บทที่ 2

ทฤษฎีเกี่ยวกับรังสีและผลของรังสีต่อวัตถุ

ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาพลังงานปรมาณูมาใช้ในทางสันติกันอย่างกว้างขวาง เป็นต้นว่าในทางการแพทย์ ก็ไปใช้ในด้านการวินิจฉัยและบำบัดรักษาโรคภัยไข้เจ็บต่างๆ ในทางเกษตรก็ใช้ไปในทางการพัฒนาที่ดินให้เหมาะแก่การเพาะปลูกพืชไร่ ทางด้านอุตสาหกรรมก็เริ่มเล็งเห็นผลประโยชน์และความคุ้มค่าในการลงทุนที่จะนำเอาพลังงานปรมาณูมาใช้ให้เป็นประโยชน์ ในการเพิ่มผลผลิตทางอุตสาหกรรมมากยิ่งๆขึ้น

2.1 กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)

กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) หมายถึงพลังงานที่ปลดปล่อยออกจากนิวเคลียสที่ไม่เสถียรของอะตอมบางชนิดออกมาในรูปอนุภาคต่างๆ หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอาจเรียกว่า รังสี

2.2 ชนิดของรังสี

รังสีแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

2.2.1 รังสีแอลฟา (alpha rays) เป็นนิวเคลียสของธาตุฮีเลียม ($^{4}_{2}He$) อนุภาคแอลฟาจะสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วในวัสดุสิ่งของที่มันทะลุผ่านไป วัสดุสิ่งของใดๆที่มีความหนาเพียงเล็กน้อยแค่เศษส่วนของหนึ่งมิลลิเมตรก็เพียงพอในการหยุดยั้งการเดินทางของมันได้ เช่น แผ่นยางบางๆ แผ่นกระดาษแข็ง อนุภาคแอลฟาโดยปกติแล้วถ้าอยู่ภายนอกร่างกายอันตรายจากรังสีก็จะไม่มี เว้นไว้แต่ว่าถ้ามีพลังงานสูง อนุภาคแอลฟาก็จะสามารถทะลุทะลวงชั้นใต้ผิวหนังได้ (basal layer of the skin)

2.2.2 รังสีเบตา(beta rays)เป็นอิเลกตรอนอิสระ อนุภาคเบตาคายพลังงานไม่เร็ว อำนาจการทะลุทะลวงสูงกว่าของอนุภาคแอลฟา ที่พลังงาน 0.5 MeV ผ่านอากาศไปได้ 1เมตร และที่พลังงาน 3 MeV ผ่านอากาศไปได้ 10 เมตร แต่ถ้าเดินทางในตัวกลางของวัสดุที่ค่อนข้างหนาแน่นความสามารถในการเดินทางของมันจะลดลงมาก ลำกระแสรังสีเบตาในการผ่านวัสดุจะเป็นแบบใกล้เคียงกับ exponential คือลดลงอย่างรวดเร็วที่ผิวหน้าของวัสดุที่ใช้ในการขวางกั้นรังสีเบตาโดยปกติแล้วความหนาของตัวกลางจะแสดงในรูปของความหนาสมมูล

(equivalent thickness)มีหน่วยเป็น mg/cm^2 วัสดุที่มีเลขมวลน้อยกว่า 30 ความสามารถในการขวางกั้นหยุดยั้งอนุภาคเบตาในหน่วย mg/cm^2 เกือบจะเท่ากับ perspex,อะลูมิเนียม,แผ่นยางหนา ตัวกลางเหล่านี้เหมาะสำหรับในการขวางกั้นรังสีเบตาเช่น perspex หนา 1/4 นิ้ว กั้นรังสีเบตาพลังงาน 1 MeV ได้ ถ้าหนา 1 นิ้วก็จะกั้นรังสีเบตาได้ถึง 4 MeV เมื่อวัสดุสิ่งของได้รับอนุภาคเบตาที่มีพลังงานสูงพุ่งชนเข้าใส่จะก่อให้เกิดรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) ที่เรียกว่า bremsstrahlung ซึ่งจะมีพลังงานตั้งแต่ศูนย์ถึงพลังงานสูงสุดของอนุภาคเบตา และมีอำนาจทะลุทะลวงสูงมากกว่าอนุภาคเบตาเสียอีก การจะเกิด bremsstrahlung เกือบจะเป็นสัดส่วนกำลังสองของเลขมวลของวัสดุที่ใช้มาทำเป็นที่ขวางกั้นมันต่อพลังงานของรังสีเบตา ด้วยเหตุนี้เองในการขวางกั้นรังสีเบตาจึงนิยมใช้วัสดุที่มีเลขมวลต่ำ ซึ่งจะมีเปอร์เซนต์น้อยมากในการก่อให้เกิด bremsstrahlung ต้นกำเนิดรังสีความเข้มข้นสูงที่ให้เบตามีพลังงานสูงจะทำให้มี bremsstrahlung เกิดขึ้นโดยประมาณ 1% ของความแรงรังสีเบตา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวัสดุที่มีเลขมวลน้อยลงมาทำเป็นฉากขวางกั้นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย

2.2.3 รังสีแกมมา (gamma radiation) รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอำนาจการทะลุทะลวงผ่านวัสดุสูง และสามารถเดินทางได้ไกลในวัสดุต่างๆ การจะหยุดยั้งมันนั้นกระทำได้ในลักษณะของปฏิกิริยาดังนี้

2.2.3.1 Photo-electric effect

รังสีแกมมา(photon) จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมของวัสดุที่ขวางกั้นมัน (absorbing material) อิเลกตรอนในวงโคจร (orbital electron) ปกติแล้วจาก K shell จะพุ่งออกไปด้วยความเร็วสูงโดยที่ได้รับพลังงานจากรังสีแกมมามากเกินพอ ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญในกรณีที่วัสดุมีเลขมวลสูงและรังสีแกมมามีพลังงานต่ำ ระดับพลังงานที่พอเหมาะสำหรับปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับธาตุที่ใช้ซึ่งมีช่วงพลังงานจาก 2-3 keV สำหรับวัสดุที่มีเลขมวลต่ำๆ ถึง 120 keV สำหรับวัสดุที่มีเลขมวลสูงๆ

2.2.3.2 Compton effect

รังสีแกมมาพุ่งเข้าชนกลุ่มของ atomic electro ที่จับตัวกันอย่างหลวมๆ แล้วคายพลังงานบางส่วนให้กับ electron ตัวที่ถูกชนกระแทกหลุดออกไป การชนแบบนี้บางทีก็เรียกว่าเป็นการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision)แล้วเสียพลังงานบางส่วน รังสีแกมมาจะพุ่งไปยังทิศทางใหม่ ปฏิกิริยานี้จะเป็นปฏิกิริยาที่รุนแรงในช่วงพลังงาน 1 - 5 MeV ในวัสดุที่มีเลขมวลสูงและ

เป็นปฏิกิริยาสำคัญเพียงอย่างเดียวในวัสดุที่มีเลขมวลต่ำ

2.2.3.3 Pair production

รังสีแกมมาที่มีพลังงานมากกว่า 1 MeV อาจถูกดูดกลืนเข้าไปในสนามของนิวเคลียสของอะตอมวัสดุที่ขวางกั้นเมื่อเกิดการดูดกลืนของพลังงานแล้วก่อให้เกิด positron-electron pairs ขึ้น ระดับพลังงานที่พอเหมาะในการก่อให้เกิดปฏิกิริยานี้ จะต้องมีพลังงานเป็น 2 เท่าของมวลอิเลกตรอนขณะหยุดนิ่งๆ (rest mass of the electron) คือ 1.02 MeV pair production จะเกิดมากเมื่อ photon energy เพิ่มขึ้น ถ้า photon ตัวเดิมยังมีพลังงานเหลือจะชนอิเลกตรอนตัวอื่นเกิด photo-electric effect และ comton effect ก็ได้ positron จะยังคงอยู่เป็นเวลาสั้นๆแล้วมันจะรีบรวมตัวกันกับ negative electron การรวมกันนี้จะปรากฏมีพลังงานออกมาเท่ากับการแบ่ง photon ออกมาเท่าๆ กัน คือ 1.02/2 MeV หรือ 0.51 MeV

2.2.4 รังสีเอ็กซ์ (X-rays)

รังสีเอ็กซ์เป็นรังสีที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูงในรูปของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดขึ้นเมื่ออิเลกตรอนในวงโคจรด้านใน (inner orbital elrctrons) ของอะตอมที่ถูกกระตุ้น (excited atom) กลับเข้าสู่สภาวะปกติของมัน หรืออาจเกิดจากเป้าของโลหะถูกระดมยิงด้วยอิเลกตรอนความเร็วสูง (high speed electron) ก็จะทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์ได้

2.2.5 นิวตรอน (neutron)

นิวตรอน เป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้าดังนั้นจึงมีอำนาจทะลุทะลวงสูงเพราะไม่ถูกสนามไฟฟ้าในวงโคจรของอิเลกตรอนหรือโปรตรอนดูดหรือผลัก ฉะนั้นการลดลำอนุภาคนิวตรอนก็จะต้องลดระดับพลังงานของมันให้น้อยลงในระดับหนึ่งก่อน แล้วจึงค่อยหยุดยั้งด้วยสิ่งอื่นที่เหมาะสมต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 หน่วยทางรังสี (Radiation Units)[4,5]

หน่วยของรังสีมีดังต่อไปนี้

ปริมาณ	หน่วยเดิม	หน่วยใหม่ (SI unit)
กัมมันตภาพรังสี	คูรี (Ci)	เบคเคอเรล (Bq)
รังสีดูดกลืน	แรด (rad)	เกรย์ (Gy)
รังสีเผยผึ่ง	เรินท์เกน (R)	คูลอมบ์ต่อกิโลกรัม (C/kg)
รังสีสมมูลย์	เรม (rem)	ซีเวิร์ต (Sv)

จากการกำหนดหน่วยของปริมาณต่างๆดังกล่าวมา การวัดรังสีเพื่อกำหนดปริมาณซึ่งเป็นที่ยอมรับและเปรียบเทียบผลกันได้โดยอาศัยการวัดค่าพื้นฐานตามคำจำกัดความของแต่ละหน่วย

2.3.1 ความแรงรังสี

การเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ ยังผลให้เกิดการแผ่รังสีหรืออนุภาคที่มีพลังงานเกิดขึ้น กัมมันตรังสีนี้จึงเป็นแหล่งกำเนิดรังสีชนิดหนึ่งในหลายชนิด การวัดปริมาณกัมมันตรังสีไม่อาจทำได้โดยการชั่งน้ำหนักหรือตวงวัดได้เพราะธาตุกัมมันตรังสีจะปนอยู่กับธาตุอื่นเสมอ แม้แต่เมื่อทำการแยกให้บริสุทธิ์แล้วเมื่อเวลาผ่านไปการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวก็จะทำให้เกิดธาตุใหม่ขึ้น ดังนั้นปริมาณกัมมันตภาพรังสีในขณะใดขณะหนึ่งจึงวัดได้โดยวัดรังสีที่เกิดขึ้นในขณะนั้น ซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ มีการกำหนดว่าธาตุเรเดียมหนัก 1 กรัม มีความแรงรังสีเท่ากับ 3.7×10^{10} disintegrationpersecond (dps) เรียกว่า 1 คูรี (Ci)

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$$

ต่อมาเมื่อมีการใช้ SI unit หน่วยของกัมมันตรังสีจึงกำหนดเป็น s^{-1} แต่ให้ใช้ชื่อเฉพาะว่า เบคเคอเรล (Bq) ดังนั้น $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ และ $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ Bq ปริมาณกัมมันตรังสีจะมีผลเมื่อเข้าสู่ร่างกายเพราะรังสีที่เกิดขึ้นนั้นจะถูกดูดกลืนในอวัยวะ และเนื้อเยื่อของร่างกายมากที่สุดโดยเมื่อการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์นั้นให้อนุภาคแอลฟาหรือเบตาเพราะอนุภาคทั้งสองเป็นอนุภาคที่มีพิสัยต่ำ แน่นอนว่าจะต้องถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดให้อวัยวะและเนื้อเยื่อในร่างกาย ทำให้เกิดอันตรายมากที่สุด

2.3.2 ปริมาณรังสีดูดกลืน (Absorbed dose)[6,7]

ผลของรังสีต่อวัตถุต่างๆ บางอย่างที่สามารถสังเกตุเห็นได้ เช่น การที่แก้วหรือพลาสติกเปลี่ยนสีเมื่อนำไปฉายรังสีเป็นเพราะเนื้อแก้วดูดกลืนพลังงานรังสีไว้ แต่รังสีแต่ละชนิดมีความสามารถทะลุผ่านวัตถุได้ไม่เท่ากันและถ่ายเทพลังงานรังสีให้กับวัตถุแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นผลของรังสีต่อวัตถุจึงแปรผันตามปริมาณพลังงานรังสีที่วัตถุนั้นดูดกลืนไว้ ตัวอย่างเช่นรังสีแอลฟาและรังสีเบตาจะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับวัตถุในระยะทางจากผิวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โฟตอนพลังงานต่ำๆก็เช่นกัน ผลก็คือจะทำให้เกิดรอยไหม้ที่ผิวหนัง ถ้าเป็นโฟตอนพลังงานสูงหรือนิวตรอน พลังงานบางส่วนอาจทะลุออกไปจากวัตถุ บางส่วนของพลังงานถูกดูดกลืนไว้

หน่วยของ absorbed dose เดิมใช้ rad (radiation absorbed dose) ซึ่งเท่ากับพลังงานรังสีที่ถูกดูดกลืน 100 ergs ในมวล 1 g หรือ 1 rad = 100 ergs/g

ในปัจจุบันหน่วยของ SI unitซึ่งใช้หน่วยใหญ่คือ MKS เป็นมาตรฐานให้หน่วยของ absorbed dose จากหน่วยของพลังงานเป็นจูล(Joule) และหน่วยของมวลเป็นกิโลกรัม โดยใช้ชื่อเฉพาะว่า เกรย์ (Gy)

1 Gy = 1 J/Kg = 100 rads

2.3.3 ปริมาณรังสีเผยผึ่ง (Exposure dose)

exposure dose เป็นปริมาณรังสีที่ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับผลของรังสีเพราะเพียงแต่วัดว่ามีการแตกตัวของอากาศมากน้อยเพียงใด การวัด exposure dose เป็นที่นิยมเพราะเป็นวิธีที่มีความไวสูงและสามารถวัดค่าได้ถูกต้องมากด้วยเทคนิคในปัจจุบัน exposure dose (X)คือ dQ/dm เมื่อ dQ เป็นประจุในอากาศซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก secondary electrons กำเนิดจาก photon ในมวล dm ของอากาศหน่วยเดิมของ exposure dose คือเรินท์เกน (R) ซึ่งเท่ากับปริมาณรังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัวให้ประจุ 1 esu. ในอากาศแห้ง 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ NTP หรืออากาศมวล 1.293×10^{-3} กรัมปัจจุบันหน่วย SI ใช้เป็นคูลอมบ์ต่อกิโลกรัม (C/Kg) โดยที่ 1 เรินท์เกนเท่ากับ 2.58×10^{-4} คูลอมบ์ต่อกิโลกรัม

2.3.4 ปริมาณรังสีสมมูล (Dose Equivalent)

Dose Equivalent เป็นหน่วยที่นำเอาผลทางชีววิทยาเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างปริมาณ Absorbed dose เท่าๆกันของรังสีหลายชนิด ปรากฏว่าความรุนแรงของผลของรังสีขึ้นอยู่กับค่า Linear

Energy Tranfer (LET) กล่าวคือ รังสีที่ถ่ายเทพลังงานต่อหน่วยระยะทางที่ผ่านไปในวัตถุมาก ก็มีผลทางชีววิทยามาก เมื่อกำหนดให้ผลทางชีววิทยาแปรผันตามค่า Quality Factor (QF) ปรากฏผลความสัมพันธ์ดังนี้

LET	QF
Kev per micron in water	
3.5 (and less)	1
7	2
23	5
53	10
175 (and above)	20

ตัวอย่างของรังสี กับ QF เป็นดังนี้

X-rays and gamma rays	1
Beta - rays and electron of energy > 0.03 Mev.	1
Beta - rays and electron of energy < 0.03 Mev.	1
Thermal neutrons	2.3
Fast neutrons and protons	10
Alpha rays and heavy ion	20

หน่วยเดิมของ dose equivalent เรียกว่า rem (radiation effect man) มีค่าเท่ากับ Absorbed dose (rad) X QF ในปัจจุบันหน่วย dose equivalentใน SI unit ใช้ว่าซีเวิร์ต (Sv) มีค่าเท่ากับ Absorbed dose (Gy) X QF ดังนั้น 1 Sv = 100 rem แต่หน่วย Sv เป็นหน่วยใหญ่ ค่าปริมาณรังสีส่วนมากจะเป็น มิลลิซีเวิร์ต (mSv)

2.3.5 การลดลงของรังสีเมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้น

เมื่อทราบ exposure rate ที่ระยะใดระยะหนึ่ง หากต้องการทราบ exposure rate ที่ระยะทางอื่นๆในอากาศ exposure rate จะเป็นส่วนกลับกับระยะทางยกกำลังสองดังสูตรต่อไปนี้

$$X_2 = X_1 d_1^2/d_2^2$$

เมื่อ X_1 เป็น exposure rate ที่ระยะทาง d_1
และ X_2 เป็น exposure rate ที่ระยะทาง d_2

2.4 ระบบในการวัดปริมาณรังสี[5] (Measurement of Absorbed Dose) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบคือ

2.4.1 Primary Reference System เป็นระบบการวัดปริมาณรังสีโดยอาศัยวิธีการวัดผลที่เกิดจากรังสีโดยตรงในรูปของปริมาณความร้อน การแตกตัวของก๊าซ หรือ chemical yield

2.4.1.1 Calorimetric Dosimeter

อาศัยการวัดปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในวัตถุซึ่งมีค่าเท่ากับ ผลคูณของความร้อนจำเพาะของวัตถุกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

2.4.1.2 Ionization chamber

โดยการวัดปริมาณการแตกตัวเนื่องจากรังสีของแก๊สในปริมาตรหนึ่ง และทราบค่าพลังงานรังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัว ซึ่งเท่ากับ 33.7 จูลล์ต่อคูลอมบ์ดังนั้นพลังงานรังสีที่ถูกดูดกลืนในก๊าซเท่ากับผลคูณของจำนวนอิออนที่เกิดขึ้น และค่าพลังงานรังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัวทั้งนี้ต้องทำให้หน่วยของค่าต่างๆสอดคล้องกันด้วย

$$\text{Absorbed dose in air (Gy)} = 33.7\ X$$

เมื่อ 33.7 มีหน่วยเป็น $J.C^{-1}$

X มีหน่วยเป็น $C.Kg^{-1}$

และ Gy เท่ากับ $J.Kg^{-1}$

2.4.1.3 Chemical Dosimeter[7]

เมื่อวัตถุได้รับพลังงานจากรังสี อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในเนื้อวัตถุนั้น ปฏิกิริยาเคมีบางอย่างไม่ซับซ้อนนักสามารถหาค่าที่ต้องการได้ จึงถูกนำมาใช้วัดปริมาณรังสี อาทิเช่น Fricke Dosimeter (Ferrous Sulfate), Ceric-Cerous sulfate Dosimeter เป็นต้น

2.4.2 Rountine Transfer System

เป็นระบบการวัดปริมาณรังสี ที่ไม่ได้วัดค่าพลังงานรังสีโดยตรงใช้วิธีวัดเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานซึ่งหาได้จากระบบในข้อ 2.4.1 แต่เป็นระบบที่มีค่าความแม่นยำดี การใช้สะดวกจึงสามารถใช้เปรียบเทียบการวัดปริมาณรังสีระหว่างห้องปฏิบัติการวัดปริมาณรังสีได้ อาทิเช่น d-alanine system และ radiochromic dye film

2.4.3 Routine In-house System

เป็นระบบการวัดปริมาณรังสีเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานเช่นเดียวกับข้อ 2 อาจเป็น dosimetrer ที่ค้นคว้าขึ้นเอง สามารถเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ จะต้องคำนึงถึงความถูกต้องเทียบกับมาตรฐานเสมอ

2.5 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีผ่านสสาร[8,9]

เมื่อรังสีไม่ว่าจะเป็นประเภทใดก็ตามผ่านเข้าไปในสสาร จะถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมหรือโมเลกุลในตัวกลางนั้นและเป็นผลให้อะตอมหรือโมเลกุลของตัวกลางดังกล่าวเกิดการแตกตัว (ionization) เป็นอิออนบวกและลบหรือถูกกระตุ้นให้อยู่ในสภาพถูกกระตุ้น(excitation)คืออะตอมหรือโมเลกุลที่มีระดับพลังงานสูงกว่าระดับพลังงานสภาวะพื้นฐาน(groundstate) เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในสภาวะดังกล่าวข้างต้นเกิดขึ้นแล้วอะตอมและโมเลกุลดังกล่าวมีความไวต่อปฏิกิริยามากอาจจะเข้ารวมตัวกันเองหรือไปทำปฏิกิริยากับอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดต่อไป การศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของอะตอมหรือโมเลกุลในสภาวะดังกล่าวข้างต้น จึงเป็นเรื่องสำคัญมากในการศึกษาด้านเคมีรังสี

2.5.1. ปฏิกิริยาของอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในรูปของอิออนหรืออยู่ในรูปสภาวะถูกกระตุ้น

ปฏิกิริยาเคมีของอะตอมหรือโมเลกุลดังกล่าว เขียนในรูปของสมการเคมีเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ

2.5.1.1 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากอิออน

2.5.1.1.1 ปฏิกิริยา neutralization by electron or negative ion ตัวอย่างเช่น

$$CH_4^+ + e^- \longrightarrow (CH_4)^*$$

$$(C_2H_6)^+ + e^- \longrightarrow C_2H_4 + H_2$$

$$(CH_4)^+ + (CH_4)^- \longrightarrow (CH_4)^* + CH_4$$

2.5.1.1.2 ปฏิกิริยา Charge transfer

$$A^+ + B \longrightarrow A + B^+$$

ดังอย่างเช่น

$$He^+ + Ne \longrightarrow He + Ne^+$$

2.5.1.1.3 ปฏิกิริยา ion-molecule

$$A^+ + B \longrightarrow C^+ + D$$

ตัวอย่างเช่น

$$H_2^+ + O_2 \longrightarrow H_2O_2^+ + H\cdot$$

2.5.1.1.4 ปฏิกิริยา electron capture

$$A + e^- \longrightarrow A^-$$

ตัวอย่างเช่น

$$I_2 + e^- \longrightarrow I^- + I\cdot$$

2.5.1.2 ปฏิกิริยาที่เกิดจากอะตอมหรือโมเลกุลในสภาวะถูกกระตุ้น

2.5.1.2.1 ปฏิกิริยา radiative or nonradiative conversion to the ground state no chemical change

$$A^* \longrightarrow A$$

ตัวอย่างเช่น

$$(CH_4)^* \longrightarrow CH_4$$

2.5.1.2.2 ปฏิกิริยา nonradiative energy transfer

$$A^* + B \longrightarrow A + B^*$$

ตัวอย่างเช่น

$$(CH_4)^* + CH_4 \longrightarrow CH_4 + (CH_4)^*$$

2.5.1.2.3 ปฏิกิริยา dissociation into free radical

$$A^* \longrightarrow R\cdot + S\cdot$$

ตัวอย่างเช่น

$$(CH_3COCH_3)^* \longrightarrow CH_3CO\cdot + \dot{C}H_3$$

2.5.1.2.4 ปฏิกิริยา electron transfer

$$A^* + B \longrightarrow A^+ + B^- \text{ (หรือ } A^- + B^+\text{)}$$

ตัวอย่างเช่น

$$D^* + Fe^{2+} \longrightarrow \dot{D}^- + Fe^{3+}$$

D เป็นโมเลกุลของ methylene blue

2.5.1.2.5 ปฏิกิริยา hydrogen abstraction

$$A^* + RH \longrightarrow AH^{\cdot} + R^{\cdot}$$

ตัวอย่างเช่น

$$Q^* + CH_3CH_2OH \longrightarrow \dot{Q}H + CH_3\dot{C}HOH$$

Q เป็นโมเลกุลของ quinone

2.5.1.2.6 ปฏิกิริยา addition

$$A^* + B \longrightarrow AB$$

ตัวอย่างเช่น

$$SO^*_2 + R\text{-}CH{=}CH_2 \longrightarrow R\text{-}\dot{C}H\text{-}CH_2\text{-}\dot{S}O_2$$

$$R\text{-}\dot{C}H\text{-}CH_2\text{-}\dot{S}O_2 \longrightarrow R\text{-}CH{=}CH\text{-}SO_2H$$

จากปฏิกิริยาของอิออนหรือโมเลกุลที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าในบางปฏิกิริยาเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามาก และมีบทบาทสำคัญต่อการศึกษาด้านเคมีรังสี

2.5.2 <u>ปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ</u>

2.5.2.1 ปฏิกิริยา rearrangement

$$AB^{\cdot} \longrightarrow BA^{\cdot}$$

ตัวอย่างเช่น

$$Ph_3C\text{-}\dot{C}H_2 \longrightarrow Ph_2\dot{C}\text{-}CH_2Ph$$

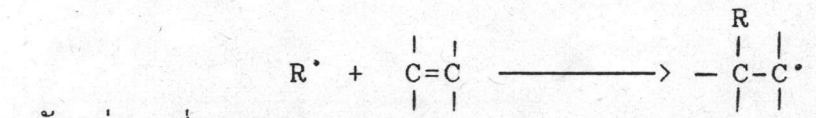
2.5.2.2 ปฏิกิริยา dissociation

$$AB^{\cdot} \longrightarrow A^{\cdot} + B$$

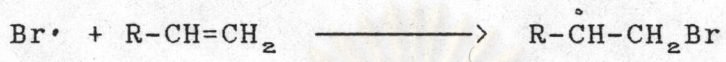
ตัวอย่างเช่น

$$Br_2CH\text{-}\dot{C}HBr \longrightarrow Br^{\cdot} + BrCH{=}CHBr$$

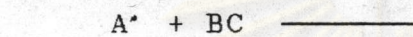
2.5.2.3 ปฏิกิริยา addition



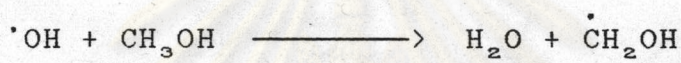
ตัวอย่างเช่น



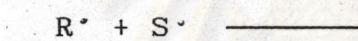
2.5.2.4 ปฏิกิริยา abstraction



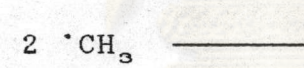
ตัวอย่างเช่น



2.5.2.5 ปฏิกิริยา combination

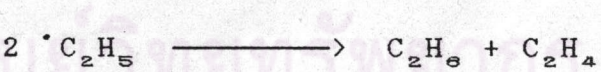


ตัวอย่างเช่น

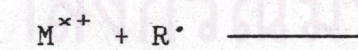


2.5.2.6 ปฏิกิริยา disproprotionation

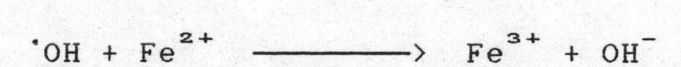
ตัวอย่างเช่น



2.5.2.7 ปฏิกิริยา electron transfer



ตัวอย่างเช่น



2.6 ผลของรังสีที่มีต่อน้ำ

เนื่องจากน้ำเป็นตัวกลางสำคัญในสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย และน้ำยังเป็นตัวกลางหรือตัวทำละลายในขบวนการทางเคมีหรือขบวนการทางชีวะ ดังนั้นจึงมีการศึกษาเคมีรังสีของน้ำอย่างกว้างขวางว่า เมื่อรังสีผ่านเข้าในน้ำแล้วเกิดอะไรขึ้น

ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อรังสีผ่านเข้าไปในน้ำก็จะทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการแตกตัวเป็นอิออน หรือโมเลกุลอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นซึ่งจะเกิดขึ้น

018091

ภายในช่วงเวลาประมาณ 10^{-18} ถึง 10^{-13} วินาที ภายหลังที่รังสีผ่าน และสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$H_2O \longrightarrow H_2O^+, e^-, H_2O^*$$

อิเลกตรอน (e^-) เมื่อเกิดขึ้นมาแล้วก็จะสูญเสียพลังงานโดยการชนกับอะตอมหรือโมเลกุลรอบๆจนกระทั่งพลังงานถึงระดับที่เรียกว่า thermal energy (0.025 eV) อิเลกตรอนนั้นก็จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำ ซึ่งจะเรียกอิเลกตรอนนี้ว่า Solvated electron มีสัญญลักษณ์ว่า e_{aq}^- ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นประมาณ 10^{-11} วินาทีหลังจากที่รังสีผ่าน อาจเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$e^- + nH_2O \longrightarrow e_{aq}^-$$

อิออนบวก (H_2O^+) เมื่อเกิดขึ้นจะไม่อยู่ตัวจะสลายตัวกลายเป็น H^+ และ OH ภายในเวลา 10^{-13} วินาทีหลังจากรังสีผ่านซึ่งอาจเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$H_2O^+ \longrightarrow H^+ + {}^{\cdot}OH$$

หรือ

$$H_2O^+ + H_2O \longrightarrow H_3O^+ + {}^{\cdot}OH$$

โมเลกุลที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (H_2O^*) เมื่อเกิดขึ้นจะไม่อยู่ตัวเช่นเดียวกันกับ H_2O^+ จะสลายตัวให้ $H^{\cdot}$ และ ${}^{\cdot}OH$ และเกิดขึ้นภายในเวลา 10^{-13} วินาทีหลังจากรังสีผ่าน และสามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$H_2O^* \longrightarrow H^{\cdot} + {}^{\cdot}OH$$

ถ้าพิจารณาถึง e_{aq}^-, ${}^{\cdot}H$, ${}^{\cdot}OH$ และ H_3O^* จะเกิดขึ้น ณ บริเวณรังสีผ่าน ดังนั้นจึงมีโอกาสที่สามารถจะทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกันได้มาก และสามารถจะเขียนสมการแสดงถึงปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$^{\cdot}H + {}^{\cdot}OH \longrightarrow H_2O$$

$$e^-_{aq} + {}^{\cdot}OH \longrightarrow OH^-$$

$$e^-_{aq} + e^-_{aq} \longrightarrow H_2 + 2OH^-$$

$$H^{\cdot} + H^{\cdot} \longrightarrow H_2$$

$$^{\cdot}OH + {}^{\cdot}OH \longrightarrow H_2O_2$$

$$e^-_{aq} + H_3O^+ \longrightarrow H_3O^{\cdot}$$

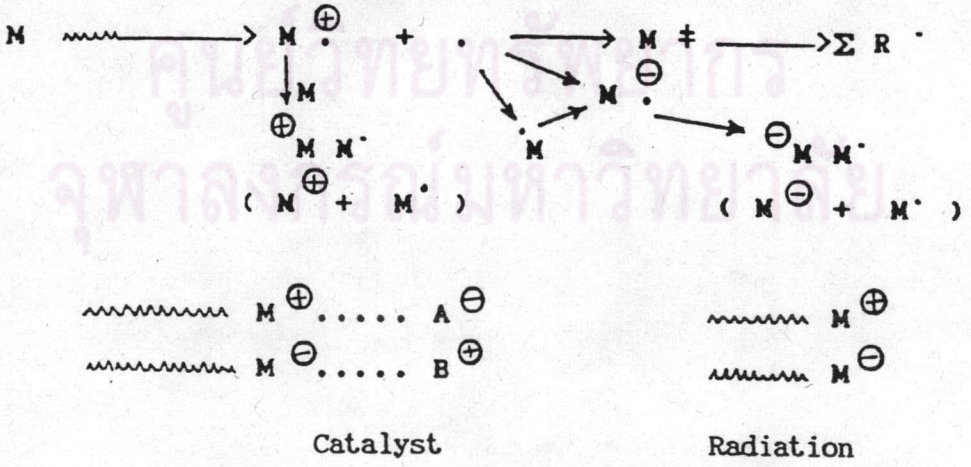
ปฏิกิริยาทั้งหมดนี้จะเกิดขึ้นประมาณ 10^{-8} วินาทีหลังจากรังสีผ่าน ดังนั้นเมื่อรังสีผ่านเข้าไปในน้ำ หลังจาก 10^{-8} วินาทีก็จะเกิดผลิตผลหลายชนิดดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งรวมเรียกว่า primary species โดยสามารถเขียนในรูปของสมการสรุปได้ดังนี้

$$H_2O \longrightarrow e^-_{aq},\ ^{\cdot}H,\ {}^{\cdot}OH,\ H_2,\ H_2O_2 \text{ และ } H_3O^+$$

และ primary species เหล่านี้จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อไปอีกขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีที่น้ำเป็นตัวกลางอยู่

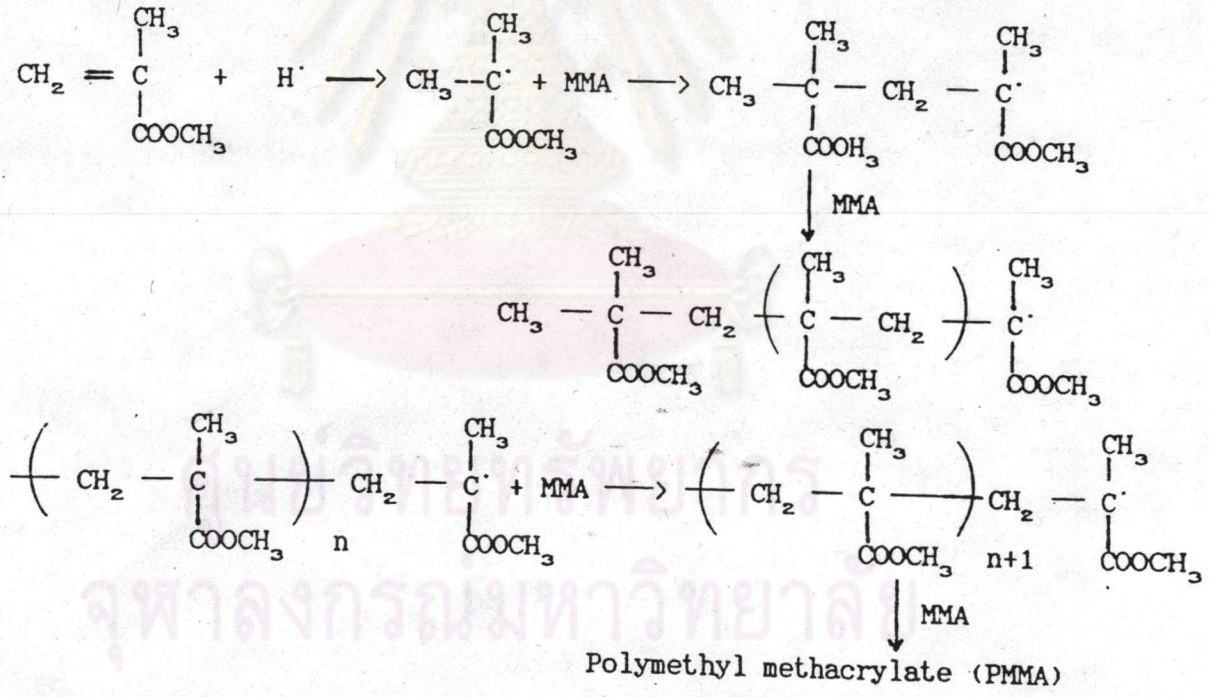
2.7 ผลของรังสีที่มีต่อโมโนเมอร์[10.11.12.13]

เมื่อรังสีกระทำต่อระบบของโมโนเมอร์จะเกิดพวกกลุ่มกัมมันต์ (active species) ต่างๆ ขึ้นหลายชนิด เช่นเกิดอนุมูล อิออนบวก อิออนลบ ดังต่อไปนี้



ในการเกิดปฏิกิริยา polymerization จะเริ่มจากกลุ่มกัมมันต์ (Active species) เช่นกลุ่มอนุมูล อิออนอนุมูล อิออนบวก อิออนลบ โมเลกุลที่ถูกกระตุ้น เป็นต้น ซึ่งกลไกต่างๆที่จะตามมาจะขึ้นอยู่กับสถานะเงื่อนไขต่างๆเช่น สถานะของระบบธรรมชาติของโมโนเมอร์ อุณหภูมิของการ polymerization และผลจากตัวที่ผสมเข้าไป

สำหรับเมทิลเมทาคริเลต (MMA) เมื่อถูกฉายรังสีแกมมาจะเกิดอนุมูลโพลีเมอร์ไรเซชันโดยโมโนเมอร์และอนุมูลอิสระจะต่อกันเป็นลูกโซ่ให้ยาวขึ้นแบบหัวต่อหาง (head-to-tail growth) อิเลกตรอนเดี่ยวของอนุมูลจะไปสร้างแขนยึด C-C (bond) ที่ตำแหน่งแขนยึดคู่ของโมโนเมอร์ตามขั้นตอนกลไกปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ดังต่อไปนี้



2.8 ผลของรังสีที่มีต่อโพลีเมอร์ที่เกิดการครอสลิงก์ขึ้น

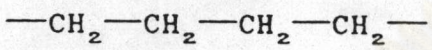
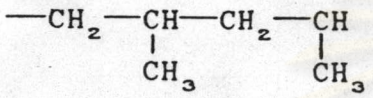
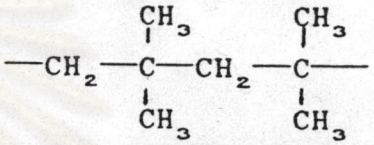
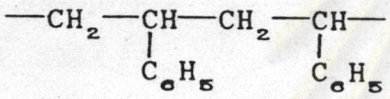
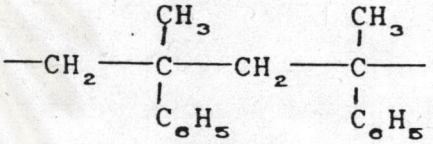
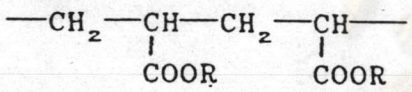
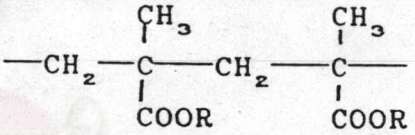
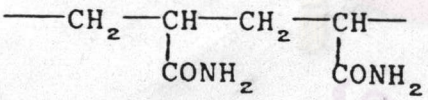
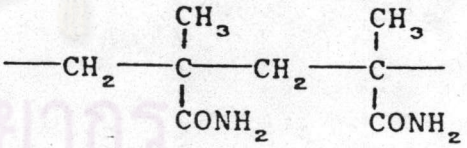
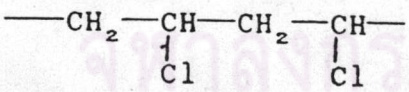
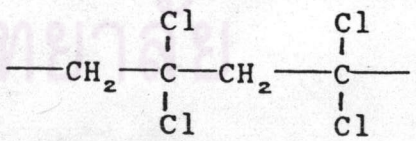
เมื่อสายโพลีเมอร์ถูกรังสีไอโอไนซ์จะเกิดผลขึ้นสองอย่างคือ การเกิดสายโซ่โพลีเมอร์เกาะกัน (Crosslinking) และการเกิดสภาพการขาดออกของสายโซ่โพลีเมอร์ (Degradation) ในการเกิด Crosslinking เกิดการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลและเกิดร่างแหหลายมิติขึ้น แต่ในการเกิด degradation น้ำหนักโมเลกุลจะลดลงโอกาสในการเกิดสภาวะแต่ละอย่างนั้นแยกกันไม่มีกฎตายตัว แต่อย่างไรก็ตามพอจะแยกกลุ่มของโพลีเมอร์เป็นสองกลุ่มตามตาราง ซึ่งจะเห็นว่าโพลีเมอร์กลุ่มที่ 1 จะเกิด Crosslink โดยรังสี และโพลีเมอร์ในกลุ่มที่ 2 จะเป็นพวกที่เกิด Degradation เป็นโมเลกุลเล็ก

เมื่อ Polymer กลุ่มที่ 1 ถูกรังสีไอโอไนซ์จะเกิดโครงข่ายขึ้น ณ จุดที่สภาวะโครงข่ายเริ่มเกิดการไม่ละลายเป็นครั้งแรกเรียกว่าจุดเจล(gel point) และปริมาณรังสีที่มีขนาดทำให้เกิดจุดเจลเรียกว่า เจลโดสส์(gelling dose)

ถ้าในสภาวะที่โครงข่ายบางส่วนเกิดสภาพเจลแล้ว แต่ยังมีบางส่วนยังสามารถละลายได้ จะเรียกว่าโซล (sol)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลของรังสีต่อโพลีเมอร์

Group 1 Cross-linking Polymer	Group 2 Degrading Polymer
Polyethylene 	
Polypropylene 	Polyisobutylene 
Polystyrene 	Poly-methylstyrene 
Polyacrylates 	Polymethacrylates 
Polyacrylamide 	Polymethacrylamide 
Polyvinyl chloride 	Polyvinylidene chloride 
Polyamides; Polyesters; Polyvinylpyrolidone; Natural rubber; Polysiloxanes Polyvinyl alcohol; Polyacroleine	Cellulose and derivatives Polytetrafluoroethylene Polytrifluorochloroethylene