรดอนและโทรอนตลอดระยะเวลา 1 ปี ซึ่งในแต่ละช่วงจะเก็บฟิล์ม CR-39 มาทำการกักรอยและอ่านรอยเช่นเดียวกับข้อ 6.1.2.2 ข้างต้น เพื่อนับความหนาแน่นของรอยที่เกิดจากอนุภาคแอลฟาจากเรดอน โทรอน และธาตุลูกหลานของเรดอนและโทรอนที่อยู่ในบริเวณนั้น

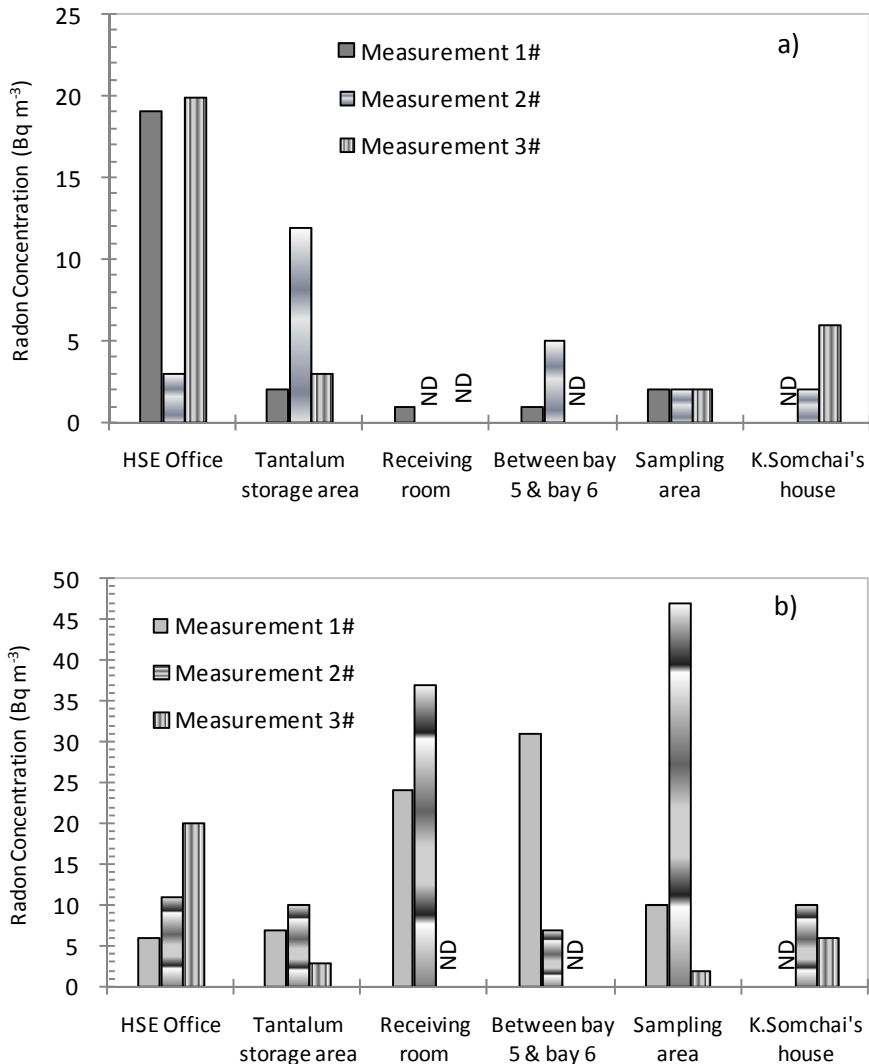
สำหรับการติดตั้งครั้งแรกคณะวิจัยได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวไว้ขณะเข้าทำการสำรวจอย่างละเอียด เมื่อวันที่ 5 มีนาคม 2552 ซึ่งบัดนี้ได้ทำการติดตั้งและทำการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นเรดอนและโทรอนแล้วเสร็จเป็นเวลา 9 เดือน ผลการตรวจวัดดังแสดงในตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.8 แสดงระบบการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโทรอน ณ พื้นที่ในช่วงระยะเวลายาว

ตารางที่ 6.6 ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนและโธรอนเฉลี่ยตลอดช่วงระยะเวลา 9 เดือน

Location	Average Concentration (Bq/m <sup>3</sup> )	
	Radon	Thoron
<b>indoor</b>		
HSE Office	42	33
Receiving room	1	84
Tantalum storage area	17	33
<b>outdoor</b>		
Sampling area	6	63
Between bay 5 & bay 6	6	207
K.Somchai's house	8	10



รูปที่ 6.9 ปริมาณความเข้มข้นกัมมันตภาพ a) ก๊าซเรดอน b) ก๊าซโธรอน ตลอดช่วงระยะเวลา 9 เดือน ที่ทำการติดตั้ง

---

## บทที่ 7 การประเมินอัตราการได้รับรังสีเนื่องจากก๊าซเรดอนและโทรอน

---

## บทที่ 7

### การประเมินอัตราการได้รับรังสีเนื่องจากก๊าซเรดอนและโพรตอน

ในการประเมินถึงอัตราการได้รับรังสีเนื่องจากก๊าซเรดอนและโพรตอนนั้นทางคณะผู้วิจัยจะนำผลที่ได้จากการตรวจวัดที่ได้จากการสำรวจภาคสนามครั้งที่ 2 เพื่อใช้ในการประเมินค่าปริมาณรังสียังผล (effective dose) จากการได้รับธาตุลูกหลานเรดอนและโพรตอน โดยใช้โปรแกรม LUDEP 2.6–Personal Computer Program for Calculating Internal Dose โดยใช้ ICRP Publication 66 Respiratory Tract Model ซึ่งในโปรแกรมนี้จะถือว่า อัตราปริมาณรังสีที่ได้รับจากก๊าซเรดอนหรือโพรตอนนั้นแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคลูกหลานเรดอนหรือโพรตอนที่เราหายใจเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งจากการเข้าสำรวจพื้นที่ภายในบริษัทไทยซารีโกนั้น คณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดขนาดของอนุภาคลูกหลานเรดอนและโพรตอนแบบ attached fraction พบว่า ปริมาณขนาดอนุภาคลูกหลานที่ตรวจวัดได้เป็นอนุภาคลูกหลานของเรดอน ดังนั้นทางผู้วิจัยจะทำการประเมินค่าปริมาณรังสียังผลของเรดอน หรือ effective dose from radon หรือที่รู้จักโดยทั่วไปคือ Dose conversion factor (DCF) ซึ่งค่า DCF ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะถือว่า ปริมาณรังสีที่ได้รับส่วนใหญ่นั้นขึ้นอยู่กับค่า unattached fraction (fp) และสามารถหาได้จากสมการด้านล่าง

$$DCF = DCF_{ae} + C_{fp} \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ  $DCF_{ae}$  = DCF จากการประเมินค่า attached fraction

C = ค่าคงที่ของ DCF จากการประเมินค่าของ unattached fraction ( $DCF_{un}$ )

จากการประเมินค่า  $DCF_{ae}$  ของ attached fraction นั้นทางคณะผู้วิจัย จะใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการตรวจวัดในพื้นที่ คือค่า AMAD และ  $\sigma_g$  ในตารางที่ 6.5 ในการคำนวณ ส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ นั้นทางคณะผู้วิจัย ใช้จากเอกสารอ้างอิงของ Ishikawa et, al (2001) ซึ่งจากการคำนวณด้วยโปรแกรม LUDEP ค่าที่คำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1  $DCF_{ac}$  จากการคำนวณด้วยโปรแกรม LUDEP

Location	$DCF_{ac}$ (nSv/(Bq h m <sup>-3</sup> ))
1.HSE office	22.0
2.Ore sampling area	31.1
3.Tantalum storage area	29.8

แต่เนื่องจากการสำรวจครั้งนี้มิได้ทำการตรวจวัดการกระจายตัวของ unattached fraction ทางคณะผู้วิจัยจึงขอใช้ค่าตัวอย่างการกระจายตัวโดยทั่วไปของสถานประกอบการอื่น (Ishikawa et, al: 2001) ที่มีลักษณะเทียบเคียงกับทางบริษัทไทยซาร์โก ซึ่งมีค่าการกระจายตัวของอนุภาค unattached fraction อยู่ที่ 1.1 nm และ  $\sigma_g$  เท่ากับ 1 ทำให้คำนวณค่า  $DCF_{un}$  ได้เท่ากับ  $148.4 \text{ nSv}/(\text{Bq h m}^{-3})$  ดังนั้นตามหลักพื้นฐานของค่า DCF ในสมการที่ 1 ทำให้ได้สมการที่จะใช้ในการคำนวณค่า DFC ของแต่ละพื้นที่ภายในบริษัทดังต่อไปนี้

$$\text{HSE office: } DCF = 22.0 + 126.4fp \text{ nSv}/(\text{Bq h m}^{-3}) \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{Ore sampling area: } DCF = 31.1 + 117.3fp \text{ nSv}/(\text{Bq h m}^{-3}) \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{Tantalum storage area: } DCF = 29.8 + 118.6fp \text{ nSv}/(\text{Bq h m}^{-3}) \dots\dots\dots(4)$$

เมื่อใช้สมการข้างต้นของแต่ละพื้นที่ และค่า  $fp$  ที่ตรวจวัดได้ในแต่ละพื้นที่ในตารางที่ 6.2 ในการคำนวณค่า DCF นั้น พบว่าค่า DFC (ดังแสดงในตารางที่ 7.2) ของแต่ละพื้นที่มีค่าแตกต่างกัน และค่าที่คำนวณได้ในพื้นที่ HSE office มีค่าเท่ากับค่าที่คำนวณได้เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์การกระจายตัวของลูกหลานเรดอนตามเอกสารอ้างอิง (AMAD=250 nm,  $\sigma_g=2.5$ )

ตารางที่ 7.2 ค่า DCF ที่ได้จากการคำนวณ

Location	DCF (nSv/(Bq h m <sup>-3</sup> ))	
	Real condition	Reference condition
1.HSE office	96.6	96.6
2.Ore sampling area	73.3	
3.Tantalum storage area	65.4	

ในการประเมินอัตราการได้รับรังสีเนื่องจากก๊าซเรดอนสำหรับพนักงานที่ทำงานในพื้นที่นั้น ๆ ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซเรดอน ทุก ๆ 3 เดือนเป็นระยะเวลารวม 9 เดือน ด้วย Alpha track-etch film ผลการตรวจวัดดังแสดงในตารางที่ 6.6 แต่เนื่องจากการประเมินปริมาณรังสีจากธาตุลูกหลานเรดอนต้องใช้ค่า Equilibrium equivalent Radon concentration (EECRn) คณะผู้วิจัยจึงคำนวณค่า EECRn จากผลการตรวจวัดความเข้มข้นเรดอนเฉลี่ยตลอด 9 เดือน โดยใช้พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดแบบระยะสั้นคือ ใช้ค่าความเข้มข้นของเรดอนที่ตรวจวัดได้ในพื้นที่ด้วย RAD 7 (ตารางที่ 6.1) และค่าความเข้มข้นของลูกหลานเรดอนที่ตรวจวัดได้ด้วย WLx (ตารางที่ 6.2) ทำให้ได้ค่า equilibrium factor (F) ของแต่ละพื้นที่ดังแสดงในตารางที่ 7.3 และเมื่อใช้ค่า F ที่ได้คำนวณหาค่า EECRn จากการตรวจวัดแบบระยะยาว (ตลอด 9 เดือน) ทำให้ได้ค่า EECRn สำหรับใช้ในการประเมินปริมาณรังสีที่ได้รับ สำหรับพื้นที่ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่

7.4 และผลจากการประเมินอัตราการได้รับรังสีจากก๊าซเรดอนค่าที่ได้ดังแสดง ในตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.3 ค่า equilibrium factor (F) ที่ได้จากการตรวจวัดในแต่ละพื้นที่

Location	Equilibrium Factor (F) <sup>a</sup>
1.HSE Office	0.52
2.Ore sampling area	0.89
3.Tantalum storage area	0.79

<sup>a</sup> F is the equilibrium factor as a ratio of EECRn to radon concentration ซึ่งค่า F ที่แสดงในตารางได้คำนวณมาจากค่าความเข้มข้นเรดอนที่ตรวจวัดได้ในพื้นที่จากตารางที่ 6.1 และค่าความเข้มข้นของลูกหลานเรดอน (EECRn) ที่ตรวจวัดได้ในพื้นที่จากตารางที่ 6.2

ตารางที่ 7.4 ผลการประเมินอัตราการได้รับรังสีเนื่องจากก๊าซเรดอนของพนักงานในพื้นที่ต่าง ๆ

Location	EECRn <sup>b</sup> (Bq m <sup>-3</sup> )	The effective dose rate (mSv/9 months)	
		Real condition*	Reference condition*
1.HSE office	21.84	3.16	3.16
2.Ore sampling area	5.34	0.59	0.77
3.Tantalum storage area	13.43	1.31	1.95

<sup>b</sup>EECRn is the equilibrium equivalent concentration of radon, that was calculated using "Correction Factor (CF)", and the CF was estimated assuming a certain activity concentration ratio: <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Pb and <sup>214</sup>Bi = 1:1:1. However, in actual environment, the concentration ratio of <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Pb and <sup>214</sup>Bi is always different from it. ในที่นี้คำนวณจากความเข้มข้นของเรดอนในตารางที่ 6.6 และค่า F จากตารางที่ 7.3

\*หมายเหตุ: สำหรับบุคคลที่ทำงานทางด้านรังสีจะคิดเวลาในการทำงานเท่ากับ 2000 ชั่วโมง/ปี แต่เนื่องจากการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซเรดอนแบบระยะยาวนี้ทำไปเพียง 9 เดือน ดังนั้นผู้วิจัยจะคิดเวลาในการทำงานเท่ากับ 1500 ชั่วโมง

### ตัวอย่างการคำนวณ The effective dose rate

$$\text{For real condition at HSE office : EECRn(Bqm}^{-3}\text{) x DCF (nSv/(Bq h m}^{-3}\text{)) x Working time (h)}$$

$$= 21.84 \times 96.6 \times 1500 = 3.16 \text{ mSv/9 months.}$$

**หมายเหตุ** การประเมินอัตราการได้รับอันตรายจากรังสีเนื่องจากก๊าซเรดอนและโพรตอนนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง แต่ปัจจัยหลักที่สำคัญคือ ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนและโพรตอน และขนาดของฝุ่นรังสีในบริเวณที่ทำการตรวจวัด ดังนั้นปริมาณรังสีที่ได้รับจึงไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของฝุ่น แต่จะขึ้นอยู่กับขนาดของฝุ่นรังสี (ปริมาณรังสีที่ได้รับแปรผกผันกับขนาดของฝุ่นรังสี) และปริมาณของก๊าซเรดอนในบริเวณนั้น ๆ



---

## บทที่ 8 สรุปผลการวิจัย

---

8.1 สรุปผลการวิจัย.....	8-1
8.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	8-4
8.3 ข้อเสนอแนะ.....	8-4

## บทที่ 8

### สรุปผลการวิจัย

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบและพัฒนากระบวนการกระจายขนาดของละอองฝุ่นกัมมันตรังสีขนาดนาโนเมตรของธาตุลูกหลานเรดอนและโธรอนในอุตสาหกรรมแร่ เพื่อประเมินอัตราการได้รับรังสี และได้นำระบบที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในการเข้าสำรวจพื้นที่ภาคสนาม ที่บริษัท ไทยแลนด์สแมลติ้งแอนดรีไฟนิง จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทเอกชนที่ให้การสนับสนุนงบประมาณส่วนหนึ่งในการวิจัย นอกจากนี้ยังได้รับการช่วยเหลือจาก National Institute of Radiological Science (NIRS) จากประเทศญี่ปุ่น ที่ให้การสนับสนุนผู้เชี่ยวชาญและเครื่องมือราคาสูงมาใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ด้วย โดยมีผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

#### 8.1 สรุปผลการวิจัย

จากการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเรดอนและโธรอน ณ พื้นที่ ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ นั้นได้ทำการตรวจวัด ด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยการตรวจวัดความเข้มข้นของเรดอนและโธรอนโดยตรงด้วยเครื่องวัดที่มีชื่อว่า RAD 7 นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจวัดโดยทางอ้อมจากของธาตุลูกหลานด้วยเทคนิคต่างๆ อีก 4 เทคนิค คือ 1) เทคนิคการหาความเข้มข้นของโธรอนในหน่วยของ Equilibrium Equivalent Thoron Concentration, EETC 2) เทคนิคหาความเข้มข้นของ attached และ Unattached fraction ของธาตุลูกหลานเรดอนและโธรอน และ 3) เทคนิคการตรวจวัดการกระจายตัวของธาตุลูกหลานเรดอนและโธรอนที่เกาะติดอยู่กับฝุ่นในอากาศ โดยในการเข้าสำรวจครั้งแรกได้ทำการตรวจวัด 4 บริเวณ คือ ห้องทำงาน โรงเก็บแร่เดิม โรงซักตัวอย่าง และโรงเก็บแร่แทนทาลัม นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจวัดความเข้มข้นของเรดอนและโธรอน ณ พื้นที่ ในช่วงระยะเวลายาว โดยการใช้เทคนิค SSNTD โดยการนำหัววัดชนิดฟิล์ม CR-39 แขนงในบริเวณต่างๆ ภายในโรงงาน 5 บริเวณ คือ ห้องทำงาน, โรงเก็บแร่ slag area (ระหว่าง bay 5-bay 6), โรงซักตัวอย่าง และโรงเก็บแร่แทนทาลัม นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งไว้ที่บ้านพักเจ้าหน้าที่เพื่อเป็นตำแหน่งอ้างอิงด้วย ผลจากการตรวจวัดครั้งที่ 1 พบว่า ทุกบริเวณที่ทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคต่างๆ มีความเข้มข้นของเรดอน โธรอน และธาตุลูกหลานของเรดอนและโธรอนต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดมาก สำหรับเกณฑ์กำหนดค่าความเข้มข้นของเรดอนสำหรับที่อยู่อาศัย คือ ไม่ควรเกิน  $148 \text{ Bq/m}^3$  โดยบริเวณที่มีความเข้มข้นของเรดอนสูงสุด คือ ห้องทำงาน โดยความเข้มข้นเรดอนสูงสุดที่ได้ทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง RAD 7 มีค่าเท่ากับ  $34.6 \pm 11.3 \text{ Bq/m}^3$  แต่ตำแหน่งที่มีความเข้มข้นของโธรอนสูงสุด คือ โรงซักตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ  $58.4 \pm 47.4 \text{ Bq/m}^3$  ส่วนค่าความเข้มข้นของโธรอนนั้นปัจจุบันยังไม่มีเกณฑ์กำหนด แต่เมื่อตรวจวัดปริมาณของลูกหลานโธรอน พบว่า ตำแหน่งที่มีปริมาณลูกหลานโธรอนสูงสุด คือ ห้องทำงาน มีค่าเท่ากับ  $0.43 \pm 0.02 \text{ Bq/m}^3$  แต่ในการตรวจวัดครั้งนี้ไม่สามารถหาความเข้มข้นของ attached และ Unattached fraction ของธาตุลูกหลานเรดอนและโธรอน และ

ตรวจวัดการกระจายตัวของธาตุลูกหลานเรดอนและโทรอนที่เกาะติดอยู่กับฝุ่นในอากาศได้ เนื่องจากใช้วิธีการเก็บตัวอย่างไม่เหมาะสม จึงทำให้ไม่สามารถทำการประเมินปริมาณรังสีจากการตรวจวัดครั้งนี้ได้

การเข้าสำรวจครั้งที่ 2 โดยใช้เทคนิคเดียวกับเทคนิคการตรวจวัดที่ใช้ในการเข้าสำรวจครั้งแรก แต่ทำการตรวจวัดแค่ 3 บริเวณ คือ ห้องทำงาน โรงซักตัวอย่างแร่ และโรงเก็บแร่แทนทาลัม พบว่า การตรวจวัดโดยตรงด้วยเครื่องวัดที่มีชื่อว่า RAD 7 ได้ค่าความเข้มข้นของเรดอนและโทรอนสอดคล้องและใกล้เคียงกับการเข้าสำรวจในครั้งแรก โดยที่จุดที่มีความเข้มข้นของเรดอนสูงสุด คือ ห้องทำงาน แต่ความเข้มข้นของเรดอนในการเข้าสำรวจครั้งนี้ลดลงจากครั้งแรกประมาณครึ่งหนึ่งเนื่องด้วยแร่ที่นำมาถลุงมาจากคนละแหล่งและวัตถุดิบอยู่ในรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็น ingot โดยค่าที่ตรวจวัดได้มีค่าเท่ากับ  $22.11 \pm 10.23 \text{ Bq/m}^3$  ส่วนบริเวณที่มีความเข้มข้นของโทรอนมากที่สุดคือ บริเวณโรงซักตัวอย่างเช่นเดิม ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $53.4 \pm 46.1 \text{ Bq/m}^3$  แต่การตรวจวัดด้วยเทคนิคการหาความเข้มข้นของโทรอนในหน่วยของ EETC นั้น มีเพียงตำแหน่งห้องทำงานเพียงตำแหน่งเดียวที่มีปริมาณลูกหลานของโทรอนใกล้เคียงกับการตรวจวัดในครั้งแรกเนื่องจากมีสิ่งแวดล้อมเหมือนเดิม ส่วนบริเวณโรงซักตัวอย่างจะมีปริมาณลูกหลานของโทรอนสูงขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกับบริเวณห้องทำงาน และบริเวณโรงเก็บแร่แทนทาลัมก็มีปริมาณลูกหลานของโทรอนสูงขึ้นเช่นกัน แต่เป็นบริเวณที่มีปริมาณของโทรอนต่ำสุด ผลการตรวจวัด ความเข้มข้นของ attached และ Unattached fraction ของธาตุลูกหลานเรดอนและโทรอน พบว่า ทุกบริเวณที่ทำการตรวจวัดส่วนใหญ่จะเป็นธาตุลูกหลานของเรดอน โดยมีปริมาณ unattached ของลูกหลานเรดอนสูงสุดที่ ห้องทำงาน และจากการตรวจวัดด้วยเทคนิคการตรวจวัดการกระจายตัวของธาตุลูกหลานเรดอนและโทรอนที่เกาะติดอยู่กับฝุ่นในอากาศ พบว่า มีเพียงการกระจายตัวของธาตุลูกหลานของเรดอนที่ตรวจพบบริเวณห้องทำงานมีค่า AMAD เท่ากับ 340 nm ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าที่พบที่บริเวณโรงเก็บแร่แทนทาลัม ที่มีขนาด 468 nm ขนาดการกระจายตัวของธาตุลูกหลานของเรดอนและโทรอนที่ตรวจวัดนี้ ทางคณะวิจัยได้นำค่าที่ได้ไปประเมินปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับ

เมื่อพิจารณาผลการตรวจวัดความเข้มข้นของเรดอนและโทรอน ณ พื้นที่ ในช่วงระยะเวลายาว โดยการใช้เทคนิค SSNTD โดยการนำหัววัดชนิดฟิล์ม CR-39 ซึ่งได้ทำการตรวจวัดได้ในช่วงเวลา 9 เดือน พบว่า บริเวณที่มีปริมาณความเข้มข้นของเรดอนสูงสุด คือ ห้องทำงาน มีค่าเท่ากับ  $42 \text{ Bq/m}^3$  ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจวัดในช่วงเวลานั้น ๆ แต่การตรวจวัดในระยะยาวตรวจวัดความเข้มข้นของเรดอนสูงกว่าการตรวจวัดในช่วงเวลานั้น ๆ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลต่าง ๆ ที่มีผลต่อการฟุ้งกระจายของเรดอน นั่นคือ อุณหภูมิ ความชื้น และความดันบรรยากาศ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทำให้การฟุ้งกระจายของเรดอนในอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถตรวจวัดด้วยเทคนิคการตรวจวัดในช่วงเวลา ยาว แต่อย่างไรก็ดีความเข้มข้นที่ตรวจวัดนี้แม้จะมีค่าสูงกว่าแต่ก็ยังเป็นค่าที่ต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดอยู่มาก ส่วนบริเวณที่มีปริมาณความเข้มข้นของโทรอนสูงสุด คือ slag area ระหว่าง bay 5-bay 6 มีค่าเท่ากับ  $207 \text{ Bq/m}^3$  แต่ตำแหน่งนี้ไม่ได้ทำการตรวจวัดในช่วงเวลานั้น ๆ และเมื่อพิจารณาเทียบกับจุดที่ได้ทำการตรวจวัดในช่วงเวลา

สั้น ๆ พบว่า บริเวณโรงเก็บแร่เดิมที่ได้ทำการตรวจวัดในครั้งแรกของการสำรวจมีความเข้มข้นโทรอนสูงที่สุดจากการตรวจวัดในระยะเวลายาว แต่ในการตรวจวัดในช่วงเวลาสั้น ๆ กลับมีความเข้มข้นโทรอนต่ำมาก ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะได้มีการเปลี่ยนชนิดของแร่ที่มีการจัดเก็บจึงทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น นอกจากนี้ อาจเป็นผลมาจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อการฟุ้งกระจายของโทรอน ซึ่งอาจทำให้มีการฟุ้งกระจายของโทรอนมากในเวลาที่ไม่ได้ทำการตรวจวัดในช่วงเวลาสั้น ๆ แต่อย่างไรก็ดีทางคณะวิจัยได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นเรดอนและโทรอนในช่วงเวลายาวไว้ตลอด เลยทำให้ตรวจวัดได้ สำหรับในตำแหน่งอื่น ๆ ค่าที่ตรวจวัดได้มีความสอดคล้องกัน แต่มีค่าสูงกว่าการตรวจวัดในระยะเวลายาวสั้น ๆ ในทุกบริเวณ

การประเมินอัตราการได้รับอันตรายจากรังสีเนื่องจากก๊าซเรดอนและโทรอน ณ บริเวณที่ทำการตรวจวัด จะเห็นได้ว่า การประเมินอัตราการได้รับอันตรายจากรังสีเนื่องจากก๊าซเรดอนและโทรอนนั้นไม่ได้ขึ้นกับปริมาณของฝุ่น แต่จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งปัจจัยที่สำคัญที่สุด คือ ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนและโทรอน และขนาดของฝุ่นรังสีในบริเวณที่ทำการตรวจวัด โดยฝุ่นรังสีที่มีขนาดเล็กจะสามารถทำอันตรายได้มากกว่าฝุ่นรังสีที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นหากบริเวณที่ทำการตรวจวัดมีฝุ่นขนาดเล็กและเป็นบริเวณที่มีปริมาณก๊าซเรดอนและโทรอนสูงก็มีโอกาสที่ลูกหลานเรดอนและโทรอนจะเกาะติดกับฝุ่นเหล่านั้น และเมื่อเราหายใจเอาฝุ่นรังสีเหล่านั้นเข้าสู่ร่างกาย ฝุ่นรังสีที่มีขนาดเล็กก็จะเข้าไปในระบบทางเดินหายใจได้ลึกกว่าฝุ่นรังสีขนาดใหญ่ ดังนั้นเมื่อทราบขนาดของฝุ่นรังสีและปริมาณเรดอนและโทรอนแล้วก็จะสามารถทำการประเมินอัตราการได้รับรังสีจากก๊าซเรดอนและโทรอนได้ ซึ่งปริมาณรังสีรวมที่ประชาชนทั่วไปได้รับมีค่าประมาณ 2.4 mSv/y และประมาณ 50 % เป็นการได้รับรังสีเนื่องจากการหายใจเอาลูกหลานเรดอนและโทรอนเข้าสู่ร่างกาย (1.26 mSv/y)

จากการวิจัยนี้ได้ผลการประเมินอัตราการได้รับรังสีจากก๊าซเรดอน ณ พื้นที่ทำการตรวจวัดซึ่งทางคณะวิจัยได้ทำการตรวจวัดได้เพียง 9 เดือน พบว่า บริเวณห้องทำงานเป็นบริเวณที่ประเมินอัตราการได้รับรังสีจากก๊าซเรดอนสูงสุด คือ 3.16 mSv/9 months หรือประมาณ 4.22 mSv/y รองลงมา คือ บริเวณโรงเก็บแร่แทนทาลัมประเมินอัตราการได้รับรังสีจากก๊าซเรดอนเท่ากับ 1.31 mSv/9 months หรือประมาณ 1.76 mSv/y และบริเวณที่ประเมินอัตราการได้รับรังสีจากก๊าซเรดอนต่ำสุด คือ บริเวณโรงชักรัดตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 0.59 mSv/9 months หรือประมาณ 0.78 mSv/y จะเห็นได้ว่า อัตราการปริมาณรังสีที่ได้รับจากก๊าซเรดอนจากบริเวณห้องทำงานสูงกว่าโรงเก็บแร่แทนทาลัม และทั้งสองแห่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ประชาชนทั่วไปควรได้รับ เมื่อพิจารณาขนาดของฝุ่นจะพบว่า ในห้องทำงานมีขนาดเฉลี่ยของฝุ่นเล็กกว่าในโรงเก็บแทนทาลัม ดังนั้น จึงอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของบุคคลที่ทำงานอยู่ในบริเวณนั้น ๆ สูงกว่าบริเวณอื่น

## 8.2 ปัญหาและอุปสรรค

เนื่องจากการทดสอบเบื้องต้นของงานวิจัยนี้ ในขั้นตอนการทดสอบการวัดขนาดของฝุ่นละอองที่มีโทรอนเกาะติดอยู่นั้น จะต้องทำการทดสอบโดยใช้โทรอนแซมเบอร์ที่มีขนาดเล็ก ทำให้ไม่สามารถใช้เครื่อง ELPI ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจวัดอนุภาคฝุ่น ที่ต้องใช้อัตราการดูดอากาศสูง (30 L/min) ดังนั้นในการทดลองเบื้องต้นจึงต้องใช้เครื่อง SMPS ซึ่งมีอัตราการดูดอากาศต่ำ (3 L/min) มาตรวจวัดขนาดอนุภาคฝุ่นที่ทำการผลิตขึ้นด้วยเครื่องผลิตอนุภาคฝุ่น โดยเครื่อง SMPS จะสามารถตรวจวัดขนาดอนุภาคฝุ่นได้ในช่วง 0.01–0.6 ไมโครเมตรเท่านั้น จึงทำให้การทดสอบเบื้องต้นสามารถทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่มีโทรอนเกาะติดอยู่ได้ในช่วงดังกล่าวเท่านั้น

## 8.3 ข้อเสนอแนะ

8.3.1. เนื่องด้วยระบบเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อคัดแยกขนาดที่ออกแบบนั้น สามารถคัดแยกขนาดอนุภาคของฝุ่นในช่วง 1-10 ไมโครเมตรเท่านั้น และจากการเข้าสำรวจในพื้นที่จริง พบว่าในพื้นที่ส่วนใหญ่ภายในโรงงาน ตัวอย่างฝุ่นส่วนใหญ่ที่ตรวจพบมีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร ดังนั้นเพื่อให้การคัดแยกฝุ่นมีความละเอียดมากขึ้น จึงควรเพิ่มขนาดของการเก็บตัวอย่างในช่วง 0.5-0.1 ไมโครเมตร เพื่อให้การวิเคราะห์ขนาดฝุ่นมีความถูกต้องมากขึ้น

8.3.2. เนื่องด้วยในแต่ละพื้นที่มีปริมาณฝุ่นละอองรังสีมากน้อยแตกต่างกันไป ดังนั้นเพื่อให้ระบบเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองรังสีเพื่อคัดแยกขนาดสามารถเก็บตัวอย่างให้ได้เพียงพอต่อการตรวจวัดในแต่ละพื้นที่ภายในระยะเวลาไม่นานนัก ระบบเก็บตัวอย่างจึงควรเก็บตัวอย่างที่อัตราการไหลของอากาศสูงกว่า 4 L/min. เพื่อให้ชดเชยจำกัดในการเก็บตัวอย่างต่ำสุด

8.3.3. ระบบวัดรังสีแอลฟาที่ใช้เป็นระบบวัดรังสีรวม ดังนั้นการตรวจวัดเพื่อวิเคราะห์ปริมาณลูกหลานเรดอนและโทรอน จึงจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการสลายตัวของลูกหลานเรดอนเป็นตัวกำหนด เนื่องจากลูกหลานเรดอนมีค่าครึ่งชีวิตสั้น ซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมงจึงจะสลายตัวหมด หลังจากนั้นจึงจะทำการตรวจวัดลูกหลานโทรอนซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตยาวกว่า ซึ่งต้องใช้เวลานานในการตรวจวัดแต่ละตัวอย่างในแต่ละครั้ง ดังนั้นเพื่อความสะดวกรวดเร็วในการตรวจวัด จึงควรใช้ระบบวัดรังสีแบบแอลฟาสเปกโตรเมตรี เพราะสามารถตรวจวัดลูกหลานเรดอนและโทรอนได้พร้อมกัน เพราะระบบสามารถแยกแยะพลังของลูกหลานเรดอนและโทรอนได้

8.3.4. วิธีการประเมินปริมาณรังสีที่ได้รับจากลูกหลานเรดอนและโทรอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นแบบ dosimetric approach ซึ่งจะใช้โปรแกรม Human respiratory tract model ในการคำนวณอัตราปริมาณรังสีที่ได้รับ ซึ่งโปรแกรมการคำนวณนี้มีหลายปัจจัยที่สำคัญต่อการคำนวณ โดยที่ขนาดของลูกหลานเรดอนและโทรอนเป็นเพียงปัจจัยหลักที่สำคัญเพียงอย่างหนึ่งเท่านั้น ส่วนปัจจัยในการคำนวณอื่น ๆ นั้น ทางคณะผู้วิจัย ได้

ใช้ค่าที่แนะนำจาก International Commission on Radiological Protection Publication และจากการศึกษาจากนักวิจัยต่างประเทศที่มีการตีพิมพ์และใช้กันอย่างกว้างขวางเป็นหลัก เช่นค่า equal weighting for the bronchial and pulmonary regions, The lung-to-blood absorption rate และขนาดของ unattached fraction เป็นต้น แต่สำหรับในประเทศไทยนั้นยังไม่มีการศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ ดังนั้นเพื่อความถูกต้องและเหมาะสมในการคำนวณปริมาณรังสีที่ได้รับสำหรับประเทศไทยแล้ว ปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณนั้นควรมีการศึกษา หรือทำการตรวจวัดให้ละเอียด เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ต่อไป

---

## ภาคผนวก ก

---

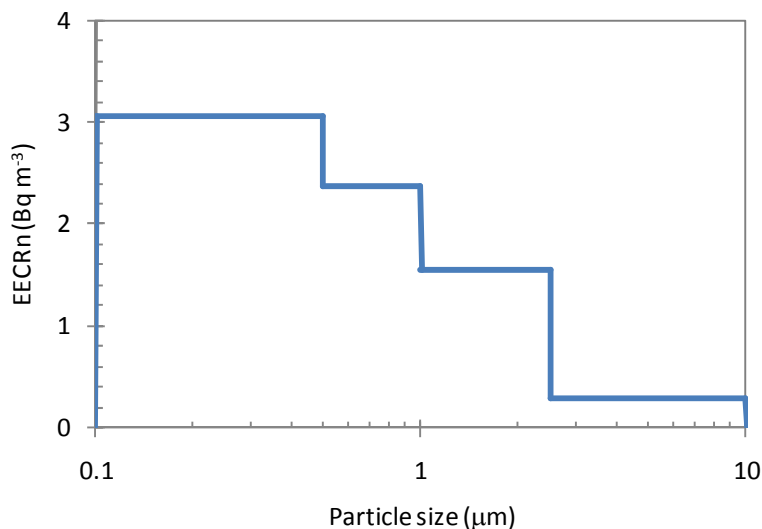
## ภาคผนวก ก

### ตัวอย่างการคำนวณค่าการกระจายตัวของธาตุลูกหลานเรดอน

HSE office จากการตรวจวัดครั้งที่ 1

#### การหาค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของธาตุลูกหลานเรดอน

The Log-Normal Distribution เป็นที่นิยมกันมากในการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค และสามารถใช้ได้กับอนุภาคที่มีการกระจายตัวที่กว้างมาก โดยทำการสร้างกราฟระหว่างขนาดของอนุภาค และ ความถี่ของอนุภาคนั้น ๆ (ในที่นี้ความถี่ของอนุภาค คือความเข้มข้นของธาตุลูกหลานเรดอน ในหน่วย  $Bq\ m^{-3}$  ซึ่งค่าที่ได้นี้ได้จากการตรวจวัดในพื้นที่ แล้วนำไปคำนวณด้วย worksheet ที่เตรียมไว้สำหรับการคำนวณ (ตัวอย่าง worksheet ที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ข)) ซึ่งตัวอย่างของ Log-Normal Distribution ที่ได้จากการตรวจวัดในพื้นที่ HSE office ดังรูปที่ 1



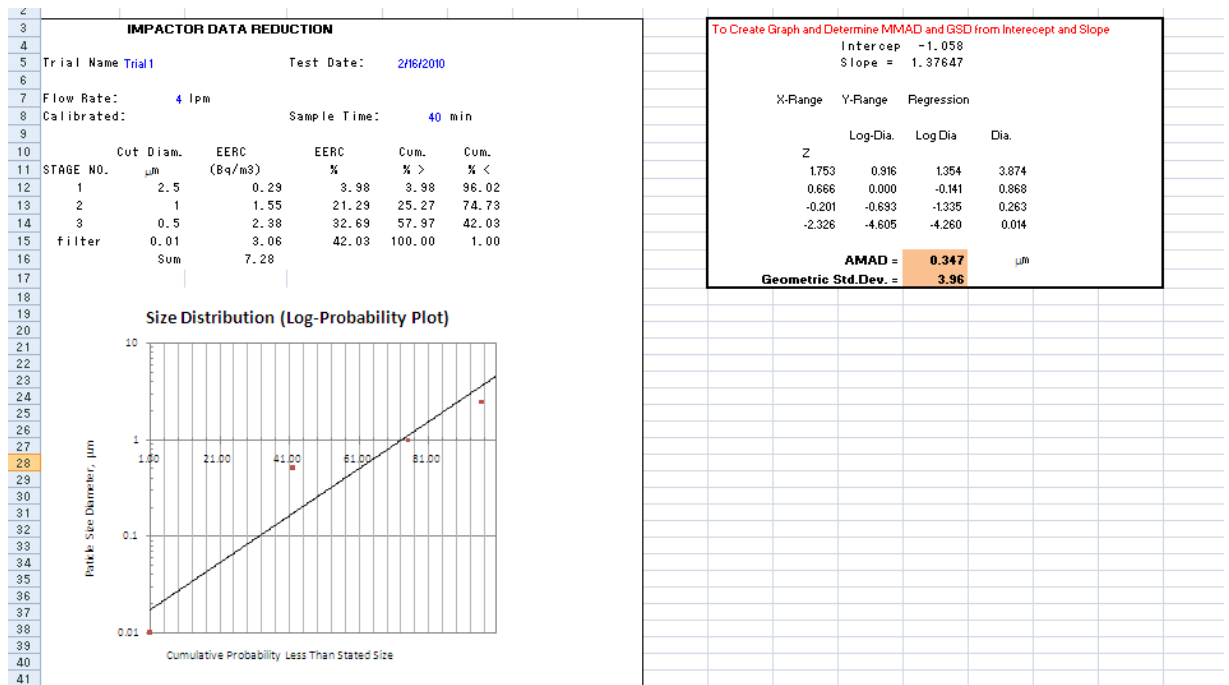
รูปที่ ก-1 แสดงการสร้างกราฟแบบ Log-Normal Distribution

การกระจายตัวของอนุภาคสามารถดูได้จากการโน้มเอียงจากจุดกึ่งกลางและความกว้างของฐานของกราฟที่ได้ การวัดความโน้มเอียงจากจุดกึ่งกลางสามารถวัดได้โดย การหาค่ากลาง หรือในที่นี้จะเรียกว่าค่า activity median aerodynamic diameter (AMAD) คือค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่จุดแบ่งพื้นที่การกระจายตัวออกเป็น 2 ส่วนเท่ากัน

เนื่องจากต้องมีการใช้ระบบทางคณิตศาสตร์มาหาค่าเฉลี่ย จึงได้มีการใช้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\sigma$  (Geometric Standard Deviation) ซึ่งเป็นค่า Root-Mean-Square เกี่ยวกับค่าเฉลี่ยค่ากลางเรขาคณิตของ



ขนาดของอนุภาคของธาตุลูกหลานเรดอน หรือ AMAD และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\sigma_g$  เป็นตัวแทนจากประชากรทั้งหมด ซึ่งสามารถนำมาอธิบายลักษณะรวมของประชากรได้ ซึ่งค่าทั้งสองสามารถหาจากการสร้างกราฟความถี่สะสม (cumulative frequency distribution) บนกราฟ Log จะได้กราฟเส้นตรง โดยค่า AMAD จะเป็นค่าของขนาดที่เปอร์เซ็นต์การสะสมที่ 50% และ  $\sigma_g$  เป็นสัดส่วนของขนาดอนุภาคที่เปอร์เซ็นต์การสะสมที่ 84.1% ต่อ 50% และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณทางคณะผู้วิจัยจึงได้ใช้โปรแกรม excel ช่วยในการสร้างกราฟและคำนวณหาค่า AMAD และ  $\sigma_g$  โดยการคำนวณจุดตัดกราฟ (intercept) และความชันของกราฟ (slope) รูปแบบ worksheet ที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ ก-2 แสดง worksheet ที่ใช้ในการคำนวณค่า AMAD และ  $\sigma_g$

---

## ภาคผนวก ข

---

## ภาคผนวก ข WORK SHEET

### Determination of radon/thoron progeny concentrations with Decay method

	Half life of radon/thoron progeny (min)	Decay constant of radon progeny (min <sup>-1</sup> )
<sup>218</sup> Po(RaA)	3.05	0.2273
<sup>214</sup> Pb(RaB)	26.8	0.0259
<sup>214</sup> Bi(RaC)	19.9	0.0348
<sup>216</sup> Po(ThA)	0.0025	277.2589
<sup>212</sup> Pb(ThB)	638.4	0.0011
<sup>212</sup> Bi(ThC)	60.55 min	0.0114

ตัวอย่างการคำนวณสำหรับ impactor stage 3 ที่ cut off diameter 0.5  $\mu\text{m}$

Geometric eff. = 0.33

#### Actual Timetable

Sampling period( $T_s$ )= 40	(min)
1st waiting period( $T_w$ )= 1.33	(min)
1st measurement period( $T_m$ )= 5	(min)
2nd waiting period( $T_w$ )= 5	(min)
2nd measurement period( $T_m$ )= 10	(min)
3rd waiting period( $T_w$ )= 10	(min)
3rd measurement period( $T_m$ )= 10	(min)

Date: 16/2/2010  
 Time: 13:20  
 Place: HSE office

Flow rate(L/min)= 4.00

Counts	Gross counts
1st measurement period	33
2nd measurement period	71
3rd measurement period	70

RaA= **10.3319** ± **20.3217** Bq/m<sup>3</sup>  
 RaB= **5.8378** ± **1.4604** Bq/m<sup>3</sup>  
 RaC= **0.2345** ± **0.0237** Bq/m<sup>3</sup>  
 PAEC(Rn)= **22.2367** ± **12.4528** nJ/m<sup>3</sup>  
 EERC= **3.9994** ± **2.2397** Bq/m<sup>3</sup>

For radon progeny

Iaa(1)=	9.716262738		
Iac(1)=	7.201045386		
Ibc(1)=	71.42988596		
Icc(1)=	94.55281892		
Iaa(2)=	1.322571762		
Iac(2)=	17.63244969		
Ibc(2)=	159.2935013		
Icc(2)=	122.8173642		
Iaa(3)=	0.014042747		
Iac(3)=	16.76922781		
Ibc(3)=	141.6543792		
Icc(3)=	61.19515842	detA=	-63933.4
(1,1)=	16.91730812	new(1,1)=	0.11965
(1,2)=	71.42988596	new(1,2)=	-0.14113
(1,3)=	94.55281892	new(1,3)=	0.098365
(2,1)=	18.95502145	new(2,1)=	-0.0141
(2,2)=	159.2935013	new(2,2)=	0.008628
(2,3)=	122.8173642	new(2,3)=	0.004465
(3,1)=	16.78327056	new(3,1)=	-0.00018
(3,2)=	141.6543792	new(3,2)=	0.018732
(3,3)=	61.19515842	new(3,3)=	-0.02097
		Xa=	0.619914
		dXa=	1.219303
		Xb=	0.350269
		dXb=	0.087624
		Xc=	-0.10975
		dXc=	0.179726



การพัฒนากระบวนการวัดการกระจายขนาดเพื่อประเมินอัตราการใช้รังสีจากละอองฝุ่น  
ขนาดนาโนเมตรของลูกหลานเรดอนและทอรอนในอุตสาหกรรมแร่

รายงานฉบับสมบูรณ์

---

---

ภาคผนวก ก

---

---

ภาคผนวก ค

หนังสือแสดงความอนุเคราะห์อุปกรณ์การตรวจวัดจาก สถาบัน NIRS



**National Institute of Radiological Sciences**  
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555, JAPAN

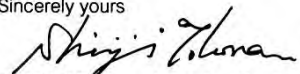
June 18, 2008

To Dean of the College of Engineering

The National Institution of Radiological Sciences, Japan, would like to donate some equipment of radon and thoron measurement system to the Nuclear Technology Department at Chulalongkorn University, Thailand, for supporting the project entitled "Development of Size Distribution System for Dose Assessment Based on Nanosize Radon and Thoron Progeny Aerosols in Mineral Industry". Please see in the attachment a list of items associated with radon and thoron measurement system and a list of their approximate values.

This donation is for educational purposes; therefore, the National Institution of Radiological Sciences is donating this equipment without any conditions.

Sincerely yours



Dr. Shinji Tokonami, Section Head  
Research Center for Radiation Protection,  
National Institute of Radiological Sciences,  
263-8555, Chiba, Japan.



National Institute of Radiological Sciences  
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555, JAPAN

### Donation Item:

Equipment	Approximate Value (JPY)
47 mm open filter holder (aluminum): Qty 1	50,000
25 mm open filter holder (plastic): Qty 1	20,000
25 mm open in-line filter holder (plastic): Qty 2	40,000
2 stages of 47 mm open filter holder (plastic): Qty 1	40,000
Mini air pump (flow rate 0.5-3 L/min) : Qty 1	110,000
Mini air pump (flow rate 0.1-1 L/min) : Qty 1	110,000
Zn(Ag) sheets (50 Discs)	60,000
400 mesh wire screen (10 Discs)	20,000
<b>Total amount</b>	<b>450,000</b>