

บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากการทดลองวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัสดุก่อสร้าง และนำผลที่ได้ไปจำลองในอาคารกรณีศึกษาประเภทตึกแถว โดยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล สามารถนำเสนอผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองได้ ดังรายละเอียดในหัวข้อต่อไปนี้

4.1 การทดลองที่ 1: การวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกวัสดุทดสอบ

การทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีตที่มีถ้ำลอยลิกไนต์ หรือฟอสโฟอิมปซัมเป็นส่วนผสมในปริมาณต่าง ๆ ซึ่งในที่นี้กำหนดเป็นร้อยละโดยปริมาตร ได้แก่ ร้อยละ 20 30 40 50 60 และ 100 รวมทั้งวัสดุทดสอบประเภทคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของถ้ำลอย และฟอสโฟอิมปซัม โดยวัสดุทดสอบแต่ละก้อนมีขนาดที่เท่ากันคือ $20 \times 20 \times 5$ เซนติเมตร ถูกบรรจุไว้ในกล่องทดลองขนาด $40 \times 40 \times 40$ เซนติเมตร มีปริมาตรภายใน 0.0589 ลูกบาศก์เมตร จนเข้าสู่สมดุลกัมมันตรังสี แล้วจึงได้ดำเนินการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นก๊าซเรือนกระจกในกล่องแต่ละกล่อง ด้วยเครื่องตรวจวัดก๊าซเรือนกระจก ATMOS 12 dpx จากนั้นจึงนำไปคำนวณหาอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของแต่ละวัสดุ โดยผลการทดลองที่ได้สามารถแสดงรายละเอียดได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

4.1.1 ผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในกล่องทดลองบรรจุวัสดุทดสอบ ที่ไม่มีส่วนผสมใด ๆ และค่าเรือนกระจกพื้นหลัง

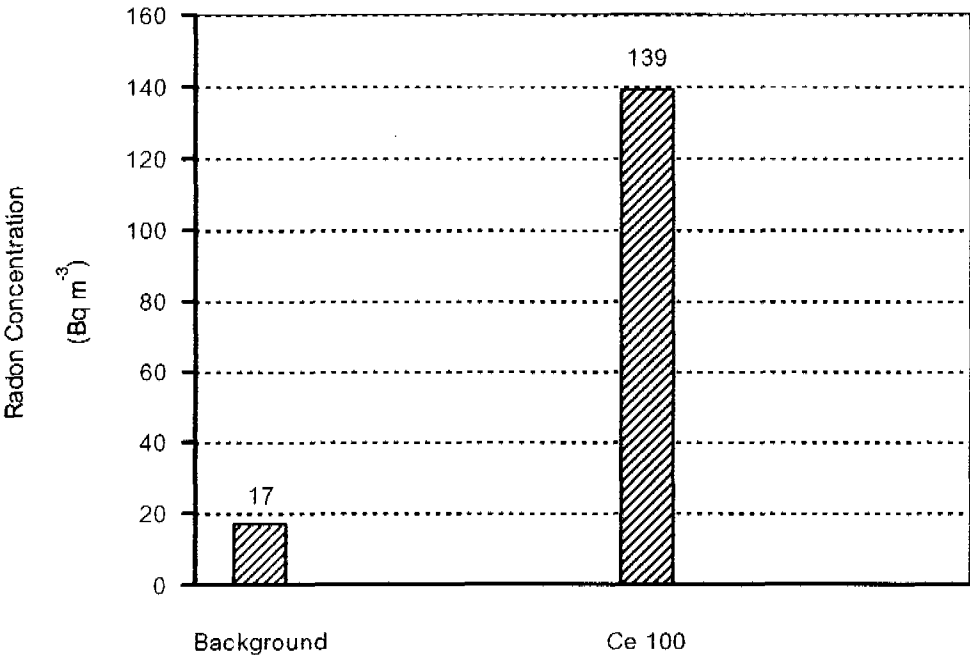
เนื่องจากในอากาศโดยทั่วไปมักมีก๊าซเรือนกระจกปะปนอยู่แล้วไม่มากนักน้อย ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกที่มีอยู่บริเวณสถานที่ทดลองด้วย เพื่อที่จะได้ทราบค่าที่แท้จริงของก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากวัสดุทดสอบ โดยการนำค่าเรือนกระจกพื้นหลังไปลบออกจากค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้จากกล่องทดลองใบอื่น ๆ นอกจากนี้ยังได้ตรวจวัดก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากวัสดุทดสอบที่เป็นคอนกรีตล้วน ไม่มีการผสมถ้ำลอย หรือฟอสโฟอิมปซัมลงไป เพื่อให้เป็นเกณฑ์บ่งชี้ว่า หลังจากที่มีส่วนผสมถ้ำลอย หรือฟอสโฟอิมปซัมลงไปแล้ว มีผลทำให้ก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากวัสดุดังกล่าว เปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ดังผลที่แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1
ผลการตรวจวัดก๊าซเรดอนพื้นหลัง และก๊าซเรดอนที่ปล่อยออกมา
จากวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีต

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปริมาณคอนกรีต (kg m ⁻³)	ปริมาณเถ้าลอย (kg m ⁻³)	ค่าเรดอนเฉลี่ย (Bq m ⁻³)
1	Background	-	-	17 ± 15
2	Ce 100	354.60	0	139 ± 21

หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 12 ม.ค. 2549

ภาพที่ 4.1
ความเข้มข้นก๊าซเรดอนพื้นหลัง และก๊าซเรดอนที่ปล่อยออกมา
จากวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีตโดยเฉลี่ย



หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 12 ม.ค. 2549.

จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1 พบว่าเมื่อตั้งกล่องทดลองทิ้งไว้จนครบตามกำหนดเวลา สามารถวัดค่าความเข้มข้นเรดอนพื้นหลัง (background) โดยเฉลี่ยได้เท่ากับ $17 \pm 15 \text{ Bq m}^{-3}$ ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับปกติของอากาศทั่วไป ส่วนค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนโดยเฉลี่ยที่วัดได้จากกล่องทดลองที่บรรจุวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีต พบว่ามีค่าเท่ากับ $139 \pm 21 \text{ Bq m}^{-3}$ เมื่อนำค่าเรดอนพื้นหลังมาลบออก ก็จะได้เป็นค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ปล่อยออกมาจากวัสดุทดสอบจริง หรือได้เท่ากับ 122 Bq m^{-3}

4.1.2 ผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซเรดอนภายในกล่องทดลองบรรจุวัสดุทดสอบ ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณต่าง ๆ กัน

วัสดุทดสอบทำมาจากคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ (ตารางที่ 3.1) โดยคิดเป็นร้อยละโดยปริมาตร ได้แก่ ร้อยละ 20 30 40 50 60 และ 100 ในขณะที่ส่วนผสมอื่น ได้แก่ ทราย หิน มีปริมาณคงที่ โดยหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว ได้บ่มคอนกรีตทิ้งไว้อีก 14 วัน ก่อนบรรจุลงกล่องทดลอง

เมื่อครบกำหนดตรวจวัด จึงได้ตรวจวัดก๊าซเรดอนภายในกล่องทดลองด้วยเครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอน ATMOS 12 dpx ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2
ผลการตรวจวัดก๊าซเรดอนภายในกล่องทดลองบรรจุวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีต
ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณต่าง ๆ กัน

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปริมาณคอนกรีต (kg m^{-3})	ปริมาณเถ้าลอย (kg m^{-3})	ค่าเรดอนเฉลี่ย (Bq m^{-3})
1	FA 20	283.68	70.92	151 ± 15
2	FA 30	248.22	106.38	131 ± 19
3	FA 40	212.76	141.84	141 ± 18
4	FA 50	177.30	177.30	161 ± 16
5	FA 60	141.84	212.76	173 ± 16
6	FA 100	0	354.60	92 ± 16

หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 12 ม.ค. 2549.

จากตารางที่ 4.2 เมื่อค่าเรดอนพื้นหลังมาลบออกจากค่าเฉลี่ย ก็จะได้ค่าความเข้มข้น
ก๊าซเรดอนจริงที่ปล่อยออกมาจากวัสดุทดสอบ (ตารางที่ 4.3)

ตารางที่ 4.3

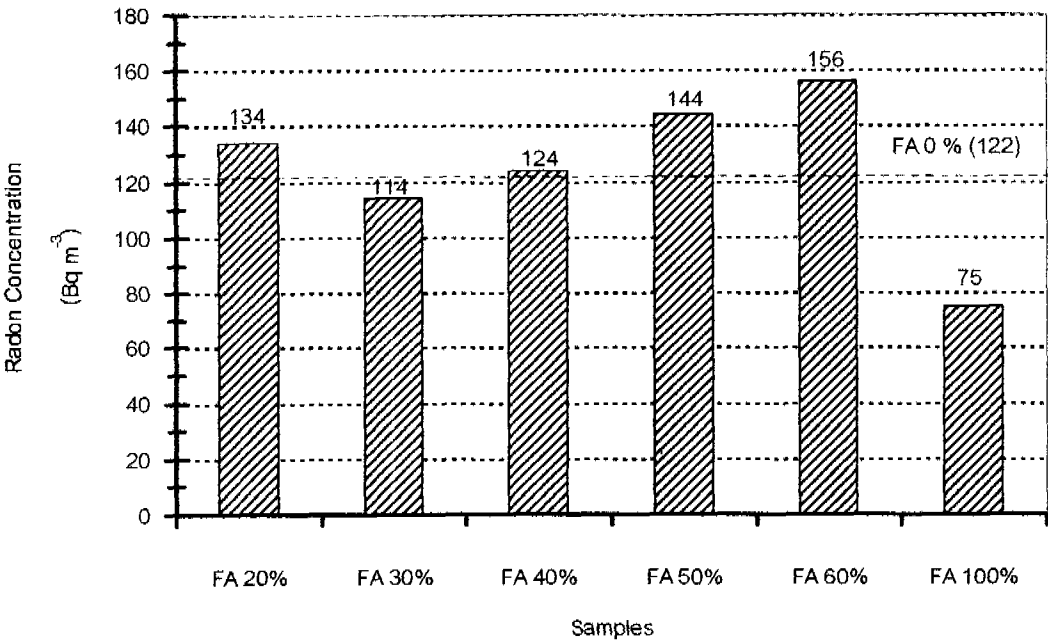
ค่าความเข้มข้นเรดอนเฉลี่ยจริงที่ปล่อยออกมาจากวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีต
ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณต่าง ๆ กัน

วัสดุทดสอบ	FA 20	FA 30	FA 40	FA 50	FA 60	FA 100
ค่าเฉลี่ยที่วัดได้ (Bq m ⁻³)	151 ± 15	131 ± 19	141 ± 18	161 ± 16	173 ± 16	92 ± 16
ค่าเฉลี่ยจริง (Bq m ⁻³)	134 ± 0	114 ± 1	124 ± 3	144 ± 1	156 ± 1	75 ± 1

หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 12 ม.ค. 2549.

ภาพที่ 4.2

ความเข้มข้นก๊าซเรดอนโดยเฉลี่ยที่ปล่อยออกมาจากวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีต
ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณต่าง ๆ กัน



หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 12 ม.ค. 2549.

จากผลการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซเรดอนในวัสดุทดสอบคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย และวัสดุทดสอบคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย สามารถนำผลที่ได้ไปใช้คำนวณหาอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบดังกล่าวได้ตามสมการที่ 2.15 โดยพิจารณาร่วมกับข้อมูลในการทดลอง ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4
การคำนวณหาอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนของวัสดุทดสอบคอนกรีต
ที่ผสม และไม่ผสมเถ้าลอยลิกันต์

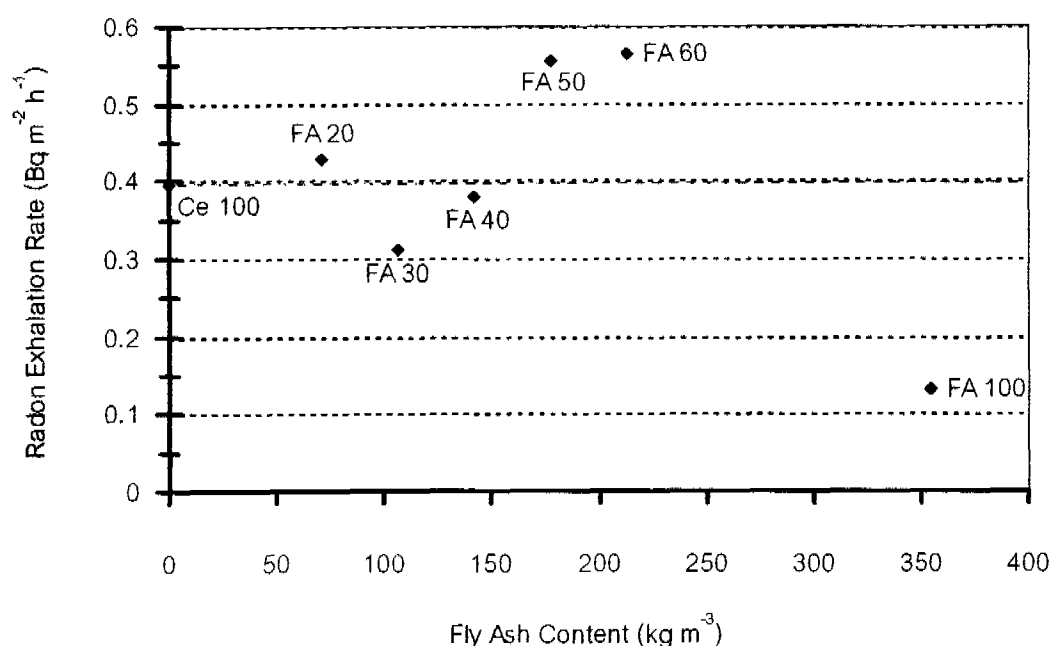
วัสดุ	ค่าเรดอนเฉลี่ยจริง (C) (Bq m ⁻³)	ระยะเวลา (t) (ชั่วโมง)	λ_t	อัตราการปล่อยก๊าซเรดอน (Bq m ⁻² h ⁻¹)
FA 20	134 ± 0	818	6.184	0.429
FA 30	114 ± 1	814	6.153	0.312
FA 40	124 ± 3	795	6.010	0.380
FA 50	144 ± 1	743	5.617	0.556
FA 60	156 ± 1	839	6.342	0.564
FA 100	75 ± 1	839	6.342	0.130
Ce 100	122 ± 6	748	5.654	0.395

เมื่อ ค่าคงที่การสลายตัวของเรดอน (λ) = 7.56×10^{-3} ต่อชั่วโมง

หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 12 ม.ค. 2549.

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบ กับปริมาณเถ้าลอยที่ผสมลงไป สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.3

ภาพที่ 4.3
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนกับปริมาณเถ้าลอย
ที่ผสมลงในวัสดุคอนกรีตทดสอบ



หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 12 ม.ค. 2549.

จากตารางที่ 4.4 ภาพที่ 4.2 และภาพที่ 4.3 สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

1. อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นในกรณีของ FA 20 ที่มีค่าแตกต่างออกไป โดยตั้งสมมติฐานในเบื้องต้นไว้ว่าน่าจะเกิดจากปัจจัยเรื่องความพรุน (porosity) ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการวัดค่าความพรุน (หัวข้อ 4.1.4) ของวัสดุทดสอบ แล้วเปรียบเทียบกับอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุนั้น

2. สำหรับวัสดุคอนกรีตทดสอบที่ไม่มีการผสมเถ้าลอยลงไป (Ce 100) พบว่ามีอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนเท่ากับ $0.395 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ มากกว่าวัสดุทดสอบที่มีแต่เถ้าลอย แต่ไม่ผสมคอนกรีตเลย (FA 100) ถึง 3 เท่า ซึ่งขัดกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ในตอนต้น ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าแท้จริงแล้ว เถ้าลอยอาจมีการปล่อยก๊าซเรดอนออกมาค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีต ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันสมมติฐานดังกล่าว จึงต้องทำการทดสอบอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนโดยมวล (mass exhalation rate) และวัดปริมาณเรเดียมในวัสดุ (radium concentration) (หัวข้อ 4.1.4) ต่อไป

4.1.3 ผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซเรดอนภายในกล่องทดลองบรรจุวัสดุทดสอบ ที่มีส่วนผสมของ
ฟอสโฟอิมปัทม์ในปริมาณต่าง ๆ กัน

วัสดุทดสอบทำมาจากคอนกรีตผสมฟอสโฟอิมปัทม์ในอัตราส่วนต่าง ๆ (ตารางที่ 3.1) โดยคิดเป็นร้อยละโดยปริมาตร ได้แก่ ร้อยละ 20 30 40 50 60 และ 100 ในขณะที่ส่วนผสมอื่น ได้แก่ ทราย หิน มีปริมาณคงที่ โดยหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว ได้บ่มคอนกรีตทิ้งไว้อีก 14 วัน ก่อนบรรจุลงกล่องทดลอง

เมื่อครบกำหนดตรวจวัด จึงได้ตรวจวัดก๊าซเรดอนภายในกล่องทดลองด้วยเครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอน ATMOS 12 dpx ได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5

ผลการตรวจวัดก๊าซเรดอนภายในกล่องทดลองบรรจุวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีต
ที่มีส่วนผสมของฟอสโฟอิมปัทม์ในปริมาณต่าง ๆ กัน

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปริมาณคอนกรีต (kg m ⁻³)	ปริมาณฟอสโฟอิมปัทม์ (kg m ⁻³)	ค่าเรดอนเฉลี่ย (Bq m ⁻³)
1	PG 20	283.68	70.92	338 ± 27
2	PG 30	248.22	106.38	352 ± 26
3	PG 40	212.76	141.84	412 ± 28
4	PG 50	177.30	177.30	631 ± 33
5	PG 60	141.84	212.76	687 ± 34
6	PG 100	0	354.60	702 ± 33

หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 13 ม.ค. 2549.

จากตารางที่ 4.5 เมื่อค่าเรดอนพื้นหลังมาลบออกจากค่าเฉลี่ย ก็จะได้ค่าความเข้มข้น
ก๊าซเรดอนจริงที่ปล่อยออกมาจากวัสดุทดสอบ (ตารางที่ 4.6)

ตารางที่ 4.6

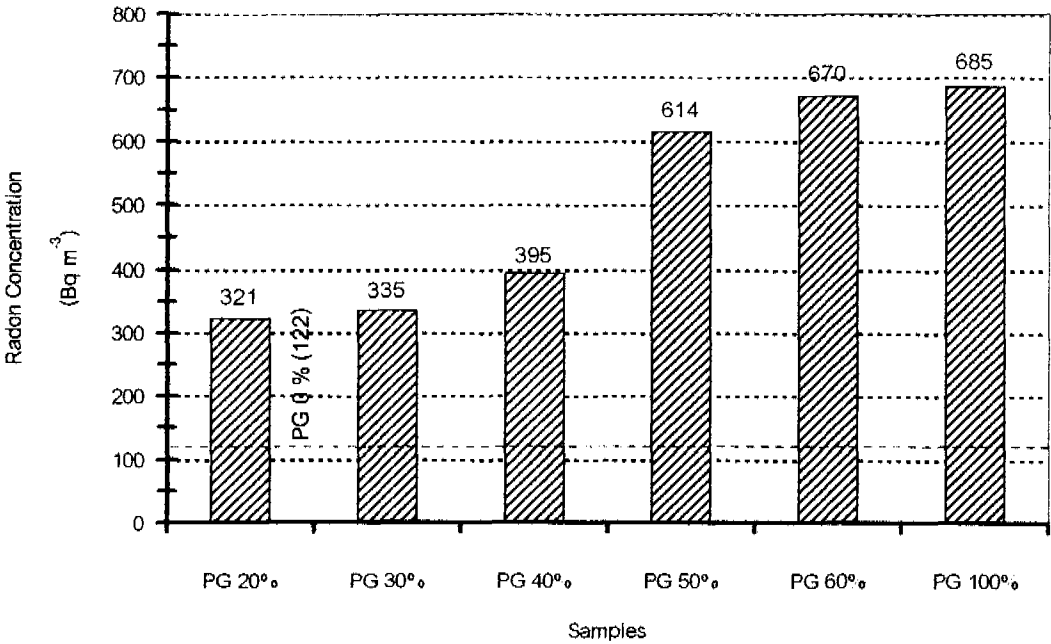
ค่าความเข้มข้นเรดอนเฉลี่ยจริงที่ปล่อยออกมาจากวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีต
ที่มีส่วนผสมของฟอสโฟยิปซัมในปริมาณต่าง ๆ กัน

วัสดุทดสอบ	PG 20	PG 30	PG 40	PG 50	PG 60	PG 100
ค่าเฉลี่ยที่วัดได้ (Bq m ⁻³)	338 ± 27	352 ± 26	412 ± 28	631 ± 33	687 ± 34	702 ± 33
ค่าเฉลี่ยจริง (Bq m ⁻³)	321 ± 12	335 ± 11	395 ± 13	604 ± 18	670 ± 19	685 ± 18

หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 13 ม.ค. 2549.

ภาพที่ 4.4

ความเข้มข้นก๊าซเรดอนโดยเฉลี่ยที่ปล่อยออกมาจากวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีต
ที่มีส่วนผสมของฟอสโฟยิปซัมในปริมาณต่าง ๆ กัน



หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 13 ม.ค. 2549.

จากผลการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซเรดอน ในวัสดุทดสอบคอนกรีตที่ผสมฟอสโฟยิปซัม สามารถนำผลที่ได้ไปใช้คำนวณหาอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบดังกล่าวได้ตามสมการที่ 2.15 โดยพิจารณาร่วมกับข้อมูลในการทดลอง ดังตารางที่ 4.7

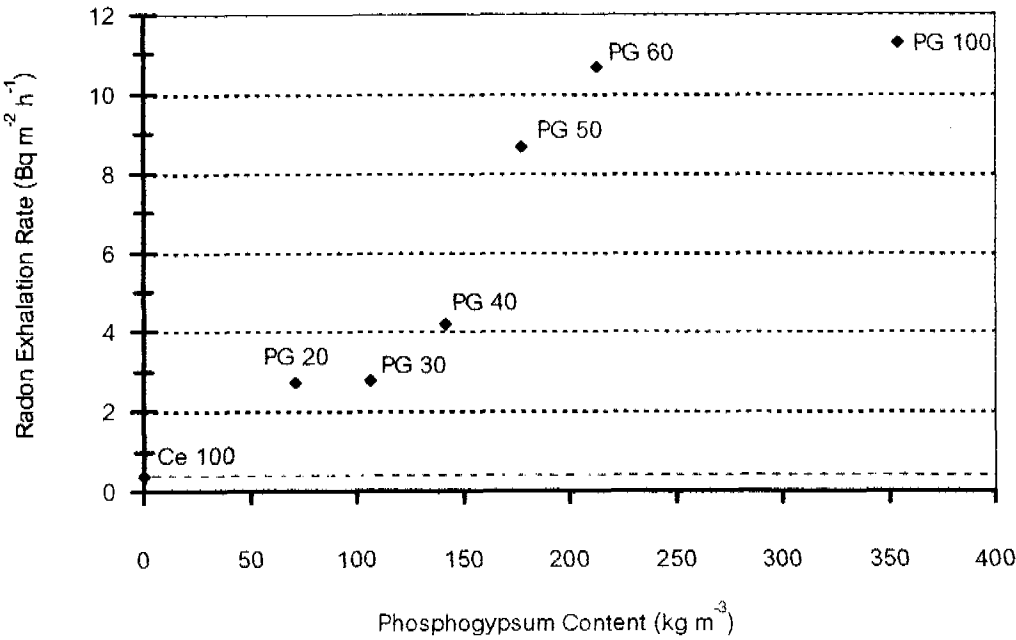
ตารางที่ 4.7
การคำนวณหาอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนของวัสดุทดสอบคอนกรีต
ที่ผสมฟอสโฟยิปซัมในปริมาณต่าง ๆ

วัสดุ	ค่าเรดอนเฉลี่ยจริง (C) (Bq m ⁻³)	ระยะเวลา (t) (ชั่วโมง)	λt	อัตราการปล่อยก๊าซเรดอน (Bq m ⁻² h ⁻¹)
PG 20	321 ± 12	749	5.662	2.736
PG 30	335 ± 11	795	6.010	2.774
PG 40	395 ± 13	745	5.632	4.170
PG 50	604 ± 18	846	6.395	8.655
PG 60	670 ± 19	821	6.206	10.679
PG 100	685 ± 18	813	6.146	11.294

เมื่อ ค่าคงที่การสลายตัวของเรดอน (λ) = 7.56×10^{-3} ต่อชั่วโมง
หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 13 ม.ค. 2549.

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบ กับ ปริมาณฟอสโฟยิปซัมที่ผสมลงไป สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.5

ภาพที่ 4.5
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนกับปริมาณฟอสโฟยิปซัม
ที่ผสมลงในวัสดุคอนกรีตทดสอบ



จากตารางที่ 4.7 ภาพที่ 4.4 และภาพที่ 4.5 สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

1. อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟอสฟอริปซัมที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แม้กระทั่ง PG 20 ซึ่งมีปริมาณฟอสฟอริปซัมผสมน้อยที่สุด ก็ยังมีอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนมากกว่าคอนกรีตธรรมดาถึง 7 เท่า

2. ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยก๊าซเรดอน กับปริมาณฟอสฟอริปซัมที่ผสมลงไปในวัสดุทดสอบ คล้ายคลึงกับการเพิ่มแบบเอกซ์โปเนนเชียล (exponential) โดยการเพิ่มปริมาณฟอสฟอริปซัมในช่วงแรก ($50 - 150 \text{ kg m}^{-3}$) อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบจะเพิ่มขึ้นทีละน้อย (ความชันน้อย) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อย ๆ ($150 - 230 \text{ kg m}^{-3}$) อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบกลับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (ความชันมาก) แล้วจึงค่อย ๆ ลดลงอีกครั้งหนึ่ง

4.1.4 ผลการตรวจสอบปัจจัยเกี่ยวเนื่องอื่น ๆ ซึ่งอาจมีผลต่ออัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบในการทดลอง

ในการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบนั้น มีปัจจัยมากมายที่ส่งอิทธิพลต่อความสามารถในการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุนั้น ๆ ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ ปัจจัยภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน ปริมาณเรดอนในบรรยากาศ เป็นต้น โดยปัจจัยภายนอกเหล่านี้ สามารถกำหนดเป็นตัวแปรควบคุมได้ และสามารถควบคุมได้ในห้องปฏิบัติการ แต่ยังมีปัจจัยอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ หรือ ปัจจัยภายใน อันได้แก่ ความพรุน ปริมาณเรเดียมภายในวัสดุ เป็นต้น

ในการวิจัยนี้ ได้แบ่งการทดลองเพื่อตรวจสอบปัจจัยภายใน ซึ่งอาจมีผลต่ออัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบ เป็น 3 การทดลอง ดังนี้

1. การตรวจสอบความพรุนของวัสดุทดสอบ
2. การวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนโดยมวล
3. การวัดปริมาณเรเดียมจากวัสดุทดสอบ

โดยผลที่ได้จากการทดลอง จะถูกนำไปพิจารณาร่วมกับผลการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบ (หัวข้อ 4.1.1 หัวข้อ 4.1.2 และหัวข้อ 4.1.3) เพื่อหาข้อสรุปที่เหมาะสมและสมเหตุสมผลมากที่สุด

1. การตรวจสอบความพรุนของวัสดุทดสอบ

จากผลการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบที่ผสมเถ้าลอยในปริมาณต่าง ๆ กัน พบว่า ถึงแม้แนวโน้มอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเถ้าลอยที่ผสมลงไปเพิ่มมากขึ้น แต่ก็มีวัสดุทดสอบบางส่วนที่ให้ผลต่างออกไป เช่น FA 20 ควรจะมีอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนน้อยกว่าวัสดุทดสอบอื่น แต่กลับพบว่ามียัตรามากกว่า FA 30 และ FA 40 ซึ่งตั้งสมมติฐานเบื้องต้นไว้ว่า สาเหตุน่าจะเกิดจากความพรุนภายในวัสดุที่มีไม่เท่ากัน

ดังนั้น จึงได้ทำการทดลองตรวจสอบความพรุนของวัสดุคอนกรีตทดสอบ ที่ผสมเถ้าลอย (FA 20 FA 30 FA 40 FA 50 และ FA 60) และวัสดุคอนกรีตทดสอบที่ไม่ผสมเถ้าลอย (Ce 100) โดยวิธีการแทนที่น้ำ (ดูรายละเอียดในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2.2) ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

- 1) นำวัสดุที่จะทดสอบความพรุนไปแช่น้ำจนกระทั่งอิ่มตัว (ประมาณ 21 วัน)
- 2) เมื่อครบกำหนด นำวัสดุขึ้นมาชั่งน้ำหนัก โดยน้ำหนักที่ได้จะเป็นน้ำหนักมวลเปียก (wet mass, m_{wet})
- 3) นำวัสดุทดสอบที่ชั่งน้ำหนักมวลเปียกเสร็จแล้ว เข้าตู้อบ เพื่ออบให้น้ำระเหยออกจากวัสดุให้หมด โดยอบไว้ที่ความร้อน 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) หลังจากทีอบวัสดุทดสอบเสร็จแล้ว จึงนำออกมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง โดยน้ำหนักที่ได้จะเป็นน้ำหนักมวลแห้ง (dry mass, m_{dry})

ภาพที่ 4.6
การระเหยน้ำออกจากวัสดุโดยใช้ตู้อบ



หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 5 ก.พ. 2549.

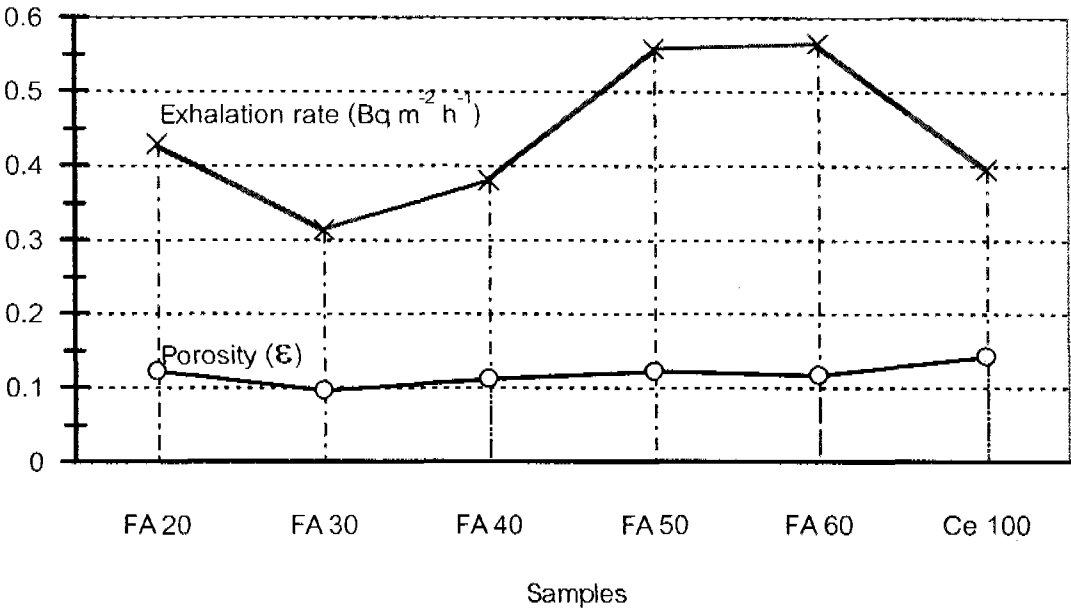
หลังจากทดลองหาค่าความพรุนของวัสดุทดสอบตามกระบวนการขั้นต้นแล้ว จึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความพรุนตามสมการที่ 2.20 ได้ผลดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8
ค่าความพรุนที่วัดได้จากวัสดุทดสอบ

ลำดับ	วัสดุทดสอบ	น้ำหนักมวลเปียก (kg)	น้ำหนักมวลแห้ง (kg)	ค่าความพรุน (%)
1	FA 20	3.990	3.750	0.120
2	FA 30	4.130	3.940	0.095
3	FA 40	3.970	3.750	0.110
4	FA 50	4.090	3.850	0.120
5	FA 60	4.050	3.820	0.115
6	Ce 100	4.180	3.900	0.140

ความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w) เท่ากับ 1000 kg m^{-3}
หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 5 ก.พ. 2549.

ภาพที่ 4.7
ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนของวัสดุทดสอบ



หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 5 ก.พ. 2549.

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.7 จะพบว่าอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก กับ ความพรุนของวัสดุทดสอบมีความสัมพันธ์กันอย่างเห็นได้ชัด คือเมื่อวัสดุมีความพรุนมาก อัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกก็มีมากขึ้นด้วย จากเหตุผลดังกล่าวนี้ อาจสามารถอธิบายกรณีของวัสดุทดสอบ FA 20 ที่มีอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าวัสดุทดสอบอื่นได้ กล่าวคือ ความพรุนของ FA 20 มีค่าเท่ากับ 0.120 ซึ่งมากกว่า FA 30 และ FA 40 ซึ่งมีค่าความพรุนเท่ากับ 0.095 และ 0.110 ตามลำดับ ดังนั้นแทนที่จะมีอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่า กลับมีอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่า FA 30 และ FA 40 ในขณะที่ FA 50 ซึ่งมีค่าความพรุนเท่ากัน มีอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่า FA 20

เห็นได้ชัดเจนว่า ปัจจัยตัวหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัสดุก่อสร้าง คือ ความพรุนของวัสดุ แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณการผสมแกลบยก็มีอิทธิพลต่ออัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัสดุทดสอบเช่นกัน ดังเห็นได้จากตัวอย่าง FA 20 FA 50 และ FA 60 ที่ถึงแม้ FA 60 จะมีความพรุนน้อยกว่า FA 20 และ FA 50 แต่ก็ยังมีอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่า

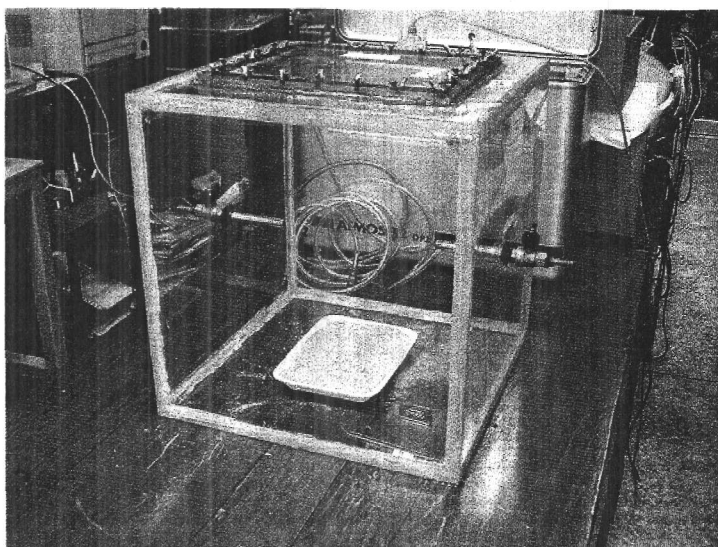
สำหรับในวัสดุทดสอบที่ผสมฟอสโฟอิมั้นนั้น เห็นได้อย่างชัดเจนแล้วว่า ปริมาณฟอสโฟอิมั้นมีอิทธิพลต่ออัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัสดุทดสอบอย่างมาก โดยอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัสดุทดสอบจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟอสโฟอิมั้นที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทดสอบความพรุนของวัสดุ

2. การวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยมวล

เพื่อเปรียบเทียบอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากตัวแปรต้นของการทดลอง ซึ่งได้แก่ แกลบย ฟอสโฟอิมั้น และปูนซีเมนต์ ซึ่งวัสดุเหล่านี้อยู่ในรูปของผงละเอียด ไม่มีรูปร่างที่แน่นอน ดังนั้นในการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจึงต้องวัดในหน่วยของมวล โดยมีวิธีการดังนี้

- 1) นำวัสดุทดสอบที่อยู่ในรูปของผงละเอียดมาชั่งน้ำหนัก โดยแบ่งให้มีน้ำหนักเท่า ๆ กันคือ 0.5 กิโลกรัม
- 2) นำวัสดุทดสอบที่ชั่งน้ำหนักแล้ว บรรจุไว้ในกล่องทดลอง แล้วปิดกล่องทดลองให้สนิท
- 3) นำกล่องทดลองที่ปิดสนิทแล้ว ไปทดสอบการรั่วซึมของอากาศ จากนั้นจึงทำการไหลเวียนอากาศภายในกล่องตามกระบวนการ (หัวข้อ 3.2.1)
- 4) นำกล่องทดลองไปตั้งไว้ในสภาวะที่กำหนด จนกว่าจะเข้าสู่สมดุลกัมมันตรังสี (ประมาณ 28 วัน)

ภาพที่ 4.8
การวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนโดยมวล



หมายเหตุ: บันทึกภาพที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2549.

เมื่อครบกำหนดแล้ว จึงนำกล่องทดลองทั้งหมดไปตรวจวัดปริมาณก๊าซเรดอนด้วยเครื่องตรวจวัดก๊าซเรดอน ATMOS 12 dpx ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.9

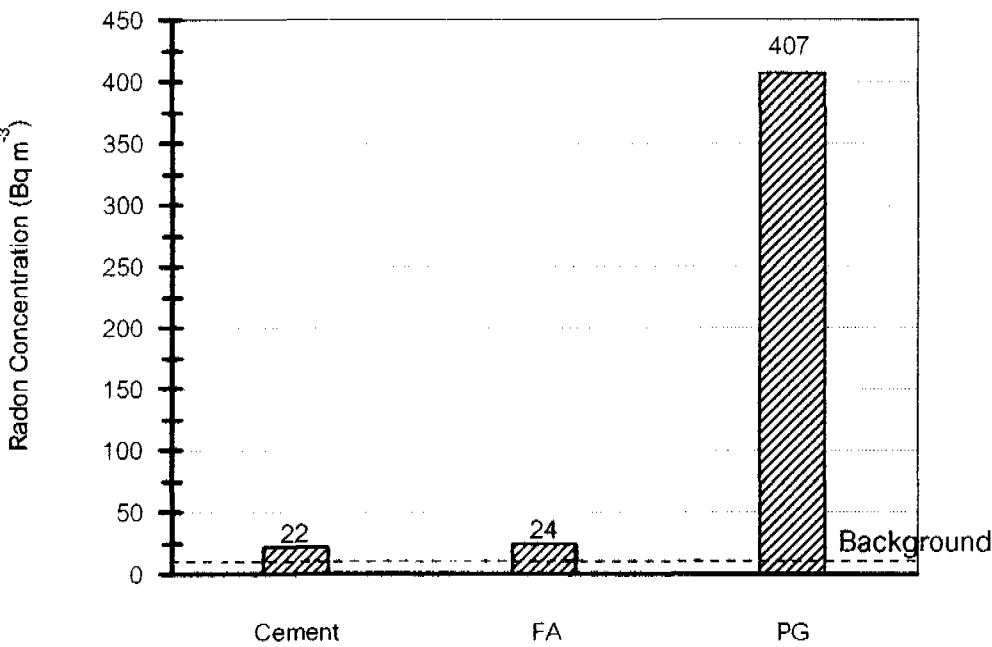
ตารางที่ 4.9
ผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซเรดอนที่ปล่อยจากวัสดุทดสอบในรูปผงละเอียด

ลำดับ	วัสดุทดสอบ	ปริมาณคอนกรีต (kg)	ค่าเรดอนเฉลี่ย (Bq m ⁻³)
1	ปูนซีเมนต์	0.50	22 ± 12
2	เถ้าลอย	0.50	24 ± 10
3	ฟอสโฟิปซัม	0.50	407 ± 27
4	Background	0.50	10 ± 3

หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 20 ม.ค. 2549.

จากตารางที่ 4.9 เมื่อค่าเรดอนพื้นหลังมาลบออกจากค่าเฉลี่ย ก็จะได้ค่าความเข้มข้นก๊าซเรดอนจริงที่ปล่อยออกมาจากวัสดุทดสอบ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.9

ภาพที่ 4.9
ความเข้มข้นก๊าซเรดอนโดยเฉลี่ยที่ปล่อยออกมาจากวัสดุทดสอบในรูปของผงละเอียด



หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 20 ม.ค. 2549.

เมื่อนำค่าเรดอนพื้นหลังลบออกจากค่าเรดอนที่ตรวจวัดได้ ก็จะได้เป็นค่าเรดอนจริงที่ปล่อยออกมาจากวัสดุทดสอบ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนโดยมวลได้ตามสมการที่ 2.11 ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10
อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนโดยมวลของวัสดุทดสอบในรูปผงละเอียด

วัสดุ	ค่าเรดอนเฉลี่ยจริง (C) (Bq m ⁻³)	มวล (M) (kg)	λv	อัตราการปล่อยก๊าซเรดอน (Bq kg ⁻¹ h ⁻¹)
Cement	12 ± 9	0.500	4.45×10^{-4}	0.0106
FA	14 ± 7	0.500	4.45×10^{-4}	0.0124
PG	397 ± 24	0.500	4.45×10^{-4}	0.3535

เมื่อ ค่าคงที่การสลายตัวของเรดอน (λ) = 7.56×10^{-3} ต่อชั่วโมง

ปริมาตรกล่องทดลอง (V) = 0.0589 ลูกบาศก์เมตร

หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 20 ม.ค. 2549.

จากตารางที่ 4.10 จะพบว่าฟอสโฟอัมมีอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนโดยมวลสูงที่สุด ซึ่งสูงกว่าปูนซีเมนต์ถึง 33 เท่า ดังนั้น เมื่อนำไปเป็นส่วนผสมในคอนกรีตแล้ว จึงมีผลทำให้คอนกรีตนั้นมีอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป ในขณะที่ผงเถ้าลอยมีอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนโดยมวลมากกว่าผงคอนกรีต 1.16 เท่า แต่เมื่อนำไปเป็นส่วนผสมในคอนกรีตแล้ว วัสดุนั้นกลับมีอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนน้อยกว่าแผ่นคอนกรีตธรรมดาทั่วไป แต่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมตั้งแต่ 40 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ซึ่งเป็นไปได้ว่า การนำเถ้าลอยไปเป็นส่วนผสมของคอนกรีต เป็นการทำให้เสียปริมาณคอนกรีตไปส่วนหนึ่ง อีกทั้งเถ้าลอยยังมีลักษณะเป็นผงละเอียดกว่าคอนกรีต ดังนั้นจึงสามารถแทรกเข้าไปอุดรูพรุนภายในเนื้อคอนกรีตได้ ทำให้เกิดขวางการแพร่ของก๊าซเรดอนสู่บรรยากาศภายนอก จนเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถึงระดับหนึ่ง จึงจะมีอิทธิพลต่อการเพิ่มอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากคอนกรีต

3. การวัดปริมาณเรเดียมในวัสดุทดสอบ

ถึงแม้ว่าการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนของวัสดุ จะสามารถบ่งชี้ว่าวัสดุนั้นปล่อยก๊าซเรดอนมากน้อยกว่ากัน แต่ไม่สามารถบ่งบอกถึงปริมาณเรเดียมซึ่งเป็นต้นกำเนิดก๊าซเรดอนภายในวัสดุนั้น ๆ ได้ เนื่องจากอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุใด ๆ ย่อมขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความพรุน ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น ดังนั้นเพื่อที่จะทราบถึงความสามารถในการผลิตก๊าซเรดอนของวัสดุนั้น จึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัดสารกัมมันตรังสีเรเดียมที่เจือปนอยู่ภายใน

วัสดุก่อสร้างทุกชนิดจะสามารถแผ่รังสีสู่ธรรมชาติได้ 2 ทาง ทางแรกคือ การแผ่รังสีแกมมา ซึ่งจะมาจาก โพแทสเซียม - 40 (^{40}K) เรเดียม - 226 (^{226}Ra) และ ทอเรียม - 232 (^{232}Th) ภายในวัสดุเป็นหลัก อีกทางหนึ่งคือ การปล่อยก๊าซเรดอนที่เกิดจากการสลายตัวของเรเดียม เมื่อมนุษย์หายใจรับก๊าซนี้เข้าสู่ร่างกาย ก็จะทำให้เกิดการแผ่รังสีสู่ภายในร่างกาย (internal exposure)

ในงานวิจัยนี้ ได้วัดสารกัมมันตรังสี โพแทสเซียม - 40 (^{40}K) เรเดียม - 226 (^{226}Ra) และ ทอเรียม - 232 (^{232}Th) จากวัสดุทดสอบทั้ง 3 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอยลิกไนต์ และฟอสโฟอัมมี ด้วยเครื่องตรวจวัดรังสีแกมมา (gamma spectrometer) ได้ผลดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11

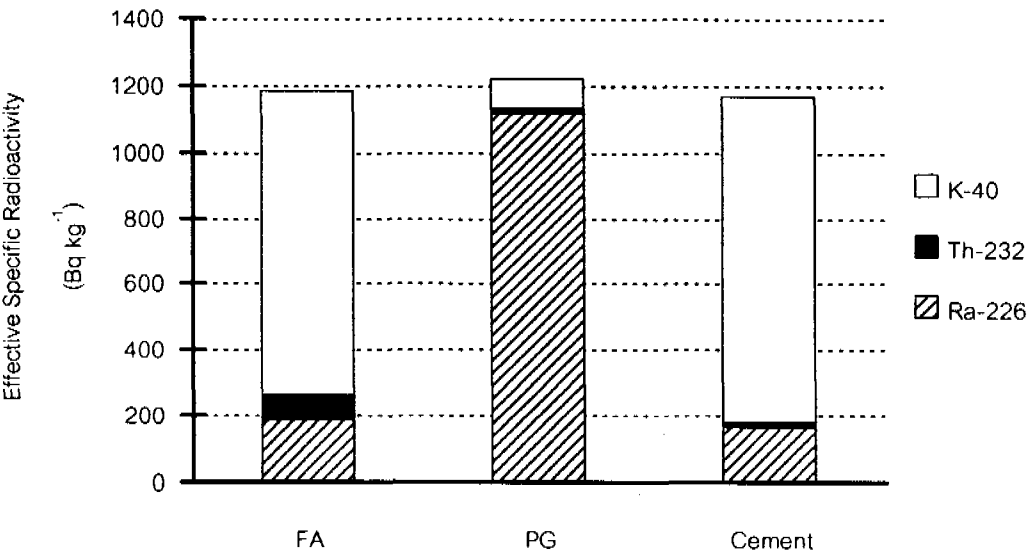
ผลการตรวจวัดสารกัมมันตรังสีเรเดียม ทอเรียม และโพแทสเซียมในวัสดุทดสอบ

Effective Specific Radioactivity		Weight (g)	Net Integral (cts)	Intensity	Activity (Bq kg ⁻¹)	SD
Cement	Ra 226	249.82	1090	0.0351	164.92	6.14
	Th 232	249.82	271	0.2660	12.66	1.60
	K 40	249.82	983	0.1067	988.42	13.33
FA	Ra 226	259.16	1924	0.0351	183.71	9.08
	Th 232	259.16	1779	0.2660	80.13	2.66
	K 40	259.16	5620	0.1067	921.79	13.05
PG	Ra 226	201.64	9120	0.0351	1119.24	20.32
	Th 232	201.64	194	0.2660	11.23	3.15
	K 40	201.64	413	0.1067	87.06	9.26

หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 5 มี.ค. 2549.

ภาพที่ 4.10

ความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีเรเดียม ทอเรียม และโพแทสเซียมในวัสดุทดสอบ



หมายเหตุ: ผลการทดลองโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 5 มี.ค. 2549.

ภาพที่ 4.10 แสดงกัมมันตภาพนิวไคลด์กัมมันตรังสี ในปูนซีเมนต์ แก้วลอย และฟอสฟอริปซัม จะพบว่าฟอสฟอริปซัมมีปริมาณเรเดียมสูงถึง $1119.24 \text{ Bq kg}^{-1}$ มากกว่าปูนซีเมนต์ถึง 6 เท่า ส่วนในแก้วลอยพบว่ามีปริมาณเรเดียมอยู่ $183.71 \text{ Bq kg}^{-1}$ มากกว่าคอนกรีตซึ่งมีปริมาณเรเดียมอยู่ $164.92 \text{ Bq kg}^{-1}$ ในทางกลับกันพบว่ามีปริมาณของโพแทสเซียมอยู่ในฟอสฟอริปซัมน้อยที่สุดเพียง 9.26 Bq kg^{-1} ในขณะที่แก้วลอย และปูนซีเมนต์พบโพแทสเซียมในปริมาณที่ใกล้เคียงกันคือ $921.79 \text{ Bq kg}^{-1}$ และ $988.42 \text{ Bq kg}^{-1}$ ตามลำดับ สำหรับทอเรียมนั้น พบว่ามีปริมาณน้อยกว่าเรเดียม และโพแทสเซียมในทุกวัสดุ โดยพบในปูนซีเมนต์ แก้วลอย และฟอสฟอริปซัม เป็นปริมาณ 12.66 Bq kg^{-1} 80.13 Bq kg^{-1} และ 11.23 Bq kg^{-1} ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้จะเน้นที่ปริมาณเรเดียมเป็นสำคัญ เนื่องจากเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซเรดอนในวัสดุก่อสร้าง ซึ่งจากการทดลองสามารถเรียงลำดับวัสดุทดสอบ ตามปริมาณเรเดียมที่ปะปนอยู่จากมากไปหาน้อยได้คือ ฟอสฟอริปซัม แก้วลอย และปูนซีเมนต์

4.2 การทดลองที่ 2 : การจำลองผลในอาคารกรณีศึกษาประเภทตึกแถว

การทดลองที่ 2 เป็นการนำผลการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนที่ได้จากการทดลองที่ 1 มาจำลองในอาคารกรณีศึกษาประเภทตึกแถว เพื่อศึกษาลักษณะการแพร่กระจายของก๊าซเรดอนภายในพื้นที่พักอาศัยในอาคารตึกแถวที่มีการใช้วัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีตที่มีส่วนผสมของแก้วลอย และฟอสฟอริปซัม นอกจากนี้ยังใช้ข้อมูลที่ได้จากการจำลองประเมินรังสีที่ผู้พักอาศัยจะได้รับในระยะเวลา 1 ปี ตลอดจนเสนอแนะแนวทางในการลดปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคาร

วัสดุทดสอบที่เลือกมาใช้ในการจำลองในการทดลองที่ 2 มีอยู่ด้วยกัน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ วัสดุประเภทคอนกรีตล้วน (CE 100) วัสดุประเภทคอนกรีตผสมแก้วลอย 50 เปอร์เซ็นต์ (FA 50) และวัสดุประเภทคอนกรีตผสมฟอสฟอริปซัม 50 เปอร์เซ็นต์ (PG 50) สามารถนำเสนอผลและวิเคราะห์ผลการทดลองในกรณีต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการจำลองปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคารประเภทตึกแถว

จากการกำหนดตัวแปรต้น ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว ได้แก่ ปริมาณการผสมแก้วลอย หรือฟอสฟอริปซัม การกั้นผนังภายใน และอัตราการระบายอากาศ ทำให้สามารถแบ่งการศึกษาออกได้เป็นกรณีต่าง ๆ ดังนี้

1. การจำลองปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว : กรณีที่ไม่มีการกั้นผนังภายใน
2. การจำลองปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว : กรณีที่มีการกั้นผนังภายใน
3. การจำลองปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว : กรณีที่ลดระดับการกั้นผนังภายใน

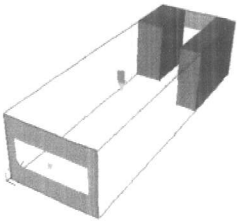
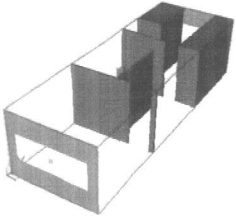
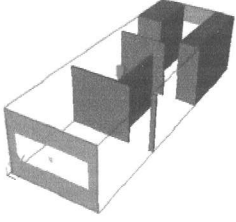
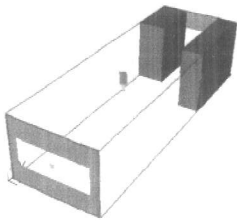
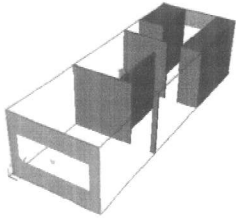
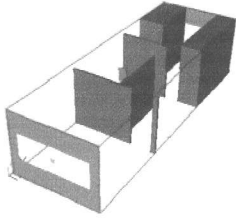
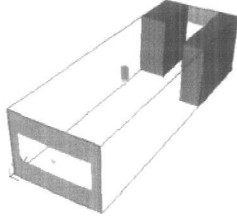
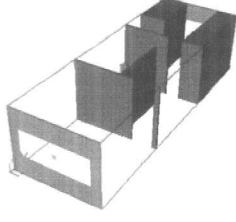
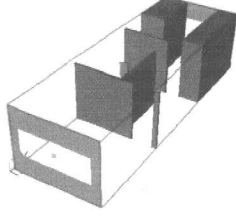
ซึ่งในทุกกรณีจะแบ่งการศึกษาระบายอากาศออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่

1. ระดับต่ำสุด หรือระดับที่ยอมให้ตามมาตรฐานการระบายอากาศ คือ 0.35 ต่อ ชั่วโมง
2. ระดับปรับปรุงที่ 1 เมื่อติดตั้งพัดลมดูดอากาศขนาด 60 CFM คือ 0.70 ต่อ ชั่วโมง
3. ระดับปรับปรุงที่ 2 เมื่อติดตั้งพัดลมดูดอากาศขนาด 90 CFM คือ 1.05 ต่อ ชั่วโมง

ดังนั้น ในแต่ละกรณีของการใช้วัสดุทดสอบ จึงสามารถแบ่งกรณีศึกษาได้ 9 แบบ ดังภาพที่ 4.11 รวมทั้งสิ้น 27 แบบจำลอง โดยในทุกกรณีสมมติให้การไหลของอากาศภายในห้องเป็นแบบลามินา (laminar airflow)

ภาพที่ 4.11

แบบจำลองการแพร่กระจายก๊าซเรดอนของอาคารตึกแถว ในแต่ละวัสดุทดสอบ

		ไม่กั้นผนังภายใน	กั้นผนังภายใน	ลดระดับการกั้นผนังภายใน
อัตราการระบายอากาศ (ต่อชั่วโมง)	0.35			
	0.70			
	1.05			

หมายเหตุ: จากการออกแบบวิจัย, 2549.

1. ผลการจำลองปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว : กรณีที่ไม่มีการกั้นผนังภายใน

การจำลองการแพร่กระจายก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว กรณีที่ไม่มีการกั้นผนังภายใน มีทั้งสิ้น 9 กรณี โดยค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นในการจำลอง และผลความเข้มข้นโดยเฉลี่ยที่ได้จากการจำลอง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12

ผลการจำลองการแพร่กระจายก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว
กรณีที่ไม่มีผนังกั้นภายใน

		Source Material	Area (m ²)	Exhalation rate (Bq m ⁻² s ⁻¹)	Flow rate (m ³ s ⁻¹)	Simulate (Bq m ⁻³)	Estimate (Bq m ⁻³)
Air change per hour	0.35	CE 100	145.72	1.12×10^{-4}	0.014	1.022	1.141
		FA 50	145.72	1.52×10^{-4}	0.014	1.387	1.548
		PG 50	145.72	2.40×10^{-3}	0.014	21.900	21.450
	0.70	CE 100	145.72	1.12×10^{-4}	0.028	0.588	0.576
		FA 50	145.72	1.52×10^{-4}	0.028	0.798	0.782
		PG 50	145.72	2.40×10^{-3}	0.028	12.590	12.350
	1.05	CE 100	145.72	1.12×10^{-4}	0.042	0.371	0.385
		FA 50	145.72	1.52×10^{-4}	0.042	0.503	0.523
		PG 50	145.72	2.40×10^{-3}	0.042	7.945	8.260

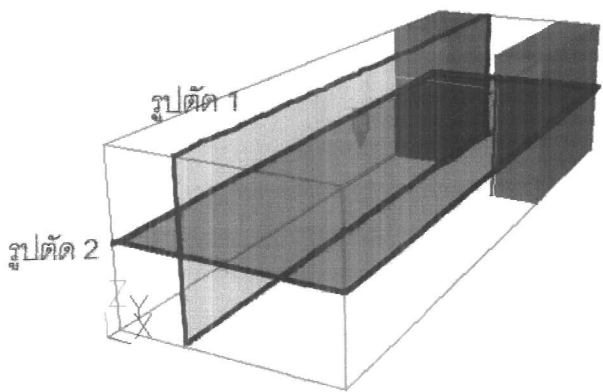
จากตารางที่ 4.12 จะพบว่าค่าที่จำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (simulate value) มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ (calculate value) ค่อนข้างมาก แสดงว่าผลที่ได้จากการจำลองมีความถูกต้องค่อนข้างมาก ซึ่งสามารถนำมาอธิบายการกระจายของก๊าซเรดอนได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

1) กรณีที่มีการระบายอากาศต่ำที่สุด (0.35 ACH)

ผลการทดสอบแบบจำลองอาคารตึกแถวที่กำหนดค่าอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่าง ได้แก่ CE 100 FA 50 และ PG 50 โดยกำหนดอัตราการระบายอากาศให้มีค่าเท่ากับ 0.35 ต่อชั่วโมง สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.12

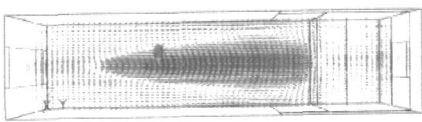
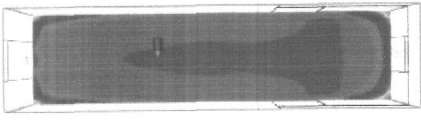
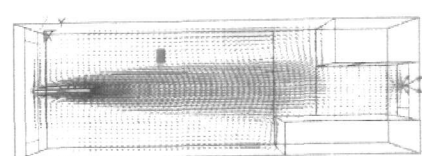
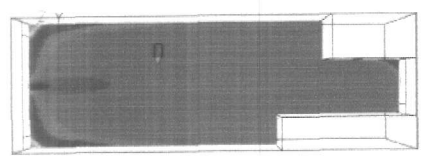
ภาพที่ 4.12

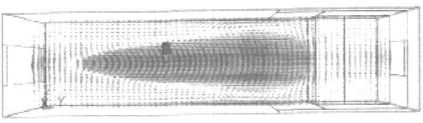
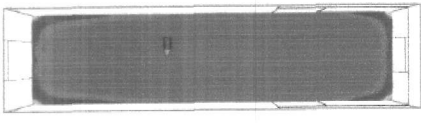
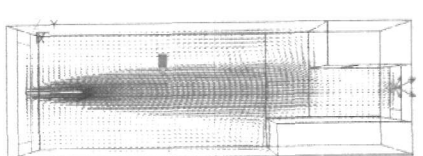
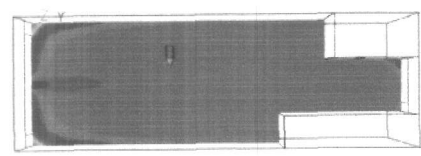
ระดับความเข้มข้นเฉลี่ยก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว กรณีไม่มีการกั้นผนังภายใน เมื่ออัตราการระบายอากาศเท่ากับ 0.35 ต่อชั่วโมง



วัสดุทดสอบ : CE 100		Rn (Bq m ⁻³)	
	แนวการไหลของอากาศ	ระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอน	
รูปตัด 1			4.00E+00 3.747E+00 3.493E+00 3.240E+00 2.987E+00 2.733E+00 2.480E+00 2.227E+00 1.973E+00 1.720E+00 1.467E+00 1.213E+00 9.60E-01 7.067E-01 4.533E-01 2.00E-01
รูปตัด 2			
ค่าเฉลี่ย ณ ระดับ 1.5 เมตรจากพื้น		1.022	Bq m ⁻³
ค่าที่วัดได้ ณ จุดวัด		0.934	

ภาพที่ 4.12 (ต่อ)

	วัสดุทดสอบ : FA 50		Rn (Bq m ⁻³)
	แนวการไหลของอากาศ	ระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอน	
รูปตัด 1			5.500E+00 5.147E+00 4.793E+00 4.440E+00 4.087E+00 3.733E+00 3.380E+00 3.027E+00 2.673E+00
รูปตัด 2			2.320E+00 2.967E+00 1.613E+00 1.260E+00 9.067E-01 5.533E-01 2.000E-01
ค่าเฉลี่ย ณ ระดับ 1.5 เมตรจากพื้น		1.387	Bq m ⁻³
ค่าที่วัดได้ ณ จุดวัด		1.261	

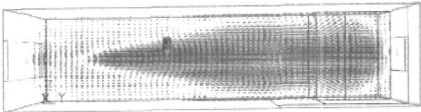
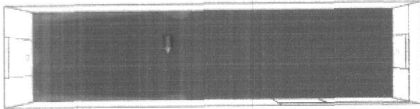
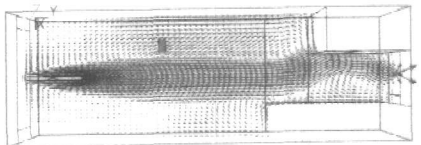
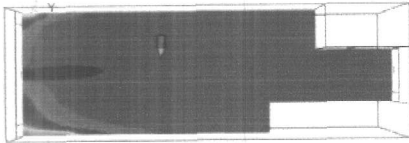
	วัสดุทดสอบ : PG 50		Rn (Bq m ⁻³)
	แนวการไหลของอากาศ	ระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอน	
รูปตัด 1			9.000E+01 8.413E+01 7.827E+01 7.240E+01 6.653E+01 6.067E+01 5.480E+01 4.893E+01 4.307E+01
รูปตัด 2			3.720E+01 3.133E+01 2.547E+01 1.960E+01 1.373E+01 7.867E+00 2.000E+00
ค่าเฉลี่ย ณ ระดับ 1.5 เมตรจากพื้น		21.90	Bq m ⁻³
ค่าที่วัดได้ ณ จุดวัด		19.91	

จากภาพที่ 4.12 แบ่งระนาบการพิจารณาออกเป็น 2 ระนาบตามแนวยาวของห้อง ซึ่ง จะพบว่าลักษณะการไหลของอากาศในแบบจำลองทั้ง 3 แบบ มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยกระแส ลมภายในห้องเกิดจากการแลกเปลี่ยนอากาศ ที่กำหนดไว้ในอัตรา 0.35 ต่อชั่วโมง ทำให้ภายใน ห้องมีความเร็วลมโดยเฉลี่ย 0.025 เมตรต่อวินาที ซึ่งความเร็วในระดับดังกล่าวมนุษย์ไม่อาจสังเกต ได้ แต่อาจรู้สึกอึดอัด หรือไม่สบายตัว และเมื่อพิจารณาการไหลของอากาศก็จะพบว่า จะเกิด กระแสลมวนขึ้นบริเวณหน้าห้องน้ำ และโถงบันได จึงทำให้ไม่เกิดการสะสมของก๊าซเรดอนใน บริเวณดังกล่าว หรือบริเวณใกล้เคียง แต่กลับพบการสะสมของก๊าซเรดอนค่อนข้างมากในบริเวณ มุมของห้อง ใกล้กับช่องเปิดทั้งสองด้าน เช่น ในกรณีของฟอสโฟอิมปัทัม (PG 50) นั้น พบว่ามี ปริมาณการสะสมก๊าซเรดอนอยู่ที่บริเวณมุมห้องทั้งสองด้านประมาณ 30 – 60 Bq m³ ในขณะที่ ค่าเฉลี่ยของทั้งห้องอยู่ที่ 21.90 Bq m³

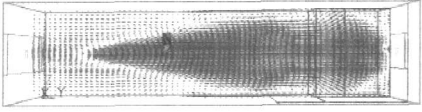
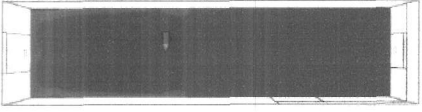
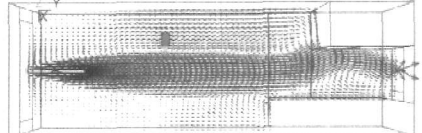
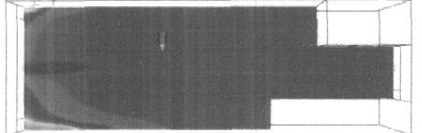
2) กรณีที่ติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาด 60 CFM (0.70 ACH)

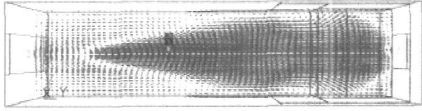
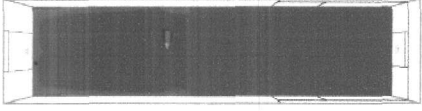
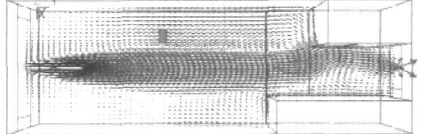
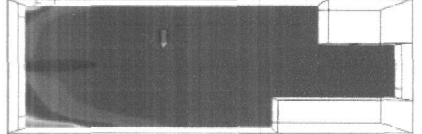
ภาพที่ 4.13

ระดับความเข้มข้นเฉลี่ยก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว กรณีไม่มีการกั้นผนังภายใน เมื่ออัตราการระบายอากาศเท่ากับ 0.70 ต่อชั่วโมง

วัสดุทดสอบ : CE 100			Rn (Bq m ³)
	แนวการไหลของอากาศ	ระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอน	
รูปตัด 1			3.000E+00
			2.807E+00
			2.613E+00
			2.420E+00
			2.227E+00
			2.033E+00
			1.840E+00
			1.647E+00
			1.453E+00
			1.260E+00
รูปตัด 2			1.067E+00
			8.733E-01
			6.800E-01
			4.867E-01
			2.933E-01
			1.000E-01
ค่าเฉลี่ย ณ ระดับ 1.5 เมตรจากพื้น		0.588	Bq m ³
ค่าที่วัดได้ ณ จุดวัด		0.507	

ภาพที่ 4.13 (ต่อ)

	วัสดุทดสอบ : FA 50		Rn (Bq m ⁻³)
	แนวการไหลของอากาศ	ระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอน	
รูปตัด 1			3.800E+00 3.557E+00 3.313E+00 3.070E+00 2.827E+00 2.583E+00 2.340E+00 2.097E+00
รูปตัด 2			1.853E+00 1.610E+00 1.367E+00 1.123E+00 8.80E-01 6.367E-01 3.933E-01 1.500E-01
ค่าเฉลี่ย ณ ระดับ 1.5 เมตรจากพื้น		0.798	Bq m ⁻³
ค่าที่วัดได้ ณ จุดวัด		0.680	

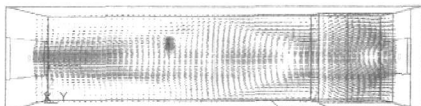
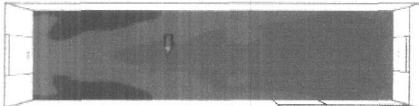
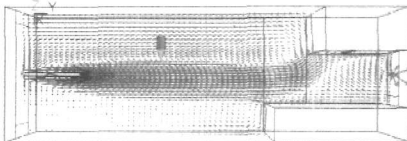
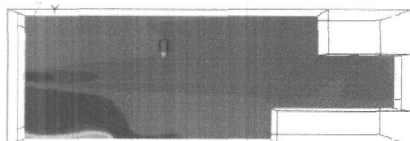
	วัสดุทดสอบ : PG 50		Rn (Bq m ⁻³)
	แนวการไหลของอากาศ	ระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอน	
รูปตัด 1			6.000E+01 5.617E+01 5.233E+01 4.850E+01 4.467E+01 4.083E+01 3.700E+01 3.317E+01
รูปตัด 2			2.933E+01 2.550E+01 2.167E+01 1.783E+01 1.400E+01 1.017E+01 6.333E+00 2.500E+00
ค่าเฉลี่ย ณ ระดับ 1.5 เมตรจากพื้น		12.59	Bq m ⁻³
ค่าที่วัดได้ ณ จุดวัด		10.86	

ภาพที่ 4.13 เมื่อเพิ่มอัตราการระบายอากาศเป็น 0.70 ต่อชั่วโมง หรือ 2 เท่าของระดับระบายอากาศต่ำสุด โดยการติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาด 60 CFM เข้าไปที่ปลายห้อง พบว่าในพื้นที่ส่วนใหญ่ของห้อง ลมจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 0.08 – 0.12 เมตรต่อวินาที และเกิดการวนของอากาศขึ้นบริเวณกลางห้องจนถึงท้ายห้อง ทำให้มีการสะสมของก๊าซเรดอนน้อยมากในทางกลับกัน พบว่าบริเวณมุมห้องใกล้กับช่องทางลมเข้า มีลักษณะเป็นพื้นที่อับลม ทำให้เกิดการสะสมของก๊าซเรดอนได้ค่อนข้างมากในบริเวณนั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความเข้มข้นก๊าซเรดอนโดยเฉลี่ยของทั้งห้อง พบว่าลดลงจากเดิมที่ไม่มีการติดตั้งพัดลมระบายอากาศประมาณ 1.73 เท่า ในทุกกรณี

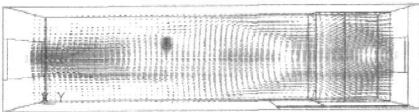
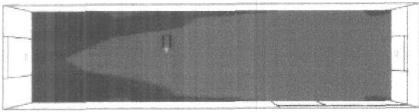
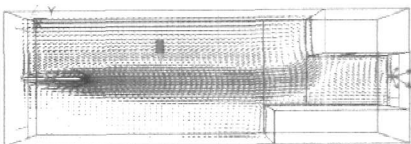
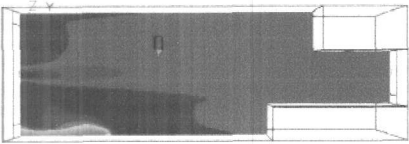
3) กรณีที่ติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาด 90 CFM (1.05 ACH)

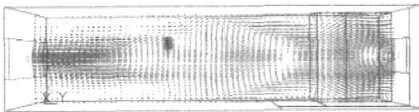
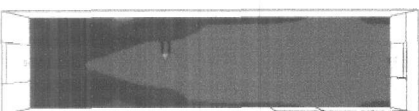
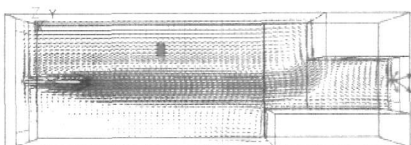
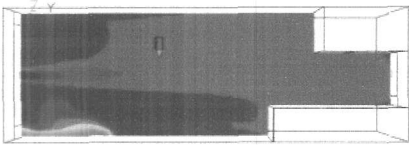
ภาพที่ 4.14

ระดับความเข้มข้นเฉลี่ยก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว กรณีไม่มีการกั้นผนังภายในเมื่ออัตราการระบายอากาศเท่ากับ 1.05 ต่อชั่วโมง

	วัสดุทดสอบ : CE 100		Rn
	แนวการไหลของอากาศ	ระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอน	(Bq m ³)
รูปตัด 1			1.250E+00 1.170E+00 1.089E+00 1.009E+00 9.287E-01 8.483E-01 7.680E-01 6.877E-01 6.073E-01 5.270E-01 4.467E-01 3.663E-01 2.860E-01 2.057E-01 1.253E-01 4.500E-02
รูปตัด 2			
ค่าเฉลี่ย ณ ระดับ 1.5 เมตรจากพื้น		0.371	Bq m ³
ค่าที่วัดได้ ณ จุดวัด		0.336	

ภาพที่ 4.14 (ต่อ)

	วัสดุทดสอบ : FA 50		Rn (Bq m ⁻³)
	แนวการไหลของอากาศ	ระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอน	
รูปตัด 1			1.500E+00 1.402E+00 1.304E+00 1.206E+00 1.108E+00 1.010E+00 9.120E-01 8.140E-01 7.160E-01 6.180E-01 5.200E-01 4.220E-01 3.240E-01 2.260E-01 1.280E-01 3.000E-02
รูปตัด 2			
ค่าเฉลี่ย ณ ระดับ 1.5 เมตรจากพื้น		0.503	Bq m ⁻³
ค่าที่วัดได้ ณ จุดวัด		0.450	

	วัสดุทดสอบ : PG 50		Rn (Bq m ⁻³)
	แนวการไหลของอากาศ	ระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอน	
รูปตัด 1			2.200E+01 2.060E+01 1.920E+01 1.780E+01 1.640E+01 1.500E+01 1.360E+01 1.220E+01 1.080E+01 9.400E+00 8.000E+00 6.600E+00 5.200E+00 3.800E+00 2.400E+00 1.000E+00
รูปตัด 2			
ค่าเฉลี่ย ณ ระดับ 1.5 เมตรจากพื้น		7.945	Bq m ⁻³
ค่าที่วัดได้ ณ จุดวัด		7.374	

ภาพที่ 4.14 แสดงผลการจำลองการกระจายก๊าซเรดอนภายในห้องตึกแถว เมื่อเพิ่มอัตราการระบายอากาศเป็น 1.05 ต่อชั่วโมง หรือ 3 เท่า ของอัตราการระบายอากาศต่ำสุด โดยการติดตั้งพัดลมดูดอากาศขนาด 90 CFM เข้าไปที่ช่องทางลมออก พบว่าในทุกกรณีสามารถลดความเข้มข้นก๊าซเรดอนโดยเฉลี่ยลงได้ประมาณ 2.75 เท่า ของความเข้มข้นเฉลี่ยเดิม เมื่ออัตราการระบายอากาศต่ำสุด แต่ในขณะเดียวกันก็พบว่าพื้นที่อับลมก็มีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้เกิดการสะสมของก๊าซเรดอนในบริเวณดังกล่าวได้มาก

2. ผลการจำลองปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว : กรณีที่มีการกั้นผนังภายใน

การจำลองการแพร่กระจายก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว กรณีที่ไม่มีการกั้นผนังภายใน มีทั้งสิ้น 9 กรณี โดยค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นในการจำลอง และผลความเข้มข้นโดยเฉลี่ยที่ได้จากการจำลอง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13
ผลการจำลองการแพร่กระจายก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว
กรณีที่มีผนังกั้นภายใน

		Source Material	Area (m ²)	Exhalation rate (Bq m ⁻² s ⁻¹)	Flow rate (m ³ s ⁻¹)	Simulate (Bq m ⁻³)	Estimate (Bq m ⁻³)
Air change per hour	0.35	CE 100	145.72	1.12×10^{-4}	0.014	5.827	1.141
		FA 50	145.72	1.52×10^{-4}	0.014	7.902	1.548
		PG 50	145.72	2.40×10^{-3}	0.014	124.900	21.450
	0.70	CE 100	145.72	1.12×10^{-4}	0.028	1.079	0.576
		FA 50	145.72	1.52×10^{-4}	0.028	1.465	0.782
		PG 50	145.72	2.40×10^{-3}	0.028	23.120	12.350
	1.05	CE 100	145.72	1.12×10^{-4}	0.042	0.330	0.385
		FA 50	145.72	1.52×10^{-4}	0.042	0.448	0.523
		PG 50	145.72	2.40×10^{-3}	0.042	7.075	8.260

จากตารางที่ 4.13 จะพบว่าค่าความเข้มข้นก๊าซเรดอนเฉลี่ย ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น ไม่เท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณ ทั้งนี้เนื่องจากว่า สมการที่ใช้ในการคำนวณนั้น ใช้สำหรับแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อน เช่น ห้องที่ไม่มีการกั้นผนังภายใน ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้การคำนวณด้วยสมการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลการจำลองได้ในกรณีนี้ แต่จะทำการพิจารณาจากกราฟความคลาดเคลื่อน และ output file แทน

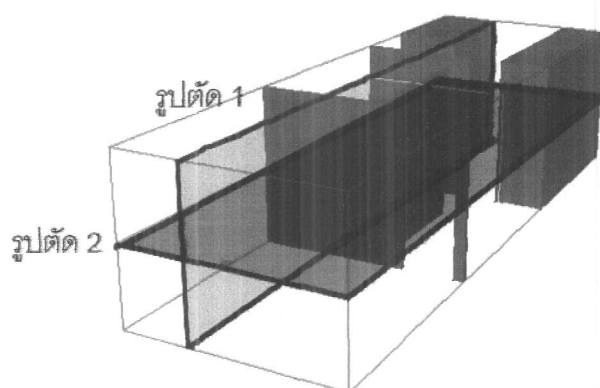
ผลการจำลองการแพร่กระจายของก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว กรณีที่มีการกั้นผนังภายใน ด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล จะพิจารณาใน 2 ระนาบเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีผนังกั้นภายใน โดยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

1) กรณีที่มีการระบายอากาศต่ำที่สุด (0.35 ACH)

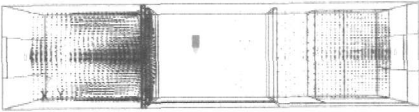
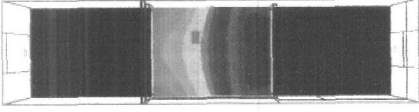
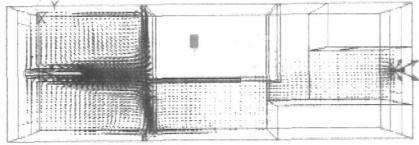
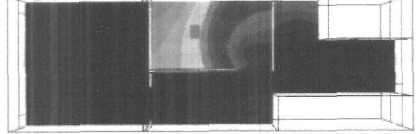
ผลการจำลองการแพร่กระจายก๊าซเรดอน ในอาคารตึกแถวที่มีการกั้นผนังภายใน เมื่อสร้างด้วยวัสดุทดสอบ 3 ตัวอย่าง ได้แก่ CE 100 FA 50 และ PG 50 โดยสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.15

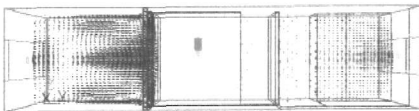
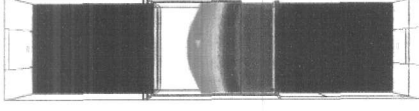
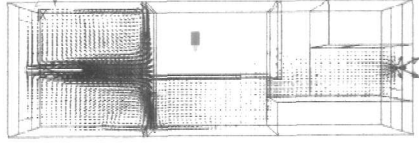
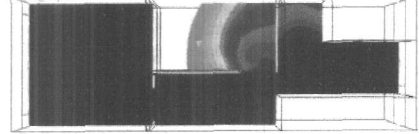
ภาพที่ 4.15

ระดับความเข้มข้นเฉลี่ยก๊าซเรดอนภายในอาคารตึกแถว กรณีที่มีการกั้นผนังภายใน เมื่ออัตราการระบายอากาศเท่ากับ 0.35 ต่อชั่วโมง



ภาพที่ 4.15 (ต่อ)

	วัสดุทดสอบ : CE 100		Rn
	แนวการไหลของอากาศ	ระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอน	(Bq m ⁻³)
รูปตัด 1			4.500E+01 4.200E+01 3.900E+01 3.601E+01 3.301E+01 3.001E+01 2.701E+01 2.401E+01 2.102E+01 1.802E+01 1.502E+01 1.202E+01 9.024E+00 6.026E+00 3.028E+00 3.000E-02
รูปตัด 2			
ค่าเฉลี่ย ณ ระดับ 1.5 เมตรจากพื้น		5.827	Bq m ⁻³
ค่าที่วัดได้ ณ จุดวัด		30.24	

	วัสดุทดสอบ : FA 50		Rn
	แนวการไหลของอากาศ	ระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอน	(Bq m ⁻³)
รูปตัด 1			4.500E+01 4.201E+01 3.901E+01 3.602E+01 3.301E+01 3.003E+01 2.704E+01 2.405E+01 2.105E+01 1.806E+01 1.507E+01 1.207E+01 9.008E+00 6.007E+00 3.093E+00 1.000E-01
รูปตัด 2			
ค่าเฉลี่ย ณ ระดับ 1.5 เมตรจากพื้น		7.902	Bq m ⁻³
ค่าที่วัดได้ ณ จุดวัด		40.47	