

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ธูปฤาษี (*Typha angustifolia*) ต้นธูปฤาษีที่พบเห็นได้ทั่วไปลักษณะดังรูปที่ 2.1 มีชื่อสามัญว่า cattail ลำต้นสูง 1-3 เมตร ลักษณะใบยาวแข็งโค้ง มีสีเขียวเข้ม โดยมีการกระจายพันธุ์ได้รวดเร็วตามหนอง คลอง บึง และ อ่างเก็บน้ำ (สารานุกรมพืชในประเทศไทย, 2555) สามารถสะสมธาตุอาหารได้ปริมาณสูงและมีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสีย (สุภาพร, 1996) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าธูปฤาษีมีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหาร N, P, K, Ca และ Mg ได้ปริมาณมาก นอกจากนี้ธูปฤาษีมีความสามารถดูดซับธาตุโลหะหนักและไอโซโทปกัมมันตรังสีในบริเวณพื้นดินได้ในปริมาณมากและมีน้ำหนักผลผลิตสูงแต่เนื่องจากต้นธูปฤาษีเป็นวัชพืชที่มีการกระจายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็วและมีดอกที่มองดูเหมือนรูปใหญ่ๆ และปกคลุมด้วยขนสีขาวสามารถปลิวไปกับลมได้ดีจึงก่อความรำคาญให้กับชุมชนเนื่องจากขนจากดอกธูปฤาษีก่อให้เกิดภูมิแพ้ต่อทางเดินหายใจในเด็กและผู้สูงอายุ จึงต้องมีมาตรการจัดการธูปฤาษีให้เกิดประโยชน์สูงสุด การนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการกำจัดวัชพืชนี้ และควรตัดต้นธูปฤาษีหลังช่วงระยะเวลาออกดอก 4 สัปดาห์ (สุภาพร, 1996)



รูปที่ 2.1 ธูปฤาษีที่พบเห็นได้ทั่วไปตามพื้นที่ชุ่มน้ำ

ในชีวิตประจำวัน คนเรามีความเสี่ยงต่อการนำโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายผ่านทาง การบริโภคอาหารหรือดื่มน้ำที่มีสารบางชนิดเหล่านี้ปนเปื้อนอยู่ หรือเกิดจากการรับประทานพืชผักที่ถูกรดน้ำด้วยน้ำเสียจากโรงงานต่างๆ ซึ่งเกิดการสะสมขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อมีคนรับประทานพืชหรือผักที่มีการปนเปื้อนของสารเหล่านี้ ก็จะทำให้ได้รับโลหะหนักไปด้วย ซึ่งพิษที่เกิดจากโลหะหนักต่อคนและสัตว์ จะอยู่ในลักษณะของการค่อยๆ สะสมเพิ่มความเป็นพิษมากขึ้น (chronic effect) มากกว่าการเกิด

ความเป็นพิษอย่างเฉียบพลัน (acute effect) อาการแพ้อย่างเฉียบพลันจะทำให้รู้สึกมีรสของโลหะในปาก (metallic taste) คอแห้ง ระบายน้ำ ปวดฟัน ปวดท้องอย่างรุนแรง อุจจาระสีดำ คลื่นไส้ วิงเวียน กล้ามเนื้อกระตุก ส่วนอาการแพ้พิษแบบเรื้อรัง จะมีอาการอ่อนเพลีย เบื่ออาหาร เหงือกมีลักษณะสีเทาปนดำ เป็นอัมพาต โดยอาการจะเริ่มแสดงในกล้ามเนื้อที่ใช้งานมาก่อน เช่น บริเวณข้อมือข้อเท้า เป็นต้น

กระทรวงสาธารณสุขได้ประกาศตั้งข้อกำหนด เกี่ยวกับมาตรฐานการปนเปื้อนของโลหะหนักในอาหาร โดยจะต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้

- | | | |
|-------------|---------------|-------------------------------------|
| 1). ดีบุก | 250 มิลลิกรัม | ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม |
| 2). สังกะสี | 100 มิลลิกรัม | ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม |
| 3). ทองแดง | 20 มิลลิกรัม | ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม |
| 4). ตะกั่ว | 1 มิลลิกรัม | ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม |
| 5). สารหนู | 2 มิลลิกรัม | ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม |
| 6). พรอท | 0.5 มิลลิกรัม | ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม สำหรับอาหารทะเล |

และไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัม ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม สำหรับอาหารอื่น (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข, 2529)

ตารางที่ 1 มาตรฐานคุณภาพตะกอนดินสำหรับแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ทะเล (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

พารามิเตอร์	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Zn	อ้างอิง
Florida DEP SQG-TEL-lower	7.24	0.68	52.3	18.7	30.2	0.13	124	MacDonald, 1994
Florida DEP SQG-TEL-higher	41.6	4.21	160	108	112	0.7	271	
Hong Kong Draft SQG-lower	8	1.5	80	65	75	0.5	200	HKGS, 1998
Hong Kong Draft SQG- higher	42	4	160	110	110	1	270	
Australia and New Zealand Draft ISQG-lower	20	1.5	80	65	50	0.15	200	ANZECC, 1998
Australia and New Zealand Draft ISQG-higher	70	9.6	370	270	220	1	410	

ส่วนมาตรฐานของปริมาณโลหะหนักในตะกอนดินนั้นในประเทศไทยยังไม่มีกำหนดมาตรฐานไว้ ดังนั้นจึงได้นำผลการตรวจวัดไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพตะกอนดิน (Sediment Quality Guideline) จากต่างประเทศ ได้แก่ประเทศสหรัฐอเมริกา (รัฐฟลอริดา) ช่องก ออสเตรเลีย-นิวซีแลนด์ ซึ่งมีระบบนิเวศน์ชายฝั่งทะเลเขตร้อนคล้ายคลึงกับประเทศไทย (ตารางที่ 1) โดยมีปริมาณ สารหนู แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี ในระดับค่าต่ำสุดที่ยอมให้ตรวจพบใน ตะกอนดิน (lower) แต่ไม่เกินค่าสูงสุด (higher)

2.2 ไอโซโทปกัมมันตรังสีในธรรมชาติ

ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาตินอกจากจะมีรังสีคอสมิกแล้ว ยังมีรังสีที่เกิดจาก ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีมาตั้งแต่โลกเกิด เช่น คาร์บอน-14 โพแทสเซียม-40 ซีเรียม-142 แกโดลิเนียม-152 แสฟเนียม-174 ทอเรียม-232 ยูเรเนียม-235 และยูเรเนียม-238 เป็นต้น การสลายตัว ของไอโซโทปกัมมันตรังสีในธรรมชาติ ที่มีการสลายตัวอย่างต่อเนื่องและไปสิ้นสุดที่ไอโซโทป ที่เสถียรมีอยู่ด้วยกัน 4 อนุกรมคือ

1. อนุกรมทอเรียม (the thorium series, $4n$ -series) ธาตุกัมมันตรังสีในอนุกรมชุดนี้จะมีค่าเลขมวลหารด้วย 4 ลงตัวจึงมักเรียกสั้นๆ ว่า อนุกรม $4n$ เริ่มต้นจากทอเรียม-232 (Th-232) ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 1.39×10^{10} ปี แล้วสลายตัวไปจนเป็นธาตุที่เสถียร (stable) ที่ตะกั่ว-208 (Pb-208)

2. อนุกรมยูเรเนียม (the Uranium series, $4n+2$ series) ค่าเลขมวลของธาตุในอนุกรมชุดนี้หารด้วย 4 จะเหลือเศษ 2 ทุกธาตุจึงเรียกสั้นๆ ว่าอนุกรม $4n+2$ เริ่มต้นจากยูเรเนียม-238 (U-238) ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 4.5×10^9 ปีแล้วสลายตัวไปเรื่อยๆจนเสถียรที่ตะกั่ว-206 (Pb-206)

3. อนุกรมแอกติเนียม (the Actinium series, $4n+3$ series) ธาตุต่างๆในอนุกรมชุดนี้ถ้าหารเลขมวลด้วย 4 จะเหลือเศษ 3 เสมอจึงเรียกสั้นๆ ว่าอนุกรม $4n+3$ เริ่มต้นจากยูเรเนียม-235 (U-235) ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 7.1×10^8 ปีแล้วสลายไปเรื่อยๆจนเป็นธาตุที่เสถียรที่ตะกั่ว-207

4. อนุกรมเนปทูเนียม (the Neptunium series, $4n+1$ series) เริ่มต้นจากธาตุพลูโตเนียม-241ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตเพียง 14.4 ปี สลายตัวจนกลายเป็นธาตุที่เสถียร คือ บิสมัท-209 (Bi-209) ธาตุที่มีค่าครึ่งชีวิตที่ยาวที่สุดในอนุกรมชุดนี้คือธาตุเทปพูเนียม-237 (Np-237) คือ 2.2×10^6 ปี

นอกจากนิวไคลด์ที่อยู่ในอนุกรมทั้ง 4 แล้ว ยังมีนิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มต้นที่ไม่มีการสลายตัวอย่างต่อเนื่อง แต่เป็นแหล่งกัมมันตรังสีที่สำคัญในธรรมชาติคือ K-40

2.3 การสลายตัวแบบต่างๆของสารกัมมันตรังสี

ธาตุกัมมันตรังสีหรือสารกัมมันตรังสีมีสมบัติเด่นคือมีการสลายตัวให้รังสีออกมาและได้ธาตุใหม่ที่มีสมบัติเปลี่ยนไปโดยรังสีที่ปลดปล่อยออกมามีได้ 3 ลักษณะคือ

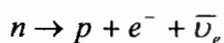
2.3.1 การสลายตัวให้รังสีแอลฟา (alpha ray)

รังสีแอลฟาเป็นนิวเคลียสของอะตอมฮีเลียม มีเลขมวล 4 และมีประจุไฟฟ้า +2 โดยทั่วไปรังสีนี้มีพลังงานประมาณ 4-10 Mev มีอัตราเร็วประมาณหนึ่งส่วนสิบเท่าอัตราเร็วแสงในสุญญากาศ แต่เนื่องจากรังสีแอลฟานี้สามารถทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนในสารที่รังสีผ่านได้ดี จึงทำให้เสียพลังงานอย่างรวดเร็ว ดังนั้นรังสีแอลฟาจึงมีอำนาจทะลุผ่านน้อยมาก โดยสามารถวิ่งผ่านอากาศได้ระยะทางเพียง 3-5 เซนติเมตรเท่านั้น บางครั้งเราเรียกรังสีแอลฟาว่า อนุภาคแอลฟา โดยมีสัญลักษณ์คือ ${}^4_2\text{He}$ อนุภาคแอลฟาส่วนใหญ่เกิดจากการสลาย (decay) ของธาตุหนักที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 82 คือ ตั้งแต่ธาตุบิสมัท (Bi) ขึ้นไป

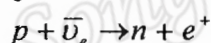
2.3.2 การสลายตัวให้รังสีเบตา (beta ray)

รังสีเบตาเกิดจากการสลายตัวของนิวไคลด์ที่มีจำนวนโปรตอนหรือนิวตรอนมากเกินไป สามารถให้รังสีเบตาได้เป็น 2 แบบคือ

2.3.2.1 รังสีเบตาชนิดลบ คือนิวเคลียสของอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสที่มีนิวตรอนมากกว่าปกติ นิวตรอนจะเปลี่ยนเป็นโปรตอนพร้อมทั้งให้บีตาลบออกมา เมื่อสลายตัวแล้วจะได้ธาตุที่มีเลขเชิงอะตอมเพิ่มขึ้น 1 และเลขมวลเท่าเดิม



2.3.2.2 รังสีเบตาชนิดบวกหรือโพซิตรอน (positive beta or positron) มีประจุ +1 และมวลเท่ากับอิเล็กตรอน และแทนสัญลักษณ์ด้วย 0_1e หรือ β^+



2.3.3 การสลายตัวให้รังสีแกมมา (gamma ray)

รังสีแกมมาเป็นชนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่มีมวล ไม่มีประจุ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง เรียกรังสีชนิดนี้อีกชื่อว่า “โฟตอน” (photon) ส่วนมากแล้วการแผ่รังสีแกมมาจะเกิดขึ้นหลังจากแผ่รังสีชนิดอื่น เช่น การแผ่รังสีแอลฟา หรือการแผ่รังสีเบตา โดยนิวเคลียสยังคงอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) เมื่อกลับลงสู่สถานะพื้น (ground state) จะถ่ายพลังงานออกมาในรูปของรังสีแกมมา ซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงสูง

นิวเคลียสของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพของนิวเคลียสอยู่ตลอดเวลา เพื่อที่จะกลายเป็นนิวเคลียสที่เสถียร การที่นิวเคลียสของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเปลี่ยนสภาพเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่ และมีการปล่อยพลังงานในรูปของกัมมันตภาพรังสีชนิดต่าง ๆ นั้น เรียกว่า การ “สลาย” (decay) นิวเคลียสกัมมันตรังสีเบื้องต้นเรียกว่า “นิวเคลียสแม่” (parent) และนิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นเรียกว่า “นิวเคลียสลูก” (daughter) การสลายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น อัตราการสลายของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะแปรผันตามจำนวนนิวเคลียส หรืออะตอมที่มีอยู่เดิมในขณะนั้น ถ้ากำหนดให้ N เป็นจำนวนอะตอมที่มีอยู่ในขณะใดขณะหนึ่ง อัตราการสลายตัวคือ

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (2.1)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.2)$$

เมื่อ λ คือค่าคงตัวของการสลายตัว (Decay constant) มีหน่วยเป็น (วินาที)⁻¹ และ N_0 เป็นจำนวนอะตอมที่มีอยู่เดิมเมื่อเวลาเริ่มต้น $t = 0$ สมการ (2.1) เขียนได้ใหม่เป็น

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad (2.3)$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (2.4)$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

สมการ (2.5) เรียกว่า “กฎการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี” (law of radioactive decay) กำหนดให้ A เป็นอัตราการสลายของนิวไคลด์กัมมันตรังสี หรือ “กัมมันตภาพรังสี” หรือ “ความแรงแรงรังสี” (Activity) จะได้ว่า

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad (2.6)$$

$$A = \lambda N \quad (2.7)$$

เมื่อ A คือ อัตราการสลายตัวต่อวินาที (disintegration per second = dps)

N คือ จำนวนนิวเคลียสของธาตุรังสีที่ที่เหลือเมื่อเวลา t ใดๆ

λ คือ เป็นค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant) มีหน่วยเป็นต่อวินาที

2.4 การวิเคราะห์ธาตุกัมมันตรังสีโดยวิธีแกมมาสเปกโทรเมตรี

หัววัดรังสีที่เหมาะสมในการตรวจวัดชนิดของธาตุไอโซโทปรังสีและปริมาณที่มีอยู่ในตัวอย่างคือหัววัดชนิดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูงเนื่องจากมีความสามารถในการแยกพลังงานสูง ความสามารถในการแยกที่สูงทำให้สามารถเห็นยอดสเปกตรัมของแต่ละธาตุได้อิสระชัดเจนไม่เกิดการรวมของยอดสเปกตรัมที่พลังงานใกล้เคียงกันเป็นยอดสเปกตรัมเดียว ดังสเปกตรัมของรังสีแกมมาจากธาตุ Eu-152 ที่นับวัดด้วยหัววัด NaI เปรียบเทียบกับหัววัด HPGe (รูปที่ 2.2)

ในธรรมชาติแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาหลักๆมาจากธาตุโปตัสเซียม (K-40) ยูเรเนียม (U-238) และทอเรียม (Th-232) โดยทำการนับวัดพื้นที่ได้กราฟของยอดสเปกตรัมที่พลังงาน 1460 keV ในตัวอย่างโปตัสเซียม พื้นที่ได้กราฟของยอดสเปกตรัมที่พลังงาน 1764 keV สำหรับตัวอย่าง ยูเรเนียม (โดยที่สเปกตรัมที่พลังงานนี้มาจาก Bi-214 ซึ่งเป็นไอโซโทปลูกของยูเรเนียม) ส่วน ทอเรียมทำการนับวัดพื้นที่ได้กราฟจากยอดสเปกตรัมที่ระดับพลังงาน 2614 keV (สเปกตรัมจาก Tl-208 ซึ่งเป็นไอโซโทปลูกของทอเรียม)

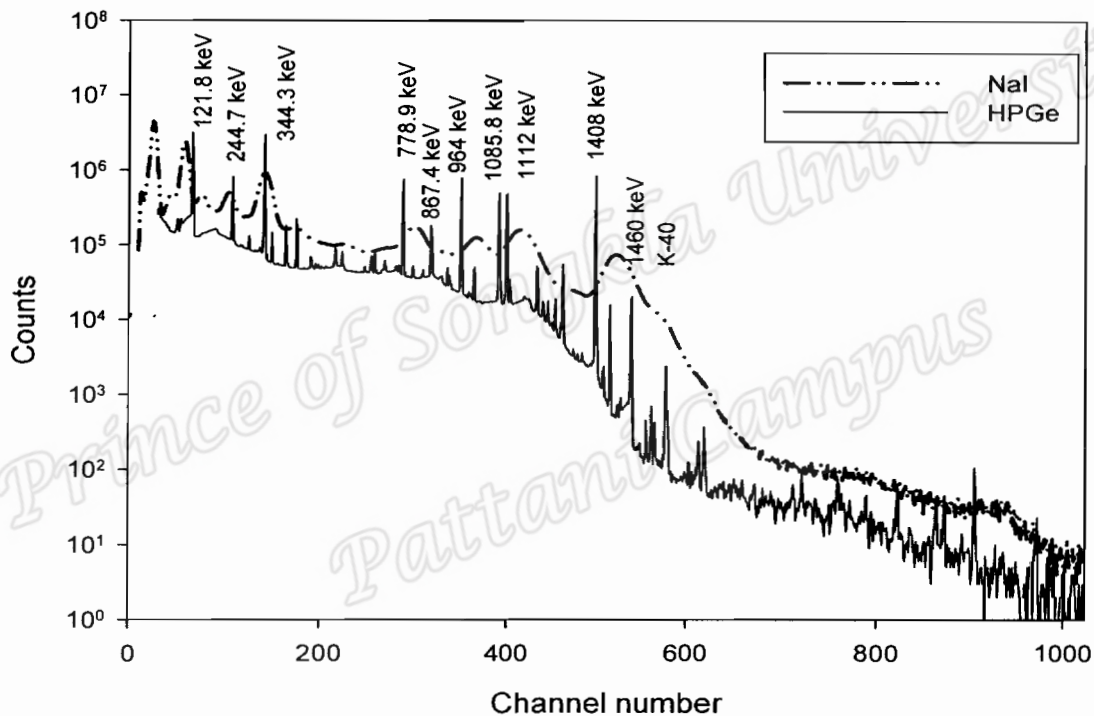
2.4.1 การตรวจวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีและประสิทธิภาพหัววัด

เมื่อต้องการทราบปริมาณของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นในธรรมชาติจากพื้นที่ได้กราฟของยอดสเปกตรัมที่เป็นค่าเฉพาะตัวของธาตุกัมมันตรังสีที่สนใจหรือไอโซโทปลูกของการสลายตัวของอนุกรมนิวเคลียร์ของธาตุไอโซโทปแม่ ปริมาณรังสีที่ตรวจวิเคราะห์ได้ในหน่วย Bq/kg จากพื้นที่ได้ยอดสเปกตรัมลบด้วยค่าภูมิหลัง (background) ในบริเวณเดียวกันเป็นไปตามสมการที่ 2.8

$$C \text{ (Bq.kg}^{-1}\text{)} = k.C_n \quad (2.8)$$

เมื่อ $k = 1/\varepsilon PM$ โดยที่ C คือความเข้มข้นรังสีในหน่วย Bq.kg^{-1} . C_n คือ อัตราการนับของยอดสเปกตรัมที่พลังงานรังสีที่ต้องการ, ε คือประสิทธิภาพของหัววัด, P คือสัดส่วนการเกิดรังสีที่พลังงานตรวจวัด, M คือมวลของตัวอย่างในหน่วย kg

Eu-152



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของธาตุกัมมันตรังสี Eu-152 ที่บันทึกด้วยหัววัด NaI เทียบกับหัววัด HPGe

2.5 การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์

การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ เป็นการใช่วงสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดรังสีซึ่งเรียกว่า รังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (primary x-ray) ไปกระตุ้นให้ธาตุในตัวอย่างปล่อยรังสีเอ็กซ์ที่เรียกว่า รังสีทุติยภูมิ (secondary x-ray) รังสีทุติยภูมิที่เกิดขึ้นอาจถูกเลี้ยวเบนด้วยผลึกกระจายแสง หรือถูกวัดโดยตรงด้วยหัววัดรังสี ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์

คุณภาพวิเคราะห์ (qualitative analysis) อาศัยสมบัติที่ธาตุต่างชนิดกันให้รังสีเอ็กซ์จำเพาะ (characteristic x-ray) ซึ่งมีค่าพลังงานที่แตกต่างกันและเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุเป็นตัวจำแนกชนิดธาตุ

ปริมาณวิเคราะห์ (quantitative analysis) ใช้ในการวัดความเข้มของรังสี (intensity) หรือปริมาณของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นจากแต่ละธาตุในแต่ละตัวอย่าง เปรียบเทียบกับปริมาณรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากตัวอย่างมาตรฐาน ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมเหมือนกัน เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์สมัยใหม่ที่มีอุปกรณ์ต่างๆครบถ้วน สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุตั้งแต่โบรอน (Boron) ถึงยูเรเนียม (Uranium) ได้ทั้งปริมาณมาก ปริมาณน้อย และขนาดส่วนในล้านส่วน (ppm) โดยให้ผลที่มีความแม่นยำและความเที่ยงสูง

2.5.1 การเกิดรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระซึ่งมีพลังงานสูงและถูกทำให้ลดความเร็วหรือถูกทำให้หยุดนิ่งโดยกะทันหันได้เมื่ออิเล็กตรอนอิสระวิ่งไปกระทบเป้าโลหะ (metal target) พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนอิสระได้ถูกถ่ายเทให้กับโลหะ แล้วถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนร้อยละ 99 ซึ่งถูกดูดกลืนไว้ที่ผิวของเป้าโลหะ ส่วนอีกประมาณร้อยละ 1 จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของโลหะที่เป็นเป้า ผลของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์ที่ถูกนำไปใช้งานต่อไป ในทางปฏิบัตินั้นจะใช้หลอดรังสีเอ็กซ์ (X-ray tube) เป็นเครื่องมือผลิตรังสีเอ็กซ์ โดยภายในหลอดรังสีเอ็กซ์จะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้

2.1.6.1 แหล่งผลิตอิเล็กตรอนอิสระจะใช้ไส้หลอด (filament) ที่ทำจากโลหะทั้งสแตนซึ่งถูกเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า ไส้หลอดนี้ทำหน้าที่เป็นแคโทด (ขั้วลบ) ของหลอดรังสีเอ็กซ์

2.1.6.2 แหล่งให้ความต่างศักย์สูง (high acceleration voltage) หรือศักย์ไฟฟ้าเร่งพลังงานของอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการ

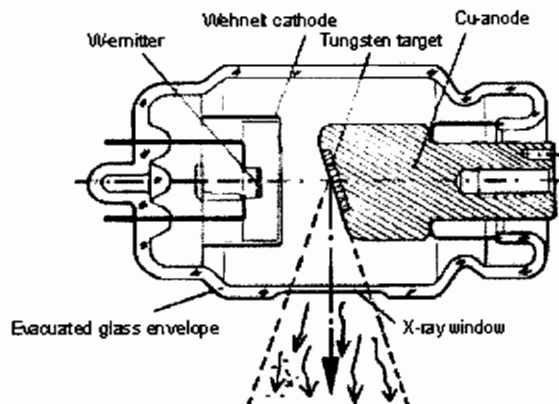
2.1.6.3 เป้าโลหะเป็นบริเวณที่ทำหน้าที่ผลิตรังสีเอ็กซ์และเป็นแอโนด (ขั้วบวก) ของหลอดรังสีเอ็กซ์ ธาตุที่จะนำมาเป็นเป้าควรมีสมบัติดังนี้

- เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมสูง เช่น Mo, W, Cr, Cu, Ag, Rh, หรือ Pt
- เป็นธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูง
- เป็นธาตุที่นำความร้อนได้ดี
- เป็นธาตุที่มีความดันไอต่ำ

หลอดรังสีเอ็กซ์เป็นหลอดสุญญากาศทำจาก pyrex หรือเซรามิกจะทนต่อความร้อนและสภาวะสุญญากาศ (10^{-6} - 10^{-7} mmHg) ได้ การที่หลอดรังสีเอ็กซ์เป็นสุญญากาศนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนอิสระเป็นสารประกอบออกไซด์ เพื่อทำให้อิเล็กตรอนอิสระที่ขั้วลบเคลื่อนที่ไปยังเป้าโลหะโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน และเพื่อเป็นฉนวนไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง (รูปที่ 2.3)

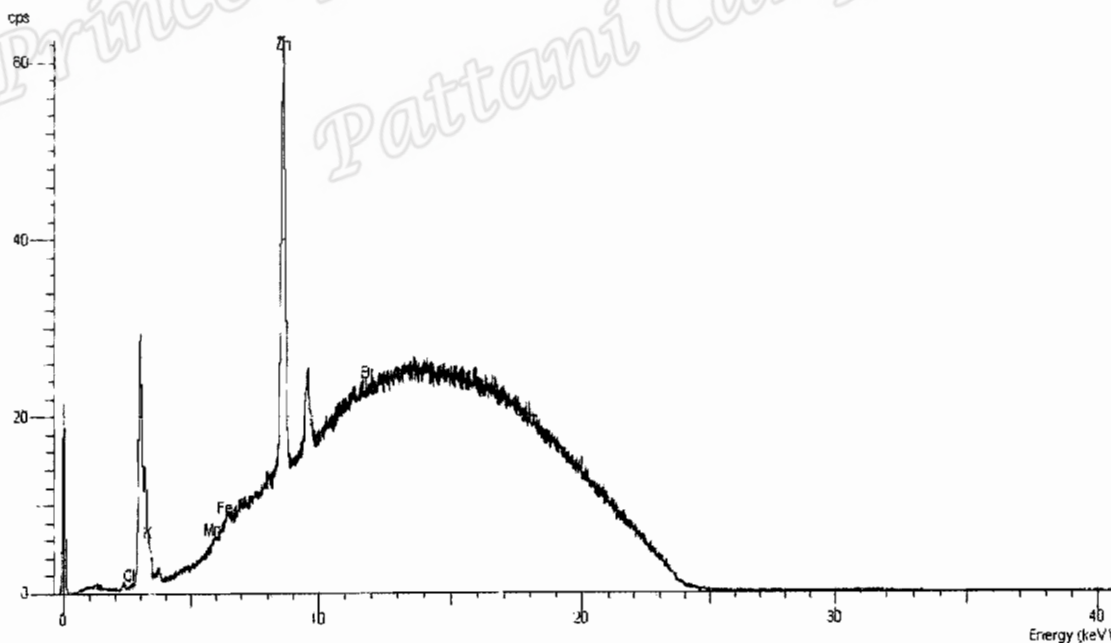
รังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นจากหลอดรังสีเอ็กซ์จะถูกส่งผ่านออกมาทางหน้าต่างที่ทำด้วยเบริลเลียม (beryllium window) ที่บางและทนต่อความดันสุญญากาศภายในหลอดรังสีเอ็กซ์ได้ เพื่อลดปริมาณการสูญเสียรังสีเอ็กซ์ เมื่อไส้หลอดทั้งสแตนถูกเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระหลุดออกมาจากผิวไส้หลอดทั้งสแตนและถูกเร่งไปที่เป้าโลหะด้วยแหล่งให้ความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ เมื่ออิเล็กตรอนอิสระชนเป้าโลหะทำให้เกิดความร้อน รังสีเอ็กซ์และการกระเจิงของอิเล็กตรอน (สุนันทา, 2549) เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบตัวอย่างที่นำมา

วิเคราะห์ พลังงานจากรังสีเอกซ์ที่มากพอจะทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นใน (inner electron shell) ของธาตุที่เป็นเป้าหมายหลุดออกจากวงโคจร ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นพลังงานถัดมากระโดดเข้ามาแทนที่พร้อมทั้งมี



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของหลอดรังสีเอกซ์ (Beckhoff, 2006)

การปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray) ออกมาด้วย ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์จึงแสดงลักษณะยอดสเปกตรัมของธาตุที่ทำการวิเคราะห์ที่พลังงานเฉพาะตัวของแต่ละธาตุดังแสดงในรูป 2.4 ส่วนปริมาณธาตุที่ทำการวิเคราะห์ก็สามารถทราบได้จากการทำกราฟมาตรฐานเพื่อการสอบเทียบปริมาณธาตุตัวอย่างจากพื้นที่ใต้พีคของธาตุนั้น



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของ Zn ในตัวอย่างรูปถ่าย

2.5.2 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์

เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ มี 2 ชนิด คือ ชนิดกระจายพลังงานและชนิดกระจายคลื่นแสง เครื่องทั้งสองชนิดมีส่วนประกอบสำคัญ และมีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกันเป็นส่วนใหญ่และเป็นที่ยอมรับใช้กันในปัจจุบันทั้งทางปริมาณวิเคราะห์และคุณภาพวิเคราะห์

การแบ่งชนิดของเครื่องมือข้างต้น อาศัยสมบัติของวิธีการวัดปริมาณรังสีเป็นหลัก เนื่องจากการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์สามารถวัดได้ 2 แบบ คือ การวัดพลังงานโดยตรง และการวัดพลังงานของธาตุต่างๆตามมุมที่เกิดขึ้นหลังจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยผลึกกระจายแสง เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์จึงสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

1) เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ชนิดกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer-EDXRF) ส่วนประกอบของเครื่องชนิดนี้ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ราคาถูกกว่า วิเคราะห์ธาตุต่างๆ ได้พร้อมทั้งหมดในคราวเดียวกัน (simultaneous analysis) ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อย สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งปริมาณและคุณภาพวิเคราะห์

2) เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ชนิดกระจายคลื่นแสง (Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometer-WDXRF) ปกติเครื่องนี้วิเคราะห์ได้ครั้งละธาตุตามลำดับ (sequential) ใช้เวลาในการวิเคราะห์นานกว่าเครื่องชนิด EDXRF มีผลึกกระจายแสงทำหน้าที่คล้ายโมโนโครมาเตอร์ จึงลดการรบกวนจากการซ้อนทับของเส้นพลังงานจากธาตุอื่นได้มาก การวัดพลังงานรังสีเอ็กซ์แต่ละธาตุมีความเฉพาะ ให้ผลวิเคราะห์ที่ดีและถูกต้องแม่นยำมากกว่าเครื่อง EDXRF

2.6 การวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน

วิธีการนิวตรอนแอคติเวชันคือการกระตุ้นธาตุที่เสถียรให้มีสมบัติเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีและสลายตัวให้รังสีที่สามารถตรวจวัดได้ออกมาและปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่สลายตัวให้รังสีแกมมามีความเหมาะสมที่จะทำการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณจากตำแหน่งพลังงานของยอดสเปกตรัมที่ปล่อยออกมาและพื้นที่ใต้ยอดสเปกตรัมเป็นปฏิภาคกับปริมาณธาตุที่ตรวจวิเคราะห์เมื่อทำการวัดด้วยหัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) นอกจากระบบตรวจวัดที่เหมาะสมแล้ววิธีการกระตุ้นด้วยนิวตรอนหรือนิวตรอนแอคติเวชันนี้จะต้องมีแหล่งกำเนิดนิวตรอนซึ่งอาจจะเป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนชนิดไอโซโทปเช่น Cf-252, Am-Be, Pu-Pe ฯลฯ หรือเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยซึ่งให้ค่าฟลักซ์นิวตรอนสูงอย่างเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1 ของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ถนนวิภาวดีรังสิต เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร ซึ่งมีองค์ประกอบและลักษณะโครงสร้างดังนี้

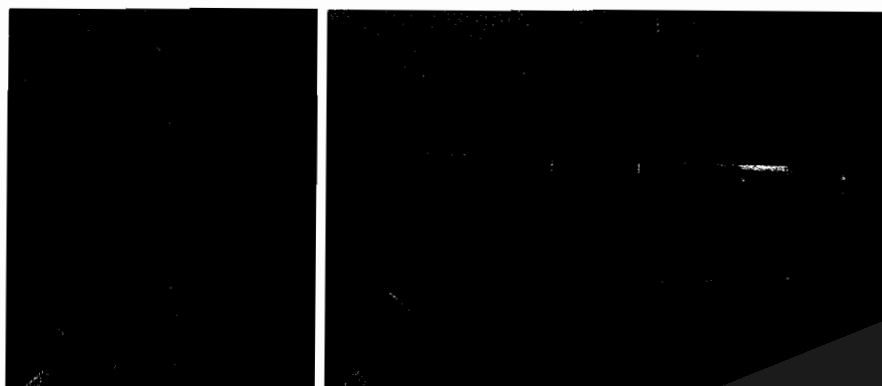
2.6.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย คือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่สร้างขึ้นมาเพื่อผลิตอนุภาคนิวตรอนเพื่อใช้ผลิตไอโซโทปรังสีสำหรับการรักษาโรคและใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม การผลิตสารกึ่งตัวนำ การเปลี่ยนสีอัญมณี การวิเคราะห์ธาตุในสารตัวอย่างและการศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ อย่างเช่น เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ของประเทศไทย เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยยังรวมถึงเครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถเตรียมเชื้อเพลิงเพื่อผลิตหัวรบอีกด้วย นอกจากนั้นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยยังมักถูกใช้เป็นเครื่องมือเพื่อเผยแพร่และสร้างความเข้าใจให้สาธารณชนเห็นว่าพลังงานนิวเคลียร์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในทางสันติและมีประโยชน์มหาศาลต่อมวลมนุษยชาติ (ถุณธาร, 2551)

ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.6.1.1 เชื้อเพลิง

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยส่วนใหญ่จะใช้เชื้อเพลิงเป็นยูเรเนียมที่เสริมสมรรถนะประมาณ 20% และในปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยยังนิยมใช้เชื้อเพลิงเป็นยูเรเนียมผสมกับเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1

โดยเชื้อเพลิงจะบรรจุอยู่ในท่อทรงกระบอกที่เรียกว่าแท่งเชื้อเพลิงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 – 4 เซนติเมตร ยาวประมาณ 38 เซนติเมตร (เฉพาะส่วนที่เป็นเนื้อเชื้อเพลิง)



รูปที่ 2.6 แกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1

ในส่วนของท่อทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งมีส่วนผสมของโลหะหลายชนิด เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ทนความร้อนได้สูงที่สำคัญคือจะต้องไม่เกิดสนิมเนื่องจากแกนปฏิกรณ์จะต้องแช่อยู่ในน้ำตลอดเวลาเพราะแบบของเครื่องปฏิกรณ์วิจัยส่วนใหญ่จะเป็นแบบสระน้ำ (รูปที่ 2.6)

แท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่งจะถูกจัดเรียงให้อยู่ในถังอลูมิเนียมรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 55 เซนติเมตร ซึ่งจะบรรจุแท่งเชื้อเพลิงประมาณ 100 - 120 แท่ง

2.6.1.2 สารหน่วงนิวตรอน

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยจะใช้น้ำธรรมดาเป็นสารหน่วงนิวตรอน เนื่องจากสมบัติในการลดพลังงานนิวตรอนได้ดี นอกจากนี้ยังมีวัสดุ เช่น กราไฟท์หรือเบริลเลียมซึ่งเป็นของแข็งที่ทำหน้าที่สะท้อนนิวตรอนได้ดีไม่แพ้หน้าอีกด้วยและสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูบางประเภท อย่างเช่น เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบทริกา (TRIGA reactor) ยังมีเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ (zirconium hydride) ที่ผสมอยู่กับเชื้อเพลิงยูเรเนียมทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงนิวตรอนได้ดีในกรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของกำลังอย่างรวดเร็วโดยจากสมบัติของของตัวหน่วงประเภทไฮไดรด์ซึ่งจะทำให้ตัวเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมีค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิเป็นลบจะทำให้โอกาสการเกิดปฏิกิริยา (reactivity) มีค่าลดลงได้

2.6.1.3 สารพาความร้อน

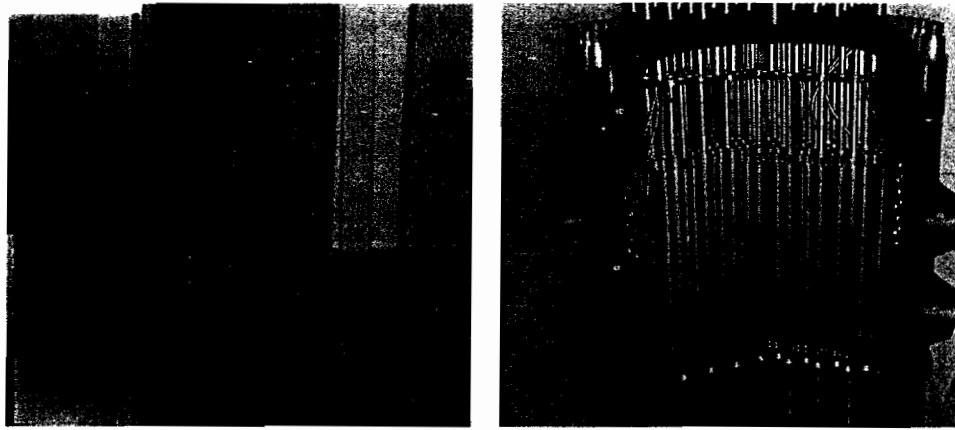
ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยสารพาความร้อนจะทำหน้าที่พาความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันไปยังตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและจะมีระบบน้ำเย็นในชั้นที่ 2 รับความร้อนไปถ่ายเทสู่บรรยากาศซึ่งสารพาความร้อนส่วนใหญ่ที่นิยมใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย คือ น้ำธรรมดา ซึ่งนอกจากใช้เป็นสารหน่วงนิวตรอนได้แล้วยังจัดได้ว่าเป็นสารพาความร้อนที่มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนได้ดีอีกด้วย

2.6.1.4 แท่งควบคุม

ทำหน้าที่ดูดจับนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูในกรณีที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันในระดับที่สูงเกินระดับมาตรฐานความปลอดภัย หรืออุณหภูมิภายในแกนปฏิกรณ์ปรมาณูสูงขึ้นผิดปกติแท่งควบคุมจะถูกเลื่อนลงไปดูดจับนิวตรอนส่วนเกินเพื่อควบคุมปฏิกิริยาให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมหรือหยุดปฏิกิริยาในกรณีที่เป็นเพื่อที่จะตรวจสอบหาสาเหตุของความผิดปกติที่เกิดขึ้น ส่วนประกอบของแท่งควบคุมจะประกอบด้วยสารที่มีความสามารถดูดจับนิวตรอนเข้ามาโดยที่สารนั้นจะต้องไม่เกิดปฏิกิริยากับนิวตรอน เช่น โบรอนคาร์ไบด์ (B_4C) ซึ่งเป็นสารที่มีความเหมาะสมในการดูดจับนิวตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ แท่งควบคุมจะถูกจัดเรียงอยู่ตามจุดต่าง ๆ ภายในแกนปฏิกรณ์ ซึ่งประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิงและท่อสำหรับไว้ใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งลักษณะการทำงานของแท่งควบคุมในกรณีของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย จะมีตัวยึดจับอยู่ด้านบนซึ่งออกแบบมาให้สามารถตกลงมาตามแรงโน้มถ่วงของโลกได้ในกรณีที่กลไกการควบคุมเกิดการทำงานบกพร่องหรือมีกระแสไฟฟ้าดับเกิดขึ้น (รูปที่ 2.7)

2.6.1.5 ถังปฏิกรณ์

ลักษณะเป็นถังรูปทรงกระบอกทำจากอลูมิเนียมผสมกับโลหะชนิดต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและทนทานต่อการกัดกร่อน



รูปที่ 2.7 แบบจำลองแกนเครื่องปว-1/1 (ซ้าย) และแกนเครื่องปฏิกรณ์เทอมอลิน (ขวา)

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์วิจัยทำการอบตัวอย่างรูปภาชนะและดินในบริเวณเก็บตัวอย่างต้นรูปภาชนะนั้น

2.6.2 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน

การวิเคราะห์ธาตุโดยการอบนิวตรอนหรือนิวตรอนแอกติเวชันนี้มีชื่อเรียกในภาษาอังกฤษว่า Neutron Activation Analysis (NAA) เป็นการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุโดยการทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุ เมื่อนิวเคลียสของไอโซโทปเสถียรได้รับนิวตรอนจะกลายเป็นไอโซโทปรังสีซึ่งจะสลายตัวกลับไปเป็นไอโซโทปเสถียร โดยปลดปล่อยรังสีออกมา ไอโซโทปรังสีจะสลายตัว โดยมีชนิดของรังสี พลังงานของรังสีและครึ่งชีวิตที่เป็นค่าเฉพาะของแต่ละไอโซโทป (ตารางที่ 2) และแผนผังการวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีนิวตรอน แอกติเวชันแสดงดังรูปที่ 2.8

เมื่อทำการอบนิวตรอน กัมมันตภาพของไอโซโทปรังสี (Activity: A_0) จะมีค่าแปรผันตามจำนวนอะตอมหรือปริมาณธาตุ (N) ความเข้มหรือฟลักซ์ของนิวตรอน (Neutron flux: ϕ) สัมประสิทธิ์ในการเกิดปฏิกิริยาหรือครอสเซกชัน (Cross-section: σ) ครึ่งชีวิตของไอโซโทปรังสี (half-life: $T_{1/2}$) และเวลาในการทำปฏิกิริยา (Irradiation time: t_i) โดย ครึ่งชีวิต = $\ln 2 /$ ค่าคงที่ในการสลายตัว (Decay constant: λ) หรือเขียนในรูปสมการได้ว่า

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda \quad \text{-----} > \quad \lambda = 0.693 / T_{1/2} \quad (2.9)$$

และค่ากัมมันตภาพของไอโซโทปรังสี

$$A_0 = N\sigma\phi (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (2.10)$$

เมื่อหยุดการอบนิวตรอน กัมมันตภาพ (A) ของไอโซโทปรังสีจะลดลงตามเวลาในการสลายตัว (t_d) แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

$$A = A_0 e^{-\lambda t_d} \quad (2.11)$$

$$A = N\sigma\phi (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} \quad (2.12)$$

จากสมการในการอบนิวตรอน กัมมันตภาพรังสีจากการอบนิวตรอน

$$A = N\sigma\phi (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (2.13)$$

การวิเคราะห์โดยทั่วไปใช้วิธีทำการทดลองโดยการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ที่ทราบค่าของปริมาณธาตุ โดยทำการทดลองด้วยวิธีการเดียวกันและได้ความสัมพันธ์ของกัมมันตภาพของสารมาตรฐาน

$$A_{std} = N_{std} \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.14)$$

และกัมมันตภาพของตัวอย่างคือ

$$A_{sample} = N_{sample} \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.15)$$

เมื่อนำสมการทั้งสองหารกัน ค่าคงที่ส่วนใหญ่มีค่าเท่ากัน ทำให้เหลือแต่ตัวแปร

$$\frac{A_{std}}{A_{sample}} = \frac{N_{std}}{N_{sample}} \quad (2.16)$$

$$N_{sample} = \frac{N_{std} \times A_{sample}}{A_{std}} \quad (2.17)$$

แทนค่ากัมมันตภาพด้วยพื้นที่ของโฟโตพีค

$$\text{Peak area} = A \times \text{Efficiency} \quad (2.18)$$

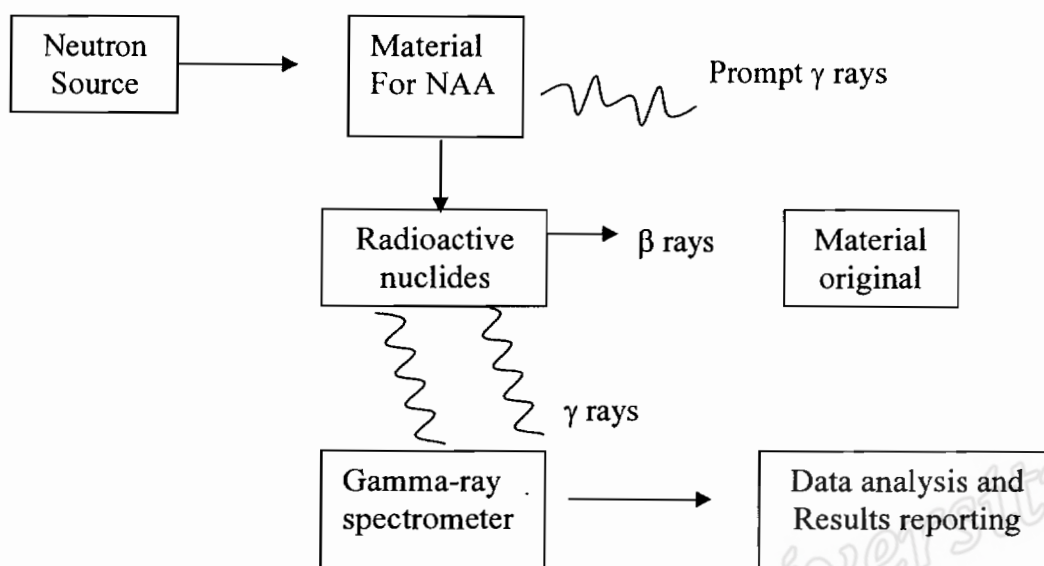
$$N_{sample} = \frac{N_{std} \times \text{Peak}_{sample}}{\text{Peak}_{std}} \quad (2.19)$$

ดังนั้นปริมาณสารตัวอย่างที่ต้องการทราบก็หาได้จากปริมาณ N_{sample} นั้นเอง

ตารางที่ 2 อันตรกิริยาทางนิวเคลียร์ของไอโซโทปที่ตรวจพบในตัวอย่าง (Capote, 2001)

Nuclide	Half-life	Nuclear reaction	Energy, keV
^{51}Cr	27.7d	$^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$	320.8
^{82}Br	1.47d	$^{81}\text{Br}(n,\gamma)^{82}\text{Br}$	554.35
^{46}Sc	83.8d	$^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$	889.25
^{59}Fe	44.4d	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$	889.25
^{65}Zn	244d	$^{64}\text{Zn}(n,\gamma)^{65}\text{Zn}$	1115.52
^{60}Co	5.27y	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	1173.24
^{124}Sb	60.2d	$^{123}\text{Sb}(n,\gamma)^{124}\text{Sb}$	1690.98

The NAA Method



รูปที่ 2.8 ไตอะแกรมของการวิเคราะห์ NAA

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กาญจนา นานะพินธุ์ สมชาย นานะพินธุ์ ดาริวรรณ เศรษฐีธรรม วรางคณา สังสิทธิสวัสดิ์ และจรรุวรรณ นิพนพานนท์ (2547) ได้ทำการศึกษาในหัวข้อการจัดการด้านกากของเสียและมลพิษที่เกิดขึ้นจากการประกอบอาชีพอุตสาหกรรมในครัวเรือน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยผลการศึกษาอาชีพทำผลิตภัณฑ์จากยางรถยนต์ได้แก่ ถังขยะ โตะ แก้ว กระถาง พบว่ามีปริมาณโลหะหนักในดินบริเวณสถานที่ทำงานดังนี้ ที่พบมากที่สุดคือ Fe มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 45.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาคือ Pb, Cr, Zn, Mn, Cu และ Ni มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.12, 6.06, 5.13, 2.29, 1.82 และ 1.23 มก./กก. ตามลำดับ อาชีพย้อมและทอผ้าไหม ผลการตรวจหาปริมาณโลหะหนักในดินและน้ำทิ้ง พบว่าโลหะหนักในดินปนเปื้อนมีค่าใกล้เคียงกับดินบริเวณที่ไม่ปนเปื้อนโดยมีค่า Zn, Fe, Ni, Mn, Cu, Cr, Pb เท่ากับ 3.40, 22.78, 0.65, 1.41, 0.66, 5.92 และ 15.81 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ อาชีพทำผลิตภัณฑ์บัดกรีสังกะสี พบว่าปริมาณตะกั่วในดินบริเวณหน้าและหลังโรงงานมีค่าระหว่าง 215.25-307.89 และ 66.10-177.64 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่พบในดิน control ที่มีค่าระหว่าง 45.32-46.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

สุภาพร จันรุ่งเรือง และ พิสนุช จิตวาพรวนิช (2539) ศึกษาศักยภาพการใช้รูปถ่ายซีในการบำบัดน้ำเสียโดยวัดคุณภาพน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมย้อมผ้า และโรงงานแบตเตอรี่ซึ่งจะมีพวกโลหะหนัก Cd, Cr, Pb และ Hg และมาตรฐานของค่า Chemical Oxygen Demand (COD) ตามกำหนดของกระทรวงอุตสาหกรรมต้องไม่เกิน 60 mg/l แสดงว่ารูปถ่ายซีมีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ และศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับธาตุอาหารของรูปถ่ายซีใบกว้างและใบแคบ พบว่าปริมาณธาตุอาหารส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินของรูปถ่ายซีใบกว้างและใบแคบจะแตกต่างกัน ปริมาณไนโตรเจน

(N) สูงสุดในใบมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 2.52-2.91% และ ปริมาณฟอสฟอรัส (P) ที่พบในใบและกาบจะมีค่าต่ำสุด อยู่ในช่วง 0.26-0.34% และ 0.19-0.36% ตามลำดับ ส่วนต่างๆของธูปฤาษีใบกว้างจะมีปริมาณธาตุอาหาร N และ P มากกว่าธูปฤาษีใบแคบ เนื่องจากพื้นที่ใบของธูปฤาษีใบกว้างจะมากกว่าธูปฤาษีใบแคบ ในทุกครั้งที่ของการเก็บเกี่ยวอันมีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโตของธูปฤาษีใบกว้างสูงกว่าใบแคบ ซึ่งมีผลต่อการสะสมธาตุอาหารของธูปฤาษีส่วนที่อยู่เหนือดินในส่วนต่างๆทั้งหมดของใบกว้างและใบแคบ ในรากจะมีปริมาณโพแทสเซียม (K) น้อยสุด ปริมาณแคลเซียม (Ca) ต่ำสุด จะพบในหน่อ ขณะที่ใบมีปริมาณโซเดียม (Na) ต่ำสุด ปริมาณธาตุอาหาร K, Ca, Na, Mg และ Mn ในทุกส่วนของธูปฤาษีใบกว้างจะสูงกว่าใบแคบ ส่วน Cu และ Zn จะพบมากที่สุดใกรากและมากเป็น 7-8 เท่า จากที่พบจากส่วนอื่นๆ และจากการทดลองพบว่า ปริมาณการสะสมธาตุโลหะหนักในธูปฤาษีใบกว้างจะมีปริมาณมากกว่าธูปฤาษีใบแคบซึ่งจากผลการทดลองสรุปได้ว่าธูปฤาษีใบกว้างมีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียมากกว่าธูปฤาษีใบแคบ

ชาลินี ศักดิ์แสน และ ศศิธร พุททวงษ์ (2550) การบำบัดโครเมียมและอาร์เซนิกด้วยหญ้าแฝกและธูปฤาษีในบึงประดิษฐ์ โดยพบว่าธูปฤาษีเป็นพืชที่มีความเหมาะสมในการบำบัดโครเมียมมากกว่าหญ้าแฝก และพบว่าพืทั้ง 2 ชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดอาร์เซนิกโดยเฉลี่ยต่ำกว่าร้อยละ 50 แต่ยังสามารถทนทานและเจริญเติบโตได้ดีในสภาพน้ำเสีย

ปริยพันธ์ ศรีสุวรรณ (2552) ได้วิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณของชั้นดินตะกอนแนวตั้งในทะเลน้อยด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน โดยพบว่าปริมาณของธาตุชนิดต่างๆที่เปรียบเทียบในตัวอย่างดินตะกอนบริเวณป่าพรุและบริเวณชุมชนทะเลน้อย คือ ดินตะกอนบริเวณป่าพรุพบว่าปริมาณธาตุซิลิกอนและธาตุเซอร์โคเนียมมีค่าต่ำกว่าบริเวณชุมชนอย่างชัดเจน ดินตะกอนบริเวณป่าพรุและบริเวณชุมชนพบว่าปริมาณธาตุไทเทเนียมและแมงกานีสมีค่าใกล้เคียงกัน ดินตะกอนบริเวณป่าพรุพบว่าปริมาณธาตุรูปีเดียม แคลเซียม และเหล็ก มีค่าสูงกว่าบริเวณชุมชน และพบว่าบริเวณจุดเก็บตัวอย่างที่อยู่ใกล้กันจะมีปริมาณธาตุใกล้เคียงกันซึ่งอาจมีบริเวณที่แตกต่างจากบริเวณอื่นเล็กน้อย

สุนันทา ชูทอง (2549) การเตรียมตัวอย่างสารมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์สาหร่ายผมนางเชิงปริมาณ ด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี โดยอาศัยเทคนิคการสร้างกราฟมาตรฐานผลของการวิเคราะห์พบว่าจะได้ความเข้มข้นของแมงกานีสตัวอย่างสาหร่ายผมนางเท่ากับ 1783.24 cps และเมื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นของแมงกานีสในสาหร่ายผมนางเท่ากับ 1867.5142 ppm และจากการทดลอง พบว่าการวิเคราะห์ WDXRF จะมีความลพเอียดกว่าการวิเคราะห์ด้วย EDXRF เนื่องจากค่าการเบี่ยงเฉลี่ยของกราฟที่วิเคราะห์ด้วย WDXRF เท่ากับ 0.98941ซึ่งใกล้เคียงกับ 1 มากกว่าค่าเบี่ยงเบนของกราฟที่วิเคราะห์ด้วย EDXRF ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.98476

เบนจมา คมวงษ์เทพ (2551) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบหลักในหินปูน จากแหล่งหินปูนจังหวัดพัทลุง โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมตรี พบว่าตัวอย่างหินปูนจากแหล่งหินปูนจังหวัดพัทลุง จำนวน 109 ตัวอย่าง ส่วนใหญ่เป็นหินปูนที่มีความบริสุทธิ์ต่ำ (low purity) และเป็นหินปูนที่ไม่บริสุทธิ์ (impure) ซึ่งมีจำนวน 48 ตัวอย่าง และ 52 ตัวอย่าง ตามลำดับ

Jastrzebska et al., (2003) ได้ตรวจวัดฟอสฟอรัสในตัวอย่างอาหาร โดยใช้เทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์และการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน พบว่าเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายความยาวคลื่น เป็นการเปรียบเทียบโดยเทียบกับสารมาตรฐานโมลิบดีนัม ซึ่งจากการอภิปรายถือเป็นวิธีที่ถูกต้อง แม่นยำและน่าเชื่อถือ นั่นคือเป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องและถือเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์อาหาร

Chatterjee et al., (2002) ได้ตรวจวัดโลหะหนักในโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้เทคนิค SXRF พบว่าตัวอย่างของวัตถุติดและของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่รวมเป็นกลุ่มก้อนและผ่านกระบวนการหลอมของตะกั่วในกระบวนการที่ต่างกัน สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SXRF โดยตรวจพบโลหะหนัก Cb, Cd, Sn, และ Pb เป็นส่วนใหญ่

Radu และ Diamond (2009) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบความเข้มข้นของดินในพื้นที่ขุดเหมืองแร่ที่ใช้ทำเครื่องเงิน โดยใช้เทคนิคอะตอมมิกแอฟซอพซันและเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ พบว่าการใช้เทคนิคอะตอมมิกแอฟซอพซัน ผลพิษที่พบในปริมาณมาก ได้แก่ Pb, As, Cu, และ Zn และพบว่าการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สามารถให้ผลที่ดีเยี่ยมกว่าเทคนิคอะตอมมิกแอฟซอพซัน

Buddhawong, S. and Saksae, C. (2007) ได้ศึกษาผลของการปลูกต้นรูปฤาษีและหญ้าแฝก (vetiver) พบว่าการปลูกรูปฤาษีและหญ้าแฝกช่วยลดปริมาณโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำลงได้ถึง 98% เมื่อเทียบกับน้ำทิ้งที่ไม่มีการปลูกพืชซึ่งลดลงเพียง 60%

Galiulin, R.V., Bashkin, V.N. Galiulina, R.R. and Birch, P. (2001) ได้ทบทวนเอกสารงานวิจัยที่นำเสนอการแก้ปัญหามลพิษจากภาคอุตสาหกรรมโดยใช้พืชดูดซับโลหะหนัก พบว่าสามารถลดปัญหามลพิษ และเป็นวิธีการที่ประหยัด ไม่ซับซ้อน

Kumar, J. and Sheel, R. ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักของรูปฤาษีพบว่ารากของรูปฤาษีดูดซับโลหะหนักอย่าง Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb และ Zn ได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนลำต้นและใบ ส่วนลำต้นจะดูดซับ Fe ได้ดีที่สุตามด้วย Zn, Mn, Cu, Cr, Pb และ Cd ตามลำดับ

Bareen, F. and Khilji, S. (2008) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของต้นรูปฤาษีโดยทำการศึกษาธาตุ Na, Cr, Cu และ Zn เปรียบเทียบสัดส่วนการดูดซับธาตุดังกล่าวจากรากและจากต้นอ่อนในระยะเวลา 90 วันนับจากเริ่มปลูกต้นรูปฤาษีในพื้นที่ควบคุมปริมาณโลหะหนักที่เตรียมขึ้นได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับโลหะหนักของรากสูงกว่าในต้นอ่อนมากกว่า 2 เท่า ดังแสดงผลในตารางที่ 3

Capote, G., Ribeiro, S., Arribere, A. and Hernandez, A. (2001) ได้ใช้หลักการ Instrumental neutron activation analysis (INAA) วิเคราะห์ปริมาณธาตุที่อยู่ในสารเภสัชรังสีและทำการตรวจวัดรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นด้วยหัววัด HPGe

Papaefthymiou, H., Symeopoulos, B.D. and Soupioni, M. (2007) ได้ทำการตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันและทำการตรวจวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นในธรรมชาติในตัวอย่างแร่ลิกไนท์และถ่านหินในแหล่ง Megalopolis ประเทศกรีซ

ตารางที่ 3 สัดส่วนโลหะหนักที่ให้กับต้นพืชกับปริมาณที่ตรวจเจอในรากพืชและในต้นอ่อนพืช (Bareen, 2008)

Metals	Concentration	Amount of metal in sludge concentrations	Amount of metal in roots after 90 days	Amount of metal in shoots after 90 days	Coefficient of bioaccumulation in roots	Coefficient of bioaccumulation in shoots
Na	30%	312.5	4,306	1,902	13.77	6.08
	60%	652.3	6,698	3,745	10.26	5.74
Cr	30%	85.3	11,520	5,512	135.0	64.61
	60%	172.3	20,210	10,150	117.29	58.90
Cu	30%	30.6	4,954	1,908	161.89	62.35
	60%	51.3	7,022	3,509	136.88	68.40
Zn	30%	68.2	7,406	5,280	108.59	77.41
	60%	135.1	16,325	7,025	120.84	51.99

โดยตรวจวัด ^{238}U จากโฟโตพีคของ ^{234}Th (63.3 และ 92.8 keV) ตรวจวัด ^{226}Ra จากโฟโตพีคของ รังสีแกมมาที่พลังงาน 3 พลังงานจากไอโซโทป ^{214}Bi (609.3, 1120.3 และ 1764.5 keV) และโฟโตพีคที่พลังงาน 2 ค่าของ ^{214}Pb (295.2 keV และ 352.0 keV) ส่วน ^{232}Th วิเคราะห์จากโฟโตพีคของ ^{228}Ac (911.1 keV) และโฟโตพีคของ ^{212}Pb (583.1 keV) และโฟโตพีคของ ^{208}Tl (238.6 keV) ตรวจวัด ^{40}K จากรังสีแกมมาที่พลังงาน 1460.8 keV