ผนวก ข

ผลกระทบของก๊าซเรดอนต่อสุขภาพ

ข.1 ความเสี่ยงเนื่องจากเรดอน

เนื่องจากเรดอนเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ (human carcinogen) ดังนั้น การตกอยู่ในพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของเรดอนสูง จะเป็นการเพิ่มความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอด แม้ว่าจะยังมีความไม่แน่นอนเกี่ยวกับขนาดของความเสี่ยงต่อสุขภาพของเรดอนเช่นเดียวกับมลพิษสิ่งแวดล้อมตัวอื่น ๆ แต่นักวิทยาศาสตร์ยังมีความเชื่อมั่นเกี่ยวกับความเสี่ยงของเรดอน ว่ามีมากกว่าความเสี่ยงต่อมลพิษจากสิ่งแวดล้อมตัวอื่น ๆ ที่จัดเป็นสารก่อมะเร็ง ทั้งนี้เนื่องจากว่าในการประเมินความเสี่ยงต่อเรดอน มีพื้นฐานการศึกษาวิจัยมาจากมะเร็งในมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากคนงานในเหมืองใต้ดิน

ทบวงการพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา ได้ประเมินว่าเรดอนเป็นตัวก่อให้เกิดการเสียชีวิตด้วยโรคมะเร็งปอดในสหรัฐอเมริกาถึง 22,000 คนต่อปี Office of the US Surgeon General ได้เตือนว่า เรดอนเป็นต้นเหตุอันดับที่สอง ที่ก่อให้เกิดการตายเนื่องจากมะเร็งปอดรองลงมาจากการสูบบุหรี่ อย่างไรก็ตามนอกจากการได้รับเรดอนเข้าไปในร่างกายแล้ว ความเสี่ยงของแต่ละบุคคลต่อการที่จะเป็นมะเร็งปอดจะสัมพันธ์กับ 3 ปัจจัยคือ

1. ระดับความเข้มข้นของเรดอน
2. ระยะเวลาที่ได้รับ
3. พฤติกรรมการสูบบุหรี่ของแต่ละคน

ความเสี่ยงจะเพิ่มสูงขึ้น ถ้าบุคคลนั้นตกอยู่ในพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของเรดอนสูงเป็นระยะเวลายาวนาน นอกจากนี้ พฤติกรรมการสูบบุหรี่ของแต่ละคนก็มีผลต่อการเป็นมะเร็งปอด จากการศึกษาพบว่า ผู้ที่สูบบุหรี่ในที่ที่มีปริมาณเรดอนสูงจะมีความเสี่ยงต่อสุขภาพรุนแรงเป็นพิเศษ และในผู้ที่สูบบุหรี่จะมีความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตเนื่องจากเรดอนมากกว่าผู้ที่ไม่สูบบุหรี่ (Bovornkitti, 2000.) จะเห็นได้ว่าการได้รับปัจจัยเสี่ยงหลาย ๆ อย่างร่วมกัน จะทำให้มีความเสี่ยงต่อการเป็นโรคมะเร็งมากขึ้นและเร็วขึ้น โดยอัตราเสี่ยงต่อการเกิดเป็นโรคมะเร็งจะเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว (additive) หรือทวีคูณ (multiplicative effect) ดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1

การประเมินความเสี่ยงเปรียบเทียบเนื่องจากเรดอน

ความเข้มข้น ($pCi\ L^{-1}$)	ตายด้วยมะเร็งปอดสาเหตุจากเรดอน (คน ใน 1,000 คน)	ความเสี่ยงเปรียบเทียบ
200	440 - 770	▶ สูงกว่า 60 เท่าของคนไม่สูบบุหรี่ที่ตายด้วยโรคมะเร็งปอด
100	270 - 630	▶ สูบบุหรี่ 4 ซองต่อวัน ▶ ถ่าย X-ray 20,000 ครั้งต่อปี
40	120 - 380	▶ สูบบุหรี่ 2 ซองต่อวัน
20	60 - 210	▶ สูบบุหรี่ 1 ซองต่อวัน
10	30 - 120	▶ สูงกว่า 5 เท่าของคนไม่สูบบุหรี่
4	13 - 50	▶ ถ่าย X-ray 200 ครั้งต่อปี
2	7 - 30	▶ เท่ากับคนไม่สูบบุหรี่ที่ตายเพราะมะเร็งปอด
1	3 - 13	▶ ถ่าย X-ray 20 ครั้งต่อปี
0.2	1 - 3	

ที่มา: USEPA, EPA-86-004, EPA, 1986.

ถึงแม้ว่า ทบวงการพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของอเมริกา (US EPA) ได้แนะนำให้ใช้มาตรการลดความเข้มข้นของเรดอนในอากาศภายในบริเวณที่พักอาศัย ให้มีค่าต่ำกว่าระดับ 4.0 พิโคคูรีต่อ 1 ลิตรของอากาศ แต่ US EPA ก็ยังเชื่อว่าระดับความเข้มข้นของเรดอนไม่ว่าระดับใดก็ตามย่อมก็ให้เกิดความเสี่ยงอยู่ค่าหนึ่ง ไม่มีระดับเรดอนที่ปลอดภัยจริง แม้ระดับความเข้มข้นของเรดอนที่ต่ำกว่า 4.0 พิโคคูรีต่อลิตร ก็ยังคงมีความเสี่ยงอยู่ระดับหนึ่ง ความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งปอดสามารถลดลงได้ ก็โดยการลดระดับความเข้มข้นเรดอนลงให้อยู่ที่ระดับ 4.0 พิโคคูรีต่อลิตรดังกล่าว เพื่อให้เหมาะสมกับความสามารถของเทคโนโลยีในปัจจุบันและต้นทุนค่าใช้จ่าย

สำหรับผลกระทบต่อสุขภาพ ไม่ได้คิดเฉพาะแค่เรดอน แต่จะรวมไปถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของเรดอนด้วย เนื่องจากเรดอนมีค่าครึ่งชีวิตสั้นจึงเกิดการสลายตัวให้ผลิตภัณฑ์

ตามมาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้นและสลายตัวให้รังสีแอลฟา ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต จากการศึกษา พบว่ามีเพียงโปโลเนียม-214 (7.69 Mev) และโปโลเนียม-212 (8.78 Mev) เท่านั้น ที่สามารถสลายตัวให้รังสีแอลฟาพลังงานสูงพอที่จะผ่านผิวหนังได้ โดยพบว่าโปโลเนียม-214 เป็นสาเหตุของการเกิดโรคมะเร็งผิวหนังของคนงานในเหมือง ส่วนโปโลเนียม-212 ไม่พบมากนัก เพราะเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวของยูเรเนียม-235 ซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ พบได้น้อยมากเมื่อเทียบกับยูเรเนียม-238 แต่เนื่องจากอนุภาคแอลฟามีการสูญเสียพลังงานในอัตรา 1 Mev ต่อเซนติเมตร จึงทำให้โปโลเนียม-212 มีพลังงานไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดมะเร็งที่ผิวหนังได้ในสิ่งแวดล้อมทั่ว ๆ ไปที่ไม่ใช่บริเวณเหมือง อย่างไรก็ตามสำหรับอวัยวะอื่นที่มีเนื้อเยื่อบาง และเป็นอวัยวะภายในซึ่งไม่มีชั้นป้องกันเหมือนผิวหนัง จึงต้องการพลังงานเพียง 5.5 Mev ก็จะสามารถผ่านไปยังผิวหนังที่ไม่หนาได้ประมาณ 40 ไมโครเมตร ดังนั้นธาตุที่เกิดจากการสลายตัวในอนุกรมยูเรเนียม จึงล้วนแล้วแต่มีอันตรายต่อมนุษย์ทั้งสิ้น

ข.2 <u>ผลกระทบของเรดอนต่อสุขภาพ</u>

ในขณะที่มนุษย์ประกอบกิจกรรมใด ๆ อยู่ในอาคาร มนุษย์ได้หายใจนำก๊าซเรดอนเข้าไปในปอด ซึ่งสามารถละลายได้ในเลือด และไหลเวียนผ่านร่างกาย อวัยวะ และเนื้อเยื่อ จนกระทั่งระบายออกผ่านทางปอด หรือผิวหนัง ทำให้เกิดสมดุลขึ้นระหว่างความเข้มข้นของเรดอนที่อยู่ภายนอก และภายใน ซึ่งประมาณการกันว่า ในอากาศแต่ละลิตร จะประกอบด้วยเรดอน 70000 อะตอม ดังนั้น จึงมีการสะสมอยู่ในทางเดินอากาศของเราประมาณ 600000 อนุภาค ทุก ๆ ชั่วโมง (วรวิทย์ รัตนวงษ์ และคณะ, 2547.) และเมื่ออะตอมของเรดอนเกิดการสลายตัว เป็นผลิตภัณฑ์ลูกหลาน พวกมันจะปล่อยรังสีออกมาด้วย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเนื้อเยื่อร่างกายบริเวณใกล้เคียง

ผลกระทบที่มีต่อเนื้อเยื่อในร่างกาย เกิดขึ้นจากการที่พันธะเคมีภายในเซลล์ของเนื้อเยื่อนั้นโดนรังสีแอลฟาทำลาย โดยกระบวนการไอออไนเซชัน (ionization) ซึ่งกระบวนการนี้จะทำลายพันธะในสารพันธุกรรม ซึ่งทำให้เซลล์นั้นตาย หรือเนื้อเยื่อนั้นเติบโตผิดปกติ

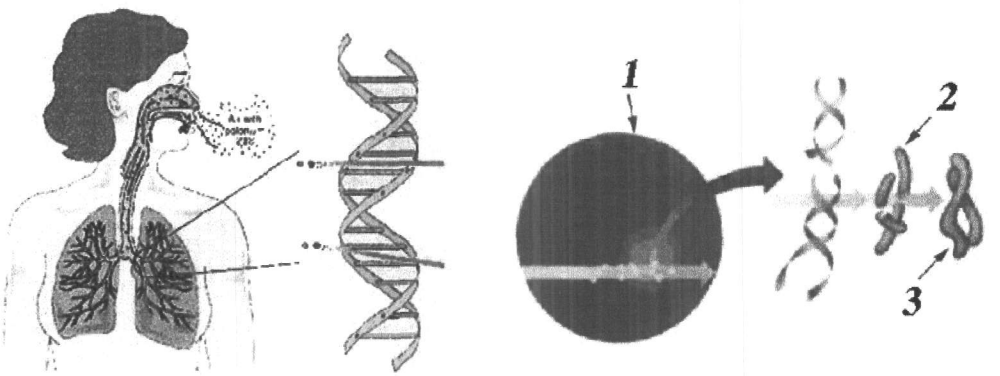
การที่สารพันธุกรรม (DNA) ถูกทำลายโดยกระบวนการ ionizing radiation นี้ คือการที่พันธะเคมีถูกกลุ่มอนุมูลอิสระทำลายทำให้แยกออกจากกัน โดยกลุ่มอนุมูลนี้มาจากการแตกตัวของโมเลกุลของน้ำภายในเซลล์ ซึ่งเซลล์ปกติจะมีน้ำอยู่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเซลล์นั้นได้รับรังสีแอลฟา โมเลกุลของน้ำจะเกิดการแตกตัวได้เป็นอะตอมของไฮโดรเจน (H) และกลุ่มอนุมูล

อิสระ (OH) ซึ่งกลุ่มอนุมูลอิสระนี้เองที่จะกลายเป็นตัวทำลายโมเลกุลของโปรตีน และกรดนิวคลีอิก (nucleic acid) ซึ่งทำให้เกิดการเสียสมดุลทางเคมีภายในเซลล์

โดยปกติแล้วสารพันธุกรรม (DNA) จะถูกทำลายอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความร้อนในร่างกาย หากสายพันธุกรรม (Strands) ถูกทำลายเพียงสายเดียว สายพันธุกรรมนั้นจะถูกซ่อมแซมโดยกระบวนการภายในเซลล์นั้นเอง แต่ถ้าหากสายพันธุกรรมถูกทำลายพร้อมกันสองสาย เซลล์จะไม่สามารถซ่อมแซมได้ ทำให้โครโมโซม (chromosome) เกิดความผิดปกติ อาจทำให้เซลล์นั้นเกิดการแบ่งตัวแบบไม่หยุดกลายเป็นมะเร็งได้

ภาพที่ ข.1

สารพันธุกรรมถูกทำลายโดยการแผ่รังสี



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.

ที่มา: U.S. Environmental Protection Agency. EPA, 1992.

นอกจากนี้หากการถูกรังสีทำลายเกิดขึ้นที่เซลล์สืบพันธุ์ (germ cells เช่น สเปิร์มในผู้ชาย เซลล์ไข่ในผู้หญิง) อาการผิดปกติของเซลล์จะถูกถ่ายทอดไปยังลูกหลานรุ่นต่อไป ก่อให้เกิดอาการผิดปกติได้ แต่ถ้าการถูกทำลายนี้เกิดขึ้นที่เซลล์ร่างกาย (somatic cells) อาการผิดปกติจะเกิดขึ้นเฉพาะบุคคล ไม่ถ่ายทอดไปยังลูกหลาน เคราะห์ดีที่การที่ได้รับรังสีเนื่องจากเรดอน จัดเป็น

การทำลายที่เกิดขึ้นเฉพาะเซลล์ร่างกาย ดังนั้นอาการป่วยต่าง ๆ จึงเกิดขึ้นเฉพาะกับผู้ที่ได้รับรังสีนั้นโดยตรงไม่ถ่ายทอดไปยังลูกหลาน ซึ่งอาการป่วยดังกล่าวอาจมีตั้งแต่วิงเวียนศีรษะ จนถึงเป็นมะเร็งปอดทำให้เสียชีวิตได้ โดยใช้ช่วงเวลาแสดงอาการตั้งแต่ 5 ถึง 50 ปี

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีในอวัยวะภายใน

1. ระบบการย่อยอาหาร เรดอนสามารถเข้าไปสู่ระบบย่อยอาหาร โดยผ่านทางการรับประทาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การรับประทานอาหารหรือน้ำที่มีการปนเปื้อนของเรดอน เช่น ในน้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อนอยู่สูง เมื่อดื่มน้ำนั้นเข้าไป เรดอนจะแพร่กระจายสู่ผนังกระเพาะและลำไส้ จากนั้นจึงเข้าสู่กระแสเลือดในที่สุด แม้ว่าข้อมูลจากการศึกษาในปัจจุบันบ่งชี้ว่าการได้รับเรดอนและผลิตภัณฑ์ของเรดอนทางระบบย่อยอาหารนี้อาจไม่มีอันตราย เนื่องจากมีอาหารอยู่ในกระเพาะทำให้อนุภาคอัลฟาที่ปลดปล่อยออกมาจะหยุดอยู่ที่ผิวของอาหาร แต่ก็ยังไม่สามารถยืนยันได้อย่างแน่ชัด เพราะยังไม่ทราบถึงความสัมพันธ์โดยตรงของการเกิดโรคมะเร็งที่ระบบทางเดินอาหารกับปริมาณเรดอน อย่างไรก็ตาม ก็มีวิธีในการลดปริมาณเรดอนในน้ำที่จะใช้ โดยการนำน้ำไปให้ความร้อน เพราะความสามารถในการละลายของเรดอนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Kenneth Q. Loa, 1990.)

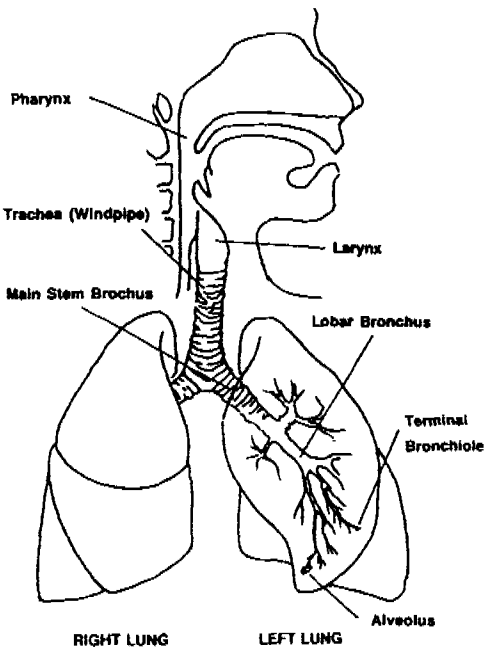
2. ระบบทางเดินหายใจ การหายใจเอาเรดอนเข้าไป เชื่อว่าเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็งในปอดของคนงานในเหมือง เพราะว่า เซลล์ในปอดไม่มีชั้นป้องกัน (protective layer) เหมือนผิวหนัง จากภาพที่ ข.2 แสดงภาพระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ ซึ่งมีความยาวเพียงพอที่จะให้เรดอนเกิดการสลายตัวทำให้ได้รับความเสียหายจากรังสีแอลฟา ก่อนที่จะถูกกำจัดด้วยระบบของร่างกาย ระบบทางเดินหายใจแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1) ส่วนท่อทางเดินอากาศ (Conducting division) โดยเริ่มตั้งแต่ Nasal cavities, Pharynx, Larynx, Trachea, Bronchi จนกระทั่งถึง Bronchioles และ Terminal bronchioles

2) ส่วนที่มีการแลกเปลี่ยนก๊าซ นับตั้งแต่ Respiratory bronchioles, Alveolar duct จนถึง Alveoli หรือถุงลม โครงสร้างเหล่านี้มีผนังบางพอที่จะยอมให้มีการแลกเปลี่ยนก๊าซเกิดขึ้นได้ระหว่างก๊าซถุงลมในปอดกับก๊าซในเส้นเลือดฝอยที่หุ้มอยู่โดยรอบ

ภาพที่ ข.2

ระบบทางเดินหายใจของมนุษย์



ที่มา: Loa, 1990.

ลักษณะของระบบทางเดินหายใจที่กว้างและค่อนข้างยาว ทำให้อนุภาคจากอากาศมีโอกาสที่จะเกาะติดกับเนื้อเยื่อปอดได้ก่อนที่จะมีการหายใจออก

เมื่อร่างกายได้รับรังสีทั้งภายใน และภายนอกทุกอวัยวะทั่วร่างกาย หากร่างกายได้รับรังสีที่มีผลทางรังสีเหมือนกัน ก็จะเกิดมะเร็งหรือให้ผลต่อสารพันธุกรรมที่เหมือนกัน แต่ในความเป็นจริงแล้ว ในอวัยวะที่แตกต่างกัน เมื่อได้รับรังสีชนิดเดียวกัน จะให้ผลที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีแฟคเตอร์ที่แตกต่างกันในแต่ละอวัยวะ