เรดอน: มหันตภัยเงียบในอาคาร

Radon: The Hidden Hazard in Buildings

ธัชพงศ์ ศรีสุวรรณ

Touchaphong Srisuwan

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Faculty of Architecture and Planning, Thammasat University

บทคัดย่อ

ก๊าซเรดอน เป็นสารกัมมันตรังสีที่มีอยู่ทั่วไปทุกหนแห่ง ไม่มีรส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่สามารถรับรู้ได้ด้วยประสาทสัมผัสใด ๆ ของมนุษย์ เป็นสารที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งปอดในมนุษย์ได้เป็นอันดับที่สอง รองจากบุหรี่ จากที่กล่าวมา จึงถือได้ว่าก๊าซเรดอน จัดเป็นมลภาวะภายในอาคารที่สำคัญที่สุดตัวหนึ่ง และมีการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ ทั้งในด้านคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพ ผลกระทบต่อมนุษย์และสัตว์ ตลอดจนวิธีการลดปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคาร และได้มีการกำหนดมาตรฐานระดับความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารขึ้นใช้ในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา สหราชอาณาจักร เนเธอร์แลนด์ เยอรมนี เป็นต้น

หนึ่งในวิธีการลดปริมาณ และการป้องกันก๊าซเรดอนเข้าสู่ตัวอาคารที่มีประสิทธิภาพที่สุด คือการแก้ไขที่ต้นเหตุ โดยเริ่มตั้งแต่การออกแบบอาคาร ซึ่งปัจจุบันได้มีการคิดค้นเทคนิควิธีการต่าง ๆ ขึ้นมาหลายวิธี เช่น การลดความดันที่ผิวดิน การอัดความดันในอาคาร เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีจะมีประสิทธิภาพ ผลดี ผลเสีย ต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะอาคารและงบประมาณของเจ้าของอาคารนั้น ดังนั้น สถาปนิก หรือผู้ออกแบบอาคาร จึงมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบเพื่อลดปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคาร อันจะส่งผลต่อคุณภาพชีวิตและสุขภาพของผู้อยู่อาศัยในอนาคต

Abstract

Radon is a ubiquitous radioactive noble gas, which has no taste, smell nor color, and cannot be detected by any of human's sensations. It is known to be the first leading cause of lung cancer among non-smokers. As a result, radon has been recognized as one of the most hazardous indoor air pollutions exposed to human beings. There are numerous research about physical properties of radon, and its effect on human and animals, as well as techniques of radon reduction in building. Besides, many countries have promulgated a standard for radon concentration in building (such as the United States of America, the United Kingdom, the Netherlands, and Germany).

One of the most effective ways of radon prevention is to tackle to problem at its root during the initial building design process. Nowadays, there are many techniques to prevent buildings from radon entering as such active soil-depressurization, building pressurization, etc. Each technique is different in effectiveness as well as pros and cons depending on building types and budgets. Therefore, architects play a very important role in order to reduce radon gas in buildings as much as possible which will affect people's well being and quality of life in the future.

คำสำคัญ (Keywords)

เรดอน (Radon/Rn-222)
ครึ่งชีวิต (Half-life)
ความเข้มข้น (Concentration)
การแผ่รังสี (Radiation)
กัมมันตรังสี (Radioactivity)
การสลายตัว (Decay)
การลดระดับความดันที่ผิวดิน (Active Soil Depressurization: ASD)
การอัดความดันในอาคาร (Building Pressurization)

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมที่หลายฝ่ายกำลังให้ความตระหนักถึง คือ ปัญหาด้านมลภาวะทางอากาศ ทั้งมลภาวะจากอุตสาหกรรม การคมนาคม และที่ไม่สามารถมองข้ามไปได้อีกประเภทหนึ่งคือ มลภาวะทางอากาศภายในอาคารที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อผู้ใช้อาคาร ซึ่งต้องใช้ชีวิตอยู่ภายในอาคารเกือบ 90 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน [1] ดังนั้น ถึงแม้จะได้รับมลพิษภายในอาคารเพียงปริมาณเล็กน้อย แต่สะสมไปเรื่อย ๆ เป็นระยะเวลานาน ก็สามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้เช่นกัน

ก๊าซเรดอน เป็นก๊าซกัมมันตรังสี ซึ่งไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่สามารถรับรู้ได้ด้วยประสาทสัมผัสใด ๆ ของมนุษย์ จัดเป็นมลภาวะทางอากาศที่สำคัญที่สุดประเภทหนึ่งที่หลายประเทศกำลังให้ความสนใจ เนื่องจากพบว่า ก๊าซเรดอนสามารถก่อให้เกิดมะเร็งปอดในมนุษย์ โดยจัดเป็นสาเหตุอันดับที่สองรองจากบุหรี่ [2] ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสียชีวิตของผู้คนในสหรัฐอเมริกาปีละ 5,000–20,000 ราย [3] และจากการจัดประชุมผู้เชี่ยวชาญทั่วโลกขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1988 โดยองค์กรระหว่างประเทศเพื่อการวิจัยมะเร็ง (International Agency of Research on Cancer: IARC) แห่งองค์การอนามัยโลก ได้ข้อสรุปเป็นเอกฉันท์ว่า เรดอนเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์และสัตว์ เช่นเดียวกับการประชุมนักวิทยาศาสตร์ชั้นนำทั่วโลก ซึ่งจัดโดย National Academic of Sciences, International Commission on Radiological Protection (ICRP) และ National Council on Radiation Protection and Measurement (NCRP) ได้สรุปว่า เรดอนเป็นสาเหตุของโรคมะเร็งปอดในมนุษย์

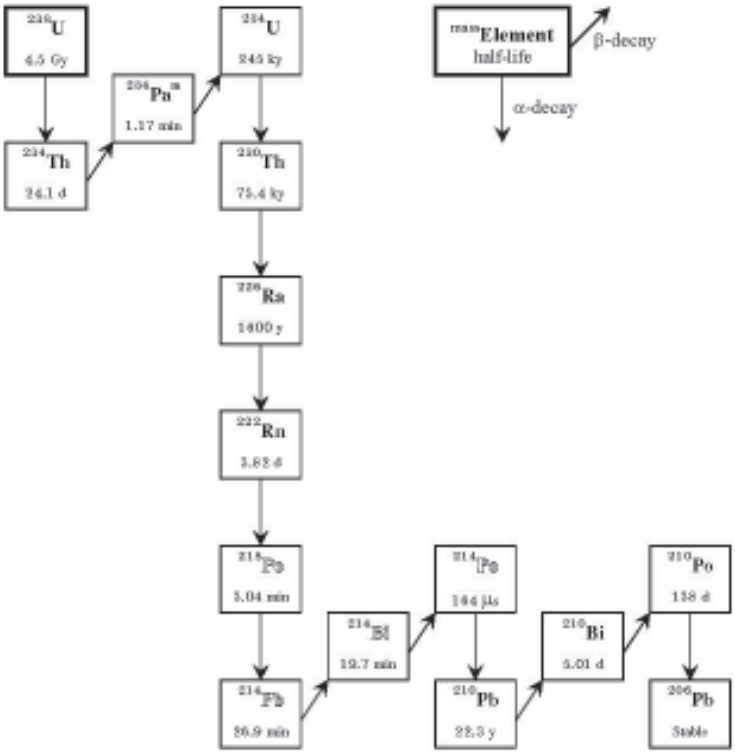
เนื่องจากก๊าซเรดอนเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของแร่เรเดียม ซึ่งมีปะปนอยู่ในดินและหินทั่วไปบนพื้นโลก ดังนั้น ในบรรยากาศทั่วไปจึงมีก๊าซเรดอนปะปนอยู่จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับปริมาณเรเดียมและยูเรเนียมในบริเวณดังกล่าว เมื่อมนุษย์นำดิน หิน หรือทรายที่มีแร่เรเดียมเจือปนมาก่อสร้างอาคาร วัสดุเหล่านั้นก็จะปล่อยก๊าซเรดอนออกมาตามปริมาณเรเดียมที่ปะปนอยู่ หากอาคารเหล่านั้นไม่มีระบบระบายอากาศที่ดีก็จะเป็นแหล่งสะสมของก๊าซเรดอนในปริมาณที่สูงจนอาจเป็นอันตรายต่อผู้อยู่อาศัยได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันอาคารในประเทศไทยได้เปลี่ยนรูปลักษณ์ไปตามรูปแบบที่ลอกเลียนมาจากต่างประเทศ ซึ่งได้รับการยกย่องว่าเป็นสิ่งแสดงอารยธรรมอันทันสมัย อาคารสร้างด้วยคอนกรีต ประตูหน้าต่างปิดเกือบตลอดเวลา ไม่มีช่องลมระบายอากาศ ต้องปรับอากาศภายในด้วยระบบเครื่องกล บางแห่งยังมีชั้นใต้ดินอีกหลายชั้น ลักษณะเช่นนี้ล้วนแล้วแต่เอื้อต่อการเกิดการสะสมของก๊าซเรดอนภายในอาคารทั้งสิ้น

บทความนี้จะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยสร้างความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการมีอยู่และภยันตรายของก๊าซเรดอน ให้แก่ผู้ออกแบบ ผู้ใช้อาคาร เพื่อที่จะได้ใช้องค์ความรู้ดังกล่าวบูรณาการกับการออกแบบ เพื่อป้องกันการเกิดการสะสมของก๊าซเรดอนภายในอาคาร โดยมีความเหมาะสมกับสภาพเศรษฐกิจและเทคโนโลยีในปัจจุบัน อันจะนำไปสู่คุณภาพชีวิตที่ดีของผู้พักอาศัยในอาคารต่อไป

2. ก๊าซเรดอนและผลกระทบต่อสุขภาพ

ก๊าซเรดอน (Rn-222) จัดเป็นก๊าซกัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียม เป็นก๊าซที่ปราศจากสี และกลิ่น มีความหนาแน่น 9.73 กรัมต่อลิตร ณ สภาวะปกติ ซึ่งถือว่ามีน้ำหนักมากที่สุดในบรรดาก๊าซทั้งหมดในธรรมชาติ นอกจากนี้ เมื่อลดอุณหภูมิลงให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-71.0°C) พบว่าก๊าซเรดอนเกิดการเรืองแสงได้ ด้วยคุณสมบัตินี้เองทำให้ในช่วงแรกก๊าซเรดอนถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า นิตอน (Niton) ซึ่งแปลว่า สารเรืองแสง

ก๊าซเรดอนมีไอโซโทป [4] อยู่ 3 ไอโซโทป ได้แก่ ก๊าซแอคตินอน (Rn-219) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวในอนุกรมแอคติเนียม เมื่อสลายตัวจะให้รังสีอัลฟา มีค่าครึ่งชีวิต 4.0 วินาที และก๊าซโทรอน (Rn-220) เกิดจากการสลายตัวในอนุกรมทอเรียม เมื่อสลายตัวจะให้รังสีอัลฟาเช่นกัน มีค่าครึ่งชีวิต 55.6 วินาที ส่วนก๊าซเรดอน เป็นไอโซโทปที่มีค่าครึ่งชีวิตนานที่สุด คือ 3.82 วัน จากที่กล่าวมาจะพบว่า ก๊าซแอคตินอน และก๊าซโทรอน มีค่าครึ่งชีวิตที่สั้นมาก แพร่กระจายไปได้ไม่ไกลก็สลายตัวหมด ปริมาณก๊าซทั้งสองที่พบบนโลกจึงมีปริมาณน้อย เมื่อเทียบกับก๊าซเรดอน ซึ่งใช้เวลานานกว่าในการสลายตัว จึงมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์มากกว่า



รูปที่ 1 การสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม [5]

แหล่งกำเนิดของก๊าซเรดอน สามารถแบ่งได้ 4 แหล่งใหญ่ ๆ ได้แก่ ยูเรเนียมในดิน น้ำบาดาล วัสดุก่อสร้าง และก๊าซธรรมชาติ แต่ต้นกำเนิดของก๊าซเรดอนที่แท้จริงแล้วคือ แร่ยูเรเนียม โดยสังเกตได้ว่าทุกอนุกรมล้วนแล้วแต่มีแร่ยูเรเนียมเป็นสารตั้งต้นทั้งสิ้น ดังนั้นก๊าซเรดอนที่มาจากพื้นดิน จึงจัดเป็นสาเหตุที่สำคัญที่สุดต่อปริมาณก๊าซเรดอนทั้งหมดในอาคาร

ยูเรเนียมสามารถพบแพร่กระจายอยู่ทั่วไปในดินและหินในปริมาณเฉลี่ย 1–5 ส่วนในล้านส่วน และ 1–4 ส่วนในพันล้านส่วนในน้ำจืดและน้ำทะเล ปริมาณยูเรเนียมในดินและหิน จึงนับเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่ง ในการใช้ประเมินศักย์เรดอน (Radon Potential) ของพื้นที่นั้น Joseph Duval ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของยูเรเนียมที่ผิวดินกับค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่ตรวจวัดในอาคารที่พักอาศัย และได้สรุปใช้เป็นเกณฑ์กำหนดศักย์เรดอนภายในอาคารไว้ดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 พื้นที่ที่มีศักย์เรดอนสูงนั้น จะมีค่าความเข้มข้นยูเรเนียมที่ผิวดินสูงกว่า 3 ppm eU และหากทำการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซเรดอนในอาคารจำนวน 100 หน่วยในพื้นที่นี้ จะมีมากกว่า 30 หน่วยที่มีความเข้มข้นของก๊าซเรดอนสูงกว่า 148 Bq m^{-3} อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าอาคารจะไม่ได้ตั้งอยู่บนพื้นที่ที่มีศักย์เรดอนสูง แต่หากวัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐ หิน ทราย นำมาจากบริเวณที่มีศักย์เรดอนสูงแล้ว อาคารนั้นก็มีโอกาสที่จะมีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนสูงตามไปด้วย

นอกจากนี้ ก๊าซเรดอนยังสามารถละลายได้ในน้ำเย็น และการละลายจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งความสามารถในการละลายน้ำได้ของเรดอนนี้เอง ที่เป็นสาเหตุให้มีการปล่อยก๊าซเรดอนเข้าสู่บรรยากาศระหว่างกิจกรรมการใช้น้ำในบ้าน (ถ้าในน้ำมีก๊าซเรดอนมาก) เช่น การซักเสื้อผ้า การล้างจาน การอาบน้ำ เป็นต้น

อันตรายที่มนุษย์ได้รับเมื่อสูดดมก๊าซเรดอนเข้าสู่ร่างกาย ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะจากตัวก๊าซเรดอนเท่านั้น หากแต่เกิดเนื่องจากการแผ่รังสีอัลฟาในระหว่างการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้น โดยเฉพาะอนุภาคอัลฟาที่ปลดปล่อยจากไอโซโทปของโปโลเนียม (^{218}Po และ ^{214}Po) ซึ่งจะปล่อยพลังงานออกมาปริมาณมากที่สุด และส่งผลกระทบโดยตรงต่อเนื้อเยื่อภายในระบบหายใจ

(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 2 แหล่งกำเนิดก๊าซเรดอน (ก) แร่ยูเรเนียม (ข) น้ำบาดาล (ค) วัสดุก่อสร้าง (ง) ก๊าซธรรมชาติ

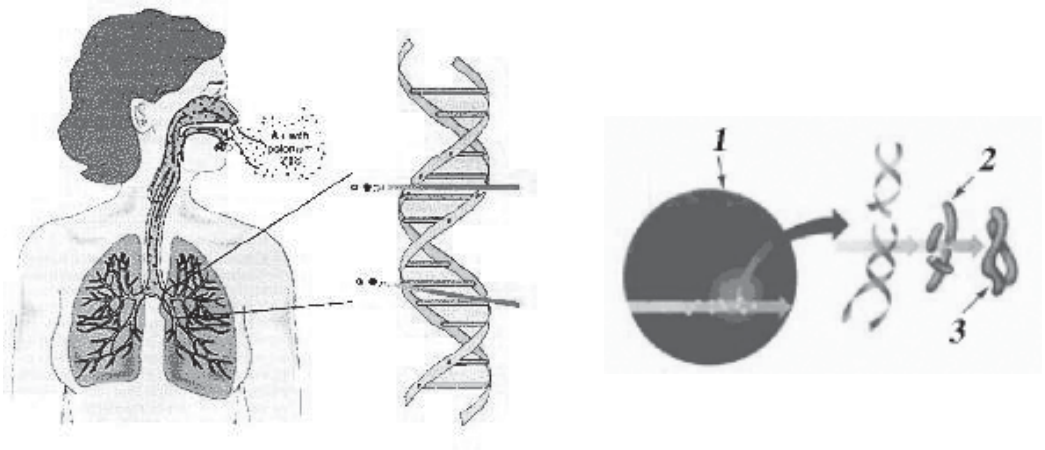
Concentration (ppm eU)*	Radon Potential	Number of data with radon Higher than 148 Bq m^{-3} Air
0.0 - 0.5	Very low	0 %
0.5 - 1.0	Low	Less than 10 %
1.0 - 2.0	Intermediate	Less than 20 %
2.0 - 3.0	Slightly high	Less than 30 %
> 3.0	High	More than 30 %

* Part per million equivalent Uranium, unit of uranium concentration at isotopic equilibrium for Uranium-238 series.

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความเข้มข้นของยูเรเนียมที่ผิวดินกับศักย์เรดอนของพื้นที่ [6]

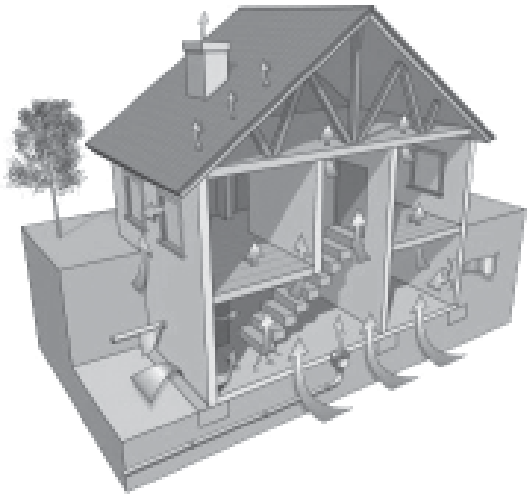
ในขณะที่มนุษย์ประกอบกิจกรรมใด ๆ อยู่ในอาคาร มนุษย์หายใจนำก๊าซเรดอนเข้าไปในปอด ซึ่งสามารถละลายได้ในเลือด และไหลเวียนผ่านร่างกาย อวัยวะ และเนื้อเยื่อ จนกระทั่งระบายออกผ่านทางปอดหรือผิวหนังทำให้เกิดสมดุลขึ้นระหว่างความเข้มข้นของเรดอนที่อยู่ภายนอกและภายใน มีการประมาณการกันว่า ในอากาศแต่ละลิตรจะประกอบด้วยเรดอน 70,000 อะตอม ดังนั้น จึงมีการสะสมอยู่ในทางเดินอากาศของเราประมาณ 600,000 อนุภาค ทุก ๆ ชั่วโมง [7] เมื่ออะตอมของเรดอนเกิดการสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์ลูกหลาน ก็จะปล่อยรังสีอัลฟาออกมาด้วย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเนื้อเยื่อบริเวณใกล้เคียง

ผลกระทบที่มีต่อเนื้อเยื่อในร่างกายเกิดขึ้นจากการที่สารพันธุกรรม (DNA) ภายในเซลล์ของเนื้อเยื่อนั้นถูกรังสีอัลฟาทำลาย โดยกระบวนการไอออไนเซชั่น (Ionization radiation) ซึ่งหากสายพันธุกรรม (Strands) ถูกทำลายพร้อมกันสองสาย เซลล์จะไม่สามารถซ่อมแซมได้ ทำให้โครโมโซม (Chromosome) เกิดความผิดปกติ อาจทำให้เซลล์นั้นเกิดการแบ่งตัวแบบไม่หยุดกลายเป็นมะเร็งได้



รูปที่ 3 สารพันธุกรรมถูกทำลายโดยการแผ่รังสี [8]

1. When radiator penetrates a human cell, it may damage molecules in its path.
2. If a DNA molecule is damaged, the chromosome containing that DNA molecule may break apart.
3. The chromosome may then recombine abnormally. This change in chromosome structure may lead to the death of the cell.

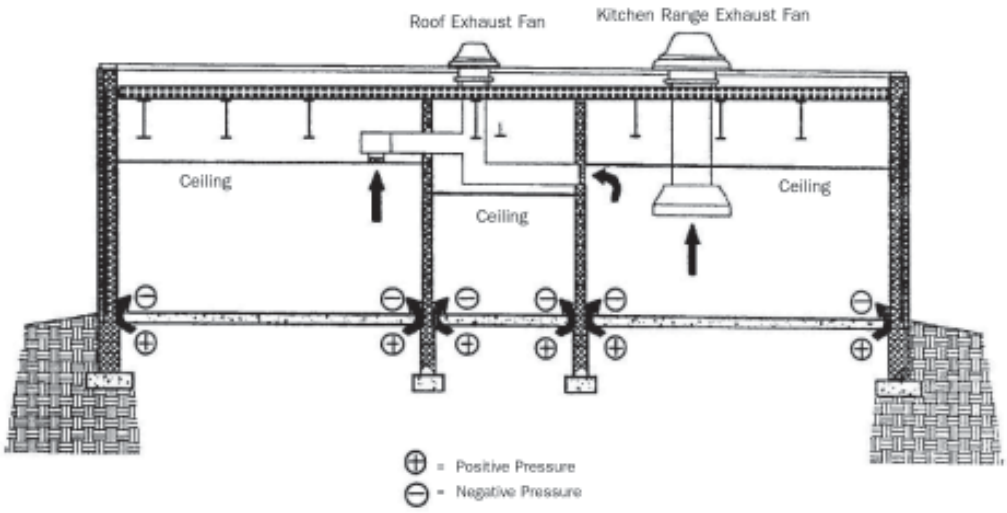


รูปที่ 4 การเข้าสู่อาคารของก๊าซเรดอน [9]

อาการผิดปกติของเซลล์จะถูกถ่ายทอดไปยังลูกหลานรุ่นต่อไปก่อให้เกิดอาการผิดปกติได้ แต่ถ้าการถูกทำลายนี้เกิดขึ้นที่เซลล์ร่างกาย (Somatic cells) อาการผิดปกติจะเกิดขึ้นเฉพาะบุคคล ไม่ถ่ายทอดไปยังลูกหลาน เคราะห์ดีที่การได้รับรังสีเนื่องจากเรดอน เป็นการทำลายที่เกิดขึ้นเฉพาะเซลล์ร่างกาย ดังนั้น อาการป่วยต่าง ๆ จึงเกิดขึ้นเฉพาะกับผู้ที่ได้รับรังสี ไม่ถ่ายทอดไปยังลูกหลาน โดยอาการป่วยดังกล่าว อาจมีตั้งแต่วิงเวียนศีรษะ จนถึงเป็นมะเร็งปอดที่ทำให้เสียชีวิตได้ ซึ่งจะใช้ช่วงเวลาแสดงอาการตั้งแต่ 5 ถึง 50 ปี

3. เส้นทางการเข้าสู่อาคารของก๊าซเรดอน และการตรวจวัดก๊าซเรดอน

ก๊าซเรดอนสามารถเข้าสู่อาคารบ้านเรือนได้หลายวิธีโดยมีกระบวนการที่สำคัญ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการแพร่ (Diffusion-driven transport) และกระบวนการต่างความดัน (Pressure-driven transport) ซึ่งเรดอนจะอาศัยกระบวนการเหล่านี้ผ่านเข้ามาทางรูรั่ว และรอยแตกร้าวของอาคารเข้าสู่ตัวอาคาร นอกจากนี้ ก๊าซเรดอนยังสามารถเข้าสู่ตัวอาคารได้โดยผ่านทางน้ำใช้ ก๊าซธรรมชาติ



รูปที่ 5 การเกิดความต่างความดันภายในอาคาร [10]

Source	Estimated Contribution (activity per second)	
Soil gas transport[a]	0 – 6.00[b] Bq s^{-1}	(0 – 150 pCi s^{-1})
Release from pot water	0 – 2.00 Bq s^{-1}	(0 – 60 pCi s^{-1})
Soil gas diffusion	0.10 – 0.20 Bq s^{-1}	(3 – 6 pCi s^{-1})
Diffusion from building materials	0.01 – 1.00 Bq s^{-1}	(0.3 – 30 pCi s^{-1})

[a] May be a factor of 10 to 100 times higher in certain regions.

[b] Ranges given are subject to wide variation dependent upon location, water sources, house design and construction materials.

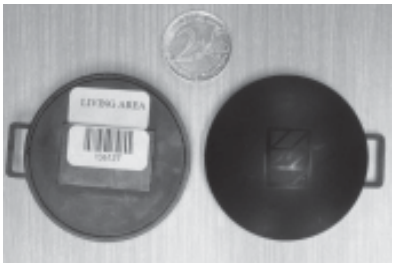
ตารางที่ 2 การประมาณปริมาณก๊าซเรดอนที่มาจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ภายในบ้าน [11]

และวัสดุก่อสร้าง แต่ก็ถือว่าเป็นปริมาณที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับก๊าซเรดอนที่มาจากพื้นดิน

การเข้าสู่อาคารของก๊าซเรดอนโดยอาศัยผลต่างของความดัน เป็นวิธีที่สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายที่สุด โดยจะเกิดขึ้นเมื่อความดันอากาศภายในอาคารมีค่าต่ำกว่าอากาศภายนอกอาคาร ส่งผลให้เกิดแรงดึงอากาศจากภายนอกรวมทั้งอากาศจากใต้ดินเข้าสู่ตัวอาคาร ซึ่งการที่ภายในอาคารมีความดันต่ำ (Negative pressure) กว่าภายนอกนั้นเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น เกิดความต่างของอุณหภูมิระหว่างภายนอกกับภายในอาคาร กระแสลม การรั่วซึมของอากาศจากภายนอก รวมถึงการใช้ระบบเครื่องกลระบายอากาศต่าง ๆ ภายในอาคาร ล้วนแล้วแต่ส่งผลต่อความดันอากาศภายในอาคารทั้งสิ้น

นอกจากนี้ ก๊าซเรดอนยังสามารถเข้าสู่ตัวอาคารได้แม้ว่าจะไม่เกิดความต่างความดัน ซึ่งลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นได้โดยกระบวนการแพร่ (Diffusion-driven transport) เหมือนกับการหยดสีลงในแก้วน้ำ ซึ่งสีก็จะกระจายไปจนทั่วแก้ว แต่จากการศึกษายังไม่ค่อยพบว่า กระบวนการแพร่เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการสะสมก๊าซเรดอนภายในอาคาร

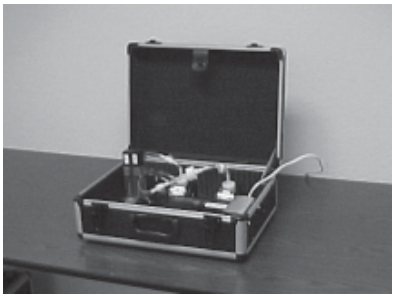
ดังนั้น สิ่งที่สำคัญเป็นอันดับแรก ในการควบคุมหรือป้องกันไม่ให้ก๊าซเรดอนเข้าสู่ตัวอาคาร คือ การทราบถึงแหล่งกำเนิดของก๊าซเรดอนในอาคารนั้น ๆ เช่น ศักย์ของยูเรเนียมในพื้นที่ตั้ง การเลือกใช้วัสดุก่อสร้าง เป็นต้น ดังตารางที่ 2 เป็นการประมาณปริมาณก๊าซเรดอนที่มาจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ภายในบ้าน



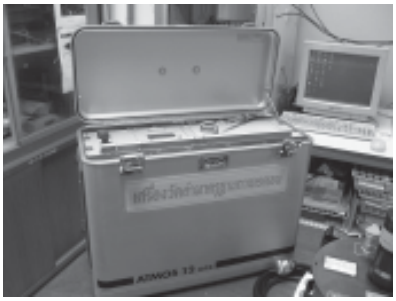
(ก)

(ข)

(ค)



(ง)



(จ)

(ก) Alpha-Track Detector (ATD)
(ข) Charcoal canister
(ค) CRM
(ง) RPISU
(จ) Atmos 12 dpx (Ionization chamber)

รูปที่ 6 ตัวอย่างของอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดก๊าซเรดอน

Device	Sampling times	Cost (US $)
Charcoal canister	2 to 7 days	15 – 30
Alpha-track detector	3 months	20 – 50
RPISU	4 days (min.), 7 days (preferred)	500 – 3,000
Continuous WL monitor	6 hrs (min.), 24 hrs (preferred)	2,500 – 10,000
Continuous radon monitor	6 hrs (min.), 24 hrs (preferred)	2,500 – 10,000
Grab WL	5 minutes	2,500 – 10,000
Grab radon	5 minutes	2,500 – 10,000

ตารางที่ 3 ระยะเวลาและราคาโดยประมาณ ในการตรวจวัดก๊าซเรดอนของอุปกรณ์แต่ละชนิด [12]

เนื่องจากก๊าซเรดอนไม่สามารถวัด หรือรับรู้ได้ด้วยประสาทสัมผัสใด ๆ ของมนุษย์ อีกทั้งยังเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสารใด ๆ ได้ค่อนข้างยาก ดังนั้น การตรวจวัดเพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน จึงสามารถกระทำได้เพียงวิธีเดียว โดยการวัดจากปริมาณรังสีที่ถูกปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการสลายตัว ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ในการตรวจวัดต่าง ๆ ให้สามารถวัดได้ทั้งรังสีอัลฟา เบตา และแกมมา

องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency: US EPA) ได้แนะนำให้ใช้วิธีการตรวจวัดก๊าซเรดอนและผลิตภัณฑ์ลูกหลาน โดยแบ่งตามประเภทของอุปกรณ์ตรวจวัด 7 ประเภท [13] ได้แก่ 1) Alpha-track detector, 2) Charcoal canister, 3) Grab sampling for Rn measurement, 4) Continuous Rn monitor (CRM), 5) Continuous WL monitor (CWLM), 6) Radon

ประเทศ	ที่พักอาศัยในปัจจุบัน (Bq m^{-3})	ที่พักอาศัยในอนาคต (Bq m^{-3})
เบลเยียม	250	250
แคนาดา	800	800
ฟินแลนด์	400	200
เยอรมนี	250	250
ไอร์แลนด์	200	200
นอร์เวย์	200	200
สวีเดน	140 และ 400	200
อังกฤษ	200	200

ตารางที่ 4 ระดับอ้างอิงความเข้มข้นก๊าซเรดอนในที่พักอาศัยของประเทศต่าง ๆ [14]

progeny integrating sampling unit (RPISU), และ 7) Grab sampling for Rn progeny measurement ซึ่ง 4 วิธีการแรกใช้สำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซเรดอน (Radon concentration) ส่วนที่เหลือจะใช้ตรวจวัดผลิตภัณฑ์ลูกหลาน ที่เกิดจากการสลายตัว โดยวิธีการที่เหมาะสมสำหรับบุคคลทั่วไปในการตรวจวัดก๊าซเรดอนภายในอาคาร จะมีเพียง Alpha-track detector และ Charcoal canister เนื่องจากสะดวก และราคาไม่แพงมาก สามารถหาซื้อได้ทั่วไปแต่ก็อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้มาก

ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัดแต่ละประเภทที่กล่าวมา จะมีความแม่นยำ ตลอดจนระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดแตกต่างกัน ดังตารางที่ 3

นอกจากการเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมจะมีผลต่อการตรวจวัดก๊าซเรดอนแล้ว ตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องตรวจวัดก็มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลจากการตรวจวัดเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น

- ควรติดตั้งห่างจากช่อง ท่อระบายอากาศ ประตู หน้าต่าง เครื่องปรับอากาศ และปล่องไฟ
- ไม่ควรติดตั้งใกล้กับห้องน้ำ ห้องครัว บริเวณชื้นแฉะ เพราะความชื้นจะมีผลต่อการตรวจวัดก๊าซเรดอน
- สำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดประเภท Passive เช่น Alpha-track detector หรือ Charcoal canister ควรติดตั้งห่างจากพื้นอย่างน้อย 20 นิ้ว เพื่อลดการเกิดปรากฏการณ์ Plate-out
- อุปกรณ์ไม่ควรถูกรบกวนตลอดระยะเวลาการตรวจวัด

4. มาตรฐานและระดับปฏิบัติของก๊าซเรดอนในอาคาร

การสร้างมาตรฐานสำหรับใช้ควบคุมปริมาณการได้รับก๊าซเรดอนจากสิ่งแวดล้อม ทั้งภายในและภายนอกอาคาร กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางทั้งในและต่างประเทศ แต่ด้วยคุณสมบัติของก๊าซเรดอนทำให้เป็นการยากที่จะกำหนด 'ระดับปฏิบัติ' (Action level) ขึ้นมา ซึ่งคณะกรรมาธิการนานาชาติว่าด้วยการป้องกันอันตรายจากรังสี (International Commission on Radiological Protection: ICRP) ได้ให้ข้อแนะนำว่า ระดับที่ถูกกำหนดให้เป็นระดับปฏิบัตินั้นจะต้องกำหนดให้ชัดเจน และต้องสามารถควบคุม หรือทำตามได้ โดยที่ระดับปฏิบัตินั้นสามารถแตกต่างกันได้ในแต่ละประเทศ [15] นอกจากนี้ ในบางประเทศยังได้มีการกำหนด 'ระดับอ้างอิง' (Reference level) ขึ้นมา ซึ่งเป็นระดับที่ใช้เป็นเกณฑ์เฉลี่ย เช่น องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา หรือ US EPA ได้กำหนดระดับเรดอนภายในอาคารโดยเฉลี่ยไว้ที่ 148 Bq m^{-3} [16] หากตรวจพบว่าอาคารใดมีค่าเกินจากนี้ จะต้องรีบหาวิธีการลดปริมาณก๊าซเรดอนลงให้ต่ำกว่าค่าดังกล่าวโดยเร็ว อย่างไรก็ตาม ระดับอ้างอิงเป็นเพียงข้อแนะนำ (Recommendation) ที่ในแต่ละประเทศกำหนดขึ้นไม่ได้มีผลบังคับทางกฎหมาย ต่างจากระดับปฏิบัติ ซึ่งจะมีผลบังคับทางกฎหมาย

แม้ว่าในปัจจุบัน US EPA จะแนะนำให้ใช้มาตรการลดความเข้มข้นของเรดอนในอากาศภายในอาคารพักอาศัยให้มีค่าต่ำกว่า 4 pCi ต่อ 1 ลิตรของอากาศ แต่กระนั้น US EPA ก็ยังเชื่อว่า ไม่มีระดับเรดอนที่ปลอดภัยจริง ไม่ว่า

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

ตารางที่ 5 ค่ามาตรฐานเรดอนในอากาศของหน่วยงานต่าง ๆ ในสหรัฐอเมริกา [17]

ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนจะอยู่ในระดับใดก็ตาม ก็จะก่อให้เกิดความเสี่ยงอยู่ค่าหนึ่ง ดังนั้น จึงไม่ควรยึดว่าระดับใด 'ปลอดภัย' หรือ 'ไม่ปลอดภัย' แต่ควรพิจารณาให้เหมาะสมสอดคล้องกับความสามารถของเทคโนโลยีปัจจุบัน รวมทั้งต้นทุนค่าใช้จ่ายและพยายามลดค่าความเข้มข้นของเรดอนลงให้มากที่สุด หรือที่ ICRP เรียกว่า ALARA (As low as reasonably achievable)

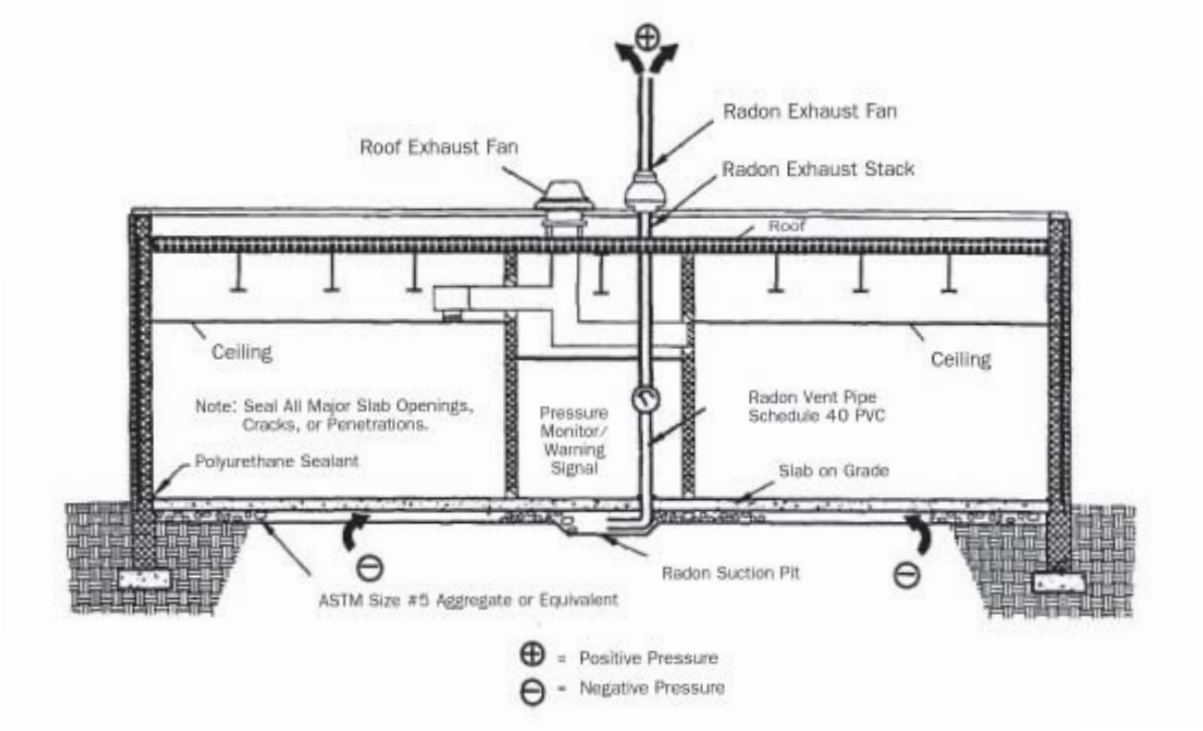
สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานความเข้มข้นเรดอนขึ้นใช้ ซึ่งระดับที่เหมาะสมกับประเทศไทย อาจจะสูงกว่าหรือต่ำกว่ามาตรฐานของที่อื่น ๆ ก็เป็นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นเรดอนเฉลี่ยที่เป็นภูมิหลัง (Background) ของทั่วประเทศ ความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอดอันเนื่องมาจากเรดอน และค่าใช้จ่ายในการลดความเสี่ยง ทั้งนี้การได้มาซึ่งตัวเลขดังกล่าว จะต้องผ่านการศึกษาอย่างละเอียดและกว้างขวาง อีกทั้งยังต้องใช้ระยะเวลา และเงินทุนจำนวนมาก ซึ่งในบางประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา มีหน่วยงานต่าง ๆ ด้านสุขภาพ ซึ่งมีความเชี่ยวชาญ และได้ทำการวิจัยอย่างกว้างขวางในเรื่องเกี่ยวกับเรดอน รวมถึงได้กำหนดระดับมาตรฐานความเข้มข้นก๊าซเรดอนไว้ (ตารางที่ 5) จากข้อมูลดังกล่าว อาจจะยอมรับได้ว่าระดับความเข้มข้นเรดอนในอากาศขนาด 4–8 pCi L^{-1} เป็นระดับที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพน้อย หรืออาจกล่าวได้ว่ามีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอดน้อย อย่างไรก็ตาม ค่าดังกล่าวอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ในอนาคต

เนื่องจากว่าประเทศไทยยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอนขึ้นใช้ คงจะเป็นการดีที่จะยอมรับระดับมาตรฐานความเข้มข้นก๊าซเรดอนของสหรัฐอเมริกาที่ระดับ 4–8 pCi L^{-1} ไปก่อน จนกว่าจะสามารถพัฒนากำหนดระดับมาตรฐานของตนเองขึ้นมาใช้ในอนาคต

5. แนวทางการปฏิบัติเพื่อลดระดับความเข้มข้นก๊าซเรดอนในอาคาร: กรณีศึกษาอาคารในต่างประเทศ

เนื่องจากก๊าซเรดอนมีอยู่ทั่วไปทุกหนแห่ง เช่นเดียวกันกับก๊าซพิษอื่น ๆ การทำให้อาคารใด ๆ ปราศจากก๊าซเรดอนโดยสิ้นเชิง จึงไม่สามารถที่จะกระทำได้ แต่การควบคุมปริมาณก๊าซเรดอนให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม เป็นสิ่งที่สามารถกระทำได้ ซึ่งหนทางที่ดีที่สุดคือ การนำเทคนิควิธีการป้องกันก๊าซเรดอนไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการออกแบบอาคารตั้งแต่ต้น จะก่อให้เกิดประสิทธิภาพและประหยัดกว่าการป้องกันก๊าซเรดอนในภายหลัง

เทคนิคและวิธีการที่ใช้ในการลดและควบคุมระดับก๊าซเรดอนในอาคารในปัจจุบัน มีอยู่ด้วยกัน 3 หลักการใหญ่ ๆ ได้แก่ วิธีการลดระดับความดันที่ผิวดิน (Active Soil Depressurization: ASD) วิธีการอัดความดันและเจือจาง อากาศในอาคาร (Building Pressurization & Dilution) และวิธีการปิดกั้นเส้นทางเข้าของก๊าซเรดอน (Sealing Radon Entry Routes)



รูปที่ 7 รูปแบบทั่วไปสำหรับระบบ ASD ในอาคาร [18]

5.1 วิธีการลดระดับความดันที่ผิวดิน (Active Soil Depressurization: ASD)

วิธีการนี้ เป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ และนับว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด หลักการของวิธีนี้ คือ การสร้างภาวะความดันต่ำ (Negative pressure) ให้เกิดขึ้นบริเวณใต้พื้นอาคาร ซึ่งภาวะดังกล่าวจะช่วยป้องกันก๊าซที่ขึ้นมาจากพื้นดินไหลเข้าสู่ตัวอาคาร ขณะเดียวกันก็ทำให้อากาศจากอาคารไหลลงสู่พื้นดิน การสร้างภาวะความดันต่ำขึ้นภายใต้พื้นอาคาร สามารถกระทำได้โดยการติดตั้งท่อดูดก๊าซเรดอน (Radon suction pit)ที่ใต้พื้นอาคาร ท่อนี้จะถูกต่อเข้ากับท่อระบายอากาศที่วิ่งทะลุออกไปยังภายนอกอาคาร ซึ่งจะมีพัดลมดูดอากาศ (Suction fan) ระบายออกสู่ภายนอก (รูปที่ 7)

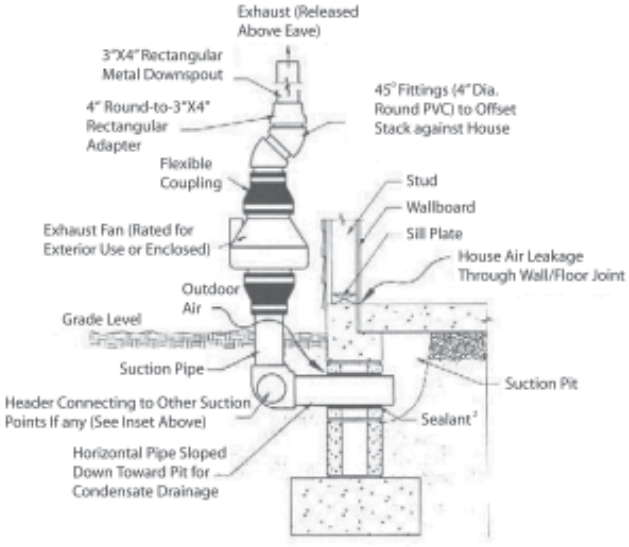
5.2 วิธีการอัดความดันและเจือจางอากาศในอาคาร (Building Pressurization & Dilution)

วิธีการนี้ ใช้หลักการเดียวกันกับวิธี ASD คือ การป้องกันก๊าซเรดอนเข้าสู่อาคารโดยการใช้ความดันอากาศเป็นเกราะ แต่ต่างกันในเทคนิควิธีการ กล่าวคือ วิธีการนี้จะทำให้ความดันอากาศภายในอาคารมีค่าสูงกว่าความดันอากาศภายนอกอาคาร หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ปริมาณอากาศจากภายนอกอาคาร (Fresh air) ที่ถูกนำเข้ามาภายในอาคารต้องมากกว่าอากาศที่ถูกระบายออกไป (Exhaust air)

รูปที่ 9 เป็นแนวคิดในการปรับความดันของอากาศภายในอาคาร โดยใช้ระบบเครื่องกล (HVAC system) เข้าช่วย โดยกำหนดให้อาคารตัวอย่างทั้งสองมีอัตราการจ่ายลมเข้า (Total supply air) เท่ากับ 100,000 cfm และมีอัตราการนำอากาศออก (Exhaust air) เท่ากับ 15,000 cfm เท่ากัน แต่มีอัตราการนำอากาศจากภายนอกเข้ามาไม่เท่ากัน โดยในอาคารที่นำอากาศภายนอกเข้ามาด้วยอัตรา 20,000 cfm หรือ 20% ของอัตราการจ่ายลมเข้า (รูปที่ 9 ก) ซึ่งมากกว่าอัตราการนำอากาศออก 5,000 cfm ทำให้ความดันอากาศภายในอาคารสูงกว่าภายนอก (Positive Pressure) ปริมาณอากาศส่วนเกินเหล่านั้น จึงเกิดการรั่วซึมออกสู่ภายนอก (Exfiltration) ผ่านทางรอยแตกของอาคาร ทำให้เรดอนจากภายนอกไม่สามารถเข้าสู่อาคารได้ ในขณะที่อาคารที่สองมีการนำอากาศจากภายนอกเข้ามาเพียง 5,000 cfm หรือ 5% ของอัตราการจ่ายลมเข้า ทำให้ความดันอากาศภายในอาคารต่ำกว่าภายนอก เกิดภาวะ Negative pressure อากาศภายนอก รวมถึงก๊าซเรดอนจึงสามารถรั่วซึมเข้าสู่ภายในอาคารได้ (รูปที่ 9 ข)

นอกจากนี้ การนำอากาศจากภายนอกเข้ามายังช่วย

(ก)



(ข)

รูปที่ 8 (ก) การติดตั้งระบบ ASD ในอาคารบ้านเรือน
(ข) รายละเอียดการติดตั้งพัดลมดูดก๊าซเรดอน [19]

เจือจาง (Dilution) ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในอาคารได้ โดยควบคู่ไปกับการระบายอากาศ (Ventilation) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าในทางทฤษฎีระบบการอัดอากาศในอาคารสามารถป้องกันการรั่วซึมของก๊าซเรดอนเข้าสู่ตัวอาคารได้จริง แต่ในทางปฏิบัติแล้ว เป็นการยากที่จะทำให้ภายในอาคารมี Positive pressure โดยสมบูรณ์ เนื่องจากมีการเปิด-ปิด ประตู หน้าต่างอยู่ตลอดเวลา อีกทั้งรอยต่อรอยร้าวทั้งหมดภายในอาคารต้องอุดอย่างสนิทจริง ๆ ดังนั้น เพื่อประสิทธิภาพสูงสุดจึงควรใช้ร่วมกับวิธีอื่น ๆ ในการป้องกันก๊าซเรดอนรั่วซึมเข้าสู่ตัวอาคาร เช่น วิธี ASD เป็นต้น

5.3 วิธีการปิดกั้นเส้นทางเข้าของก๊าซเรดอน (Sealing Radon Entry Routes)

เนื่องจากแหล่งกำเนิดก๊าซเรดอนภายในอาคารที่สำคัญที่สุด คือ พื้นดิน โดยก๊าซเรดอนที่อยู่ในดินจะรั่วซึมเข้าสู่อาคารผ่านทางรอยแตก รอยร้าว ของพื้นอาคารที่อยู่ติดกับพื้นดิน ดังนั้น วิธีการโดยตรงในการป้องกันก๊าซเรดอนเข้าสู่อาคาร ก็คือ การอุดปิดรอยรั่วทั้งหมดของอาคาร ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำได้ยากมาก ยิ่งอาคารขนาดใหญ่ด้วยแล้ว ยิ่งแทบจะเป็นไปไม่ได้เลย แต่ยังมีอีกหนทางหนึ่งที่พอจะกระทำได้นั่นคือ อุดรอยรั่วเฉพาะจุดหลัก ๆ ที่เป็นทางเข้าของก๊าซเรดอน ซึ่งจะสามารถช่วยลดปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคารได้ส่วนหนึ่ง โดยจุดหลักที่ควรมีการอุดรอยรั่วได้แก่

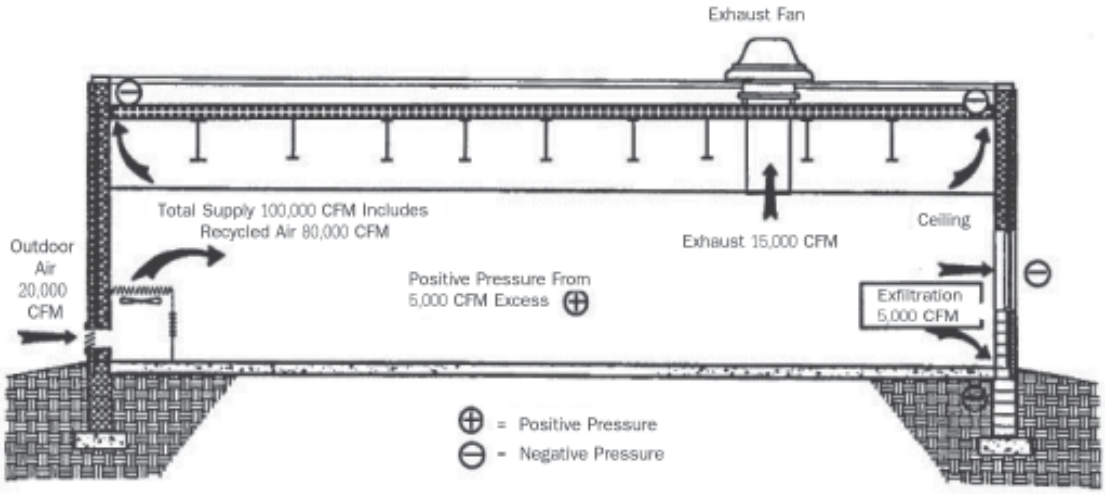
- รอยร้าวของพื้นผนัง และจุดเชื่อมต่อของโครงสร้าง (Expansion joints)
- พื้นที่รอยต่อโดยรอบของระบบท่อที่ติดตั้งผ่านพื้น หรือฐานราก
- งานก่อผนังใต้ดิน

เป็นต้น

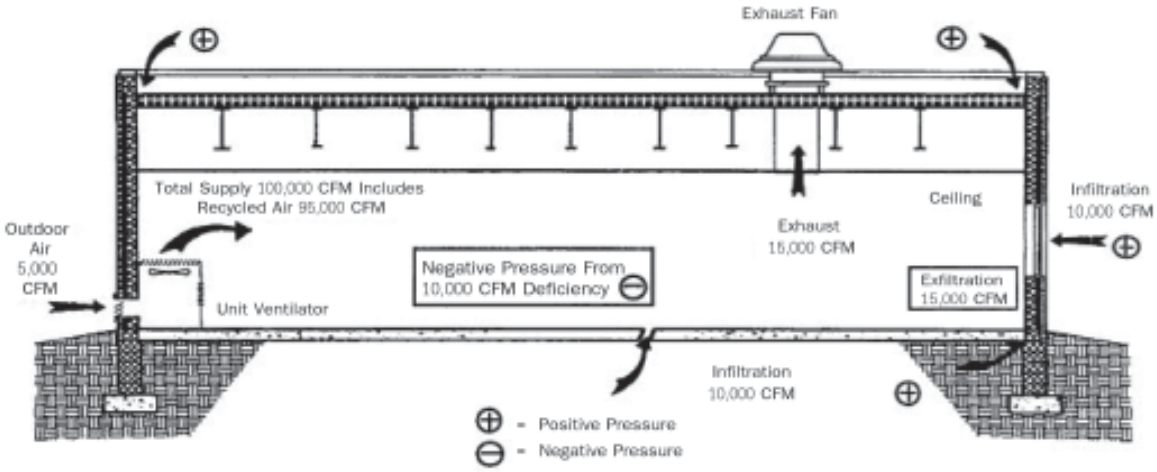
เช่นเดียวกับเทคนิควิธีการป้องกันก๊าซเรดอนอื่น ๆ หากต้องการที่จะลดปริมาณก๊าซเรดอนที่เข้าสู่ตัวอาคารให้มากที่สุด ควรมีการใช้ร่วมกับวิธีอื่นด้วย เช่น วิธี ASD หรือการอัดอากาศภายในอาคาร

6. บทสรุป

สำหรับประเทศไทย ก๊าซเรดอนถือว่าเป็นสิ่งที่ค่อนข้างใหม่ บางคนอาจไม่เคยรู้จัก หรือได้ยินมาก่อน ดังนั้น งานศึกษาวิจัยเกี่ยวกับก๊าซชนิดนี้ทั้งด้านคุณสมบัติทางกายภาพหรือผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีน้อยมาก และทำอยู่ในวงจำกัดเท่านั้น ผิดกับในต่างประเทศ ซึ่งมีความตื่นตัวมานานมากแล้ว และมีการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง ทั้งในสาขาวิทยาศาสตร์ วิทยาศาสตร์สุขภาพ แพทยศาสตร์



(ก) Building positive pressurization with HVAC system



(ข) Building depressurization with HVAC system

รูปที่ 9 หลักการอัดความดันอากาศในอาคารโดยทั่วไป [20]

รูปที่ 10 การอุดรอยต่อและรอยร้าวบริเวณพื้น และผนังอาคาร

วิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มีการพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดทั้งแบบละเอียด ต้องทำกันในห้องปฏิบัติการณ์เท่านั้น จนถึงแบบที่ประชาชนทั่วไปสามารถนำไปตรวจวัดกันเองตามบ้านเรือนได้ นอกจากนี้ยังมีการตั้งเป็นหน่วยงาน และองค์กรต่าง ๆ ขึ้น เพื่อให้ข้อมูล ตลอดจนกำหนดเป็นมาตรฐานความเข้มข้นของปริมาณก๊าซเรดอนภายในอาคารขึ้นใช้ในประเทศ

จากการสำรวจแหล่งแร่ยูเรเนียมในประเทศไทย ของกรมทรัพยากรธรณี [21] พบว่า ประเทศไทยมีแหล่งแร่ยูเรเนียมที่สำคัญอยู่หลายแห่งทั่วประเทศ โดยเฉพาะบริเวณภาคเหนือและภาคใต้ จึงมีโอกาสที่พื้นที่บริเวณดังกล่าวจะเป็นพื้นที่ที่มีศักย์เรดอนสูงได้ และจากการตรวจวัดก๊าซเรดอนภายในอาคาร และที่อยู่อาศัยภายในกรุงเทพมหานครและเขตพื้นที่ใกล้เคียง ของพรศรี พลพงษ์ และคณะ [22] รวม 176 หลังคาเรือน พบว่า มีบ้านเรือนที่มีก๊าซเรดอนสูงเกินกว่ามาตรฐาน US EPA อยู่ถึง 39 หลังคาเรือน หรือประมาณ 1 ใน 5 ของทั้งหมด จากที่กล่าวมาทั้งหมด จึงไม่อาจปฏิเสธได้ว่าการมีอยู่ของก๊าซเรดอนภายในอาคารเป็นเรื่องไกลตัวได้อีกต่อไป และยังเกี่ยวพันโดยตรงกับงานออกแบบสถาปัตยกรรม ดังนั้น ก่อนการสร้างอาคารบ้านเรือน ควรมีการตรวจวัดก๊าซเรดอนใต้ดินบริเวณก่อสร้าง ซึ่งบางบริเวณอาจมีระดับต่ำ (1,000 Bq m^{-3}) บางบริเวณอาจมีระดับสูง (100,000 Bq m^{-3}) เพื่อหาทางแก้ไขในขั้นตอนการออกแบบต่อไป

ถึงแม้ว่ามนุษย์ไม่มีทางที่จะหลีกหนี หรือสร้างอาคารที่ปราศจากก๊าซเรดอนโดยสมบูรณ์ได้ เนื่องจากเป็นก๊าซที่มีอยู่แล้วโดยธรรมชาติ เช่นเดียวกันกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่เราก็มีทางเลือกที่จะหลีกเลี่ยง หรือลดปริมาณก๊าซเรดอนลงได้ ดังนั้น คงยังไม่เป็นการสายเกินไปที่จะเริ่มมีการศึกษาวิจัยในเรื่องของก๊าซเรดอนภายในอาคารกันอย่างจริงจัง เพื่อหาหนทางในการลดระดับความเข้มข้น ตลอดจนกำหนดระดับปลอดภัยขึ้นมาใช้เป็นมาตรฐานในการออกแบบก่อสร้าง สร้างคุณภาพชีวิตที่ดีให้แก่ผู้ใช้อาคาร อันจะนำประโยชน์สู่องค์กร และประเทศชาติได้ต่อไป

รายการอ้างอิง (References)

[1] The American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers. (1993). ASHRAE Fundamentals Handbook: Air contaminants. Atlanta: ASHRAE.

[2] Nagda, N. L. (1994). Radon: Prevalence, measurements, health risks and control. Philadelphia, PA: ASTM Publication, 1-10.

[3] Bodansky, D. (1987). Overview of the indoor radon problem. Indoor radon and its hazards. Seattle: University of Washington Press, 1-16.

[4] ไอโซโทป (Isotope) คือ อะตอมของธาตุเดียวกัน ซึ่งในนิวเคลียสมีจำนวนโปรตอนเท่ากัน แต่มีจำนวนนิวตรอนต่างกัน เช่น ธาตุไฮโดรเจนมี 3 ไอโซโทป ได้แก่ $^{1}_{1}H$ $^{2}_{1}H$ $^{3}_{1}H$ ไอโซโทปของธาตุเดียวกันจะมีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนกัน แต่คุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างกัน

[5] Sextro, R. G. (1994). Radon and the natural environment. In N. L. Nagda, Radon: Prevalence, measurements, health risks and control. Philadelphia: PA, 10.

[6] Duval, J. (1988). Indoor radon predicting using gamma ray spectrometric data. EOS, Transactions of Am Geophysics Union, 70, 496.

[7] วรวิทย์ รัตนวงษ์ และคณะ. (2547). เรดอนมหันตภัยร้ายที่ก่อให้เกิดมะเร็งปอด. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์, 3 (2).

[8] United States Environmental Protection Agency (US EPA). (1992). Indoor air – radon (Rn). Retrieved from http://www.epa.gov/radiation/radionuclides/radon.htm.

[9] GT. Analytic KEG. Radon measuring instruments. Retrieved from http://www.gt-analytic.at/engl about_radon.htm.

[10] United States Environmental Protection Agency (US EPA). (1994). Radon preventing in the design and construction of schools and other large buildings. Washington DC, 10.

[11] Wilkening, M. (1990). Radon in the environment. Netherlands: Elsevier Science Publishers, B.V.

[12] United States Environmental Protection Agency (US EPA). (1987). Interim protocols for screening and follow-up radon and radon decay product measurements. Washington DC.

[13] _____. (1986). Interim indoor radon and radon decay product measurement protocols. Washington DC.

[14] European Concerted Action. (1988). Radon in indoor air. Indoor air quality and its impact on man. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

[15] International Commission on Radiological Protection (ICRP). (1991). 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Annual of the ICRP, 21(1-3). Oxford: Pergamon Press.

[16] United States Environmental Protection Agency (US EPA). (1992). National emission standards for hazardous air pollutants: Emission standards for radon emissions from phosphogypsum stacks. Federal Register. Final Rule (40CFR61). 57(107): 23305.

[17] ธวัช ชิตตระการ. (2540). เรดอน ภัยเงียบใกล้ตัว. นิวเคลียร์ปริทัศน์, 12(1), 11-18.

[18] ดูอ้างอิง [10].

[19] United States Environmental Protection Agency (US EPA). (1993). Radon reduction techniques for existing detached houses. Technical guidances for active soil depressurization systems.

[20] ดูอ้างอิง [10].

[21] กองเศรษฐธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม. (2543). แหล่งแร่ยูเรเนียมในประเทศไทย, 4-7.

[22] Polpong P., M.sc., Aksornintra M., Poshpakom R., M.D., M.sc. Med., & Bovornkitti S., M.D., D.sc. Med. (1995). Indoor radon and lung cancer. Sirirat Hosp Gaz, 47(6), 503-508.