บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

งานศึกษาวิจัยนี้มีลักษณะเป็นงานวิจัยเชิงทดลอง เพื่อที่จะได้ทราบถึงอัตราการปล่อยก๊าซเรดอน จากคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย และฟอสโฟยิปซัมในปริมาณต่าง ๆ แล้วนำผลที่ได้ไปใช้ในอาคารประเภทตึกแถว โดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics; CFD) เพื่อศึกษาถึงความเข้มข้น และการกระจายของก๊าซเรดอน ร่วมกับปัจจัยด้านการระบายอากาศ ตลอดจนปริมาณรังสีที่ผู้อยู่อาศัยในอาคารตึกแถวได้รับ ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จะนำไปใช้ในการกำหนดแนว ทางการออกแบบที่เหมาะสมในการลดปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคารต่อไป

3.1 แบบแผนการวิจัย

แบบแผนการวิจัยในครั้งนี้ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ หลายขั้นตอน ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับก๊าซเรดอนภายในอาคาร และผลกระทบของก๊าซเรดอนต่อมนุษย์ ทั้งในประเทศและต่างประเทศ

2. วัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนของก้อนคอนกรีตตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยและฟอสโฟยิปซัมในปริมาณต่าง ๆ กัน โดยคำนวณจากความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ตรวจวัดได้จากกล่องทดลองของแต่ละวัสดุ

3. สำรวจรูปแบบอาคารประเภทตึกแถวในประเทศไทย โดยศึกษาครอบคลุมถึงเรื่องการออกแบบ การก่อสร้าง การใช้พื้นที่ภายในของผู้พักอาศัย วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง การระบายอากาศ ตลอดจนวิเคราะห์ปัจจัยที่อาจส่งผลต่อปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคาร เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการทดลอง

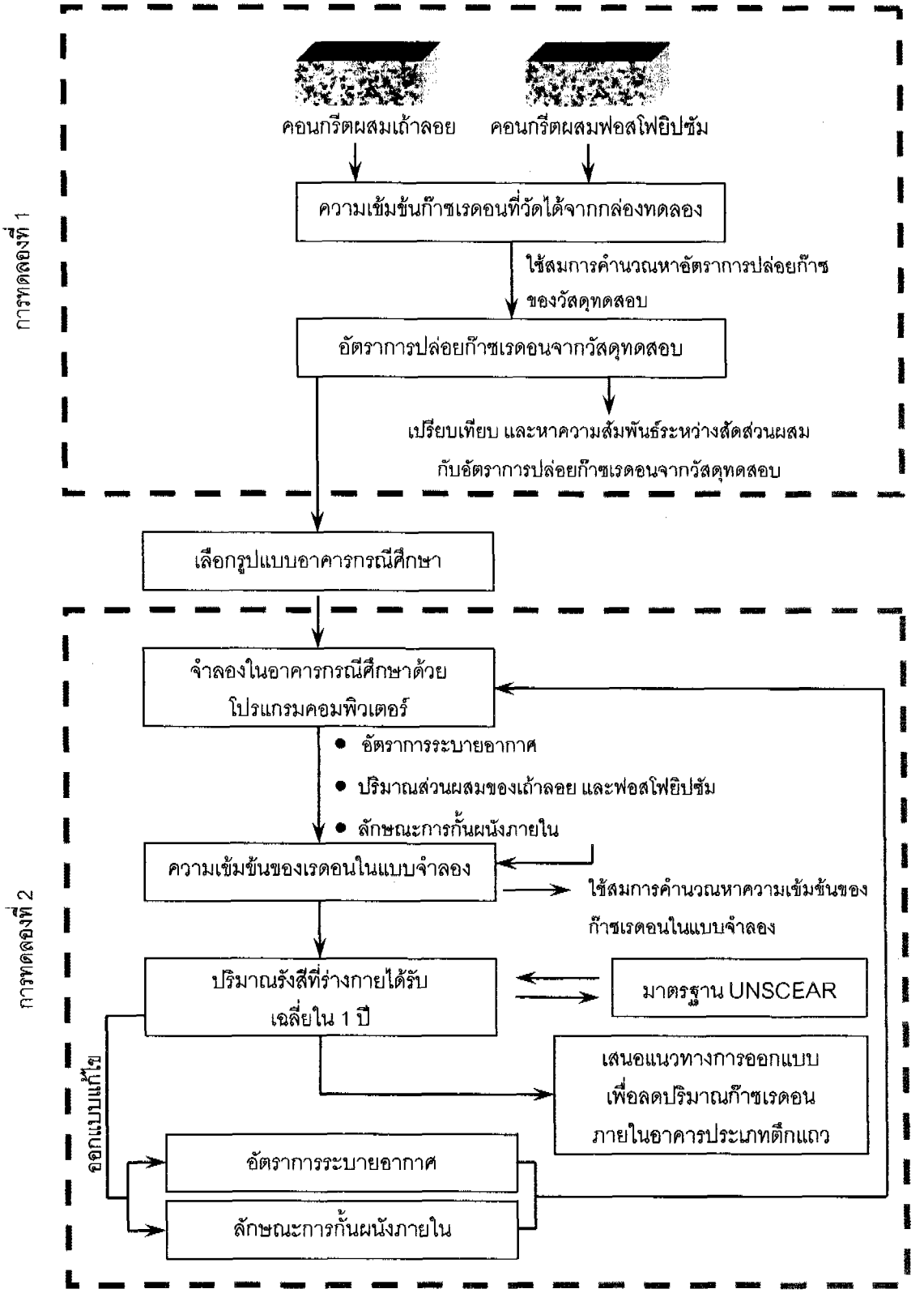
4. นำค่าอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนที่คำนวณได้จากวัสดุทดสอบ มาใช้ในการจำลองการปล่อยก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล เพื่อดูความเข้มข้นเฉลี่ย ตลอดจนลักษณะการแพร่กระจายของก๊าซภายในอาคารในกรณีศึกษาต่าง ๆ

5. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการจำลองการปล่อยก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว โดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล เปรียบเทียบกันในกรณีศึกษาต่าง ๆ รวมทั้งประเมินความเสี่ยงจากการคำนวณปริมาณรังสีที่ผู้อยู่อาศัยจะได้รับในระยะเวลา 1 ปี

6. สรุปผลการทดลอง และเสนอแนะแนวทางการลดปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถวที่ใช้วัสดุก่อสร้างซึ่งมีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์ และฟอสโฟยิปซัม

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการวิจัยได้ดังภาพที่ 3.1

ภาพที่ 3.1
ขั้นตอนการวิจัย



3.2 รูปแบบการทดลอง

การวิจัยนี้แบ่งรูปการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ การวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบ และการจำลองผลในอาคารกรณีศึกษา ซึ่งในที่นี้คือ อาคารประเภทตึกแถว โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 การทดลองที่ 1: การวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบ

การทดลองที่ 1 เป็นการเพื่อวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบ ซึ่งก็คือก้อนคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย และฟอสโฟยิปซัมในปริมาณต่าง ๆ กัน โดยตั้งวัสดุทดสอบไว้ในกล่องทดลองที่ปิดสนิท โดยไม่มีการรั่วซึมของอากาศจากภายนอก (hermetically chamber) จนเข้าสู่สมดุลทางกัมมันตรังสี[1] ซึ่งสำหรับก๊าซเรดอนจะใช้ระยะเวลาประมาณ 7 เท่าของครึ่งชีวิต หรือประมาณ 27 วัน จากนั้น จึงวัดความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในกล่องทดลองแต่ละกล่องด้วยเครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอน ATMOS 12 dpx (the pulse counting ionization chamber ATMOS 12 dpx) โดยค่าที่วัดได้จะเป็นค่าความเข้มข้นก๊าซเรดอน (Radon concentration) ซึ่งสามารถคำนวณเป็นอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุได้ตามสมการที่ 2.10

1. ตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปรที่สำคัญสำหรับการทดลองที่ 1 สามารถจำแนกได้ดังนี้

1) ตัวแปรต้น

ตัวแปรต้น ที่สนใจศึกษาในการทดลองนี้คือ ปริมาณการผสมของเถ้าลอยและฟอสโฟยิปซัม เป็นร้อยละโดยน้ำหนัก โดยจากการสำรวจพบว่า ในปัจจุบันมีการนำเถ้าลอยและฟอสโฟยิปซัมมาใช้ผสมคอนกรีตในปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 – 35 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นไปตามที่กำหนดโดยมาตรฐาน ASTM (The American Society for Testing and Materials) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าลอย หรือฟอสโฟยิปซัมด้วย ถ้ายิ่งละเอียดมากก็สามารถนำไปผสมได้มากขึ้น และพบว่าในโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนกั้นน้ำ อาจใช้เถ้าลอยผสมได้ถึงร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ดังนั้น เพื่อให้ครอบคลุมการใช้งานในสภาพจริง และเพื่อสามารถดูถึงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยก๊าซเรดอน กับปริมาณการผสมเถ้าลอย และฟอสโฟยิปซัม

---

[1] ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก หน้า 169.

ที่เพิ่มขึ้น จึงกำหนดปริมาณการผสมเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก ได้แก่ 20 30 40 50 60 และ 100 เทียบกับก้อนคอนกรีตที่ไม่มีการใช้เถ้าลอย หรือฟอสโฟยิปซัมเป็นส่วนผสม

2) ตัวแปรตาม

ตัวแปรตาม หรือผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวแปรต้นของการทดลองนี้ ได้แก่ อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากก้อนคอนกรีตทดสอบ โดยสามารถคำนวณได้จากความเข้มข้นก๊าซเรดอนที่วัดได้ภายในกล่องทดลอง

3) ตัวแปรควบคุม

จากการศึกษาผลงานวิจัย และทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่ออัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุ ซึ่งจัดเป็นตัวแปรที่จะต้องควบคุม โดยสามารถแบ่งได้ดังนี้

(1) ปัจจัยจากภายนอก หรือปัจจัยจากสภาวะแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และความดันอากาศ

(2) ปัจจัยจากภายใน หรือปัจจัยจากตัววัสดุทดสอบ ได้แก่ ขนาด ปริมาตร พื้นผิว และความพรุนของวัสดุทดสอบ ซึ่งในส่วนของความพรุนนี้ไม่สามารถควบคุมได้เนื่องจากข้อจำกัดของวิธี การผสมคอนกรีต แต่สามารถวัดได้ภายหลังจากวัดก๊าซเรดอนเรียบร้อยแล้ว โดยวิธีการแทนที่น้ำ (ดูราย ละเอียดในหัวข้อ 2.2.2)

2. <u>วัสดุทดสอบ</u>

วัสดุทดสอบที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ก้อนคอนกรีตผสมเถ้าลอยและฟอสโฟยิปซัม ในปริมาณต่าง ๆ กัน โดยลักษณะของก้อนคอนกรีตจะหล่อเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 20 × 20 เซนติเมตร ลึก 5 เซนติเมตร (ภาพที่ 3.2) สำหรับส่วนผสมที่ใช้ในก้อนคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

- ส่วนผสมที่มีปริมาณคงที่ ได้แก่ กรวด และทราย เนื่องจากในวัสดุเหล่านี้จะมีเรเดียมเจือปนอยู่ด้วย หากไม่ควบคุมอาจมีผลต่อความเข้มข้นที่วัดได้
- ส่วนผสมที่มีปริมาณไม่คงที่ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และฟอสโฟยิปซัม ซึ่งเป็นตัวแปรต้นที่ใช้ในการทดลอง

โดยเถ้าลอย จะใช้เถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ฟอสโฟยิปซัมใช้ฟอสโฟยิปซัมจากบริษัทปุ๋ยแห่งชาติ ส่วนปูนซีเมนต์ กรวด และทราย ใช้ที่มีจำหน่ายอยู่ตาม

ท้องตลาดทั่วไป โดยการคำนวณส่วนผสมนั้น ใช้ตามวิธีที่แนะนำโดยสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (สมนึก ตั้งเติมสิริกุล, 2542) ได้เป็นปริมาณส่วนผสมดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1

ปริมาณส่วนผสมของก้อนคอนกรีตทดสอบ

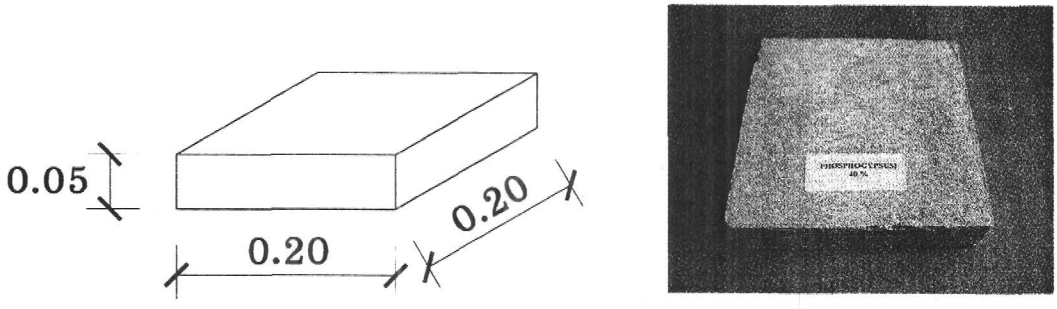
ลำดับ	สัญลักษณ์	เถ้าลอย / ฟอสโฟยิปซัม (กิโลกรัม)	คอนกรีต (กิโลกรัม)	หิน (กิโลกรัม)	ทราย (กิโลกรัม)
1	FA 20%	0.141	0.567	1.764	1.800
2	FA 30%	0.212	0.496	1.764	1.800
3	FA 40%	0.283	0.425	1.764	1.800
4	FA 50%	0.354	0.354	1.764	1.800
5	FA 60%	0.425	0.283	1.764	1.800
6	FA 100%	0.709	0.000	1.764	1.800
7	PG 20%	0.141	0.567	1.764	1.800
8	PG 30%	0.212	0.496	1.764	1.800
9	PG 40%	0.283	0.425	1.764	1.800
10	PG 50%	0.354	0.354	1.764	1.800
11	PG 60%	0.425	0.283	1.764	1.800
12	PG 100%	0.709	0.000	1.764	1.800
13	Cement 100%	0.000	0.709	1.764	1.800

หมายเหตุ : FA หมายถึง เถ้าลอย (fly ash)

PG หมายถึง ฟอสโฟยิปซัม (phosphogypsum)

ภาพที่ 3.2

ลักษณะของก้อนคอนกรีตทดสอบ



หมายเหตุ: จากการออกแบบวิจัย, 2549.

3. <u>กล่องทดลอง</u>

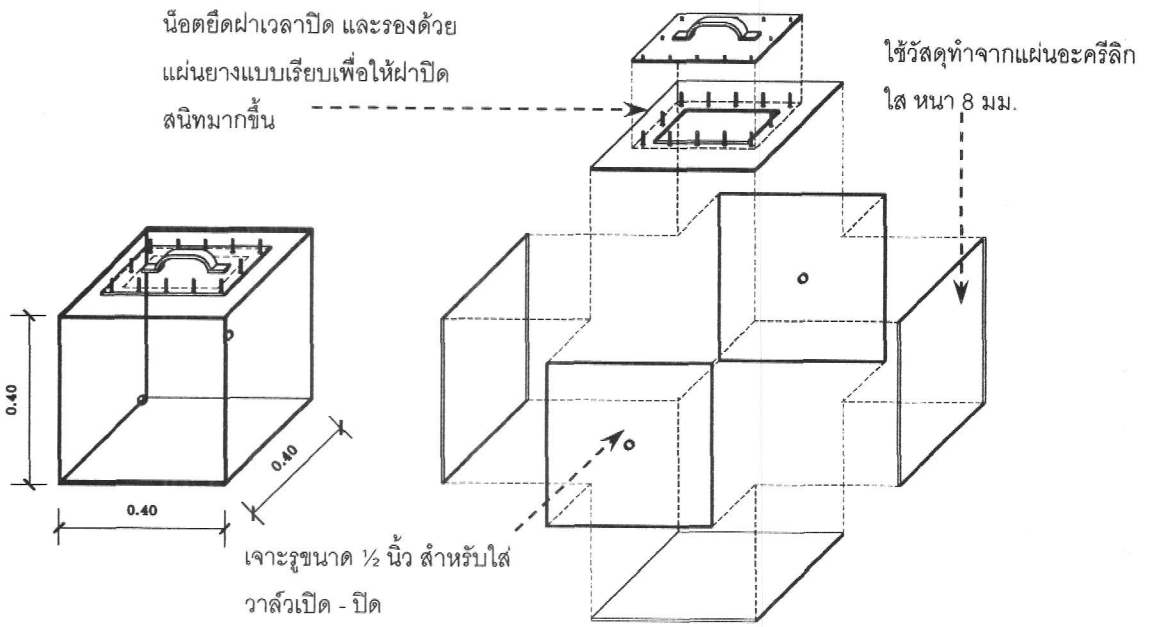
ลักษณะของกล่องทดลองที่ไว้ใส่วัสดุทดสอบในการทดลอง จะต้องมีลักษณะดังต่อไปนี้

1) เป็นภาชนะปิดสนิทไม่มีการรั่วซึมจากอากาศ (hermetically closed space)
2) ทำจากวัสดุที่ไม่มีการปล่อยก๊าซเรดอน หรือมีแร่เรเดียมเจือปนอยู่
3) มีขนาดใหญ่กว่าวัสดุไม่น้อยกว่า 10 เท่า เพื่อลดการเกิดปรากฏการณ์การแพร่ย้อนกลับ (back diffusion) (Petropoulos, 2001)
4) มีวาล์วเปิด-ปิด เพื่อสามารถดูดเอาก๊าซเรดอนภายในออกมาได้
5) สามารถทนแรงดันได้ไม่น้อยกว่า 2.5 นิ้ว-ปรอท

จากข้อกำหนดข้างต้น สามารถออกแบบกล่องทดลองได้ โดยทำจากแผ่นอะคริลิกใส หนา 8 มิลลิเมตร ยาแนวทั้งหมดด้วยกาวซิลิโคนทั้งภายนอกและภายใน ขนาดวัดจากภายนอกมีขนาดเท่ากับ 40 × 40 × 40 เซนติเมตร มีปริมาตรภายใน 0.0589 ลูกบาศก์เมตร มีฝาเปิด-ปิดจากด้านบน สำหรับใส่วัสดุทดสอบ และมีวาล์วเปิด-ปิด 2 ข้าง สำหรับดูดอากาศออก ดังภาพที่ 3.3 และภาพที่ 3.4

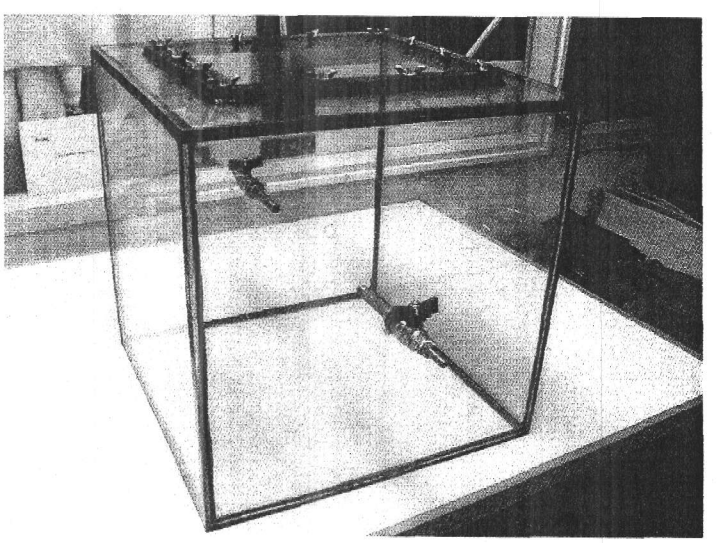
ภาพที่ 3.3

รายละเอียดของกล่องทดลอง



ภาพที่ 3.4

กล่องทดลอง และวาล์วเปิด – ปิด

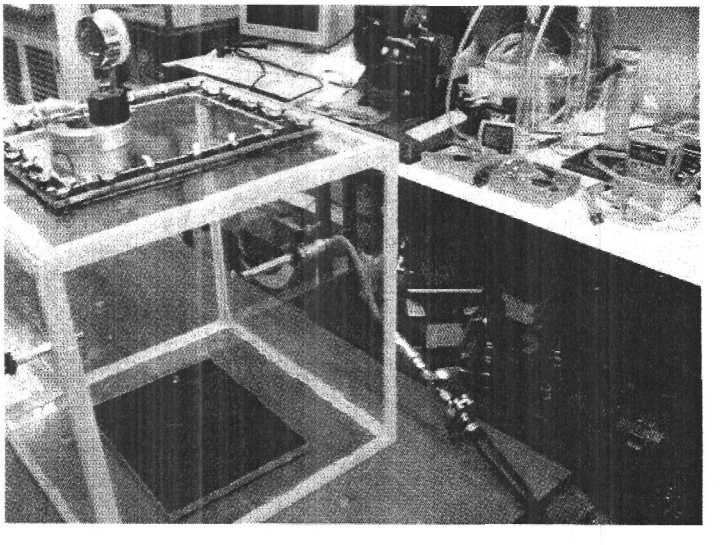


หมายเหตุ: จากการออกแบบวิจัย, 2549.

วาล์วที่เปิด-ปิดของกล่องทดลอง จะใช้สำหรับดูดอากาศออกก่อนการทดลองเพื่อทดสอบการรั่วซึม และดูดอากาศออกหลังการทดลองเพื่อวัดปริมาณก๊าซเรดอน โดยจะถูกติดตั้งไว้ทั้งสองด้านของกล่องทดลอง ด้านหนึ่งใช้เป็นช่องลมเข้า อีกช่องหนึ่งใช้เป็นช่องลมออก นอกจากนี้ วาล์วทั้งหมดจะต้องผ่านการทดสอบการรั่วซึมของอากาศก่อนนำไปติดที่กล่องทดลอง และเมื่อติดที่กล่องทดลองแล้ว กล่องทดลองทุกใบก็จะต้องผ่านการทดสอบเช่นเดียวกัน หากกล่องใดยังพบการรั่วซึมของอากาศต้องดำเนินการแก้ไขจนกว่าจะไม่มีการรั่วซึมของอากาศ

การทดสอบการรั่วซึมของอากาศจากกล่องทดลอง สามารถกระทำได้ โดยนำท่อจากเครื่องดูดอากาศต่อเข้าไปยังวาล์วด้านหนึ่งของกล่องทดลอง ส่วนอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน โดยเปิดวาล์วทั้งสองด้านทิ้งไว้ แล้วจึงเปิดเครื่องดูดอากาศโดยปรับอัตราการดูดอากาศออกทีละน้อย เพื่อเป็นการลดแรงกระทำที่กล่องจากแรงดันภายนอก จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มขึ้นทีละน้อย สังเกตที่เข็มชี้วัดความดัน รอจนเข็มชี้ที่ประมาณ 2.5 นิ้ว-ปรอท จึงปิดเครื่องดูดอากาศ แล้วสังเกตที่เข็มชี้วัดความดัน หากเข็มยังคงค้างอยู่ที่ขีดเดิม แสดงว่ากล่องไม่มีการรั่วซึมของอากาศภายนอก สามารถนำไปทำการทดลองได้ แต่ถ้าเข็มเริ่มตกลงไปยังขีดเริ่มต้น แสดงว่ามีอากาศรั่วซึมจากภายนอก ต้องดำเนินการแก้ไขต่อไป

ภาพที่ 3.5
การทดสอบการรั่วซึมของอากาศจากกล่องทดลอง



หมายเหตุ: บันทึกภาพที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2549.

4. การตั้งกล่องทดลอง

หลังจากที่ทดสอบกล่องทดลองจนมั่นใจได้ว่าไม่มีอากาศรั่วซึมจากภายนอกแล้ว จึงนำก้อนคอนกรีตที่เตรียมไว้ใส่ลงไปภายในกล่อง ปิดฝาให้แน่นแล้วอุดรอยต่อรอบ ๆ ฝาปิดด้วยกาวซิลิโคนอีกชั้นหนึ่ง จากนั้นจึงทำการฟอกอากาศที่อยู่ภายในกล่องเพื่อให้มีปริมาณเรดอนพื้นหลังและความชื้นอยู่น้อยที่สุด โดยมีกระบวนการดังต่อไปนี้

1) ดูดอากาศภายในออกโดยผ่านเครื่องปั๊มอากาศ ซึ่งต่อเข้ากับวาล์วด้านหนึ่งของกล่องทดลอง

2) เครื่องปั๊มอากาศจะต่อเข้ากับวาล์วอีกชุดหนึ่ง เพื่อกำหนดอัตราการไหลเวียนของอากาศ ซึ่งในที่นี้กำหนดให้มีอัตราการไหลเวียนเท่ากับ 2.5 ลิตรต่อนาที

3) หลังจากอากาศภายในกล่องถูกดูดออกมาผ่านเครื่องปั๊มอากาศมาแล้ว จะถูกลดความชื้น โดยให้ไหลผ่านเข้าสู่ผงแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะปิด

4) เมื่ออากาศผ่านกระบวนการลดความชื้นแล้ว ก็จะเข้าสู่การลดปริมาณเรดอนที่อาจมีปะปนอยู่ โดยการให้ไหลผ่านผงถ่านกัมมันต์ (activated charcoal) ที่บรรจุอยู่ในภาชนะปิด เมื่อก๊าซเรดอนผ่านเข้ามาก็จะถูกดูดซับไว้โดยผงถ่านกัมมันต์นี้

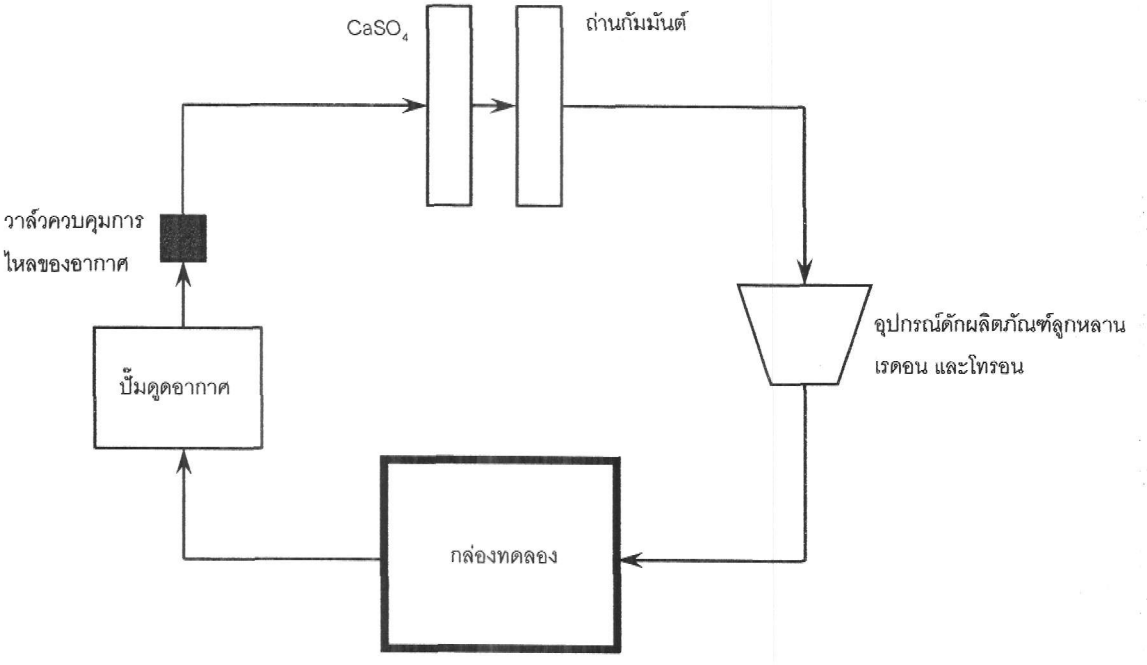
5) ถึงแม้ว่าอากาศจะผ่านการกรองเรดอนแล้ว แต่ก็อาจมีผลิตภัณฑ์ลูกหลานของเรดอนหลงเหลือปะปนอยู่ ดังนั้น จึงต้องทำการกรองผลิตภัณฑ์ลูกหลาน โดยให้อากาศผ่านเข้าสู่อุปกรณ์ดักผลิตภัณฑ์ลูกหลานก๊าซเรดอน และโทรอน

6) หลังจากที่ผ่านกระบวนการที่กล่าวมา อากาศในขณะนี้สามารถประมาณได้ว่ามีความชื้น เรดอน และผลิตภัณฑ์ลูกหลาน ปะปนอยู่ไม่ถึง 10 % ถือว่าเป็นอากาศที่บริสุทธิ์แล้ว จึงปล่อยอากาศให้ไหลเข้าสู่กล่องทดลองได้ โดยผ่านวาล์วอีกด้านหนึ่งของกล่อง

กระบวนการทั้งหมดที่กล่าวมาจะวนต่อเนื่องกันเป็นวงจร (ภาพที่ 3.6) ซึ่งถ้าให้อากาศภายในกล่องทดลองทั้งหมดผ่านกระบวนการนี้ จะต้องใช้ระยะเวลาในการไหลเวียนทั้งหมดเป็นเวลาประมาณ 20 นาที เมื่อครบเวลาแล้วจึงปิดวาล์วทั้ง 2 ข้าง

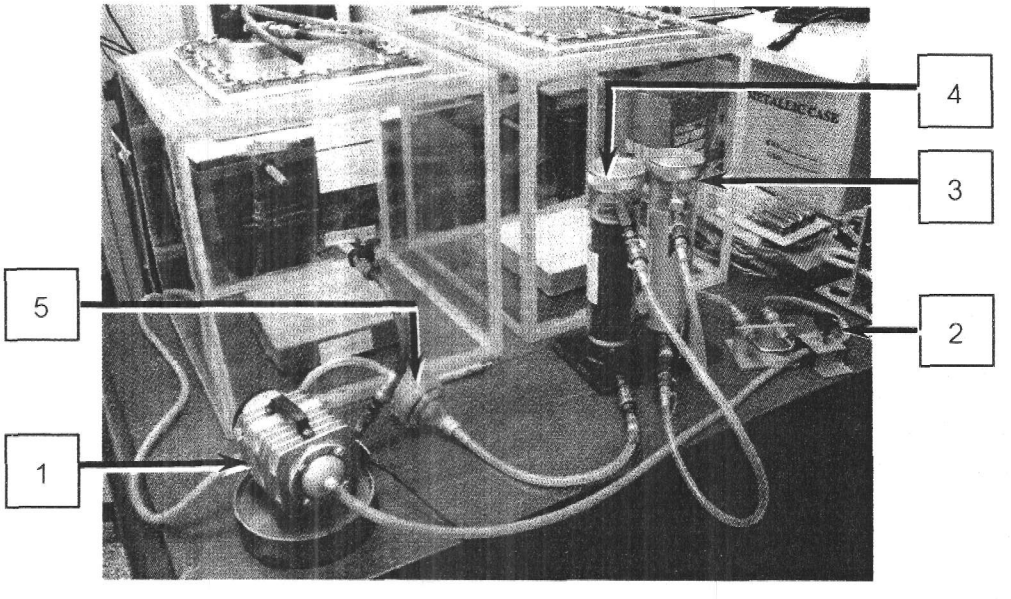
ภาพที่ 3.6

กระบวนการทำให้อากาศภายในกล่องทดลองบริสุทธิ์ก่อนการทดลอง



ภาพที่ 3.7

การไหลเวียนอากาศเพื่อให้บริสุทธิ์ก่อนการทดลอง



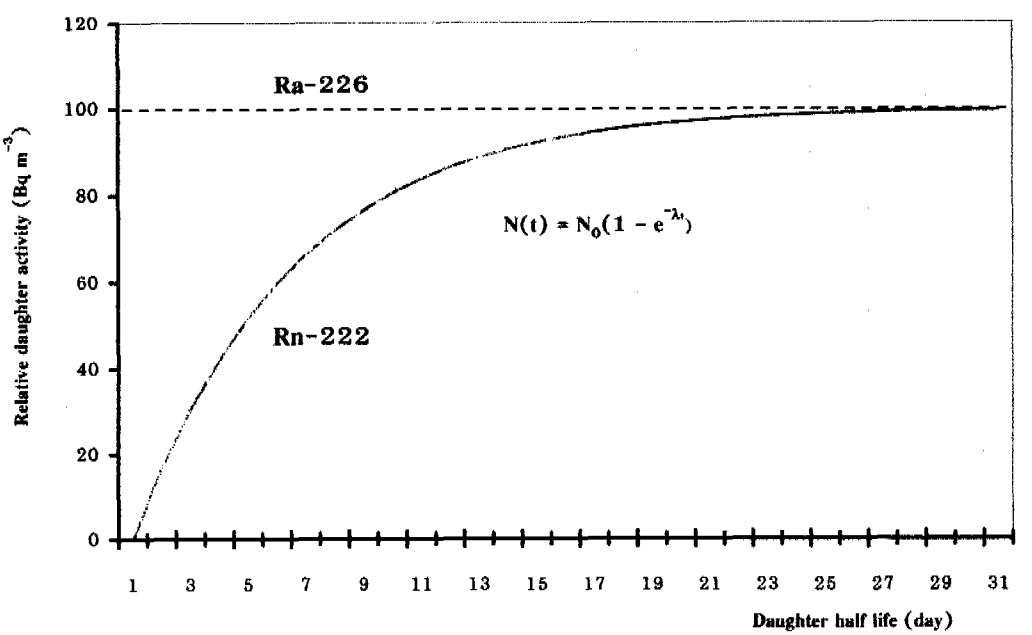
หมายเหตุ: บันทึกภาพที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2549.

1. เครื่องปั๊มอากาศ
2. วาล์วควบคุมอัตราการไหลเวียนอากาศ
3. ผงแคลเซียมซัลเฟต ใช้ลดความชื้น
4. ผงถ่านกัมมันต์ ใช้ดูดซับเรดอน
5. อุปกรณ์ดักจับผลิตภัณฑ์ลูกหลานของเรดอน และโทรอน

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการดังกล่าวข้างต้นแล้ว จึงนำกล่องทดลองที่ใส่วัสดุทดสอบไว้ทั้งหมด 13 กล่อง (ตารางที่ 3.1) รวมกับกล่องทดลองที่ว่างเปล่าอีก 1 ใบ เอาไว้เพื่อวัดความเข้มข้นของเรดอนพื้นหลัง ไปตั้งไว้ในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ (N.P. Petropoulos) เรเดียมที่อยู่ภายในวัสดุจะสลายตัวให้ก๊าซเรดอนออกมา จนกระทั่งเกิดภาวะสมดุลถาวร (secular equilibrium) ขึ้น ซึ่งใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 27 วัน ดังภาพที่ 3.8

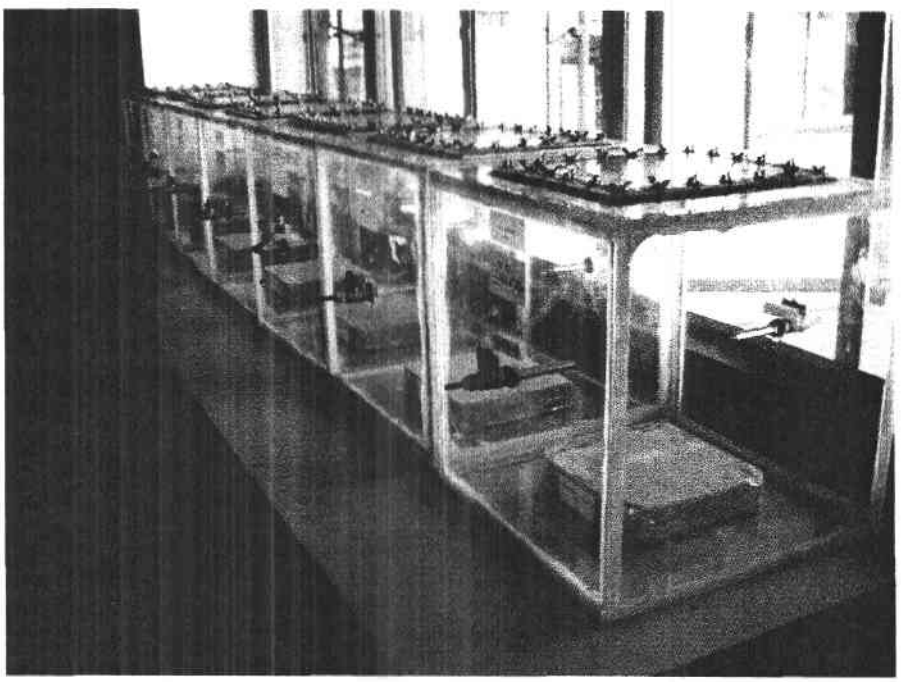
ภาพที่ 3.8

การเกิดภาวะสมดุลแบบถาวรของเรเดียมกับเรดอน



หมายเหตุ: จากการออกแบบวิจัย, 2548.

ภาพที่ 3.9
การตั้งกล่องทดลอง



หมายเหตุ: บันทึกภาพที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2549.

3.2.2 <u>การทดลองที่ 2 : การจำลองผลในอาคารกรณีศึกษาประเภทตึกแถว</u>

การทดลองในขั้นตอนนี้ เป็นการนำผลที่ได้จากการทดลองที่ 1 มาใช้จำลองในอาคารประเภทตึกแถว เพื่อดูถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง ซึ่งถึงแม้ว่าผลการศึกษาหลายชิ้น จะเสนอสมการที่สามารถคำนวณหาระดับก๊าซเรดอนภายในห้องปิดได้ แต่ในสภาพความเป็นจริงแล้ว ภายในอาคารหนึ่ง ๆ ย่อมมีการไหลเวียนของอากาศตลอดเวลาไม่มากก็น้อย ทำให้เกิดการพา (convection) อนุภาคก๊าซเรดอน ซึ่งมีผลต่อการกระจายตัวของก๊าซภายในอาคารมากกว่าที่เกิดจากการแพร่ (diffusion) (Kato, 1997) โดยที่สมการทั่วไปไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบเหล่านี้ มากไปกว่านั้น การคำนวณแต่เพียงอย่างเดียวไม่สามารถที่จะแสดงภาพให้เห็นได้ว่า การกระจายตัว หรือการสะสมของก๊าซเรดอนจะเกิดขึ้นในลักษณะเช่นไร เพียงแต่สามารถบอกระดับความเข้มข้นเฉลี่ยได้เท่านั้น

ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น การกระจายตัวของก๊าซเรดอน หรือก๊าซกัมมันตรังสีอื่นใดก็ตาม เกิดขึ้นด้วยกลไกทางฟิสิกส์ที่ซับซ้อน นอกเหนือจากกระบวนการสลายตัวจากแหล่งกำเนิดแล้ว ลักษณะการกระจายของก๊าซ ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลของอากาศ อัตราการระบายอากาศ ตำแหน่งของช่องลม ฯลฯ ด้วยเหตุนี้ จึงได้ใช้การจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) มาช่วยในการศึกษาลักษณะการกระจายของก๊าซเรดอนภายในอาคาร ตลอดจนแสดงค่าระดับเรดอนเฉลี่ยภายในอาคาร ควบคู่ไปกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์

1. <u>ตัวแปรในการทดลอง</u>

ตัวแปรที่สำคัญสำหรับการทดลองที่ 2 สามารถจำแนกได้ดังนี้

1) ตัวแปรต้น

ตัวแปรต้น ที่ศึกษาในการทดลองที่ 2 นี้ ได้แก่

(1) อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบ ซึ่งได้มาจากผลการทดลองในขั้นตอนที่ 1 โดยคัดเลือกมาใช้ในการจำลองทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ได้แก่ cement 100 % FA 50 % และ PG 50 %

(2) อัตราการระบายอากาศ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการลดระดับก๊าซเรดอนภายในอาคาร โดยมีรายละเอียดดังนี้

(2.1) 0.35 ต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้ภายในที่อยู่อาศัย

(2.2) 0.70 ต่อชั่วโมง เมื่อติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาด 60 CFM

(2.3) 1.05 ต่อชั่วโมง เมื่อติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาด 90 CFM

(3) การกั้นผนังภายใน (interior partition) เพื่อศึกษาถึงผลจากการกั้นผนังภายในของผู้อยู่อาศัยต่อปริมาณ และการกระจายตัวของก๊าซเรดอนที่ปล่อยออกมาจากวัสดุก่อสร้าง โดยแบ่งกรณีศึกษาเป็น 3 กรณี ดังนี้

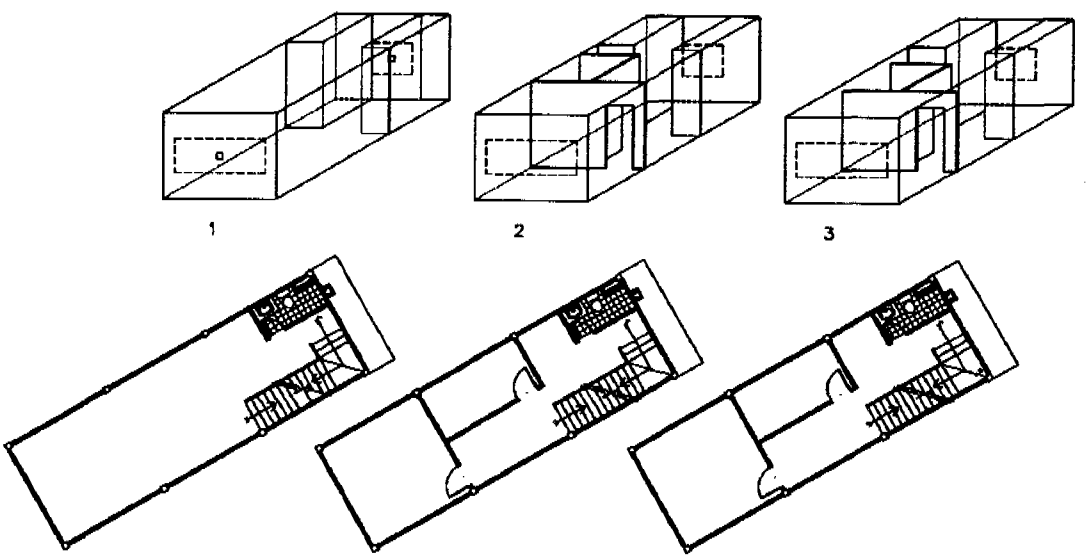
(3.1) ไม่มีการกั้นผนังภายในห้อง

(3.2) มีการกั้นผนังภายในห้อง ตั้งแต่พื้นจรดเพดาน

(3.3) มีการกั้นผนังภายในห้อง ตั้งแต่พื้นแต่ไม่ถึงเพดาน โดยเว้นช่อง ว่างไว้ 25 เซนติเมตร

ภาพที่ 3.10

แบบจำลองการกั้นผนังภายในของอาคารประเภทตึกแถว



1. ไม่มีการกั้นผนังภายใน
2. กั้นผนังภายในตั้งแต่พื้นจรดเพดาน
3. กั้นผนังภายในตั้งแต่พื้น แต่ไม่ถึงเพดาน โดยเว้นช่องไว้ 25 เซนติเมตร

หมายเหตุ: จากการออกแบบวิจัย, 2549.

2) ตัวแปรตาม

(1) ระดับความเข้มข้นโดยเฉลี่ยของก๊าซเรดอน โดยอ่านค่าที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล เปรียบเทียบกับการคำนวณโดยสมการทางคณิตศาสตร์

(2) ปริมาณรังสีเฉลี่ยที่ผู้อยู่อาศัยได้รับในระยะเวลา 1 ปี ในหน่วยมิลลิซีเวิร์ต โดยการคำนวณจากค่าความเข้มข้นก๊าซเรดอนเฉลี่ย ตามวิธีการที่แนะนำโดย UNSCEAR

(3) ความทั่วถึงในการระบายอากาศ โดยดูจากแนวการไหลของอากาศควบคู่ไปกับจุดที่มีการสะสมของก๊าซเรดอนภายในอาคาร

3) ตัวแปรควบคุม

(1) ขนาดพื้นที่ของตึกแถวในชั้นที่ใช้ในการจำลองคือ 48 ตารางเมตร โดยมีหน้ากว้าง 4 เมตร ลึก 12 เมตร สูง 3 เมตร ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานที่ใช้ก่อสร้างโดยทั่วไป

(2) ช่องเปิดด้านหน้ามีพื้นที่ 3.84 ตารางเมตร (1.20 × 3.20 เมตร) ช่องเปิดด้านหลังมีพื้นที่ 1.54 ตารางเมตร (1.10 ×1.40 เมตร)

(3) ลักษณะการกั้นผนังภายในได้มาจากการสำรวจ (ภาพที่ 3.10) ซึ่งพบว่าเป็นรูปแบบที่พบในอาคารตึกแถวส่วนใหญ่ โดยกั้นเป็นห้อง 2 ห้อง มีผนังกั้นบันได และห้องน้ำ โดยผนังทั้งหมด (ยกเว้นผนังห้องน้ำ) กำหนดให้เป็นวัสดุที่ไม่มีการปล่อยก๊าซเรดอน

(4) ทำการจำลองการไหลเวียนอากาศเฉพาะชั้น ไม่เกี่ยวข้องกับการไหลเวียนอากาศระหว่างชั้น

(5) การจำลองนี้เกี่ยวข้องเฉพาะก๊าซเรดอนที่ปล่อยจากวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในอาคารเท่านั้น ไม่นำก๊าซเรดอนจากบรรยากาศภายนอก หรือก๊าซเรดอนที่มาจากพื้นดิน หรือแหล่งกำเนิดอื่น ๆ มาใช้ในการจำลอง

(6) กำหนดให้อากาศภายในอาคารตึกแถวเกิดจากการปรับอากาศ โดยหน้าต่างถูกปิดอยู่ตลอดเวลา

2. <u>การกำหนดแบบจำลอง</u>

จากการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ข้างต้น สามารถสร้างรูปแบบอาคารตึกแถวเพื่อใช้ในการทดสอบ และจำลองผลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ 3 ลักษณะ (ภาพที่ 3.10) โดยในแต่ละลักษณะจะถูกกำหนดขนาดของขอบเขต (domain) ดังนี้ (ภาพที่ 3.11)

1) เนื่องจากเป็นการจำลองภายในอาคาร ไม่เกี่ยวข้องกับภายนอกอาคาร ดังนั้นขนาดของขอบเขตการจำลอง ก็คือขนาดของอาคารตึกแถวซึ่งกำหนดตามแบบมาตรฐาน คือ หน้ากว้าง 4 เมตร ลึก 12 เมตร สูง 3 เมตร

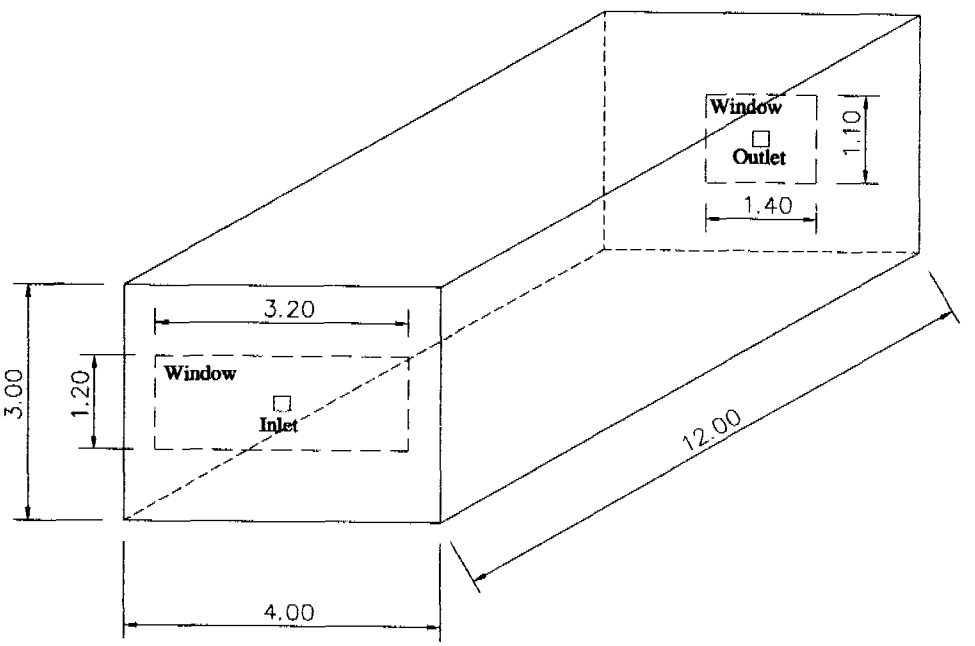
2) ช่องเปิดในแบบจำลองมีอยู่ 2 ตำแหน่งคือ ด้านหน้า ซึ่งมีขนาดพื้นที่ 3.84 ตารางเมตร และด้านหลัง ซึ่งมีขนาดพื้นที่ 1.54 ตารางเมตร โดยกำหนดให้เป็นตำแหน่งลมเข้า (inlet) และลมออก (outlet) ตามลำดับ

3) จากการทดสอบแบบจำลอง เปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสมการทางคณิตศาสตร์ พบว่าขนาดของช่องลมเข้า และช่องลมออกที่เหมาะสม ที่ทำให้ค่าการจำลองใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดคือ 20 × 20 เซนติเมตร (0.04 ตารางเมตร)

4) พื้นที่ทั้งหมดยกเว้นผนังกั้นห้อง ถือว่าสร้างด้วยวัสดุทดสอบ ซึ่งจะปล่อยก๊าซเรดอนออกมาตามค่าที่ใส่ข้อมูลลงไป

ภาพที่ 3.11

การกำหนดขนาด และขอบเขตแบบจำลองในโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล



หมายเหตุ: จากการออกแบบวิจัย, 2549.

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

เนื่องจากงานวิจัยนี้ประกอบด้วยการทดลอง 2 ส่วน คือ การวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบจริง และการนำผลที่ได้ไปจำลองในอาคารกรณีศึกษา ซึ่งเครื่องมือที่ใช้จะแตกต่างกันไป โดยสามารถจำแนกตามการทดลองได้ดังนี้

3.3.1 การทดลองที่ 1 : การวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบ

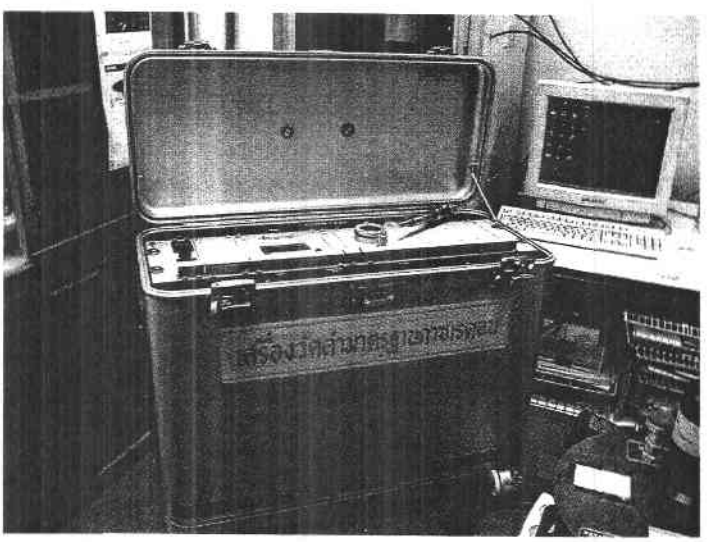
เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 1 นี้ ประกอบด้วย เครื่องมือสำหรับตรวจวัดก๊าซเรดอน ได้แก่ เครื่องตรวจวัด ATMOS 12 dpx และคอมพิวเตอร์ประมวลผล และอุปกรณ์สำหรับเตรียมการทดลอง ได้แก่ เครื่องดูดอากาศ มาตรวัดความดัน เครื่องปั๊มอากาศ ผงถ่านกัมมันต์ ผงแคลเซียมซัลเฟต และอุปกรณ์ดักผลิตภัณฑ์ลูกหลานของเรดอน และโทรอน

1. เครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอน ATMOS 12 dpx

การวัดปริมาณก๊าซเรดอนในงานวิจัยนี้ จะใช้การตรวจวัดแบบ Grab sampling โดยใช้เครื่องวัดก๊าซเรดอนแบบ Pulse-counting ionization chamber ATMOS 12 dpx (ภาพที่ 3.12) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

ภาพที่ 3.12

เครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอน ATMOS 12 dpx

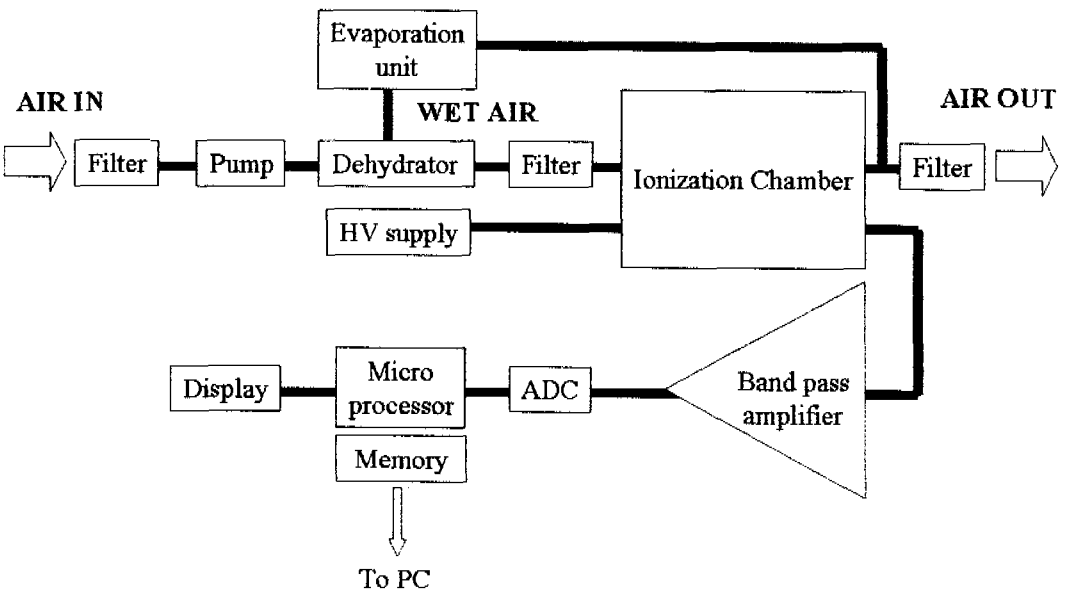


หมายเหตุ: บันทึกภาพที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2549.

อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซเรดอนนี้ ฝ่ายวิจัยประยุกต์การวัดรังสี กองการวัดกัมมันตภาพรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ได้รับคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญที่สถาบัน Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety (STUK) แห่งประเทศฟินแลนด์ ว่าเครื่องมือวัดก๊าซเรดอนแบบ ATOMS 12 dpx มีความถูกต้อง และแม่นยำในการวัดมากที่สุด โดยอากาศจะถูกดูดเข้าสู่เครื่องวัดที่อัตราการดูดประมาณ 2 ลิตรต่อนาที ผ่านกระดาษกรอง ซึ่งจะทำการกักกันผลิตภัณฑ์ลูกหลานก๊าซเรดอนที่เกิดอยู่ภายนอกไม่ให้ผ่านเข้าไปสู่หัววัด นอกจากนี้ อุปกรณ์ลดความชื้น (Dehydrator) ทำให้ระดับความชื้นของอากาศลดลง โดยการทำให้อากาศผ่านความเย็น และควบแน่นที่อุปกรณ์ Peltier element ที่ถูกควบคุมปิดเปิดการทำงานด้วย Thermostat ละอองน้ำเย็นที่เกิดขึ้นจะถูกนำออกจากอากาศด้วยวัสดุดูดน้ำซึ่งทำด้วยใยผ้า และถูกทำให้ระเหยออกไปทางด้านร้อนของ Peltier element (ภาพที่ 3.13)

ภาพที่ 3.13

แผนภาพการทำงานของเครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอน ATOMS 12 dpx



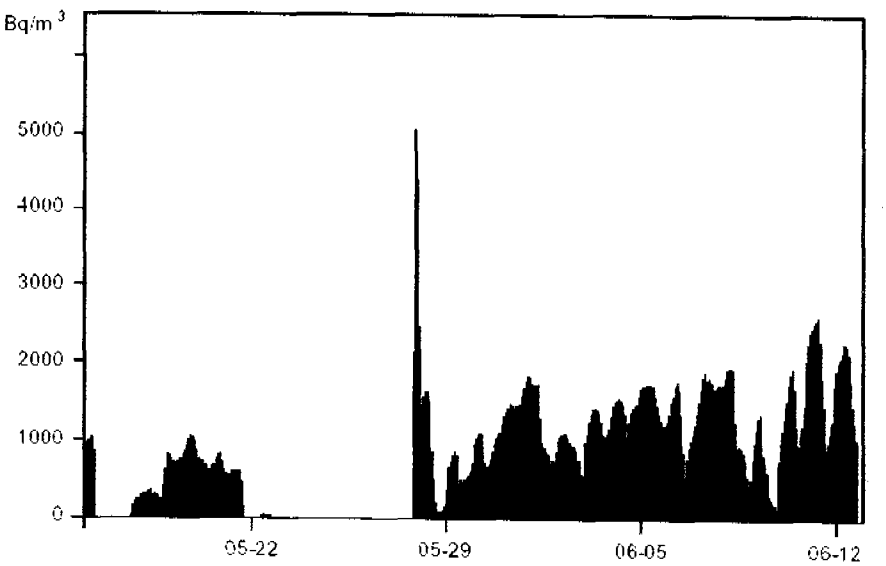
ที่มา: Gammadata Matteknik, 1994.

หมายเหตุ: User's Guide ATMOS 12 DPX, version 4.1, 1994.

ปริมาณก๊าซเรดอนที่มีอยู่ในอากาศจะถูกวัดในหัววัด Ionization Chamber แบบ Pulse - counting ซึ่งนับวัดอนุภาคอัลฟาที่ปลดปล่อยในการสลายตัวของนิวเคลียสของ ^{222}Rn และ ^{218}Po ภายในช่องหัววัดรูปทรงกระบอก ปริมาตรของอากาศทั้งหมดเป็นประมาณ 2 ลิตร ปริมาตรส่วนที่มีความไวในการวัดของหัววัดเป็นประมาณ 0.6 ลิตร ซึ่งเป็นส่วนที่มีโครงสร้างของเส้นลวดตัวนำที่ถูกขึงตรึงอยู่ระหว่างขั้วของแหล่งจ่ายไฟศักย์สูง จากนั้นเครื่องจะประมวลผลความเข้มข้นก๊าซเรดอนแล้วแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ดังภาพที่ 3.14

ภาพที่ 3.14

การรายงานผลของเครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอน ATOMS 12 dpx

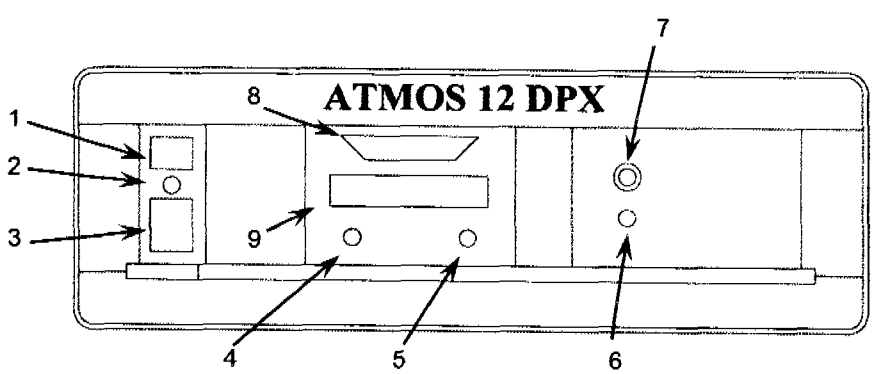


ที่มา: Gammadata Matteknik, 1994.

หมายเหตุ: User's Guide ATMOS 12 DPX, version 4.1, 1994.

ภาพที่ 3.15

ส่วนประกอบของเครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอน ATOMS 12 dpx



1. power switch
2. fuse
3. connection to electrical outlet
4. start button
5. integration time adjustment
6. air outlet
7. air inlet
8. communication port
9. LC display

ที่มา: Gammadata Matteknik, 1994.

หมายเหตุ: User's Guide ATMOS 12 DPX, version 4.1, 1994.

2. อุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้สำหรับเตรียมการทดลอง

ในการทดลองเพื่อวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง โดยวิธีการวัดในระบบปิดนั้น (ซึ่งในการวิจัยนี้เป็นการตั้งวัสดุไว้ในกล่องทดลอง) สิ่งที่สำคัญก่อนนำวัสดุเข้าไปไว้ในกล่องทดลอง ก็คือ ต้องทดสอบจนแน่ใจว่า กล่องทดลองไม่มีการรั่วซึม เพราะอาจทำให้ก๊าซเรดอนรั่วออกมาได้ระหว่างการทดลอง นอกจากนี้ ยังต้องแน่ใจด้วยว่าอากาศเริ่มต้นภายในกล่อง มีเรดอนผลิตภัณฑ์ลูกหลาน รวมทั้งความชื้น ปะปนอยู่น้อยที่สุด เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้เป็นสาเหตุให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้

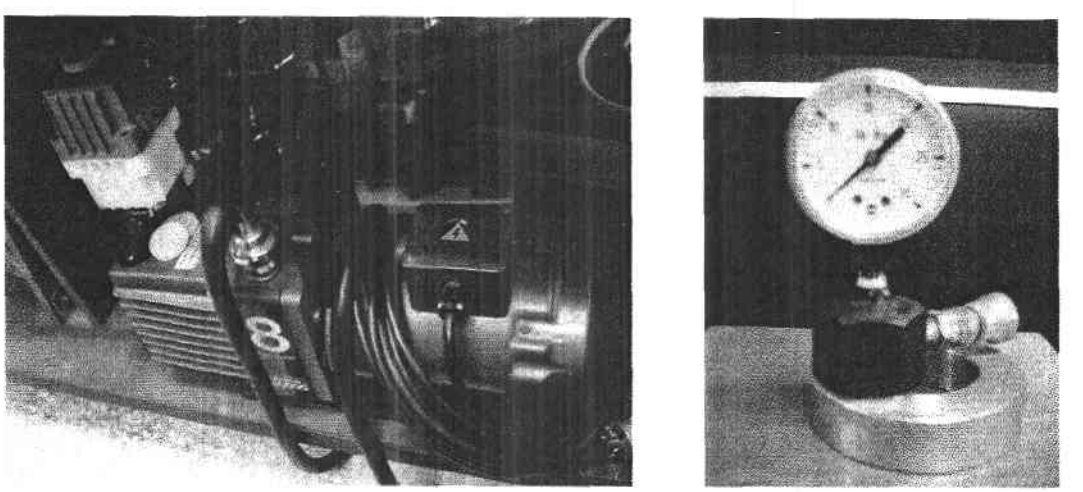
ดังนั้น ก่อนจะเริ่มการทดลอง จึงต้องมีการทดสอบกล่องทดลองอย่างละเอียด แล้วจึงนำวัสดุเข้าไปไว้ในกล่องทดลองตามกระบวนการ (หัวข้อที่ 4 ในหัวข้อ 3.2.1) ซึ่งมีอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1) เครื่องดูดอากาศ และเกจวัดความดัน

ใช้สำหรับดูดอากาศออกจากกล่องทดลอง เพื่อทดสอบการรั่วซึมของอากาศจากกล่องทดลอง ในการใช้งานจะใช้ร่วมกับมาตรวัดความดัน โดยต่อมาตรวัดความดันเข้าที่วาล์วด้านหนึ่ง และต่อเครื่องดูดอากาศเข้าที่วาล์วอีกด้านหนึ่งของกล่องทดลอง จากนั้น จึงดูดอากาศออกจนถึงที่ระดับความดัน 2.5 นิ้ว-ปรอท แล้วปิดวาล์ว หากไม่มีอากาศรั่วซึมออก เข็มของมาตรวัดความดันจะไม่ตกลงมา

ภาพที่ 3.16

เครื่องดูดอากาศ (ก) และมาตรวัดความดัน (ข)



(ก) (ข)

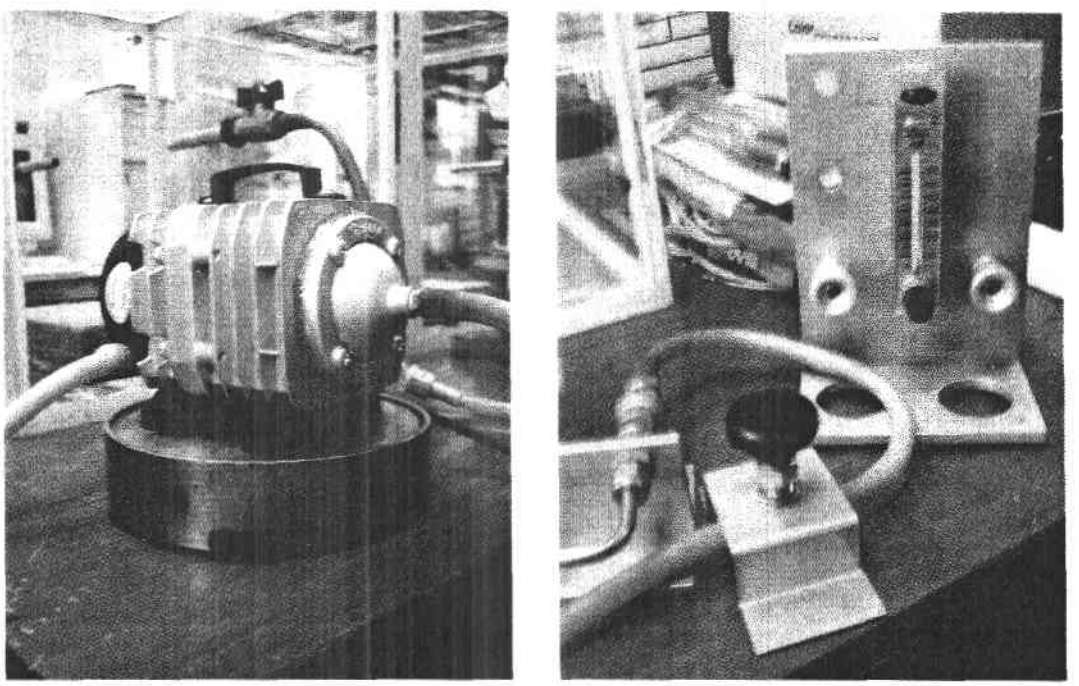
หมายเหตุ: บันทึกภาพที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2549.

2) <u>เครื่องปั๊มอากาศ และวาล์วควบคุมการไหลของอากาศ</u>

เมื่อนำวัสดุทดสอบเข้าไปไว้ในกล่องทดลองและปิดฝาจนสนิทแล้ว ภายในกล่องจะมีอากาศอยู่แล้วจำนวนหนึ่งซึ่งเท่ากับปริมาตรของกล่องทดลอง แต่เป็นอากาศที่อาจยังไม่บริสุทธิ์ คือ อาจมีเรดอน ผลิตภัณฑ์ลูกหลาน และไอน้ำปะปนอยู่ ดังนั้น จึงต้องนำอากาศเหล่านั้นออกมาเข้าสู่กระบวนการลดปริมาณเรดอน และลดความชื้น โดยใช้เครื่องปั๊มอากาศ ซึ่งจะใช้ร่วมกับวาล์วควบคุมการไหลเวียนของอากาศ เพื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศ สำหรับการทดลองนี้กำหนดไว้ที่อัตรา 2.5 ลิตรต่อนาที

ภาพที่ 3.17

เครื่องปั๊มอากาศ (ก) และวาล์วควบคุมการไหลเวียนของอากาศ (ข)



(ก) (ข)

หมายเหตุ: บันทึกภาพที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2549.

3) <u>ผงแคลเซียมซัลเฟต และผงถ่านกัมมันต์</u>

ผงแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ใช้เพื่อลดความชื้นจากอากาศที่ส่งมาโดยเครื่องปั๊มอากาศ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดความชื้นได้ถึง 90 % โดยจะบรรจุอยู่ในภาชนะแก้วทรงกระบอก

ขนาด $2\frac{5}{8} \times 11\frac{3}{8}$ นิ้ว อากาศที่ผ่านการลดความชื้นแล้วก็จะเข้าสู่กระบวนการลดปริมาณเรดอน โดยการให้ไหลผ่านผงถ่านกัมมันต์ ซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะที่มีขนาดเท่ากันนี้

ภาพที่ 3.18

ผงแคลเซียมซัลเฟต และผงถ่านกัมมันต์

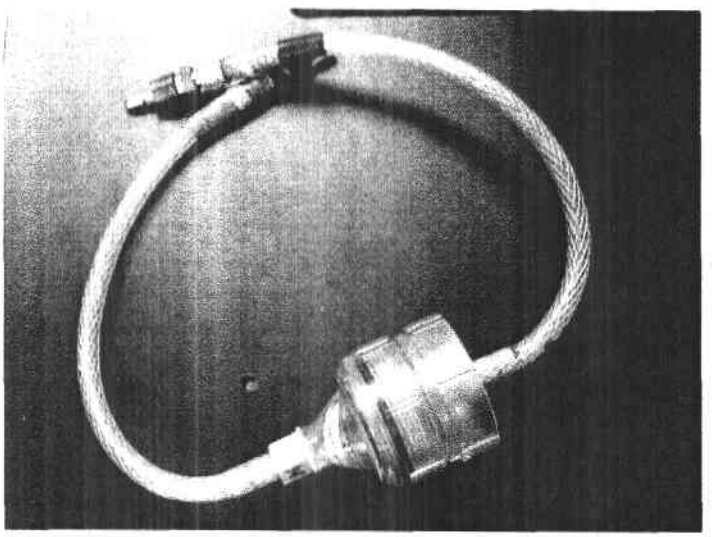
หมายเหตุ: บันทึกภาพที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2549.

4) <u>อุปกรณ์ดักจับผลิตภัณฑ์ลูกหลานเรดอน และโทรอน</u>

ถึงแม้ว่าอากาศที่ผ่านมาจากกระบอกถ่านกัมมันต์ จะถูกดักเรดอนออกไปชั้นหนึ่งแล้ว แต่ก็ยังอาจจะมีผลิตภัณฑ์ลูกหลานของก๊าซเรดอนหลุดรอดออกมาได้ ดังนั้น จึงต้องมีการกรองด้วยอุปกรณ์ดักผลิตภัณฑ์ลูกหลานเรดอน และโทรอนอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งภายในอุปกรณ์นี้จะมีกระดาษกรองซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะ สำหรับกรองผลิตภัณฑ์ลูกหลานเรดอน และโทรอน ที่ไม่สามารถดักจับได้ด้วยผงถ่านกัมมันต์

ภาพที่ 3.19

อุปกรณ์ดักจับผลิตภัณฑ์ลูกหลานเรดอน และโทรอน



หมายเหตุ: บันทึกภาพที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2549.

3.3.2 <u>การทดลองที่ 2 : การจำลองผลในอาคารกรณีศึกษาประเภทตึกแถว</u>

การทดลองที่ 2 จะเป็นการจำลองการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง ในอาคารกรณีศึกษาประเภทตึกแถว ซึ่งเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลองนี้ ได้แก่ โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics; CFD) หรือ โปรแกรม PHOENICS 3.5.1 (CHAM, 2005)

โปรแกรม PHOENICS version 3.5.1 เป็นโปรแกรมที่ใช้ทดสอบการเคลื่อนที่ของของไหลซึ่งสามารถคำนวณหาทิศทาง และความเร็วของลม ความดันอากาศ อุณหภูมิ และค่าความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ รวมทั้งไอน้ำได้อย่างแม่นยำ ผู้ใช้สามารถกำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศในโปรแกรมการจำลองได้ และสามารถจำลองได้ค่อนข้างรวดเร็ว โดยผลที่ได้สามารถแสดงรูปการไหลเวียนของอากาศ และค่าต่าง ๆ ที่ต้องการทราบเป็นตัวเลข สี และกราฟฟิกที่ชัดเจน แต่อย่างไรก็ตาม การที่จะเชื่อมั่นผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมนั้น จำเป็นต้องเปรียบเทียบผลการจำลองจากโปรแกรมกับผลจากการทดลองอื่น ๆ ด้วย เช่น ผลจากการวัดสภาพจริง หรือผลจากห้องทดลองก่อนการใช้งานจริงด้วย (Chen and Srebric, 2001. อ้างถึงใน เฉลิมวัฒน์ ตันตสวัสดิ์, 2547)

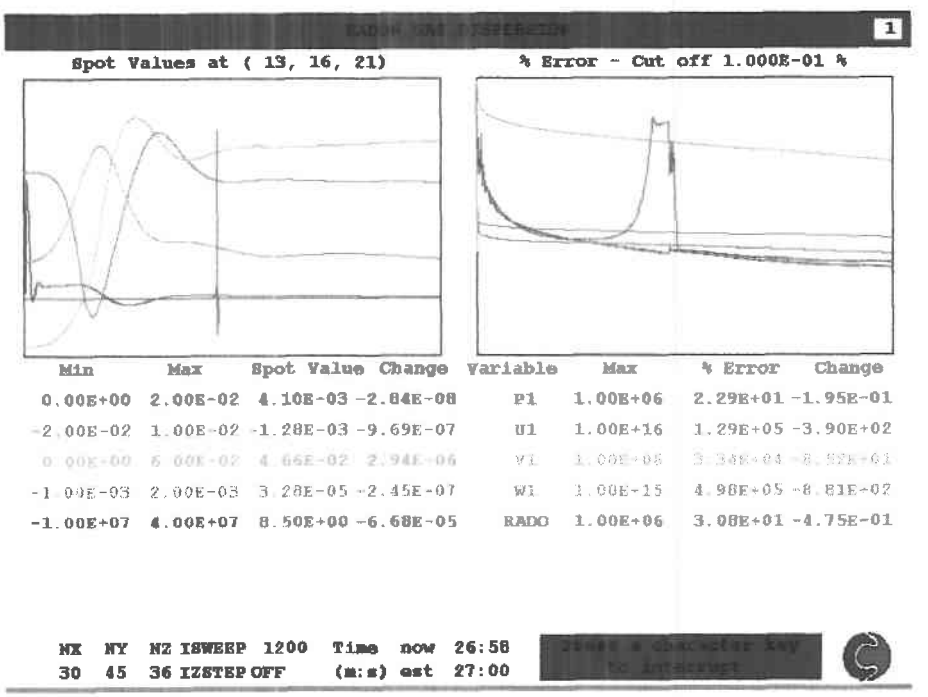
ในงานวิจัยนี้ จะนำโปรแกรมมาใช้ในการจำลองเพื่อดูการแพร่กระจายของก๊าซเรดอนที่ปล่อยออกมาจากวัสดุทดสอบในอาคารกรณีศึกษา และวัดค่าเฉลี่ยภายในอาคารเพื่อคำนวณเป็นปริมาณรังสีที่ผู้อยู่อาศัยได้รับในระยะเวลา 1 ปี

1. <u>ความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง</u>

การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการจำลองสำหรับงานวิจัยนี้ มีอยู่ 3 วิธี ดังนี้

1) จากภาพที่ 3.20 เมื่อพิจารณาจากกราฟ 2 รูป โดยกราฟทางด้านซ้ายจะแสดงความน่าเชื่อถือของข้อมูล หากกราฟมีเส้นตรงโดยที่แต่ละเส้นเคลื่อนที่ขนานกับแกน X แสดงว่าผลการทดลองนั้นมีความน่าเชื่อถือ แต่ในทางตรงกันข้าม หากเส้นแต่ละเส้นมีลักษณะการเคลื่อนที่โค้ง แสดงว่าผลการทดลองชิ้นนั้นไม่สามารถเชื่อถือได้ ต้องมีการทดลองต่อไปจนกว่าเส้นทุกเส้นมีการเคลื่อนที่ขนานกับแกน X ส่วนกราฟทางด้านขวา จะแสดงค่าความผิดพลาดจากการจำลอง หากกราฟมีการเคลื่อนที่ต่ำลง แสดงว่าการทดลองชิ้นนั้นมีค่าความผิดพลาดน้อย สามารถนำไปพิจารณาต่อได้

ภาพที่ 3.20
ผลความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง



2) พิจารณาจากผลของการคำนวณของซอฟท์แวร์ (result หรือ output file) โดยแยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณี (Chen and Srebric, 2001. อ้างถึงใน ทรัพยมณี ชัยแสนสุข, 2548) ได้แก่

(1) สำหรับความเร็วลม ความน่าเชื่อถือของข้อมูล สามารถคำนวณได้ โดยการนำผล รวมของ pressure residual หรือ P1 หารด้วย ผลรวม source ของ U1 V1 และ W1 ซึ่งผลที่ได้ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.01

$$\frac{\left|\text{residual sum P1}\right|}{\left|\sum \text{net source U1}_{\text{inlet}} + \sum \text{net source V1}_{\text{inlet}} + \sum \text{net source W1}_{\text{inlet}}\right|} < 0.01$$

(2) สำหรับความเข้มข้นของก๊าซ สามารถคำนวณค่าความน่าเชื่อถือของข้อมูลได้ โดยการนำค่า concentration residual ของ RADON หารด้วยผลรวม source ของ RADON ซึ่งผลที่ได้ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.01

$$\frac{\left|\text{residual sum RADON}\right|}{\left|\sum \text{net source RADON}_{\text{inlet and source}}\right|} < 0.01$$

3) การเปรียบเทียบผลการจำลอง กับค่าที่คำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งหากไม่นำก๊าซเรดอนจากภายนอกอาคารเข้ามาใช้ในการพิจารณาแล้ว ค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภาย ในห้องธรรมดา อาจสามารถประมาณได้ในเบื้องต้นตามสมการที่ 3.1 (C. R. Cothern and J. E. Smith Jr., 1987 อ้างใน W. Zhuo, et al., 2001)

$$C = \sum_{n=1}^{i} \frac{E_i S_i}{V(\lambda_i + \lambda_v)} \qquad \text{สมการ (3.1)}$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของก๊าซเรดอน (Bq m^{-3})

E คือ อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนของวัสดุก่อสร้าง (Bq m^{-2} h^{-1})

S คือ พื้นที่ผิวของวัสดุที่ปล่อยก๊าซเรดอน (m^2)

V คือ ปริมาตรของห้องจำลอง (m^3)

λ_i คือ ค่าคงที่การสลายตัวของเรดอน (7.56×10^{-3} h^{-1})

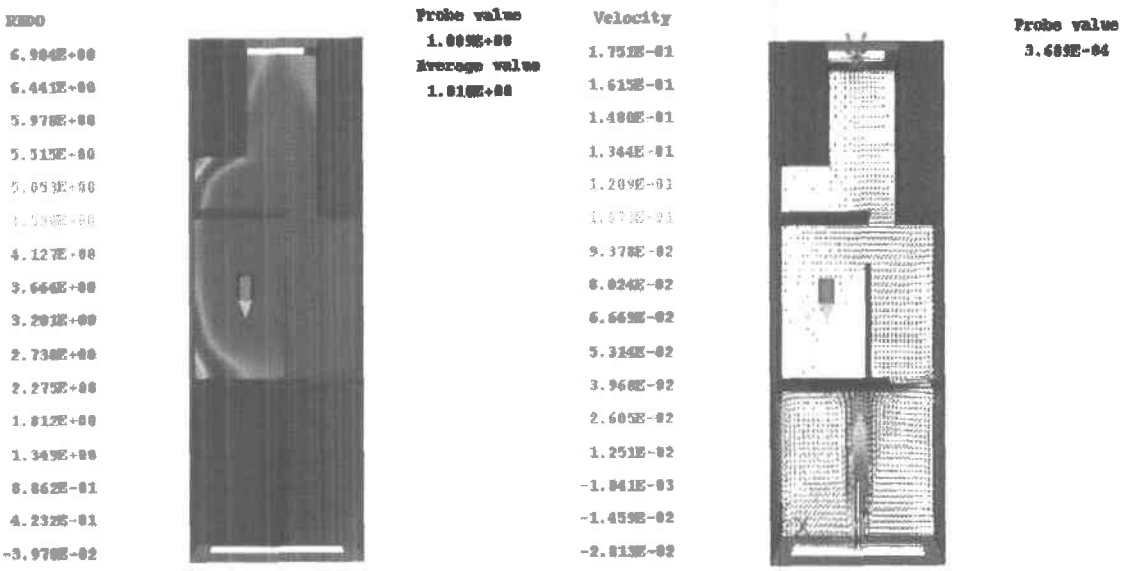
λ_v คือ อัตราการระบายอากาศของห้องจำลอง (h^{-1})

2. <u>การแสดงผลการทดลอง</u>

การแสดงผลลัพธ์ของการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล จะแสดงเป็นภาพกราฟฟิก ซึ่งสามารถแสดงได้ทั้งระดับเฉดสี ลูกศรทิศทางการไหลของอากาศ และตัวเลขบอกค่าต่าง ๆ ดังตัวอย่างในภาพที่ 3.21

ภาพที่ 3.21

ตัวอย่างการแสดงผลของโปรแกรม PHOENICS



(ก) แสดงผลแบบเฉดสี (ข) แสดงผลแบบลูกศร

จากภาพที่ 3.21 (ก) เป็นการแสดงผลแบบเฉดสี โดยแถบสีแต่ละสี ก็คือค่าความเข้มข้นของก๊าซในบริเวณนั้น โดยสามารถอ่านค่าได้จากตัวเลขทางด้านซ้าย หรืออ่านค่าเฉลี่ยได้ทางด้านขวาของหน้าจอ ส่วนภาพที่ 3.21 (ข) เป็นการแสดงผลแบบลูกศร แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสลม โดยสามารถอ่านค่าได้จากตัวเลขทางด้านซ้ายของหน้าจอเช่นกัน

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

3.4.1 การทดลองที่ 1 : การวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบ

หลังจากที่ตั้งวัสดุทดสอบไว้ในกล่องทดลองครบกำหนด 28 วันแล้ว จึงทำการวัดปริมาณก๊าซเรดอนภายในกล่องทดลอง ด้วยเครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอน ATMOS 12 dpx (ภาพที่ 3.22) ผลในการตรวจวัดจะถูกแสดงออกมาทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ (ภาพที่ 3.23) ซึ่งในการตรวจวัดนั้นสามารถกำหนดค่าความละเอียดของการตรวจวัดได้ โดยการปรับที่ค่า integration time ถ้ายิ่งตั้งค่าไว้มาก การตรวจวัดก็จะมีความละเอียดมาก ทำให้มีความคลาดเคลื่อนน้อย ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2

เปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอนของผลการตรวจวัด

Radon gas Bq m^{-3}	Integration time			
	1 min	10 min	1 hr	8 hr
200	70 %	20 %	10 %	4 %
800	35 %	10 %	5 %	2 %
2000	25 %	6 %	3 %	1.5 %

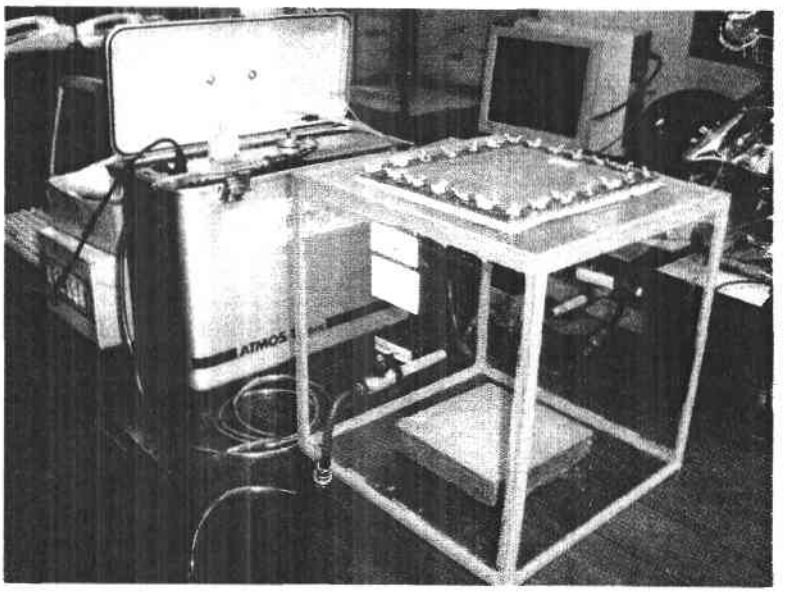
ที่มา: Gammadata Matteknik, 1994.

หมายเหตุ: User's Guide ATMOS 12 DPX, version 4.1, 1994.

สำหรับการทดลองนี้ ได้ตั้งค่า Integration time ไว้ที่ 30 นาที ซึ่งเครื่องจะแสดงผลทุก ๆ 10 นาที ผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ นั่นคือ ผลการตรวจวัดที่ได้ในแต่ละกล่องทดลองจะมี 3 ค่า ซึ่งต้องนำมาหาค่าเฉลี่ย จึงจะเป็นค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในกล่องทดลองนั้น หลังจากที่ได้ค่าเฉลี่ยแล้ว ต้องนำค่า Background หรือปริมาณเรดอนเฉลี่ยที่มีอยู่ในบรรยากาศมาลบออกก่อน แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนในแต่ละวัสดุทดสอบ

ภาพที่ 3.22

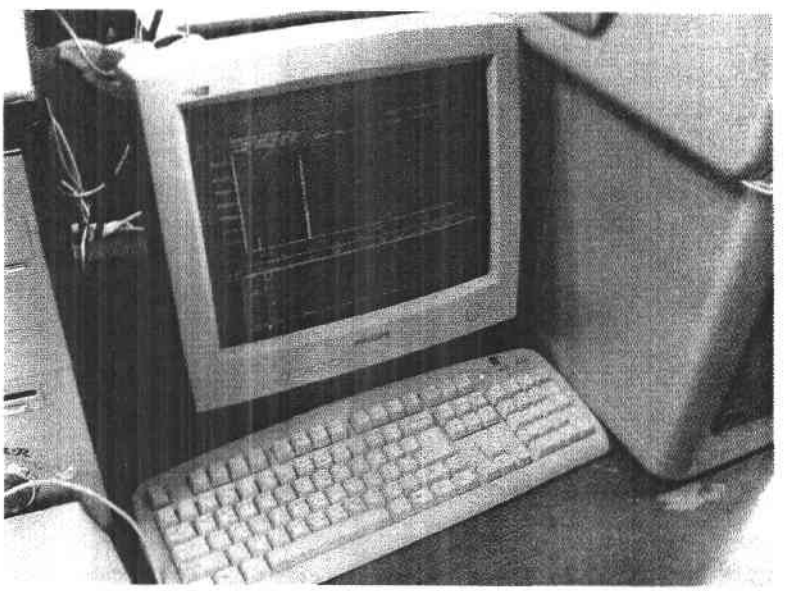
การตรวจวัดก๊าซเรดอนในกล่องทดลองด้วยเครื่องตรวจวัด ATMOS 12 dpx



หมายเหตุ: บันทึกภาพที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2549.

ภาพที่ 3.23

การแสดงผลการตรวจวัดทางหน้าจอคอมพิวเตอร์



หมายเหตุ: บันทึกภาพที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2549.

3.4.2 <u>การทดลองที่ 2 : การจำลองผลในอาคารกรณีศึกษาประเภทตึกแถว</u>

เมื่อทราบอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบ จากการทดลองที่ 1 โดยการตรวจวัดจากวัสดุจริงแล้ว จึงนำข้อมูลที่ได้มาทดลองในแบบจำลองอาคารกรณีศึกษาด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลในลักษณะที่เป็นภาพแสดงการเคลื่อนที่ของอากาศและข้อมูลเชิงปริมาณอื่น ๆ ดังนี้

1. ความเข้มข้นของก๊าซเรดอน จะวัดในหน่วย เบกเคอเรลต่อลูกบาศก์เมตร (Bq m^{-3}) โดยดูจากค่าเฉลี่ยที่แสดงบนมุมจอคอมพิวเตอร์ทางด้านขวา

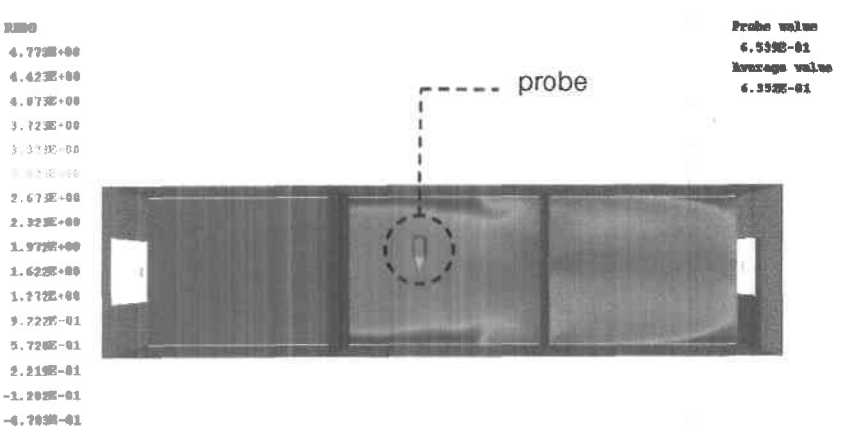
2. ความเร็วลม จะวัดในหน่วย เมตรต่อวินาที (m s^{-1}) เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาในการปรับปรุงอัตราการระบายอากาศ

3. พื้นที่สะสมก๊าซเรดอน โดยพิจารณาจากแนวการไหลของอากาศ รวมทั้งเฉดสีแสดงความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่แสดงผลด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล

อนึ่ง ในการจำลองการไหลเวียนของของไหลด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล จำเป็นต้องมีการกำหนด จุดวัด (probe) เพื่อวัดค่าต่าง ๆ ในบริเวณที่สำคัญ (ภาพที่ 3.24) ซึ่งสำหรับการทดลองนี้ จะให้ความสำคัญกับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในระดับหายใจของมนุษย์เป็นหลัก เนื่องจากส่วนใหญ่ มนุษย์จะสามารถรับก๊าซเรดอนเข้าสู่ร่างกายได้โดยผ่านทางระบบหายใจ ซึ่งระดับหายใจของมนุษย์โดย ทั่วไปอยู่ที่ระดับความสูง 1.50 เมตรจากพื้นดิน (Zhu et al., 2005) ดังภาพที่ 3.25

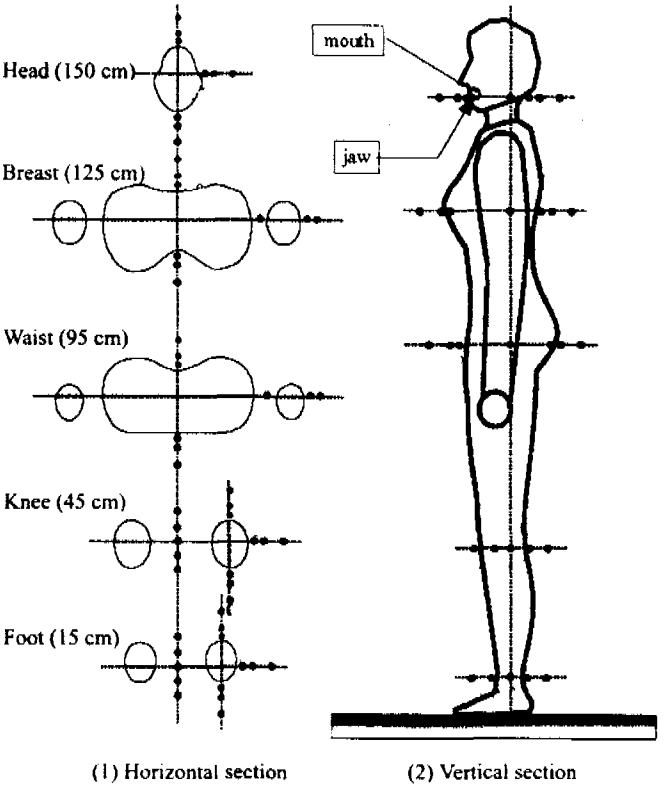
ภาพที่ 3.24

จุดวัด (probe) ในแบบจำลองการไหลเวียนอากาศ



ภาพที่ 3.25

ระดับการหายใจโดยทั่วไปของมนุษย์



ที่มา: Zhu et al., 2005.

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลของงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งรายละเอียดได้ตามประเภทการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.1 การทดลองที่ 1: การวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบ

หลังจากที่ได้ทดลองวัดปริมาณก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบ และสามารถคำนวณทราบอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุดังกล่าวแล้ว จึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ตามหัวข้อดังนี้

1. วิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างอัตราการปล่อยก๊าซเรดอน กับปริมาณส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์ และฟอสโฟยิปซัม

2. วิเคราะห์ถึงปัจจัยที่เกี่ยวเนื่อง หรือส่งผลกระทบต่ออัตราการปล่อยก๊าซเรดอนออกจากวัสดุทดสอบ

3.5.2 <u>การทดลองที่ 2: การจำลองผลในอาคารกรณีศึกษาประเภทตึกแถว</u>

จากการทดลองวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง จึงนำผลที่ได้มาใช้ในการจำลองในอาคารกรณีศึกษาด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล เพื่อเสนอแนะแนวทางที่สามารถช่วยลดปริมาณก๊าซเรดอน โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ดังนี้

1. วิเคราะห์ และเปรียบเทียบถึงผลของการกั้นผนังภายใน ที่มีต่อการเกิดการสะสมของก๊าซเรดอนภายในอาคาร

2. วิเคราะห์และเปรียบเทียบวิธีการลดระดับก๊าซเรดอนในอาคาร ระหว่างการเพิ่มอัตราการระบายอากาศ กับการลดระดับผนังลงไม่ให้ปิดกั้นทางเดินของอากาศ

โดยมีตัวที่จะชี้วัดถึงประสิทธิภาพในการลดปริมาณมลพิษ ดังนี้

1. ปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับในระยะเวลา 1 ปี ซึ่งใช้ตามเกณฑ์มาตรฐานของ UNSCEAR คือ รังสีที่มนุษย์ได้รับจากแหล่งต่าง ๆ ไม่ควรเกิน 1 มิลลิซีเวิร์ต และรังสีที่มนุษย์ได้รับจากก๊าซเรดอนเมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยมาตรฐานของโลก คือ 1.15 มิลลิซีเวิร์ต (ตารางที่ 2.2)

2. ในการปรับปรุงอัตราการระบายอากาศโดยเฉลี่ย (air change rate per hour; ACH) นั้น ต้องพิจารณาถึงความเร็วลมที่เกิดขึ้นภายในอาคารควบคู่ไปด้วย เนื่องจากมีผลกระทบต่อภาวะน่าสบายของผู้ใช้อาคาร โดยควบคุมไว้ไม่ให้ความเร็วลมมีค่าเกิน 1 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมที่จะใช้ในอาคารปรับอากาศ (ภาคผนวก ค)