# บทที่ 2

# ทฤษฎี

## 2.1 การทำปฏิกิริยาต่อกันของรังสีแกมม่าเมื่อไปถูกสสาร

เมื่อรังสีแกมม่าไปถูกสสาร จะเกิดปฏิกิริยาต่อกันแบบไหนนั้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมม่านั้น ในกรณีที่รังสีแกมม่าที่มีพลังงานสูง มักจะสามารถเข้าไปถึงนิวเคลียสได้ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์คือ ถ้ารังสีแกมม่านั้นมีพลังงานมากกว่าพลังงานที่ใช้ยึดกัน (Binding energy) ของนิวคลีออน (nucleon) ในนิวเคลียส ซึ่งมักจะอยู่ในช่วง 7 - 9 เมกาอีเลกตรอน-โวทล์ แต่ในงานด้านนี้รังสีแกมม่าที่ใช้มักมีพลังงานต่ำกว่าที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นการทำปฏิกิริยาต่อสสารจะเกิดกับอีเลกตรอนที่อยู่ล้อมรอบนิวเคลียส ซึ่งแบ่งออกได้ 3 แบบคือ

ก. โฟโตอีเลกตริค เอฟเฟคท์ (Photoelectric effect) เป็นกระบวนการที่รังสีแกมม่าวิ่งชนอนุภาคอีเลกตรอนที่โคจรล้อมรอบนิวเคลียส โดยเฉพาะในเคเชลล์ (K-shell) แล้วถ่ายเทพลังงานให้อนุภาคอีเลกตรอนทั้งหมด ทำให้อนุภาคอีเลกตรอนนั้นหลุดออกจากวงโคจร ด้วยพลังงานอันหนึ่ง ($E_p$) ซึ่งทำให้เกิดไอออนไนเซชั่น (ionization) อีเลกตรอนที่หลุดออกมานี้เรียกว่า โฟโตอีเลกตรอน ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งก็สามารถไปกอให้เกิดไอออนไนเซชั่นและ เอกซ์ไซเทชั่น (excitation)

ค่า $E_p$ ของอีเลกตรอนที่หลุดออกมานั้นหาได้จาก

$$E_p = h\nu - \phi$$

ในเมื่อ $h\nu$ เป็นพลังงานของรังสีแกมม่านั้น

$\phi$ เป็นพลังงานที่ยึดกันของอีเลกตรอน

ขบวนการนี้จะไม่เกิดขึ้นถ้า ค่าพลังงานของรังสีแกมม่านั้นมีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานที่ใช้ยึดกันของอีเลกตรอน เมื่ออนุภาคอีเลกตรอนหลุดจากวงโคจร ก็เกิดหลุมที่ว่าง อนุภาคอีเลกตรอนของวงโคจรที่อยู่ถัดออกไปก็จะวิ่งมาแทนที่ แล้วคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์

ข. คอมพ์ตัน เอฟเฟคท์ (Compton effect) เป็นกระบวนการที่รังสีแกมม่าวิ่งชนอนุภาคอีเลกตรอนในวงโคจรนอก ๆ แล้วถ่ายเทพลังงานส่วนหนึ่งให้แก่อนุภาคอีเลกตรอน ๆ นั้นก็จะหลุดจากวงโคจร เกิดไอออนไนเซชั่นส่วนพลังงานที่เหลือก็คงรูปเป็นรังสีแกมม่าเช่นเดิม แต่มีพลังงานน้อยกว่าเดิม อนุภาคอีเลกตรอนที่หลุดออกจากวงโคจรโดยกระบวนการนี้มีชื่อว่า คอมพ์ตันอีเลกตรอน ซึ่งก็สามารถไปก่อให้เกิดไอออนไนเซชั่นหรือเอ็กซ์ไซเทชั่นต่อไปอีกได้ ส่วนรังสีแกมม่าที่เหลือก็สามารถไปก่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อไปได้อีกเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 ถ้าอีเลกตรอนที่ถูกชนกระเด็นออกมาด้วยพลังงาน และทำมุมกับแนวรังสีที่มาตกกระทบเป็นมุม $\theta$ และหลังจากการชนแล้วรังสีมีพลังงานลงเป็น T และเบี่ยงเบนจากแนวเดิมเป็นมุม $\phi$

จากคอนเซอเวชั่น(conservation) ของพลังงานและโมเมนตัมในการชนครั้งนี้ เราสามารถหาพลังงานของรังสีแกมม่าที่ลดลงได้

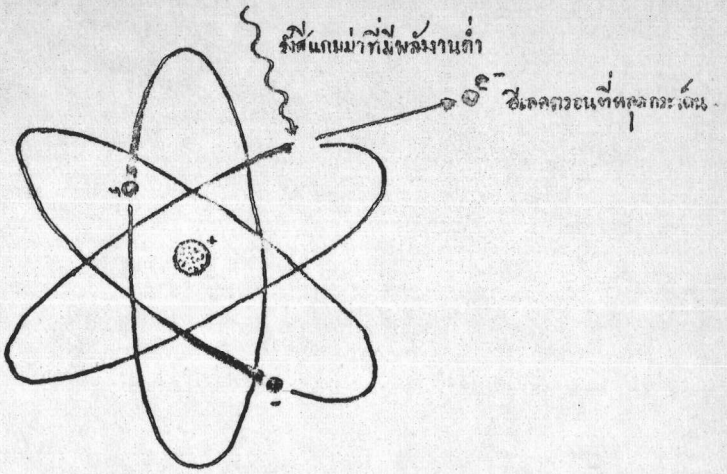
$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1-\cos\phi)}$$

โดย $\alpha = \frac{h\nu}{M_0 C^2}$ , $M_0$ เป็นเรสแมส (rest mass) ของอีเลกตรอนจะเห็นได้ว่าพลังงานของรังสีจะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับมุม

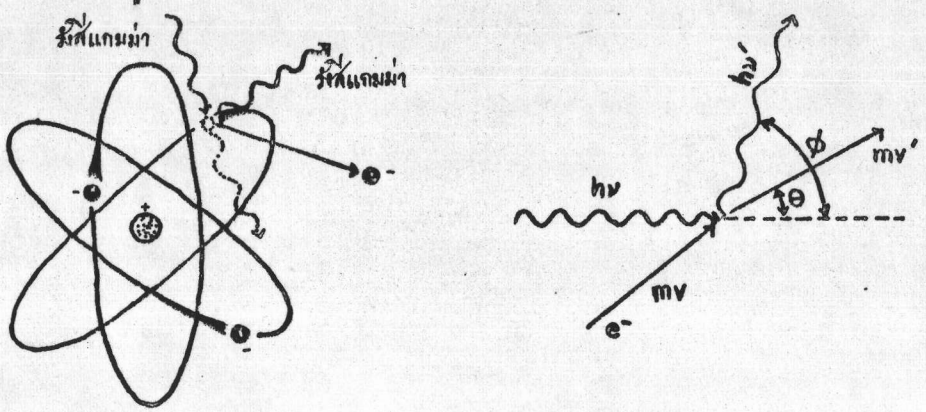
ส่วนพลังงานของอีเลกตรอนที่หลุดออกมานั้นเท่ากับ

$$T = h\nu \left[1 - \frac{1}{1 + (1-\cos\phi)}\right]$$

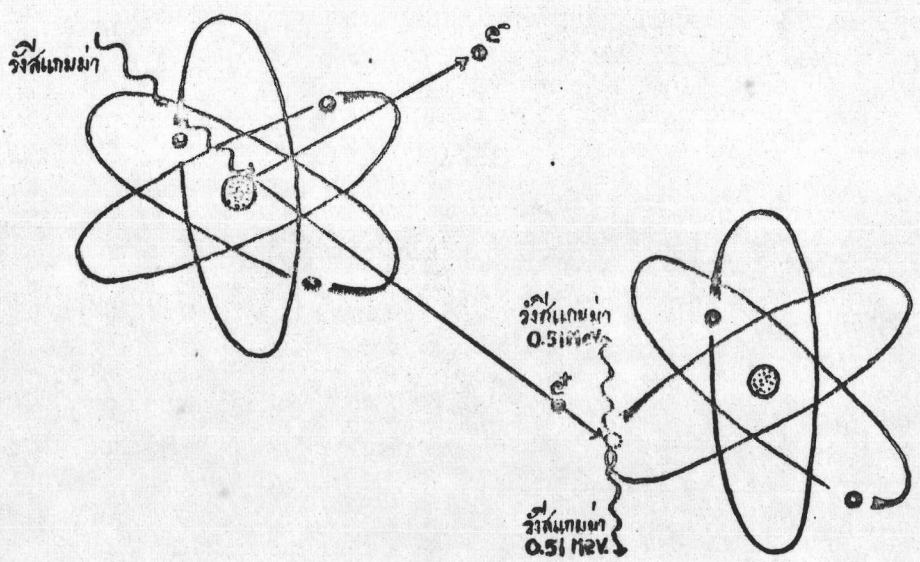
5. แพร์โพรดัคชั่น (Pair Production) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมม่ามีพลังงานสูงกว่า 1.02 เมกาอีเลกตรอนโวหล์วิ่งผ่านเข้าไปในสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสแล้วหายไป เป็นอนุภาคอีเลกตรอนและอนุภาคโพสิตรอน ซึ่งอนุภาคอีเลกตรอนนี้ก็สามารถให้เกิดการไอออนไนเซชั่นหรือเอ็กซ์ไซเทชั่นต่อไปอีกได้ ส่วนอนุภาคโพสิตรอนนั้นก็จะสามารถไปรวมตัวกับอีเลกตรอนอิสระที่มีอยู่ทั่วไปหรืออีเลกตรอนในอะตอมอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 เกิดการแอนนิหิเลชั่น (annihilation) ได้รังสีแกมม่าออกมา 2 อันมีพลังงานอันละ 0.51 เมกาอีเลกตรอนโวหล์




รูปที่ 1 โฟโตอีเลคตริค เอฟเฟคท์




รูปที่ 2 คอมพ์ตัน เอฟเฟคท์




รูปที่ 3 แพร์โพรดักชั่น

## 2.2 ผลของรังสีที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าเมื่อรังสีถูกกับสสาร ก็จะทำให้เกิดการไอออนไนเซชั่นและเอ็กซ์ไซเทชั่น ผลที่ได้คือเอ็กซ์ไซด์โมเลกุลหรืออะตอมหรือไอออน ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีกกับโมเลกุลหรืออะตอมที่อยู่รอบ ๆ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เมื่อสารถูกรังสีไม่ว่าชนิดใดก็ตาม จะทำให้เกิดการไอออนไนเซชั่นและเอ็กซ์ไซเทชั่นเหมือนกันหมดแต่จะเกิดมากน้อยอย่างไรขึ้นอยู่กับชนิดของรังสีนั้น ๆ

ในที่นี้จะขอกล่าวแต่ผลของรังสีที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชั่นอย่างเดียว คือรังสีเมื่อผ่านน้ำยาโมโนเมอร์ ก็จะทำให้โมเลกุลของโมโนเมอร์นั้นเกิดการไอออนไนซ์และเอ็กซ์ไซด์นั้น จากนั้นก็จะไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลที่อยู่รอบ ๆ ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นฟรีแรดิกัส (Free radical) ขึ้นเป็นจำนวนมาก ฟรีแรดิกัสนี้ก็จะไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น ๆ อีก ต่อไปเรื่อย ๆ เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ทำให้โมเลกุลของโมโนเมอร์รวมตัวเป็นโมเลกุลใหญ่ขึ้นตามลำดับ จนกระทั่งฟรีแรดิกัสใช้ไปหมดปฏิกิริยานี้ก็จะสิ้นสุดลง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

ขั้นเริ่มต้น (initiation step)

$$A \xrightarrow{\sim\sim} 2R^{\cdot} \quad \text{อัตราการเกิด} = R_i \qquad (1)$$

ขั้นต่อเนื่อง (propagation step)

$$R^{\cdot} \longrightarrow RM^{\cdot}$$

$$RM_n^{\cdot} \longrightarrow RM_{n+1}^{\cdot} \quad \text{อัตราการเกิด} = k_p[PM^{\cdot}][M] \qquad (2)$$

ขั้นสุดท้าย (termination step)

Conbination $\quad RM_m^{\cdot} + RM_n^{\cdot} \longrightarrow P_{m+n}$

Proportionation $\quad RM_m^{\cdot} + RM_n^{\cdot} \longrightarrow P_m + P_n$

$$\text{อัตราการเกิด} = k_t[RM^{\cdot}]^2 \qquad (3)$$

ซึ่ง A เป็นโมเลกุลใด ๆ เช่น โมโนเมอร์ ตัวทำละลาย

$R^{\cdot}$ เป็นฟรีแรดิกัสตัวแรก

M เป็นโมเลกุลของโมโนเมอร์

$M_n^{\cdot}$ เป็นโมเลกุลของโลพีเมอร์ที่กำลังโตขึ้น

$P_n$ เป็นโมเลกุลของโพลีเมอร์ที่หยุดการเติบโต

steady-state appoximation จะได้ว่าอัตราการเกิดและอัตราการหายไปของฟรีแรดิกัสเท่ากัน

ดังนั้น $$R_i = k_t \left[RM^{\cdot}\right]^2 \quad (4)$$

$$\left[RM^{\cdot}\right] = \left(R_i/k_t\right)^{1/2} \quad (5)$$

เนื่องจากว่าขั้นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องนั้นมีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในขั้นนี้มากกว่าที่เกิดในขั้นอื่น ๆ มากนัก ดังนั้นอาจจะถือได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดก็คืออัตราการเกิดของปฏิกิริยาในขั้นนี้

ดังนั้น R (อัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด) $= k_p\left[RM^{\cdot}\right]\left[M\right]$ (6)

$$= k_p\left[R_i/k_t\right]^{1/2}\left[M\right] \quad (7)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชั่น เป็นสัดส่วนกับรากที่ 2 ของอัตราการเกิดในตอนแรก ($R_i$)

ถ้าเป็นโมโนเมอร์อย่างเดียวแต่อาบรังสี

ดังนั้นขั้นเริ่มต้นก็จะเป็น $M \longrightarrow\!\!\!\!\!\!\sim\!\!\!\!\!\!\sim 2R^{\cdot}$

อัตราการเกิด $(R_i) = \phi_m I\left[M\right]$ (8)

$\phi_m[M]$ เป็นอัตราการเกิดฟรีแรดิกัสในโมโนเมอร์มีหน่วยเป็นโมเลกุลต่อหน่วยปริมาณรังสี

I เป็นโดสเรท (dose rate)

จากสมการที่ (7) ดังนั้น (R) อัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด $= k_p k_t^{-1/2} \phi^{1/2} I^{1/2} [M]^{3/2}$ จะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดเป็นสัดส่วนกับรากที่ 2 ของโดสเรท