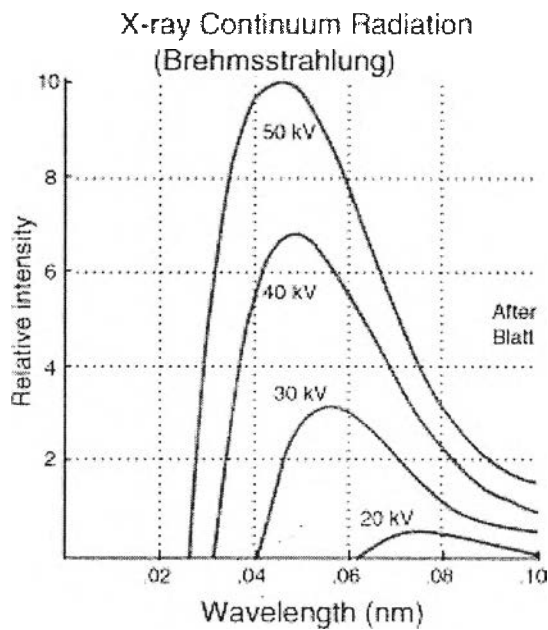




2.1 รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ คือ รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการลดความเร็วของอิเล็กตรอนหรืออนุภาคที่มีประจุซึ่งมีพลังงานสูง หรือเกิดจากการเปลี่ยนชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนภายในวงโคจรชั้นในของอะตอม ซึ่งกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์ทั้งสองแบบนี้ จะให้ลักษณะของสเปกตรัมรังสีที่แตกต่างกัน คือ รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนอันเนื่องมาจากการลดความเร็วเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสนามคูลอมป์ของนิวเคลียสหรือที่เรียกว่า “เบรมส์ตราห์ลุง (Bremsstrahlung)” นั้นมีลักษณะเป็นสเปกตรัมแบบต่อเนื่อง (Continuous spectrum) ส่วนรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนหรือที่เรียกว่า “รังสีเอกซ์เรือง (Fluorescent x-rays)” หรือ “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic x-rays)” ซึ่งมีลักษณะของสเปกตรัมเป็นแบบอนุกรมของพลังงานเดี่ยว (Characteristic line spectrum)



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงสเปกตรัมแบบต่อเนื่องของรังสีเอกซ์ ณ ความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน

2.2 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับตัวกลาง

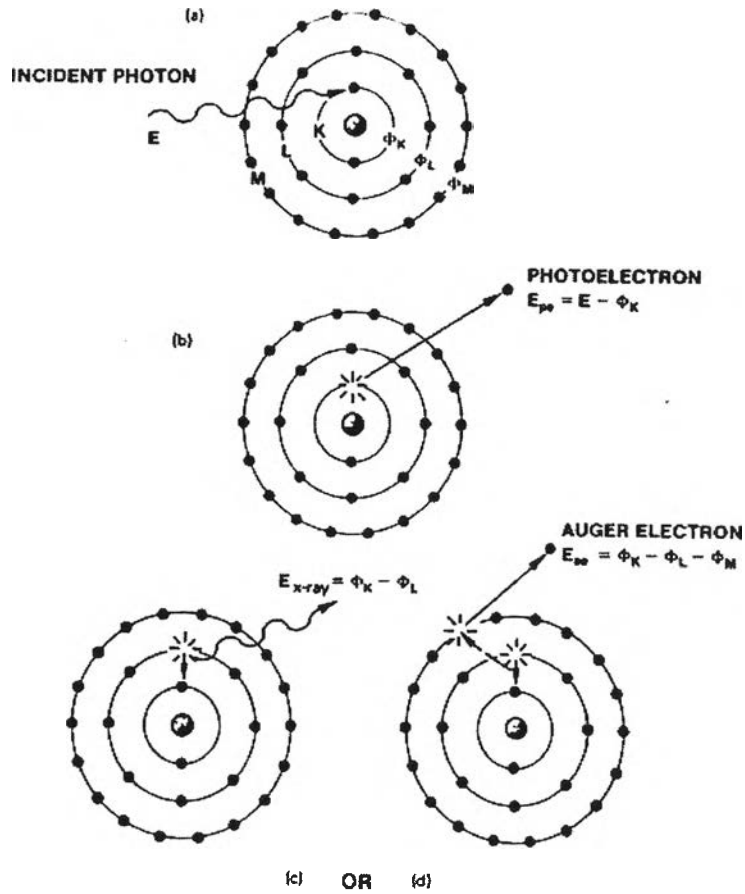
อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับตัวกลางนั้น จะมีลักษณะเช่นเดียวกับอันตรกิริยาของรังสีแกมมา ซึ่งรังสีทั้งสองนั้นมีคุณสมบัติที่เหมือนกันเพียงแต่แตกต่างกันที่แหล่งกำเนิดโดยรังสีแกมมานั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายในนิวเคลียส ส่วนรังสีเอกซ์นั้นจะเกิดที่ชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส แต่เนื่องจากทั้งรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ก็เป็นรังสีที่ประพฤติตัวเป็นได้ทั้งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอนุภาค (Wave particle duality) เรียกว่า “โฟตอน (Photon)” ดังนั้นโฟตอนจึงสามารถใช้เรียกแทนทั้งรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ อันตรกิริยาของโฟตอนกับตัวกลางนั้นสามารถแยกได้ตามลักษณะของอนุภาคที่ถูกเข้าทำอันตรกิริยาด้วย เช่น อิเล็กตรอนหรือนิวเคลียส หรือแยกได้ตามลักษณะของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น เช่น การดูดกลืนหรือการกระเจิง ซึ่ง ณ ที่นี้จะกล่าวตามลักษณะของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric absorption) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) และการกระเจิงแบบเรย์เลห์ (Rayleigh scattering)

2.2.1 การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็กทริก

การดูดกลืนในลักษณะนี้ เกิดจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่าปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) คือปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนในชั้นวงโคจรของอะตอมดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนไว้ทั้งหมดและทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกไปจากอะตอม อะตอมจึงสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออน (Ion) ส่วนอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากอะตอมเรียกว่า “โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron)” เนื่องจากอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสมืออยู่ในชั้นพลังงาน ยึดเหนี่ยวต่างๆ กัน หากอิเล็กตรอนชั้นใน ๆ (ชั้น K หรือชั้น L) ดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนและอิเล็กตรอนนั้นหลุดออกจากอะตอม ก็จะทำให้เกิดที่ว่างขึ้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นนอกๆ ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าก็จะเข้าไปแทนที่ว่างนั้น พร้อมปลดปล่อยพลังงานส่วนหนึ่งออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งก็คือ รังสีเอกซ์เรอังก์ที่กล่าวมาแล้วนั่นเอง และโฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีค่าพลังงานเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของโฟตอนที่เข้าชนกับพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในชั้นวงโคจรนั้น ดังสมการ (2.1)

$$E_{pe} = E - \Phi_K \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ	E_{pe}	คือ	พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอน
	E	คือ	พลังงานของโฟตอนที่เข้าชน
	Φ_K	คือ	พลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ชั้นวงโคจรนั้น ๆ



รูปที่ 2.2 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

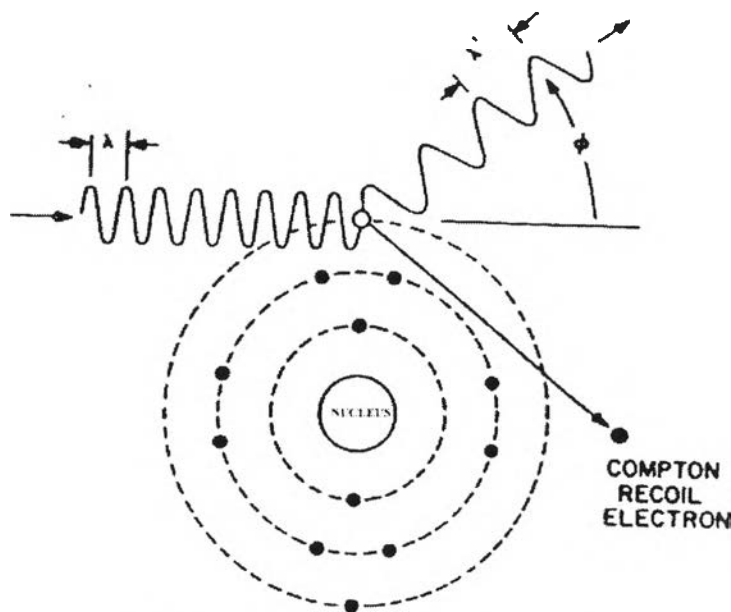
โอกาสในการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อตัวกลางเป็นธาตุเบา และพลังงานของโฟตอนที่เข้าชนมีค่าสูงขึ้น

2.2.2 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering)

การกระเจิงแบบคอมป์ตัน เป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง โฟตอนกับอิเล็กตรอนในวงโคจร เมื่อโฟตอนเข้าชนกับอิเล็กตรอนดังกล่าว อิเล็กตรอนนั้นจะหลุดออกไปจากอะตอมพร้อมกับพลังงานบางส่วนของโฟตอนที่เข้าชน ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปมีชื่อเรียกว่า “คอมป์ตันอิเล็กตรอน (Compton electron)” ส่วนโฟตอนที่กระเจิงออกไปนั้น จะมีพลังงานลดลง โดยผลรวมของพลังงานระหว่างคอมป์ตันอิเล็กตรอนกับ โฟตอนที่กระเจิงออกไป จะมีค่าเท่ากับพลังงานของโฟตอนเริ่มต้นที่เข้าชน พลังงานของโฟตอนที่เกิดการกระเจิงมีความสัมพันธ์กับพลังงานของโฟตอนที่เข้าชน ดังสมการ (2.2)

$$E' = \frac{E}{[1 + 0.001957E(1 - \cos \phi)]} \dots\dots\dots (2.2)$$

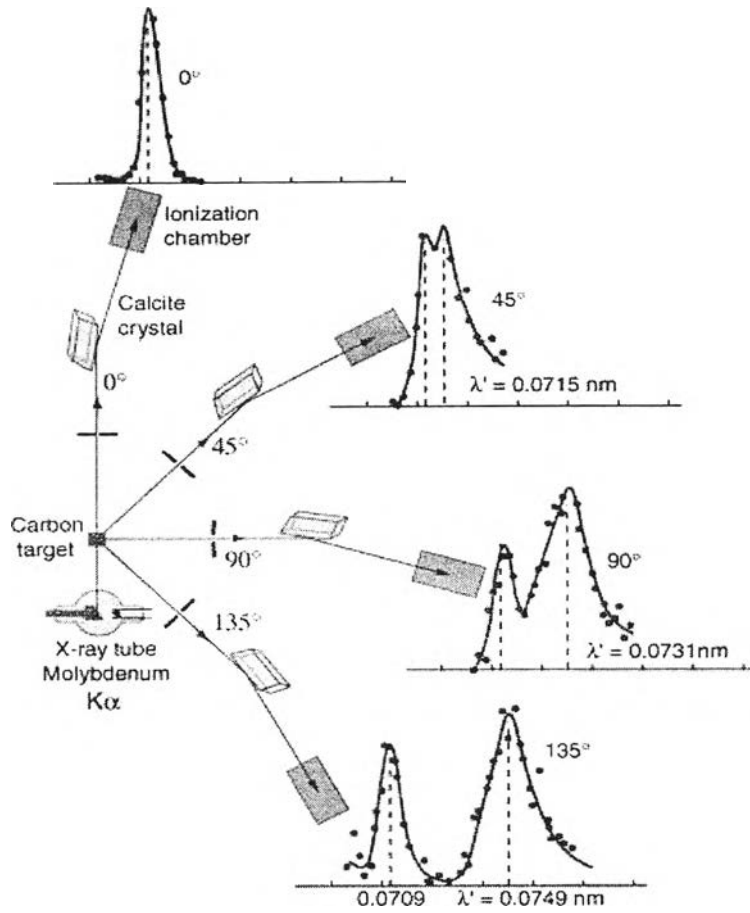
- เมื่อ E' คือ พลังงานในหน่วย keV ของโฟตอนที่กระเจิงออกไป
 E คือ พลังงานในหน่วย keV ของโฟตอนที่เข้าชน
 ϕ คือ มุมที่โฟตอนกระเจิงออกไปจากแนวเดิม



รูปที่ 2.3 การเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตัน

เมื่อมุมของการกระเจิงเปลี่ยนไปจะทำให้ค่าพลังงานของโฟตอนที่กระเจิงออกมา มีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วยตามสมการที่ 2.2 สเปกตรัมการกระเจิงแบบคอมป์ตัน ณ มุมต่างๆ กัน แสดงดังรูปที่ 2.4

โอกาสในการเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันนั้นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อโฟตอนที่เข้าชน มีพลังงานสูงขึ้น จนถึงช่วงพลังงานประมาณ 100 keV ตัวกลางที่ถูกชนมีเลขอะตอมต่ำลง และมุมที่ตกกระทบมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้การเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันนั้นจะเกิดขึ้นเป็นอันตรกิริยาหลักก็ต่อเมื่อพลังงานของโฟตอนที่เข้าชนมีค่าสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน การกระเจิงแบบคอมป์ตันนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ เนื่องจากจะก่อให้เกิดรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่ำกว่ารังสีเอกซ์ปฐมภูมิรบกวนในสเปกตรัม



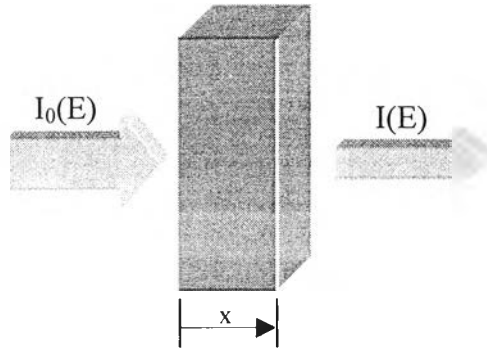
รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงการกระเจิงแบบคอมป์ตันที่มุมต่างๆ

2.3 การลดทอนรังสีเอกซ์

เมื่อลำของรังสีเอกซ์ผ่านเข้าไปยังตัวกลาง โฟตอนบางตัวจะทำอันตรกิริยากับอะตอมของตัวกลาง ซึ่งอันตรกิริยาที่เกิดขึ้น ได้แก่ ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบคอมป์ตัน และการกระเจิงแบบเรย์เลย์ เหตุการณ์เหล่านี้จะทำให้ปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์มีค่าลดลง ซึ่งสามารถนิยามได้จากความสัมพันธ์ที่เป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law)

$$I(E) = I_0(E)e^{-\mu(E)X} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ	$I(E)$	คือ	ความเข้มของโฟตอนที่ผ่านตัวกลางออกมาโดยไม่ทำอันตรกิริยาใดๆ กับอะตอมของตัวกลาง
	$I_0(E)$	คือ	ความเข้มของโฟตอนที่เข้าชนกับตัวกลาง
	$\mu(E)$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient)
	X	คือ	ความหนาของตัวกลางในหน่วยเซนติเมตร



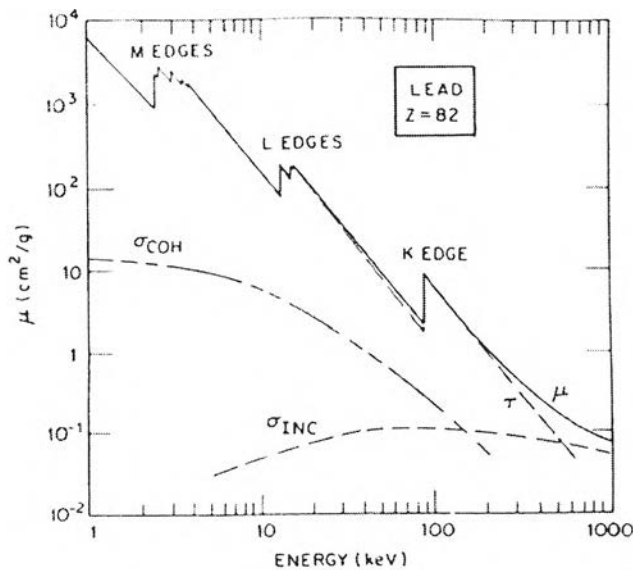
รูปที่ 2.5 ภาพแสดงลักษณะการลดทอนของรังสี

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น $\mu(E)$ เป็นค่าที่บอกถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาต่างๆ ของโฟตอนกับตัวกลาง ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ดังนี้

$$\mu(E) = \mu_{pe}(E) + \mu_{coh}(E) + \mu_{inc}(E) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

- เมื่อ $\mu_{pe}(E)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็กทริกเชิงเส้น
- $\mu_{coh}(E)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแบบไม่สูญเสียพลังงานเชิงเส้น
- $\mu_{inc}(E)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแบบสูญเสียพลังงานเชิงเส้น

ค่าสัมประสิทธิ์แต่ละค่าที่กล่าวมานั้น จะมีค่าเฉพาะขึ้นอยู่กับพลังงานของโฟตอนและเลขอะตอมของตัวกลางนั้น ๆ ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ อาจเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ ดังนี้ คือ μ , μ_{pe} , μ_{coh} และ μ_{inc}



รูปที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของธาตุตะกั่ว

2.4 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์

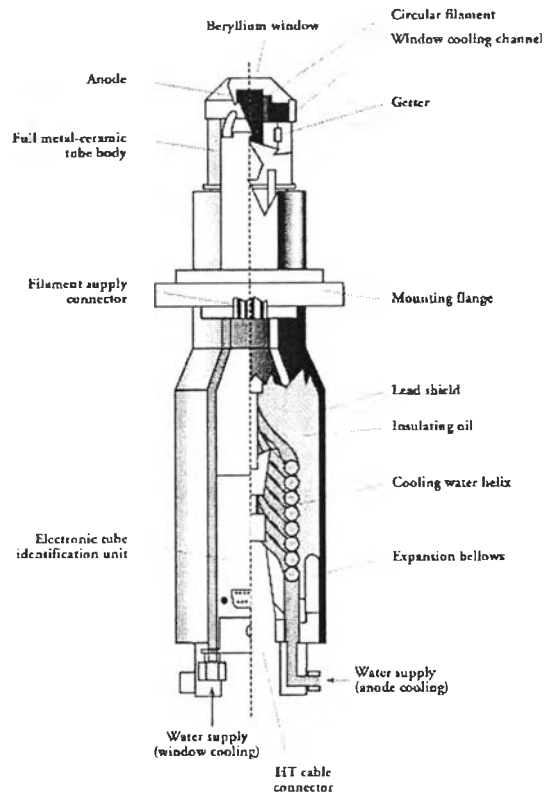
จากหลักการเกิดรังสีเอกซ์ที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.1 สามารถจำแนกต้นกำเนิดของรังสีเอกซ์ได้ออกเป็น 2 ชนิด คือ ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาจากการเร่งอนุภาคที่มีประจุหรืออิเล็กตรอนเข้าชนกับตัวกลางแล้วมีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะเป็นแบบสเปกตรัมต่อเนื่องออกมา ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบนี้ ได้แก่ หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ส่วนต้นกำเนิดรังสีเอกซ์อีกชนิดที่ปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ในลักษณะที่เป็นสเปกตรัมของอนุกรมพลังงานเดี่ยว ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นนอกเข้าสู่ วงโคจรชั้นในแล้วปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-rays) ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบนี้ ได้แก่ ไอโซโทปรังสี

2.4.1 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

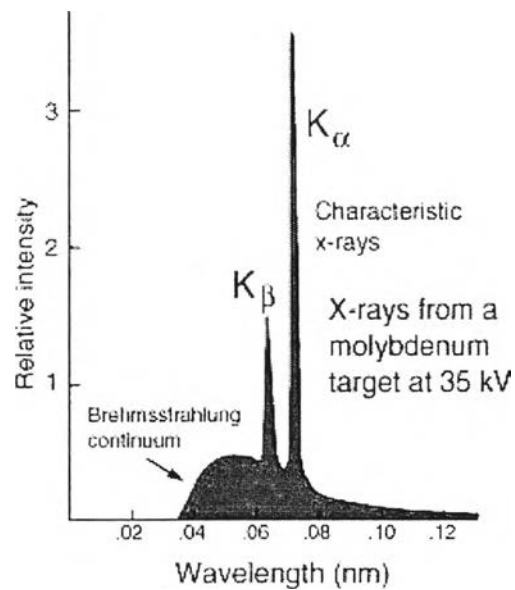
หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ จะมีหลักการโดยทั่วไปในการสร้างรังสีเอกซ์ คือ การเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงภายในหลอดสุญญากาศด้วยความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด อิเล็กตรอนที่ถูกเร่งจะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปชนเป้า (Target) ซึ่งเป็นส่วนของขั้วแอโนด จากนั้นรังสีเอกซ์จะถูกปลดปล่อยออกมาจากเป้านั้น

โดยส่วนใหญ่แล้วหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก ๆ ที่สำคัญได้แก่ หลอดที่เป็นสุญญากาศซึ่งอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งจะเคลื่อนที่อยู่ภายในหลอดนี้ โครงสร้างของขั้วแคโทด ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นไส้หลอด (Filament) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดของอิเล็กตรอน โครงสร้างของขั้วแอโนด ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเป้า ซึ่งทำมาจากโลหะที่มีประสิทธิภาพสูงในการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา

รังสีเอกซ์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์นั้น ประกอบไปด้วยรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง และรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของวัสดุที่นำมาทำเป็นเป้า ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 แผนภาพโครงสร้างของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์



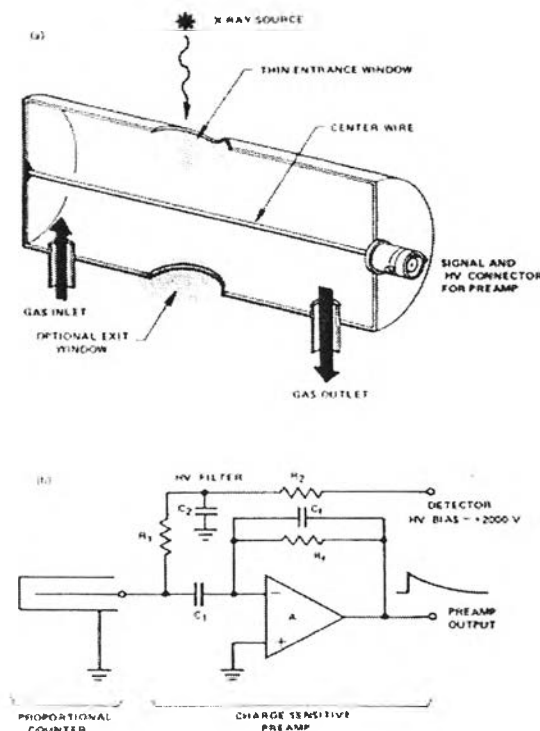
รูปที่ 2.8 รังสีเอกซ์แบบสเปกตรัมต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะตัวจากหลอดรังสีเอกซ์ที่ใช้เป้าโมลิบดีนัม

2.5 หัววัดรังสีเอกซ์

โดยทั่วไปหัววัดรังสีที่ใช้ในการวัดรังสีเอกซ์แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ (1) หัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซ ได้แก่ หัววัดพรอพอร์ชันแนล (2) หัววัดรังสีชนิดเรืองแสง ได้แก่ หัววัดโซเดียมไอโอไดด์ [NaI(Tl)] (3) หัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำ ได้แก่ หัววัด Si(Li) และ หัววัด HPGe หัววัดรังสีทั้งสามชนิดแตกต่างกันที่คุณสมบัติของตัวกลางที่ทำอันตรกิริยากับรังสี ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะหัววัด ชนิดบรรจุก๊าซ และ ชนิดเรืองแสง

2.5.1 หัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซพรอพอร์ชันแนล

หัววัดรังสีชนิดนี้ ใช้ก๊าซเป็นตัวกลางในการทำอันตรกิริยากับรังสีโดยอาศัยหลักการแตกตัวเป็นประจุ (Ionization) ของก๊าซ เมื่อโฟตอนเข้าชนกับอะตอมของก๊าซโฟตอนนั้นจะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในชั้นวงโคจร ทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกจากวงโคจรพร้อมกับพลังงานจลน์ที่ได้รับจากโฟตอนและเคลื่อนที่ชนกับอะตอมของก๊าซอื่น ๆ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นคู่ประจุ ซึ่งคู่ประจุทั้งหมดที่เกิดขึ้นนั้นจะมีจำนวนแปรผันตามพลังงานของรังสี คู่ประจุบวกและลบที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดและแอโนดของหัววัดรังสีเกิดเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งสามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาพลังงานและความเข้มของรังสีได้

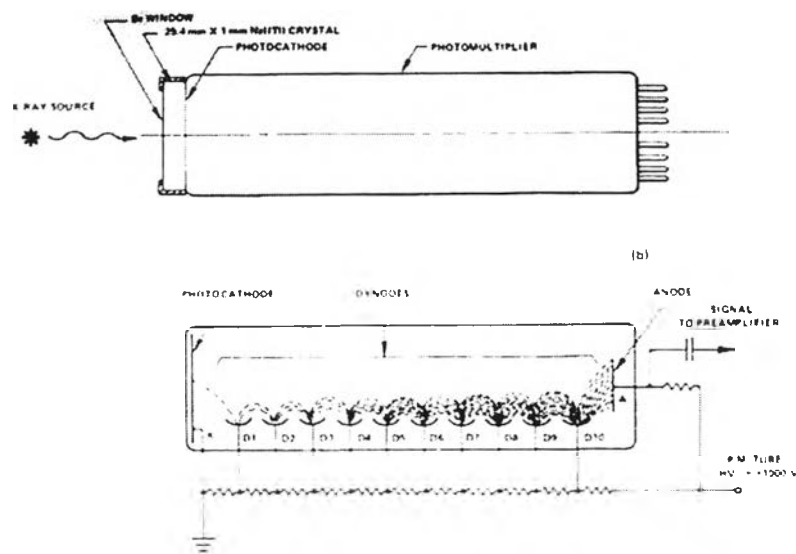


รูปที่ 2.9 รูปแบบของหัววัดพรอพอร์ชันแนล

ประสิทธิภาพและความสามารถในการแยกพลังงาน (Resolution) ของหัววัดชนิดนี้ จะขึ้นอยู่กับชนิดและความดันภายในของก๊าซที่ใช้ การเลือกใช้หัววัดพรอพอร์ชันแนลในการวัด รังสีเอกซ์นั้นจะต้องคำนึงถึงชนิดของก๊าซที่บรรจุอยู่ในหัววัด เนื่องจากการเกิดเอสเคปพีค (Escape peak) ซึ่งเกิดจากการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของก๊าซภายในหัววัดเมื่อถูกคลื่นพลังงานจากรังสีเอกซ์จากภายนอก แล้วรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของก๊าซนั้นไม่ได้ถูกดูดกลืนไว้ภายในหัววัด ทำให้พลังงานที่ถูกดูดกลืนจากรังสีเอกซ์จากภายนอกหัววัดนั้นมีค่าพลังงานน้อยกว่าค่าพลังงานเดิม ซึ่งค่าพลังงานที่น้อยลงนี้จะไปปรากฏอยู่ที่เอสเคปพีค ทำให้ประสิทธิภาพในการวัดรังสีเอกซ์จากภายนอกหัววัดนั้นมีค่าลดลง

2.5.2 หัววัดรังสีชนิดเรืองแสงโซเดียมไอโอไดด์ [NaI(Tl)]

การเรืองแสงของสารเรืองแสงซึ่งเป็นตัวกลางของหัววัดรังสีเอกซ์นั้น เกิดขึ้นจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีเอกซ์กับอะตอมของตัวกลาง ซึ่งส่วนใหญ่อันตรกิริยาที่เกิดขึ้น คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก โดยรังสีเอกซ์จะชนกับอิเล็กตรอนของอะตอมของสารเรืองแสง และถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน ซึ่งโฟโตอิเล็กตรอนนี้จะไปทำอันตรกิริยากับสารเรืองแสง และให้แสงฟลิวออออกมา โดยความเข้มของแสงฟลิวออที่ปล่อยออกมาจะแปรผันตามพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้าทำอันตรกิริยาด้วย



รูปที่ 2.10 รูปแบบของหัววัดโซเดียมไอโอไดด์แบบบาง

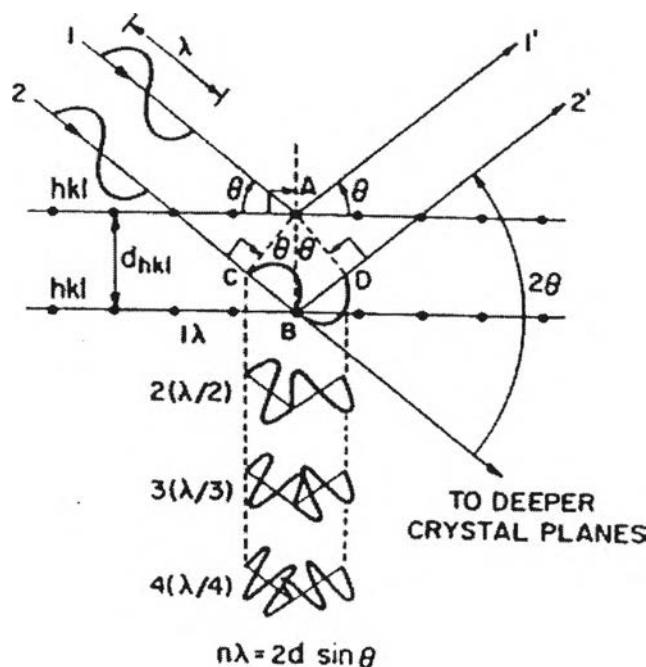
หัววัดรังสีชนิดเรืองแสงโซเดียมไอโอไดด์แบบบางที่ใช้วัดรังสีเอกซ์นี้ มีประสิทธิภาพสูงในการวัดรังสีเอกซ์แต่มีข้อจำกัดในการวัดรังสีเอกซ์พลังงานต่ำและความสามารถในการแยกพลังงานต่ำกว่าหัววัดชนิดบรรจุก๊าซพรอพอร์ชันแนล

2.6 Bragg's Law

เป็นหลักการพื้นฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความยาวคลื่นกับมุมที่คลื่นตกกระทบในตัวกลางที่ระนาบต่างๆ โดยคลื่นที่ความยาวคลื่นต่างกันจะเกิดการหักเห ณ มุมเฉพาะตัวซึ่งเรียกว่ามุม Bragg (Bragg angle) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.5

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

เมื่อ	d	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก
	θ	คือ	มุมตกกระทบ ซึ่งเท่ากับมุมสะท้อน
	n	คือ	เลขจำนวนเต็มมีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, ... เมื่อ $n = 1$ จะเรียกสเปกตรัมรังสีเอกซ์ที่เกิดคลื่นเสริมกันว่า First order of diffraction เมื่อ $n = 2$ จะเรียกสเปกตรัมรังสีเอกซ์ที่เกิดคลื่นเสริมกันว่า Second order of diffraction เมื่อ $n = 3$ จะเรียกสเปกตรัมรังสีเอกซ์ที่เกิดคลื่นเสริมกันว่า Third order of diffraction
	λ	คือ	ความยาวคลื่น



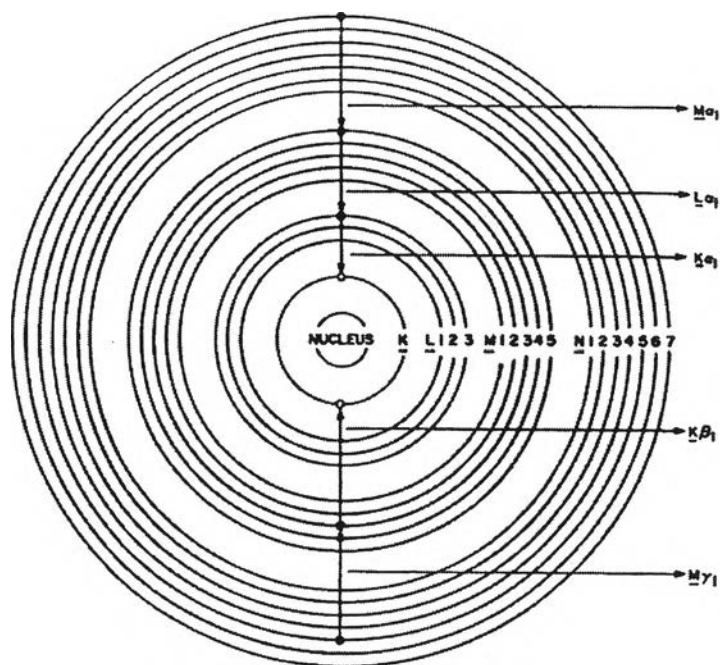
รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเมื่อผ่านผลึกภายใต้เงื่อนไขของ Bragg's Law

ในระบบวิเคราะห์สามารถวัดมุมตกกระทบหรือมุมสะท้อน และทราบค่า $2d$ จากข้อมูลเฉพาะตัวของผลึกได้ จึงสามารถคำนวณหาค่าของ λ ได้จากสมการที่ 2.5

2.7 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

2.7.1 หลักการเรืองรังสีเอกซ์

จากอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับตัวกลาง ได้แก่ การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็กทริก และการกระเจิงแบบคอมป์ตันนั้น ผลที่เกิดขึ้นตามมาคือ การหลุดออกไปจากชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอน ซึ่งการหลุดออกไปจากชั้นวงโคจรนั้นทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้นภายในชั้นวงโคจร ผลที่เกิดขึ้นตามมาคือ การแทนที่ของอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นวงโคจรถัดออกไป ซึ่งการแทนที่ของอิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรออกไปแทนที่ยังที่ว่างในวงโคจรชั้นในนั้น อิเล็กตรอนจะคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่ารังสีเอกซ์เรือง (Fluorescent x-rays) หรือ รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic x-rays)



รูปที่ 2.12 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ถูกปล่อยออกมา นั้นจะประกอบไปด้วยอนุกรมของรังสีเอกซ์พลังงานเดียวหลายพลังงานซึ่งแต่ละพลังงานจะมีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานระหว่างชั้นวงโคจรที่อิเล็กตรอนเข้าแทนที่ และมีค่าเฉพาะในแต่ละธาตุ ซึ่งอนุกรมของรังสีเอกซ์ที่ถูกปล่อยออกมาจากแต่ละชั้นวงโคจรจะมีชื่อเรียกตามชั้นวงโคจรที่เกิดช่องว่างและถูกอิเล็กตรอนเข้าแทนที่ เช่น อนุกรมของรังสีเอกซ์ที่ถูกปล่อยออกมาจากการแทนที่ของอิเล็กตรอนที่วงโคจรชั้น K จะเรียกว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัวอนุกรม K ถึงแม้ว่าการแทนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างนั้นจะเป็นอิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นใดก็ตาม

การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวอนุกรมใด ๆ นั้น พลังงานของรังสีที่ใช้กระตุ้นจะต้องมีค่ามากพอในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากชั้นวงโคจรนั้น ซึ่งค่าพลังงานอย่างน้อยที่เพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปนั้นเรียกว่า absorption edge

2.7.2 ระบบวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

ในการวิเคราะห์ธาตุโดยการเรืองรังสีเอกซ์นั้น เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ คือ

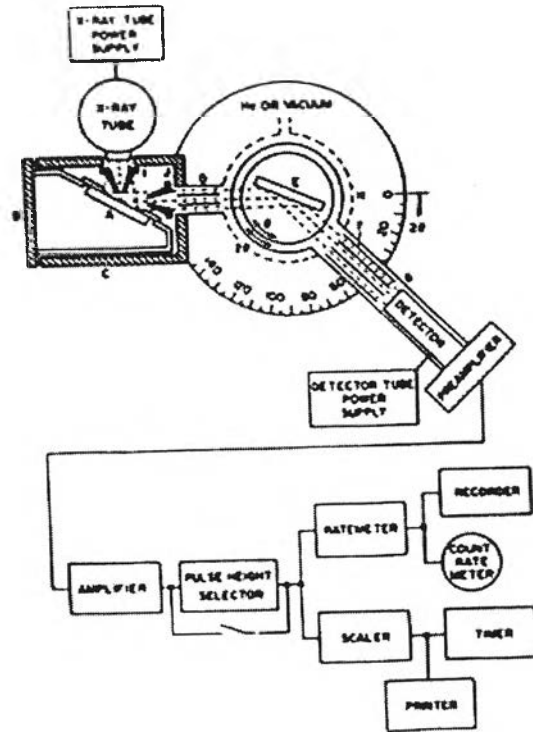
Non – dispersion หรือ Energy Dispersive X-ray Fluorescence System (EDXRF)

ระบบ Non – dispersion เป็นระบบที่วิเคราะห์รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างโดยตรง โดยที่ต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ (Primary radiation source) อาจมาจากแหล่งกำเนิดรังสี (X – ray generator) จากหลอดรังสีเอกซ์ หรือ ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ที่เป็นธาตุกัมมันตรังสี

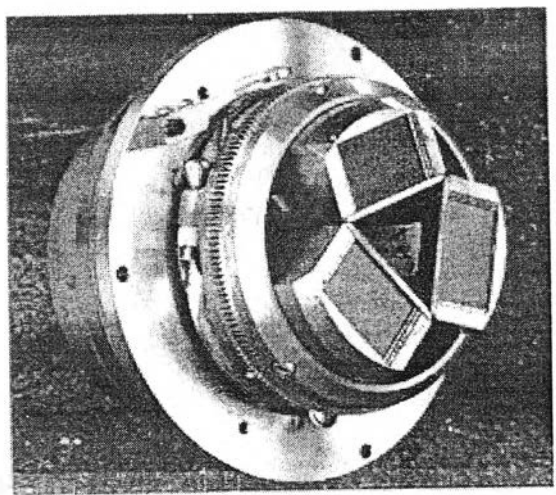
Dispersion หรือ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence System (WDXRF)

ระบบ WDXRF เป็นระบบวิเคราะห์รังสีเอกซ์ โดยคุณสมบัติการเลี้ยวเบน (diffraction) และการแทรกสอด (interference) ของรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย

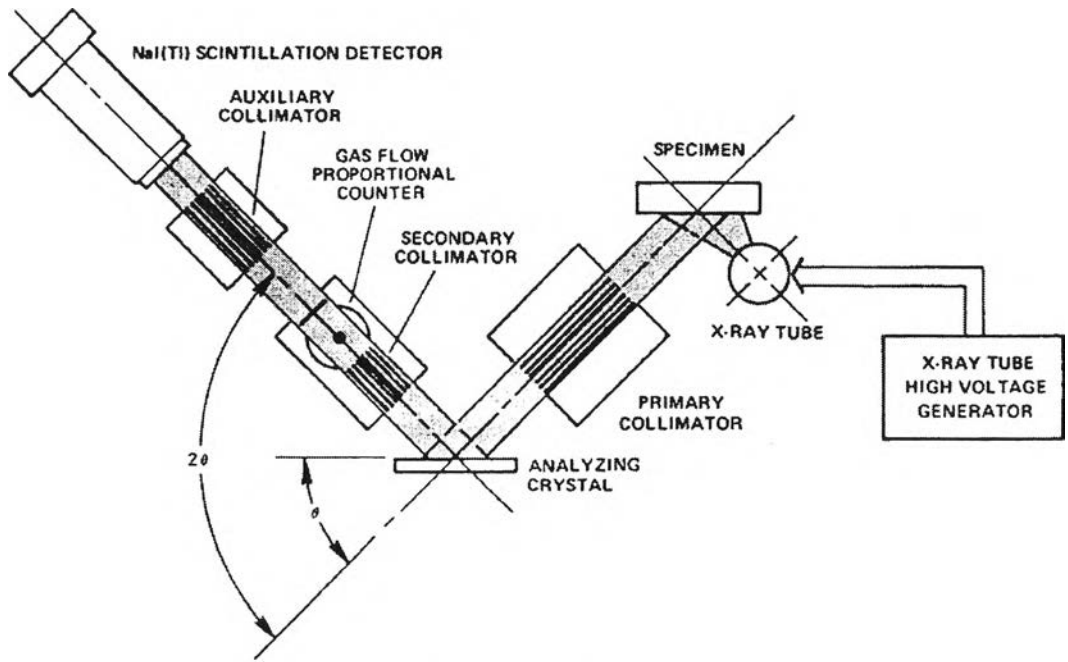
1. ผลึกวิเคราะห์ (Analyzing crystal) ทำหน้าที่กระจายหรือแยกรังสีเอกซ์ออกไปให้มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ซึ่งมีค่าความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นจะหักล้างกัน และเสริมสร้างกันไป มุมที่เกิดคลื่นเสริมกันของแต่ละความยาวคลื่นเป็นไปตาม Bragg's law ซึ่งรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กันจะถูกวัดความเข้มรังสี ด้วยการสแกน (scan) ของหัววัดรังสี สัญญาณที่วัดได้จะถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูลแล้วถ่ายทอดออกมาเป็นสเปกตรัมด้วยเครื่องพิมพ์หรือ เครื่องเขียนกราฟ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์กับมุม 2θ ซึ่งแปรผันตามความยาวคลื่น
2. ต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ ได้แก่ หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์
3. หัววัดรังสีเอกซ์ ส่วนมากใช้หัวชนิดเรืองแสงและหัวชนิดพรอพอร์ชันแนล
4. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณเป็นแบบหลายช่อง (MCA)
5. Goniometer
6. Preamplifier และ amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและปรับแต่งสัญญาณ
7. Collimator



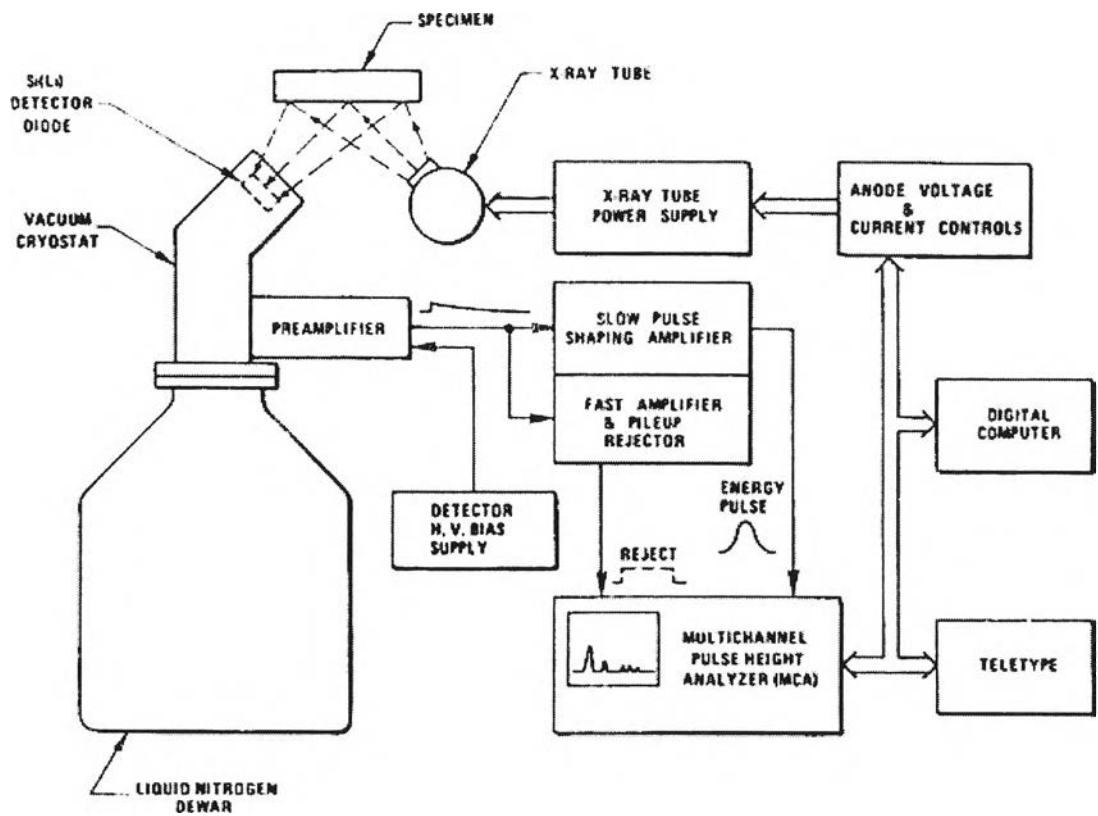
รูปที่ 2.13: Goniometer



รูปที่ 2.14 Collimator



รูปที่ 2.15: แผนภาพการจัดวางระบบวิเคราะห์ WDX

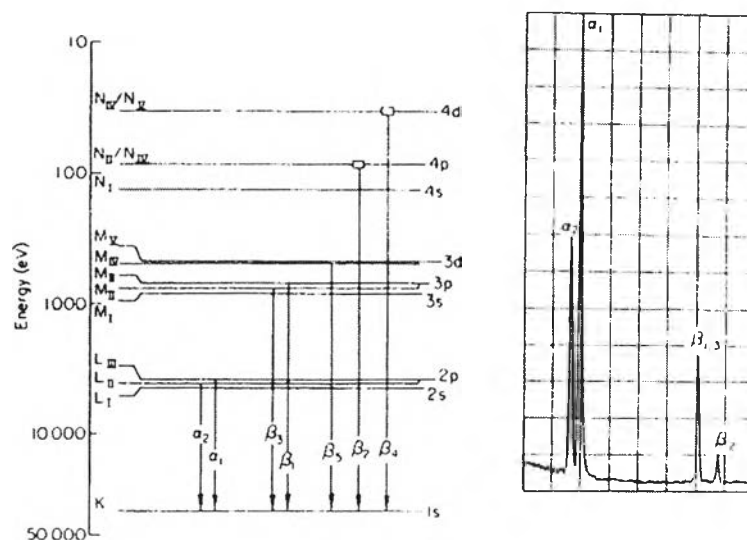


รูปที่ 2.16: แผนผังการจัดระบบวิเคราะห์ EDX

2.8 เทคนิคการวิเคราะห์

2.8.1 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยวิธี XRF นั้นกระทำได้ง่ายและรวดเร็ว โดยระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์อาจเป็น EDXRF เนื่องจากระบบนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA) ทำให้สามารถจัดแบ่งช่องรับสัญญาณให้ครอบคลุมช่วงพลังงานกว้าง ๆ ได้ ด้วยเหตุนี้ การตรวจวัดพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้าสู่หัววัดรังสี จึงสามารถกระทำได้พร้อม ๆ กันหลาย ๆ ระดับพลังงาน แต่มีข้อเสียคือเกิดมีปัญหาในการเกิดซ้อนกันของพีคที่มีพลังงานใกล้เคียงกัน เนื่องจากที่ขีดจำกัด ในด้านความสามารถในการแยกพลังงานรังสี ส่วนระบบ WDXRF ระบบจะยุ่งยาก แต่มีข้อดีคือมีความสามารถแยกพลังงานรังสีเอกซ์ได้ดีกว่าระบบ EDXRF เพราะผลึกวิเคราะห์สามารถแยกพลังงานได้ดีกว่าความสามารถในการแยกพลังงานของหัววัดรังสี โดยเฉพาะในช่วงพลังงานรังสีเอกซ์ต่ำกว่า 20 KeV ลงไป



รูปที่ 2.17 สเปกตรัมของรังสีเอกซ์เรืองชั้นอนุกรม K ของดีบุก

2.8.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

การวิเคราะห์ปริมาณด้วยวิธีวิเคราะห์เรืองรังสีเอกซ์นั้น เป็นการวิเคราะห์ความเข้มของเรืองรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งผู้วิเคราะห์จะต้องมีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการดูดกลืนและการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ของธาตุนั้นต่าง ๆ เพื่อจะได้ช่วยในการแก้ไขและปรับเทียบผลวิเคราะห์ให้ถูกต้องแม่นยำ

อย่างมากที่สุด เนื่องจากความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะผันแปรไปตามความเข้มของธาตุที่สนใจและธาตุอื่นที่เป็นส่วนประกอบในตัวอย่างด้วย ผลจาก matrix elements หรือ matrix effects ที่สำคัญ มี 2 แบบ ที่ควรทราบ คือ

Matrix absorption: เมื่อส่วนประกอบของตัวอย่างเปลี่ยนไป ย่อมทำให้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งจะเป็นผลต่อทั้งการดูดกลืนรังสีเอกซ์ปฐมภูมิและการดูดกลืนรังสีเอกซ์รองที่ปล่อยออกมาจากตัวอย่าง

Enhancement effect (multiple excitation): เกิดขึ้นจากการที่รังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่เป็นส่วนประกอบในตัวอย่าง (Matrix Element) มีพลังงานสูงกว่า(ความยาวคลื่นสั้นกว่า) absorption edge ของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ (Analyte Element) ดังนั้นธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ซึ่งมี absorption edge ต่ำกว่าพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่เป็นส่วนประกอบนั้น สามารถที่จะถูกกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์รองได้ด้วยอีกทางหนึ่งนอกจากถูกการกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ปฐมภูมิเพียงอย่างเดียว ปรากฏการณ์เช่นนี้จะมีผลมากในกรณีที่พลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่เป็นส่วนประกอบในตัวอย่าง สูงกว่า absorption edge ของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ เพียงเล็กน้อย

ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากสารตัวอย่างกับความเข้มรังสีเอกซ์ที่ได้จากสารมาตรฐาน โดยความเข้มที่เกิดจากธาตุนั้นจะเกี่ยวข้องกับการดูดกลืนและการปลดปล่อยของรังสีเอกซ์ของธาตุนั้น รวมทั้งธาตุต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของสารต่าง ๆ หรือที่เรียกว่า “matrix element” ดังนั้นในการวิเคราะห์จะต้องแก้ไขหรือลดผลจาก matrix effect นี้ทำให้ในทางปฏิบัติมีเทคนิคการวิเคราะห์เชิงปริมาณหลายวิธี เช่น

1. Calibration standardization methods
2. Thin film methods
3. Matrix-dilution methods
4. Standard addition and dilution methods
5. Internal standardization methods
6. Standardization with scattered x-ray
7. Experimental correction
8. Mathematical correction

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ได้ใช้วิธีการสร้างกราฟเปรียบเทียบ (Calibration standardization methods) วิธีเติมสารมาตรฐาน (Standard addition methods) และ วิธีการเติมธาตุข้างเคียง (internal standardization methods) ประกอบกัน

วิธีการสร้างกราฟเปรียบเทียบ เป็นเทคนิคการสร้างกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองที่วัดได้กับปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ โดยกราฟนี้จะสร้างขึ้นมาจากการนำสารมาตรฐานซึ่งทราบค่าความเข้มข้นแน่นอนต่างๆ กัน และหาอัตรานับรังสีต่อหน่วยเวลา

ในการหาปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่สนใจในสารตัวอย่าง ด้วยการนำสารตัวอย่างนั้นมานับความเข้มของรังสีเอกซ์เรือง ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ โดยปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่สนใจในสารตัวอย่าง (C%) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$I_p = MC + I_b \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

$$C = (I_p - I_b) / M \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

- เมื่อ I_p คือ อัตราการนับที่ได้จากสารตัวอย่าง (counts per second)
 I_b คือ อัตรานับเมื่อไม่มีสารตัวอย่าง (counts per second)
 C คือ ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง (ppm)
 M คือ ความชันของกราฟเป็น Calibration factor ของระบบวัด

ในการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธีนี้สารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะต้องมีลักษณะเหมือนกัน กล่าวคือ มีสถานะเดียวกันและองค์ประกอบในเนื้อสารต้องเหมือนกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีตัวอย่างที่เตรียมขึ้นเป็นผง จะต้องเตรียมให้มีขนาดเม็ดละเอียดและความหนาแน่นใกล้เคียงกัน พื้นที่หน้าตัด และตำแหน่งที่รับรังสีจะต้องเท่ากันจึงจะเปรียบเทียบกันได้ถูกต้อง

การเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน สารตัวอย่างกับสารมาตรฐานที่จะเปรียบเทียบกันได้จะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์กับการดูดกลืนใกล้เคียงกันมากที่สุด จึงจะถูกต้องมากที่สุดนั้นก็หมายความว่า ส่วนประกอบของตัวอย่างกับสารมาตรฐานจะต้องมีส่วนประกอบเหมือนกัน และมีความเข้มข้นของส่วนประกอบใกล้เคียงกัน การวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบความเข้มรังสีของธาตุที่สนใจระหว่างตัวอย่างกับสารมาตรฐานจะต้องมีสารมาตรฐานที่มีส่วนประกอบและความเข้มข้นต่างๆ

มากพอเพื่อจะได้เลือกให้เหมาะสมกับตัวอย่างแต่ละแบบ สารมาตรฐานสามารถเตรียมขึ้นมาได้จากการผสมสารเคมีมาตรฐานให้มีส่วนประกอบและความเข้มข้นตามต้องการ

วิธีเติมธาตุมาตรฐาน การเติมธาตุมาตรฐานลงไปในตัวอย่งนั้นเป็นการเติมธาตุชนิดเดียวกับธาตุที่จะวิเคราะห์ลงไป เพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เพิ่มขึ้นเทียบกับความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวก่อนเติมธาตุมาตรฐานฐาน แล้วนำค่ามาคำนวณดังสมการ

$$\frac{I_x}{I_{x+\Delta x}} = \frac{C_x}{DC_x + C_{\Delta x}} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

- เมื่อ C_x คือ ความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ
 I_x คือ ความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่สนใจ
 D คือ dilution factor ซึ่งเท่ากับ
 น้ำหนักของตัวอย่าง / (น้ำหนักของตัวอย่าง + น้ำหนักของสารมาตรฐานที่เติม)
 $C_{\Delta x}$ คือ ความเข้มข้นของธาตุที่สนใจจากสารมาตรฐานที่เติมลงไป ซึ่งเท่ากับ
 น้ำหนักของธาตุที่เติมลงไป / (น้ำหนักของตัวอย่าง + น้ำหนักของสารมาตรฐานที่เติม)

วิธีการเติมธาตุข้างเคียง เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่เติมธาตุมาตรฐานคนละธาตุกับธาตุกับธาตุที่สนใจลงไปในตัวอย่ง ธาตุที่เติมลงไปเป็น internal standard ปกติจะเติมธาตุที่มีเลขอะตอมมากหรือน้อยกว่าธาตุที่สนใจอยู่ 1 ลงไป

การคำนวณความเข้มข้นของธาตุที่สนใจสามารถหาได้จาก

$$C_A = C_{IS} \left(\frac{1}{D} \right) \left(\frac{I_{IS}}{I_A} \right)_{std} \left(\frac{I_A}{I_{IS}} \right)_{sample} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

- เมื่อ C_A คือ ความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ
 C_{IS} คือ ความเข้มข้นของ internal standard ในตัวอย่าง
 $(I_{IS}/I_A)_{std}$ คือ “intensity correction factor” เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์ของ internal standard ต่อความเข้มรังสีเอกซ์ของธาตุที่สนใจ เมื่อ internal standard กับธาตุที่สนใจมีความเข้มข้นเท่ากัน
 $(I_A/I_{IS})_{sample}$ คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์ของธาตุที่สนใจต่อ ความเข้มรังสีเอกซ์ของ internal standard ในตัวอย่าง

2.9 หญ้าแฝก

หญ้าแฝก หรือ Vetiver เป็นพืชตระกูลหญ้าเช่นเดียวกับ ข้าวโพด ข้าวฟ่าง อ้อย และตะไคร้ พบกระจายทั่วไปหลาย ๆ พื้นที่ เป็นพืชมีการเจริญเติบโตได้ดีในดินเกือบทุกชนิด มีการกระจายตัวและเจริญเติบโตได้ดีทั้งในสภาพพื้นที่ทั้งที่ลุ่ม และที่ดอน ในดินสภาพต่างๆกันและทนต่อสภาพความแห้งแล้งความเปียกแฉะและสภาพน้ำท่วมขังได้ดี เพราะมีระบบรากลึกและใบแคบ ดังนั้นหญ้าแฝกจึงถูกนำไปปรับประยุกต์ใช้ในงานสิ่งแวดล้อมต่างๆไป ในประเทศไทยหญ้าแฝกเป็นพืชที่ขึ้นได้และมีการเจริญเติบโตที่ดี เนื่องจากสภาวะภูมิอากาศและภูมิประเทศที่เหมาะสมพันธุ์ที่พบในประเทศไทยจำแนกออกได้ 2 ชนิดได้แก่ หญ้าแฝกหอม และหญ้าแฝกดอน โดยพื้นฐานของหญ้าแฝก จะขึ้นเป็นกอใหญ่ มีขนาดความกว้างของกอต่างๆ ประมาณ 30 ซม.และความสูงของต้นประมาณ 50-150 ซม. ใบของหญ้าแฝกมีลักษณะแคบและบางยาวประมาณ 75 ซม. และ กว้างประมาณ 8 มม. มีรากเป็นกระจุกเหมือนใยฟองน้ำสามารถดูดซับน้ำได้ดีถ้านำมาปลูกเป็นแถวจะช่วยในการดักตะกอนดินและป้องกันการพังทลายของดินได้ดี

ลักษณะทั่วไปของหญ้าแฝก เป็นกอ พุ่ม ใบยาวตั้งตรงขึ้นสูง และ สูงประมาณ 150-200 ซม. แตกตะเกียงและแตกแขนงสำคัญ ใบมีขนาด ยาว 45-100 ซม. กว้าง 0.6-1.2 ซม. สีเขียวเข้ม หลังใบโค้งงอ เนื้อใบเนียน มีไขเคลือบมาก ลักษณะของช่อดอกและดอก มีช่อดอกสูง 150-200 ซม. ดอกมีสีอมม่วง ดอกย่อยไม่มีระยางค์แข็ง รากมีลักษณะ เป็นกระจุกเหมือนใยฟอง กลิ่นหอมเย็น หยั่งลึก 100-300 ซม.

2.9.1 พันธุ์หญ้าแฝก

หญ้าแฝกที่พบในประเทศไทยมีการแบ่งเป็น 2 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์แฝกหอม (*Vetiveria Zizanioides*) และ พันธุ์แฝกดอน (*Vetiveria Nemoralis*)

หญ้าแฝกพันธุ์แฝกหอมนี้ มีหลายสายพันธุ์อันได้แก่ กำแพงเพชร 2, เชียงราย, สงขลา 1, สงขลา 2, สงขลา 3, สุราษฎร์ธานี, ตรัง 1, ตรัง 2, ศรีลังกา, เชียงใหม่ และแม่ฮ่องสอน รวมทั้งสิ้น 11 พันธุ์

หญ้าแฝกพันธุ์แฝกดอนประกอบด้วยสายพันธุ์ อุตรธานี 1, อุตรธานี 2, นครพนม 1, นครพนม 2, ร้อยเอ็ด, ชัยภูมิ, เลย, สระบุรี 1, สระบุรี 2, ห้วยขาแข้ง, กาญจนบุรี, นครสวรรค์, ราชบุรี, ประจวบคีรีขันธ์, จันทบุรี, พิษณุโลก และ กำแพงเพชร

ในงานวิจัยชุดนี้พันธุ์หญ้าแฝกที่ใช้ได้แก่พันธุ์แฝกหอมสายพันธุ์ –สุราษฎร์ธานี เนื่องจากพันธุ์นี้มีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดีในดินทราย

2.9.2 ประโยชน์ของหญ้าแฝก

นอกจากการปลูก เพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำ เพื่อป้องกันการกัดชะการพังทลายของดิน เพื่อปรับปรุงสภาพพื้นที่เสื่อมโทรมแล้วยังมีประโยชน์ในด้านอื่นๆ อาทิเช่น

ต้นและใบ

- ช่วยกรองเศษพืชและตะกอนดิน
- ใช้ทำวัสดุคลุมหลังคา
- ใช้ทำเชือก หมวก ตะกร้า ฯลฯ
- ใช้เป็นวัสดุคลุมดิน
- ใช้ทำปุ๋ยหมัก

ราก

- ดูดซับน้ำและช่วยรักษาความชุ่มชื้นในดิน
- ดูดซับแร่ธาตุและอาหาร
- ดูดซับสารพิษ
- ช่วยปรับปรุงสภาพดินทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของดินดีขึ้น
- ใช้ทำเครื่องสมุนไพรและเครื่องประทีนผิว
- ใช้กลั่นทำน้ำหอม
- ใช้ป้องกันแมลงศัตรูพืช

การขยายพันธุ์หญ้าแฝกที่นิยมกันมาก ได้แก่การแยกหน่อแล้วนำไปชำในแปลงเพาะหรือในถุงชำ ซึ่งมีวิธีการดังนี้

1. นำหญ้าแฝกที่เป็นกอมาตัดใบออกให้เหลือความยาวของต้นประมาณ 20 เซนติเมตร และความยาวของรากประมาณ 5 เซนติเมตร แล้วแยกออกเป็นต้นๆ คัดเลือกต้นที่สมบูรณ์มีรากดีคนำลงปลูกในถุงชำขนาด 5 x 8 นิ้วที่มีส่วนผสมของดินร่วนปนทรายและขี้เถ้าแกลบ จากนั้นนำถุงชำมาวางเรียงในที่แจ้งให้เป็นแถว แถวละประมาณ 10 ถุง ระหว่างแถวห่างกัน 1 เมตร รดน้ำอย่างสม่ำเสมอ

2. การเพาะชำในแปลงเพาะแบบยกร่อง โดยการนำหญ้าแฝกที่เตรียมไว้ในข้อที่ 1 มาปลูกลงในแปลงขยายพันธุ์ที่เตรียมดิน โดยการทำเป็นแปลงยกร่องกว้างขนาด 1-1.5 เมตร ความห่างระหว่างแปลงประมาณ 1 เมตร ความยาวของแปลงแล้วแต่ความเหมาะสม โดยนำหญ้าแฝกมาปลูกลงห่างกันระหว่างต้น 20 เซนติเมตร ในพื้นที่ 1 ไร่ สามารถปลูกรุ่นหญ้าแฝกได้ประมาณ 3,200 กอ รดน้ำอย่างสม่ำเสมอ หญ้าแฝกจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และสามารถแตกหน่อได้ประมาณ 40-50 เท่าในระยะเวลา 4-5 เดือน



รูปที่ 2.18 หน่อหญ้าแฝก (Office of The Royal Development Projects Board, 2000)



รูปที่ 2.19 หญ้าแฝกพันธุ์ *Vetiveria zizanioides* Nash (Office of The Royal Development Projects Board, 2000)