

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไปแล้วมนุษย์ทุกคนที่อาศัยอยู่บนโลกนี้ จะได้รับรังสีจากธรรมชาติอยู่ตลอดเวลา เช่น ดวงอาทิตย์ สารกัมมันตรังสี สินแร่และสิ่งแวดล้อมจากการที่เราหายใจ ในอาหารที่เจือปนด้วยสารกัมมันตรังสี เจือปนอยู่ด้วย ในขณะที่เดียวกันพลังงานของรังสีเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ด้วย เช่น แสงแดดที่ให้ความร้อน แสงสว่างที่ช่วยในการมองเห็นและช่วยสังเคราะห์สารต่างๆ [21, 22] ส่วนรังสีบางชนิดที่มีพลังงานสูงจะอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอนุภาคพลังงานสูงเมื่อผ่านตัวกลาง จะสามารถทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นประจุ (Ionizing radiation) และรังสีพลังงานต่ำซึ่งเมื่อผ่านตัวกลางไม่ทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัว (Non ionizing radiation) [21] ซึ่งบางชนิดมีประโยชน์และอาจจะมีโทษได้ในขณะเดียวกัน เราสามารถแบ่งต้นกำเนิดรังสีที่มนุษย์ได้รับ เป็น 2 ประเภทคือ

2.1 แหล่งกำเนิดรังสี

แหล่งกำเนิดรังสีสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่

2.1.1 รังสีที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ ได้แก่ [22]

1. รังสีคอสมิก (Cosmic radiation) เป็นรังสีชนิดอนุภาคพลังงานสูง ที่มีระดับ พลังงานอยู่ในช่วง 10^3 - 10^{20} อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุหรือเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น อิเล็กตรอน โปรตอน แอลฟา บีต้า และสามารถแบ่งรังสีคอสมิก ได้เป็น 2 ประเภท คือ

1.1 รังสีคอสมิกปฐมภูมิ (Primary cosmic radiation) ซึ่งรังสีส่วนใหญ่มาจากนอกระบบสุริยะ สามารถพบได้ทั่วไปในอวกาศ ได้แก่ อนุภาคโปรตอน อนุภาคแอลฟา เป็นต้น

1.2 รังสีคอสมิกทุติยภูมิ (Secondary cosmic radiation) เกิดจากการที่รังสีทุติยภูมิวิ่งเข้าสู่ชั้นบรรยากาศของโลก แล้วเกิดการชนและทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับนิวเคลียสของอะตอมของธาตุที่อยู่ในอากาศทำให้เกิดอนุภาคใหม่ขึ้นมา เช่น อนุภาคนิวตรอน อนุภาคโปรตอน เป็นต้น

2. สารกัมมันตรังสีที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ (Natural radioactivity) อาจพบปะปนอยู่ในรูปของสารประกอบต่างๆ เช่น ดิน หิน ทราซ เป็นต้น

2.1.2 รังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น โดยมนุษย์ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น ทางด้านการแพทย์ การเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เป็นต้น

เนื่องจากรังสีเป็นพลังงานรูปหนึ่ง สามารถทำปฏิกิริยากับตัวกลางได้โดยการถ่ายเทพลังงานให้กับตัวกลาง ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุล มีระดับพลังงานสูงขึ้น (Excitation) เมื่อระดับพลังงานสูงพอ ทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรหลุดออกมาจากอะตอมหรือโมเลกุล เรียกว่าเกิดการแตกตัวเป็นประจุ (Ionization) และเรียกรังสีที่ทำให้เกิดกระบวนการดังกล่าวว่า รังสีที่ทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นประจุ

2.2 ชนิดของรังสีและอนุภาค

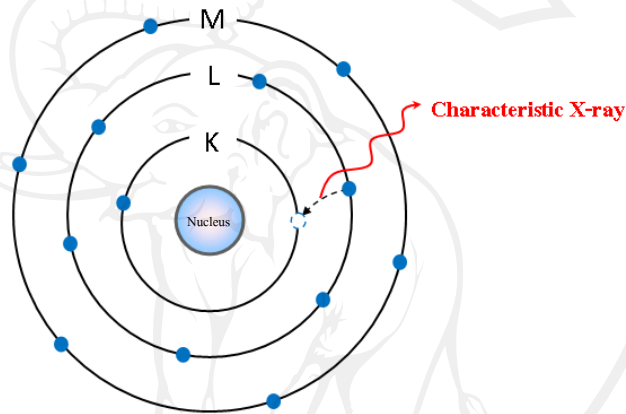
ชนิดของรังสีและอนุภาคแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.2.1 ชนิดที่แตกตัวเป็นประจุ [21, 22]

1. อนุภาคแอลฟา (Alpha particle, α) เป็นอนุภาคที่ประกอบด้วย นิวตรอน 2 ตัว และโปรตอน 2 ตัวการสลายตัวของอนุภาคแอลฟามักเกิดในธาตุหนัก เพราะอนุภาคแอลฟามีประจุ $+2e$ จึงสามารถถูกสกัดกั้นได้ง่ายด้วยอะลูมิเนียมที่มีความหนาเพียง 0.004 เซนติเมตร เท่านั้น
2. อนุภาคบีตา (Beta particle, β) เกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีสามารถเปลี่ยนทิศทางได้จากแรงดึงดูดในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า มีความเร็วเกือบเท่าความเร็วแสงแต่มีพลังงานน้อยกว่าอนุภาคแอลฟา และมีประจุ $-1e$ จึงสามารถสกัดกั้นไม่ให้รังสีผ่านได้ อะลูมิเนียมที่มีความหนาเพียง 0.65 เซนติเมตร
3. รังสีแกมมา (Gamma rays, γ -rays) เป็นรังสีที่เกิดจาก นิวเคลียสของอะตอมที่อยู่ในสถานะไม่เสถียร (Excited state) ไม่มีมวล ไม่มีประจุเป็นกลุ่มพลังงานที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง เนื่องจากรังสีแกมมาไม่มีประจุไฟฟ้า จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางในสนามแม่เหล็ก แต่มีการแตกตัวเป็นไอออน ได้น้อยกว่าอนุภาค แอลฟาและบีตา ซึ่งรังสีแกมมาเป็นกลุ่มของพลังงานที่ส่งออกมาจากการสลายตัวของนิวเคลียส เรียกว่า โฟตอน (Photon)
4. รังสีเอกซ์ (X-ray) [23] เป็นรังสีที่เกิดจากเครื่องกำเนิดรังสี เช่น เครื่องเอกซเรย์ เครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูง เกิดจากการเร่งให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจาก

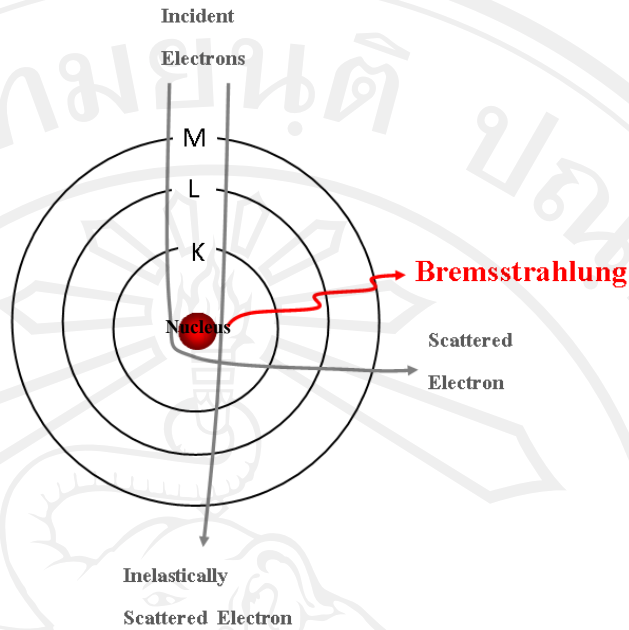
ใส่หลอดด้วยความเร็วสูงแล้วเข้าชนเป้าหลอดที่ทำด้วยโลหะหนัก ทำให้เป้าหลอดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์ดังกล่าวเกิดได้ 2 แบบ [1, 23, 25]

1. รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (Characteristic x-ray) เกิดจากอิเล็กตรอนวงโคจรใน (Inner orbital electron) ของอะตอมที่ถูกชนหลุดออกจากอะตอมแล้ว อิเล็กตรอนจากวงโคจรนอกวิ่งเข้ามาแทนที่ ในขณะที่เดียวกันจะปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ [21]

2. รังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (Continuous X-ray) เกิดจากการที่อิเล็กตรอนความเร็วสูงวิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสแล้วเคลื่อนที่แบบมีความเร่งจะปลดปล่อยรังสีเอกซ์ ซึ่งจะอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง [21]

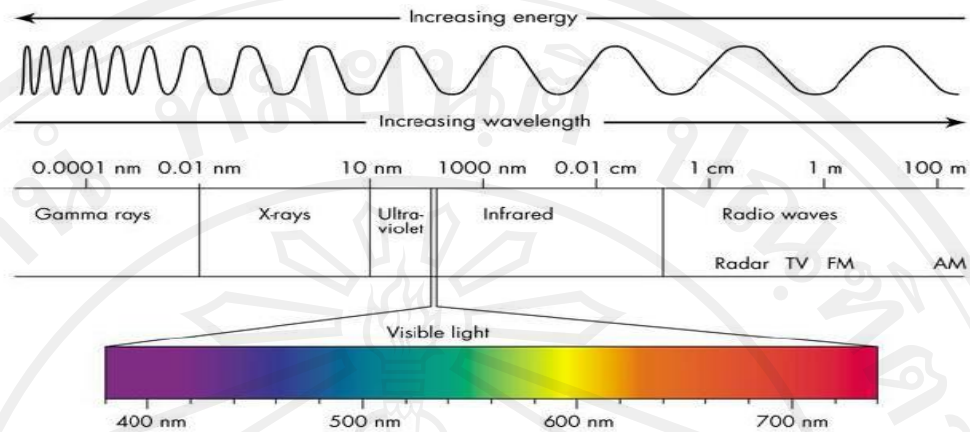
2.2.2 ชนิดที่ไม่แตกตัวเป็นประจุ (Non-Ionizing Radiation) ได้แก่

อนุภาคนิวตรอน (Neutron particle, n) เป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ เมื่อสลายตัวจะให้อนุภาคโปรตอนและอนุภาคบีต้าที่มีพลังงานต่ำ เนื่องจากไม่มีประจุไฟฟ้า และมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงจึงสามารถผ่านอะตอมเข้าไปรวมกับนิวเคลียสได้ง่าย

2.3 รังสีที่ใช้ในทางการแพทย์

รังสีที่ใช้ในทางการแพทย์ เป็นรังสีที่มีพลังงานสูงสามารถทำให้เกิดการแตก สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.3.1 รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) [22, 23] เป็นรังสีที่มีความถี่ ไม่มีประจุ ไม่มีมวล สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าแสง (3×10^8 m/s) มีอำนาจทะลุทะลวงสูง ทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัวได้ทางอ้อม ได้แก่ รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา เป็นต้น ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงรังสีและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ (Electromagnetic spectrum) [24]

2.3.2 อนุภาครังสี (Particle radiation) เป็นรังสีที่อยู่ในรูปอนุภาคพลังงานสูง อาจมีหรือไม่มีประจุก็ได้ ได้แก่ อนุภาคบีตา อนุภาคแอลฟา โปรตอน อิเล็กตรอน และนิวตรอน เป็นต้น

2.4 อันตรกิริยาของรังสีกับวัตถุ (Radiation interaction with matter)

รังสีที่อยู่ในรูปของอนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีกระบวนการในการถ่ายเทพลังงานให้กับตัวกลางได้ 3 แบบ [26] คือ

2.4.1 การเกิดโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ปฏิกริยานี้เกิดขึ้นระหว่างโฟตอนและอิเล็กตรอน ที่อยู่รอบนิวเคลียส โดยโฟตอนที่เข้ามาชนจะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้อิเล็กตรอนใน แล้วถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกผลักรอกจากอะตอมด้วยพลังงาน จลน์ (Kinetic energy, E_k) ดังสมการที่ 1

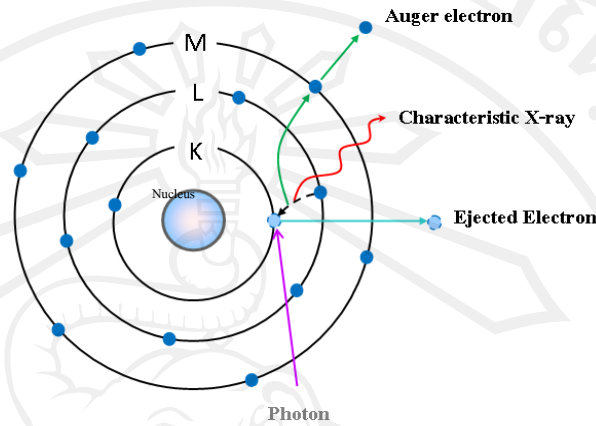
$$E_k = E_\gamma - E_b \quad (1)$$

เมื่อ E_γ = พลังงานทั้งหมดของโฟตอน

E_b = พลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของอิเล็กตรอน คือ พลังงานที่ใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม มีค่าเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรนั้น

และเรียกอิเล็กตรอนที่วิ่งออกมาว่าโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอนใน ในชั้น K (K-shell) ขณะเดียวกันจะมีอิเล็กตรอนจากวงโคจรถัดไปวิ่งเข้ามาแทนที่ โดยถ่ายเทพลังงานส่วนเกินออกไป โดยพลังงานบางส่วนจะถ่ายเทออกไปในรูปของรังสี

ลักษณะเฉพาะ และบางส่วนจะถ่ายเทให้แก่ อิเล็กตรอนอื่นในอะตอมและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเรียกว่า ออเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดโฟโตอิเล็กทริก [21]

2.4.2 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) อันตรกิริยาเกิดขึ้นเมื่อรังสีโฟตอนวิ่งชนอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรวงนอก ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนที่จับตัวกันอย่างหลวมๆ (Free electron) แล้วถ่ายเทพลังงานส่วนหนึ่งให้กับอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนจะถูกผลักให้เบนออกไปทำมุมกับแนวโฟตอนเดิมเรียกอิเล็กตรอนคอมป์ตัน (Compton electron) ส่วนโฟตอนดังกล่าวจะเบนออกไปทำมุมกับแนวเดิมเรียกว่าโฟตอนกระเจิง (Scattered photon) ดังสมการที่ 2

$$E_e = E_\gamma - E'_\gamma - E_b \quad (2)$$

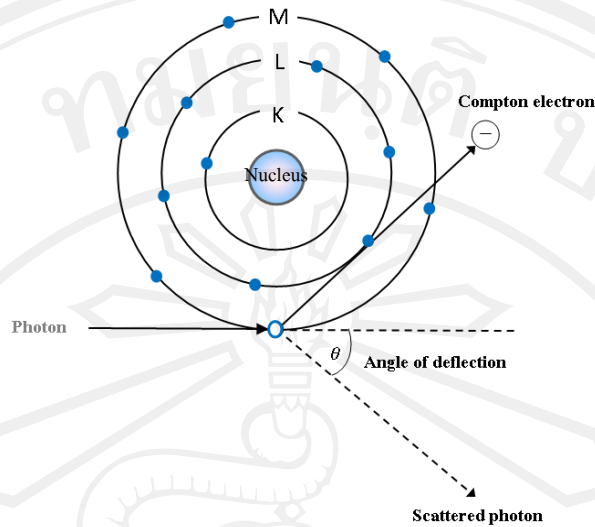
เมื่อ E_e = พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน

E_γ = พลังงานทั้งหมดของโฟตอน

E'_γ = พลังงานของโฟตอนที่กระเจิง

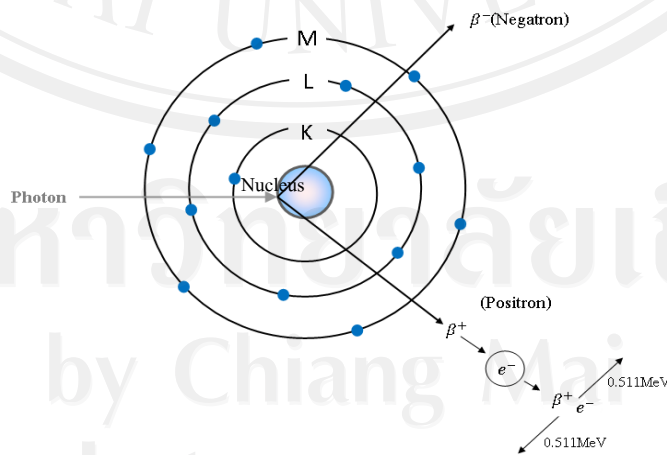
E_b = พลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม
(พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน)

ซึ่งโอกาสของการเกิดปฏิกิริยานี้จะลดลงอย่างสม่ำเสมอถ้าพลังงานเพิ่มขึ้น นั่นคือโฟตอนที่มีพลังงานมากจะมีโอกาสกระเจิงได้น้อยกว่าโฟตอนที่มีพลังงานน้อย ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการกระเจิงแบบคอมป์ตัน [21]

2.4.3 กระบวนการเกิดแพร์โพดักชัน (Pair production) กระบวนการนี้เกิดขึ้นเมื่อโฟตอน ว่างเข้าใกล้ นิวเคลียสแล้วถูกดูดกลืนเข้าไปในสนามนิวเคลียสของตัวกลาง และจะเกิดอิเล็กตรอนขึ้นคู่หนึ่ง ได้แก่ เนกาตรอน (Negatron) และโพสิตรอน (Positron) ระดับพลังงานที่จะทำให้เกิดอันตรกิริยา เช่นนี้ต้องมีพลังงานเป็นสองเท่าของมวลอิเล็กตรอนขณะหยุดนิ่ง (Electron rest mass) คือ 1.02 เมกะอิเล็กตรอน โวลต์ (MeV) ส่วนพลังงานที่เหลือจะเป็นพลังงานจลน์ ของอิเล็กตรอนทั้งสอง โพสิตรอน (Positron) ที่เกิดขึ้นจะมีการถ่ายเทและลดพลังงานลง แล้วเข้าร่วมตัวกับอิเล็กตรอนเกิดเป็น แอนนิ-ฮิลชัน โฟตอน (Annihilation photon) ซึ่งจะมีพลังงานประมาณ 0.51 MeV และจะวิ่งออกไปในทิศทางที่ตรงกันข้ามกัน ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดแพร์โพดักชัน [21]

2.5 ผลของรังสีต่อร่างกายมนุษย์ [22]

1. ระดับโมเลกุล เป็นระดับที่เกิดความเสียหายกับชีวโมเลกุลใหญ่ในเซลล์ เช่น โปรตีน ไขมัน ดีเอ็นเอ และอาร์เอ็นเอ ซึ่งอันตรายในระดับนี้จะมีผลต่อกระบวนการเผาผลาญ (Metabolic pathway)
2. ระดับองค์ประกอบของเซลล์ (Sub cellular) เป็นระดับที่เกิดความเสียหายกับส่วนประกอบที่อยู่ในเซลล์ เช่น เยื่อหุ้มเซลล์ นิวเคลียส โครโมโซม ไมโทคอนเดรีย และไลโซโซม
3. ระดับเซลล์ (Cellular) เป็นระดับที่หยุดยั้งการแบ่งตัวของเซลล์ ทำให้เซลล์มีการแบ่งตัวที่ผิดปกติหรือเปลี่ยนไปอยู่ในสภาพที่เกิดความเสียหายอย่างร้ายแรง อันจะเป็นสาเหตุนำไปสู่กระบวนการตายเกิดขึ้น
4. ระดับเนื้อเยื่อและอวัยวะในระดับนี้อาจเกิดความเสียหายหรืออาการบาดเจ็บกับระบบประสาท ระบบทางเดินอาหาร จนถึงแก่ความตายได้ หรือผลของรังสีในระยะยาวอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดมะเร็งตามมา
5. ระดับร่างกาย (Whole animal) อาจทำให้อายุสั้นหรือตายก่อนเวลา
6. ระดับกลุ่มประชากร (Population of animal) ผลรังสีในระยะยาวอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของยีน และ โครโมโซม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการกลายพันธุ์ได้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าขีดจำกัดของปริมาณรังสี ตามหลัก ICRP No.103 [4]

ร่างกาย / อวัยวะที่ได้รับรังสี	สำหรับผู้ปฏิบัติงาน	สำหรับบุคคลทั่วไป
ร่างกาย	20 mSv ต่อ ปี	1 mSv ต่อ ปี
Equivalent dose :		
- ที่เลนส์ตา, อวัยวะสืบพันธุ์, ไชกระดูก	150 mSv ต่อ ปี	15 mSv ต่อ ปี
- ที่ผิวหนัง, ที่มือและเท้า	500 mSv ต่อ ปี	50 mSv ต่อ ปี

รังสีที่มีผลต่อมนุษย์เมื่อได้รับรังสีทั้งตัว แสดง ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 2.2 ผลของรังสีต่อมนุษย์เมื่อได้รับรังสีทั้งตัว [22]

ปริมาณรังสี (Gy)	อาการและการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจพบ
< 0.10	ไม่พบการเปลี่ยนแปลง
0.10-0.20	พบความผิดปกติของโครโมโซมเพิ่มขึ้นแต่ไม่พบอาการหรืออาการแสดงทางคลินิก
> 0.12	ตรวจพบจำนวนสเปิร์มลดน้อยลงและพบปริมาณน้อยที่สุดประมาณวันที่ 45 หลังได้รับรังสี
0.50	ตรวจพบจำนวนเม็ดเลือดขาวชนิดลิมโฟไซต์ลดน้อยลงซึ่งเป็นผลเนื่องจากการกดการทำงานของไขกระดูก
1.00 (threshold)	อาจมีอาการคลื่นไส้อาเจียน
1.50 (threshold)	อาจเกิดการตาย
3.20-3.60 (LD 50/60)	ต้องได้รับการดูแลอย่างระมัดระวัง (Support care)
4.80-5.40 (LD 50/60)	ต้องได้รับการรักษาพยาบาล (medical treatment)
> 5.40 (LD 50/60)	ควรได้รับการเปลี่ยนถ่ายไขกระดูก (bone marrow transplant)

2.6 หลักการ ALARA [4,5]

ในปี 1954 สภาแห่งชาติในการป้องกันอันตรายรังสี (National Council on Radiation Protection; NCRP) ได้เสนอแนะหลักปฏิบัติงานสำหรับผู้เกี่ยวข้องต่างๆ ให้ได้รับรังสีให้น้อยที่สุดและเกิดประโยชน์สูงสุด (As Low As Reasonably Achievable; ALARA) โดยใช้รังสีน้อยที่สุดให้แก่ตัวผู้ป่วยและผู้ที่เกี่ยวข้อง โดยมีการจำกัดปริมาณรังสีที่ร่างกายของผู้ปฏิบัติงานหรือบุคคลทั่วไปได้รับ ดังนี้

1. การจำกัดปริมาณรังสีที่ได้รับโดยใช้หลักการของเวลา (Timing) ปริมาณรังสีที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ปฏิบัติงานในบริเวณนั้นโดยตรง ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานควรใช้เวลาในการปฏิบัติงานกับรังสีให้สั้นที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$D = R \times T \quad (3)$$

เมื่อ $D =$ อัตราการได้รับรังสีสูงสุดที่สามารถปฏิบัติงานได้ (Total Exposure)

$R =$ ปริมาณรังสี (Exposure rate)

$T =$ เวลาที่อนุญาตให้ทำงานได้ (Time)

2. การจำกัดปริมาณรังสีที่ได้รับโดยใช้หลักการของระยะทาง (Distance) ระยะทางเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการกำหนดปริมาณรังสีที่ร่างกายของผู้ปฏิบัติงานได้รับนักรังสีเทคนิคจะสามารถลดปริมาณรังสีที่ตนเองได้รับลงได้ โดยยืนอยู่ห่างจากต้นกำเนิดรังสีให้มากขึ้น กฎกำลังสองผกผัน (Invert square law) เป็นกฎที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและความเข้ม (ปริมาณ) ของรังสีที่ได้เป็นอย่างดี กฎนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานที่ว่า “ความเข้มของรังสีจะแปรผกผันกับระยะทางยกกำลังสอง” สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$I = \frac{k}{d^2} \quad (4)$$

เมื่อ I = ปริมาณรังสี

d = ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสี

k = ค่าคงที่ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามชนิดของต้นกำเนิดรังสี

3. การจำกัดปริมาณรังสีที่ได้รับโดยใช้อุปกรณ์ป้องกันรังสีวัตถุกำบัง (Shielding) เป็นสิ่งที่ใช้ในการลดปริมาณรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีเพื่อป้องกันหรือลดปริมาณรังสีให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ส่วนวัตถุและความหนาของวัตถุที่จะนำมาใช้กำบังรังสี ขึ้นอยู่กับชนิดและพลังงานของรังสี สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$I_1 D_1^2 = I_2 D_2^2 \quad (5)$$

เมื่อ I_1 = ปริมาณรังสี เมื่อห่างจากต้นกำเนิดเป็นระยะทาง D_1

I_2 = ปริมาณรังสี เมื่อห่างจากต้นกำเนิดเป็นระยะทาง D_2

D_1 = ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีปริมาณรังสี I_1

D_2 = ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีปริมาณรังสี I_2

วัตถุประสงค์ของการป้องกันอันตรายจากรังสี มี 2 ข้อดังนี้

1. เพื่อป้องกันผลทางชีววิทยาแบบเฉียบพลัน (Deterministic) เพื่อป้องกันไม่ได้รับปริมาณรังสีเกิดจุดสูงสุดของการเกิดผล ซึ่งเป็นผลของรังสีแบบเฉียบพลัน คือ การได้รับรังสีปริมาณสูงกว่า 1 Sv ในครั้งเดียว ขนาดความรุนแรงของผลที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของปริมาณรังสีที่ได้รับ
2. เพื่อจำกัดความเสี่ยงของการเกิดผลทางชีววิทยาแบบระยะยาว (Stochastic) จำกัดความเสี่ยงของผลทางชีววิทยาให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งผลทางชีววิทยาแบบระยะยาว คือ ผลกระทบจากการได้รับปริมาณรังสีต่ำต่อเนื่อง (1 Sv หรือไม่เกิน 15 Sv) ผลกระทบแบบนี้เกิดขึ้นตามโอกาสหรือความเสี่ยงต่อรังสีมากกว่าระดับปริมาณรังสีที่ได้รับ โดยจากข้อมูลองค์การสากลในการป้องกัน

อันตรายจากรังสี (International Commission on Radiological Protection; ICRP) ได้กำหนดขีดจำกัดปริมาณรังสี (Dose limits) ในปี 1990 (ICRP publication 60) สำหรับผู้ทำงานด้านรังสีและบุคคลทั่วไปเพื่อให้เกิดความปลอดภัยจากการใช้ประโยชน์จากรังสีในด้านต่างๆ

2.7 ปริมาณรังสีสูงสุดที่อนุญาตให้ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีและสาธารณชนรับได้ใน 1 ปี

สภาแห่งชาติในการป้องกันอันตรายรังสี ได้ให้หลัก NCRP Report No 116 [27] โดยกำหนดปริมาณรังสีเทียบเท่า (Effective Dose Equivalent; EDE) ต่อปีโดยคิดรวมจากทุกอวัยวะที่ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีสามารถรับได้ไม่ให้เกิน 20 mSv (2 rem) และไม่อนุญาตให้ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีที่มีอายุต่ำกว่า 18 ปีทำงานได้ ยกเว้นเข้าข่ายนิสิตนักศึกษาฝึกงานทางด้านรังสี ส่วนสาธารณชน (Annual EDE) ไม่เกิน 1 mSv (0.1 rem) ต่อปี สำหรับผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสีที่ตั้งครรภ์อนุญาตให้ EDE ต่อเดือนไม่เกิน 0.5 mSv (0.05 rem) ในระหว่างตั้งครรภ์ทั้งนี้เพื่อลดปริมาณรังสีต่อทารกในครรภ์ให้อยู่ในระดับต่ำที่สุดและปริมาณรังสีรวมทั้งหมดในช่วงตั้งครรภ์ต้องไม่เกิน 5 mSv (0.5 rem) สามารถวัดปริมาณรังสี ดังนี้

1. ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว (Exposure; Exp) คือ ปริมาณรังสีที่แสดงถึงความมากน้อยของรังสี ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยวัดความสามารถของลํารังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว ได้ดังสมการที่ 6

$$\text{Exp} = \frac{Q}{M} \quad (6)$$

เมื่อ Exp = ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว (Exposure)

Q = จำนวนประจุ (Charge)

M = มวล (Mass)

หน่วยการวัด Exposure ของรังสีมีหน่วยเป็น Roentgen (R) ในระบบ SI (SI Unit)

ค่า Exposure มีหน่วยเป็น C/kg โดยที่ 1 R มีค่าเท่ากับ 2.58×10^{-4} C/kg สามารถวัดปริมาณรังสีได้โดยนำหัววัดรังสีไปวางตรงตำแหน่งที่มีลํารังสีผ่าน

2. ปริมาณรังสีดูดกลืน (Absorbed dose) คือ ปริมาณรังสีที่แสดงถึงพลังงานที่ดูดกลืนในตัวกลางที่รังสีผ่าน เป็นจำนวนพลังงานของรังสีที่ถ่ายทอดแก่วัตถุต่อหนึ่งหน่วยมวลของวัตถุ ณ ตำแหน่งนั้น เมื่อรังสีผ่านตัวกลาง จะมีรังสีบางส่วนทะลุผ่านออกไปและบางส่วนถูกดูดกลืนไว้ในตัวกลาง รังสีที่ทะลุผ่านออกจากตัวกลางจะมีปริมาณลดลงจากปริมาณรังสีเริ่มต้น โดยพลังงานส่วนที่หายไปหรือลดลง คือ พลังงานส่วนที่รังสีถ่ายทอดให้กับตัวกลาง หรือ ตัวกลางดูดกลืนไว้ มีหน่วยเป็น

rad มีค่าเท่ากับ 100 erg/g ในระบบ SI การดูดกลืนรังสีในตัวกลางมีหน่วยเป็น Gray(Gy) โดยที่ 1 Gy มีค่าเท่ากับ 1 J/kg หรือ 100 rad

3. ปริมาณรังสีสมมูล (Equivalent dose) คือ ปริมาณรังสีที่ก่อให้เกิดผลทางชีววิทยาต่ออวัยวะ เนื่องจากรังสีแต่ละชนิดให้ผลทางชีววิทยาต่อเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตแตกต่างกัน แม้จะได้รับปริมาณรังสีดูดกลืนเท่ากันจึงได้มีการกำหนดปริมาณรังสีสมมูลขึ้นมา เพื่อประโยชน์ในงานด้านการป้องกันอันตรายจากรังสีมีหน่วยเป็น rem (roentgen-equivalent man) ในระบบ SI มีหน่วยเป็น Sievert (Sv) โดย 1 Sv มีค่าเท่ากับ 100 rem

2.8 อันตรกิริยาของรังสีเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัตถุกำบังรังสี

ซึ่งในการเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ในการกำบังรังสีนั้น จะต้องพิจารณาคุณสมบัติดังต่อไปนี้

2.8.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient : μ) [22, 25] ถ้าโฟตอนถูกดูดกลืน หรือเกิดรังสีกระเจิงทำให้ปริมาณรังสีทุติยภูมิน้อยกว่ารังสีปฐมภูมิ เรียก ปรากฏการณ์นี้ว่าการลดทอนรังสี (Attenuation) เมื่อความหนาของตัวกลางมากขึ้น ทำให้รังสีทุติยภูมิลดลงมาก เนื่องจากมีระยะทางให้เกิดการดูดกลืนรังสีโฟตอนหรือเกิดรังสีกระเจิง ซึ่งอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้โดยสมการของ (Lambert–Beer law) ดังสมการที่ 7

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (7)$$

เมื่อ I = จำนวนรังสีโฟตอนที่เคลื่อนที่ออกจากตัวกลาง

I_0 = จำนวนรังสีโฟตอนก่อนที่จะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

x = ความหนาของตัวกลางที่รังสีโฟตอนเคลื่อนที่ผ่าน

μ = ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (linear attenuation coefficient)

เมื่อรังสีโฟตอนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง (cm^{-1})

2.8.2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient: μ_m)

[22, 25] เมื่อรังสีโฟตอน เดินทางผ่านตัวกลางโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาของรังสีโฟตอนกับตัวกลางขึ้นกับจำนวนอะตอมต่อปริมาตร ซึ่งค่านี้ ขึ้นกับความหนาแน่นของตัวกลาง (ρ) ซึ่งจะเป็นตัวทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของตัวกลางชนิดเดียวกันแต่มีลักษณะทางกายภาพต่างกัน ซึ่งอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้โดยสมการ ดังสมการที่ 8

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (8)$$

เมื่อ μ_m = ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (cm^2/g)
 μ = ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (cm^{-1})
 ρ = ความหนาแน่นของตัวกลาง (g/cm^3)

2.9 วัตถุประสงค์ของการป้องกันอันตรายจากรังสี [26, 27]

การป้องกันอันตรายจากรังสีในการปฏิบัติงานทางรังสีมีจุดมุ่งหมายในการป้องกันผลกระทบของรังสีต่อสุขภาพของร่างกายผู้ปฏิบัติงานทั้งผลกระทบในระยะสั้น (Short term effect) และผลกระทบในระยะยาว (Long term effect) ผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ที่ได้รับรังสีที่เกิดขึ้นในระยะเวลาดังกล่าวหลังจากได้รับรังสีไปแล้วเกิดจากการที่บุคคลนั้น ได้รับรังสีปริมาณสูงมากในระยะเวลาดังกล่าวหรือที่เรียกว่าแบบเฉียบพลัน (Acute Dose) ทำให้ร่างกายเกิดอาการบาดเจ็บและเจ็บปวดขึ้นมาหลังจาก ได้รับรังสีไปแล้วในระยะเวลาไม่นานนัก

ผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ที่ได้รับรังสีในระยะยาวหลังจากได้รับรังสีไปแล้ว เกิดจากบุคคลนั้นได้รับรังสีในปริมาณที่ไม่จำกัดว่าจะมากหรือน้อย แต่ผลกระทบของรังสีที่เกิดขึ้นจะแอบแฝงในร่างกาย (Latent Effect) ไม่แสดงอาการผิดปกติออกมาทันที แต่จะแสดงผลออกมาให้เห็นหลังจาก ผ่านไปแล้วเป็นเวลานานานเป็นปี หรือ อาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านพันธุกรรมถ่ายทอด ไปยังรุ่นลูกหลานต่อไป

2.10 อุปกรณ์ในการกำบังรังสี

กรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ จึงมีความจำเป็นจะต้องมีการป้องกันอันตรายจากรังสีโดยใช้อุปกรณ์ที่ช่วยในการลดทอนปริมาณรังสีควรวางอยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับตัวผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งการเลือกใช้อุปกรณ์ในการป้องกันอันตรายจากรังสี ควรคำนึงถึง ความแรงของต้นกำเนิดรังสี ชนิดและพลังงานของรังสี [22, 23]

ซึ่งสามารถแบ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันอันตรายจากรังสี ได้ดังนี้

1. อุปกรณ์ป้องกันจากรังสีที่อวัยวะสืบพันธุ์ (Gonads shielding) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันรังสีชนิดปฐมภูมิ ที่บริเวณอวัยวะสืบพันธุ์
2. อุปกรณ์ป้องกันรังสีสำหรับผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสี (Personnel shielding) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันรังสีชนิดทุติยภูมิ (Secondary radiation) เช่น ถุงมือตะกั่ว แว่นตาตะกั่ว เสื้อตะกั่ว และอุปกรณ์ป้องกันรังสีที่คอ เป็นต้น

3. ผนังห้องปฏิบัติงานทางด้านรังสี (Room shielding) จะเป็นผนังหรือกระจกชนิดโปร่งแสง
4. อุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากรังสีที่หลอดเอกซเรย์ (X-ray tube shielding) ซึ่งจะเป็นตัวป้องกันการรั่วไหลของรังสีที่ตัวหลอดเอกซเรย์ซึ่งจะสามารถกันรังสีได้ทั้งตัวคนผู้ป่วยและผู้ปฏิบัติงานได้

2.11 หลักการในเลือกใช้วัสดุในการกำบังรังสี [1]

การเลือกใช้ชนิดของวัสดุในการกำบังรังสี ควรเลือกให้เหมาะสมกับ

1. ความแรงรังสีของต้นกำเนิดรังสี
2. ค่าที่ยอมรับได้หลังจากผ่านเครื่องกำบังรังสี เช่น ค่าที่ยอมให้ผู้ปฏิบัติงานรับได้ในระหว่างปฏิบัติงาน
3. ระยะเวลาที่ปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติทางด้านรังสี (Time of occupancy factor: T)
4. ชนิดของรังสี / พลังงานของรังสี เช่น รังสีแกมมา รังสีบีต่าพลังงานสูง รังสีบีต่าพลังงานต่ำรังสีแอลฟา
5. ระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีหรือ ระยะระหว่างหลอดเอกซเรย์กับอุปกรณ์กำบังรังสีสำหรับวัสดุที่จะนำมาใช้ทำเครื่องกำบังรังสีแต่ละชนิดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะตัวของรังสีด้วย เช่น
 1. รังสีบีต่า สามารถใช้แผ่นพลาสติก แผ่นกระดาษแข็ง เป็นฉากกำบังรังสี
 2. รังสีเอกซ์และแกมมา ต้องใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น ตะกั่ว เหล็ก คอนกรีตหนา
 3. รังสีนิวตรอน ต้องอาศัยวัสดุที่มีไฮโดรเจนสูง ส่วนรังสีนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ (Thermal neutron) ก็อาจจะใช้วัสดุที่มีค่าการดูดกลืนนิวตรอนสูง (High neutron cross section) มาช่วยจับไว้

ตารางที่ 2.3 ชนิดของเครื่องกำบังรังสีแบ่งตามชนิดของรังสี [1]

ชนิดของรังสี	ชนิดของอุปกรณ์กำบังรังสี
แอลฟา	ไม่จำเป็น
บีต่าพลังงานต่ำ	ไม่จำเป็น
บีต่าพลังงานสูง	แผ่นพลาสติก
เอกซเรย์และแกมมา	คอนกรีต / เหล็ก/ ตะกั่ว/ กระจก
นิวตรอน	คอนกรีต / น้ำ / polythene / พาราฟิน

2.12 ค่าความหนาครึ่งค่า (HVL) [22, 26, 27]

ค่า Half Value Layer (HVL) คือค่าความหนาครึ่งค่า จะหมายถึงค่าความหนาของโลหะที่นำมาบังรังสีเอกซ์แล้วทำให้ความเข้มรังสีลดลงเหลือครึ่งเดียวจากเดิม สามารถหาได้จากสมการที่ 9

$$HVL = \frac{0.693}{\mu} \quad (9)$$

เมื่อ HVL = ค่าความหนาครึ่งค่า Half Value layer (mm.)

μ = ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (cm^{-1})

ซึ่งสามารถแสดงค่าความหนาครึ่งค่าของตะกั่วสำหรับใช้ในการกันรังสีที่ระดับพลังงานต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าความหนาครึ่งค่าของตะกั่วสำหรับใช้ในการกันรังสีที่ระดับพลังงานต่างๆ[28]

ค่าความหนาครึ่งค่า HVL (mm.)	ระดับพลังงาน (kVp)
0.06	50
0.17	70
0.27	100
0.28	125

2.13 การใช้อุปกรณ์กำบังรังสี [1]

อุปกรณ์กำบังรังสีเป็นสิ่งจำเป็นมากในเรื่องการป้องกันอันตรายจากรังสีเพื่อช่วยในการลดทอนรังสี ดังเช่นห้องเอกซเรย์ควรที่จะมีจากกำบังรังสีไว้สำหรับเจ้าหน้าที่ และผนังห้องเอกซเรย์ควรมีความหนาเพียงพอที่จะสามารถป้องกันรังสีได้ และในขณะที่ปฏิบัติงาน ควรสวมอุปกรณ์กำบังรังสีส่วนบุคคล เช่น อุปกรณ์กำบังรังสีของต่อมไทรอยด์, แวนตาตะกั่ว, เสื้อตะกั่ว, ถุงมือตะกั่ว, กระจกกันรังสี, ฉากตะกั่ว, ผนังที่ทำด้วยตะกั่วหรือเทียบเท่า เป็นต้น เพื่อลดปริมาณรังสีให้น้อยลง วัตถุที่สามารถใช้กำบังรังสี ได้แก่

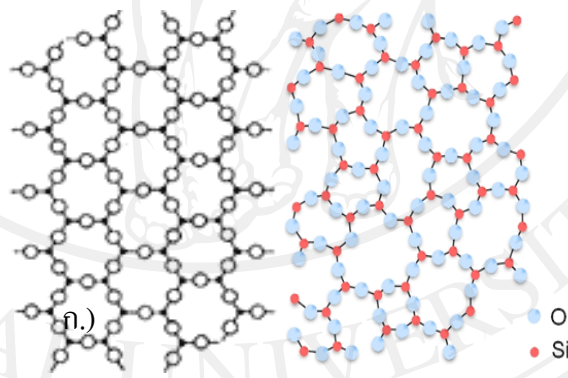
1. ตะกั่ว (Lead; Pb) มีลักษณะเป็นแผ่น มีความหนาประมาณ 1-10 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับการใช้งานในแต่ละประเภท
2. คอนกรีต (Concrete) โดยทั่วไปที่ใช้เป็นจากกำบังรังสี จะต้องมีความหนาประมาณ 2.35 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

3. แผ่นแก้วธรรมดา จะใช้สำหรับกันรังสีพลังงานต่ำ ควรมีความหนาแน่นประมาณ 2.5 - 2.7 กรัม/ ลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)
4. แผ่นแก้วผสมตะกั่ว เพื่อให้มีความหนาแน่นสูง จะใช้สำหรับกันรังสีที่มีพลังงานสูง ควรมีความหนาแน่นประมาณ 3.5 - 6.2 กรัม/ ลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

2.14 โครงสร้างของวัตถุ [29]

โครงสร้างของวัตถุจะแบ่งออกได้เป็น 2 โครงสร้าง ดังนี้

1. โครงสร้างแบบผลึก (Framework Structure) โครงสร้างภายในจะจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้ผลึกมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน มีสมบัติ เช่น จุดหลอมเหลวคงตัวและแน่นอน เช่น เพชร ควอตซ์ โทแพซ ทัวร์มาลีน ดังรูปที่ 2.7 (ขวา)
2. โครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous Structure) มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างอะตอมในส่วนต่างๆแตกต่างกัน เช่น แก้ว พลาสติก และเรซิน ดังรูปที่ 2.7 (ซ้าย)

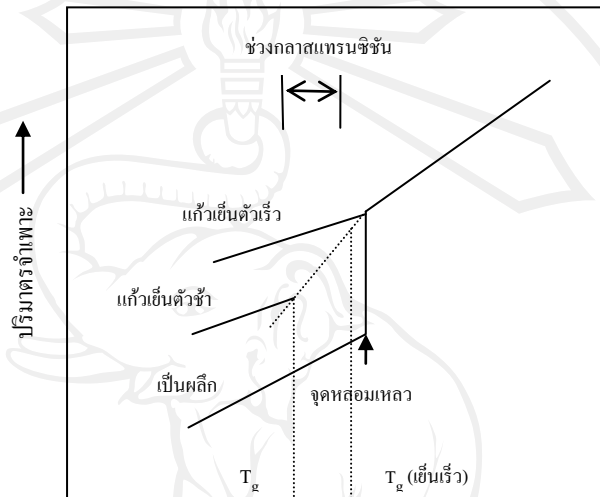


รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกแบบผลึก (Framework structure) และ โครงสร้างแบบสุ่ม (Random structure)

2.15 กระบวนการผลิตแก้ว [29]

แก้วเป็นวัตถุที่ไม่มีผลึก ดังนั้นการแข็งตัวของแก้วจึงแตกต่างจากการแข็งตัวของวัตถุที่มีผลึกอย่างเช่น โลหะ ดังรูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาตรจำเพาะของวัตถุที่มีโครงสร้างผลึกและแก้วที่ไม่มีโครงสร้างผลึก การแข็งตัวของวัตถุที่มีโครงสร้างผลึก เช่น โลหะบริสุทธิ์จะเกิดขึ้นที่จุดหลอมเหลวและเกิดผลึกขึ้นในโครงสร้างทำให้ปริมาตรลดลงอย่างรวดเร็ว

โดยอุณหภูมิคงที่ แต่สำหรับแก้วแล้ว เมื่อเกิดการลดลงของอุณหภูมิและเกิดการแข็งตัวปริมาตรจะค่อยๆลดลง โดยความชันมากหรือน้อยขึ้นกับอัตราการเย็นตัวช้าหรือเร็ว ขณะแข็งตัวของแก้วจะมีความหนืดมากขึ้น จุดที่เส้นกราฟเริ่มเปลี่ยนความชันเรียกว่า อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพของแก้วหรือ อุณหภูมิของกลาส ทรานซิชัน (Glass Transition Temperature; T_g)



รูปที่ 2.8 แสดงการแข็งตัวของแก้วหรือโครงสร้างวัสดุที่ไม่มีผลึก และวัสดุที่มีผลึก [29]

2.16 องค์ประกอบทางเคมีของแก้ว [7, 29, 30]

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติของแก้ว ดังต่อไปนี้

- ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide; SiO_2) จุดหลอมเหลวอยู่ที่ $1600-1725^\circ\text{C}$ แก้วที่มีปริมาณของ SiO_2 สูง จะทำให้แก้วนั้นมีโครงสร้างที่แข็งแรง ทนต่อความร้อนและสารเคมี แต่ทำการผลิตได้ยากเนื่องจากต้องใช้การหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงขึ้นไป และขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากมีความหนืดสูง
- โซเดียมออกไซด์ (Sodium oxide; Na_2O) จุดหลอมเหลวอยู่ที่ 1132°C แก้วที่มีปริมาณ Na_2O สูงจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำเปราะแตกง่าย และไม่ทนต่อสารเคมี ถ้ามีปริมาณ Na_2O สูงมากๆ จะสามารถละลายน้ำได้
- โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide; K_2O) ช่วยให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม
- แคลเซียมออกไซด์, แมกนีเซียมออกไซด์ (Calcium oxide; CaO , Magnesium oxide; MgO) จุดหลอมเหลวอยู่ที่ 2572°C จะช่วยในการขึ้นรูป ทำให้แก้วคงตัว (set) เร็วขึ้นเมื่อเย็นลง

และเพิ่มความทนต่อสารเคมี แก้วที่มีปริมาณ MgO มากกว่า CaO จะทำให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม

5. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide; Al_2O_3) จุดหลอมเหลวอยู่ที่ $2072\text{ }^{\circ}C$ แก้วที่มีปริมาณ Al_2O_3 สูง จะทำให้แก้วนั้นมีความทนทานต่อการสึกกร่อนและสารเคมีได้ดีขึ้น
6. โบรอนไตรออกไซด์ (Boron trioxide; B_2O_3) จุดหลอมเหลวอยู่ที่ $450\text{ }^{\circ}C$ แก้วที่มีสารประกอบพวก Boron เป็นองค์ประกอบ (Borosilicate) จะมีความคงทนต่อการกัด-ล้าง และทนต่อความร้อน เนื่องจากจะทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนลดลง แก้วประเภทนี้เป็นแก้วที่ใช้ในอุปกรณ์วิทยาศาสตร์และเป็นแก้วประเภทที่สามารถใช้ในเตาไมโครเวฟได้
7. เหล็กออกไซด์ (Iron oxide; Fe_2O_3) ช่วยประหยัดเชื้อเพลิงในขณะหลอม แต่จะทำให้เนื้อกระจกใส มีสีค่อนข้างเทาเขียว
8. แบเรียมออกไซด์ (Barium oxide; BaO) จุดหลอมเหลวอยู่ที่ $1923\text{ }^{\circ}C$ จะช่วยในการขึ้นรูป ทำให้แก้วคงตัว (set) เร็วขึ้นเมื่อเย็นลง และเพิ่มความทนต่อสารเคมี และมีคุณสมบัติช่วยในการกำบังรังสี [13]
9. ตะกั่ว (Lead oxide; PbO) จุดหลอมเหลวอยู่ที่ $888^{\circ}C$ แก้วที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ (Lead glass) เนื้อแก้วใสขาวเนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหสูงมีความอ่อน (Soft) ไม่แข็งกระด้าง ง่ายต่อการเจียรระโน เวลาเคาะมีเสียงกังวาน และมีคุณสมบัติช่วยในการกันรังสี
10. บิสมัทออกไซด์ (Bismuth oxide ; Bi_2O_3) จุดหลอมเหลวอยู่ที่ $817\text{ }^{\circ}C$ มีคุณสมบัติช่วยในการกันรังสี และใช้แทนตะกั่วเนื่องจากความเป็นพิษต่ำกว่า [13]

2.17 คุณสมบัติของแก้ว [29, 30]

2.17.1 คุณสมบัติทางกล

1. ความยืดหยุ่น (Elasticity) แก้วเป็น elastic material ที่สมบูรณ์แบบ คือมันจะไม่เปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรแต่มันมีความเปราะซึ่งหมายถึงมันจะแตกเมื่อได้รับความเค้น (stress) เพิ่มขึ้น

1.1 มอดูลัสของยัง (Young's modulus; E) เป็นค่าที่แสดงถึงแรงดึงตามทฤษฎีที่ใช้ในการทำให้แก้ว

ยืดออกให้ยาวขึ้นเท่ากับความยาวเดิมของมัน หน่วยของมันจะมีค่าเป็นแรงต่อพื้นที่ สำหรับแก้วตามมาตรฐานยุโรปจะมีค่า $E = 7 \times 10^{10} \text{ Pa} = 70 \text{ GPa}$

1.2 อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) เมื่อวัตถุถูกดึงด้วยแรง ขนาดตามขวางของมันจะลดลง ค่า m คือความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยที่ลดลงตามทิศทางที่ตั้งฉากกับแรง กับหน่วยของความเครียด (Strain) ตามทิศทางของแรง สำหรับแก้วในงานก่อสร้างค่า $m=0.22$

2. แรงอัด (Compressive strength) แก้วมีค่า ความทนแรงอัด (Compressive strength) สูงมาก คือ 1000N/mm^2 หรือ 1000MPa นั้นหมายถึงในการทำให้แก้วขนาด 1 cm^3 แตกละเอียดลงได้ต้องให้น้ำหนักถึง 10 ตัน
3. ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) แก้วตามปกติจะมีความต้านแรงดึง (Tensile strength) ประมาณ 40 เมกะปาสกาล (MPa หรือ N/mm^2) และอาจทำให้เพิ่มสูงขึ้นถึง 120-200 MPa เมื่อผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงต่างๆ

2.17.2 คุณสมบัติทางความร้อน

1. ค่าการขยายตัวเชิงเส้น (Linear expansion) จะแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งวัดจากการยืดออกต่อหน่วยความยาวเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิทุก 1°C โดยทั่วไปค่านี้จะวัดที่อุณหภูมิในช่วงค่าสัมประสิทธิ์ของ Linear expansion ของแก้วคือ $9 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$
2. ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal stress) เนื่องจากแก้วมีการนำความร้อน ที่ต่ำ การทำให้แผ่นแก้วร้อนหรือเย็นเฉพาะที่จะทำให้เกิดความเค้นที่ทำให้แผ่นแก้วแตกได้เช่นกระจกที่ใส่กรอบและทิ้งไว้ในที่มี แสงแดดจัด อุณหภูมิของขอบกระจกที่อยู่ในกรอบจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าส่วนอื่น จึงเป็นเรื่องจำเป็นในการคำนึงถึงคุณสมบัติข้อนี้ในการใช้งานกระจก การอบชุบทางความร้อน (Heat treatment) จะทำให้แก้วทนความต่างของอุณหภูมิได้ประมาณ $150\text{-}200^\circ\text{C}$

2.17.3 คุณสมบัติทางแสง

1. คุณลักษณะการวัดสเปกตรัมแสง (Spectrophotometer characteristics)

- 1.1 รังสี (Radiation) เมื่อรังสีหรือแสง (Solar) ตกกระทบแก้วจะมีส่วนหนึ่งที่สะท้อนกลับ (Reflection) ส่วนหนึ่งถูกดูดกลืน (Absorbed) และส่องผ่านไป (Transmission) อัตราส่วนระหว่างความเข้มของแสงเหล่านี้กับแสงเริ่มต้น จะบ่งบอกถึงสมบัติของแก้ว 3 ตัว คือ ความสะท้อน (Reflectance), ความดูดกลืน (Absorptance) และ ความส่งผ่าน (Transmittance) ซึ่งเมื่อพล็อตสมบัติแต่ละชนิดที่ความยาวคลื่นต่างๆ กัน ก็จะได้กราฟในลักษณะของสเปกตรัมของแก้ว ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนเหล่านี้ได้แก่ สีของแก้ว ความหนา และสารเคลือบในกรณีที่แก้วนั้นมีการเคลือบด้วย

1.2 ค่าตัวประกอบรังสีอาทิตย์ (Solar factor ; ST) ของแก้ว คือ เปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนรวมที่เกิดจากแสงที่ผ่านเข้ามาในห้องทางแก้ว หรือกระจก นั้นค่าพลังงานรวมได้จากแสงที่ผ่านเข้ามาโดยตรงกับพลังงานส่วนที่แก้ว ดูดกลืนไว้และส่งผ่านออกมาด้านในของห้อง

1.3 การส่งผ่านและการสะท้อนกลับของแสง คือ อัตราส่วนของแสงในช่วงคลื่น ที่ตามองเห็น ที่ส่องผ่านและสะท้อนกลับกับแสงเริ่มต้นสำหรับกระจกที่หนา มากหรือมีการเคลือบ ถึงแม้จะไม่มีสีแต่อาจทำให้แสงที่ส่องผ่านมามีสีฟ้าหรือ สีเขียวได้

2. แสงสว่างจากธรรมชาติ (Natural light, Daylight factor) สำหรับกระจกหนึ่งๆ แสงสว่าง ในเวลากลางวัน คือ อัตราส่วนของแสงภายใน ณ จุดหนึ่ง เทียบกับแสงภายนอก วัดในแนว ระนาบจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับช่วงเวลาในแต่ละวัน

2.17.4 คุณสมบัติทางเคมี

เมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่นๆ เช่น โลหะ และ โพลีเมอร์ แก้วนั้นมีความทนทานต่อ สารเคมีมากกว่าจึงนิยมนำมาใช้เป็นภาชนะบรรจุต่างๆแต่อย่างไรก็ตามแก้วก็สามารถเกิดปฏิกิริยา ทางเคมีได้ซึ่งในสภาพที่เป็นด่างจะเกิดปฏิกิริยาที่ต่อเนื่องซึ่งทำลายโครงสร้างของแก้วได้มากกว่า สภาพที่เป็นกรด

2.18 ชนิดของแก้ว [31, 32]

แก้ว (Glass) เป็นวัสดุโปร่งใส เนื้อใสสะอาด มีความเป็นมันแวววาวสุกใส แก้วเป็น สารประกอบของซิลิกากับสารโลหะออกไซด์มีลักษณะโปร่งตาและมีความเปราะในตัวเอง โดย แก้ว คือ วัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ต่างๆ มาเผาให้ถึงจุดละลายที่อุณหภูมิสูง และเมื่อเวลาเย็นตัวลงมา จะกลายเป็นของแข็งโดยไม่ตกผลึก ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของแก้วได้ เป็นชนิดต่างๆ ดังนี้

1. แก้วโซดา-ไลม์ (Soda-lime glass) เป็นแก้วที่ทำจากวัตถุดิบหลัก 3 ชนิด คือ ทราซ โซดา แอช และหินปูน สามารถหลอมที่อุณหภูมิปานกลาง ที่อุณหภูมิประมาณ 1300-1400 °C สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ลักษณะของแก้ว โซดา-ไลม์ นี้จะ มีลักษณะเป็นแก้วใส และมีความ แข็งแรงและทนทานต่อการใช้งานต่างๆ ไป แต่จะไม่ทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่างได้ดีนัก เมื่อโดนความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆแก้วจะเกิดการแตกร้าว เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การ ขยายตัวเมื่อเจอความร้อนสูงจะเป็นแก้วที่มีความแข็งแรงปานกลางเมื่อเทียบกับแก้วทั่วไป

2. แก้วโอ-ปอล (Opal glass) เป็นแก้วที่มีลักษณะขุ่นหรือทึบ ซึ่งเกิดจากขบวนการ 2 ชนิด คือการตกผลึกของโอปอล (Crystalline opal) ชนิด โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) หรือแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF₂) และการแยกเฟสของแก้วโอปอลออกเป็นแก้ว 2 ชนิด (Liquid-liquid opal) ขณะที่แก้ว เย็นตัวในระหว่างการผลิต หรือจากการผ่านกระบวนการความร้อนหลังการขึ้นรูป ข้อดีของแก้วโอ-ปอล คือ อุดหนุนหกลอมต่ำ ขึ้นรูปได้ง่าย ข้อเสียของแก้วโอ-ปอล คือ ไม่ทนต่อการแตกเมื่อโดนความร้อน มีความต้านทานต่อกรด-ด่าง และมีความแข็งแรงปานกลาง แก้วโอ-ปอลมีความขุ่นหรือทึบมากเท่าใด จะยิ่งไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีมากขึ้นเท่านั้น
3. แก้วลามิเนต (Laminate glass) เป็นผลิตภัณฑ์แก้วในท้องตลาดที่มีชื่อทางการค้าว่า คอเรลล์ (Correll) เป็นแก้วที่มีลักษณะขุ่นหรือโปร่งแสง เกิดจากการพยายามพัฒนาแก้วโอ-ปอลให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ทนทานต่อสารที่มีฤทธิ์ เป็นกรด-ด่าง ทำให้ประสิทธิภาพในการขยายตัวเมื่อเจอความร้อนก็จะมากขึ้น ในเมื่อมีความแข็งแรงจึงสามารถผลิตแก้วลามิเนต ที่มีความบางและเบา
4. กลาส - เซรามิกส์ (Glass-ceramics) เป็นแก้วที่ผสมผสานแก้วและผลึกเซรามิกส์เข้าด้วยกัน โดยการควบคุมสวนผสมและกระบวนการตกผลึกในแก้ว การผลิตกลาส-เซรามิกส์ นั้นใช้วิธีหลอมและขึ้นรูปเช่นเดียวกับการทำแก้วทั่วไป แต่ต้องเพิ่มกระบวนการทางความร้อนเพื่อให้เกิดผลึกที่มีขนาดเล็ก มีการกระจายตัวและมีขนาดสม่ำเสมอและต้องมีปริมาณมากกว่า 50% โดยปริมาตร (ส่วนนี้เป็นข้อแตกต่างที่สำคัญที่ใช้จำแนก กลาส-เซรามิกส์จากแก้วโอปอล) ซึ่งแก้วเซรามิกส์จะมีความแข็งแรงและทนทานต่อสารเคมีมาก อีกทั้งยังมีค่าสัมประสิทธิ์การ ขยายตัวเมื่อโดนความร้อนทำให้ทนความร้อนได้สูง
5. แก้วเทมเปอร์ด์ โซดา-ไลม์ (Tempered soda-lime glass) คือแก้วโซดา-ไลม์ ที่ผ่านขบวนการผลิตอีกหนึ่งขั้นตอน คือ วิธีเทมเปอร์ ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์แข็งแรงมากขึ้น
6. แก้วตะกั่ว (Lead glass) หรือที่รู้จักกันในชื่อแก้วเจียรนัย (lead crystal) ซึ่งจะต้องมีตะกั่วออกไซด์ (PbO) อยู่ในส่วนผสมมากกว่า 24% โดยน้ำหนัก แก้วตะกั่วจะมีค่าดัชนีหักเหของแสงในตะกั่วสูงกว่าแก้วชนิดอื่นมาก
7. แก้วอัลคาไลน์-เอิร์ทอะลูมิโนซิลิเกต (Alkaline-earth alumino silicate glass) มีส่วนผสมคล้าย แก้วโซดา-ไลม์ แต่มีออกไซด์ของกลุ่มอัลคาไลน์-เอิร์ท เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแบเรียมออกไซด์ (BaO) อยู่ในส่วนผสม ทำให้ค่าดัชนีหักเหของแสงใกล้เคียงกับแก้ว ตะกั่ว แต่ผลิตง่ายกว่า และมีความทนทานต่อสารที่มีความเป็นกรด-ด่างมากกว่า แก้วตะกั่วเล็กน้อยมีความทนทานต่อการแตกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน

8. แก้วไพเร็กซ์ (Pyrex) หรือ แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate) เป็นแก้วที่มีการเติมบอริกออกไซด์ ลงไป ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อน แก้วที่ได้สามารถนำไปใช้ ทำเครื่องแก้ววิทยาศาสตร์โดยใช้ทำอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ทำภาชนะแก้วสำหรับใช้ในเตาไมโครเวฟ เป็นต้น

2.19 หลักการทำงานของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrophotometer) [33-35]

การดูดกลืนแสง คือ พหุคูณที่แสงตกกระทบวัตถุแล้วถูกวัตถุดูดกลืนหายไปในตัวกลางซึ่งกฎการดูดกลืนแสงที่ใช้ในสเปกโตรสโคปี จะใช้กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) และกฎของเบียร์ (Beer's law)

กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) คือ เมื่อ มีแสงเดี่ยว (Monochromatic light) ซึ่งคือแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของเนื้อเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากันดังสมการที่ 10

$$A = bc \quad (10)$$

เมื่อ $A =$ ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (Absorbance)
 $c =$ ความเข้มข้นเป็น โมล/ลิตร หรือ โมลาร์ (M)
 $b =$ ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง (cm)

กฎของเบียร์ (Beer's Law) คือเมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปร โดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้นสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 11

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (11)$$

เมื่อ $T =$ แสงที่ส่องผ่าน (Light transmission)
 $I =$ ความเข้มของแสงก่อนส่องผ่านตัวกลาง
 $I_0 =$ ความเข้มของแสงหลังส่องผ่านตัวกลาง

เมื่อเราวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย ปริมาณความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่ลำแสงส่องผ่าน จึงจำเป็นต้องรวมกฎของเบียร์และกฎของแลมเบิร์ต เรียกเป็น กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) จึงสามารถแสดงดังสมการที่ 12

$$A = \log \frac{I}{I_0} = \epsilon bc \quad (12)$$

$$\%T = \frac{I}{I_0} \times 100$$

$$\%A = 100 - \%T$$

เมื่อ	A	=	ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (absorbance)
	I	=	ความเข้มของแสงก่อนส่องผ่านตัวกลาง
	I ₀	=	ความเข้มของแสงหลังส่องผ่านตัวกลาง
	ε	=	เป็นสมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่ง (Molarabsorptivity) (Lmol ⁻¹ cm ⁻¹)
	c	=	ความเข้มข้นเป็น โมล/ลิตร หรือโมลาร์ (M)
	b	=	ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง (cm)
	T	=	แสงที่ส่องผ่าน (light transmission)

2.19.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง

เป็นเครื่องมือที่นำเทคนิค UV-Vis spectroscopy ไปใช้งาน เครื่องมือตัวนี้ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจาก ตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด เป็นการวัดพลังงานที่ดูดกลืนเข้าไปเมื่ออิเล็กตรอนถูกเลื่อน ไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น (electronic transition) โดยปกติช่วง UV จะมีความยาวคลื่นประมาณ 10-380 nm แต่การวิเคราะห์โดย UV Spectrum จะใช้ความยาวคลื่นในช่วง 200-380 nm ซึ่งเรียกว่า "Near-Ultraviolet Region" ในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 200 nm อากาศจะดูดกลืนรังสีในช่วงนี้ จึงต้องวัด spectrum ภายใต้อากาศ จึงเรียกความยาวคลื่นของ UV ในช่วงนี้ว่า "Vacuum-Ultraviolet Region" ส่วนความยาวคลื่นที่เราสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือเรียกว่า "Visible Region" จะเป็น spectrum ของในช่วงประมาณ 380-780 nm

2.19.2 ชนิดของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีเดี่ยว (Single-Beam Spectrophotometer) หลักการคือเมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสีแล้วจะผ่านเลนส์กระจกต่างๆ ผ่านเข้าสู่ โมโนสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วผ่านตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

แล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณ ซึ่งตลอดเส้นทางของลำรังสีเป็นแบบลำรังสีเดี่ยว จึงเรียก สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีเดี่ยว

2. สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่ (Double-Beam Spectrophotometer) หลักการคือ เมื่อลำรังสีออกมาจากแหล่งกำเนิดจะผ่าน โมโนโครเมเตอร์ 2 ครั้งด้วยกันทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดี่ยวอย่างมีประสิทธิภาพและให้ความละเอียดมากขึ้นเมื่อเทียบกับแบบลำรังสีเดี่ยว เมื่อออกจาก exit slit แล้ว ลำรังสีจะไปสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (beam chopper) ซึ่งในกรณีนี้เป็นแผ่นวงกลมซึ่งครึ่งหนึ่งเป็นโลหะและอีกครึ่งหนึ่งเป็นช่องว่างอุปกรณ์นี้จะหมุนอยู่ตลอดเวลา เมื่อลำรังสีตกกระทบครึ่งวงกลมที่เป็นโลหะ ก็จะสะท้อนไปผ่านตัวอย่างที่ต้องการตรวจ ในขณะที่ต่อมาลำรังสีจะผ่านครึ่งวงกลมที่เป็นช่องว่างและทะลุไปผ่านตัวอย่างที่ต้องการตรวจ ด้วยวิธีนี้ ลำรังสีลำเดียวที่ผ่าน โมโนโครเมเตอร์จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบ phototube ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไป

2.19.3 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

1. แหล่งกำเนิดรังสี (Source): แหล่งกำเนิดรังสีในสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่นิยมใช้กันแพร่หลายมีดังนี้
 - 1.1 หลอดไฮโดรเจนและหลอดดิวทีเรียมความดันต่ำ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีต่อเนื่องที่ดีที่สุดตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 160-360 nm มีทั้งประเภทใช้ศักดาไฟฟ้าสูง (2,200-6,600 โวลต์) และประเภทใช้ศักดาไฟฟ้าต่ำ (ประมาณ 40 โวลต์) หลอดชนิดนี้ให้รังสีที่มีความเข้มสูงจนถึงความยาวคลื่นประมาณ 360 nm หลังจากนั้นความเข้มของรังสีจะลดลงอย่างรวดเร็ว
 - 1.2 หลอดทังสเตน ประกอบด้วยหลอดทังสเตนอยู่ในหลอดสุญญากาศซึ่งให้รังสีที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ช่วง UV ใกล้ ช่วงแสงที่แลเห็นได้จนถึงช่วงอินฟราเรด (Infrared; IR)
2. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) โมโนโครเมเตอร์เป็นส่วนสำคัญในการกำหนดคุณภาพของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำหน้าที่แยกลำรังสีที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องออกเป็นลำรังสีความยาวคลื่นเดี่ยว ในช่วงแสงที่แลเห็นได้อาจใช้ปริซึมแก้ว

ส่วนในช่วง UV จำเป็นต้องใช้ปริซึมที่ทำด้วย ควอตซ์สำหรับ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จะประกอบด้วย

- 2.1 ช่องที่ปล่อยให้แสงเข้า (entrance slit) เพื่อให้แสงที่เข้ามาแรงพอที่จะผ่านออกไปยังสารตัวอย่าง โดยติดต่อกับพื้นที่ที่แสงผ่าน ดังนั้น ความกว้างของสลิตจึงมีความสำคัญ
 - 2.2 กระจกและเลนส์ (mirror and lens) เพื่อใช้ทำให้แสงเกิดการสะท้อนไปมาในเครื่องบางครั้งทำให้แสงเกิดการรวมกัน ทั้งนี้เพื่อช่วยลดขนาดของเครื่อง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ให้เล็กลง และบางครั้งทำให้แสงกลายเป็นลำแสงขนาน
 - 2.3 ส่วนที่ใช้ทำให้แสงกระจายออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ กันเพื่อให้เหมาะสมแก่การเลือกใช้หรืออาจเป็นส่วนที่ตัดแสงบางช่วงออกไปให้เหลือเฉพาะช่วงคลื่นแสงที่ต้องการ
3. รีเฟลกชันเกรตติง (Reflection Grating) หรือเกรตติงแบบสะท้อนแสง เป็นเกรตติงแบบสะท้อนแสง จะใช้ในการสะท้อนแสง ดังนั้นผิวหน้าของร่องวัตถุที่ใช้ทำจะต้องเรียบและสะท้อนแสงได้ ซึ่งเกรตติงที่ใช้ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตหรือวิสิเบิล ควรจะต้องมีจำนวนร่อง 300-2000 ร่อง ต่อมิลลิเมตร
 4. ช่องแสงออก (Exit slit) เป็นส่วนที่จะปล่อยให้แสงที่ผ่านตัวอย่างแล้วผ่านไปยังมาตรวัดแสง ตลอดจนเป็นส่วนที่ช่วยตัดแสงที่รบกวน โดยทั่วไปแสงเข้าและแสงออกจะเปิดเท่ากัน
 5. หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube; PMT) จะมีความไวดีต่อแสงสามารถใช้ได้ในช่วงความยาวคลื่น 190-900 นาโนเมตร จึงนิยมใช้ในการนับวัดอัลตราไวโอเล็ตหรือวิสิเบิล ลักษณะของหลอดจะประกอบด้วยแคโทดที่ฉาบผิวด้วยสารที่สามารถให้อิเล็กตรอนเมื่อถูกแสง (photo emissive material) จำนวน 9 ชุด ที่เรียกว่าไดโนด (Dynode) แต่ละไดโนดจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 90 โวลต์ เรื่อยไปจนครบ 9 ไดโนด
 6. อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (Recorder) หลังจากทีได้รังสีความยาวคลื่นเดียวผ่านวัตถุที่ต้องการวัดการดูดกลืนแล้ว จะไปตกที่อุปกรณ์รับสัญญาณซึ่งให้ข้อมูลการดูดกลืนอยู่ในรูปของสเปกตรัม

2.20 การหักเหของแสง (Refraction) [36-38]

แสงสีขาว เมื่อตกกระทบบนผิววัตถุที่มีความโปร่งให้แสงผ่านได้ แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับ (Reflection) และบางส่วนจะผ่านทะลุเข้าไปในวัตถุ แสงสีขาวที่ผ่านอากาศแล้วผ่านเข้าไปในวัตถุ ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าอากาศ จะทำให้ความเร็วของแสงลดลง และเกิดการเบี่ยงเบนเข้าหาแนวเส้นปกติ (แนวเส้นตั้งฉากกับวัตถุ) เรียกว่า เกิดการหักเหแสง (Refraction) การหักเหของแสงที่ทะลุผ่านวัตถุจะมากหรือน้อยพิจารณาจากการเบี่ยงเบนของแสงเข้าหาเส้นปกติมากน้อยเพียงใด หรือมุมระหว่างเส้นปกติกับแนวแสงมีค่ามากน้อยเพียงใด ถ้ามุมดังกล่าวมีค่าน้อย แสดงว่าการหักเหของแสงเข้าหาเส้นปกติน้อย หรือ กล่าวได้ว่าแสงเบี่ยงเบนจากแนวเดิมน้อย ในการพิจารณาคุณสมบัติการหักเหแสงสามารถพิจารณาได้จาก ดรรชนีหักเหแสง (Refractive Index; RI) โดยอาศัยกฎทางแสงของสเนล (Snell's Law) ที่กล่าวว่า อัตราส่วนของไซน์ (Sine) มุมตกกระทบ (i) กับมุมหักเห (r) จะมีค่าคงที่ และเรียกค่าคงที่นี้ว่า ค่าดรรชนีหักเหแสง (Refractive Index; RI) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 13

$$RI = \frac{\sin i}{\sin r} \quad (13)$$

เมื่อ RI = ดรรชนีหักเหแสง
 Sin i = มุมตกกระทบ
 Sin r = มุมหักเห

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่า RI ได้จากค่าความเร็วของแสงที่วิ่งผ่านวัตถุตัวกลางเทียบกับความเร็วของแสงที่วิ่งผ่านสุญญากาศ สามารถหาได้จากสมการที่ 14

$$n = \frac{c}{v} \quad (14)$$

เมื่อ n = ค่าดรรชนีหักเหแสง
 c = ความเร็วแสงในอากาศ (3×10^8 m/s)
 v = ความเร็วแสงในตัวกลาง

ตารางที่ 2.5 ค่าดัชนีหักเหแสงของตัวกลางชนิดต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร [38]

ชนิดของตัวกลาง	ค่าดัชนีหักเหแสง
อากาศ	1.0002
ฮีเลียม	1.0004
น้ำ	1.333
เอทานอล	1.36
เส้นใยแก้ว	1.5
เพชร	2.417

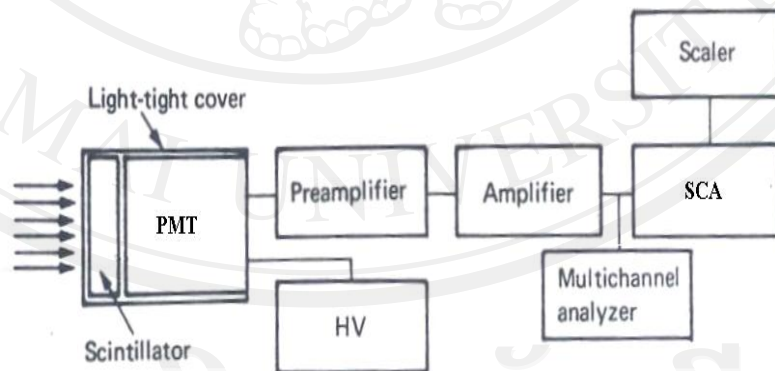
2.21 หลักการทำงานของเครื่องนับวัดรังสีชนิดหัววัดซินทิลเลเตอร์ (Scintillation detector)

หัววัดซินทิลเลเตอร์ [26, 39] หมายถึงวัสดุที่อาจเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ ที่สามารถเปล่งแสงได้ในเวลาอันสั้น เมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสี เรียกการเปล่งแสงโดยวิธีนี้ว่าซินทิลเลชัน (Scintillation) จะมีหลักการทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติของสารซึ่งเมื่อได้รับรังสีจะปล่อยโฟตอนแสงออกมาโดยใช้ ทฤษฎีแถบพลังงาน (Band theory) คือ เมื่ออิเล็กตรอนในวงโคจรวงนอกมีพลังงานในช่วง แถบเวเลนซ์ (Valance band) และที่อยู่เหนือ แถบเวเลนซ์ ขึ้นไปจะเป็น แถบการนำ (Conduction band) ซึ่งพลังงานที่อยู่ระหว่าง แถบเวเลนซ์ และ แถบการนำ เรียกว่า แถบต้องห้าม (Forbidden gap) ซึ่งพลังงานช่วงนี้จะไม่พบในสารบริสุทธิ์ เมื่อรังสีถูกดูดกลืนไว้ในสารทำให้อิเล็กตรอนเกิดสภาวะกระตุ้น (Excitation) ขึ้นเข้าไปอยู่ในช่วง แถบการนำ และทำให้เกิดช่องว่างที่ แถบเวเลนซ์ ในสารบริสุทธิ์ อิเล็กตรอนเมื่อกลับสู่สภาวะปกติจะมาที่ แถบเวเลนซ์ และปล่อยโฟตอนออกมาและเพื่อทำให้การปล่อยโฟตอนแสงที่มีความยาวคลื่นตามที่ต้องการ ออกมาจึงต้องใส่สารปนเปื้อนเข้าไปซึ่งจะอยู่ในรูปของสารอนินทรีย์ ซึ่งจะทำให้ช่องว่างลดลงเมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นก็จะกลับสู่สภาวะปกติและปล่อยโฟตอนแสงออกมา ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. หัววัดซินทิลเลเตอร์ แบบของเหลว (Solid scintillation) ซึ่งการนับวัดรังสีวิธีนี้จะอาศัยสารเรืองแสงอยู่ในรูปของเหลวเมื่อใส่สารกัมมันตรังสีลงไปจะเกิดการเรืองแสงขึ้นและจะถูกรับวัดและแสดงผลที่ได้จากการนับวัด
2. หัววัดรังสีที่อยู่ในรูปของแข็ง (Crystal scintillation) ซึ่งซึ่งการนับวัดรังสีวิธีนี้จะอาศัยสารเรืองแสงอยู่ในรูปของแข็ง ในที่นี้จะใช้ผลึกโซเดียมไอโอไดร์ที่ปนเปื้อนด้วยสารไม่บริสุทธิ์ชนิด ทอริยม ((Sodium iodide crystal activated with thallium) NaI(Tl))

2.21.1 หลักการทำงานของหัวนับวัดรังสีชนิดของแข็ง

เมื่อรังสีตกกระทบผลึก NaI(Tl) จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ในผลึกให้เป็นโฟตอนแสง ซึ่งโฟตอนแสงที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ โดยผลึก NaI(Tl) จะประกอบติดกับหลอดโฟโตมัลติฟายเออร์ (Photomultiplier Tube; PMT) ซึ่งเป็นหลอดสูญญากาศที่ทำหน้าที่เปลี่ยนโฟตอนแสงที่ได้จากผลึก NaI(Tl) ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นจะถูกส่งไปยังส่วนปรับรูปร่างสัญญาณ (Preamplifier) ซึ่งเป็นตัวปรับรูปร่างของสัญญาณไฟฟ้าให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่สัญญาณที่ได้จะไม่สม่ำเสมอ จึงถูกส่งไปยังตัวขยายขนาดสัญญาณ (Amplifier) เพื่อให้ได้ขนาดของสัญญาณที่มีความสูงตามที่ต้องการ ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของพลังงานที่ถูกดูดกลืนในหัววัดรังสี ซึ่งจะสามารถบอกพลังงานของรังสีได้จากความสูงของสัญญาณ และจะมีตัวแยกสัญญาณ (Pulse-height analyzer; PHA) ซึ่งจะทำให้สามารถแยกรังสีที่เกิดจากการกระเจิง และรังสีที่เกิดจากพื้นหลัง (Background) ได้ ถ้าสามารถวัดสัญญาณได้ที่ละพลังงานจะเรียกว่า (Single channel analyzer; SCA) แต่ถ้าวัดได้หลายครั้งจะเรียก (Multi channel analyzer; MCA) แล้วสัญญาณที่ได้จะ ไปถูกส่งไปยังหน่วยแสดงผลโดยมีตัวควบคุมเวลาที่ใช้ในการนับวัด (Scaler and Timers) โดยหลอดโฟโตมัลติฟายเออร์จะถูกจ่ายกระแสไฟเพื่อช่วยในการขยายสัญญาณโดย (High voltage power supply ;HV) ซึ่งจะทำหน้าที่จ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าและแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง สามารถแสดงการทำงานของ ระบบวัดรังสีแบบซิลทิเลชันได้ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของระบบวัดรังสีแบบซิลทิเลชัน [39]

2.22 ค่าความหนาแน่น [36, 40]

ค่าความหนาแน่น คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของวัตถุ ต่อปริมาตรของวัตถุ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 15

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (15)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่น (g/cm^3)

m = มวล (g)

v = ปริมาตร (cm^3)

2.22.1 วิธีไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Method)

ในทางปฏิบัติ การหาขนาดหรือปริมาตรของวัตถุ จึงใช้วิธีการแทนที่น้ำแล้วชั่งน้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่ ตามหลักของอาคิมีดีส ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งเมื่อชั่งวัตถุในน้ำ น้ำหนักของวัตถุจะน้อยกว่าเมื่อชั่งในอากาศ น้ำหนักของวัตถุที่หายไปเมื่อชั่งในน้ำจะเท่ากับน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุนั้น หรือน้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่โดยวัตถุนั้นเอง ดังนั้นในการหาความหนาแน่นของวัตถุสามารถหา จากสมการที่ 16 [36, 37, 40]

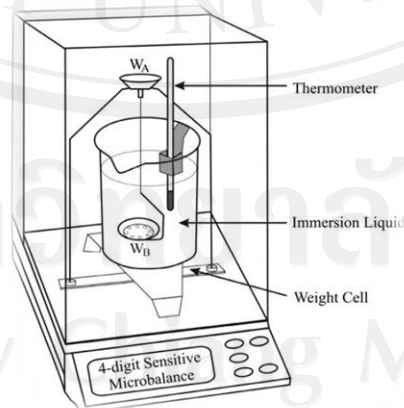
$$\rho = \frac{W_a}{W_a - W_b} \times \rho_b \quad (16)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่น (g/cm^3)

W_a = น้ำหนักที่ชั่งในอากาศ (g)

W_b = น้ำหนักที่ชั่งในไซริน (g)

ρ_b = ความหนาแน่นของของเหลว (g/cm^3)



รูปที่ 2.10 เครื่องชั่งชนิดคีต้ำแหน่ง เพื่อใช้ในการคำนวณความหนาแน่น [12]

2.23 ความแข็ง [29]

2.23.1 หลักการวัดความแข็ง

การทดสอบความแข็ง (Hardness test) เป็นการวัดความต้านทานของวัสดุต่อการกดให้เป็นรอยบุ๋ม (Indentation) การขีดหรือขีดให้เป็นรอย (Scratching) การหาค่าความแข็งของวัสดุ อาศัยหลักการ 3 อย่างคือ

1. หาคความต้านทานต่อความยืดหยุ่น (Elastic hardness) โดยการให้วัสดุชนิดหนึ่งตกลงมากระทบกับวัตถุอีกชนิดหนึ่ง แล้วปล่อยให้กระดอนขึ้น สังเกตการณ์กระดอนของวัตถุนั้น วัตถุใดมีความแข็งมากก็จะกระดอนได้สูง ส่วนวัตถุที่มีความแข็งต่ำก็จะกระดอนได้ต่ำ
2. หาคความต้านทานต่อการตัดหรือขีดข่วน (Resistance to cutting or abrasion) เป็นการนำเอาวัตถุชนิดต่างชนิดกันมาขีดหรือถูกัน วัตถุใดมีความแข็งสูงก็จะขีดหรือถูวัตถุที่มีความแข็งต่ำให้เป็นรอยได้
3. หาคความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอยบุ๋ม (Resistance to indentation) เป็นการนำเอาวัตถุชนิดหนึ่งมาตกลงบนผิววัตถุอีกชนิดหนึ่ง วัตถุใดที่สามารถทำให้เกิดรอยบุ๋มได้โตหรือลึก แสดงว่าวัตถุนั้นมีความแข็งแรงต่ำ แต่ถ้ารอยกดนั้นเล็กหรือตื้น แสดงว่าวัตถุนั้นมีความแข็งสูง

2.23.2 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker Hardness test; VH)

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์กระทำโดยใช้แรงกดระหว่าง 1-200 กิโลกรัม กดผ่านหัวกดที่ทำด้วยเพชรรูปพีระมิด มีฐานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มุมรวมที่ปลายแหลมเท่ากับ 136 องศา ไปบนผิวหน้าชิ้นงานทดสอบเป็นเวลา 10-30 วินาที จากนั้นปลดแรงกดออกแล้วนำชิ้นงานไปวัดขนาดของรอยกดด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อนำค่าที่ได้ไปหาความแข็งได้จากสมการที่ 17

$$HV = \frac{0.183 \times F}{d^2} \quad (17)$$

เมื่อ HV = ความแข็งของวัตถุ

F = แรงที่กด (N)

d = ความยาวของเส้นทแยงมุมของรอยกด (mm)