บทที่ 2

ผลงานวิจัยและงานเขียนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากก๊าซเรดอนจัดเป็นก๊าซกัมมันตรังสีชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถสลายตัวให้ผลิตภัณฑ์ลูกหลาน และเมื่อเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ผลิตภัณฑ์เหล่านั้นจะเกิดการสลายตัวต่อไป ให้รังสีแอลฟาที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อหรืออวัยวะต่าง ๆ ในร่างกายได้ ดังนั้น การศึกษาเพื่อหาวิธีการลดปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคาร จึงจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงคุณสมบัติของสารกัมมันตรังสี พฤติกรรมของก๊าซเรดอน ตลอดจนทฤษฎี และงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถเรียบเรียงได้เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 กัมมันตภาพรังสี และก๊าซเรดอน

- 2.1.1 การแผ่รังสีในธรรมชาติ
- 2.1.2 ก๊าซเรดอนและคุณสมบัติ
- 2.1.3 กัมมันตภาพรังสีจากวัสดุก่อสร้าง
- 2.1.4 ต้นกำเนิดก๊าซเรดอนในอาคาร: วัสดุก่อสร้าง

2.2 การปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง

- 2.2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง
- 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง
- 2.2.3 กัมมันตรังสี และก๊าซเรดอนจากเถ้าลอย และฟอสโฟยิปซัม

2.3 ปริมาณการได้รับรังสีจากก๊าซเรดอน

- 2.3.1 การประเมินความเสี่ยงจากการได้รับก๊าซเรดอน
- 2.3.2 การคำนวณหาปริมาณรังสีที่ได้รับ
- 2.3.3 มาตรฐานการ และการควบคุมการได้รับก๊าซเรดอนในปัจจุบัน

2.4 อาคารกรณีศึกษา: อาคารประเภทตึกแถว

- 2.4.1 รูปแบบอาคารตึกแถว และการใช้ประโยชน์ในปัจจุบัน
- 2.4.2 การใช้วัสดุก่อสร้างของอาคารประเภทตึกแถว
- 2.4.3 การระบายอากาศภายในอาคารประเภทตึกแถวในประเทศไทย
- 2.4.4 มาตรฐานการระบายอากาศภายในอาคาร

2.5 บทสรุป

2.1 กัมมันตภาพรังสี และก๊าซเรดอน

เนื่องจากก๊าซเรดอนจัดเป็นก๊าซกัมมันตรังสีชนิดหนึ่ง (radioactive gas) เมื่อเกิดการสลายตัวจะให้ผลิตภัณฑ์ลูกหลาน (daughter or progeny) ออกมาเรื่อย ๆ และในระหว่างการสลายตัวก็จะให้รังสีออกมาด้วย ซึ่งรังสีเหล่านี้เองที่ทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของผู้ที่ได้รับ ดังนั้นในการศึกษาอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง จึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงการแผ่รังสีจากสารกัมมันตรังสีด้วย โดยสามารถสรุปทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

2.1.1 การแผ่รังสีในธรรมชาติ

โดยปกติแล้ว ในสภาวะโลกที่เราอยู่ทุกวันนี้ล้วนเต็มไปด้วยกัมมันตภาพรังสี และการแผ่รังสี (radioactive world) ทั้งรังสีจากเปลือกโลก ในบรรยากาศ ในพืชผัก และแม้แต่ในร่างกายของเราเอง ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของต้นกำเนิดรังสีที่มนุษย์ได้รับจากธรรมชาติได้ 2 ประเภทคือ

1. การแผ่รังสีคอสมิก (Cosmic Radiation)

การแผ่รังสีคอสมิก เป็นรังสีที่แผ่มาจากนอกโลก เกิดจากการที่อนุภาคจากอวกาศพุ่งเข้าใส่โลกอย่างต่อเนื่อง เมื่ออนุภาคเหล่านี้ชนกับนิวเคลียสของสสารต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศโลกก็จะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องหลายขั้นตอน ซึ่งในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ก็จะมีการกระจายรังสีออกมาด้วย เรียกรังสีที่เกิดขึ้นนี้ว่า รังสีคอสมิก (cosmic ray) ในระหว่างที่รังสีคอสมิกกระจายผ่านชั้นบรรยากาศลงมา ก็จะสร้างนิวไคลด์กัมมันตรังสีต่าง ๆ ขึ้นมาด้วย โดยเรียกนิวไคลด์เหล่านี้ว่า นิวไคลด์กัมมันตรังสีคอสโมเจนิก (cosmogenic radionuclide) ตัวอย่างที่สำคัญ ได้แก่ ^{3}H ^{7}Be ^{14}C และ ^{22}Na

ปริมาณรังสีที่มนุษย์ได้รับจากรังสีคอสโมเจนิกนั้น ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับรังสีจากแหล่งอื่น ๆ โดยจากรายงานของ UNSCEAR 2000 ได้ประเมินไว้ว่ามนุษย์ได้รับปริมาณรังสีรอบปีจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีคอสโมเจนิกประมาณ 12 ไมโครซีเวิร์ต จาก ^{14}C 0.15 ไมโครซีเวิร์ต จาก ^{22}Na 0.01 ไมโครซีเวิร์ต จาก ^{3}H และ 0.03 ไมโครซีเวิร์ต จาก ^{7}Be

2. การแผ่รังสีบนพื้นโลก (Terrestrial Radiation)

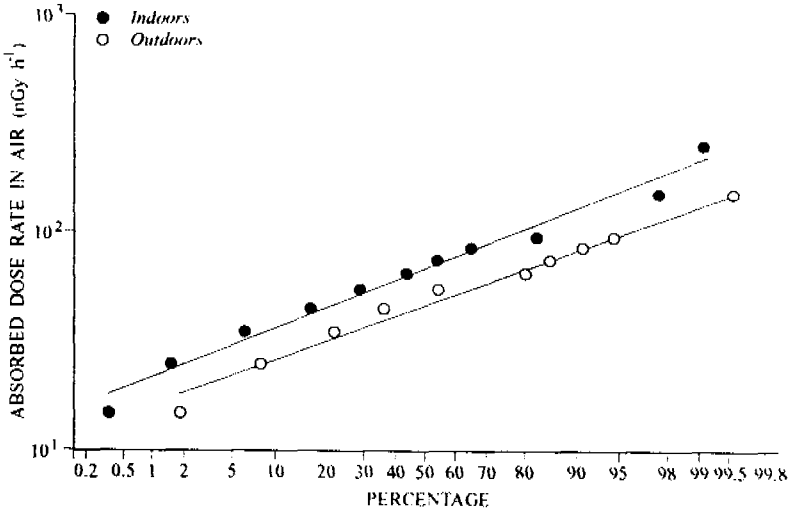
มนุษย์ได้รับรังสีจากการแผ่รังสีบนพื้นโลกในหลายระดับ ทั้งจากสิ่งแวดล้อมรอบตัว และจากการแผ่รังสีภายในร่างกายมนุษย์เอง โดยรังสีที่ได้รับจากภายนอก (external exposure) ส่วนใหญ่จะเป็นการแผ่รังสีแกมมาจากไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียม (uranium series) อนุกรมทอเรียม (thorium series) และจาก โพแทสเซียม-40 (^{40}K) นอกจากนี้ยังมีนิวไคลด์กัมมันตรังสี

ชนิดอื่น ๆ อีก แต่พบในสัดส่วนเล็กน้อย และมีผลต่อร่างกายของมนุษย์และสัตว์ค่อนข้างน้อย เช่น อนุกรมยูเรเนียม-235 (^{235}U series) ^{87}Rb ^{138}La ^{147}Sm เป็นต้น

เมื่อมนุษย์อยู่ภายนอกอาคาร หรือสิ่งกำบัง (outdoor) รังสีจากภายนอกที่มนุษย์จะได้รับ ก็คือ รังสีที่เกิดจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีที่ปะปนอยู่ในดิน หรือจากภูมิประเทศที่มีหินเป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะหินประเภทหินอัคนี เช่น หินแกรนิต หินอ่อน หินตะกอน เป็นต้น แต่เมื่อมนุษย์อยู่ภายในอาคาร หรือมีสิ่งกำบัง (indoor) รังสีแกมมาที่ได้รับเป็นส่วนใหญ่จะมาจากวัสดุก่อสร้าง และโดยปกติแล้วการแผ่รังสีภายในอาคาร จะมากกว่าภายนอกอาคาร อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 2.1

ภาพที่ 2.1

ปริมาณรังสีแกมมาที่ประชากรได้รับจากการแผ่รังสีบนพื้นโลก



ที่มา: UNSCEAR, 2000.

นอกจากมนุษย์จะได้รับรังสีที่มาจากแหล่งกำเนิดรังสีที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ (natural radiation source) แล้ว หลังจากปี พ.ศ. 2437 มนุษย์ก็เริ่มรับรังสีจากแหล่งรังสีที่มนุษย์ทำขึ้นเอง (man-made radiation source) เช่น จากการทดลองอาวุธนิวเคลียร์ จากแหล่งรังสีที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น ทางด้านการแพทย์ พลังงาน และอุตสาหกรรม ซึ่งจากการสำรวจ

ของ NCRP ถึงสัดส่วนการได้รับรังสีจากประชากรในประเทศสหรัฐอเมริกา (ตารางที่ 2.1) พบว่ามีสัดส่วนเป็นไปตามภาพที่ 2.2

ตารางที่ 2.1

ปริมาณรังสีที่ชาวอเมริกันได้รับต่อปี จากรังสีในธรรมชาติ และแหล่งรังสีที่มนุษย์ทำขึ้น

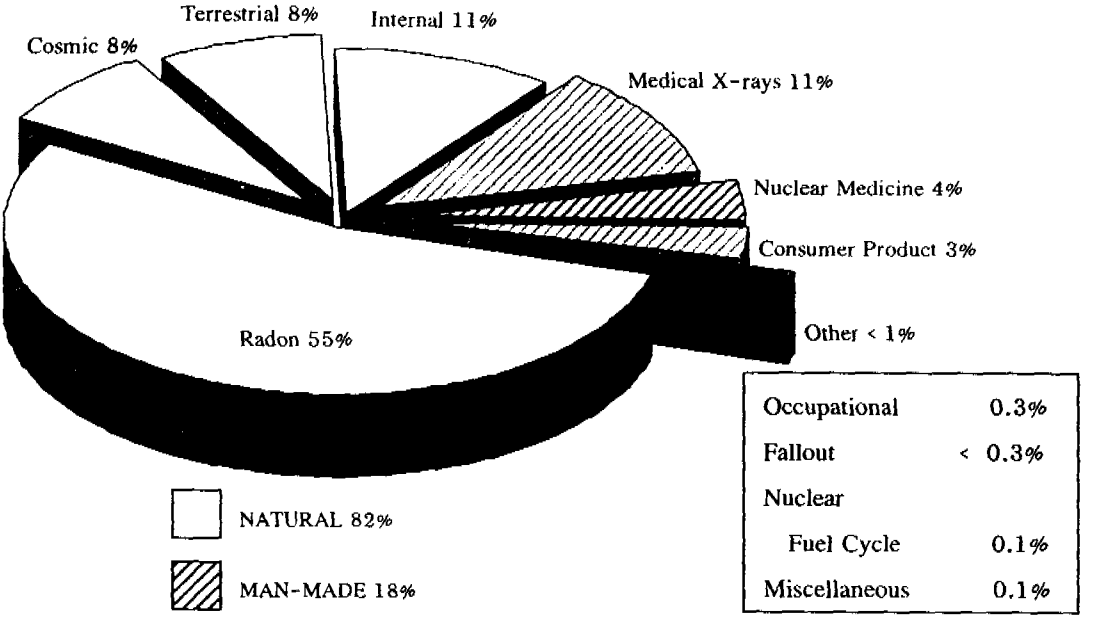
แหล่งรังสี	ปริมาณรังสี (mSv y^{-1})	เปอร์เซ็นต์ของทั้งหมด
แหล่งรังสีในธรรมชาติ		
ก๊าซเรดอน	2.00	55
แหล่งรังสีภายในร่างกาย	0.39	11
แหล่งรังสีจากพื้นดิน	0.28	8
รังสีคอสมิก	0.27	8
รวมปริมาณรังสีที่ได้รับจากธรรมชาติ	2.94	82
แหล่งรังสีที่มนุษย์ทำขึ้น		
รังสีเอกซ์เพื่อการวินิจฉัยโรค	0.39	11
เวชภัณฑ์นิวเคลียร์	0.14	4
อุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ	0.10	3
รวมปริมาณรังสีจากแหล่งรังสีที่มนุษย์ทำขึ้น	0.63	18
รวมทั้งสองแหล่ง	3.57	100

ที่มา: NCRP, 1987. (ดัดแปลง)

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2.1 และภาพที่ 2.2 จะพบว่า รังสีที่มนุษย์ได้รับจากแหล่งกำเนิดในธรรมชาติมีมากกว่าร้อยละ 82 โดยมาจากก๊าซเรดอนกว่าร้อยละ 55 ส่วนรังสีที่เกิดจากแหล่งรังสีที่มนุษย์ทำขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีทางนิวเคลียร์มีเพียงร้อยละ 18 ซึ่งถือว่ามีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับรังสีที่มาจากสิ่งแวดล้อม ดังนั้น จึงควรให้ความสำคัญต่อแหล่งกำเนิดรังสีจากธรรมชาติ โดยเฉพาะจากก๊าซเรดอนซึ่งเป็นก๊าซกัมมันตรังสีที่เกิดจากการสลายตัวของแร่เรเดียมและยูเรเนียมที่มีปะปนอยู่ในพื้นดิน และหิน กระจายอยู่ในทุกส่วนของเปลือกโลก

ภาพที่ 2.2

สัดส่วนการรับรังสีนิวเคลียร์ของมนุษย์จากแหล่งกำเนิดรังสีในธรรมชาติ
และแหล่งรังสีที่มนุษย์ทำขึ้น



ที่มา: NCRP, 1987.

จากผลการศึกษาของ UNSCEAR เกี่ยวกับรังสีที่มนุษย์ได้รับจากสิ่งแวดล้อม โดยศึกษาจากกลุ่มประชากรตัวอย่าง พบว่าปริมาณการได้รับรังสีคอสมิก และรังสีแกมมาขึ้นอยู่กับความสูงและลักษณะของภูมิประเทศที่อยู่อาศัย ส่วนปริมาณการได้รับรังสีภายในสู่ร่างกาย (internal exposure) นั้นจะขึ้นอยู่กับอายุ และอาหารที่ใช้บริโภค สำหรับปริมาณการได้รับรังสีเนื่องจากก๊าซเรดอนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของภูมิประเทศที่ตั้งถิ่นฐาน และลักษณะที่อยู่อาศัย สรุปโดยรวมแล้วปริมาณรังสีเฉลี่ยต่อปีที่ได้รับของประชากรโลก มีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.4 มิลลิซีเวิร์ต (UNSCEAR, 2000) ซึ่งสามารถจำแนกปริมาณการได้รับรังสีต่อปีของประชากรตัวอย่างได้จากสาเหตุต่าง ๆ (ตารางที่ 2.2) และพบว่า ก๊าซเรดอน ยังคงเป็นตัวการสำคัญในการทำให้ปริมาณการได้รับรังสีของประชากรโลกอยู่ในระดับที่สูงได้มากกว่าสาเหตุจากแหล่งอื่น

ตารางที่ 2.2

ค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีที่ประชากรโลกได้รับจากแหล่งรังสีธรรมชาติ

Source of exposure	Annual effective dose (mSv)	
	Average	Typical range
Cosmic radiation		
- Directly ionizing and photon component	0.28 (0.30)	
- Neutron component	0.10 (0.08)	
Cosmogenic radionuclides	0.01 (0.01)	
Total cosmic and cosmogenic	0.39	0.30 – 1.00
External terrestrial radiation		
- Outdoors	0.07 (0.07)	
- Indoors	0.41 (0.39)	
Total external terrestrial radiation	0.48	0.30 – 0.60
Inhalation exposure		
- Uranium and Thorium series	0.0006 (0.01)	
- Radon (^{222}Rn)	1.1500 (1.2)	
- Thoron (^{220}Rn)	0.1000 (0.07)	
Total inhalation exposure	1.2600	0.20 – 10.00
Ingestion exposure		
- ^{40}K	0.17 (0.17)	
- Uranium and Thorium series	0.12 (0.06)	
Total ingestion exposure	0.29	0.20 – 0.80
Total	2.40	1.00 – 10.00

ที่มา: UNSCEAR, 2000.

2.1.2 <u>ก๊าซเรดอน และคุณสมบัติบางประการ</u>

ก๊าซเรดอน (Rn – 222) เป็นก๊าซกัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียม[1] (^{238}U series) เป็นก๊าซที่ปราศจากสี และกลิ่น มีความหนาแน่น 9.73 กรัมต่อลิตร ณ สภาวะปกติ ซึ่งมากกว่าอากาศถึง 7.53 เท่า (อากาศ มีความหนาแน่น 1.29 กรัมต่อลิตร) จึงถือว่ามีน้ำหนักมากที่สุดในบรรดาก๊าซทั้งหมดในธรรมชาติ นอกจากนี้เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-71.0°C) พบว่าก๊าซเรดอนเกิดการเรืองแสงได้ โดยมีสีเหลือง และถ้าลดอุณหภูมิลงอีกก็จะเปลี่ยนเป็นสีส้มแดง ซึ่งด้วยคุณสมบัตินี้เองที่ทำให้ในช่วงแรกก๊าซเรดอนถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า นิตอน (Niton) ซึ่งแปลว่า สารเรืองแสง

ก๊าซเรดอน เป็นผลิตภัณฑ์กัมมันตรังสีที่สลายตัวมาจากแร่เรเดียม (^{226}Ra) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในอนุกรมยูเรเนียม ในระหว่างการสลายตัวจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาด้วย โดยจะเป็นการปล่อยรังสีแอลฟาประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานทั้งหมด ส่วนที่เหลือจะเป็นการปล่อยรังสีแกมมา (0.186 MeV)

แร่เรเดียม มีค่าครึ่งชีวิต 1620 ปี (Shlein, 1998) ส่วนเรดอนมีค่าครึ่งชีวิต 3.8235 วัน ซึ่งถือว่ายาวนานที่สุดในธาตุไอโซโทป[2]ของธาตุเดียวกัน ซึ่งมีอยู่อีก 2 ไอโซโทป ได้แก่ ก๊าซแอคตินอน (Rn-219) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวในอนุกรมแอคตินียม จะสลายตัวให้รังสีอัลฟา มีค่าครึ่งชีวิต 4.0 วินาที ถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1904 โดย Friedrich O. Giesel และ Andreloris Debierne และก๊าซโทรอน (Rn-220) เกิดจากการสลายตัวในอนุกรมทอเรียม สลายตัวให้รังสีอัลฟาเช่นกัน มีค่าครึ่งชีวิต 55.6 วินาที ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1899 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ R.B. Owens และ Ernest Rutherford ทั้งสามไอโซโทปของเรดอนล้วนแล้วแต่สลายตัวโดยการปล่อยรังสีแอลฟา แล้วจึงได้ผลิตภัณฑ์กัมมันตรังสีต่าง ๆ ออกมา โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

1. ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้น ได้แก่ ^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi และ ^{214}Po ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตอยู่ในช่วง 1.64×10^{-4} วินาที ถึง 26.9 นาที ผลิตภัณฑ์ทั้งสี่ชนิดนี้มีความสำคัญต่อมนุษย์มาก เนื่องจากผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะเข้าไปสะสมในปอด เป็นสาเหตุให้เกิดมะเร็งปอดได้ ไอโซโทปของโปโลเนียมทั้งสองจะสลายตัวให้รังสีอัลฟา โดยเฉพาะ ^{218}Po ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 30 นาที และมีประจุบวก ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะยึดเกาะกับฝุ่นละอองในอากาศ ดังนั้น สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย

---

[1] ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก

[2] ไอโซโทป (Isotope) คืออะตอมของธาตุเดียวกัน ซึ่งในนิวเคลียสมีจำนวนโปรตอนเท่ากันแต่จำนวนนิวตรอนต่างกัน เช่น ธาตุไฮโดรเจนมีสามไอโซโทป ได้แก่ $^{1}_{1}$H $^{2}_{1}$H $^{3}_{1}$H ไอโซโทปของธาตุเดียวกันจะมีสมบัติทางเคมีเหมือนกัน แต่สมบัติทางฟิสิกส์ต่างกัน

ของผลิตภัณฑ์จึงขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของอากาศ เช่น กระแสการพาของลม ความแปรปรวนของลม และความสามารถในการกรองผ่าน

2. ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าครึ่งชีวิตยาว ได้แก่ ^{210}Pb, ^{210}Bi และ ^{210}Po ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตตั้งแต่ 5 วันถึง 22 ปี พบมากในบรรยากาศ แต่เนื่องจากการมีค่าครึ่งชีวิตที่ยาว ทำให้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ไปสะสมที่อวัยวะอื่นหลังจากที่เดินทางมายังปอด การบริโภคอาหารมีความสำคัญในการนำ ^{210}Pb และ ^{210}Po เข้าสู่ร่างกาย พบความเข้มข้นต่ำในเนื้อและนม พบปานกลางในธัญพืชและผัก และพบค่อนข้างสูงในอวัยวะของสัตว์น้ำ ความเข้มข้นของ ^{210}Pb ในน้ำดื่มค่อนข้างต่ำทำให้ไม่มีผลต่อระบบการย่อยอาหารเมื่อดื่มน้ำเข้าไป

การที่ก๊าซเรดอนจัดอยู่ในประเภทก๊าซเฉื่อย (inert gas) ซึ่งไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้น จึงสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระโดยปราศจากพันธะเกี่ยวพันกับสสาร หรือโมเลกุลอื่น ๆ เช่น การเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนของวัสดุ ผ่านน้ำ หรืออากาศ และสัมผัสกับร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้ ซึ่งครึ่งชีวิตของเรดอนที่ 3.82 วันนั้นยาวนานพอที่ก๊าซเรดอนจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านวัสดุ หรือชั้นดินออกมาสู่ชั้นบรรยากาศ (Nazaroff and Nero, 1988) ในขณะที่ไอโซโทปอื่น เช่น ก๊าซโทรอน ซึ่งมีครึ่งชีวิตที่สั้นมากจะสลายตัวหมดไปก่อนที่จะแพร่ออกสู่ชั้นบรรยากาศ นอกจากนี้ ก๊าซเรดอนยังสามารถละลายได้ในน้ำเย็น และการละลายจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความสามารถในการละลายน้ำได้นี้เองที่เป็นสาเหตุให้มีการปล่อยเรดอนเข้าสู่บรรยากาศระหว่างกิจกรรมการใช้น้ำในบ้าน เช่น การซักเสื้อผ้า การล้างจาน การอาบน้ำ เป็นต้น

อันตรายที่มนุษย์ได้รับเมื่อสูดดมก๊าซเรดอนเข้าสู่ร่างกาย ไม่ได้เกิดขึ้นจากตัวก๊าซเรดอนโดย ตรง หากแต่เกิดเนื่องจากการแผ่รังสีแอลฟาในระหว่างการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้น โดยเฉพาะอนุภาคแอลฟาที่ปลดปล่อยจากไอโซโทปของโปโลเนียม (^{218}Po และ ^{214}Po) ซึ่งจะปล่อยพลังงานออกมาปริมาณมากมากที่สุด และส่งผลกระทบโดยตรงต่อเนื้อเยื่อภายในระบบหายใจได้[3]

ในอดีตที่ผ่านมา เริ่มมีหลักฐานปรากฏว่ามนุษย์ได้รับผลกระทบจากการได้รับก๊าซเรดอนเข้าสู่ร่างกาย เมื่อประมาณช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 16 โดยพบว่ามีการเจ็บป่วยด้วยโรคทางเดินหายใจอย่างรุนแรงในหมู่ของคนงานที่ทำงานภายในเหมืองแร่เงินในเมืองชนีย์เบิร์ค (Schneeberg) แคว้นแซกโซนี (Saxony) หรือดินแดนที่เป็นประเทศเยอรมนีในปัจจุบัน และพบปรากฏการณ์ในลักษณะเดียวกันนี้อีกที่เหมืองแร่ในเมือง Joachimstahl (ปัจจุบันคือ เมือง Jachymov ประเทศสโลวาเกีย) ต่างกันตรงที่เหมืองแร่ในเมือง Joachimstahl อยู่ใกล้ผิวดินมากกว่าเหมืองเงินในเมืองชนีย์เบิร์ค

[3] ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข หน้า 182.

ซึ่งอยู่ลึกลงไปใต้ดินถึง 400 เมตร (ICRP, 1994) โดยในวงการแพทย์สมัยนั้นเรียกโรคในระบบทางเดินหายใจที่พบนี้ว่า mala metallorum (Hoover, 1950) และพบบ่อยขึ้นตามลำดับ ตามปริมาณการทำเหมืองเงิน โคบอลต์ และทองแดงที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

จนกระทั่งในช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 19 โรคดังกล่าวนี้จึงถูกระบุว่าเป็น โรคมะเร็งปอด (lung cancer) (ICRP, 1994) โดยได้มีการประมาณการไว้ว่าประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ของคนงานในเหมืองดังกล่าว เสียชีวิตด้วยโรคมะเร็งปอด (ICRP, 1977) ต่อมาในปี ค.ศ. 1924 ได้มีผู้เสนอว่าโรคมะเร็งปอดที่พบนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่กระจายก๊าซเรดอนภายในเหมือง ตั้งแต่นั้นจึงได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุบัติการณ์การเกิดโรคมะเร็งปอดที่เพิ่มสูงขึ้น กับปริมาณก๊าซเรดอนที่ปล่อยออกมาจากพื้นที่ดังกล่าว และได้ข้อสรุปในเวลาต่อมาว่าสาเหตุหลักที่แท้จริงเกิดจากผลิตภัณฑ์ลูกหลานที่สลายตัวมาจากก๊าซเรดอน ไม่ได้เกิดมาจากก๊าซเรดอนโดยตรง (Bale and Shapiro, 1956)

ปัญหาเรื่องผลกระทบต่อสุขภาพจากการได้รับก๊าซเรดอนเข้าสู่ร่างกายได้รับความสนใจในระดับนานาชาติเป็นครั้งแรก ในเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 1984 เมื่อวิศวกรรับเหมาก่อสร้างแห่ง Limerick Generating Station ในรัฐเพนซิลเวเนีย สามารถตรวจวัดการแผ่รังสีได้ในระดับที่สูงมากในบริเวณพื้นที่ดังกล่าว โดยในตอนแรกสันนิษฐานว่าเป็นผลจากการแผ่รังสีจากการทำงาน แต่เมื่อทำการศึกษาขยายผลเพิ่มเติม พบว่ารังสีที่ตรวจวัดได้นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากก๊าซเรดอน และผลิตภัณฑ์ลูกหลานที่เกิด ขึ้นภายในอาคารนั้นเอง นับตั้งแต่นั้นมา จึงได้มีการศึกษาวิจัยหลายชิ้นซึ่งส่วนหนึ่งรวบรวมโดย ICRP และ NCRP ได้แสดงให้เห็นว่าก๊าซเรดอนเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ที่ทำงานอยู่ใต้ดินได้เท่า ๆ กับผู้ที่ทำงานอยู่ในอาคารสำนักงาน หรือบ้านพักอาศัย (ICRP, 1994 and NCRP, 1987) และจากการศึกษาถึงคุณภาพอากาศภายในอาคารปัจจุบัน ชี้ชัดว่าวัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐ และคอนกรีต คือปัจจัยหลักของก๊าซเรดอนภายในอาคาร (ICRP, 1987) ซึ่งจากการศึกษาปริมาณก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างในประเทศสหรัฐอเมริกา อังกฤษ เยอรมนี และสวีเดน พบว่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในพื้นที่ที่ใช้วัสดุก่อสร้างดังกล่าว มีค่าตั้งแต่ 0.7 – 100 เบคเคอเรลต่อลูกบาศก์เมตร (ICRP, 1987) และในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการประมาณการถึงจำนวนผู้เสียชีวิตจากการป่วยเป็นโรคมะเร็งปอดอันเนื่องมาจากก๊าซเรดอน 15,400 – 21,800 รายต่อปี (NRC, 1999)

2.1.3 กัมมันตภาพรังสีจากวัสดุก่อสร้าง

วัสดุก่อสร้างเป็นสิ่งที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น หิน ทราย ไม้ หรืออาจมาจากสิ่งที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น อิฐ ซีเมนต์ ดังนั้นในวัสดุก่อสร้างทุกชนิดจึงล้วนแล้วแต่มีการเจือปนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีมากน้อยในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน โดยเฉพาะวัสดุที่มาจากหิน หรือดิน มักจะประกอบด้วยนิวไคลด์กัมมันตรังสีหลัก ได้แก่ อนุกรมยูเรเนียม (^{238}U series) อนุกรมทอเรียม (^{232}Th series) และไอโซโทปกัมมันตรังสีของโพแทสเซียม (^{40}K) โดยในอนุกรมยูเรเนียม ธาตุกัมมันตรังสีตั้งต้นที่สำคัญที่สุดคือ เรเดียม (^{226}Ra) ดังนั้นต่อไปนี้จึงใช้เรเดียมเป็นตัวแทนของอนุกรมยูเรเนียม จากการสำรวจตัวอย่างของวัสดุก่อสร้างในกลุ่มประเทศในสหภาพยุโรป พบว่ามีการปะปนของเรเดียม ทอเรียม โดยเฉลี่ยที่ความเข้มข้น 40 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ส่วนโพแทสเซียมจะพบประมาณ 400 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3

ความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีในวัสดุก่อสร้าง และผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมที่ใช้ในวัสดุก่อสร้างของกลุ่มประเทศในสหภาพยุโรป

Material	Typical activity concentration (Bq kg^{-1})			Maximum activity concentration (Bq kg^{-1})		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Concrete	40	30	400	240	190	1600
Aerated and light-weight concrete	60	40	430	2600	190	1600
Clay (red) bricks	50	50	670	200	200	2000
Sand-lime bricks	10	10	330	25	30	700
Natural building stones	60	60	640	500	310	4000
Natural gypsum	10	10	80	70	100	200
Phosphogypsum	390	20	60	1100	160	300
Coal fly ash	180	100	650	1100	300	1500

ที่มา: Mustonen; Pennanen; Annanmaki M.; and Oksanen,1999.

รังสีที่มนุษย์ได้รับเนื่องมาจากการแผ่รังสีจากวัสดุก่อสร้าง สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การแผ่รังสีภายนอก (external exposure) และการแผ่รังสีภายใน (internal exposure) โดยที่การแผ่รังสีภายนอกนั้น เกิดจากการแผ่รังสีแกมมาโดยตรง ส่วนการแผ่รังสีภายในนั้น เกิดจากการที่มนุษย์ได้รับก๊าซเรดอน โทรอน และผลิตภัณฑ์ครึ่งชีวิตสั้นเข้าสู่ร่างกาย เมื่อเกิดการสลายตัวก็จะแผ่รังสีสู่ร่างกาย

ถึงแม้ว่ามนุษย์ไม่อาจหลีกเลี่ยงการได้รับรังสีจากธรรมชาติได้ ตราบใดที่มนุษย์ยังอาศัยอยู่บนโลกใบนี้ แต่มนุษย์สามารถที่จะควบคุมการได้รับรังสีได้ โดยการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างที่เหมาะสมเพื่อจะได้ไม่เป็นการเพิ่มปริมาณรังสีที่ได้รับจากธรรมชาติให้มากขึ้น ดังนั้น จึงได้มีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานในการได้รับรังสีของมนุษย์ขึ้น ดังเช่นกลุ่มประเทศในสหภาพยุโรป ได้มีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานในการได้รับรังสีแกมมาของมนุษย์เนื่องจากวัสดุก่อสร้างไว้ไม่เกิน 1 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี และได้สร้างแนวทางในการตรวจสอบรังสีที่แผ่ออกมาจากวัสดุก่อสร้างเรียกว่า ค่าดัชนีความเข้มข้นของกัมมันตภาพในวัสดุก่อสร้าง (Activity Concentration Index; I) โดยใช้เพื่อแปลงค่าความเข้มข้นของกัมมันตภาพในวัสดุ (Bq kg^{-1}) ให้เป็นปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับ (mSv) โดยสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$I = \frac{C_{Ra}}{300 Bq \cdot kg^{-1}} + \frac{C_{Th}}{200 Bq \cdot kg^{-1}} + \frac{C_K}{3000 Bq \cdot kg^{-1}} \qquad \text{สมการ (2.1)}$$

เมื่อ I คือ ค่าดัชนีความเข้มข้นกัมมันตภาพของวัสดุ

C_{Ra} คือ ความเข้มข้นกัมมันตภาพของเรเดียมในวัสดุ (Bq kg^{-1})

C_{Th} คือ ความเข้มข้นกัมมันตภาพของทอเรียมในวัสดุ (Bq kg^{-1})

C_K คือ ความเข้มข้นกัมมันตภาพของโพแทสเซียมในวัสดุ (Bq kg^{-1})

ค่า I ที่คำนวณได้จากสมการ 2.1 สามารถนำไปเทียบหาความสัมพันธ์กับปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับจากวัสดุก่อสร้างในระยะเวลาหนึ่งปี ได้จากตารางที่ 2.4

อย่างไรก็ตาม ค่าดัชนีความเข้มข้นกัมมันตภาพของวัสดุก่อสร้าง ควรใช้เป็นเพียงแค่เครื่องมือเบื้องต้นในการระบุถึงวัสดุที่มีความเสี่ยงต่อการแผ่รังสีสูง แต่การตัดสินใจในการเลือกวัสดุนั้น ควรพิจารณาจากการประมาณการรังสีที่ผู้ใช้อาคารได้รับเป็นหลัก

ตารางที่ 2.4

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเข้มข้นกัมมันตภาพกับปริมาณรังสีที่ได้รับในระยะเวลาหนึ่งปี

Dose Criterion	0.3 mSv y^{-1}	1 mSv y^{-1}
Materials used in bulk amounts, e.g. concrete	$I \leq 0.5$	$I \leq 1$
Superficial and other materials with restricted use : tiles, boards, etc.	$I \leq 2$	$I \leq 6$

ที่มา: European Commission Radiation Protection, 1999.

สำหรับในประเทศไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ยังไม่มีมาตรการใด ๆ ที่ใช้เป็นค่ากำหนด แน่นอนว่าวัสดุก่อสร้างจะมีธาตุกัมมันตรังสีทั้งสามชนิดนี้ปนอยู่ได้ในปริมาณเท่าใด จึงจะไม่ทำให้ผู้ที่อยู่อาศัยได้รับผลกระทบที่เนื่องมาจากการแผ่รังสีแกมมาจากภายนอก นอกจากนี้ปริมาณของเรเดียมที่เจือปนอยู่ ยังสามารถสลายตัวก่อให้เกิดก๊าซเรดอนลอยปะปนอยู่ในอากาศภายในอาคาร ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของอนุภาคกัมมันตรังสีแอลฟาที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย หากหายใจเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่เพียงพอ

2.1.4 <u>ต้นกำเนิดก๊าซเรดอนในอาคาร : วัสดุก่อสร้าง</u>

ก๊าซเรดอน ที่สามารถเข้าสู่ตัวอาคารได้นั้นอาจมีมาได้จากหลายแหล่งกำเนิด แต่แหล่งที่สำคัญได้แก่ ดิน หรือหินที่อยู่ภายใต้และบริเวณโดยรอบอาคาร ส่วนอีกแหล่งหนึ่งคือ วัสดุก่อสร้างที่ใช้ภายในอาคาร ซึ่งหากก๊าซเรดอนมาจากพื้นดิน หรือหินแล้ว ปริมาณความเข้มข้นเรดอนเฉลี่ยภายในอาคารจะขึ้นอยู่กับสี่ปัจจัยดังนี้

1. ค่าความต่างความดันเฉลี่ย ระหว่างพื้นดินกับภายในอาคาร
2. ค่าความต้านทานการไหลผ่านของพื้นดิน และฐานราก
3. อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนต่อปริมาตรของดิน
4. อัตราการระบายอากาศโดยเฉลี่ยของอาคาร

ถึงแม้ว่าก๊าซเรดอนจากดินใต้อาคาร ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดเรดอนที่สำคัญที่สุด แต่ในหลายกรณีก็ไม่เป็นเช่นนั้นเสมอไป เช่น จากการสำรวจความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในที่พักอาศัยในประเทศเนเธอร์แลนด์เมื่อปี ค.ศ. 1995 พบว่า ก๊าซเรดอนภายในอาคารประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์

มาจากวัสดุก่อสร้าง ส่วนที่เหลือมาจากใต้ดิน และจากอากาศภายนอก (Stoop; Glastra; Hiemstra; De Vries; and Lembrechts, 1998) เช่นเดียวกันกับการศึกษาปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคารในประเทศเยอรมนี พบว่าวัสดุก่อสร้างเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการเพิ่มระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร (Folkerts; Keller and Muth, 1982)

การที่วัสดุก่อสร้างจะสามารถปล่อยก๊าซเรดอนได้มากน้อยเท่าไรนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของเรเดียม (^{226}Ra) ที่ปะปนอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบัน ได้มีการนำเอาหางแร่ หรือผลพลอยได้ที่ได้จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม มาใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งวัสดุเหล่านี้มีธาตุกัมมันตรังสีธรรมชาติรวมทั้งเรเดียม ปะปนอยู่ในปริมาณสูงกว่าวัสดุก่อสร้างทั่วไป ตัวอย่างเช่น ที่เมืองแกรนด์จังค์ชั่น (Grand Junction) ในรัฐโคโลราโด (Colorado) ในระหว่างปี ค.ศ. 1952 – 1966 ได้มีการนำหางแร่จากเหมืองยูเรเนียมมาถมที่ และใช้ในการก่อสร้างบ้านด้วย ซึ่งต่อมาพบว่าปริมาณรังสีภายในบ้านของหมู่บ้านนั้น มีค่าสูงมากจนต้องมีการอพยพผู้คนออกไป

นอกจากนี้ งานวิจัยหลายชิ้นในต่างประเทศ ได้มีการศึกษาถึงปริมาณเรเดียมที่ปะปนอยู่ภายในวัสดุก่อสร้างต่าง ๆ (ตารางที่ 2.5) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดมาตรฐานปริมาณเรเดียมในวัสดุก่อสร้างต่อไป

ตารางที่ 2.5

ปริมาณเรเดียมในวัสดุก่อสร้างชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	ปริมาณเรเดียม	
	$Bq\ kg^{-1}$	$pCi\ g^{-1}$
ไม้ (wood)	1	0.03
คอนกรีต (concrete)	16 - 61	0.43 – 1.65
อิฐ (brick)	42 – 96	1.10 – 2.60
กระเบื้อง (tile)	78	2.10
ยิปซัมทั่วไป (natural gypsum)	4 – 10	0.11 – 0.27
ฟอสโฟยิปซัม (phosphogypsum)	27	0.73
ใยแก้ว (glass wool)	13 - 40	0.35 – 1.10

ที่มา: UNSCEAR, 1982.

อย่างไรก็ตามปริมาณเรเดียมในวัสดุก่อสร้างใด ๆ ก็ย่อมขึ้นอยู่กับแหล่งผลิตของวัสดุก่อสร้างนั้น การจะถือเอามาตรฐานเรเดียมในวัสดุก่อสร้างของประเทศหนึ่ง มาเป็นเกณฑ์ของอีกประเทศหนึ่งย่อมไม่เกิดความเหมาะสม เนื่องจากมีลักษณะทางธรณีวิทยาที่ต่างกัน ดังนั้น ในแต่ละประเทศควรมีการศึกษาหาแนวทางในการสร้างมาตรฐานเป็นของตนเอง ดังตัวอย่างเช่น ในรัฐฟลอริดา (Florida) ประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการตั้งหน่วยงานขึ้นมาเพื่อศึกษาปริมาณเรดอนในอาคาร และปริมาณเรเดียมในวัสดุก่อสร้าง กับผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้อาคาร ภายใต้ชื่อโครงการว่า Florida Radon Research Program (FRRP) และได้กำหนดมาตรฐานของปริมาณเรเดียมในอาคาร เพื่อควบคุมแหล่งกำเนิดเรดอนภายในอาคาร หรือที่เรียกว่า Florida Standard for Radon-Resistant Residential Building Construction

2.2 การปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง

แม้ว่าตามปกติแล้ว วัสดุก่อสร้างจะก่อให้เกิดปริมาณก๊าซเรดอนภายในอากาศไม่มากเท่ากับก๊าซเรดอนที่มาจากดินใต้พื้น และบริเวณโดยรอบอาคาร แต่วัสดุก่อสร้างก็ถือเป็นแหล่งกำเนิดที่สามารถควบคุมได้มากกว่าดิน เช่น การควบคุมและจำกัดปริมาณเรเดียมในวัสดุ เนื่องจากเรเดียมคือต้นกำเนิดของก๊าซเรดอน โดยทั่วไปแล้วจะวัดความเข้มข้นของเรเดียมของวัสดุก่อสร้างในหน่วยของ เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม (Bq kg^{-1}) เช่น วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งมีความเข้มข้นของเรเดียม 23 เบคเคอเรล หมายความว่า เรเดียมในวัสดุนั้นจะสลายตัวให้ก๊าซเรดอนในอัตรา 23 อะตอมต่อวินาที

การปล่อยก๊าซเรดอนออกจากวัสดุก่อสร้างใด ๆ จะประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ตามที่แสดงในภาพที่ 2.3 ดังต่อไปนี้

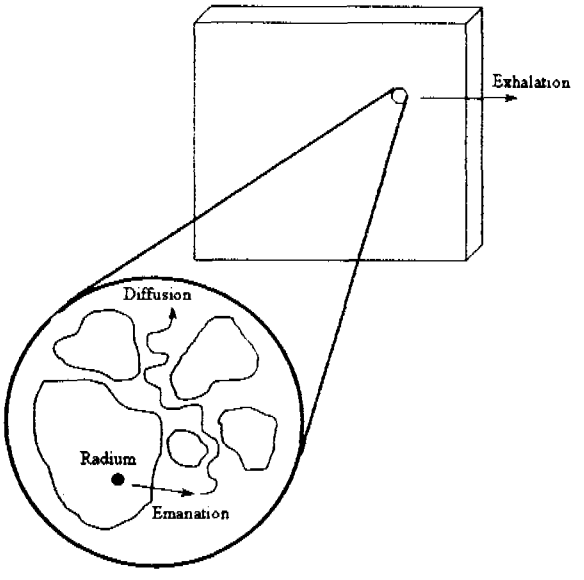
1. เรเดียมที่ปะปนอยู่ในเนื้อวัสดุก่อสร้างเกิดการสลายตัวตามอนุกรมยูเรเนียม ได้ก๊าซเรดอนเป็นผลิตภัณฑ์

2. อะตอมของก๊าซเรดอนบางส่วน สามารถออกจากเนื้อวัสดุมาถึงช่องว่างภายในตัววัสดุก่อสร้างได้ เรียกกระบวนการนี้ว่า Emanation

3. ก๊าซเรดอนแพร่ผ่านช่องว่าง (pores) ภายในวัสดุก่อสร้าง

4. ก๊าซเรดอนที่สามารถผ่านช่องว่างจากภายในจนถึงผิววัสดุก่อสร้างได้สำเร็จ โดยไม่สลายตัวไปก่อน จะกระจายสู่ชั้นบรรยากาศ เรียกกระบวนการนี้ว่า Exhalation

ภาพที่ 2.3
การปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างสู่บรรยากาศภายนอก



ที่มา: Andersen, 1999.

จากภาพที่ 2.3 จะพบว่ามีกระบวนการสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซเรดอนออกจากวัสดุก่อสร้างอยู่ 3 กระบวนการ ได้แก่

1. กระบวนการกระจายก๊าซเรดอนภายในวัสดุ (emanation process)
2. กระบวนการแพร่ของก๊าซเรดอนภายในวัสดุ (diffusion process)
3. กระบวนการกระจายก๊าซเรดอนจากวัสดุออกสู่บรรยากาศ (exhalation process)

1. กระบวนการกระจายก๊าซเรดอนภายในวัสดุ (emanation process)

การกระจายของเรดอนภายในวัสดุ (emanation of radon) หมายถึง การที่ก๊าซเรดอนที่สลายตัวจากเรเดียม กระจายหรือฟุ้งจากอนุภาคของวัสดุออกสู่ช่องว่างระหว่างอนุภาคภายในวัสดุนั้น ซึ่งแน่นอนว่า ไม่ใช่ก๊าซเรดอนทุกอะตอมที่เกิดจากการสลายสลายตัวของเรเดียมจะสามารถหลุดออกจากอนุภาคของวัสดุได้ แต่จะมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่สามารถกระจายออกมาสู่ช่องว่างภายในวัสดุได้ ดังนั้นวัสดุแต่ละชนิดจึงมีความสามารถในการกระจายก๊าซเรดอนต่างกัน ค่าที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการกระจายก๊าซเรดอนของวัสดุแต่ละชนิดนี้ เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายก๊าซเรดอนภายในวัสดุ (coefficient of emanation or emanation power; η) ซึ่งก็คือ อัตราส่วน

ระหว่างจำนวนอะตอมของก๊าซเรดอนที่ฟุ้งกระจายออกมาจากอนุภาควัสดุต่อหน่วยเวลา กับจำนวนอะตอมของก๊าซเรดอนทั้งหมดที่สลายตัวจากเรเดียมในอนุภาควัสดุนั้นต่อหน่วยเวลา จากการทดลองโดยใช้ตลับถ่านกัมมันต์ (activated charcoal) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง (Bossew, 2003) สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายก๊าซเรดอนได้จากสมการที่ 2.2

$$\eta = \frac{A(^{222}Rn)}{A(^{226}Ra)} \cdot \frac{1}{1-e^{-\lambda t}} \qquad \text{สมการ (2.2)}$$

เมื่อ η คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายก๊าซเรดอนจากวัสดุ

$A(^{222}Rn)$ คือ ค่าความเข้มข้นก๊าซเรดอนที่วัดได้จากถ่านกัมมันต์

$A(^{226}Ra)$ คือ ค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพเรเดียมในวัสดุ

λ คือ ค่าคงที่การสลายตัวของก๊าซเรดอน

t คือ ระยะเวลาการปล่อยก๊าซจากวัสดุ

เนื่องจากเป็นอัตราส่วน ค่าสัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายก๊าซเรดอนจากวัสดุจึงเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย โดยมีค่าตั้งแต่ 0 (ไม่มีเรดอนออกมาได้เลย) ถึง 1 (เรดอนออกมาได้ทั้งหมด) ดังเช่นตารางที่ 2.6 เป็นตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายของก๊าซเรดอนในวัสดุก่อสร้างบางชนิด

ตารางที่ 2.6

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายก๊าซเรดอนในวัสดุก่อสร้างบางชนิด

วัสดุ	สัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายก๊าซเรดอน
คอนกรีต	0.10 – 0.40
อิฐ	0.02 – 0.10
ยิปซัม	0.03 – 0.20
ซีเมนต์	0.02 – 0.05

ที่มา : Pensko et al., 1972.

2. กระบวนการแพร่ของก๊าซเรดอนภายในวัสดุ (diffusion process)

กระบวนการการเคลื่อนที่ของก๊าซเรดอนจากแหล่งกำเนิดผ่านตัวกลางออกสู่บรรยากาศมีกลไกที่ซับซ้อนหลายกระบวนการ ซึ่งได้เคยมีผู้ศึกษาและได้อธิบายไว้หลายกรณีด้วยกัน หนึ่งในนั้นคือกระบวนการแพร่

การแพร่ (diffusion) คือการเคลื่อนที่จากที่ที่มีความเข้มข้นสูงไปยังที่ที่มีความเข้มข้นต่ำ ขณะที่ความดันยังคงที่ โดยการแพร่ของอนุภาคของก๊าซจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) คงที่อยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งการแพร่ของก๊าซสามารถอธิบายได้ด้วยกฎการแพร่ (Fick's law) ดังนี้

$$J = -D\frac{dC}{dx} \qquad \text{สมการ (2.3)}$$

เมื่อ J คือ จำนวนอนุภาคของก๊าซที่เคลื่อนที่ผ่านหน่วยพื้นที่ ต่อหน่วยเวลาหนึ่ง ๆ (Flux)

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซ

C คือ ความเข้มข้นของก๊าซ

x คือ ระยะทางในทิศทางของการเคลื่อนที่

ก๊าซต่าง ๆ รวมทั้งเรดอน จะมีความสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งได้ต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ขนาดของโมเลกุล อุณหภูมิ ความชื้น และที่สำคัญคือความพรุน (porosity) ของตัวกลางนั้น ซึ่งก๊าซเรดอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความพรุนมากได้ดีกว่าตัวกลางที่มีความพรุนน้อย โดยระยะทางที่ก๊าซเรดอนสามารถเคลื่อนที่ไปได้ในตัวกลาง ก่อนที่จะสลายตัวไปเป็นธาตุอื่น เรียกว่า ระยะของการแพร่ (diffusion length) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$L = \sqrt{\frac{D}{\lambda}} \qquad \text{สมการ (2.4)}$$

เมื่อ L คือ ระยะของการแพร่ (m)

D คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่ (dimension less)

λ คือ ค่าคงที่การสลายตัวของก๊าซเรดอน (s^{-1})

จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของก๊าซเรดอนผ่านดิน กับวัสดุก่อสร้างบางชนิด (Nero and Nazaroff, 1984) พบว่า การเคลื่อนที่ของก๊าซเรดอนผ่านดินนั้นต่างจากวัสดุก่อสร้างตรงที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมเป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณความชื้นในดิน ซึ่งโดยปกติระยะของการแพร่ของก๊าซเรดอนในดิน จะอยู่ที่ประมาณ 1 เมตร แต่สามารถลดลงได้เป็น 0.01 เมตร ถ้าดินนั้นถูกทำให้อิ่มตัวด้วยความชื้น และสามารถเพิ่มมากได้ถึง 1.5 เมตร ถ้าดินนั้นมีความแห้งมาก ดังเช่นตารางที่ 2.7 เป็นตัวอย่างคุณสมบัติการแพร่ของก๊าซเรดอนผ่านตัวกลางวัสดุก่อสร้างบางชนิด

ตารางที่ 2.7

คุณสมบัติการแพร่ของก๊าซเรดอนผ่านตัวกลางวัสดุก่อสร้างบางชนิด

Material	Porosity (ε)	Pore diff.coef. (10^{-6} m^2s^{-1})	Effective diff.coef. (10^{-6} m^2s^{-1})	Diff. length (m)
Aerated concrete	0.48	1.3000	0.62000	1.0
Heavy concrete	0.10	0.0068	0.00068	0.1
Slagstone	0.26	0.3800	0.10000	0.6
Limestone	0.24	0.3400	0.08200	0.5
Brick	0.18	0.3500	0.06900	0.5
Quarry stone (Porphyry)	0.03	0.0460	0.00140	0.2
Sandstone	0.14	2.6000	0.37000	1.4

ที่มา: Folkerts; Keller; and Muth, 1984.

3. กระบวนการกระจายก๊าซเรดอนจากวัสดุสู่บรรยากาศ (exhalation process)

เมื่อเรเดียมที่ปนอยู่ในวัสดุก่อสร้างเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซเรดอน ก๊าซเรดอนบางส่วนจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนในวัสดุนั้นออกสู่บรรยากาศภายนอก เรียกกระบวนการนี้ว่า การปล่อยก๊าซเรดอนของวัสดุ ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ทั้งปัจจัยจากภายใน เช่น ความพรุน ความหนา ปริมาณเรเดียมที่ปะปนอยู่ ลักษณะพื้นผิว และปัจจัยจากภายนอก เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น

เมื่อนำตัวอย่างวัสดุก่อสร้างชิ้นหนึ่ง มาวางไว้ในพื้นที่ที่ซึ่งถูกปิดล้อมอย่างดี และถูกควบคุมสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดันไว้ให้คงที่ อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุนั้น ก็คือ จำนวนเรดอนทั้งหมดที่สามารถหลุดออกจากวัสดุมาสู่บรรยากาศได้ ต่อ

หน่วยเวลา ซึ่งสามารถนิยามได้สองแบบ คือ จำนวนอะตอมของเรดอนทั้งหมดที่ออกมาต่อวินาที (atoms s^{-1}) หรือ ปริมาณกัมมันตภาพของเรดอนในหน่วยเบคเคอเรลทั้งหมดที่ออกมาต่อหน่วยชั่วโมง (Bq h^{-1}) ดังนั้นจากกฎการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี[4] จะได้ว่า

$$E_b = \lambda \frac{3600s}{1h}(E_n) \qquad \text{สมการ (2.5)}$$

เมื่อ E_b คือ อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนในหน่วยเบคเคอเรลต่อชั่วโมง

E_n คือ อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนในหน่วยอะตอมต่อวินาที

λ คือ ค่าคงที่การสลายตัวของเรดอน ($2.1 \times 10^{-6}\ s^{-1}$)

โดยทั่วไปแล้วการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุใด ๆ จะมีอยู่สองแบบ คือ การวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนเชิงพื้นที่ (area specific radon exhalation rate; E_a) และการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนเชิงมวล (mass specific radon exhalation rate; E_m) โดยสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$E_a = \frac{E_b}{A} \qquad \text{สมการ (2.6)}$$

$$E_m = \frac{E_b}{M} \qquad \text{สมการ (2.7)}$$

เมื่อ E_a คือ อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนเชิงพื้นที่ของวัสดุ (Bq m^{-2} h^{-1})

E_m คือ อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนเชิงมวลของวัสดุ (Bq kg^{-1} h^{-1})

A คือ พื้นที่ผิวที่ปล่อยก๊าซเรดอนของวัสดุ (m^2)

M คือ มวลของวัสดุที่ปล่อยก๊าซเรดอน (kg)

---

[4] ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก หน้า 162.

2.2.1 <u>ทฤษฎีเกี่ยวกับการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง</u>

ดังที่ได้กล่าวในตอนต้นแล้วว่า วัสดุก่อสร้างเกือบทุกชนิดล้วนแล้วแต่ปะปนด้วยสารกัมมันตรังสีจากธรรมชาติ (Naturally Occurring Radioactive Elements; NORM) โดยมีชนิดที่สำคัญ ได้แก่ โพแทสเซียม-40 (^{40}K) และอนุกรมกัมมันตรังสีอีก 2 ไอโซโทป ได้แก่ ทอเรียม-232 (^{232}Th) และ เรเดียม-226 (^{226}Ra) ซึ่งสารกัมมันตรังสีเหล่านี้ก่อให้เกิดการแผ่รังสีแกมมาสู่มนุษย์ที่อาศัยในอาคารที่ก่อสร้างด้วยวัสดุก่อสร้างดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เรเดียม ยังมีส่วนในการเพิ่มระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอน และผลิตภัณฑ์ลูกหลานภายในอาคารให้สูงขึ้นด้วย

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนในงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งรายละเอียดเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1. การคำนวณหาอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง

เมื่อนำวัสดุก่อสร้างใด ๆ ไปวางไว้ในภาชนะปิด โดยที่ไม่มีการรั่วซึมของอากาศจากภายนอก (hermetically closed space) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในภาชนะกับอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.8

$$C(t) = C_{\infty}(1-e^{-\lambda t}) \qquad \text{สมการ (2.8)}$$

โดยที่

$$C_{\infty} = \frac{ES}{V\lambda} \qquad \text{สมการ (2.9)}$$

เมื่อ

	$C(t)$	คือ ความเข้มข้นของก๊าซเรดอน ณ เวลาใด ๆ ($Bq\ m^{-3}$)
	C_{∞}	คือ ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่มากที่สุด เมื่อไม่จำกัดเวลา ($Bq\ m^{-3}$)
	E	คือ อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนเชิงพื้นที่จากวัสดุ ($Bq\ m^{-3}s^{-1}$)
	S	คือ พื้นที่ผิวของวัสดุ (m^2)
	t	คือ เวลาที่ผ่านไป (s)
	V	คือ ปริมาตรอากาศภายในภาชนะ (m^3)
	λ	คือ ค่าคงที่การสลายตัวของก๊าซเรดอน ($2.1 \times 10^{-6}\ s^{-1}$)

สมการที่ 2.8 จะใช้ในการคำนวณหาอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุ หลังจากที่วางวัสดุไว้ในภาชนะปิด ณ เวลาใด ๆ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้อาจจะไม่ใช่คุณสมบัติจำเพาะของ

วัสดุนั้น เนื่องจากค่าความเข้มข้นภายในกล่อง ย่อมเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านไปจนกว่าจะถึงภาวะสมดุล

ดังนั้น เพื่อให้สามารถคำนวณได้ค่าอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนที่เป็นคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุนั้น ๆ ควรวัดความเข้มข้นของก๊าซเรดอนเมื่อเข้าสู่สมดุลกัมมันตรังสี โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณจะต่างจากสมการที่ 2.8 เล็กน้อย ดังนี้

$$C(t) = C_{\infty}\left(1-\frac{1-e^{-\lambda t}}{\lambda t}\right) \qquad \text{สมการ (2.10)}$$

นอกจากนี้ยังมีวิธีการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างที่ต่างจากวิธีข้างต้น ในกรณีที่วัสดุเหล่านั้น ไม่มีรูปทรงที่แน่นอนเหมือนกับก้อนอิฐ กระเบื้อง หรือแผ่นหิน แต่มีลักษณะเป็นผง หรือฝุ่น เช่น ซีเมนต์ หรือเถ้าลอย สิ่งที่คงที่เพียงอย่างเดียวคือ มวล ดังนั้นการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุประเภทนี้ จึงควรสัมพันธ์กับมวลของวัสดุ ค่าที่ได้จะเรียกว่าอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนเชิงมวลของวัสดุนั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$E_{mass} = \frac{C_{\infty}\lambda V}{M} \qquad \text{สมการ (2.11)}$$

เมื่อ E_{mass} คือ อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนเชิงมวลของวัสดุ (Bq kg^{-1} s^{-1})

C_{∞} คือ ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่วัดได้ภายใต้สภาวะสมดุล (Bq m^{-3})

V คือ ปริมาตรอากาศภายในภาชนะ (m^3)

M คือ มวลของวัสดุ (kg)

2. การวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง

หลักการที่ใช้ในการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุโดยทั่วไปแล้ว มีอยู่ด้วยกัน 2 หลักใหญ่ ๆ คือ การวัดในระบบปิด (closed-chamber methods, CCM) และการวัดในระบบเปิด (Opened-Chamber Methods, OCM)

1) วิธีการวัดในระบบปิด (closed-chamber methods, CCM) การวัดโดยวิธีนี้ถือว่าเป็นการวัดที่สะดวกที่สุดในการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง (Stranden, 1984) โดยวัสดุก่อสร้างตัวอย่างจะถูกนำไปใส่ไว้ในกล่องทดลองที่ป้องกันการรั่วซึมของอากาศ (airtight

container) ดังนั้นก๊าซเรดอนที่ปล่อยออกมาจากวัสดุก่อสร้างก็จะถูกกักเก็บไว้ในกล่องทดลอง ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสมการที่ 2.12

$$C(t) = C_0 e^{-\lambda t} + E\left(\frac{1-e^{-\lambda t}}{\lambda V}\right) \qquad \text{สมการ (2.12)}$$

เมื่อ $C(t)$ คือ ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในกล่องทดลอง ณ เวลา t ($Bq\ m^{-3}$)

C_0 คือ ความเข้มข้นของเรดอน ณ เวลาเริ่มต้น (เช่น ค่าเรดอนพื้นหลัง)

E คือ อัตราการปล่อยก๊าซเรดอน ($Bq\ h^{-1}$)

λ คือ ค่าคงที่การสลายตัวของก๊าซเรดอน (h^{-1})

สมการที่ 2.12 จะถูกต้อง และน่าเชื่อถือ ก็ต่อเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะดังนี้ คือ ปราศจากการรั่วซึมจากอากาศภายนอกโดยสิ้นเชิง ค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพภายในกล่องทดลองต้องต่ำมากเมื่อเทียบกับความเข้มข้นกัมมันตภาพในวัสดุทดลอง และจะต้องไม่เกิดปรากฏการณ์การแพร่ย้อนกลับ (back diffusion) ในระหว่างการทดลอง แต่หากมีการรั่วซึมจากอากาศภายนอกหรือมีปรากฏการณ์การแพร่ย้อนกลับเกิดขึ้น ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในกล่องทดลองจะเป็นไปตามสมการที่ 2.13

$$C(t) = C_0 e^{-\lambda' t} + E\left(\frac{1-e^{-\lambda' t}}{\lambda' V}\right) \qquad \text{สมการ (2.13)}$$

เมื่อ λ' คือ ค่าคงที่การสลายตัวประสิทธิผล (effective decay constant) มีค่าเท่ากับ $\lambda + \lambda_{b,l}$

$\lambda_{b,l}$ คือ ค่าคงที่การสลายตัวของก๊าซเรดอนที่ถ่ายออกไปโดยกระบวนการแพร่ย้อนกลับ (b) และการรั่วซึมของอากาศ (l)

2) วิธีการวัดในระบบเปิด (Opened-Chamber Methods, OCM) การวัดโดยวิธีนี้จะกระทำในกล่องทดลองที่มีการระบายอากาศที่หมุนเวียนตลอดเวลา ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซภายในกล่องน้อยมาก ดังนั้นเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของก๊าซที่เกิดขึ้น จะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.14

$$C(t) = C_0 + \frac{E}{V\lambda_v} \qquad \text{สมการ (2.14)}$$

เมื่อ λ_v คือ อัตราการระบายอากาศ (h^{-1})

ในการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างโดยใช้วิธีการตามที่กล่าวมาข้างต้น จะต้องเผชิญกับปัญหาต่าง ๆ หลายประการ แต่ปัญหาสำคัญที่อาจมีผลต่อผลลัพธ์ที่ได้ ได้แก่

1) ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนพื้นหลัง (Background; C_0) ผลลัพธ์ของค่าความเข้มข้นก๊าซเรดอนภายในกล่องทดลอง อาจมีค่าสูงได้ ถ้าหากความเข้มข้นของก๊าซเรดอนพื้นหลังภายในกล่องทดลองมีค่าสูงอยู่แล้ว ดังนั้น การกรองอากาศก่อนนำเข้าสู่กล่องทดลองจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อลดปริมาณก๊าซเรดอนที่อาจปะปนเข้าสู่กล่องทดลอง นอก จากนี้ การใช้ก๊าซไนโตรเจนแทนอากาศภายในกล่อง ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนพื้นหลังลงได้

2) การเกิดปรากฏการณ์การแพร่ย้อนกลับ (back-diffusion) สิ่งที่สำคัญอย่างมากในการวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุในกล่องทดลองคือ การรักษาระดับก๊าซเรดอนพื้นหลังภายในกล่องให้ต่ำกว่าก๊าซเรดอนในโพรงของวัสดุ ไม่เช่นนั้น ก๊าซเรดอนที่ปล่อยออกมาจากวัสดุอาจแพร่ย้อนกลับเข้าไปในวัสดุอีกได้

จากทฤษฎีและการทดลองของ แซมมูเอลสันและเพทเทอสัน (Samuelsson and Petterson, 1984) ได้เสนอแนะว่าหากใช้กล่องทดลองที่มีปริมาตรประสิทธิผลมากกว่าปริมาตรของวัสดุเกิน 10 เท่าขึ้นไป จะสามารถช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์การแพร่ย้อนกลับได้ สำหรับการทดลองในระบบเปิด การควบคุมการรั่วซึมของอากาศจากภายนอกสามารถลดการเกิดปรากฏการณ์การแพร่ย้อนกลับได้

3. การคำนวณหาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างภายในห้องปิด

การคำนวณหาความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคาร สามารถกระทำได้โดยใช้หลักและกฎการสมดุลของมวล (mass balance equation) ดังนี้

$$\text{Accumulation} = \text{Input} - \text{Output} - \text{Reaction}$$

สมมติว่าก๊าซเรดอนกระจายปะปนอยู่กับอากาศภายในห้องหนึ่ง โดยที่ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีใด ๆ กับสสารอื่น หรือหายไปด้วยกระบวนการใด ๆ นอกจากการระบายอากาศหรือการ

สลายตัวไปโดยธรรมชาติ และแหล่งกำเนิดก๊าซเรดอนอื่น ๆ เช่น น้ำ หรือก๊าซธรรมชาติในอาคาร ไม่นำมารวมด้วย ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในห้องดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.15 (UNSCEAR, 1982; Man and Yeung, 1999)

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{E \cdot S}{V} + C_0\lambda_v - C(\lambda + \lambda_v) \qquad \text{สมการ (2.15)}$$

เมื่อ $C(t)$ คือ ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในห้อง ณ เวลา t ($Bq\ m^{-3}$)

E คือ อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง ($Bq\ m^{-2}s^{-1}$)

S คือ พื้นที่ของวัสดุที่ปล่อยก๊าซเรดอน (m^2)

V คือ ปริมาตรของห้อง (m^3)

C_0 คือ ระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอนในอากาศภายนอก ($Bq\ m^{-3}$)

λ_v คือ อัตราการระบายอากาศ (s^{-1})

λ คือ ค่าคงที่การสลายตัวของก๊าซเรดอน ($2.1 \times 10^{-6}\ s^{-1}$)

ณ สภาวะสมดุล $\frac{dC(t)}{dt} = 0$ ดังนั้น

$$0 = \frac{E \cdot S}{V} + C_0\lambda_v - C(\lambda + \lambda_v) \qquad \text{สมการ (2.16)}$$

$$C = \frac{\frac{ES}{V} + C_0\lambda_v}{\lambda + \lambda_v} \qquad \text{สมการ (2.17)}$$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ สนใจศึกษาเฉพาะก๊าซเรดอนที่เกิดขึ้นจากวัสดุก่อสร้างเท่านั้น ไม่รวมถึงก๊าซเรดอนจากภายนอก ดังนั้นจากสมการที่ 2.17 จะได้ว่า

$$C = \frac{E \cdot S}{V(\lambda + \lambda_v)} \qquad \text{สมการ (2.18)}$$

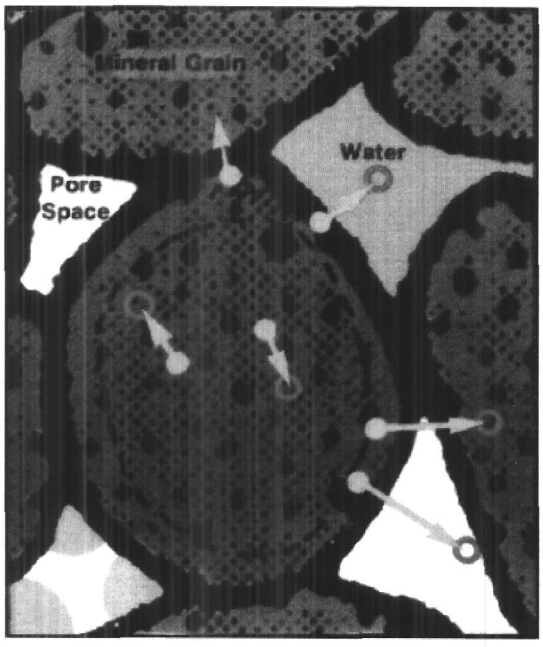
2.2.2 <u>ปัจจัยที่มีผลต่อการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง</u>

ในการศึกษาเพื่อวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง ต้องคำนวณจากความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ปล่อยออกมาจากวัสดุก่อสร้าง โดยกระบวนการแพร่ และการส่งผ่าน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน และขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ หลายปัจจัยด้วยกัน สามารถแบ่งได้เป็น ปัจจัยจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ และความชื้น และปัจจัยจากภายใน ได้แก่ ปริมาณเรเดียม และความพรุนของตัววัสดุก่อสร้าง

จากการศึกษางานวิจัยหลายชิ้น เกี่ยวกับอิทธิพลของความชื้น และอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก็เพิ่มขึ้นด้วย (Stranden; Kolstad; and Lind, 1984) แต่ก็ยังไม่มากเท่ากับอิทธิพลของความชื้น ดังเห็นได้จากผลการวิจัยของ Hirokuni Yamanishi และคณะ จาก National Institute of Fusion Science แห่งประเทศญี่ปุ่น เรื่องผลกระทบของความชื้นต่ออัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากคอนกรีต โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลอง 3 ระดับความชื้น (ตามลักษณะฤดูกาลของประเทศญี่ปุ่น) ได้แก่ ที่ระดับความชื้นควบคุม (dry control) มีความชื้นสัมพัทธ์ 10%, ระดับความชื้นต่ำ (low humidity) มีความชื้นสัมพัทธ์ 40% และระดับความชื้นสูง (high humidity) มีความชื้นสัมพัทธ์ 90% โดยให้ทั้งสองระดับหลังเป็นตัวแทนของฤดูหนาว และฤดูร้อน ตามลำดับ ผลจากการวิจัยพบว่า ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 40% และ 90% อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนเพิ่มสูงขึ้นเป็น 0.13 และ 0.43 Bq m^{-2} s^{-1} ตาม ลำดับ และยังพบอีกว่าปริมาณเรดอนเปลี่ยนแปลงตามระดับไอน้ำภายในกล่องทดลอง เป็นสาเหตุให้ที่ระดับความชื้นต่ำ อัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุจะต่ำกว่าที่ระดับความชื้นสูง ซึ่งสอดคล้องกันกับผลการศึกษาวิจัยของ สแตรนเดน โคลสแตท และลินด์ (Stranden; Kolstad; and Lind, 1984) แห่ง National Institute of Radiation Hygiene ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความชื้น และอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการปล่อยก๊าซเรดอน โดยใช้วัสดุทดลองคือ คอนกรีต alum shale และ shale bearing soil พบว่าอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนของวัสดุทั้งสามชนิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความชื้นภายในกล่องทดลอง และได้ผลสรุปว่าสาเหตุที่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากเรดอนสามารถละลายน้ำ และแพร่ผ่านน้ำได้ดีกว่าอากาศ โดยน้ำมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเป็น 10^{-5} cm^2s^{-1} ในขณะที่อากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน 10^{-2} cm^2s^{-1} ดังนั้นเมื่อมีความชื้น ไอน้ำจะเข้าไปแทรกในรูพรุนของวัสดุ ทำให้เรดอนแพร่ออกมาจากเนื้อวัสดุมากขึ้น ดังภาพที่ 2.4

ภาพที่ 2.4

การแพร่ของก๊าซเรดอนผ่านรูพรุนในวัสดุ



ที่มา: U.S. Department of Interior, 1997.

ส่วนความพรุนของวัสดุก่อสร้างนั้น นับเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการแพร่ผ่านของก๊าซเรดอนสู่บรรยากาศภายนอก ความพรุนของวัสดุขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และการจัดเรียงตัวของอนุภาควัสดุนั้น ๆ ส่วนวัสดุประเภทที่เป็นผงฝุ่น เช่น ทราย หรือแป้ง ความพรุนจะขึ้นอยู่กับการบดอัด และการกระจายของอนุภาควัสดุ

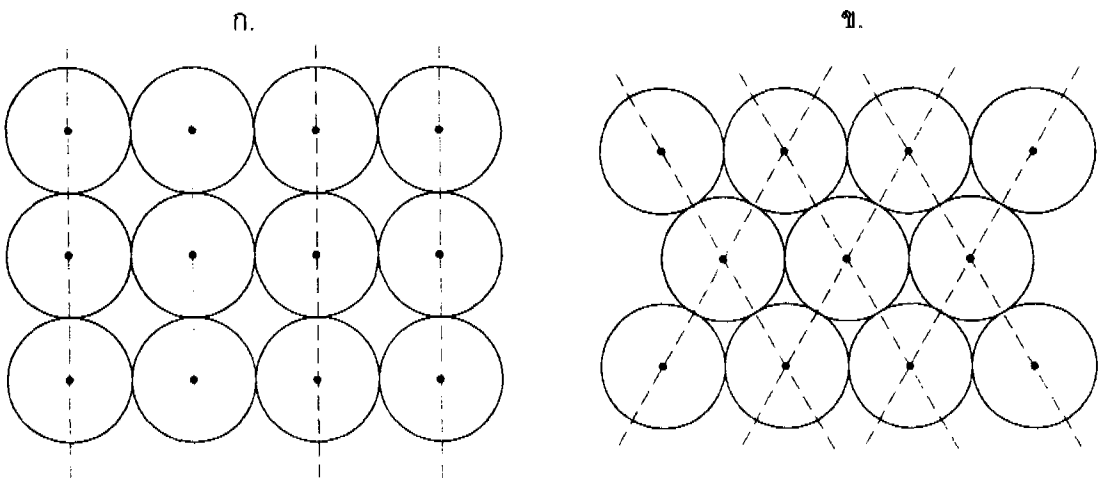
คำจำกัดความ ความพรุนของวัสดุ (porosity of material) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างอากาศภายในวัสดุ กับปริมาตรทั้งหมดของวัสดุ (Chauhan and Chakarvarti, 2002) การเพิ่มความพรุนของวัสดุเท่ากับเป็นการเพิ่มช่องอากาศภายในวัสดุ ให้ก๊าซเรดอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้มากขึ้นด้วย ดังนั้น การลดความพรุนของวัสดุลงเป็นการช่วยลดการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุได้อีกทางหนึ่ง

ได้มีการศึกษา และพยายามที่จะตั้งเกณฑ์ในการวัดความพรุนของวัสดุ โดยมีสมมติว่าอนุภาคของวัสดุนั้นมีรูปทรงเป็นทรงกลมที่สมบูรณ์ (perfectly spherical particles) และมีขนาดเท่า ๆ กัน ถ้าอนุภาคของวัสดุมีการจัดเรียงตัวกันอย่างอัดแน่นโดยที่จุดศูนย์กลางของอนุภาคแถวบนอยู่ตรงกับจุดศูนย์กลางของอนุภาคแถวล่างในแนวดิ่งแล้ว ค่าความพรุนของวัสดุนั้นจะมากที่สุด

คือ 0.476 (ภาพที่ 2.5 ก) แต่ถ้าอนุภาคของวัสดุที่จัดเรียงตัวกันอย่างอัดแน่นและจุดศูนย์กลางของอนุภาคแถวบนอยู่ตรงกับจุดศูนย์กลางของอนุภาคแถวล่าง โดยที่อนุภาคหนึ่งอยู่ระหว่างสองอนุภาคที่อยู่แถวล่างแล้ว ค่าความพรุนของวัสดุนั้นจะน้อยที่สุด คือ 0.26 (ภาพที่ 2.5 ข) (Graton and Frazer, 1935; Davis and DeWiest, 1966)

ภาพที่ 2.5

ลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาควัสดุในอุดมคติ



หมายเหตุ: จากการออกแบบวิจัย, 2549.

การคำนวณหาค่าความพรุนของวัสดุ ได้มีผู้เสนอไว้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือการคำนวณจากความหนาแน่นของวัสดุ และการคำนวณโดยการแทนที่น้ำ

1) การคำนวณค่าความพรุนจากความหนาแน่นของวัสดุ สามารถคำนวณได้เมื่อทราบความหนาแน่นของวัสดุ และความหนาแน่นของอนุภาคของวัสดุ จากสมการดังต่อไปนี้ (Stoulos; Manolopoulou; Papastefanou; and 2003)

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_b}{\rho_p}\right) \qquad \text{สมการ (2.19)}$$

เมื่อ ε คือ ค่าความพรุนของวัสดุ

ρ_b คือ ความหนาแน่นของวัสดุทั้งหมด ($kg\ m^{-3}$)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาคของวัสดุ ($kg\ m^{-3}$)

2) การคำนวณหาค่าความพรุนของวัสดุโดยการแทนที่น้ำ วิธีนี้ใช้ในการหาค่าความพรุนของวัสดุ ภายหลังจากที่วัดอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนเรียบ ร้อยแล้ว โดยนำวัสดุที่ต้องการหาค่าความพรุนไปแช่น้ำจนอิ่มตัว แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำวัสดุนั้นไปให้ความร้อนเพื่อให้ไอน้ำระเหยออกจนหมด แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำค่าน้ำหนักที่ชั่งได้ไปคำนวณ หาค่าความพรุนได้จากสมการต่อไปนี้

$$\varepsilon = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{\rho_w V} \qquad \text{สมการ (2.20)}$$

เมื่อ m_{wet} คือ น้ำหนักของวัสดุที่แช่น้ำจนอิ่มตัว (kg)

m_{dry} คือ น้ำหนักของวัสดุเมื่อทำให้น้ำระเหยออกจนหมด (kg)

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg m^{-3})

V คือ ปริมาตรของวัสดุทั้งหมด (m^3)

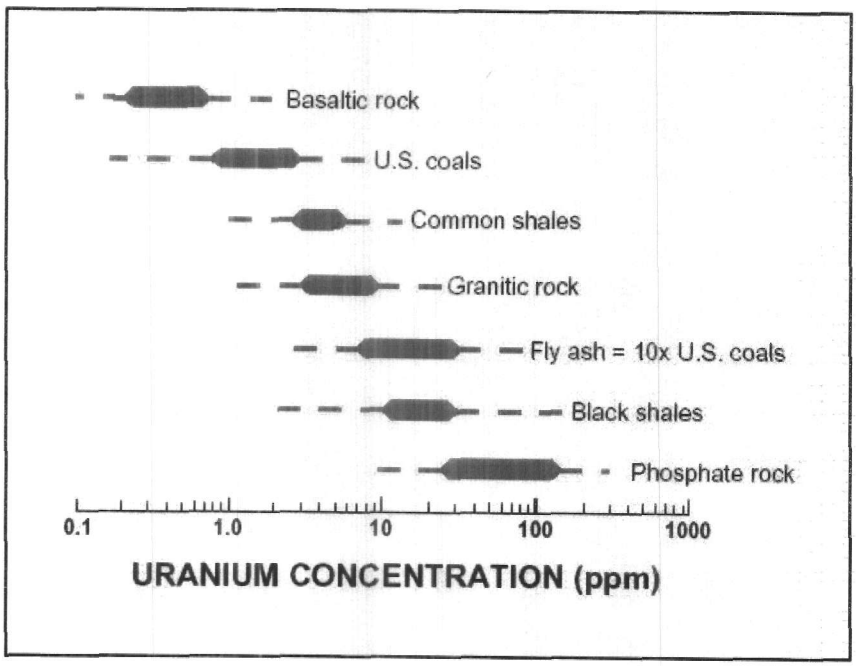
2.2.3 <u>กัมมันตรังสี และก๊าซเรดอนจากเถ้าลอย และฟอสโฟยิปซัม</u>

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า วัสดุก่อสร้างทุกชนิดล้วนมีธาตุกัมมันตรังสีเจือปนอยู่ทั้งสิ้น จึงมีการแผ่รังสี และปล่อยก๊าซเรดอนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งยังไม่ถือว่าเป็นอันตรายหากอาคารมีการระบายอากาศที่ดี และไม่มีปัจจัยอื่นส่งเสริมให้เกิดการสะสมของก๊าซเรดอนในอาคาร แต่ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุอื่นที่มีการเจือปนของธาตุกัมมันตรังสีมาใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างมากขึ้น เช่น การนำเถ้าลอยมาผสมกับคอนกรีต การนำหางแร่มาใช้ในการถมที่ ทำให้วัสดุก่อสร้างใหม่นี้มีการเจือปนของธาตุกัมมันตรังสีในระดับที่สูงกว่าปกติ อาจส่งผลต่อการแผ่รังสี และการปล่อยก๊าซเรดอนภายในอาคารมากขึ้นจนถึงระดับอันตรายได้

ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาถึงก๊าซเรดอนที่ปล่อยออกมาจากวัสดุคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์และฟอสโฟยิปซัม โดยเถ้าลอยลิกไนต์ เป็นผลิตผลพลอยได้จากการถลุงถ่านหิน ส่วนฟอสโฟยิปซัมนั้นเป็นผลิตผลพลอยได้ที่ได้จากอุตสาหกรรมปุ๋ยฟอสเฟต ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุที่มีการเจือปนของแร่ยูเรเนียมในระดับที่ค่อนข้างสูง (ภาพที่ 2.6) จึงเป็นไปได้ว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย และฟอสโฟยิปซัมจะมีการปล่อยก๊าซเรดอนในอัตราที่สูงด้วย

ภาพที่ 2.6

ปริมาณยูเรเนียมในหินประเภทต่าง ๆ โดยทั่วไป



ที่มา: U.S. Department of Interior, 1997.

1. เถ้าลอย (fly ash)

เถ้าลอย หรือเถ้าถ่านหิน เป็นวัสดุละเอียดที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหิน แล้วถูกพัดออกมาทางปล่องควัน มีสารประกอบทางเคมีคือ ออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เมื่อสัมผัสกับความชื้นภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เรียกว่า "ปฏิกิริยาปอซโซลานิก" (pozzolanic) ได้สารที่มีคุณสมบัติเหมือนซีเมนต์ จึงเรียกเถ้าลอยว่าเป็น "วัสดุปอซโซลาน" (pozzolan)

เนื่องจากเถ้าลอยได้มาจากการเผาไหม้ถ่านหิน ซึ่งถ่านหินที่ใช้ในโลก มีอยู่ 4 ชนิด ได้แก่ แอนทราไซด์ (antracide) บิทูมินัส/ซับบิทูมินัส (bituminous/sub-bituminous) ลิกไนท์ (lignite) และพีท (peat) โดยถ่านหินที่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมากที่สุดคือ บิทูมินัส/ซับบิทูมินัส และลิกไนท์ ซึ่งถ่านหินบิทูมินัสมีคุณภาพและคุณสมบัติดีกว่าถ่านหินลิกไนท์ ตรงที่มีความชื้นต่ำ ให้ค่าความร้อนสูง มีสารกำมะถันเจือปนปริมาณต่ำ และมีขี้เถ้าน้อย ในขณะที่ถ่านหินลิกไนท์มีคุณภาพต่ำกว่า มีปริมาณออกซิเจนและความชื้นสูง อีกทั้งมีสารกำมะถันเจือปนในปริมาณมาก

ในประเทศไทยมีแหล่งสำรองถ่านหินมากกว่าน้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ โดยถ่านหินที่ถูกสำรวจพบส่วนใหญ่เป็นลิกไนท์ แหล่งที่พบมากที่สุดคือแหล่งแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เมื่อเผาถ่านหินลิกไนท์จะเหลือเถ้าถ่านหินประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณถ่านหินที่เผา โดยสามารถแบ่งประเภทเถ้าถ่านหินลิกไนท์ได้ดังนี้

1) เถ้าลอย (fly ash, pulverized fuel ash, dry ash) เป็นเถ้าที่ถูกแยกออกมาจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควัน และถูกดักจับไว้ได้ในเครื่องดักจับ (electrostatic precipitator) โดยจะมีประมาณ 82 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณเถ้าทั้งหมด

2) เถ้าหนัก (bottom ash, wet ash) เป็นเถ้าที่เกิดจากการปะทะกันของอนุภาคเถ้าในบริเวณสันดาป (combustion zone) โดยในบริเวณนี้อุณหภูมิจะสูงพอที่จะหลอมเถ้าที่เป็นเม็ดหรือก้อนตกลงสู่ก้นเตา โดยมีประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ ของเถ้าทั้งหมด

3) ขี้เถ้า (slag) เป็นเถ้าที่ปะทะกับผนังเตา และหลอมติดกันรวมตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ เมื่อรวมตัวกันจนมีน้ำหนักมากจะตกลงสู่ก้นเตา โดยมีปริมาณน้อยมาก

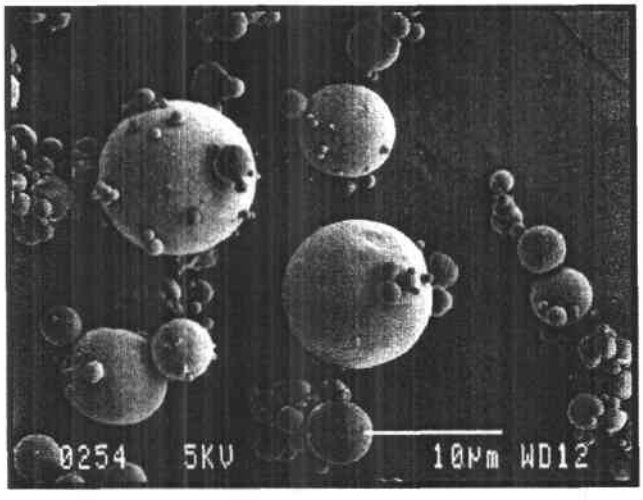
เถ้าลอยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชั้นคุณภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังนี้

- เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินประเภทแอนทราไซด์และบิทูมินัส โดยเถ้าลอยนี้มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอร์ริกออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก มีปริมาณแคลเซียมน้อยกว่าร้อยละ 5 ดังนั้นเถ้าลอยประเภทนี้จึงมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์ต่ำ หรือแทบจะไม่มี แต่ยังมีคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยประเภทนี้ในช่วงต้นจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา

- เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินประเภทลิกไนต์ และซับบิทูมินัส โดยเถ้าลอยนี้มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอร์ริกออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์อยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 15 ถึง 23 โดยน้ำหนัก ดังนั้นเถ้าลอยชนิดนี้จึงมีคุณสมบัติของซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานในตัวเอง กำลังรับแรงอัดของคอน กรีตที่ใช้เถ้าลอยประเภทนี้จะพัฒนาได้อย่างรวดเร็วในช่วงต้น

ภาพที่ 2.7

ภาพถ่ายด้วยกล้องอิเล็คตรอน ไมโครสโคป ของเถ้าลอย



ที่มา: Landman, 2003.

เมื่อไม่นานมานี้ การนำเถ้าลอยมาใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง เริ่มเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวางทั่วโลก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์ อิฐ และคอนกรีตบล็อค เนื่องจากสามารถใช้แทนที่ทรายกับซีเมนต์ได้ และยังสามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2543) นอกจากนี้ การผสมเถ้าลอยลงในคอนกรีตยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติให้คอนกรีตหลายประการ เช่น เพิ่มความสามารถด้านการลื่นไหล ลดความต้องการน้ำ ลดการสูญเสียน้ำ และการแยกชั้นของคอนกรีต เพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตระยะปลาย ลดการหดตัวขณะแห้ง เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการนำเถ้าลอยมาใช้ผสมในวัสดุก่อสร้างจะก่อให้เกิดประโยชน์หลายประการตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น แต่โทษที่อาจตามมาก็ยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจน เช่น การแผ่รังสี และการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เถ้าลอยมีธาตุยูเรเนียม (^{238}U) และเรเดียม (^{226}Ra) ปะปนอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าในเถ้าหนัก (D.J. Karangelos et al., 2004) ซึ่งธาตุเหล่านี้จะเกิดการสลายตัวเป็นธาตุกัมมันตรังสีอีกหลายชนิด รวมทั้งก๊าซเรดอนด้วย จึงเป็นไปได้ว่าวัสดุก่อสร้างที่นำเถ้าลอยมาใช้อาจปล่อยก๊าซเรดอนในอัตราที่สูงกว่าวัสดุก่อสร้างทั่วไป

ถึงแม้ว่าในเถ้าลอยจะมีปริมาณของยูเรเนียมปะปนอยู่มากกว่าในถ่านหิน เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ แต่กลับพบว่ามีอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนน้อยกว่าถ่านหิน (Kumar; Mahur; Sengupta; and Prasad, 2005) ซึ่งอาจเป็นเพราะว่า เนื้อผงที่ละเอียดของเถ้าลอยจึงไม่มีรูพรุนภายในมากเท่ากับถ่านหิน

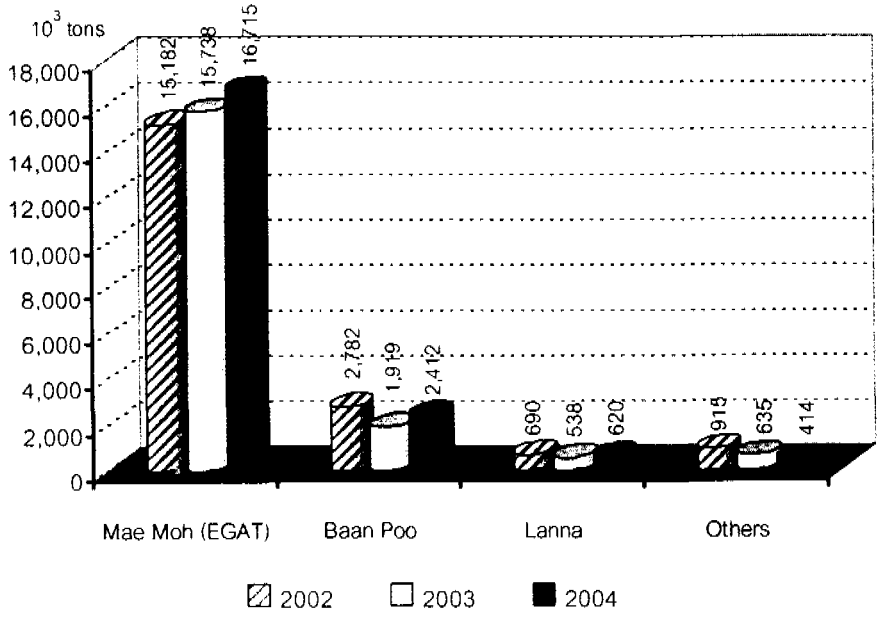
ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม จากผู้วิจัยหลายกลุ่มด้วยกัน ซึ่งมีรายงานผลการศึกษาวิจัยที่แตกต่างกันออกไป โดย สแตรนเดน (Stranden, 1983) และ มาราซิโอติส (Maraziotis,1985) ได้รายงานผลการศึกษาไว้ว่า เกิดการปล่อยก๊าซเรดอนลดลงในคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม แต่การศึกษาของ ซิโอทิสและวริกซ์ตัน (Siotis and Wrixon,1984) เกี่ยวกับอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนจากคอนกรีตผสมเถ้าลอยในสัดส่วนต่าง ๆ กัน กลับพบว่ามีอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ผลการศึกษาของ อัลแบค (Ulbak, et al.,1984) และ คามาดูส (Karmadoost, et al., 1988) สรุปไว้ว่า การผสมเถ้าลอยลงในวัสดุทดสอบ (คอนกรีต และดิน) ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเมื่อมีการทดสอบในลักษณะเดียวกันนี้โดย คูมาร์ (Kumar, et al., 2005) กลับพบว่า คอนกรีตจะมีอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการผสมเถ้าลอย แต่ให้ผลกลับกันเมื่อทดลองกับดิน

จากที่ยกตัวอย่างมา จะเห็นได้ว่ายังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซเรดอนที่ปล่อยออกมาจากวัสดุก่อสร้าง กับปริมาณการผสมเถ้าลอย นอกจากนี้ปัจจัยทางด้านภูมิศาสตร์ ขนาด และความละเอียดของเถ้าลอย ลักษณะปูนซีเมนต์ของพื้นที่นั้น ๆ ล้วนแต่เป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่ออัตราการปล่อยก๊าซเรดอนทั้งสิ้น

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ใช้เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งนับเป็นแหล่งที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย (ภาพที่ 2.8)

ภาพที่ 2.8

ปริมาณการผลิตถ่านหินระหว่างปี พ.ศ. 2545 - 2547 จากแหล่งต่าง ๆ ในประเทศไทย



ที่มา: สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2547.

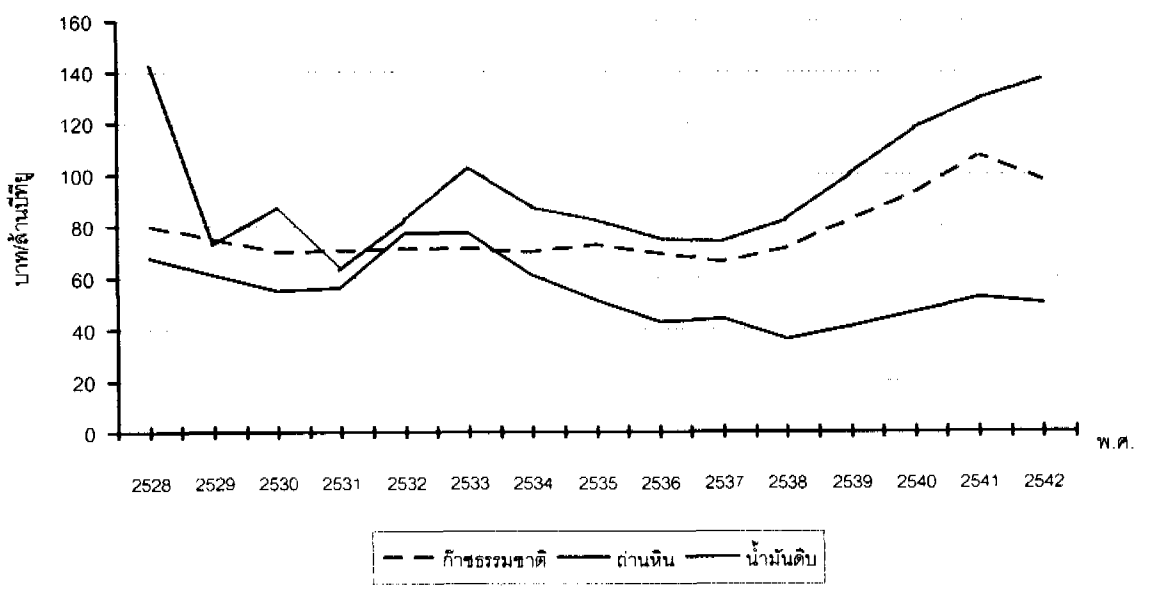
ถ่านหินแม่เมาะ เป็นถ่านหินลิกไนท์ ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ยุคเทอร์เชียรี (Tertiary) หรือเมื่อประมาณ 10 ถึง 70 ล้านปีก่อน โดยจะสะสมตัวอยู่ภายในหุบเขา เมื่อได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนผิวโลก จึงทำให้คุณภาพของถ่านหิน ความหนาของชั้นถ่านหิน ขนาด และปริมาณของถ่านหินแตกต่างกันไป

การผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จะใช้ถ่านหินลิกไนท์เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นถ่านหินซึ่งให้ความร้อนต่ำ จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ C ต่างจากถ่านหินที่ใช้กันในแถบยุโรป อเมริกา และญี่ปุ่นที่ใช้ถ่านหินประเภทแอนทราไซด์ และบิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นถ่านหินชั้นดีให้ความร้อนสูง จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ F โดยในแต่ละวันโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะใช้ถ่านหินกว่า 40,000 ตัน ในการเผาไหม้ และได้เถ้าลิกไนท์ออกมาประมาณวันละ 10,000 ตัน ในจำนวนนี้จะเป็นเถ้าลอยประมาณ 8,000 ตัน

นับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531 เป็นต้นมา กฟผ. ได้นำเถ้าลอยลิกไนท์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะไปใช้ในงานก่อสร้างหลายอย่าง เช่น งานก่อสร้างฐานราก งานก่อสร้างชั้นพื้นทางถนน งานก่อสร้างถนนคอนกรีตบดอัด (RCCP) รวมทั้งได้นำเถ้าลอยไปใช้ทดแทนซีเมนต์ในงานคอนกรีตทั่วไปด้วย

ภาพที่ 2.9

เปรียบเทียบราคาก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และน้ำมันดิบ



ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, 2543

เป็นที่แน่นอนว่าการนำเถ้าลอยไปใช้ในงานก่อสร้างของประเทศไทย มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในอนาคต เนื่องจากมีปริมาณการผลิตค่อนข้างมากในแต่ละวัน รวมทั้งแผนพัฒนาเศรษฐกิจและ

สังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 7 ที่ตั้งเป้าหมายให้เพิ่มการใช้ลิกไนท์ให้มากขึ้น เพื่อลดปริมาณการสั่งซื้อน้ำมันปิโตรเลียมลง นอกจากนี้ราคาถ่านหินยังต่ำกว่าราคาเชื้อเพลิงอื่น และมีแนวโน้มที่จะลดลงด้วย (ภาพที่ 2.9) แต่ที่น่ากังวลที่สุดก็คือ พื้นที่ตั้งของเหมืองถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าแม่เมาะตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีศักย์เรดอน[5] และความเข้มข้นของยูเรเนียมในปริมาณที่ค่อนข้างสูง

ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงผลกระทบด้านมลพิษต่าง ๆ ที่อาจตามมาเนื่องจากการใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในวัสดุก่อสร้าง เพื่อที่จะได้เข้าใจ และสามารถหาหนทางป้องกัน รวมทั้งการกำหนดเป็นมาตรฐาน หรือแนวทางในการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างดังกล่าวสำหรับประเทศไทย

2. ฟอสโฟยิปซัม (phosphogypsum)

ฟอสโฟยิปซัม เป็นวัตถุเหลือใช้ หรือผลิตผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยเคมี ซึ่งเกิดจากการนำหินฟอสเฟตมาผสมกับกรดซัลเฟอริก (sulfuric acid) ทำให้ได้ฟอสโฟยิปซัมที่มีการปนเปื้อนของกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) ที่มีความเป็นกรดสูง เมื่อไม่นานมานี้ ประเทศไทยเริ่มนำสารฟอสโฟยิปซัมมาใช้ประโยชน์ โดยนำมาทำเป็นวัสดุปรับปรุงดิน ตลอดจนนำมาใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้าง จนในปัจจุบันธุรกิจการค้ายิปซัมภายในประเทศมีมูลค่าปีละไม่ต่ำกว่า 6,000 ล้านบาท มีปริมาณการใช้ปีละกว่า 1 ล้านตัน

คนส่วนใหญ่อาจคุ้นเคยกับ "ยิปซัม" มากกว่า "ฟอสโฟยิปซัม" ซึ่งยิปซัม ก็คือ แร่เกลือจืด ซึ่งเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตมีน้ำอยู่สองโมเลกุล มีสูตรทางเคมีคือ $CaSO_4.2H_2O$ ยิปซัมที่เกิดตามธรรมชาติเกิดจากการตกตะกอนของทะเลเก่าที่เป็นแอ่งใหญ่ ในประเทศไทยสามารถพบได้ในพื้นที่จังหวัดพิจิตร นครสวรรค์ และในพื้นที่ภาคใต้ ซึ่งยิปซัมชนิดนี้จะปราศจากธาตุโลหะหนักที่มีพิษต่าง ๆ จึงปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

แต่ยังมียิปซัมอีกประเภทหนึ่ง ที่เกิดจากผลพลอยได้ของอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต โดยเกิดจากกระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริกจากหินฟอสเฟต ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้

$$Ca_{10}(PO_4)6F_2 + 10H_2SO_4 + 20H_2O \longrightarrow 10CaSO_4.2H_2O + 6H_3PO_4 + 2HF$$

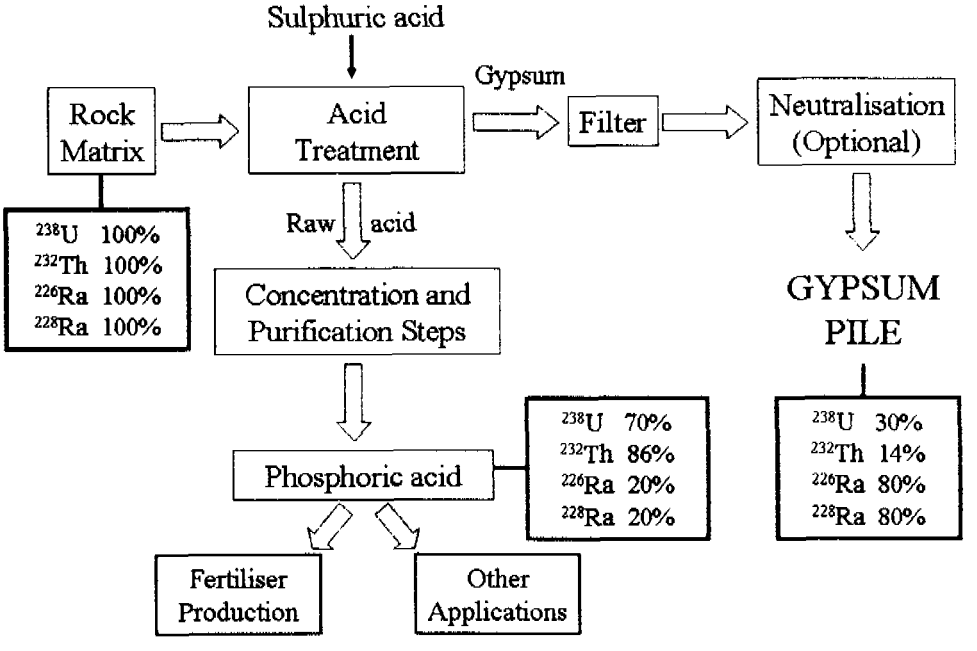
ผลิตผลพลอยได้ที่ได้มาจากกระบวนการนี้ด้วยก็คือ ฟอสโฟยิปซัม ($10CaSO_4.2H_2O$) ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยแคลเซียมซัลเฟต ซิลิกาในรูปของควอท และหินฟอสเฟตที่ไม่เกิด

[5] ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก หน้า 178

ปฏิกิริยาอีกบางส่วน นอกจากนี้ยังมีสารกัมมันตภาพรังสีเรเดียมและยูเรเนียม รวมถึงธาตุโลหะหนัก ซึ่งเป็นพิษ ได้แก่ สารหนู แบเรียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง ปรอท เซเลเนียม เงิน อลูมินัม และสารฟลูออไรด์ที่เป็นพิษปนเปื้อนอยู่ ดังนั้น ในประเทศต่าง ๆ ทั้งในยุโรป อเมริกา และออสเตรเลีย จึงมีมาตรการออกมาควบคุมการใช้ฟอสโฟยิปซัมอย่างเข้มงวด

เนื่องจากฟอสโฟยิปซัมเกิดจากกระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริกจากแร่หินฟอสเฟต ซึ่งมีสิ่งเจือปนที่ไม่บริสุทธิ์ตามธรรมชาติที่มีความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีอยู่สูงปะปนอยู่ด้วย แม้แต่ในแร่เกรดสูงที่ประกอบด้วยแคลเซียมฟอสเฟต 70 เปอร์เซ็นต์ ก็ยังมีสิ่งไม่บริสุทธิ์เจือปนอยู่มาก เช่น แคลเซียมฟลูออไรด์ สารประกอบจำพวกคลอไรด์ โครเมียม สารกัมมันตภาพรังสี ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการผลิต สารกัมมันตภาพรังสี จะถูกรวมอยู่ในฟอสโฟยิปซัม

ภาพที่ 2.10
กระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริก



ที่มา: International Atomic Energy Agency (IAEA), 2003.

ในประเทศตะวันตก ได้มีการศึกษาผลกระทบของการใช้ฟอสโฟยิปซัมกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในเรื่องที่เกี่ยวกับการแผ่รังสีสู่ร่างกายมนุษย์ ดังตัวอย่างเช่น ในสหรัฐอเมริกาได้มีการเก็บตัวอย่างฟอสโฟยิปซัมมาตรวจสอบ พบว่ามีความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีของแร่ยูเรเนียมสูงเป็น 10 เท่า ของระดับพื้นฐานของดินปกติ และมีความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีของแร่เรเดียม

สูงเป็น 60 เท่า ของระดับพื้นฐานของดินปกติ นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีของเรเดียมในฟอสโฟยิปซัม ผันแปรไปตามแหล่งที่เก็บตัวอย่างในแสต็คส์หนึ่ง และยังแตกต่างกันในระหว่างแสต็คส์ในเหมืองยิปซัมที่อยู่ในภูมิภาคเดียวกัน สอดคล้องกับผลการวัดรังสีที่แผ่ออกมาจากวัสดุก่อสร้างที่ทำมาจากฟอสโฟยิปซัมในประเทศบราซิล (Mazzilli and Saueia, 1999) ซึ่งพบว่า ร่างกายของผู้อยู่อาศัยในอาคารที่สร้างด้วยวัสดุดังกล่าว จะได้รับรังสีจากการแผ่รังสีภายนอกอยู่ในช่วง 1.0×10^{-1} ถึง 2.8 mSv ต่อปี ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของฟอสโฟยิปซัม และพบว่าจะได้รับรังสีจากการแผ่รังสีภายใน อันเนื่องมาจากการสูดดมก๊าซเรดอนที่ปล่อยออกมาจากฟอสโฟยิปซัมอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2.0×10^{-1} ถึง 6.3 mSv ต่อปี ซึ่งเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ว่าร่างกายมนุษย์ไม่ควรได้รับรังสีเกิน 1 mSv ต่อปี

เมื่อมีการนำฟอสโฟยิปซัมมาวิเคราะห์ พบว่ามีธาตุที่เป็นองค์ประกอบดังตารางที่ 2.8 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของยิปซัมที่เหมาะสมในการใช้ภายในอาคาร ตามตารางที่ 2.9 ก็พบว่า ฟอสโฟยิปซัมมีธาตุกัมมันตรังสีเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่สูงกว่ายิปซัมทั่วไปมาก

ตารางที่ 2.8

องค์ประกอบของฟอสโฟยิปซัม

Major constituents ($g\ kg^{-1}$) :	
Ca	200 – 240
P	1 - 5
S	150 – 190
F	5 - 38
Minor constituents ($mg\ kg^{-1}$) :	
K	100 – 800
Mg	8 – 400
Mo	65
Cd	0.23
Radioactive elements :	
^{226}Ra	10 – 25 $pCi\ g^{-1}$

ที่มา: Korcak, 1992.

ปัจจุบันมีการผลิตปุ๋ยเคมีออกมาเป็นจำนวนมาก โดยทุก ๆ การผลิตกรดฟอสฟอริคหนึ่งตัน จะมีฟอสโฟยิปซัมที่เป็นผลิตผลพลอยได้ออกมาจำนวน 4 ตัน ซึ่งปริมาณที่มากมายเช่นนี้จึงได้มีผู้นำไปใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้าง ดีกว่าปล่อยทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ เนื่องจากฟอสโฟยิปซัมมีคุณสมบัติในการแทนที่ทรายให้ผลใกล้เคียงกับเถ้าลอย และมีราคาถูกกว่ายิปซัมทั่วไปมาก

ตารางที่ 2.9

เปรียบเทียบสารปนเปื้อนในฟอสโฟยิปซัม กับมาตรฐานของยิปซัมที่ใช้ในอาคาร

	Phosphogypsum	Requirements for building gypsum
Total P_2O_5	1.0 %	< 0.4 %
Water soluble P_2O_5	0.2 %	< 0.01 %
Total F	1.0 %	< 1.0 %
Water soluble F	0.14 %	< 0.05 %
Na	0.17 %	< 0.05 %
Organic	0.15 %	< 0.10%
Inert	> 2.0 %	< 2.0 %
pH	4	> 5

ที่มา: Kovler, K.; Haquin, G.; Manasherov, V.; Ne'eman, E.; and Lavi, N., 2002.

นอกจากฟอสโฟยิปซัมจะมีปริมาณเรเดียม ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของก๊าซเรดอนเจือปนอยู่ในปริมาณมากแล้ว ทางหน่วยงานป้องกันสภาพแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency; US EPA) ยังเชื่อว่าธาตุโลหะหนักอื่น ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ อาจทำให้เกิดอันตรายทางเคมีต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ มากไปกว่านั้น อาจมีโอกาสที่สารพิษเหล่านี้อาจถูกชะล้างออกมาจากแหล่งเก็บฟอสโฟยิปซัม ไหลลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน ดังนั้น การนำฟอสโฟยิปซัมมาใช้ประโยชน์ไม่ว่าในทางใดก็ตาม ควรมีการศึกษาถึงผลกระทบที่อาจตามมาอย่างละเอียดรอบคอบจะเป็นการดีที่สุด

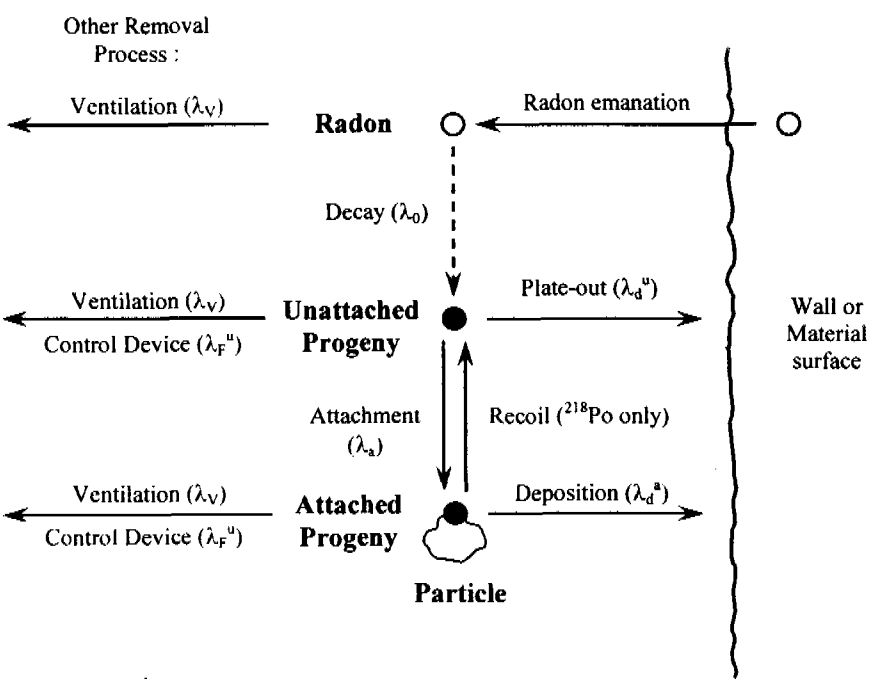
2.3 ปริมาณการได้รับรังสีจากก๊าซเรดอน

เรดอน นับเป็นหนึ่งในสสารไม่กี่ชนิด ที่จัดเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์และสัตว์ โดยถูกจัดอยู่ในกลุ่มที่ 1 ของสารก่อมะเร็งในมนุษย์ ในการจัดแบ่งประเภทโดยองค์การอนามัยโลก (WHO, 1988) และจากหน่วยงานป้องกันสภาพแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (USEPA; 1987) ตามลำดับ นอกเหนือจากผลกระทบของเรดอนที่อาจก่อให้เกิดโรคมะเร็งปอดในมนุษย์แล้ว จากการศึกษาเมื่อไม่นานมานี้ (Henshaw et al. 1990, 1992) ยังพบว่าปริมาณเรดอนภายในอาคารที่เพิ่มขึ้นอาจมีความเกี่ยวเนื่องกับโรคมะเร็งอื่น ๆ เช่น การเป็นโรคมะเร็งในเม็ดเลือดขาว หรือลิวคีเมีย (leukemia) ในเด็ก แต่ยังไม่ได้รับการยืนยันทางวิทยาศาสตร์อย่างเป็นทางการ

การได้รับเรดอนเข้าสู่ร่างกายโดยเฉพาะที่ปอด เกิดขึ้นเนื่องจากการสูดดมเอาผลิตภัณฑ์ลูกหลานของเรดอน (radon daughters or radon progeny) เข้าสู่ร่างกาย ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีพฤติกรรมไม่เหมือนกับเรดอน โดยจะสามารถทำปฏิกิริยากับสสารรอบ ๆ ได้ ดังนั้นจึงสามารถเกาะติดกับอนุภาคโดยรอบได้อย่างรวดเร็ว เรียกว่า attached progeny จะมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ไม่สามารถเกาะกับอนุภาครอบ ๆ ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ความเข้มข้น และการระบายอากาศ (Nazaroff and Nero, 1988) ดังแสดงในภาพที่ 2.11

ภาพที่ 2.11

พฤติกรรมของผลิตภัณฑ์ลูกหลานของเรดอนในบรรยากาศ



ที่มา: Nagda, 1994.

เมื่อก๊าซเรดอน และผลิตภัณฑ์ลูกหลานถูกสูดดมเข้าสู่ระบบหายใจ อนุภาคเหล่านี้ก็จะไปเกาะติดกับเนื้อเยื่อของปอด เมื่อเกิดการสลายตัวก็จะปล่อยรังสีต่าง ๆ ออกมาด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รังสีแอลฟา ที่ปล่อยพลังงานออกมามากถึง 6.17 MeV ในขณะที่ปล่อยรังสีเบตา และรังสีแกมมาออกมาเพียง 1.1 MeV และ 1 MeV ตามลำดับ ซึ่งพลังงานจากรังสีต่าง ๆ นี้เองจะทำให้เกิดปฏิกิริยา ไอออไนเซชั่น[6] (ionization) ขึ้นภายในเซลล์ ซึ่งกระบวนการนี้จะทำลายพันธะเคมีในสารพันธุกรรม ทำให้เซลล์นั้นตาย หรือเนื้อเยื่อนั้นเติบโตผิดปกติ

2.3.1 <u>การประเมินความเสี่ยงเนื่องมาจากก๊าซเรดอน</u>

แนวทางที่ใช้กันโดยทั่วไปในการประเมินความเสี่ยงที่จะเป็นมะเร็งปอดในมนุษย์ อันเนื่องมาจาก การได้รับก๊าซเรดอนเข้าสู่ร่างกาย สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แนวทางหลัก ได้แก่ epidemiological method และ dosimetric method

1. Epidemiological Method เป็นแนวทางที่ใช้ประเมินความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอด โดยการสังเกตอุบัติการณ์เกิดโรคมะเร็งปอดขึ้นภายในกลุ่มตัวอย่าง ประเมินผลด้วยกระบวนการทางสถิติ แล้วจึงอ้างอิงผลที่ได้ไปยังประชากรกลุ่มใหญ่ เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อหน่วยปริมาณที่ได้รับ แนวทางนี้มักใช้เมื่อมีผลกระทบต่อหมู่คนเป็นจำนวนมาก เช่น การเกิดมะเร็งปอดกับคนงานในเหมือง การเกิดมะเร็งในผู้หญิงของเมืองหนึ่ง เป็นต้น

แม้จะเป็นที่นิยม แต่การประเมินความเสี่ยงโดยแนวทางนี้ก็ยังมีความคลาดเคลื่อน และไม่แน่นอนอยู่บ้าง เช่น การประเมินความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอดในคนงานเหมืองใต้ดิน ต้องอาศัยระยะเวลาค่อนข้างยาวนาน อาจเป็นสิบปีในการสังเกต อีกทั้งยังมีปัจจัยแทรกซ้อนมากมาย ซึ่งมีผลทำให้เป็นมะเร็งได้เช่นกัน เช่น ขี้โลหะ รังสีแกมมา พฤติกรรมการสูบยาสูบ และนิวไคลด์กัมมันตรังสีอื่น ๆ ทำให้ยากต่อการระบุความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโรคมะเร็งปอดกับก๊าซเรดอน

2) Dosimetric Method แนวทางในการประเมินความเสี่ยงนี้ จะใช้การคำนวณปริมาณรังสีที่ปอดได้รับจากเรดอน และผลิตภัณฑ์ลูกหลาน โดยใช้แบบจำลองซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย ICRP เรียกว่า Human Respiratory Tract Model (HRTM) ในการประเมินความเสี่ยง จะประกอบด้วยสองขั้นตอนหลัก โดยในขั้นตอนแรก จะเป็นการคำนวณเพื่อหาปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose) ที่ปอด หลังจากนั้นจึงคำนวณค่าปริมาณรังสียังผล (effective dose) โดยคูณด้วยค่าปรับเทียบตามเนื้อเยื่อหรืออวัยวะ (tissue weighting factor) หรือค่าปรับเทียบตามชนิดรังสี

---

[6] ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข หน้า 184.

(radiation weighting factor) เพื่อประเมินความความเสี่ยงต่อร่างกาย (ICRP 1991) ส่วนในขั้นตอนที่สอง คือการนำค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้มาประเมินผลความเสี่ยงที่ปอดและร่างกายได้รับตามระยะเวลาที่ได้รับรังสี โดยใช้ตัวคูณปัจจัยเสี่ยง (risk / dose factor) ในการปรับค่า ปัจจุบัน ICRP ได้กำหนดอยู่ที่ 5×10^{-2} Sv^{-1} (ICRP,1991) ซึ่งค่าความเสี่ยงนี้ได้มาจากการศึกษาตามแนวทาง epidemiological จากกลุ่มประชากรที่ได้รับรังสีในปริมาณต่าง ๆ กัน โดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นผลมาจากการศึกษาผู้รอดชีวิตจากเหตุการณ์ทิ้งระเบิดปรมาณูที่เมืองฮิโรชิมา และนางาซากิ ถึงแม้ว่า ในกรณีของทั้งสองจะเป็นการได้รับรังสีเนื่องมาจากการแผ่รังสีแกมมาและนิวตรอน แต่สำหรับเรดอน จะเป็นการได้รับรังสีจากการแผ่รังสีแอลฟาก็ตาม ซึ่งตรงจุดนี้เองที่อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประเมินผลความเสี่ยงตามแนวทางนี้ได้

2.3.2 <u>การคำนวณหาปริมาณรังสีที่ได้รับ</u>

การคำนวณหาปริมาณรังสีที่ได้รับ จากการสูดดมก๊าซเรดอน หรือโทรอน และผลิตภัณฑ์ลูกหลานเข้าสู่ร่างกาย สามารถที่จะกระทำได้หลายวิธี เช่น การคำนวณหาปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose) ในบางส่วนของเนื้อเยื่อ การคำนวณหาปริมาณรังสีดูดกลืนเฉลี่ย (average absorbed dose) ของปอด การคำนวณหาปริมาณรังสีสมมูล (equivalent dose) ของปอด การคำนวณหาปริมาณรังสียังผล (effective dose) ต่อทั้งร่างกาย เป็นต้น ซึ่งในทางปฏิบัติโดยทั่วไปแล้ว จะให้ความสำคัญต่อปริมาณรังสียังผลมากที่สุด (Health Physics Society, 2001)

เนื่องจากในสภาพบรรยากาศโดยทั่วไป ก๊าซเรดอน หรือโทรอน จะเกิดการสลายตัวอย่างต่อเนื่อง และมีความสัมพันธ์ค่อนข้างสลับซับซ้อนกับปริมาณผลิตภัณฑ์ลูกหลานที่เกิดจากการสลายตัวดังกล่าว ดังนั้น จึงได้มีการกำหนดหน่วยที่ใช้ในการวัดปริมาณเพื่อใช้ในการคำนวณและประเมินความเสี่ยงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการได้รับก๊าซเรดอน โทรอน และผลิตภัณฑ์ลูกหลานเข้าสู่ร่างกาย (ตารางที่ 2.10) ในการคำนวณหาปริมาณรังสียังผลที่ร่างกายได้รับนั้น สามารถกระทำได้เมื่อทราบค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในพื้นที่ที่ต้องการศึกษา แต่ค่าที่วัดได้นั้นอาจจะไม่ใช่ค่าความเข้มข้นในภาวะสมดุลกัมมันตรังสี ดังนั้น จึงต้องมีตัวคูณเพื่อปรับค่า โดยเรียกตัวคูณนี้ว่า equilibrium factor แล้วเรียกค่าความเข้มข้นที่ได้หลังจากปรับค่าแล้วว่า Equilibrium Equivalent Concentration (EEC) จากนั้น จึงนำค่าความเข้มข้นนี้ไปคำนวณหาปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับต่อไป

ตารางที่ 2.10

หน่วยในการวัดปริมาณเรดอน โทรอน และผลิตภัณฑ์ลูกหลาน

อักษรย่อ	ความหมาย	คำอธิบาย
pCi L^{-1}	Picocuries per liter	กัมมันตภาพของก๊าซกัมมันตรังสี (เรดอน หรือ โทรอน) ต่อหน่วยปริมาตรของอากาศ
PAEC	Potential alpha energy concentration	ปริมาณของพลังงานรังสีแอลฟาที่ปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์ลูกหลานของเรดอน หรือโทรอนต่อหน่วยปริมาตรของอากาศ
WL	Working level	หน่วยของ PAEC โดย 1 WL = 1.3×10^5 MeV L^{-1}
PAEE	Potential alpha energy exposure	ค่าเฉลี่ยของ PAEC × ระยะเวลาที่สัมผัส
WLM	Working level month	ค่าเฉลี่ยของ PAEC × ระยะเวลาที่สัมผัสใน 1 เดือน โดยกำหนดให้ 1 เดือน เท่ากับ 170 ชั่วโมง 1 WLM = 170 WLh
F	Equilibrium factor	ตัวคูณค่าปัจจัยสมดุล เท่ากับ 0.4 สำหรับภายในอาคาร เท่ากับ 0.6 สำหรับภายนอกอาคาร
EEC	Equilibrium equivalent concentration	ค่าความเข้มข้นในสภาวะสมดุลเทียบเท่า โดยที่ EEC = F × ค่าความเข้มข้นของเรดอนที่วัดได้

* UNSCEAR 2000 report.

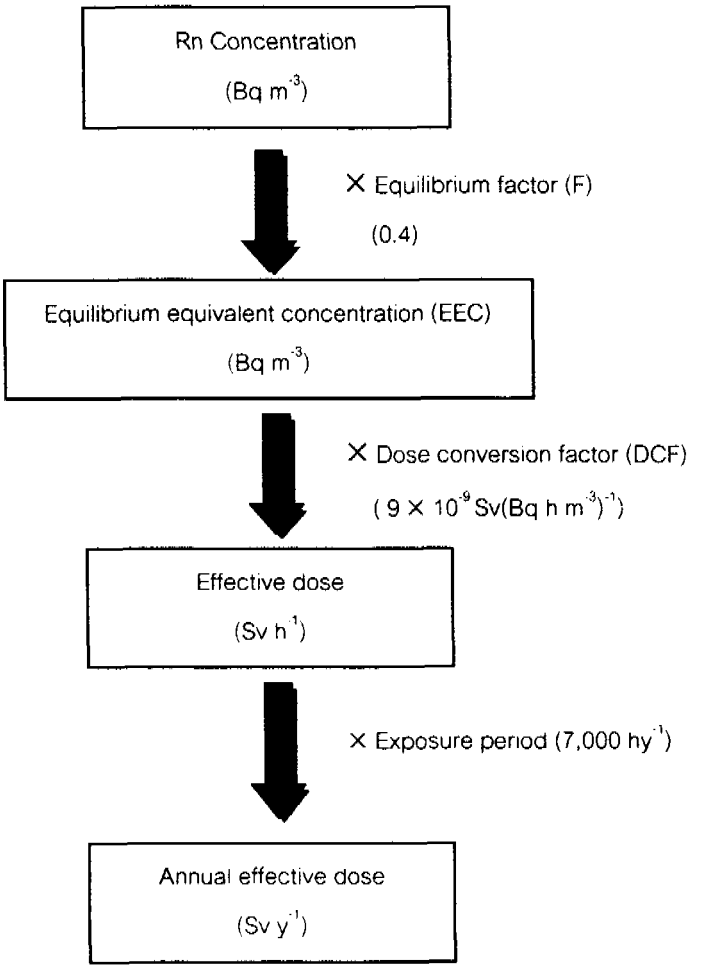
ที่มา: U.S. Department of Energy, 1996.

เมื่อทราบค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนในสภาวะสมดุลเทียบเท่าแล้ว สามารถเปลี่ยนเป็นค่าปริมาณรังสียังผลได้โดย การคูณด้วย dose conversion factor ซึ่งจะแตกต่างกันไปในก๊าซกัมมันตรังสีชนิดต่าง ๆ สำหรับเรดอนแล้ว ในรายงานของ UNSCEAR ฉบับปี 1993 ได้กำหนดให้ใช้ค่า 9 nSv $(Bq\ h\ m^{-3})^{-1}$ ซึ่งในรายงานฉบับปี 2000 ก็ยังคงให้ใช้ค่านี้ต่อไป (UNSCEAR, 2000) ค่าที่ได้จะเป็น ปริมาณรังสียังผลที่ผู้สัมผัสได้รับในหน่วยซีเวิร์ตต่อชั่วโมง ($Sv\ h^{-1}$)

การจะประเมินความเสี่ยงที่ผู้สัมผัสกับก๊าซเรดอนได้รับจากการแผ่รังสี จะต้องเทียบเป็นปริมาณที่ได้รับในระยะเวลา 1 ปี ดังนั้นจึงต้องนำค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับใน 1 ชั่วโมงมาปรับเทียบ โดยคูณด้วยระยะเวลา 1 ปี ซึ่งกำหนดให้เท่ากับ 7,000 ชั่วโมง (UNSCEAR, 2000) ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือ ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับในระยะเวลา 1 ปี (annual effective dose)

จากขั้นตอนการคำนวณหาปริมาณรังสียังผลที่ได้รับในระยะเวลา 1 ปี สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.10

ภาพที่ 2.10
ขั้นตอนการคำนวณปริมาณรังสียังผลที่ได้รับในระยะเวลา 1 ปี



หมายเหตุ: จากการออกแบบวิจัย, 2549.

2.3.3 มาตรฐาน และการควบคุมการได้รับก๊าซเรดอนในปัจจุบัน

การสร้างมาตรฐานสำหรับควบคุมปริมาณการได้รับก๊าซเรดอนจากสิ่งแวดล้อม กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางทั้งในระดับประเทศ และระดับนานาชาติ เนื่องจากทุกฝ่ายตระหนักดีว่าก๊าซเรดอนมีอยู่ทั่วไปทุกหนแห่ง สามารถลดปริมาณได้แต่ไม่สามารถกำจัดให้หมดไปได้ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่องานวิจัยหลายชิ้นบ่งชี้ว่า เรดอนเป็นสาเหตุสำคัญในการเกิดโรคมะเร็งปอดในมนุษย์ อีกทั้งยังอาจมีความสัมพันธ์กับโรคมะเร็งชนิดอื่น ๆ อีกด้วย ซึ่งในปัจจุบันมีปัจจัยหลายอย่างที่สนับสนุนให้มนุษย์ได้รับก๊าซเรดอนมากขึ้น หนึ่งในนั้นก็คือ รูปแบบของอาคารที่ปิดทึบ ไม่มีการหมุนเวียนอากาศ รวมทั้งการใช้วัสดุก่อสร้างซึ่งมีเรเดียมเจือปนในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ดังนั้น ก๊าซเรดอน จึงได้ถูกจัดให้เป็นหนึ่งในปัญหามลภาวะทางอากาศภายในอาคารที่สำคัญซึ่งส่งผลกระทบต่อมนุษย์

จากลักษณะดังกล่าวของเรดอน ทำให้เป็นการยากในการที่จะกำหนด "ระดับปฏิบัติ" (action level) ขึ้นมา แต่ ICRP ได้ให้ข้อแนะนำไว้ว่า ระดับที่ถูกกำหนดให้เป็นระดับปฏิบัตินั้นจะต้องกำหนดให้ชัดเจน และต้องสามารถควบคุม หรือทำตามได้ ซึ่งระดับปฏิบัตินั้นสามารถแตกต่างกันได้ในแต่ละประเทศ (ICRP, 1991) นอกจากนี้ในบางประเทศยังได้มีการกำหนด "ระดับอ้างอิง" (reference level) ขึ้นมา ซึ่งเป็นระดับที่ใช้เป็นเกณฑ์เฉลี่ย เช่น US EPA ได้กำหนดระดับเรดอนภายในอาคารโดยเฉลี่ยไว้ที่ 148 Bq m^{-3} (EPA,1992) หากตรวจพบว่าอาคารใดมีค่าเกินจากนี้ จะต้องรีบหาวิธีการลดปริมาณก๊าซเรดอนลงให้ต่ำกว่าค่าดังกล่าวโดยเร็ว อย่างไรก็ตาม ระดับอ้างอิง ยังเป็นเพียงข้อแนะนำ (recommendation) ที่ในแต่ละประเทศกำหนดขึ้น แต่ไม่ได้มีผลบังคับทางกฎหมาย ต่างจากระดับปฏิบัติ ซึ่งจะมีผลบังคับทางกฎหมาย

ตารางที่ 2.11

ระดับอ้างอิงความเข้มข้นก๊าซเรดอนในที่พักอาศัยของประเทศต่าง ๆ

ประเทศ	ที่พักอาศัยในปัจจุบัน (Bq m^{-3})	ที่พักอาศัยในอนาคต (Bq m^{-3})
เบลเยียม	250	250
แคนาดา	800	800
ฟินแลนด์	400	200
เยอรมนี	250	250
ไอร์แลนด์	200	200

ตารางที่ 2.11 (ต่อ)

ประเทศ	ที่พักอาศัยในปัจจุบัน (Bq m^{-3})	ที่พักอาศัยในอนาคต (Bq m^{-3})
นอร์เวย์	200	200
สวีเดน	140 และ 400	200
อังกฤษ	200	200

ที่มา: European Concerted Action, 1988.

แต่สำหรับ US EPA หรือทบวงการพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของอเมริกาแนะนำให้ใช้มาตรการลดความเข้มข้นของเรดอนในอากาศภายในที่พักอาศัย หรือในอาคารต่าง ๆ ให้มีค่าต่ำกว่า 4 pCi ต่อ 1 ลิตรของอากาศ อย่างไรก็ตาม US EPA ก็ยังเชื่อว่าไม่ว่าความเข้มข้นของเรดอนจะอยู่ในระดับใดก็ตาม ก็จะก่อให้เกิดความเสี่ยงอยู่ค่าหนึ่ง ไม่มีระดับเรดอนที่ปลอดภัยจริง แม้ระดับเรดอนที่ต่ำกว่า 4 pCi L^{-1} ก็ยังคงมีความเสี่ยงอยู่ระดับหนึ่ง ดังนั้น จึงไม่ควรยึดว่าระดับใด "ปลอดภัย" หรือ "ไม่ปลอดภัย" แต่ควรพิจารณาให้เหมาะสมสอดคล้องกับความสามารถของเทคโนโลยีปัจจุบัน รวมทั้งต้นทุนค่าใช้จ่าย และพยายามลดค่าความเข้มข้นของเรดอนลงให้มากที่สุด หรือที่ ICRP เรียกว่า ALARA (as low as reasonably achievable)

สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานความเข้มข้นเรดอนขึ้นใช้ ซึ่งระดับที่เหมาะสมกับประเทศไทยอาจจะสูงหรือต่ำกว่ามาตรฐานของที่อื่น ๆ ก็เป็นได้ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นเรดอนเฉลี่ยที่เป็นภูมิหลังของทั่วประเทศ ความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอดอันเนื่องมาจากเรดอน และค่าใช้จ่ายในการลดความเสี่ยง ทั้งนี้การได้มาซึ่งตัวเลขดังกล่าว จะต้องผ่านการศึกษาอย่างละเอียด และกว้างขวาง ต้องใช้ระยะเวลาและเงินทุนจำนวนมาก ซึ่งในบางประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา มีหน่วยงานต่าง ๆ ด้านสุขภาพ ซึ่งเรียกได้ว่ามีความเชี่ยวชาญ และได้ทำงานวิจัยอย่างกว้างขวางในเรื่องเกี่ยวกับเรดอน ได้กำหนดตัวเลขระดับมาตรฐานความเข้มข้นเรดอนเอาไว้ (ตารางที่ 2.12) ซึ่งจะเห็นได้ว่า มีความแตกต่างกันอยู่ระหว่าง 4 – 8 พิโคคูรี ต่อลิตร (มาตรฐานในบ้านเรือนของหน่วยงาน EPA และ NCRP ตามลำดับ)

จากข้อมูลดังกล่าว อาจจะยอมรับได้ว่า ระดับความเข้มข้นเรดอนในอากาศขนาด 4 – 8 พิโคคูรีต่อลิตร เป็นระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ หรือมีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอดน้อย แต่อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวอาจมีการเปลี่ยนแปลง กำหนดขึ้นใหม่ในอนาคต

ตารางที่ 2.12

ค่ามาตรฐานเรดอนในอากาศ ของหน่วยงานต่าง ๆ ในสหรัฐอเมริกา

หน่วยงาน	ลักษณะ	ระดับ	หมายเหตุ
Indoor radon abatement act	ในบ้านเรือน	ให้เท่ากับภายนอกบ้านเรือน (~ 0.2 -0.7 pCi L^{-1})	เป้าหมายของชาติ
NCRP	ในบ้านเรือน	8 pCi L^{-1}	แนวทาง
EPA	ในบ้านเรือน	4 pCi L^{-1}	ระดับปฏิบัติในปัจจุบัน อาจลดลงอีกในอนาคต
EPA	ในโรงเรียน	4 pCi L^{-1}	ระดับปฏิบัติ
EPA	ในน้ำ	กำลังศึกษา	
NIOSH	ที่ทำงาน (เหมืองแร่)	1 WLM y^{-1} and ALARA	ข้อเสนอแนะเป็นขอบเขตที่ควรได้รับ
OSHA	ที่ทำงาน	4 WLM y^{-1}	ตามกฎหมาย
MSHA	เหมืองแร่	4 WLM y^{-1}	ตามกฎหมาย

ที่มา: ธวัช ชิตตระการ, 2541 (ดัดแปลง)

ถึงแม้ว่าค่ามาตรฐานระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมในแต่ละประเทศจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับสภาพปัจจัยต่าง ๆ กันไป แต่สำหรับมาตรฐานในการได้รับรังสีของแต่ละบุคคลแล้ว ทั่วโลกจะใช้มาตรฐานเดียวกัน เนื่องจากรังสีสามรถก่อให้เกิดผลโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิต และก๊าซเรดอนก็จัดเป็นก๊าซกัมมันตรังสีชนิดหนึ่ง โดยผลจากการแผ่รังสีจากการสลายตัวของเรดอนและผลิตภัณฑ์ลูกหลานจะก่อให้เกิดมะเร็ง (radiation carcinogenesis) ในสิ่งมีชีวิตได้ ดังนั้น จึงได้มีการกำหนดขีดจำกัดปริมาณการได้รับรังสีของแต่ละบุคคล (individual dose limit) ขึ้นมา โดย ICRP ได้ให้คำแนะนำว่า การได้รับรังสีของแต่ละบุคคลจะต้องจำกัดไว้ไม่ให้เกินค่าที่กำหนด (dose limit) สำหรับบุคลากรที่ทำงานด้านรังสีและบุคคลทั่วไป เพื่อการป้องกันผลของรังสีแบบ deterministic effects[7] และลดผลของรังสีแบบ stochastic effects[8] ด้วย ค่าปริมาณรังสีที่กำหนดโดย ICRP แสดงไว้ในตารางที่ 2.13

---

[7] deterministic effects เป็นผลกระทบจากการได้รับรังสีปริมาณสูงในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ แล้วเกิดอันตรายต่อร่างกายหรืออวัยวะ ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากการได้รับรังสีในปริมาณที่เกินขีดจำกัดของการรับรังสี (threshold dose)

ตารางที่ 2.13

ICRP 60 recommended dose limits

Application	Occupational Dose Limit	Public Dose Limit
Whole body	20 mSv y^{-1} Effective dose averaged over 5 yrs maximum is 50 mSv y^{-1}	1 mSv y^{-1}
Annual equivalent dose to		
- Lens of the eyes	150 mSv	15 mSv
- Skin	500 mSv	50 mSv
- Hands and feet	500 mSv	

ที่มา: ICRP, 1991.

สำหรับในประเทศไทยในสภาวะปัจจุบัน ยังไม่มีการตั้งมาตรฐานระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอนขึ้นใช้ คงจะเป็นการดีที่จะยอมรับระดับมาตรฐานความเข้มข้นก๊าซเรดอนของสหรัฐอเมริกาที่ระดับ 4 – 8 พิโคคูรี ต่อลิตรไปก่อน จนกว่าจะสามารถพัฒนากำหนดระดับมาตรฐานของตนเองขึ้นมาใช้ในอนาคต ส่วนค่าปริมาณรังสีที่ได้รับในบุคคลให้ใช้ตามข้อกำหนดของ ICRP ซึ่งถือเป็นมาตรฐานที่ใช้เป็นสากล

2.4 อาคารกรณีศึกษา: อาคารประเภทตึกแถว

รูปแบบของอาคารตึกแถวเริ่มมีปรากฏในประเทศไทย ตั้งแต่ครั้งสมัยกรุงศรีอยุธยาเป็นราชธานี ในรัชสมัยของ พระเจ้าปราสาททอง (เพ็ญศรี ฉันทวรางค์, 2529) ซึ่งเป็นที่อยู่อาศัยของกลุ่มชาวจีนที่เข้ามาตั้งรกรากในประเทศไทย โดยใช้ไม้เป็นวัสดุก่อสร้างหลัก มีขนาด 1 ถึง 2 ชั้น เนื่องด้วยข้อจำกัดในด้านเทคโนโลยีการก่อสร้างของสมัยนั้น ตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ตึกแถวผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงมาโดยตลอด ทั้งรูปแบบ การใช้สอย ตลอดจน

---

[6] stochastic effects เป็นผลจากการได้รับรังสี โดยเมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น จะเพิ่มโอกาสเกิดมะเร็งมากขึ้น แต่ความรุนแรงของการเกิดมะเร็งจะไม่เพิ่มขึ้น ผลกระทบแบบนี้จะไม่มีขีดจำกัดในการได้รับ ความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายจึงแปรตามปริมาณรังสีที่ได้รับ

วัสดุ และวิธีการก่อสร้าง จนกลายเป็นรูปแบบตึกแถวที่พบเห็นกันในปัจจุบัน สิ่งหนึ่งที่ทำให้ตึกแถวได้รับความนิยมมาถึงปัจจุบัน ก็คือ การที่ตึกแถวมีลักษณะเป็นอาคารเอนกประสงค์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบัน การเจริญเติบโตของเศรษฐกิจ ทำให้เมืองหลวง เช่น กรุงเทพมหานคร เกิดการขยายตัวขึ้นเรื่อย ๆ มีการอพยพจากชนบทเข้าสู่ตัวเมืองเพื่อหางานทำ สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ ก่อให้เกิดการสร้างอาคารประเภทต่าง ๆ ขึ้นมามากมาย เช่น ศูนย์การค้า อาคารสำนักงาน อาคารชุดพักอาศัย ตลอดจนโครงการที่อยู่อาศัยต่าง ๆ และตึกแถวก็คือหนึ่งในรูปแบบของอาคารที่เป็นที่นิยมสร้างมากที่สุด เนื่องจากสามารถตอบ สนองได้ทั้งเป็นที่อยู่อาศัย สำนักงาน หรือการค้าขาย

อย่างไรก็ตาม มีตึกแถวเป็นจำนวนมากมีการวางผัง และการออกแบบที่ไม่เหมาะสม ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาขึ้นมากมาย อย่างที่เห็นกันอยู่ในปัจจุบัน เช่น การก่อสร้างที่ไม่มีคุณภาพ การไม่สามารถใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสงสว่างไม่เพียงพอ การระบายอากาศไม่ดี สิ่งเหล่านี้ล้วนทำให้คุณภาพชีวิตของผู้อยู่อาศัยมีมาตรฐานต่ำ หากไม่รีบแก้ไขอาจทำให้เกิดปัญหาในระดับเมืองได้

จากที่กล่าวมาข้างต้น ปัญหาที่เกิดจากตึกแถวมีอยู่มากมาย ซึ่งที่สำคัญประเด็นหนึ่งก็คือ การระบายอากาศที่ไม่มีประสิทธิภาพ อีกทั้งวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในการก่อสร้างตึกแถวในสมัยปัจจุบัน ล้วนแล้วแต่ใช้คอนกรีตเกือบทั้งสิ้น ซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างที่ปล่อยก๊าซเรดอนออกมาในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ดังนั้น ผู้อยู่อาศัยในอาคารตึกแถวจึงมีโอกาสที่จะได้รับปริมาณก๊าซเรดอนทั้งจากวัสดุก่อสร้าง และจากพื้นดินค่อนข้างมาก นอกเหนือจากนั้น ตึกแถว ยังมีรูปแบบค่อนข้างตายตัว ทำให้สะดวกในการจัดแบ่งรูปแบบการศึกษา ดังนั้น จึงเป็นสาเหตุให้เลือกอาคารประเภทตึกแถว มาเป็นอาคารกรณีศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้

2.4.1 <u>รูปแบบอาคารตึกแถว และการใช้ประโยชน์ในปัจจุบัน</u>

ตึกแถวในปัจจุบัน โดยเฉพาะที่มีจุดประสงค์เพื่อการค้าขาย มักจะสร้างบนที่ดินสองข้างถนนสายหลักใกล้ศูนย์กลางเมือง เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่ให้ผลประโยชน์แก่การพาณิชยกรรมมาก และเป็นที่ต้องการของพ่อค้านักธุรกิจ การใช้ที่ดินจึงต้องใช้อย่างคุ้มค่าเท่าที่จำเป็น จึงทำให้ที่ดินในแต่ละหน่วยของห้องแถวมีขนาดกะทัดรัด เช่น ขนาด 4 × 12 ตารางเมตร และวางตั้งฉากกับแนวถนน

ในปัจจุบัน ด้วยเทคโนโลยีใหม่ วิธีการก่อสร้างสมัยใหม่ ทำให้ตึกแถวสามารถก่อสร้างได้อย่างสะดวกรวดเร็วทันกับความต้องการของตลาด แต่ยังขาดการควบคุมดูแลจากเจ้าของ รวมทั้งไม่มีมาตรการทางกฎหมายบังคับอย่างจริงจัง ทำให้ตึกแถวที่สร้างขึ้นมามีคุณภาพต่ำ และไม่สามารถควบคุมการขยายตัวได้ (คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524) รวมทั้งการตกแต่งหน้าบ้านของเจ้าของโดยขาดระเบียบปฏิบัติ ทำให้ทัศนียภาพโดยรวมเสียไปด้วย

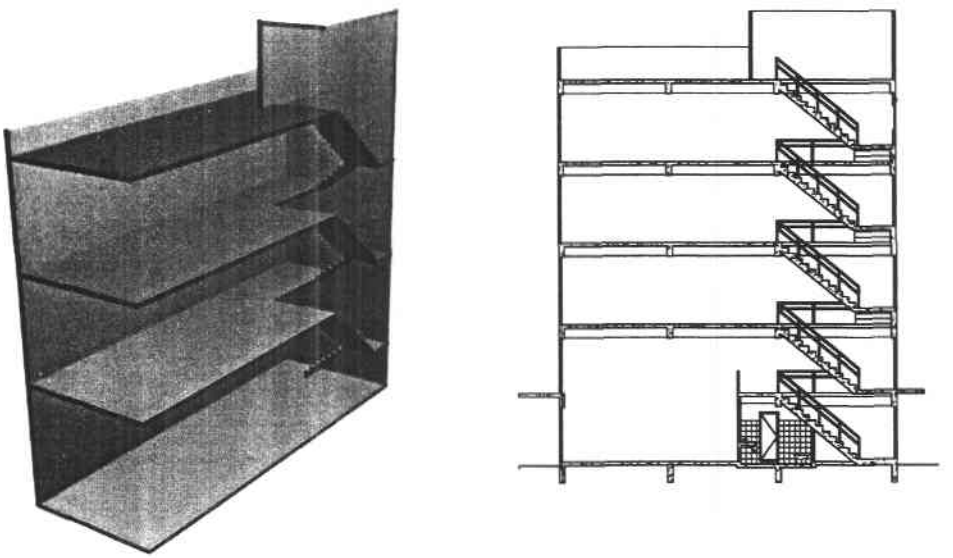
ภาพที่ 2.12
รูปแบบตึกแถวโดยทั่วไปในกรุงเทพมหานคร

หมายเหตุ: บันทึกภาพโดยผู้วิจัย, 2549.

อาคารตึกแถวโดยทั่วไป จะวางผังเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 12 เมตร โดยส่วนใหญ่จะใช้พื้นที่ชั้นล่างเป็นบริเวณประกอบธุรกิจการค้า ส่วนชั้นบนจะใช้เป็นที่พักอาศัยของครอบครัว ในกรณีที่เป็นอาคารชั้นเดียว ด้านหน้ามักจะใช้เพื่อการค้า ส่วนด้านหลังจะใช้เพื่ออยู่อาศัย (สันติ ฉันทวิลาสวงศ์, 2521) จากการสำรวจพบว่าอาคารตึกแถวส่วนมากจะมีความสูงที่สุดอยู่ที่ 4 ชั้น (ไม่รวมชั้นลอย และชั้นดาดฟ้า) เพราะข้อกำหนดในปริมาตรใช้สอยที่พอเหมาะ ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยต่ออัคคีภัย และอื่น ๆ ซึ่งถึงแม้ว่าจะสร้างอาคารสูงเพียง 4 ชั้น แต่ก็พบว่าส่วนใหญ่ก็จะมีการต่อเติมเพิ่มชั้นต่อไปอีกตามความต้องการของแต่ละคูหา ซึ่งมักจะเป็นการกระทำที่ก่อให้เกิดความไม่เป็นระเบียบ ขาดความสวยงามเสมอ

ภาพที่ 2.13

ภาพตัดขวางของตึกแถวโดยทั่วไป



หมายเหตุ: จากการออกแบบวิจัย, 2549.

นอกจากนี้ จากการศึกษาการใช้พื้นที่ภายในอาคารตึกแถวในเขตกรุงเทพมหานคร โดย เพ็ญศรี ฉันทวรางค์ พบว่ามีรูปแบบที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นกว่าเดิม คือมีการใช้พื้นที่ประกอบกิจกรรมต่าง ๆ ผสมกันหลายประเภท นอกเหนือไปจากกิจกรรมในด้านการค้าและพักอาศัยดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีการใช้พื้นที่สำหรับประกอบกิจกรรมในด้านอุตสาหกรรม บริการ สำนักงาน และธุรกิจต่าง ๆ ปะปนอยู่ภายในอาคารเดียวกัน ซึ่งบางแห่งมีการใช้พื้นที่ของอาคารตึกแถวหลาย ๆ หน่วยมาดำเนินกิจการร่วมกันเป็นอาคารขนาดใหญ่ เช่น ศูนย์การค้า ห้างสรรพสินค้า ธนาคาร โรงแรม ฯลฯ

2.4.2 <u>การใช้วัสดุก่อสร้างในอาคารประเภทตึกแถว</u>

ตึกแถวในอดีตยุคเริ่มแรก จะก่อสร้างเป็นที่พักอาศัยขนาด 2 ชั้น ด้วยวิธีการก่อสร้างที่รับมาจากประเทศจีน คือ การใช้ระบบผนังรับน้ำหนัก หลังคามุงด้วยกระเบื้องดินเผา ส่วนบันได ประตู และหน้าต่าง ล้วนใช้ไม้เป็นวัสดุก่อสร้างทั้งหมด ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น จนกระทั่งเมื่อระบบการก่อสร้างด้วยเสา คาน พื้นคอนกรีตได้เข้ามามีบทบาทในการก่อสร้างอาคารในประเทศไทย จึงได้ค่อย ๆ เข้ามาแทนที่วัสดุที่ใช้แต่เดิมจนหมด ดังเช่นในปัจจุบัน เสา จะใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ผนัง ใช้การก่ออิฐ หรือหล่อสำเร็จ พื้น ใช้คอนกรีตหล่อสำเร็จ เป็นต้น

ภาพที่ 2.14

ลักษณะความแตกต่างระหว่างตึกแถวในอดีต กับปัจจุบัน

หมายเหตุ: บันทึกภาพโดยผู้วิจัย, 2549.

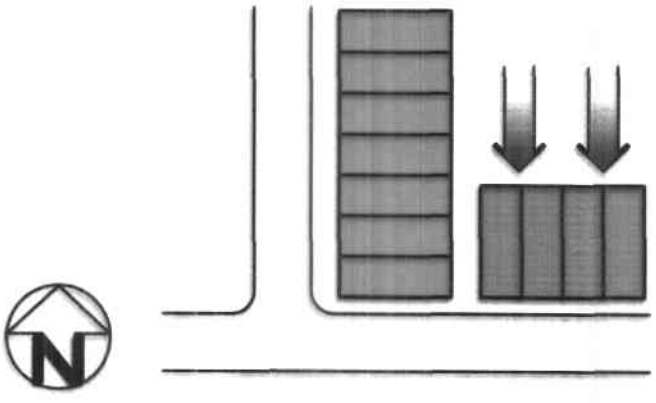
จากการที่อาคารส่วนมาก รวมทั้งอาคารประเภทตึกแถว หันมาใช้คอนกรีตเป็นวัสดุหลักในการก่อสร้าง จึงเป็นไปได้ว่าอีกไม่นาน อาจมีการนำเถ้าลอย หรือฟอสโฟยิปซัมมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตด้วย เนื่องจากคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม และสามารถช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างได้ดัง ที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น ซึ่งถ้าหากวัสดุดังกล่าวมีอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนในระดับที่ค่อนข้างสูงแล้ว ผู้ที่อาศัยอยู่ภายในอาคารตึกแถว ย่อมมีความเสี่ยงจากการได้รับก๊าซเรดอนเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่สูงตามไปด้วย เนื่องจากการระบายอากาศที่ค่อนข้างจำกัดของตึกแถว

2.4.3 <u>การระบายอากาศภายในอาคารประเภทตึกแถว</u>

เนื่องจากการก่อสร้างตึกแถว จะสร้างขนาบไปตามถนนสายต่าง ๆ ซึ่งถนนเหล่านั้นถูกตัดไปในทิศทางต่าง ๆ กันไป เช่น จากเหนือไปใต้ จากตะวันออกไปตะวันตก เป็นต้น ดังนั้นย่อมมีปริมาณตึกแถวจำนวนหนึ่ง มีตำแหน่งที่ตั้งไม่เหมาะสมกับทิศทางของแดด และลม ดังภาพที่ 2.14

ภาพที่ 2.15

การวางผังอาคารตึกแถวกับทิศทางแดดและลม



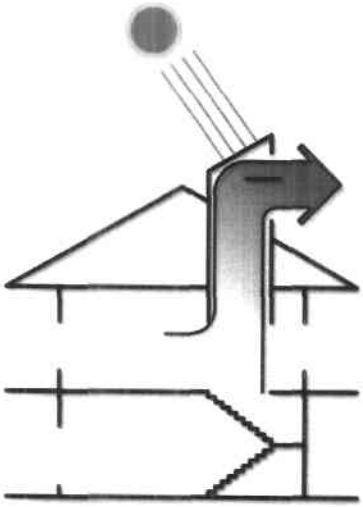
ที่มา: สันติ ฉันทวิลาสวงศ์, 2521. (ดัดแปลง)

อย่างไรก็ตาม อาคารห้องแถวในอดีตที่มีการวางผังที่ตั้งผิดทิศทางลม หรืออาคารที่ตั้งในที่คับแคบ การระบายอากาศไม่ดี มักได้รับการแก้ไขโดยเจาะหลังคาทำปล่องระบายอากาศสูงขึ้นไป (ภาพที่ 2.15) โดยปล่องนี้จะทำด้วยโลหะสังกะสี เปิดปิดได้เมื่อต้องการด้วยการดึงเชือก ในเวลากลางวันที่แดดร้อนจัดสังกะสีจะร้อน และถ่ายความร้อนให้กับอากาศภายในปล่อง ทำให้อากาศภายในปล่องลอยตัวสูงขึ้น อากาศที่เย็นกว่าจะไหลเข้าไปแทนที่ เกิดการระบายอากาศขึ้นโดยไม่ต้องมีลมพัด ซึ่งปล่องระบายอากาศนี้มักจะหันปากปล่องไปทางทิศเหนือ จึงสามารถใช้เป็นเครื่องหมายบอกทิศทางแก่ผู้สัญจรได้อีกวิธีหนึ่ง (สันติ ฉันทวิลาสวงศ์, 2521) แต่ลักษณะเช่นนี้ไม่มีปรากฏอีกแล้วในตึกแถวปัจจุบัน

ตึกแถวในปัจจุบันโดยเฉพาะในเขตเมือง เช่นในกรุงเทพมหานคร ไม่สามารถที่จะระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติได้ดังเช่นอดีต เนื่องจากอากาศภายนอกล้วนเต็มไปด้วยมลพิษจากรถยนต์บนท้องถนน อีกทั้งมลพิษทางเสียง ทำให้อาคารตึกแถวส่วนมาก โดยเฉพาะที่ใช้เป็นสำนักงาน จึงจำเป็น ต้องติดเครื่องปรับอากาศเพื่อป้องกันมลพิษจากภายนอก บางแห่งประตูหน้าต่างปิดตลอดเวลา ทำให้ภายในอาคารมีความดันต่ำกว่าภายนอกอาคาร และไม่สามารถระบายอากาศได้ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ก๊าซเรดอนแพร่เข้าสู่อาคาร (Arvela and Winqvist, 1989)

ภาพที่ 2.16

การใช้ปล่องระบายอากาศในอาคารตึกแถวแบบเก่า



ที่มา: สันติ ฉันทวิลาสวงศ์, 2521. (ดัดแปลง)

นอกจากนี้เจ้าของ หรือผู้อยู่อาศัยในตึกแถวส่วนใหญ่ไม่มีการดูแลรักษาที่ดี ปล่อยให้ตึกชำรุดทรุดโทรม และยังมีป้ายโฆษณาขนาดใหญ่มาติดขวางทางระบายอากาศทางช่องหน้าต่าง ทำให้การระบายอากาศแต่เดิมที่มีค่อนข้างจำกัดอยู่แล้วแย่ลงไปอีก ดังนั้นลักษณะอาคารที่ปิดเช่นนี้ ย่อมเป็นปัจจัยเกื้อหนุนให้มีก๊าซเรดอนสะสมในปริมาณสูงได้มาก

ภาพที่ 2.17

อาคารตึกแถวที่มีการระบายอากาศค่อนข้างต่ำ

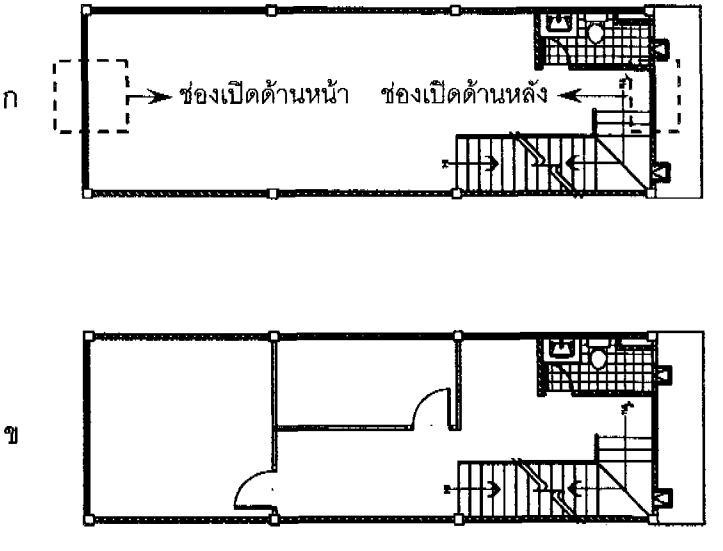
หมายเหตุ: บันทึกภาพโดยผู้วิจัย, 2549.

นอกเหนือไปจากที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว สาเหตุอีกประการหนึ่งที่น่าจะมีผลต่อการระบายอากาศภายในอาคารตึกแถว ก็คือลักษณะการจัดผังภายในอาคาร หรือก็คือการสร้างผนังกั้นห้องของเจ้าของนั่นเอง ตามปกติแล้วตึกแถวโดยทั่วไปจะมีช่องเปิดอยู่สองแห่งด้วยกัน คือ ผนังด้านหน้าอาคารและผนังด้านหลังของอาคาร (ภาพที่ 2.17 ก) ซึ่งลมจากภายนอกสามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าออกอาคารทางช่องเปิดดังกล่าวได้ แต่เมื่อมีการกั้นผนังภายในเพื่อแบ่งพื้นที่ของผู้อยู่อาศัย ซึ่งส่วนใหญ่จะทำขึ้นด้วยความต้องการในพื้นที่ใช้สอยเป็นหลัก โดยมักไม่คำนึงถึงเรื่องการระบายอากาศ ผนังเหล่านี้จึงมักไปกีดขวางช่องทางการไหลของลม ทำให้เกิดจุดอับลมขึ้นมาได้ ซึ่งนอกจากจะเสี่ยงต่อการเพิ่มระดับเรดอนภายในอาคารแล้ว ยังอาจเป็นแหล่งสะสมของเชื้อโรคต่าง ๆ ภายในอาคารได้อีกด้วย

จากการสำรวจพบว่า รูปแบบการกั้นผนังภายในของผู้อยู่อาศัยในตึกแถวนั้นไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แต่มีลักษณะร่วมกันอยู่ 2 ประการคือ มักใช้วัสดุเบาเป็นวัสดุหลัก เช่น ไม้ กระจกกรอบบานอลูมิเนียม แผ่นยิปซัม เป็นต้น และมักจะกั้นในส่วนใกล้หน้าต่างด้านหน้าเป็นพื้นที่สำหรับทำกิจกรรมส่วนตัว เช่น ห้องนอน ห้องทำงาน ส่วนด้านหลังอาคารจะกั้นเป็นพื้นที่ส่วนบริการ (ภาพที่ 2.17 ข) เช่น ห้องน้ำ ห้องครัว ห้องรับประทานอาหาร เป็นต้น

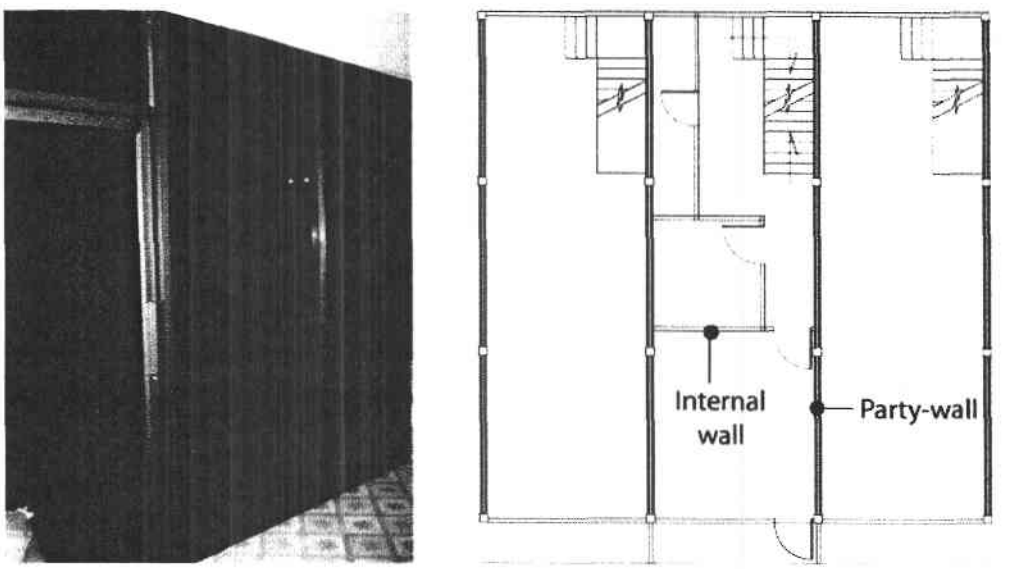
ภาพที่ 2.18

ลักษณะการกั้นผนังห้องโดยทั่วไปของอาคารตึกแถว



หมายเหตุ: จากการออกแบบวิจัย, 2549.

ภาพที่ 2.19
ผนังภายใน (interior wall) ใช้แบ่งพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารตึกแถว



ที่มา: Tirapas, 2004.

2.4.4 มาตรฐานการระบายอากาศภายในอาคาร

คุณภาพอากาศภายในอาคารมีความสัมพันธ์กับปัจจัยต่าง ๆ หลายปัจจัย เช่น คุณภาพอากาศภายนอกอาคาร การออกแบบห้อง การออกแบบระบบระบายอากาศ แหล่งกำเนิดมลพิษ ความเข้มข้นของมลพิษในแต่ละแหล่ง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อการกำหนดระดับคุณภาพอากาศภายในอาคารที่สามารถยอมรับได้

การกำหนดอัตราการระบายอากาศภายในอาคารมีวิธีการกำหนดได้หลายแบบ เช่น การระบุอัตราการระบายอากาศเป็นปริมาตรต่อนาที ต่อคน การระบุอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง เป็นต้น ซึ่งในการวิจัยนี้จะใช้การระบุเป็นอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมงเป็นหลัก

เนื่องจากอาคารตึกแถวจัดเป็นอาคารพักอาศัยประเภทหนึ่ง ซึ่งตามมาตรฐานการระบายอากาศที่กำหนดโดย สมาคมวิศวกรรมสถาน ในพระบรมราชูปถัมภ์ (ว.ส.ท) และสมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย (ส.ว.ป.ท.) ได้ระบุอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่ำสุดที่ยอมรับได้ของพื้นที่พักอาศัยไว้ที่ 0.35 ต่อชั่วโมง ดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14

ความต้องการอากาศภายนอก สำหรับการระบายอากาศในอาคารพักอาศัย

ประเภท	ความต้องการอากาศภายนอก	ข้อสังเกต
พื้นที่อาศัย	0.35 air change ต่อชั่วโมงแต่ไม่น้อยกว่า 15 cfm (7.5 Ls^{-1}) ต่อคน	สำหรับการคำนวณหา อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมงปริมาตรของพื้นที่อาศัย การรวมพื้นที่ทั้งหมด ที่อยู่ภายใต้สภาวะการปรับอากาศ โดยปกติการระบายอากาศอาจเกิดขึ้นได้ โดยการรั่วซึมเข้า (infiltration) หรือโดยการระบายอากาศตามธรรมชาติ (ventilation)
ห้องครัว	100 cfm (50 Ls^{-1}) ไม่ต่อเนื่อง 25 cfm (12 Ls^{-1}) ต่อเนื่อง	การติดตั้งเครื่องระบายอากาศทิ้งทางกล สภาพภูมิประเทศอาจมีผลกระทบต่อการเลือกระบบระบายอากาศ

ที่มา: คณะกรรมการมาตรฐานระบบเครื่องกลในอาคาร, 2545.

หมายเหตุ: มาตรฐาน ว.ส.ท. 3010 — 45, 2545. (ดัดแปลง)

การระบายอากาศ (ventilation) หรือการไหลเวียนอากาศ คือ การที่อากาศภายนอกผ่านเข้าสู่อาคารโดยตั้งใจ หรือถูกออกแบบให้เกิดการไหลเวียนของอากาศเข้าสู่อาคารอย่างตั้งใจและได้มีการคิดคำนวณไว้ก่อนแล้ว ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้ 2 ลักษณะคือ ถ้าการไหลเวียนของอากาศเข้าสู่อาคารนั้นเกิดขึ้นโดยธรรมชาติ ผ่านทางช่องเปิดต่าง ๆ เรียกว่า การไหลเวียนของอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (natural ventilation) ถ้าการไหลเวียนของอากาศนั้นเกิดขึ้นโดยการออกแบบบังคับจากเครื่องกล มีการใช้พัดลมในการนำอากาศเข้า และออกจากอาคารผ่านทางช่องรับลมเข้า หรือช่องระบายอากาศ จะเรียกว่า การไหลเวียนอากาศโดยเครื่องกล (mechanical ventilation) แต่ถ้ามีการไหลของอากาศเข้าสู่อาคารโดยไม่สามารถควบคุมได้ ผ่านทางรอยแตกหรือช่องเปิดที่ไม่ต้องการให้อากาศไหลผ่านเข้ามา เรียกว่า การรั่วซึมของอากาศ (infiltration)

อัตราการระบายอากาศ (air exchange rate, I) ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างการไหลของอากาศ (flow rate) กับปริมาตร โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I = \frac{Q}{V} \qquad \text{สมการ (2.21)}$$

เมื่อ I = อัตราการระบายอากาศ

Q = ปริมาณของอากาศที่ไหลเข้าสู่อาคาร (cfm, m^3h^{-1})

V = ปริมาตรของห้อง (ft^3, m^3)

อัตราการระบายอากาศ เป็นหน่วยที่ต้องใช้ในการเทียบต่อเวลา เช่น ถ้าหากหน่วยเวลาเท่ากับ 1 ชั่วโมง จะเรียกว่า air change per hour (ACH) หรือก็คือ จำนวนเท่าของปริมาตรอากาศที่นำมาแทนที่อากาศภายในห้องในเวลา 1 ชั่วโมง

ในงานวิจัยครั้งนี้ จะพิจารณาจากอัตราการระบายอากาศภายในตึกแถวเป็นสำคัญ ในการศึกษาถึงวิธีการลดปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคาร โดยการอนุมานว่าอากาศภายนอกอาคารบริสุทธิ์ในระดับที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศกับระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารได้ตามสมการที่ 2.15

2.5 บทสรุป

จากการศึกษาผลงานวิจัย และงานเขียนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ทำให้ทราบถึงข้อเท็จจริงที่ว่าเถ้าลอยลิกไนต์ และฟอสโฟยิปซัมเป็นวัสดุที่มีการปนเปื้อนของธาตุกัมมันตรังสีในระดับสูง ถึงแม้ในต่างประเทศได้ทำการวิจัยกันอย่างกว้างขวาง ทั้งเรื่องที่เกี่ยวกับการปล่อยก๊าซเรดอน และรังสีอื่น ๆ ที่ปล่อยจากวัสดุดังกล่าว แต่ก็ยังไม่ได้ข้อสรุปที่แน่ชัด เนื่องจากขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหลายประการ เช่น ลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะภูมิอากาศ กระบวนการผลิต แหล่งผลิต และวิธีการนำไปใช้ ซึ่งแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ ไม่สามารถที่จะนำผลการทดลองของพื้นที่หนึ่งไปเป็นเกณฑ์กำหนดผลการทดลองของอีกพื้นที่หนึ่งได้

เป็นที่น่าวิตกว่า การนำเถ้าลอยลิกไนต์ และฟอสโฟยิปซัมมาใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างของประเทศไทยเริ่มมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ในขณะที่ยังไม่มีการศึกษาถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุดังกล่าว หรือแม้กระทั่งมาตรฐานกำหนดระดับเรดอนภายในอาคารก็ยังไม่มี ซึ่งอาคารตึกแถวก็เป็นอาคารอีกประเภทหนึ่ง ที่ผู้อยู่อาศัยมีความเสี่ยงสูงในการได้รับก๊าซเรดอนที่ปล่อยมาจากวัสดุก่อสร้าง ถ้าหากมีการนำคอนกรีตผสมเถ้าลอย หรือฟอสโฟยิปซัมมาใช้ เนื่องจากการระบายอากาศที่ค่อนข้างจำกัด ดังนั้น จึงเป็นที่มาของ

สมมติฐานงานวิจัยในครั้งนี้ ที่ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซเรดอนที่ปล่อยออกมาจากคอนกรีต กับปริมาณการผสมเถ้าลอย และฟอสโฟยิปซัม รวมไปถึงการศึกษาปริมาณรังสีที่ผู้อยู่อาศัยในอาคารตึกแถวได้รับ เนื่องจากการได้รับก๊าซเรดอน เพื่อเสนอแนวทางการลดก๊าซเรดอนภายในอาคารให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ต่อไป