

การวิเคราะห์ธาตุที่เป็นพิษในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน

THE LIBRARY
COLLEGE OF EDUCATION
BANGKOK THAILAND
วิทยานิพนธ์

ขอ

เสนอ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต

7 มีนาคม 2518

คณะกรรมการที่ปรึกษาประจำตัวนิสิตได้พิจารณาปัญหานี้นี้แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้.

..... อินท-พล ประธาน

..... กมล-พล กรรมการ

7 มีนาคม 2518

ประกาศญ่ปการ

การทำปริญญานิพนธ์ครั้งนี้ได้รับความช่วยเหลือจากกองเคมี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงอุตสาหกรรม ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดีเนื่องจากผู้เขียนได้รับคำแนะนำและช่วยเหลือจากอาจารย์ ม.ล. อนงค์ นิลอุบล หัวหน้ากองเคมี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ อาจารย์สมเกียรติ กรีทอง, รองศาสตราจารย์สุนทรี พิริยกิจ คณะวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร และคุณเชาวน์ รอคทองคำ นักวิทยาศาสตร์โท กองเคมี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ตลอดจนเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ผู้เขียนขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สุรน เสถียรยานนท์

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ.....	1
	คำนำ.....	1
	✓ ความมุ่งหมายของการศึกษาคนควา.....	4
	ความสำคัญของการศึกษาคนควา.....	4
	ขอบเขตของการศึกษาคนควา.....	5
	คำว่ากักความและศัพท์เฉพาะ.....	5
	เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาคนควา.....	7
2	ทฤษฎี	14
	การวิเคราะห์แบบนิเวตรอนแอคติเวชัน.....	14
3	เครื่องมือและวิธีดำเนินการ.....	30
	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	30
	วิธีการเก็บตัวอย่าง.....	39
	วิธีดำเนินการทดลอง.....	40
4	การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง.....	83
	สถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล.....	84
	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	86
5	บทย่อ สรุปและขอเสนอแนะ.....	95
บรรณานุกรม		
ภาคผนวก ก.		
ภาคผนวก ข.		
ภาคผนวก ค.		
ภาคผนวก ง.		

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	แสดงคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุ Hg, As, Cu และ Se	42
2	แสดงปริมาณของธาตุ Hg, As, Cu และ Se ในน้ำส่วนบน, ในคลองแสนแสบ ซึ่งเก็บตัวอย่างน้ำในฤดูฝนในระหว่างเดือน มีนาคมถึงเมษายน 2517	81
3	แสดงปริมาณของธาตุ Hg, As, Cu และ Se ในน้ำส่วนบนใน คลองแสนแสบ ซึ่งเก็บตัวอย่างน้ำในฤดูฝนในระหว่างเดือน กันยายนถึงตุลาคม 2517	82
4	แสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Hg, As, Cu และ Se ใน สารตัวอย่างน้ำซึ่งเก็บในฤดูร้อน	84
5	แสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Hg, As, Cu และ Se ใน สารตัวอย่างน้ำซึ่งเก็บในฤดูฝน	84
6	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างธาตุ Hg กับ Hg, As กับ As, Cu กับ Cu และ Se กับ Se ในสาร ตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อนกับฤดูฝน	85

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
1	Block Diagram แสดงส่วนประกอบของ Ge-Li Detector....	32
2	รูปเครื่องวัดกัมมันตภาพรังสี Ge-Li	34
3	Block Diagram แสดงส่วนประกอบของ multichannel - spectrometer	35
4	รูปเครื่องวัดกัมมันตภาพรังสี NaI(Tl).....	38
5	แสดงแผนที่คลอสมสแนปและจุดเก็บตัวอย่างน้ำ	39
6	โคอะแกรมแสดงการสลายตัวของนิวเคลียสของธาตุ Cu	44
7	กราฟแสดงพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจากธาตุ Cu ⁶⁴	45
8	โคอะแกรมแสดงการสลายตัวของนิวเคลียสของธาตุ As	46
9	กราฟแสดงพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจากธาตุ As ⁷⁶	47
10	โคอะแกรมแสดงการสลายตัวของนิวเคลียสของธาตุ Se	48
11	กราฟแสดงพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจากธาตุ Se ⁷⁵	49
12	โคอะแกรมแสดงการสลายตัวของนิวเคลียสของธาตุ Hg	50
13	กราฟแสดงพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจากธาตุ Hg ²⁰³	51
14	โคอะแกรมแสดงการแยกธาตุ As และ Cu ให้บริสุทธิ์ด้วยวิธี ตกตะกอน	54
15	โคอะแกรมแสดงการแยกธาตุ Se และ Hg ให้บริสุทธิ์ด้วยวิธี ตกตะกอน	57
16	แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ของธาตุ Cu ⁶⁴ ในสารมาตรฐาน และสารตัวอย่างน้ำฤดูร้อนเบอร์ S. 1..	64
17	แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ของธาตุ As ⁷⁶ ในสารมาตรฐาน และสารตัวอย่างน้ำฤดูร้อนเบอร์ S. 19	68

18	แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ของธาตุ Se^{75} ในสารมาตรฐาน และสารตัวอย่างนำฤดูรอนเบอร์ S. 1	74
19	แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ของธาตุ Hg^{203} ในสารมาตรฐาน และสารตัวอย่างนำฤดูฝนเบอร์ R. 6	80
20	แสดงสเปกตรัมของธาตุต่าง ๆ ซึ่งเก็บในฤดูรอนในน้ำส่วนบนใน คลองแสนแสบ	87
21	แสดงสเปกตรัมของธาตุต่าง ๆ ซึ่งเก็บในฤดูฝนในน้ำส่วนบนในคลอง แสนแสบ	88

คำนำ

ปัจจุบันนี้หลาย ๆ ประเทศทั่วโลกกำลังประสบปัญหาหนึ่งที่วิตกอย่างยิ่งและกำลังได้รับความสนใจอย่างมาก ก็คือปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ ปัญหาน้ำเสียและอากาศเป็นพิษเป็นปัญหาใหญ่ การเพิ่มของประชากรอย่างรวดเร็ว ตลอดจนความเจริญทางวิทยาศาสตร์ได้ก่อให้เกิดสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ การปล่อยควันไอเสียจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงออกไปในอากาศ และยิ่งกว่านั้นการทิ้งสิ่งปฏิกูลต่าง ๆ ที่เกิดจากการอุปโภคบริโภคลงสู่แม่น้ำลำคลอง การระบายน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่แม่น้ำลำคลองโดยตรง เป็นการปล่อยสารหลายชนิดที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น ปรอท สารหนู ตะกั่ว เป็นต้น ลงในแม่น้ำลำคลอง (1) (2)

น้ำเป็นสิ่งจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต เพราะแหล่งน้ำใช้ทำประโยชน์ต่าง ๆ และเป็นแหล่งสะสมอาหารของมนุษย์และสัตว์ สัตว์น้ำตัวเล็ก ๆ ได้อาศัยสำหรับ โปรโตซัวที่อยู่ในน้ำเป็นอาหาร เมื่อสัตว์เหล่านี้เจริญเติบโตก็เป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์อื่น ๆ ต่อไป ปัญหา น้ำเสียในประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในนครหลวง เป็นปัญหาความเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อมอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการพัฒนาอุตสาหกรรมและชุมชนที่ขาดระเบียบแบบแผน น้ำเสียมีส่วนคุกคามต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน ก่อให้เกิดผลเสียหลายต่อการเกษตร การประมง คุณค่าสุนทรียภาพของลำน้ำ

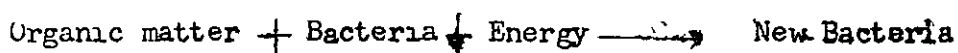
สาเหตุของน้ำเสียโดยทั่ว ๆ ไปน้ำเสียก็คือน้ำสกปรก น้ำไม่บริสุทธิ์ คุณลักษณะของน้ำนั้นเปลี่ยนไปจากเดิมตามธรรมชาติ ซึ่งจะทำให้เกิดผลเสียต่อการใช้ประโยชน์นานาประการของน้ำ ในลำน้ำ คุณลักษณะของน้ำที่สำคัญอย่างหนึ่งก็คือสารละลายออกซิเจน ซึ่งจำเป็นในการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ในน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสอันเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของลำน้ำในประเทศไทย สารละลายออกซิเจนจะมีอยู่ได้ไม่เกิน 8 มิลลิกรัมต่อลิตร (3) ถ้าปริมาณสารละลายออกซิเจนในน้ำลดต่ำกว่า 3 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำนั้นจัดว่าเสีย ทั้งนี้ถ้าถือเอาสารละลายออกซิเจนเป็นหลัก น้ำเสียจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือน้ำเสียชนิดที่สารละลายออกซิเจนไม่ลดลง และน้ำเสียชนิดที่สารละลายออกซิเจนลดลง

น้ำเสียชนิดแรกอาจเรียกได้น้ำเป็นพิษ กล่าวคือมีสารที่เป็นพิษต่าง ๆ เช่นกรด ค่าง ไซยาไนด์ ยาฆ่าแมลง ตะกั่ว โครเมียม ฯลฯ ละลายปนอยู่ในน้ำ ความเข้มข้นของสารละลาย ออกซิเจนในน้ำที่เป็นพิษจะไม่ต่ำกว่าปรกติ น้ำเสียประเภทนี้ไม่พบกันบ่อยนัก

น้ำเสียชนิดที่สองที่พบกันอยู่ทั่วไปเกิดขึ้นเนื่องจากมีสารละลายอินทรีย์ต่าง ๆ ละลายเจือปน อยู่ สารอินทรีย์เหล่านี้มีอยู่ในน้ำโสโครกและสิ่งปฏิกูลจากบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียย่อยสลายได้ (Biodegradable Organic Matter) ประกอบด้วยธาตุสำคัญคือ C, O, H, N และ S ทราบว่าที่สารละลายออกซิเจนในน้ำยังมีเหลืออยู่ แบคทีเรียชนิดต้องการออกซิเจน (Aerobic Bacteria) จะใช้ออกซิเจนเผาผลาญสารอินทรีย์ เพื่อให้ได้พลังงาน สารอินทรีย์จะถูกทำลายกลายเป็นสารประกอบต่าง ๆ ซึ่งอยู่ตัว (Stabilized Compounds) เช่น CO_2 , NO_3^- , H_2O , $\text{SO}_4^{=}$ ฯลฯ ดังสมการ



พลังงานที่ได้นั้นจะถูกนำไปใช้ในการเจริญเติบโต เพื่อสร้างเซลล์ใหม่ โดยใช้สารอินทรีย์ อีกจำนวนหนึ่ง ดังสมการ



ดังนั้นความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำมีมาก สารละลายออกซิเจนอาจจะถูกใช้หมดไปได้ แบคทีเรียชนิดไม่ต้องการออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) ก็จะเจริญเติบโตและทำลายสารอินทรีย์โดยใช้ออกซิเจนที่รวมอยู่ในสารอินทรีย์และสารประกอบอื่น ๆ ทำให้เกิดแก๊ส NH_3 , CH_4 และ H_2S แก๊สพวกนี้มีกลิ่นเหม็น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง H_2S นอกจากจะมีกลิ่นเหม็นยังทำปฏิกิริยากับ โลหะต่าง ๆ กลายเป็นเกลือซัลไฟด์ ทำให้น้ำเน่าเหม็นและมีสีค้ำงในลำคลองต่าง ๆ ในนครหลวง ขณะนี้

ดังนั้น จะเห็นว่าสารเคมีส่วนมากจะมีทั้งคุณและโทษ จึงเปรียบประหนึ่งดาบสองคม ไม่ว่า ยารักษาโรคก็ดี ผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรมก็ดี ล้วนแล้วแต่มีสารเคมีเป็นองค์ประกอบทั้งสิ้น สารเคมี ที่เป็นพิษต่อร่างกายนั้นมีมากมายหลายร้อยชนิด เช่น พิษของปรอท ไอของปรอท หรือสารประกอบ ของปรอท ล้วนแล้วแต่เป็นอันตรายต่อร่างกายทั้งสิ้น และในสารที่ร่างกายสามารถกำจัดออก

(ทางปัสสาวะ) ได้น้อยมาก (4) จึงถูกสะสมอยู่ภายในร่างกายและเนื่องจากขนาดความปลอดภัย (dose) ของมันต่ำเพียง 50 มิลลิกรัมก็ทำให้ถึงแก่ชีวิตได้ นอกจากนี้องค์การ FAO ได้กำหนดให้อาหารและยามีปรอทไม่เกิน 0.5 ppm. ในน้ำดื่มควรมีไม่เกิน 0.005 ppm. และมีขีดปลอดภัยในการบริโภคปรอทของคนไม่ควรให้เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อวัน (4)(5)

สารประกอบของปรอทเป็นอันตรายทั้งสิ้น ซึ่งอันตรายของสารพวกนี้แต่ละตัวขึ้นกับการละลายน้ำของมัน และความสามารถในการดูดซึมของลำไส้ (6) เช่น เกลลิโอนินทรีย์จะเป็นอันตรายน้อยกว่า เกลลิออนทรีย์ และในบรรดาเกลลิออนทรีย์ด้วยกันแล้ว แอลคิล เมอคิวรี (Alkyl Mercury) เป็นพวกที่ร้ายแรงที่สุด เช่น เมทิล เมอคิวรี (Methyl Mercury) เพราะลำไส้ดูดซึมได้ดีที่สุด ส่วนพวก เกลลิออนินทรีย์จะพบว่า $HgCl_2$ ร้ายแรงกว่า Hg_2Cl_2 นอกจากจะได้รับอันตรายจากสารเคมีโดยตรงแล้ว ยังอาจได้รับจากสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เช่น จากอาหารที่รับประทาน น้ำดื่มเป็นต้น สาเหตุที่สำคัญส่วนใหญ่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้ปรอทหรือสารประกอบของมัน (7)(8) เช่น โรงงานผลิตอุปกรณ์ทางเคมี โรงงานกระดาษ โรงงานทำสักรีด โรงงานฟอกหนัง โรงงานผลิตเครื่องสำอาง ฯลฯ เหล่านี้เป็นต้น จะปล่อยสิ่งเป็นพิษไปตามน้ำ ปรอทในแม่น้ำลำคลอง (9) จะมีแบคทีเรียชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนปรอทที่อยู่ในรูปต่าง ๆ ให้กลายเป็น เมทิล เมอคิวรี ได้ทั้งนั้น ปลาและสัตว์น้ำอื่น ๆ จะได้รับปริมาณปรอทมากขึ้นเข้าไปสะสมภายในตัวของมัน (10)(11) และเมื่อมนุษย์บริโภคเนื้อปลาก็จะได้รับปรอทเข้าไปโดยปริยาย ถ้าปริมาณของปรอทมาก ก็อาจถึงตายได้เช่นกัน (12)

เมื่อปรอทเข้าสู่ร่างกายเข้าสู่กระแสเลือด ปรอทจะเข้าไปจับกับโคเอนไซม์เอ (Coenzyme - A) เพราะโคเอนไซม์เอมีหมู่ซัลไฟริลอยู่ (-SH) ได้สารประกอบ (CoA-Hg-SH) ซึ่งไม่รวมตัวกับกรดไพรูวิก (Pyruvic acid) ดังนั้นเซลล์จะเปลี่ยน Acetyl - CoA เป็นกรดแลคติก (Lactic acid) ทำให้กล้ามเนื้อเมื่อยล้าและมีสภาพเป็นกรดมาก ๆ จะทำให้เซลล์ตายในที่สุด (13)(14)(15).

เมื่อปี 1950 ชาวประมงแถวอ่าวมินามาตะ ประเทศญี่ปุ่นป่วยเป็นโรคทางระบบประสาทขึ้น ล้มตายมากมาย (4)(16) ซึ่งค้นพบสาเหตุในภายหลังว่า ชาวประมงเหล่านี้ได้บริโภคปลาที่มีปริมาณเมทิล เมอคิวรีสูงเข้าไปนั่นเอง ถึงแม้ว่าเหตุการณ์ร้ายแรงเช่นนี้จะยังไม่ได้เกิดขึ้นในประเทศไทยเราก็ตาม เราก็ควรจะมีการป้องกันให้รัดกุมและจริงจังไว้เสมอว่า ปรอทเป็นสารมีพิษ อาจทำ

อันตรายถึงชีวิตได้ นอกจากปรอทอาจเป็นพวกตะกั่ว ซึ่งตะกั่วเป็นธาตุที่ให้โทษแก่ร่างกายมนุษย์ ทำให้เกิดโรคตะกั่วเป็นพิษ (17)(18) ปริมาณของตะกั่วที่อาจจะเป็นพิษต่อร่างกายได้ เกณฑ์ทั่วไป ถือว่าหากร่างกายได้รับตะกั่วเกินกว่า 0.6 มิลลิกรัมต่อ 1 วัน (19) แล้ว และเป็นระยะเวลาต่อเนื่องกัน จะทำให้เกิดอาการเป็นพิษจากตะกั่ว แต่การหาปริมาณตะกั่วในน้ำนั้น เขาไม่ใช้วิธี NAA ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้ทำโดยวิธี NAA จึงไม่หาปริมาณตะกั่ว แต่ต้องการให้ทราบว่าในน้ำนั้นมีธาตุตะกั่วที่ทำให้เกิดโทษต่อร่างกายมนุษย์ด้วย

นอกจากนี้ในน้ำเสียยังประกอบด้วยสารที่เป็นพิษอื่น ๆ อีกมากมาย ซึ่งเรายังไม่ค้นพบหรือบางแห่งยังไม่ได้ทำการวิจัยว่ามีธาตุที่เป็นพิษอะไรอยู่บ้าง เหตุที่กล่าวเหล่านี้เองจึงเป็นเหตุคลีใจให้ผู้ทำการวิจัยได้ทำการวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นพิษในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันขึ้น เหตุผลใหญ่ที่ทำการวิจัยเรื่องนี้ เพื่อจะได้ทราบว่าในคลองแสนแสบ ซึ่งน้ำเสียหรือเน่าว่ามีธาตุที่เป็นพิษต่อร่างกายของมนุษย์อะไรอยู่บ้าง ตลอดจนมุ่งศึกษาหาธาตุที่เป็นพิษที่สำคัญ เช่น ปรอท สารหนู ทองแดง เซเลเนียม คั่ว เพราะธาตุเหล่านี้มีปริมาณมากหรือน้อยเกินไป อาจถึงชีวิตได้ นอกจากนี้สองฝั่งของคลองนี้ ประชาชนตั้งบ้านเรือนอยู่หนาแน่น จำนวนหลายพันครอบครัวได้อาศัยน้ำในคลองนี้ทำการอุปโภคและบริโภค ตลอดจนทำการกลักรวมและอื่น ๆ อีกจำนวนมาก และเหตุที่ใช้วิธีวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน เพราะว่าวิธีนี้สามารถวิเคราะห์หาธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ ได้

ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นพิษเฉพาะในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ โดยใช้วิธีทางนิวเคลียร์ที่เรียกว่าวิธีวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน

ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า

1. ผลของการศึกษาค้นคว้านี้ จะทำให้ทราบว่าธาตุที่เป็นพิษอะไรอยู่บ้าง และมีปริมาณเท่าใด เฉพาะในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในทางการแพทย์เกี่ยวกับสมุฏฐานของการเกิดโรค และอาจนำทางให้เกิดการป้องกันการเป็นโรคต่าง ๆ และการรักษาพยาบาลที่ถูกต้องได้

2. เทคนิคและวิธีการที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าและทดลองในครั้งนี้สามารถนำไปใช้ในการเรียนการสอนวิชานิวเคลียร์ฟิสิกส์ และวิชาเคมีระดับอุดมศึกษาได้

3. เทคนิคและขบวนการทดลองครั้งนี้จะได้หลักและวิธีการวิเคราะห์ที่เหมาะสมเกี่ยวกับ Water Pollution เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ทำการวิจัยเกี่ยวกับ Water Pollution ได้ศึกษาต่อไป

ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า

การศึกษาค้นคว้ามีขอบเขตดังนี้

1. ศึกษาเฉพาะในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ โดยสุ่มตัวอย่างน้ำในฤดูร้อน 21 ตัวอย่าง ในฤดูฝน 21 ตัวอย่าง รวม 42 ตัวอย่าง จากคลองแสนแสบ กรุงเทพมหานคร
2. ศึกษาเฉพาะธาตุที่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์เท่านั้น
3. ในการวิเคราะห์ครั้งนี้วิเคราะห์ด้านคุณภาพวิเคราะห์ (Qualitative Analysis) โดยวิธี NAA แบบ Non-Destructive Method และใช้ Ge(Li) Detector วัดกัมมันตภาพรังสี ส่วนวิเคราะห์ด้านปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative Analysis) โดยวิธี NAA แบบ Destructive Method และใช้ Multichannel Gamma Spectrometer วัดกัมมันตภาพรังสี

คำจำกัดความและศัพท์เฉพาะ

1. Activation Analysis คือ การวิเคราะห์สิ่งของด้วยรังสี หมายความว่าถ้านำเอาสิ่งของที่ต้องการวิเคราะห์แม้จะมีขนาดเล็กหรือปริมาณน้อยมากจนแทบมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น นำไปอบรังสีนิวตรอนหรืออนุภาคที่มีพลังงานสูง ธาตุบางอย่างในสิ่งของนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เรียกว่า Nuclear Transformation เกิดเป็นธาตุเรกิโอไอโซโทป มีหลักการเช่นเดียวกับการผลิตไอโซโทป หลังจากนั้นธาตุเรกิโอไอโซโทปก็จะสลายตัวพร้อมกับให้รังสี ขนาดพลังงานต่าง ๆ และปริมาณต่าง ๆ กับ ซึ่งนักวิทยาศาสตร์สามารถจะตรวจสอบและวัดปริมาณรังสีได้

2. การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชัน (NAA) หมายถึงการยิง (Bombard) อนุภาคนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ และจะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุนั้น (Nuclear Reaction) อะตอมของธาตุเหล่านั้นจะเปลี่ยนเป็นไอโซโทปของธาตุเดิมหรือธาตุใหม่

ส่วนมากไอโซโทปที่เกิดขึ้นจะเป็นไอโซโทปชนิดที่มีรังสี (Radioisotope) เมื่อวัดความแรงรังสีเทียบกับสารมาตรฐานก็จะทราบปริมาณของธาตุในสารเคมี

3. Destructive NAA หมายถึงวิธีวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยนำสารมาตรฐานและสารตัวอย่างอาบรังสีนิวตรอนแล้วอาศัยวิธีการทางเคมี (Chemical Separation) แยกเอาสารกัมมันตภาพรังสีตัวที่ต้องการ หรือไม่ต้องการออกมาแล้วตรวจนับแบบไหนสะดวกกว่ากัน แล้วนำเอาธาตุกัมมันตรังสีตัวที่ต้องการ ซึ่งไม่มีสารรังสีชนิดอื่นเจือปน ไปวัดหากัมมันตภาพรังสี

4. Non-Destructive NAA หมายถึงวิธีวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในสารตัวอย่างโดยนำสารมาตรฐานและสารตัวอย่างอาบรังสีนิวตรอนแล้วนำมาวัดรังสีซึ่งไม่ต้องผ่านขั้นตอนการทางเคมี

5. ppm. (Part Per Million) หมายถึงหน่วยเปรียบเทียบปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง ปริมาณธาตุหนึ่ง ppm. หมายถึงมีธาตุนั้นหนึ่งในล้านในสารตัวอย่างหนึ่งล้านส่วน

6. ธาตุที่เป็นพิษ (Poisonous Trace Elements) หมายถึงธาตุที่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ เมื่อมนุษย์ได้รับปริมาณเล็กน้อย จะทำให้เป็นอันตรายหรือเกิดโรคต่าง ๆ ในภายหลัง หรือถ้าเกิดการสะสมอยู่ในร่างกายของมนุษย์มากพอแล้ว อาจเป็นอันตรายถึงเสียชีวิตได้

7. ในน้ำส่วนบน (in surface water) หมายถึงความลึกของน้ำไม่เกิน 30 เซนติเมตร จากผิวน้ำ

8. น้ำเสีย หมายถึงการที่คุณลักษณะของน้ำนั้นเปลี่ยนไปจากเดิมตามธรรมชาติ และมีสิ่งเจือปนที่ผสมอยู่ในน้ำบางชนิด อาจทำให้เกิดโรคและทำลายสุขภาพของมนุษย์ได้ เมื่อน้ำมีสิ่งเจือปนมาก ๆ BOD (Biochemical Oxygen Demand) หรือ COD (Chemical Oxygen Demand) ของน้ำนั้นจะสูงขึ้น หมายถึงว่าออกซิเจนในน้ำลดลง ถ้าต่ำกว่า 3 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำนั้นจัดว่าเป็นน้ำเสีย

9. สารมาตรฐาน หมายถึงสารละลายซึ่งนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบกับกัมมันตภาพรังสีของสารละลายนั้นกับกัมมันตภาพรังสีของสารตัวอย่าง

10. NaI(Tl)-Detector หมายถึงเครื่องมือสำหรับวัดกัมมันตภาพรังสีโดยใช้ผลึกโซเดียมไอโอไดด์ ซึ่งแอคทีเวตด้วยเทลลูเรียมเป็นหัววัดรังสี ใช้ประกอบกับ 128 multichannel pulse height analyzer แล้วพิมพ์ข้อมูลด้วยเครื่องพิมพ์ IBM

11. ไอโซโทปกัมมันตรังสี หมายถึงไอโซโทปที่ไม่อยู่ตัวของธาตุ จะสลายตัวแผ่รังสีแอลฟา เบตา หรือแกมมาออกจากนิวเคลียส

12. กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) หมายถึงขบวนการซึ่งนิวเคลียสบางชนิดเกิดการสลายตัวส่งพลังงานออกมาแล้วกลายเป็นนิวไคลด์ชนิดใหม่ พลังงานที่ส่งออกมาจะอยู่ในรูปการแผ่รังสีชนิดต่าง ๆ

13. Ge(Li)-Detector หมายถึงเครื่องมือสำหรับวัดกัมมันตภาพรังสี ซึ่งใช้ผลึกเยอรมันเนียมและแอคติเวตด้วยลิเทียม (Li) เป็นหัววัดรังสีที่ใช้ประกอบอยู่กับ 1024 multi-channel pulse height analyzer (PHA) แล้วพิมพ์ข้อมูลด้วยเครื่องพิมพ์ IBM

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค้นคว้า

เมื่อปี ค.ศ. 1936 Hevesy และ H. Levi (20) นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน ได้เริ่มงานค้นคว้าเกี่ยวกับการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันขึ้นเป็นครั้งแรก ต่อมาในปี ค.ศ. 1938 G. T. Seaborg และ J.J. Livingood ได้เผยแพร่ผลงานการวิเคราะห์แบบแอคติเวชันเป็นครั้งแรกในสหรัฐอเมริกา หลังจากนั้นนักวิทยาศาสตร์หลายคนได้ทำการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน เช่น G.E. Boyd, D.N. Hume, R.T. Overman ฯลฯ และใน ค.ศ. 1949 G.E. Boyd ก็ได้จัดพิมพ์ผลงานของเขาเพื่อเผยแพร่และได้มีการอภิปรายถึงวิธีวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันอย่างกว้างขวาง ทำให้มีผู้สนใจในการวิเคราะห์แบบนี้กันมาก

รายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หน้า โดยวิธีการวิเคราะห์แบบแอคติเวชัน มีดังนี้

R.L. Blanchard, G.W. Leddicotte และ D. W. Moeller (1958) .
ทำการวิเคราะห์หน้าคัมโดยวิธี Destructive NAA (21) เขาเก็บตัวอย่างน้ำคัมในสหรัฐอเมริกาจากแหล่งต่าง ๆ มา 7 แหล่ง และตัวอย่างน้ำคัมที่ใช้ในการวิเคราะห์แต่ละครั้ง 30 มิลลิลิตร แล้วนำไปอาบรังสีนิวตรอน ความเข้ม 6.5×10^{11} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เมื่ออาบรังสีแล้วเขาใช้วิธีแยกทางเคมี (Chemical Separation) เพื่อแยกสารให้บริสุทธิ์ แล้ววัดรังสีด้วย Gamma Spectrometry ผลปรากฏว่าพบธาตุ (ปริมาณเป็น ppm.) ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้คือ Cl (7.0), Cu (0.004), Mg (9.50), K (2.50), Na (4.40), Sr (0.48), Zn (0.023), As (< 0.00002), Ba (0.010), Br (0.32), I (0.027) และ Mn (0.0004), Th (< 0.001)

ข้อมูลที่น่ามาแสดงนี้เฉพาะผลการวิเคราะห์หน้า

ที่ Chicago และ Illinois เท่านั้น ส่วนแหล่งอื่น ๆ ผลปรากฏว่าพบธาตุอย่างเดียวกัน แต่มีปริมาณแตกต่างกันเท่านั้น นอกจากนี้เขายังสรุปว่าวิธีการวิเคราะห์แบบนี้มีประโยชน์และเป็นวิธีที่ดีมาก เพราะสามารถวิเคราะห์หาธาตุที่มีปริมาณน้อยมาก ๆ ในน้ำดื่มได้ ซึ่งสมัยก่อนไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้

L.C. Bate, Y. Wellwart และ J.R. Stokely (1962) ทำการวิเคราะห์หา Trace Manganese ในน้ำแม่น้ำโดยวิธี Destructive NAA ซึ่งเกี่ยวข้องกับ $Mn^{55}(\beta, \gamma)$ $Mn^{56}(22)$ ในการศึกษาครั้งนี้ เขาใช้ตัวอย่างน้ำโดยการแปรปรมาครตั้งแต่ 10 ถึง 100 มิลลิลิตร และนำสารตัวอย่างแต่ละอันมาอบรังสีนิวตรอนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นเขาใช้กรรมวิธีทางเคมี (Chemical Separation) เพื่อแยกสารให้บริสุทธิ์ แล้วนำไปวัดปริมาณรังสีด้วย Gamma Spectrometry ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการ Determine the Purity of Radiochemical Separations ผลปรากฏว่าพบธาตุ Mn ในน้ำตัวอย่างประมาณ 10^{-3} ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ($\mu g./ml.$) นอกจากนี้เขายังวิเคราะห์หา Mn ใน Tap water และในน้ำกลั่นโดยวิธีวิเคราะห์แบบแอคทีเวชัน และใช้วิธีแยกทางเคมี (Chemical Separation) เช่นกัน ผลปรากฏว่าใน Tap water 4 ตัวอย่าง พบ Mn ดังนี้ 2 ตัวอย่างน้อยกว่า 10^{-3} ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และอีก 2 ตัวอย่างพบว่ามี Mn เท่ากับ 10^{-3} ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ส่วนในน้ำกลั่น 8 ตัวอย่าง พบว่ามีปริมาณของ Mn โดยเฉลี่ยเท่ากับ 12.63×10^{-3} ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ดังนั้นวิธีการนี้ใช้ในการวิเคราะห์หา Mn ในตัวอย่างน้ำได้ดี ดังนั้นในปัจจุบันนี้เขาจึงนิยมใช้วิธีนี้ในการวิเคราะห์หาธาตุต่าง ๆ ในน้ำ

Donald F. Schutz และ Karl K. Turekian (1965) แห่งมหาวิทยาลัยเยล ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณธาตุที่มีอยู่น้อย (Trace elements) ในน้ำทะเลโดยทำการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชัน (23) ธาตุที่มีปริมาณน้อยที่ศึกษาครั้งนี้มี 18 ธาตุ ผลการทดลองพบว่าเมื่อนำน้ำซึ่งเป็นสารตัวอย่างไปอบรังสีนิวตรอนในเวลาไม่นานนักแล้วนำมาวิเคราะห์ก็พบปรากฏว่าพบธาตุเหล่านี้คือ รูบิเดียม ซีเซียม แบเรียม ทอง ซีลีเนียม เงิน โคบอลต์ และนิกเกิล และหลังจากการอบรังสีนิวตรอน ความเข้ม (neutron flux) ขนาด $(2-6) \times 10^{13}$ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีเป็นเวลาจนถึง 150 ชั่วโมง ได้พบธาตุเหล่านี้ คือ ปรอท สังกะสี นิกเกิล โคบอลต์ เหล็ก แบเรียม เงิน

② ✓ H. Nakasa และ H. Ohno (1967) ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่มีอยู่น้อย (Trace elements) ในน้ำธรรมชาติโดยวิธี Non-Destructive NAA (24) เขานำน้ำตัวอย่างมาอบรังสีในเวลาต่าง ๆ กันที่นิวตรอนความเข้ม (Neutron flux) 1×10^{17} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที แล้ววัดปริมาณรังสีด้วย 3" X 3" NaI (Tl) Scintillation Counter and the 400 Channel pulse height analyzer ผลปรากฏว่าในการทดลองครั้งนี้พบธาตุต่าง ๆ ดังนี้ (ปริมาณเป็นไมโครกรัมต่อลิตร) Na (500-1,500), Sc (0.005-0.02), Fe (0.3-0.9), Zn (20-50), Sr (100-1,400), Sb (0.1-1.2), Cs (0.1-1.4)

Ove T. Hogdahl, Sigurd Melson และ Vaughan T. Bowen (1967) ทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของธาตุพวกแลนธาไนด์ (Lanthanide) ในน้ำที่ได้จากมหาสมุทรแอตแลนติกเหนือ โดยทำการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน (25) ผลปรากฏว่าในการทดลองครั้งนี้พบว่าธาตุพวกแลนธาไนด์อยู่หลายธาตุ และในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันนี้ สามารถหาปริมาณของธาตุที่มีอยู่น้อยได้ละเอียดถึงจุดเทคนิคตำแหน่งที่สองของไมโครกรัมต่อลิตร

Kyu Chang (1968) ทำการวิเคราะห์หา Arsenic และ Antimony ในตัวอย่างน้ำพุร้อนในประเทศเกาหลีโดยวิธี Non-Destructive NAA (26) เขานำสารตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์มาอบรังสีที่นิวตรอนความเข้ม (neutron flux) 1.1×10^{11} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นระยะเวลา 4 วัน ที่ Korean Atomic Energy Research Institute ผลปรากฏว่าในการทดลองครั้งนี้ เขาสามารถหาปริมาณของ As ได้เท่ากับ 0.04-1.21 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณของ Sb ได้เท่ากับ 0.007-0.018 มิลลิกรัมต่อลิตร

Kawakami Hirayasu (1969) ทำการวิเคราะห์หาปริมาณของปรอท (Hg) เป็นจำนวนไมโครกรัมในน้ำพุร้อนในประเทศญี่ปุ่นโดยวิธีทางเคมี Destructive NAA (27) เขานำน้ำตัวอย่างมา 400 มิลลิลิตรและทำให้มี pH 1.5 ด้วยกรดกำมะถัน แล้วนำสารตัวอย่างนี้มาเขย่าด้วย Dithizone-Chloroform หลังจากนั้นก็ระเหยจนแห้งด้วย Infrared Lamp ที่ 65 องศาเซลเซียส แล้วใช้ 2 มิลลิลิตรของ Chloroform แยกเอา Mercury Dithizonate แล้วกรองด้วยกระดาษกรอง หลังจากนั้นก็นำกระดาษกรองและสารมากระดามาใส่ลงในขวด Polyethylene พร้อมทั้งผนึกขวดด้วยความร้อน (heat sealing) แล้วนำไปอบรังสีนิวตรอนความเข้ม 2.1×10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และ Cool เป็นเวลา 5 วัน แล้ววัดปริมาณ

รังสีด้วย $1\frac{3}{4} \times 1$ " NaI Crystal กับ 400 Channel pulse height analyzer ผลปรากฏว่าในน้ำพุร้อนนี้มีปริมาณปรอทอยู่ 0.5-20 ไมโครกรัม ค่าที่ได้นี้เชื่อถือได้ 95 เปอร์เซ็นต์ และค่าผิดพลาด ± 5

Tetsuo Mamuro และคณะ (1969) ทำการวิเคราะห์น้ำในแม่น้ำในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเหมืองแร่ Tungsten เหนือเสียลงในแม่น้ำ เขาเก็บตัวอย่างน้ำมาทำการวิเคราะห์โดยวิธี Non-Destructive NAA (28) เขานำตัวอย่างน้ำมาทั้งหมด 29 มิลลิลิตร แล้วทำการระเหยให้เหลือ Residue 11.18 มิลลิกรัม หลังจากนั้นก็นำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานมาอบรังสีเป็นระยะเวลา 10 นาทีที่นิวตรอนความเข้ม 2.34×10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีที่ Kyoto University Research Reactor แล้วใช้ Ge(Li) detector วัดปริมาณรังสี ผลจากการทดลองปรากฏว่าพบธาตุทั้งหมด 20 ธาตุ ดังนี้ คือ

^{24}Na , ^{42}K , ^{46}Sc , ^{54}Mn , ^{56}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{64}Cu , ^{65}Zn , ^{76}As

^{82}Br , ^{86}Rb , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{115}Cd , $^{117\text{m}}\text{Sn}$, ^{122}Sb , ^{124}Sb , ^{134}Cs

^{140}La , ^{141}Ce , ^{153}Sm , ^{187}W

Tetsuo Mamuro และคณะ (1970) ทำการวิเคราะห์น้ำเสียในแม่น้ำโดยวิธีวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน (29) ในการศึกษาครั้งนี้เขาได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำในประเทศญี่ปุ่นจากน้ำเสียที่โรงงานเหมืองแร่ Tungsten ปลดปล่อยลงในแม่น้ำโดยการเก็บตัวอย่างน้ำมา 11.7 มิลลิลิตร และ 27.3 มิลลิลิตร แล้วนำมาระเหยให้เหลือ residues 4.486 มิลลิกรัม และ 10.488 มิลลิกรัมตามลำดับ แล้วนำ residues มาใส่ขวด Polyethylene เล็ก ๆ พร้อมกับผนึกขวดด้วยความร้อน (heat sealing) จากนั้นนำมาอบรังสีเป็นเวลา 3 และ 30 นาทีตามลำดับ แล้วนำไปวัดปริมาณรังสีด้วย Gamma ray spectrometry กับ high resolution Ge(Li) detector และพิมพ์ข้อมูลออกมาด้วย Electronic computer ผลปรากฏว่า ในการศึกษาครั้งนี้พบธาตุ 31 ธาตุ (ปริมาณเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร) ดังนี้ คือ

Na (4.6), Mg (32), Al (11), Cl (2.6), K (4.8), Ca (97), Sc (0.00081), V (0.018), Cr (0.011), Mn (0.63), Fe (14), Co (0.0057), Cu (1.6), Zn (3.0), As (0.51), Br (0.011), Rb (0.045), Ag (0.0073), Cd (0.14), In (0.0067), Sn (0.29), Cs (0.013), La (0.0058), Ce (0.013), Sm (0.0018), Eu (0.00042), Lu (0.0012), Ta (0.0002), W (0.67), Au (0.000010), Th (0.0034)

จำนวนธาตุที่พบเหล่านี้มีหลายธาตุที่เป็นธาตุสำคัญ ทำให้เกิดสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ (Environmental Pollution) เช่น Cd, As, Sn และ Cr เป็นต้น

Surinder K. Bhagat, William H. Funk, Royston H. Filby และ K.R. Shah (1971) ทำการวิเคราะห์หาธาตุในน้ำตัวอย่างในประเทศสหรัฐอเมริกา ณ มลรัฐวอชิงตัน โดยวิธี Non-Destructive NAA (30) เขาเก็บตัวอย่างน้ำและทำการทดลองที่ Washington State University TRIGA III research reactor of 1 Mw maximum power และใช้ Thermal neutron fluxes ระหว่าง $5 \times 10^{12} - 1.6 \times 10^{13}$ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที พวก Short half-life เขาใช้เวลาอบรังสี 5 นาที พวก Medium half-life ใช้เวลาอบรังสี 1 ชั่วโมง และสกัด Na ออกโดยใช้ HAP (hydrated antimony pentoxide) ส่วนพวก Long half-life เขาใช้เวลาอบรังสี 8 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ 2 สัปดาห์ เพื่อให้ Short half-life สลายตัว (decay) แล้วทำการวัดปริมาณรังสีด้วย Ge(Li) Gamma-ray spectrometer system ในการทดลองครั้งนี้ เขาพบ Trace elements ประมาณ 21 ธาตุดังนี้ (ปริมาณเป็น ppb)

K (1,000-100,000), Na (1,000-100,000), Fe (90-1,080), Mn (11-1,000), Cu (1.7-10), Cr (1.6-12), Co (0.2 - 1.0), Sc (0.03-0.05), Zn (12-125), Sr (70-120), Br (21-30), Sb (0.31-1.2), U (1.6-18), Au (0.08-0.16), Ba (16-150), Cs (0-0.1), Hg (1.1-5.3), Cl (20-300), Al (0.1-1.0), Th (0-0.1), Rb (4.15-35.0)

- ⑨ ✓ D.E. Becknell, R.H. Marsh และ William Allie, Jr. (1971) ทำการวิเคราะห์ Trace Mercury ในน้ำโดยวิธีวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน (31) ในการทดสอบแต่ละตัวอย่างใช้ตัวอย่างน้ำ 500 มิลลิลิตรมาเติม 0.1 N. HCl แล้วกรองโดยผ่าน 0.80- μ m Millipore Filters เพื่อ Remove suspended matter หลังจากนั้นก็ผ่านก๊าซคลอรีนซึ่งเตรียมจากโปตัสเซียมคลอเรตกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นลงไปในตัวอย่างน้ำเพื่อทำลายพวกสารประกอบพวก Organomercury แล้วกรองตัวอย่างน้ำโดยใช้ Anion exchange resin-loaded paper กรอง 7 ครั้ง แล้วนำ paper มาทำให้แห้งโดยอากาศ (Air dry) แล้วใส่ลงใน Mylar bags และผนึกด้วยความร้อน (heat sealing) เพื่อนำไปอบรังสีและเตรียมสารมาตรฐานปรอท เช่นกัน แล้วนำสารมาตรฐานและสารตัวอย่างมาอบรังสีนิวตรอนความเข้ม 1.3×10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที และปล่อยให้สลายตัว (decay) 3 - 4 วัน แล้วนำไปวัดปริมาณรังสีด้วย Pulse height analyzer; Ge(Li) detector ผลปรากฏว่าวิเคราะห์หาปริมาณของปรอทในตัวอย่างน้ำต่าง ๆ ได้ดังนี้

<u>Sample</u>	<u>Hg from 500 ml water, ppb</u>	
River A	0.45	0.014
River B	0.03	0.001
River C	0.27	0.011
Lake	2.20	0.070
Creek	6.56	0.131
Well	0.28	0.009

ดังนั้นการทดสอบหาปรอทโดยวิธีนี้สามารถหาปริมาณปรอทในตัวอย่างน้ำธรรมชาติได้ถึง 0.03 - 6.6 ppb.

T. Fujinaga และคณะ (1973) ทำการวิเคราะห์ Trace metal ions. V, Al, Cu, Mo, Zn และ U ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติโดยวิธี Destructive NAA (32) เป็นวิธีการอาศัยขบวนการทางเคมีเข้าช่วยโดยนำสารตัวอย่างมาอบรังสีในเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor)

เป็นเวลา 10 นาทีที่ Thermal flux 2×10^3 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที แล้วใช้วิธีทางเคมีแยกธาตุที่ต้องการออกมาโดยทำให้ตกตะกอน แล้ววัดปริมาณรังสีด้วย NaI detector นอกจากนี้เขายังทำการวิเคราะห์น้ำโดยวิธี Non-Destructive NAA ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ใช้ขบวนการทางเคมีเข้าช่วยควบคู่กัน แต่การวิเคราะห์วิธีนี้เขาวัดปริมาณรังสีด้วย Ge(Li) detector connected to a 1024 - Channel PHA ผลปรากฏดังนี้ (ปริมาณเป็นไมโครกรัมต่อลิตร)

Underground Water, Al (3.14), V (1.26), Cu (21.20), Zn (28.6),
Mo (1.9), U (0.22)

Lake Water; Al (6.90), V (0.12), Cu (2.86), Zn (23.8)
Mo (not), U (0.18)

Sea Water, Al (8.26), V (1.08), Cu (1.12), Zn (42.2),
Mo (11.5), U (3.50)

จากรายงานการวิจัยเหล่านี้จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชัน สามารถวิเคราะห์ธาตุในสารตัวอย่างน้ำได้มากมายหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นวิธี Destructive NAA หรือ Non-Destructive NAA ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุส่วนประกอบที่ปะปนอยู่ในสารตัวอย่างและชนิดของสารตัวอย่าง

การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชัน (Neutron Activation Analysis)

การวิเคราะห์แบบแอคทีเวชัน (activation analysis) เป็นวิธีการวิเคราะห์อย่างหนึ่งที่นักวิทยาศาสตร์ใช้วิเคราะห์หาธาตุส่วนประกอบของสารตัวอย่างในระดับปริมาณน้อย ๆ (trace level) โดยอาศัยการศึกษาคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุที่วิเคราะห์ (test element) เป็นสำคัญ (33) หรืออาศัย Nuclear transmutation (34) และ Radioactive tracer technique (35) เป็นสำคัญ

การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชันมีหลักการเบื้องต้นดังนี้ (36) คือเมื่อไอโซโทปเสถียร (Stable isotope) ถูก activate ด้วยอนุภาคนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูหรือแหล่งกำเนิดอนุภาคอื่น ๆ ที่เหมาะสม จะมีการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์เกิดขึ้นในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุ เรียกว่า Nuclear transformation (37) ไอโซโทปเสถียรจะแปรสภาพเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioactive isotope) ของธาตุเดิมหรือไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุใหม่ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคนิวตรอนที่ใช้เป็นตัว bombardment ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสภาวะที่ไม่อยู่ตัว (unstable) นิวเคลียสของมันจะเปลี่ยนแปลงอยู่เรื่อย ๆ จนกว่าจะถึงสภาวะที่อยู่ตัว (stable) ในขบวนการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ของไอโซโทปกัมมันตรังสีนี้ ไอโซโทปกัมมันตรังสีแต่ละชนิดจะแผ่รังสี (radiate) ให้กัมมันตภาพรังสี (radioactivity) ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวออกมา (38) จากการศึกษากัมมันตภาพรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจะวิเคราะห์หาอะตอมของธาตุเดิม (parent isotope) ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างเริ่มต้นทั้งด้านคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์ได้

การเกิดเป็นเรดิโอไอโซโทปของธาตุใด ๆ ก็ตาม จะขึ้นอยู่กับสิ่งสำคัญต่าง ๆ ดังนี้ (39)

1. จำนวนธาตุเดิมในตัวอย่างที่นำไปอาบรังสี รวมทั้งปริมาณที่มีอยู่ในธรรมชาติ หมายถึง natural isotopic abundance ของธาตุนั้น

2. คุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุนั้น และความสามารถในการจับนิวตรอน
3. ระยะเวลาอับรังสี
4. นิวตรอนฟลักซ์ (neutron flux)

เทคนิคในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันมี 2 แบบ คือ

1. การวิเคราะห์แบบไม่อาศัยวิธีทางเคมี (non-destructive NAA) คือการนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอับรังสีนิวตรอนพร้อมกัน แล้วนำมาวัดรังสีเปรียบเทียบกัน
2. การวิเคราะห์แบบอาศัยวิธีทางเคมี (destructive NAA) สารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์นั้นบางที่เป็นส่วนผสมของธาตุหลายอย่าง มิได้มีแค่ธาตุเดียวโดด ๆ อาจมีการรบกวนซึ่งกันและกันได้ โดยเฉพาะที่มี peak energy ใกล้เคียงกัน ไม่สามารถจำแนกได้ง่าย ดังนั้นจำเป็นต้องอาศัยวิธีทางเคมี เช่น การตกตะกอน การสกัด การกลั่นและการแยกด้วย ion exchange resin เป็นต้น เมื่อแยกไอโซโทปกับมันตรังสีได้บริสุทธิ์แล้วจึงทำการวัดรังสี

ในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันมีเงื่อนไขที่จำเป็นดังนี้ (40)

1. ธาตุในสารที่จะวิเคราะห์ต้องมีค่า neutron interaction cross section ที่เหมาะสม
2. แต่ละธาตุที่จะวิเคราะห์ต้องเกิดไอโซโทปกับมันตรังสี ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมา เมื่อถูก activate ด้วยนิวตรอน
3. ไอโซโทปกับมันตรังสีที่เกิดขึ้นต้องมีอายุครึ่งชีวิต (half-life) ไม่มากหรือน้อยเกินไป
4. ธาตุที่จะวิเคราะห์ในสารนั้นต้องมีปริมาณมากพอ
5. ลักษณะทางนิวเคลียร์ของธาตุในขณะที่ยังไม่เป็นธาตุกับมันตรังสีและผลที่เกิดขึ้นจาก activation เป็นสิ่งที่ต้องทราบล่วงหน้า

แหล่งกำเนิดนิวตรอน (Neutron Sources)

แหล่งที่จะให้นิวตรอนเพื่อจะได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน ก็คือ

1. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (nuclear reactor) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูสามารถผลิตนิวตรอนได้ตั้งแต่ 10^{10} จนถึง 10^{15} นิวตรอนต่อวินาที และเครื่องปฏิกรณ์มีหลายแบบด้วยกัน สำหรับใน

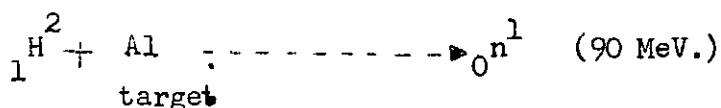
การวิเคราะห์ครั้งนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นแบบที่เรียกว่า Research reactor, swimming pool type ใช้น้ำเป็นเครื่องกำบังรังสี นิวตรอนที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์มี 3 ชนิด (41) เรียงตามขนาดของพลังงาน คือ

1. Fast neutron มีพลังงานมากกว่า 0.1 MeV.
2. Epithermal หรือ intermediate neutron มีพลังงานระหว่าง 0.1 MeV. ถึง 1 eV.

3. Slow neutron หรือ thermal neutron มีพลังงานต่ำกว่า 1 eV.

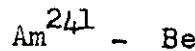
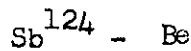
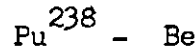
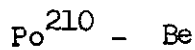
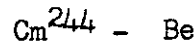
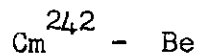
สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะมี Thermal neutron ที่มีพลังงานเฉลี่ย 0.025 eV. มากที่สุด และธาตุส่วนมากสามารถจะมีปฏิกิริยา (n, γ) กับ Thermal neutron ได้ดี และมี cross section ที่เหมาะสมมากในช่วงนี้ ฉะนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ทำการวิเคราะห์แบบแอคติเวชัน

2. เครื่องเร่งอนุภาค (accelerator) เครื่องเร่งอนุภาคใช้เร่งอนุภาคโปรตรอน คิวทีเรียม หรือ ทิตเนียม หรืออัลฟา ให้มีพลังงานสูงหรือมีประจุสูงแล้วใช้ยิง target เพื่อให้ได้ นิวตรอนออกมาใช้ เช่น



อนุภาคประเภทนี้ใช้ในการวิเคราะห์แบบแอคติเวชันได้เหมือนกัน และวิเคราะห์โดยวิธีการ non-destructive ด้วย การใช้อนุภาคที่มีพลังงานสูงทำการวิเคราะห์แบบแอคติเวชัน มักใช้ fast neutron reaction และใช้ fast neutron ที่มีพลังงานจำเพาะ ตัวอย่างเครื่องเร่งอนุภาคก็มี Cyclotron, Van de Graaff accelerator, Cockcroft และ Walton machine เป็นต้น

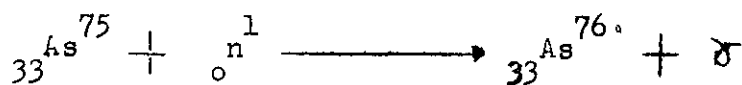
3. Isotopic Sources มีธาตุเรกิโอไอโซโทปอยู่หลายชนิด ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยา (α , n) หรือ (γ , n) แล้วให้นิวตรอนซึ่งมีพลังงานระดับต่าง ๆ และสามารถนำไปใช้ทำการวิเคราะห์แบบแอคติเวชันได้เช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเหมือนกัน แต่ต้องมี Be เป็น target material เช่น



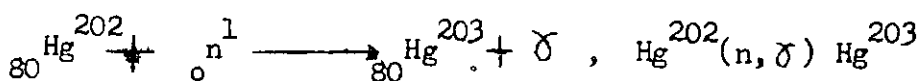
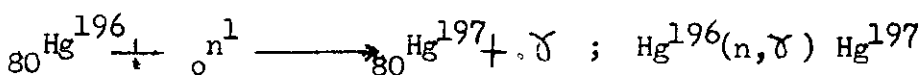
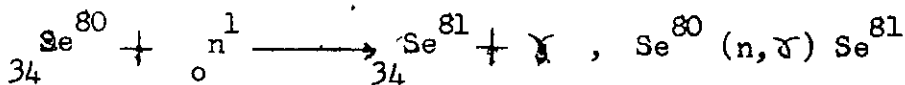
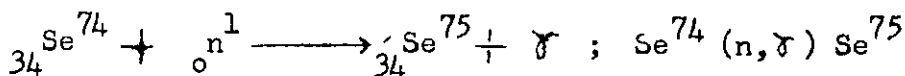
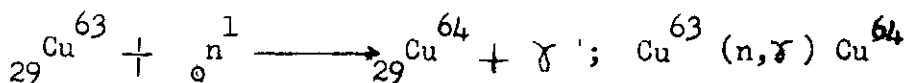
Neutron Nuclear Transformation

เมื่อนิวเคลียสของอะตอมของธาตุทำปฏิกิริยากับอนุภาคนิวตรอนที่ใช้เป็นตัวยิง จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นหลายแบบ คือ

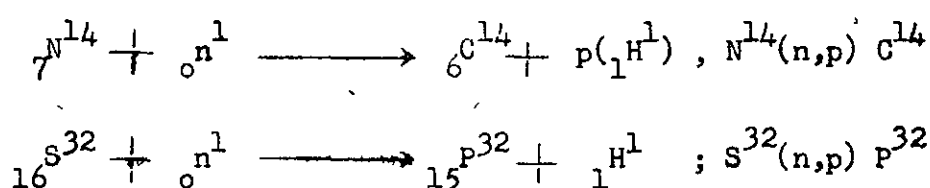
๑. ปฏิกิริยานิวตรอน-แกมมา เขียนย่อเป็น (n, γ) คือปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุ อะตอมของธาตุจะเปลี่ยนเป็นเรกิโอไอโซโทปของธาตุเดิม พร้อมทั้งปล่อยรังสีแกมมาออกมา โอกาสที่นิวตรอนวิ่งชนนิวเคลียสจะขึ้นอยู่กับ cross-section ของนิวเคลียสซึ่งจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อความเร็วของนิวตรอนลดลง (n, γ) จะเกิดมากที่สุดถ้าใช้ Thermal neutron เป็นตัวยิง ปฏิกิริยาแบบนี้มีใช้มากที่สุดใน NAA เช่น



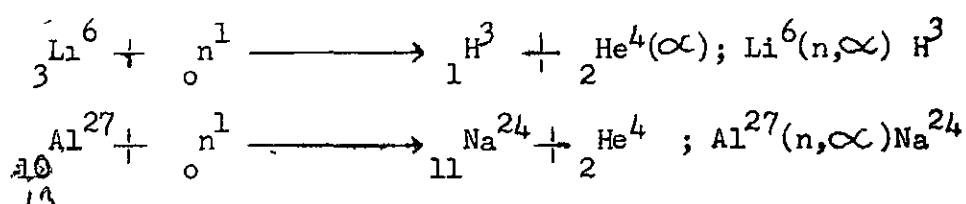
เขียนสั้น ๆ ได้ดังนี้ $\text{As}^{75}(n, \gamma) \text{As}^{76}$



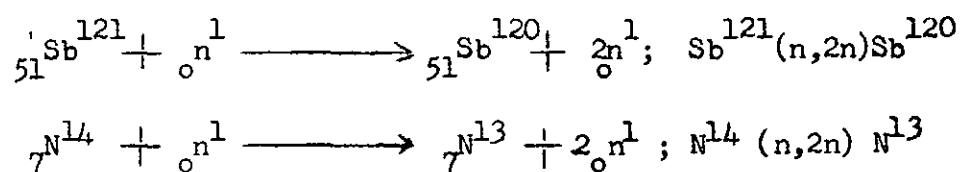
2. ปฏิกิริยานิวตรอน-โปรตอน เขียนย่อเป็น (n,p) คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วอะตอมของธาตุเปลี่ยนเป็นเรกิโอไอโซโทปของธาตุใหม่ พร้อมทั้งปล่อยอนุภาคโปรตอนออกมา นิวตรอนที่ใช้ในปฏิกิริยานี้จะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุนั้น ๆ และทำให้โปรตอนหลุดออกมาจากนิวเคลียสของธาตุนั้นได้ จึงต้องใช้ fast neutron ปฏิกิริยานี้อาจนำไปใช้กับ NAA ได้ เช่นกัน แต่ไม่มากนัก ส่วนมากนิยมใช้ในการผลิตสารกัมมันตรังสีต่าง ๆ เพราะว่าปฏิกิริยา (n,p) ทำให้เกิดไอโซโทปของธาตุใหม่ขึ้นมา ซึ่งสามารถแยกให้บริสุทธิ์ได้ง่าย ตัวอย่างปฏิกิริยา เช่น



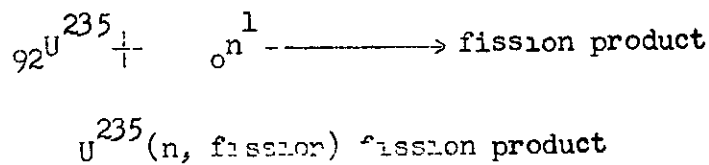
3. ปฏิกิริยานิวตรอน-อัลฟา เขียนย่อเป็น (n,α) คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วอะตอมของธาตุเปลี่ยนเป็นไอโซโทปของธาตุใหม่ พร้อมทั้งปล่อยอนุภาคอัลฟาออกมา ปฏิกิริยา (n,α) ต้องใช้ fast neutron เช่นเดียวกับปฏิกิริยา (n, p) จึงไม่ค่อยนิยมใช้ใน NAA ตัวอย่างปฏิกิริยา (n,α) คือ



4. ปฏิกิริยานิวตรอน-นิวตรอน เขียนย่อเป็น (n,2n) คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วอะตอมของธาตุเปลี่ยนเป็นเรกิโอไอโซโทปของธาตุใหม่ พร้อมทั้งปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกมา ปฏิกิริยานี้ต้องใช้ fast neutron เป็นตัวยิง ตัวอย่างปฏิกิริยา (n,2n) คือ



5. ปฏิกิริยานิวตรอน-ฟิชชัน เขียนย่อเป็น (n, fission) คือปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุแล้วเกิด fission product ปฏิกิริยานี้ถ้าเป็นปฏิกิริยากับ ${}_{92}\text{U}^{235}$ และ ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ thermal neutron ก็มีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ แต่ถ้าเป็นปฏิกิริยากับ ${}_{92}\text{U}^{238}$, ${}_{91}\text{Pa}^{231}$ และ ${}_{90}\text{Th}^{232}$ ต้องใช้ fast neutron จึงจะเกิดปฏิกิริยา (41)



อัตราการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสี (Rate of Radioisotope production)

ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู มี Thermal neutron เคลื่อนที่กระจายอยู่ทั่วไป (42) ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคนิวตรอนเป็น random motion (43) เมื่อนำสารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ไปอบรังสี Thermal neutron จะเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีขึ้น ในขณะเดียวกันไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะสลายตัวให้รังสีแกมมาออกมา ดังนั้นอัตราการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ได้ (44) จะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{dN^*}{dt} = P - \lambda N^* \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ P = อัตราการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสี

$\frac{dN^*}{dt}$ = อัตราการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี

λ = ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant)

N^* = จำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ผลิตได้

ถ้านำสารตัวอย่างไปอบรังสีเป็นเวลา t_1 โดยที่ค่า P ไม่เปลี่ยนแปลง เราอาจใช้ integrating-factor method หาค่า $N_{t_1}^*$ จากสมการ (1) ได้ดังนี้

$$\frac{dN_{t_1}^*}{dt} = P - \lambda N_{t_1}^* \dots\dots\dots(2)$$

คูณสมการ (2) ด้วย $e^{\lambda t_1}$ จะได้

$$e^{\lambda t_1} \cdot \frac{dN_{t_1}^*}{dt} = P e^{\lambda t_1} - \lambda N_{t_1}^* e^{\lambda t_1}$$

$$e^{\lambda t_1} \frac{dN_{t_1}^*}{dt} + \lambda N_{t_1}^* e^{\lambda t_1} = P e^{\lambda t_1}$$

$$\frac{d}{dt} (N_{t_1}^* e^{\lambda t_1}) = P e^{\lambda t_1}$$

$$\int d(N_{t_1}^* e^{\lambda t_1}) = \int P e^{\lambda t_1} dt$$

$$N_{t_1}^* e^{\lambda t_1} = \frac{P e^{\lambda t_1}}{\lambda} + C$$

$$N_{t_1}^* = \frac{P}{\lambda} + C e^{-\lambda t_1} \dots\dots\dots (3)$$

เมื่อ $t_1 = 0$ จะได้ว่า $C = - \frac{P}{\lambda}$

แทนค่า C ในสมการ (3). จะได้

$$N_{t_1}^* = \frac{P}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_1}) \dots\dots\dots (4)$$

ในทางปฏิบัติเราต้องการทราบปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่ $N_{t_1}^*$ ปลดปล่อยออกมาต่อหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งสมมติให้มีค่า A_{t_1}

$$\text{จากสมการ (4)} \quad N_{t_1}^* \lambda = P (1 - e^{-\lambda t_1}) \dots\dots\dots (5)$$

สิ่งที่ต้องการทราบต่อไป คือ P ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

เมื่อนำสารตัวอย่างไปอบรังสีนิวตรอน โอกาสที่นิวตรอนหนึ่งอนุภาคจะชนและเกิดปฏิกิริยากับนิวเคลียสของธาตุในสารตัวอย่างหาได้จากสูตร

$$\begin{aligned} \text{โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาต่อหนึ่งนิวตรอน} &= \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดของนิวเคลียสในเป้า}}{\text{พื้นที่ทั้งหมดของเป้า}} \\ &= \frac{N \sigma}{a} \end{aligned}$$

เมื่อ N = จำนวนนิวเคลียสทั้งหมดในเป้า

σ = cross section สำหรับ thermal neutron
activation เป็น barn ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$)

ถ้า ϕ เป็นจำนวนนิวตรอนที่ชนเป้าในแนวตั้งฉากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อวินาที จะได้ว่า

$$\text{จำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อวินาที} = \frac{N\sigma}{a} \times \phi a$$

$$\therefore \text{อัตราการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสี} = N\sigma\phi \dots\dots\dots (6)$$

จำนวนอะตอมหรือนิวเคลียสทั้งหมดที่นำไปอาบรังสีสามารถหาได้จาก (45)

$$N = \frac{N_0 W K}{\text{At. wt.}} \dots\dots\dots (7)$$

เมื่อ N_0 = Avogadro's number

W * น้ำหนักของธาตุเป็นกรัม

K = fractional isotopic abundance

At. wt. = น้ำหนักอะตอมของธาตุนั้น

แทนสมการ (6) และ (7) ในสมการ (5) จะได้

$$A_{t1} = \frac{6.02 \times 10^{23} W K \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_1})}{\text{At. wt.}} \dots\dots (8)$$

$$\text{หรือ} \quad A_{t1} = \frac{6.02 \times 10^{23} W K \sigma \phi (1 - e^{-\frac{0.693 t_1}{T_{1/2}}})}{\text{At. wt.}}$$

$$\text{เมื่อ} \quad \lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

$T_{1/2}$ = ระยะเวลาที่สารกัมมันตรังสีสลายตัวเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของปริมาณเดิม (half-life)

จากสมการ (8) จะเห็นได้ว่าเราสามารถเปลี่ยนระยะเวลาการอาบรังสี เพื่อให้ได้ค่า activity ตามต้องการได้เทอม $1 - e^{-\lambda t_1}$ เรียกว่า saturation factor ถ้า $t_1 \gg T_{1/2}$ แล้ว ค่า saturation factor จะเข้าใกล้ 1 ดังนั้นที่ saturation time (เวลาที่ให้การรักษาผลิตรและอัตราการสลายตัวของอะกอมกัมมันตรังสีมีค่าเท่ากัน) ค่า activity ของไอโซโทปกัมมันตรังสีจะมีค่าสูงสุดตามสมการ

$$A = N \phi \dots\dots\dots (9)$$

โดยทั่วไปจะเริ่มศึกษา activity ได้ภายหลังจากยิงอนุภาคเป็นเวลา T อะกอมกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะสลายตัวเป็น factor ของ $e^{-\lambda T}$ ดังนั้นสมการ (8) อาจเขียนใหม่เป็น

$$A_{t_1} = \frac{K \phi W (1 - e^{-\lambda t_1})(e^{-\lambda T}) \times 6.02 \times 10^{23}}{M}$$

เมื่อ M = น้ำหนักของอะกอมของธาตุนั้น
เพราะฉะนั้นปริมาณของธาตุคำนวณได้จากสมการ

$$W = \frac{M A_{t_1} e^{\lambda T}}{\phi K (1 - e^{-\lambda t_1}) 6.02 \times 10^{23}}$$

แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ได้นำเอาสารมาตรฐาน ซึ่งทราบน้ำหนักแน่นอนเข้าอาบรังสีพร้อมกับสารตัวอย่าง ฉะนั้นสูตรที่ใช้ในการคำนวณจึงเหลือเพียง

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ปริมาณกัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{ปริมาณกัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารมาตรฐาน}} \dots\dots\dots (11)$$

ดังนั้นถ้าวัดปริมาณกัมมันตรังสีในสารตัวอย่าง ปริมาณกัมมันตรังสีในสารมาตรฐาน และน้ำหนักของสารมาตรฐาน เราก็สามารถคำนวณหาปริมาณธาตุในสารตัวอย่างได้

การเลือกสารมาตรฐาน ควรพิจารณาในสิ่งต่อไปนี้

1. สารมาตรฐานควรบริสุทธิ์ ไม่มีสิ่งอื่นปะปน
2. สารมาตรฐานควรมีธาตุที่สามารถ activate ได้เพียงธาตุเดียว
3. สารมาตรฐานควรละลายได้ง่ายในตัวทำละลาย
4. สารมาตรฐานควรสามารถชั่งได้โดยง่าย

จากสมการ (8) สามารถคำนวณหา sensitivity (น้ำหนักของธาตุที่น้อยที่สุดที่เป็นเป้าที่จะนำไปอาบรังสีเพื่อให้ได้ปริมาณรังสีตามต้องการ) ของธาตุได้ดังนี้

$$S = \frac{M}{Wf \sigma \phi E} \cdot \frac{A/s}{(1 - e^{-\lambda t}) 6.02 \times 10^{23}} \dots\dots\dots (12)$$

เมื่อ S = ความไวหรือน้ำหนักของธาตุที่น้อยที่สุดที่จะทำให้เครื่องวัดทำงานได้

M = น้ำหนักของอะตอมของธาตุที่ต้องการหา

W = น้ำหนักของธาตุที่ต้องการหา (หน่วยน้ำหนัก)

λ = ค่าคงที่ = $\frac{0.693}{T_{1/2}}$

σ = neutron cross-section มีหน่วยเป็นบาร์น (barn)

ϕ = ความเข้มของนิวตรอน (หน่วยนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร ต่อวินาที (n/cm²/sec.))

f = ปริมาณของไอโซโทปที่มีในธรรมชาติ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์

$T_{1/2}$ = ครึ่งชีวิตของเรดิโอไอโซโทปนั้น (หน่วยเวลา)

t = เวลาที่ใช้ในการอาบรังสี

6.02×10^{23} = Avogadro's number

d/s = ความแรงรังสีที่จะนับได้ คืออัตราการสลายตัวของธาตุต่อวินาที

E = ประสิทธิภาพของเครื่องนับรังสี

อัตราการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี (Rate of radioisotope decay)

เมื่อธาตุกัมมันตรังสีเริ่มเกิดขึ้น ก็จะมีอัตราการสลายตัวด้วยทันที (46) Rutherford และ Soddy (47) ได้ศึกษาปรากฏการณ์สลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี พบว่าจำนวนการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสีต่อหน่วยเวลาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนอะตอมที่มีอยู่ในขณะนั้น

การสลายตัวของกัมมันตรังสีเป็น Random phenomena คือไม่สามารถบอกได้ว่านาฬิกาอะตอมใดจะสลายตัวหรือให้รังสีออกมา แต่เมื่อคำนึงถึงอะตอมเป็นจำนวนนับล้านอะตอม ตามหลักทฤษฎีสถิติ ทำให้กล่าวได้ว่าจะมีกี่อะตอมที่จะสลายตัวในนาฬิกา (48)

ดังนั้นอัตราการสลายตัวจึงลดลงตลอดเวลา เพราะว่าปริมาณของนิวเคลียสกัมมันตรังสีลดลงอยู่เรื่อย ๆ อันเนื่องมาจากการสลายตัว จนกระทั่งกลายเป็นไอโซโทปชนิดเสถียร (stable isotope) เรารู้ว่าไอโซโทปแต่ละชนิดใช้เวลาในการสลายตัวไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติประจำตัวของธาตุไอโซโทปที่เรียกว่าครึ่งชีวิต (half-life) เมื่อตั้งสารกัมมันตรังสีไว้เป็นเวลาครึ่งชีวิต จะพบว่าปริมาณของนิวเคลียสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณตั้งต้น การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีในทาง Kinetic ถือว่าเป็น first-order process

ถ้าจำนวนอะตอม ΔN สลายตัวในระยะเวลา Δt และ N เป็นอะตอมที่ยังเหลืออยู่ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} -\frac{\Delta N}{\Delta t} &\propto N \quad (\text{ใช้เครื่องหมายลบเพราะว่าเป็นอัตราการลดลง}) \\ \therefore \frac{\Delta N}{\Delta t} &= -\lambda N \\ \text{เมื่อ } \lambda &= \text{decay constant} \\ \frac{\Delta N}{\Delta t} &= \text{Activity ของไอโซโทปกัมมันตรังสี} \end{aligned}$$

โดยอาศัยวิธีการทางแคลคูลัส เมื่อ $t \rightarrow 0$ เราจะได้

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad \dots\dots\dots (1)$$

ถ้าได้จำนวนของอะตอมที่ขณะตั้งต้นการทดลอง $= N_0$ เราก็อาจหาค่า N คือจำนวนของอะตอมที่เหลือเมื่อเวลาผ่านไป $= t$ ได้จากการ Integrate สมการ (1) นั่นคือ

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

$$N_0 \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad \dots\dots\dots (2)$$

หรือ
$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

จากสมการ (2) เปลี่ยนจาก log ฐาน e มาเป็น log ฐาน 10 จะได้

$$2.303 \log \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\log N = \log N_0 - \frac{\lambda t}{2.303} \quad \dots\dots\dots (5)$$

จากสมการ (4) ถ้า $t =$ ครึ่งชีวิต $= T_{1/2}$, N จะ $= \frac{N_0}{2}$ เราจะได้

$$2.303 \log \frac{1}{2} = -\lambda T_{1/2}$$

หรือ
$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (6)$$

สมการ (5) เป็นสมการเส้นตรง ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log N$ (ส่วนมากจะใช้แทนเป็นปริมาณกัมมันตภาพรังสี หรือที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ จำนวน "นับ" เพราะทั้งสองจำนวนนี้เป็นปริมาณตรงกับจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่มีอยู่นั้น) และเวลา t โดยให้ $\log N$ เป็นแกน Y t เป็นแกน X จะได้กราฟเส้นตรงโดยมี $\log N_0$ เป็น intercept บนแกน Y และมี slope $= -\frac{\lambda}{2.303}$ ถ้าเราต้องการหา $T_{1/2}$ ของไอโซโทปต่าง ๆ หาได้โดยการเขียนกราฟดังกล่าวและหาช่วงเวลาที่จะลดปริมาณกัมมันตรังสีลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของปริมาณที่มีอยู่ ณ เวลาใดก็ได้

อนึ่ง การติดตาม half-life ของธาตุที่มี half-life ยาว ๆ ถ้าหาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง activity กับ zero time ต้องใช้เวลามาก ควรใช้การวัด activity ใน 2 ช่วงเวลาที่ห่างกันพอสมควร แล้วคำนวณหาจากสูตร

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693 t_e}{2.303 \log \frac{At_1}{At_2}} \dots\dots\dots (7)$$

เมื่อ $T_{\frac{1}{2}}$ = half-life ของเรกิโอไอโซโทปนั้น

0.693 = ค่าคงที่

t_e = เวลาระหว่างช่วงการวัดกัมมันตภาพรังสี

At_1 = activity ของการวัดเมื่อ zero time = t_1

At_2 = activity ของการวัดเมื่อ zero time = t_2

สมการ (3) สามารถเขียนในรูป activity ของอะตอมกัมมันตรังสีได้ดังนี้

$$A = A_0 e^{-\frac{0.693 t}{T_{\frac{1}{2}}}} \dots\dots\dots (8)$$

เมื่อเรานำสารตัวอย่างออกจากการอาบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์แล้ว ในบางกรณี เราอาจต้องปล่อยให้อะตอมกัมมันตรังสีสลายตัวชั่วระยะหนึ่ง เพื่อขจัดการแผ่รังสีกลบ (overshadow) ของอะตอมกัมมันตรังสีที่เราไม่ต้องการ ดังนั้นถ้าเราอาบรังสีเป็นเวลา t_1 และทิ้งไว้ให้สลายตัวเป็นเวลา t_2 ก่อนทำการวัดรังสี ค่า activity ที่ได้ คือ

$$\text{Activity} = \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ W K } \phi (1 - e^{-\frac{0.693 t_1}{T_{\frac{1}{2}}}}) e^{-\frac{0.693 t_2}{T_{\frac{1}{2}}}}}{\text{At. wt.}}$$

จากการวัดค่า activity แทนค่า $K, \phi, T_{\frac{1}{2}}, \text{At. wt.}, e, t_1, t_2$ แล้ว เราจะสามารถทราบปริมาณของธาตุ (w) ได้

หน่วยกัมมันตภาพรังสี

ปริมาณกัมมันตภาพของสารคิดเป็น disintegration ต่อวินาที (dps) หรือ disintegration ต่อนาที (dpm)

หน่วยที่มักใช้วัดกัมมันตภาพรังสีคือ คูรี (Curie)(49) 1 คูรี คือปริมาณของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ที่ให้กัมมันตภาพ 3.70×10^{10} dps 1 คูรี ประมาณ 1 กรัมของธาตุราเดียมเคียมเคียมที่เกี่ยวกัั้งใจเอาธาตุราเดียมเป็นมาตรฐานเทียบปริมาณสารกัมมันตรังสีใด ๆ ก็ได้ที่ให้กัมมันตภาพเท่า 1 กรัมของราเดียมเป็น 1 คูรี และปรากฏว่า 1 กรัมราเดียมให้กัมมันตภาพ 3.70×10^{10} dps โดยปกติคูรี (Ci) เป็นหน่วยใหญ่เกินไปที่ใช้กันเสมอคือมิลลิวคูรี (mCi) หรือ 3.70×10^7 dps และไมโครคูรี (μCi) หรือ 3.70×10^4 dps.

การวิเคราะห์แบบแอคติเวชันในปัจจุบันได้กลายเป็นวิธีการที่สำคัญในการวิเคราะห์วิธีหนึ่ง นักวิทยาศาสตร์ได้นำเอาไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เพราะผู้วิจัยพยายามคิดค้นออกแบบเครื่องบ่อเครื่องวัดที่อาบรังสี กำเนิดนิวตรอนตลอดจนเครื่องวัดที่มีความสะดวกและเหมาะสมแก่ผู้ต้องการใช้มากขึ้นทุกที เทคนิคในการทำก็ปรับปรุงให้มี sensitivity เพิ่มขึ้นจนสามารถทำให้นักวิทยาศาสตร์นำ NAA ไปใช้ในการวิเคราะห์วิธีได้เกือบทุกสาขา ซึ่งมีประโยชน์ในทางเกษตร ประโยชน์ในทางการแพทย์ ประโยชน์ในด้าน Geochemistry ประโยชน์ในการพิสูจน์ของปลอม ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม ตลอดจนช่วยเหลือในการพิสูจน์หลักฐานประกอบคดีอาชญากรรมของทางการตำรวจ (50) เป็นต้น

อย่างไรก็ตามถึงจะกล่าวว่า การวิเคราะห์แบบแอคติเวชันมีประโยชน์และใช้กันแพร่หลายสักเพียงใดก็ตามที่ ก็ยังมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ข้อดีก็มีมาก ข้อเสียก็มีมาก และธาตุบางตัวก็ยังใช้วิธีนี้วิเคราะห์ไม่ได้ (51)

ข้อดีของการวิเคราะห์แบบแอคติเวชัน

1. รวดเร็ว ธาตุเมื่ออาบรังสีแล้ววัดได้โดยตรงด้วยเครื่องวัดได้เลย ไม่ต้องใช้กรรมวิธีเคมี กรณีเช่นนี้การวิเคราะห์ทำได้รวดเร็วมก แต่ทั้งนี้ย่อมแล้วแต่ความสะดวกที่มีอยู่ ธาตุที่วิเคราะห์ได้โดยตรงและรวดเร็ว มักเป็นพวกที่มี half-life สั้น เช่น Na, Mn, Cu, Al, S

2. การวิเคราะห์แบบแอคติเวชันนี้ sensitivity สูง สามารถวิเคราะห์สิ่งเจือปนเล็ก ๆ น้อย ๆ ขนาดต่ำกว่าหนึ่งในล้านได้ ในกรณีที่วิธีเคมีธรรมดาไม่อาจทำได้ เช่น น้ำ 1 มิลลิลิตรมีธาตุอาร์เซนิกประมาณ 0.005 ไมโครกรัม เป็นต้น และอาจใช้วิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ของแร่โลหะผสมและเคมีภัณฑ์ได้ดี

3. หลังจากการอาบรังสีนิวตรอนแล้ว แม้จะมี contamination หรือเติม reagent หรือเติม carrier สักเท่าไรก็ไม่ทำให้ธาตุกัมมันตรังสีเพิ่มขึ้นได้อีก การแยกการทําปฏิกิริยาเคมีไม่จำเป็นต้องทำอย่าง quantitatively การตกตะกอน การกรอง การสกัด ไม่จำเป็นต้องทำให้ละเอียด ใช้คำนวณหา yield ได้จากตะกอน

4. เรกิโอไอโซโทป มีคุณสมบัติเฉพาะตัว เช่น half-life, β -energy, γ -energy มีบางกรณีเท่านั้นที่อาจมี γ หรือ β energy ในเขตใกล้เคียงกันจนอ่านด้วย gamma-spectrometer ไม่ออก เมื่อเป็นเช่นนี้ก็ต้องใช้วิชาเคมีช่วยแยกออกมาให้บริสุทธิ์และตรวจสอบด้วย half-life ตัวอย่างเช่น Mn -56 และ Ni -65 มี half-life ใกล้เคียงกันมาก และมี β -energy ใกล้เคียงกันด้วย อย่างไรก็ตามวิธีตรวจสอบสิ่งที่แตกต่างกันระหว่างสองธาตุนี้ คือ γ -energy

Mn -56 γ -energy 0.85, 1.82, 2.12 Mev., $t_{1/2}$ = 2 ชั่วโมง

Ni -65 γ -energy 0.37, 1.12, 1.49 Mev., $t_{1/2}$ = 2.56 ชั่วโมง

5. ใช้สารตัวอย่างน้อย ในบางกรณีตัวอย่างที่ทำไม่มีการสูญเสีย เช่น เศษผง เล็บ ชิ้นส่วนกระจก ชิ้นส่วนโลหะ ถ้าเป็นหลักฐานทางคดี หลังจากการวิเคราะห์แล้ว ก็สามารถจะเก็บไว้เป็นหลักฐานได้อีกนาน ไม่มีการเสียหายหรือเสื่อมคุณภาพ นำไปแสดงเป็นประจักษ์พยานยืนยันในศาลได้อีก

ข้อเสียของการวิเคราะห์แบบแอคติเวชัน

1. ธาตุบางชนิดไม่สามารถทำการวิเคราะห์แบบนี้ได้ เพราะไม่ยอมเกิดเป็นเรดิโอไอโซโทป บางตัวถูกนิวตรอนแล้วก็ยังเป็น stable isotope และบางตัวก็มี half-life ยาวนานเกินไป คิดตามได้ยาก ไม่เหมาะแก่การนำมาวิเคราะห์ด้วยแบบนี้ เช่น C, H, O, N, Ne, Cd, B, Pb
2. เป็นวิธีการที่ลงทุนมาก เช่นต้องมีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ต้องมีเครื่องวัดรังสี ต้องมีเครื่องป้องกันอันตรายจากการแผ่รังสี ขณะที่ปฏิบัติงาน ซึ่งเครื่องมือต่าง ๆ เหล่านี้มีราคาสูง
3. High sensitivity บางครั้งก็มีผลเสีย เวลาที่ sample มี contamination สิ่งที่ไม่ต้องการจะตรวจก็มักจะตรวจพบเสมอ เช่น Na, Ar และ Cl เป็นต้น
4. การวิเคราะห์แบบแอคติเวชัน เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณทั้งหมดของธาตุ มิได้แสดงออกมาว่า ธาตุนั้นอยู่ในลักษณะหรือสภาพทางเคมีอย่างไร เช่น การหาไอโอดีนใน Biological sample จะแสดงได้เพียงปริมาณทั้งหมดของไอโอดีน แต่ไม่สามารถจะบอกได้ว่า นี่คือ ionic iodine หรือ protein bounded iodine ดังนี้เป็นต้น (52)(53)

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีดำเนินการ

เครื่องมือ

การวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นพิษในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบโดยวิธี non-destructive และ destructive neutron activation analysis ประกอบด้วยเครื่องมือดังนี้

1. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย - 1 (ปปรว - 1)
2. Ge-Li detector ร่วมกับ 1024 multichannel γ -spectrometer
3. NaI (Tl) detector ร่วมกับ 128 multichannel pulse height analyzer

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย - 1 (Thai Research Reactor - 1)

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย - 1 เป็นแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอนแบบสระน้ำ (swimming pool) กำลังสูงสุด 1,000 กิโลวัตต์ คำนิวตรอนฟลักซ์โดยเฉลี่ยประมาณ 6×10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย - 1 ประกอบด้วย

1. เชื้อเพลิงปรมาณู (nuclear fuel) ใ้แก่ยูเรเนียม - 235 ขนาดของมวลวิกฤต 2.7 กิโลกรัม ประกอบเป็นชุดแบบ MTR ขนาด 30 x 38 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร
2. แท่งควบคุมปฏิกิริยา (control rod) มี 4 แท่ง ประกอบด้วยแท่งปลอดภัย (safety rod) 3 แท่ง และแท่งปรับระดับกำลัง (regulating rod) 1 แท่ง
3. ตัวลดความเร็วนิวตรอน (moderator) ใช้น้ำบริสุทธิ์ (de-mineralized water) เป็นตัวลดความเร็วนิวตรอน
4. ตัวระบายความร้อน (coolant) ใช้น้ำบริสุทธิ์ (de-mineralized water) เป็นตัวระบายความร้อน

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย - 1 มีการทำงานดังนี้ (54)

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ ปปว - 1 เป็นระบบที่เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ นิวเคลียร์ติดต่อกันไป ซึ่งสามารถควบคุมได้ เชื้อเพลิงที่ใช้คือ U^{235} ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนทำให้อะตอมแยกออก ในกระบวนการนี้จะมีนิวตรอน 2 - 3 ตัวหลุดออกมา นิวตรอนที่หลุดออกมาจะทำให้อะตอมอื่นของ U^{235} เกิดการแตกตัว (fission) ต่อไปอีก เป็นดังนี้เรื่อย ๆ ไป ผลสุดท้ายจะได้นิวตรอนปริมาณมาก การที่ U^{235} แตกตัวจะปล่อยพลังงานจำนวนมากออกมาในรูปรังสีและความร้อน ความร้อนจะกระจายไปทั่วระบบระบายความร้อน

นิวตรอน 2 - 3 ตัวที่หลุดออกมามีความเร็ว 1.8×10^7 เมตรต่อวินาที จะต้องทำให้ช้าลงเหลือความเร็วเพียง 2.2×10^3 เมตรต่อวินาทีจึงจะสามารถทำปฏิกิริยากับ U^{235} อะตอมอื่น ๆ ต่อไปได้ กระบวนการนี้เกิดขึ้นใน ปปว - 1 โดยการแช่เชื้อเพลิง U^{235} ไว้ในน้ำ จะทำให้นิวตรอนที่วิ่งไปมาลดความเร็วลง น้ำที่ใช้ใน ปปว - 1 ทำหน้าที่ 3 ประการ คือ

1. ลดความเร็วของนิวตรอน
2. ระบายความร้อน
3. ป้องกันอันตรายจากรังสี

ดังนั้นปฏิกิริยาการแตกตัวของอะตอมของยูเรเนียม - 235 จะมีอนุภาคนิวตรอนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชันได้เป็นอย่างดี

Ge-Li Detector (36)

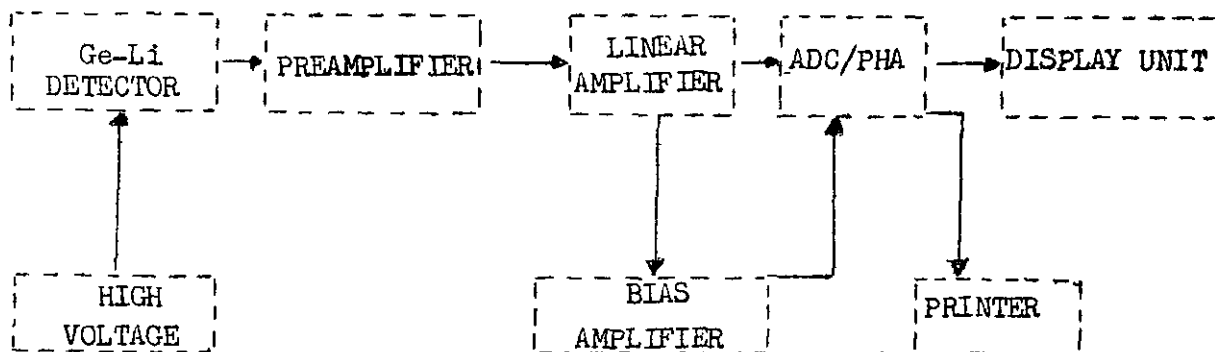
Ge-Li detector เป็นเครื่องมือสำหรับใช้วัดรังสีแกมมา เครื่องมือประกอบ
ด้วย

1. Detector แบบ solid state scintillation detector ของ ORTEC ประกอบด้วย Ge-Li crystal ขนาด 26.3 ซี.ซี. กับ photomultiplier tube.

2. Power Supply, Model 495 ของ ORTEC

3. Preamplifier ของ ORTEC

4. Linear Amplifier, Model 761 A ของ ORTEC
5. Bias Amplifier ของ Nuclear Data Inc.
6. 1024-multichannel Pulse Height Analyzer (PHA) และ Analog-to-Digital Convertor (ADC) ของ Nuclear Data Inc.
7. Display Unit ประกอบด้วย type 503 oscilloscope ของ Nuclear Data Inc.
8. Printer- ประกอบด้วยเครื่องพิมพ์ที่ IEM, ND-316 autofinger ของ Nuclear Data Inc.



รูปที่ 1 Block Diagram แสดงส่วนประกอบของ Ge-Li Detector

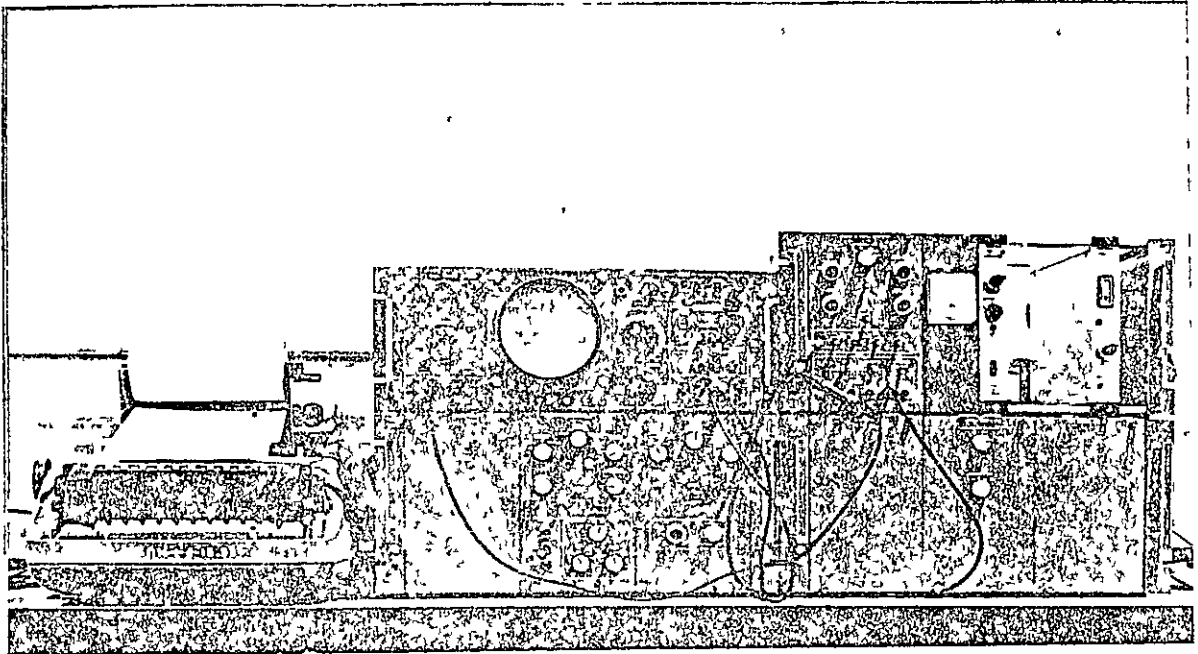
การทำงานของ Ge-Li Detector มีหลักดังนี้ ✓

1. เมื่อรังสีแกมมาตกกระทบบนหัววัดรังสีที่ทำด้วย Li-activated Ge จะทำให้เกิดปฏิกิริยา ionization (เกิด electron hole pair ซึ่งมีประจุบวกและลบขึ้นในผลึก) และ excitation (อิเล็กตรอนในผลึกถูก excite ขึ้นไปอยู่ใน orbital ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเดิม) การเกิด ionization ทำให้ผลึกนำไฟฟ้าได้มากขึ้น เมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่ระดับพลังงานเดิม จะปลดปล่อยพลังงานแสง (light flash) ออกมา แสงทั้งหมดที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนโฟตอนของรังสีแกมมาที่ผ่านเข้าไปในผลึก
2. แสงที่เกิดขึ้นใน scintillator นี้จะถูกสะท้อนบน light reflector

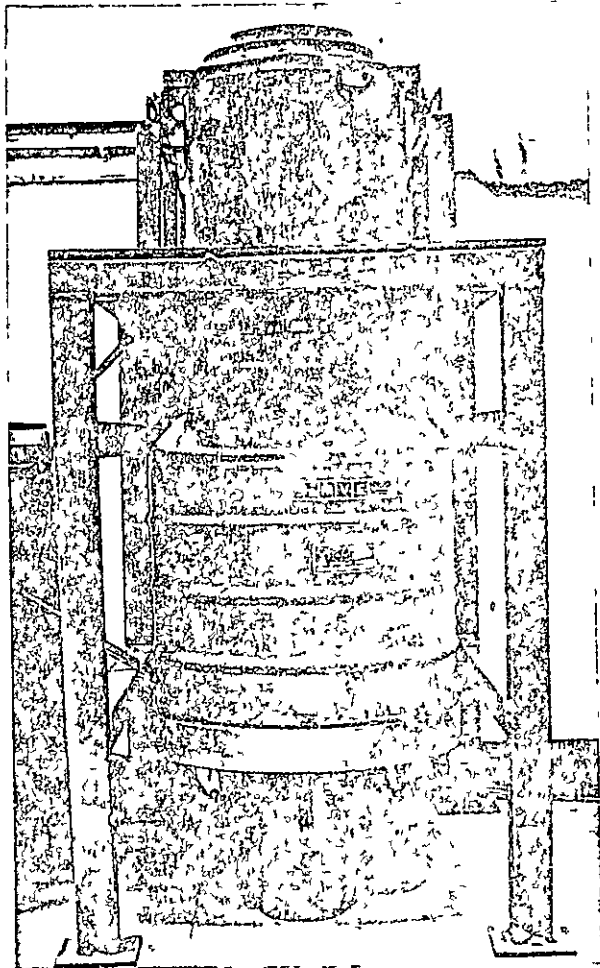
ไปตกลงบน Photocathode ใน photomultiplier tube ทำให้เกิด photoelectric effect ขึ้น ให้ photoelectron ออกมา photoelectron นี้จะผ่านเข้าไปใน dynode เกิดกระบวนการ multiplication ขึ้นใน photomultiplier tube photoelectron จะทวีจำนวนมากขึ้น จนเกิดเป็น voltage pulse, voltage pulse นี้จะถูกขยายใน preamplifier และ linear amplifier ต่อไป ส่วน bias amplifier จะปรับรูปร่างของสัญญาณให้พอเหมาะ พอที่วงจรอื่นจะบังคับกับสัญญาณต่อไปได้ แล้วสัญญาณจะถูกส่งเข้าสู่ภาค ADC ต่อไป .

3. วงจร ADC จะเปลี่ยน electrical pulse ให้เป็นจำนวนนับ (count) และสัญญาณจะถูกส่งไปบันทึกไว้ใน PHA ซึ่งประกอบด้วยสมองอิเล็กทรอนิกส์มากมาย สมองอิเล็กทรอนิกส์แต่ละหน่วยเรียกว่า channel number แต่ละ channel number จะเก็บสัญญาณที่มีระดับพลังงานช่วงหนึ่ง ๆ ไว้ เช่น สัญญาณถูกขยายให้มีขนาด 0 - 100 โวลต์ แล้วส่งไปยัง PHA ที่มี 100 channel number สัญญาณที่มีขนาด 0 - 1 โวลต์ จะถูกส่งไปเก็บใน channel number 1 สัญญาณที่มีขนาด 1 - 2 โวลต์จะถูกส่งไปเก็บใน channel number 2 ไปเรื่อย ๆ จนถึงสัญญาณที่มีขนาด 99 - 100 โวลต์ ก็จะถูกส่งไปยัง channel number 100 เป็นต้น ทั้งหมดนี้จะทำงานพร้อมกัน

4. การนำจำนวนนับออกจาก PHA อาจจะเป็นสเปกตรัมบนจอซิลิโคนสโคป หรือพิมพ์ข้อมูลออกมาโดยอัตโนมัติก็ได้



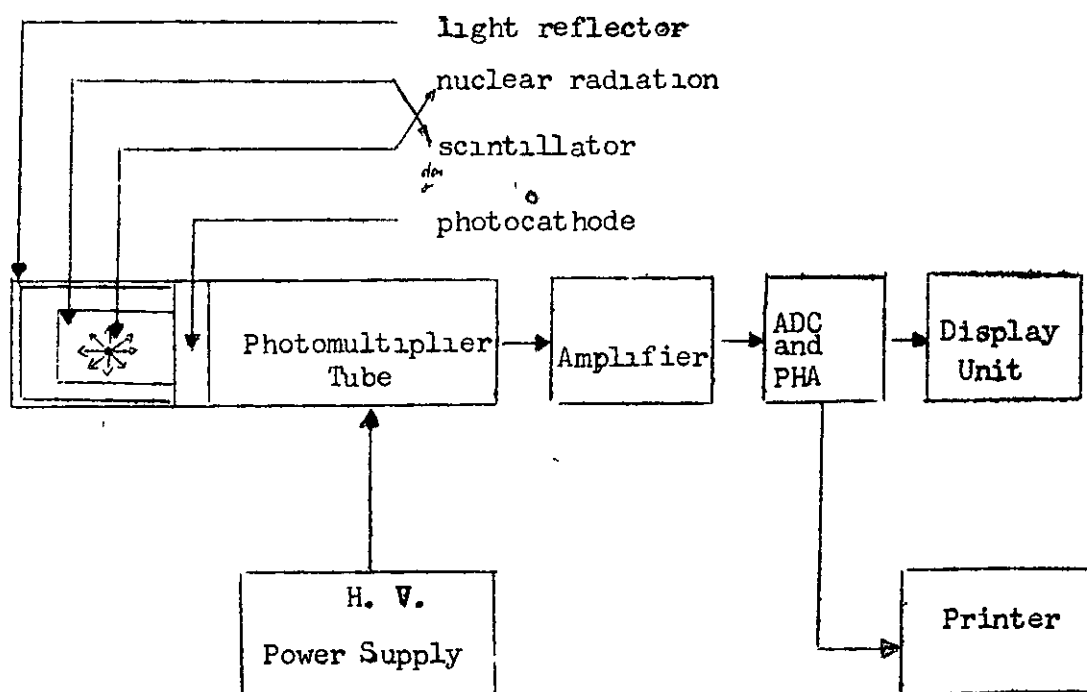
รูป 2 ก แสดงเครื่องวัดรังสี Multichannel Analyzer
พร้อมทั้ง Oscilloscope และเครื่องพิมพ์



รูป 2 ข แสดงหัววัด Ge(Li)
อยู่ในเครื่องกำบังรังสี

Multichannel Gamma Spectrometer มีส่วนประกอบดังนี้ ✓

1. หัววัดรังสีแบบ Inorganic solid scintillation detector ของ Harshaw Type 12512 ประกอบด้วย NaI(Tl) crystal ขนาด 3" x 3" และหลอด photomultiplier
2. H.V. supply detector หรือ power supply Model 312 A เป็นต้นกำเนิด high voltage ให้กับหลอด photomultiplier ในหัววัดรังสี การทดลองนี้ใช้ high voltage 920 V.
3. Amplifier ประกอบด้วย preamplifier และ main amplifier ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณและลบแต่งสัญญาณตามลำดับ
4. 128 multichannel pulse height analyzer model No. 110.
5. Display unit ประกอบด้วย oscilloscope ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลและรูปร่าง spectrum กับมันดราฟรังสีของธาตุที่นำมาวัด



รูปที่ 3 Block Diagram แสดงส่วนประกอบของ multichannel γ -spectrometer

หลักการทํางานโดยย่อของ Multichannel Gamma Spectrometer (54)

ขั้นที่ 1 เมื่อรังสีแกมมาจากไอโซโทปกัมมันตรังสี ที่นำมาวัดผ่านเข้าไปในหัววัดรังสี พลังงานของรังสีแกมมาที่ผ่านเข้าไป จะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนอันหนึ่งมาจากปรากฏการณ์ต่อไปนี้

- 1) Photoelectric effect เกิดจากรังสีแกมมาถ่ายทอดพลังงานให้กับอิเล็กตรอนของผลึก NaI จนหมดสิ้น ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา
- 2) Compton effect เกิดจากรังสีแกมมาถ่ายทอดพลังงานให้กับอิเล็กตรอนของ NaI เพียงบางส่วนแล้วรังสีแกมมาจะเปลี่ยนทิศทางไป ซึ่งจะมีพลังงานลดลง ส่วนอิเล็กตรอนที่รับพลังงานไปจะหมุนอยู่รอบ ๆ ผลึก NaI ด้วยพลังงานส่วนที่รับไปจากรังสีแกมมา
- 3) Pair production เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีแกมมาผ่านเข้าไปในสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสของ NaI แล้วตัวรังสีแกมมาก็จะแตกตัวออกเป็น positron กับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะกลายเป็นอิเล็กตรอนของ NaI ส่วน positron จะทำปฏิกิริยากับวัตถุนั้นเหมือนกับ β -ray ก็เกิด ionization และ excitation เมื่อพลังงานหมดจะ รวมตัวกับอิเล็กตรอนแล้วกลายเป็น γ -ray pair production นี้เกิดขึ้นได้เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานเกิน 1.02 Mev.

พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่เกิดจาก photoelectric effect และ compton effect จะเปลี่ยนเป็นพลังงานแสง เมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่สภาพเดิม (ground state) และปริมาณแสงที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาคงกับพลังงานรังสีแกมมาที่ผ่านเข้าไป (55)

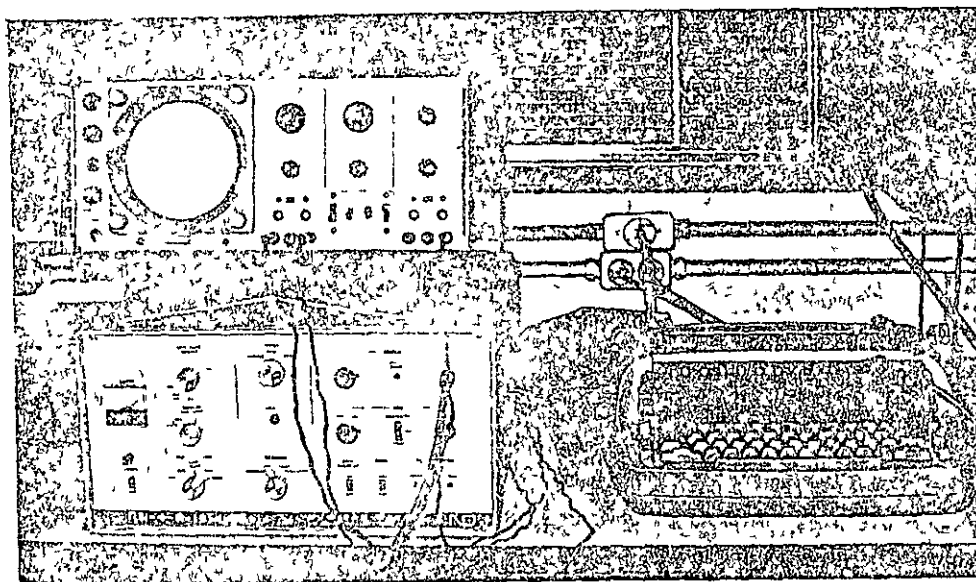
ขั้นที่ 2 Light reflector ก้อนผลึกนิยมนํามาใช้ผลึก NaI (TI) จะทำให้แสงที่เกิดขึ้นใน scintillator สะท้อนผ่านเข้าไปตกกระทบบน photocathode ของหลอด photomultiplier ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจาก photocathode เรียกว่า photoelectron ซึ่งจะถูกทวีคูณเพิ่มขึ้นหลายเท่าด้วยกลไกของหลอด photomultiplier ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้า แล้วส่งให้แก่ amplifier

ขั้นที่ 3 สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากหัววัดรังสีโดยทั่วไปมักมีค่าต่ำ ไม่สามารถทำให้ scaler หรือ counting ratemeter ทํางานได้ (56) ดังนั้นจึงต้องขยายสัญญาณด้วย

preamplifier ก่อน จากนั้นก็ส่งสัญญาณผ่านไปยัง main amplifier เพื่อตกแต่งสัญญาณให้ได้ขนาดพอดีที่จะทำให้ scaler ทำงานได้ แล้วส่งสัญญาณไปยัง Analog to Digital Convertor (ADC)

ขั้นที่ 4 ADC จะเปลี่ยนสัญญาณให้เป็นจำนวนนับ ซึ่งจะถูกส่งไปบันทึกใน multichannel pulse height analyzer (PHA), PHA ประกอบด้วยส่วนที่เป็นสมองอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งแต่ละตัวเรียกว่า channel จะทำหน้าที่แยกและเก็บสัญญาณในช่วงหนึ่ง ๆ ไว้ เช่นสัญญาณที่ขยายได้มีขนาด $0 - 100 \text{ V}$. เมื่อส่งไปยัง multichannel analyzer ที่มี 100 channel สัญญาณที่มีขนาดตั้งแต่ $0 - 1 \text{ V}$. จะถูกส่งไปเก็บยัง channel ที่หนึ่ง สัญญาณที่มีขนาดตั้งแต่ $1 - 2 \text{ V}$. จะถูกส่งไปเก็บยัง channel ที่สอง เช่นนี้เรื่อย ๆ ไปจนถึงสัญญาณขนาดตั้งแต่ $99 - 100 \text{ V}$. จะถูกส่งไปเก็บไว้ที่ channel ที่หนึ่งร้อย

ขั้นที่ 5 การนำจำนวนนับออกจากสมองอิเล็กทรอนิกส์ อาจพิมพ์ออกมาอย่างอัตโนมัติด้วยเครื่องพิมพ์ IBM หรืออาจแสดงเป็น spectrum บนจอของ oscilloscope ก็ได้



รูป 4 ก แสดงเครื่องวัดรังสี Multichannel Analyzer
พร้อมทั้ง Oscilloscope และเครื่องพิมพ์



รูป 4 ข แสดงหัววัดรังสี NaI(Tl)
อยู่ในเครื่องกำบังรังสี

วิธีดำเนินการ

1. วิธีการเก็บกลุ่มตัวอย่าง การเก็บกลุ่มตัวอย่างมีวิธีการดังนี้

1.1 เก็บตัวอย่างน้ำในคลองแสนแสบ กรุงเทพมหานคร ทั้งหมด 7 จุด ดังแผนภาพ



รูป 5 แสดงแผนที่คลองแสนแสบและจุดเก็บตัวอย่างน้ำ

1.2 ในการศึกษารั้งนี้เก็บเฉพาะส่วนบนของน้ำ ลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร ทุกระยะน้ำ และเก็บน้ำ 3 เวลา คือ เวลาเช้า 7.00 น. เวลากลางวัน 12.00 น. และเวลาเย็น 16.00 น. แล้วนำแต่ละเวลามาผสมกันเป็นแต่ละตัวอย่างน้ำแต่ละจุด

1.3 เก็บตัวอย่างน้ำทั้งหมดสองฤดู คือ ฤดูร้อน (ระหว่างเดือนมีนาคม ถึง เมษายน) และฤดูฝน (ระหว่างเดือนกันยายน ถึง ตุลาคม) แต่ละฤดูเก็บ 21 ตัวอย่าง ดังนั้นสองฤดูรวมกันจะเป็น 42 ตัวอย่าง

1.4 เก็บตัวอย่างน้ำอาทิตย์เว้นอาทิตย์ เพื่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำในคลองแสนแสบ

1.5 ในการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อศึกษารั้งนี้จะเก็บตัวอย่างน้ำในฤดูร้อนเป็นหลัก เพราะฤดูร้อน จุด 6 และจุด 7 จะค่อนข้างใส จุด 1 ถึง จุด 5 น้ำมีสีค้ำเห็นได้ชัด และจะศึกษาเปรียบเทียบระหว่างฤดูร้อนกับฤดูฝน

2. วิธีดำเนินการทดลอง ^{110m}Pb , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th γ -ray

2.1 การวิเคราะห์ธาตุที่เป็นพิษในตัวอย่างในคลองแสนแสบ โดยวิธี ~~non-~~ destructive neutron activation analysis เพื่อหาว่ามีธาตุที่เป็นพิษอะไรอยู่บ้าง

แบ่งการศึกษออกเป็น 7 ขั้นตอน คือ

- ก. การทำ Calibration curve (ภาคผนวก ก.)
- ✓ ข. การเตรียมสารตัวอย่างเพื่ออาบรังสี
- ค. การนำสารตัวอย่างเข้าอาบรังสี
- ง. การวิเคราะห์เพื่อหาระยะเวลาในการอาบรังสีที่เหมาะสม
- จ. การวัดรังสีด้วย Ge-Li detector
- ฉ. การศึกษาธาตุเฉพาะตัว
- ✓ ช. การเปรียบเทียบ Photopeak energy และติดตาม half-life ของธาตุที่วิเคราะห์กับธาตุมาตรฐาน

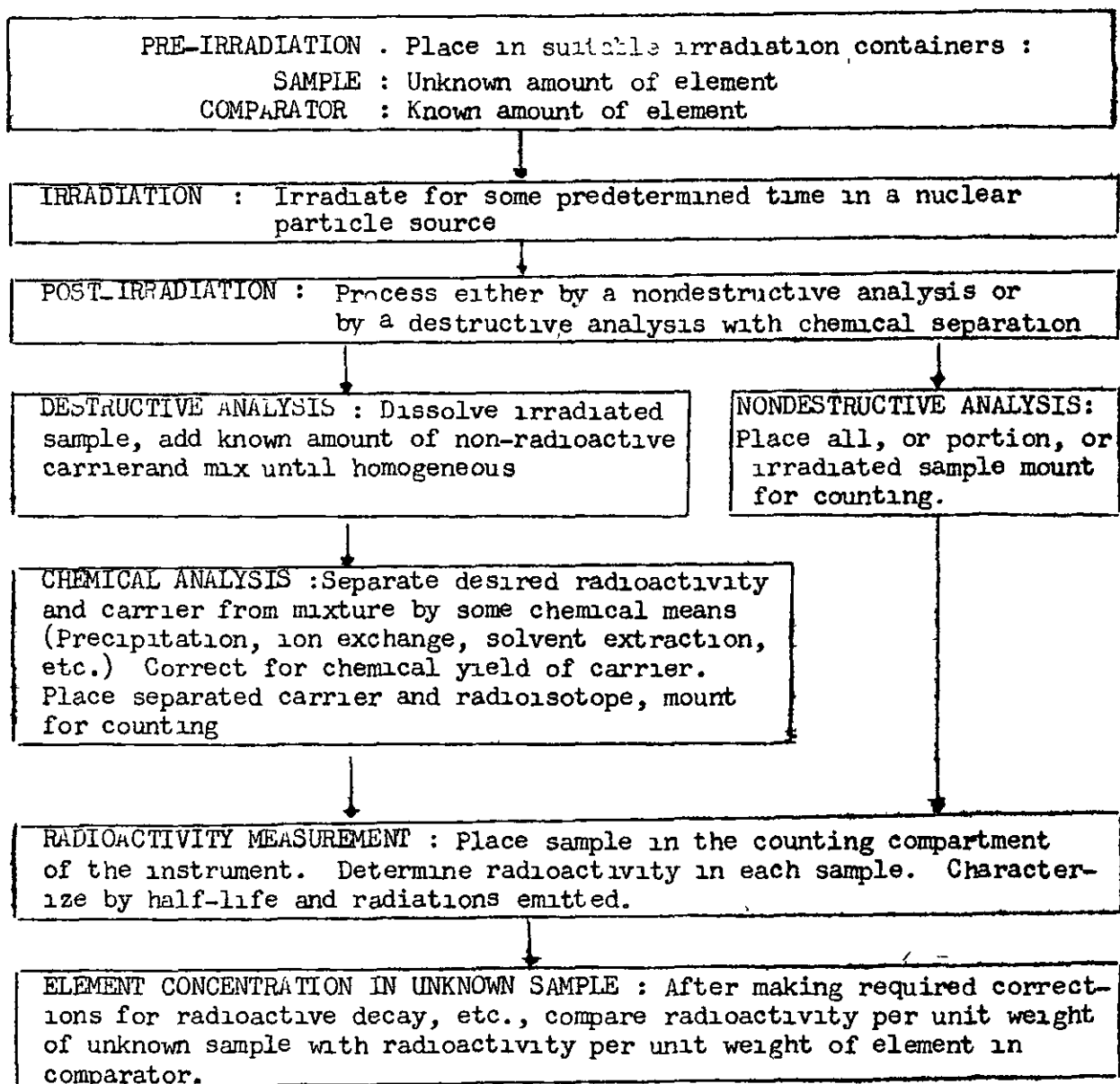
เมื่อทราบว่าธาตุที่เป็นพิษอะไรอยู่บ้างแล้ว เลือกธาตุที่เป็นพิษที่สำคัญ เช่น Hg, Se, As, Cu เป็นต้น เพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณวิเคราะห์ (quantitative analysis) เชิงปริมาณ

✓ 2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณวิเคราะห์ (quantitative analysis) โดยวิธี NAA แบบ destructive method มีลำดับขั้นตอนการทดลองดังนี้

- ก. การศึกษาคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุที่จะวิเคราะห์
- ✓ ข. การเตรียมสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์
- ✓ ค. การนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีนิวตรอน
- ง. การเติม Carrier และการทำสารตัวอย่างให้ละลาย
- ✓ จ. การแยกธาตุให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีเคมี
- ✓ ฉ. การวัดกัมมันตภาพรังสีด้วย NaI (Tl) detector
- ✓ ช. การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดกัมมันตภาพรังสี

ในการวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการทดลองวิเคราะห์แบบ Non-destructive neutron activation analysis พบว่าในสารตัวอย่างน้ำในคลองแสนแสบทั้งฤดูร้อนและฤดูฝนมีธาตุที่เป็นพิษที่สำคัญคือ Hg, As, Cu และ Se ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาปริมาณ Hg, As, Cu และ Se โดยวิธี NAA แบบ Destructive method เท่านั้น เพื่อให้เหมาะสมกับเวลาในการทำวิจัย

Radioactivation Analysis Methods (57)

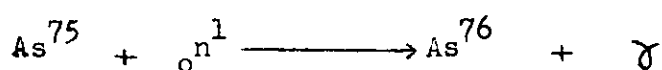


การศึกษาคงสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุที่วิเคราะห์

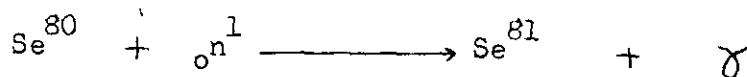
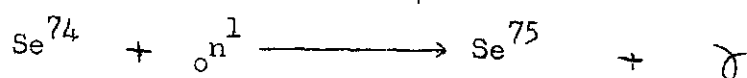
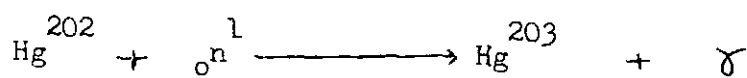
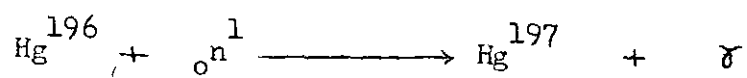
ตาราง 1 แสดงคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุ Hg, As, Cu และ Se

คุณสมบัติ	ธาตุที่วิเคราะห์					
	Hg		As	Cu	Se	
ไอโซโทปในธรรมชาติ	Hg-196	Hg-202	As-75	Cu-63	Se -74	Se -80
Isotopic abundance(%)	0.146	29.80	100	69.17	0.87	49.82
Cross Section (barn)	(25 + 880	4	4.3	4.7	58	0.08 + 53
ไอโซโทปที่เกิดขึ้น	Hg -197	Hg-203	As-76	Cu-64	Se-75	Se-81
ครึ่งชีวิต	24 hr/65 hr	47 d.	26.5 hr	12.8 hr	120 d.	18 min.
พลังงานของรังสีแกมมา	0.130, 0.077	0.279	0.559	0.511	0.136	0.103,
ที่ส่งออกมา (Mev.)	0.41, 0.191	0.279	0.559	0.511	0.136	0.28,
	0.28	.	0.657	1.34	0.265	0.55,
			1.21		0.402	0.83

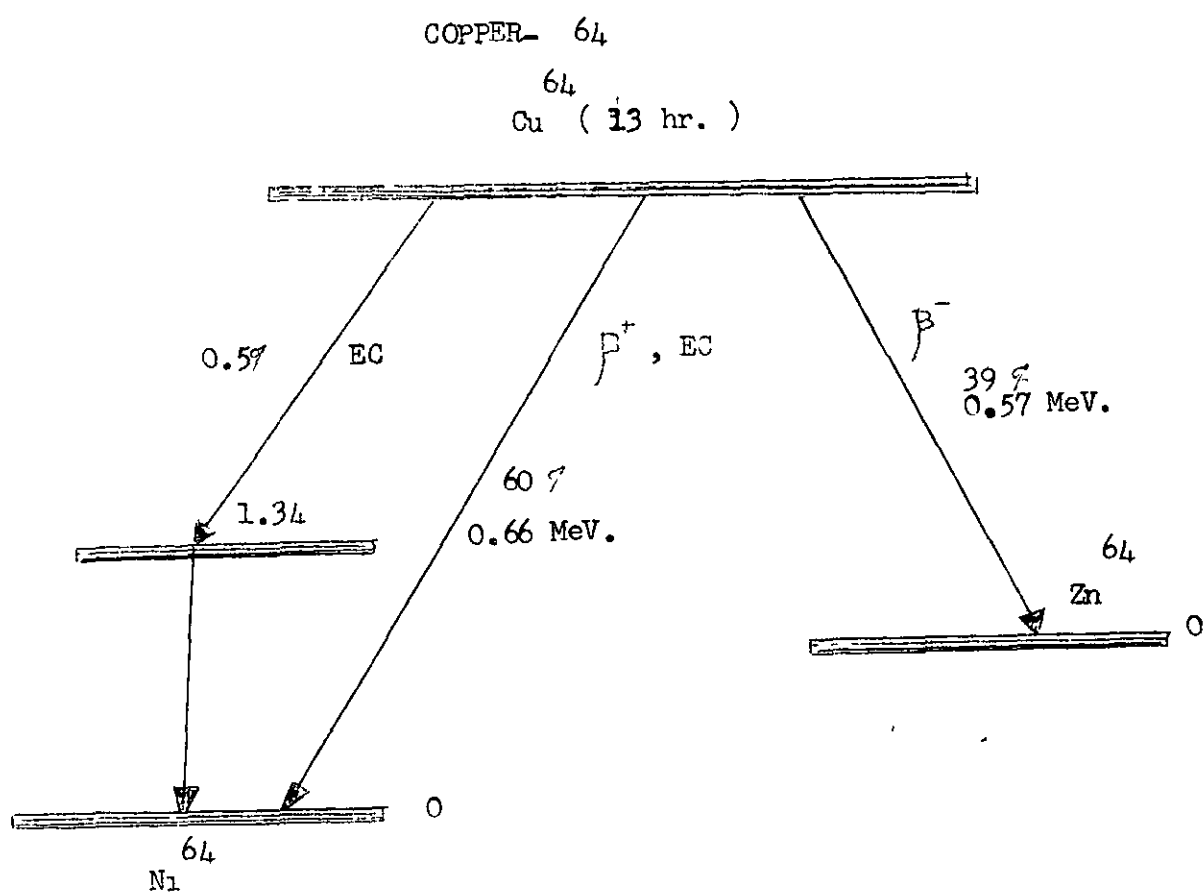
ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ คือปฏิกิริยานิวตรอน-แกมมา เมื่อนำธาตุ Cu และ As เข้าอบรังสีนิวตรอน จะเกิดปฏิกิริยา (n,γ) ดังนี้



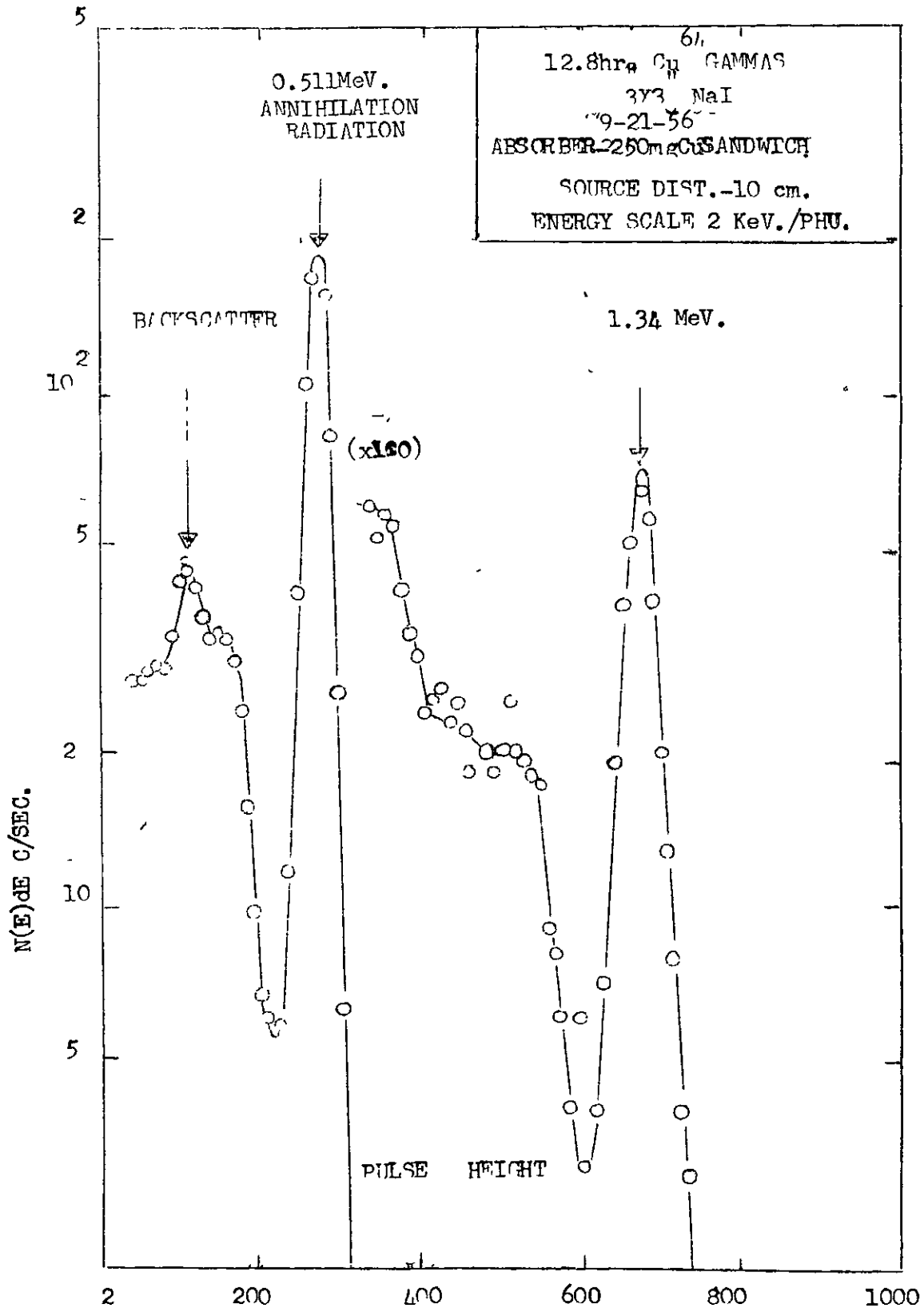
สำหรับธาตุ Hg นั้น มี 2 stable isotope คือ Hg¹⁹⁶ และ Hg²⁰² ส่วน Se มี 2 stable isotope คือ Se⁷⁴ และ Se⁸⁰ ดังนั้นเมื่อนำ Hg และ Se เข้าอบรังสีนิวตรอน จะเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



รูป 6 โคออะแกรมแสดงการสลายตัว (Decay Scheme) ของนิวเคลียส
ของธาตุ Cu

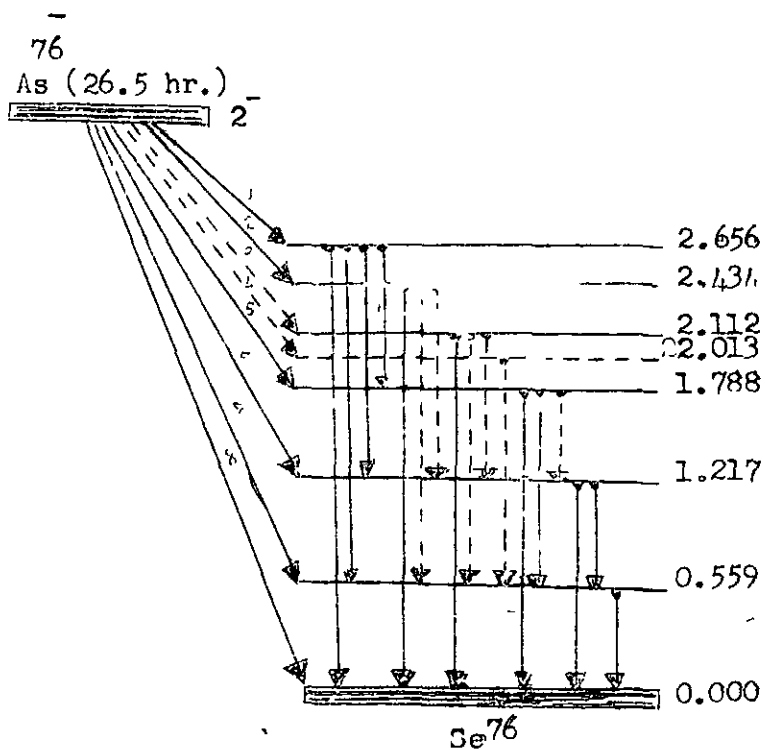


รูป 7 กราฟแสดงพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจากธาตุ Cu^{64} (58)



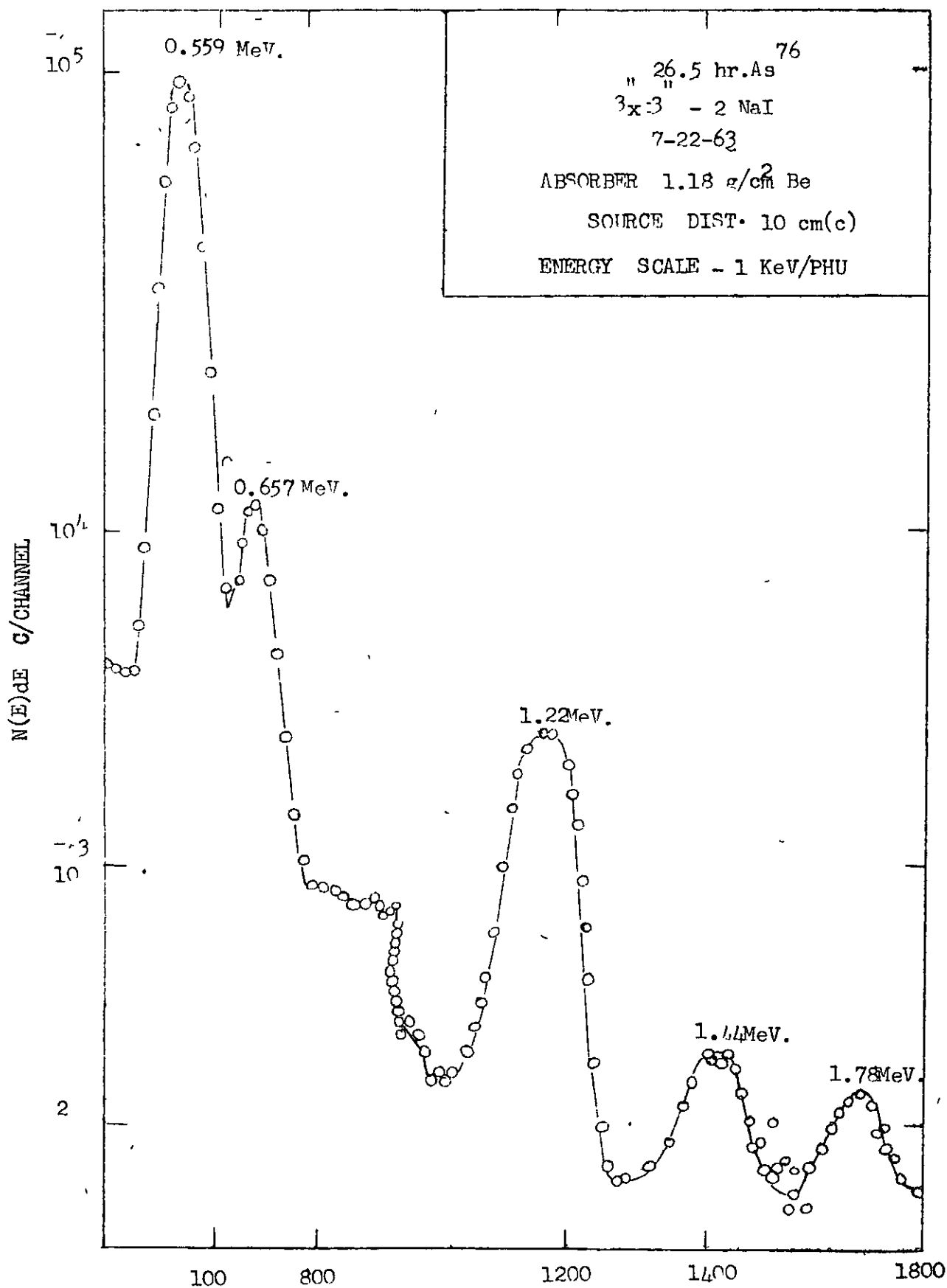
รูป 8 โคออะแกรมแสดงการสลายตัว (Decay Scheme) ของ
นิวเคลียสของธาตุ As (59)

ARSENIC- 76



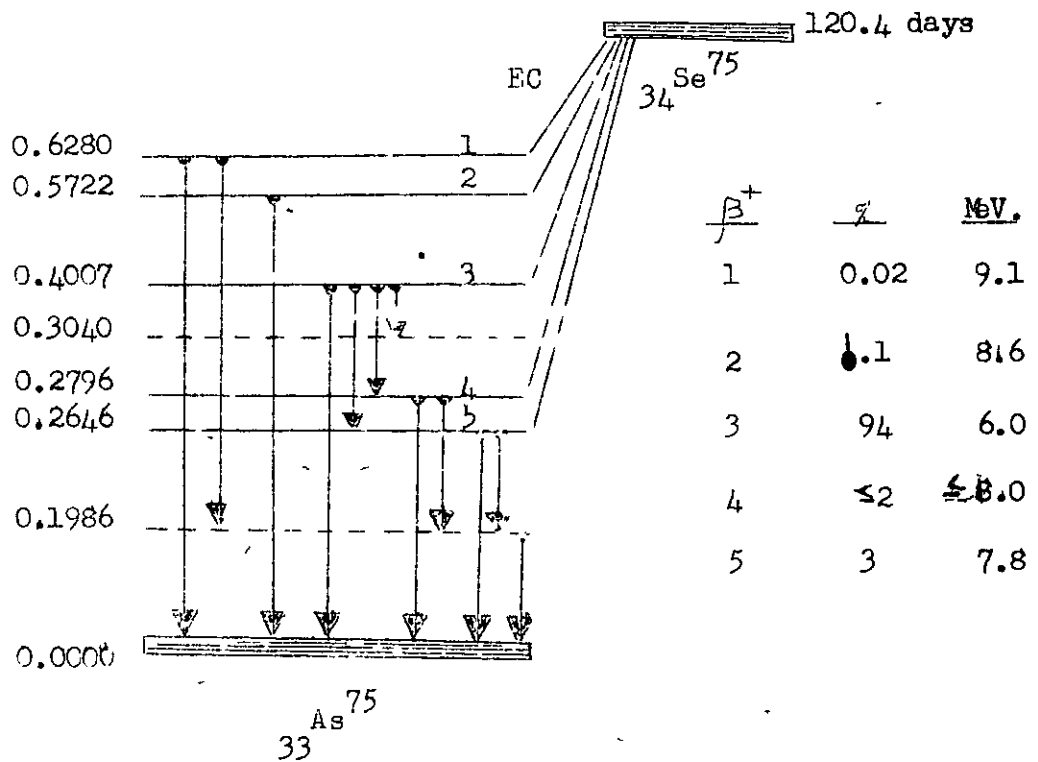
β^-	%	MeV.
1	1.2	0.309
2	1.0	0.530
3	0.6	0.853
4	0.2	0.952
5	2.1	1.177
6	6.9	1.718
7	35	2.405
8	53	2.965

รูป 9 กราฟแสดงพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจากธาตุ As^{76} (58)

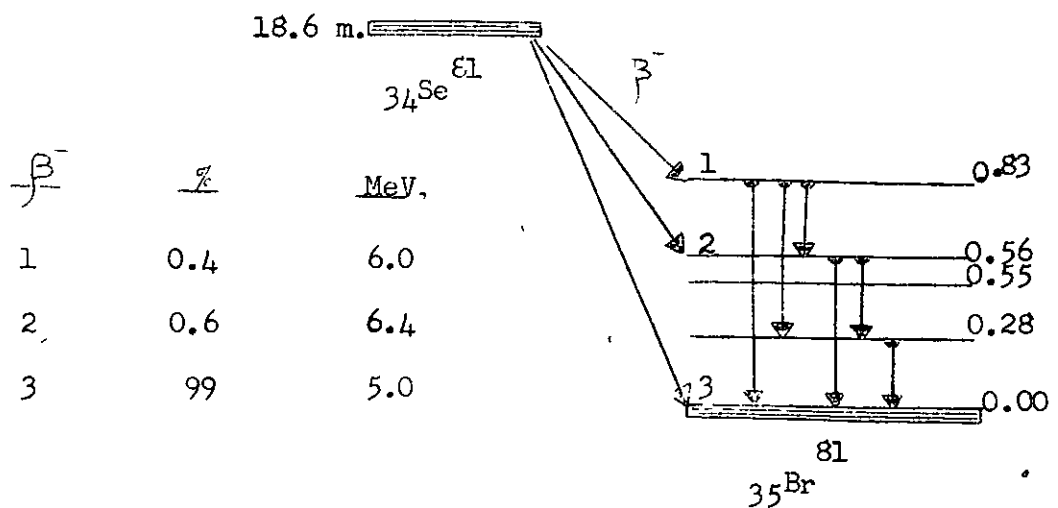


รูป 10 โคอะแกรมแสดงการสลายตัว (Decay Scheme) ของ
นิวเคลียสของธาตุ Se (60)

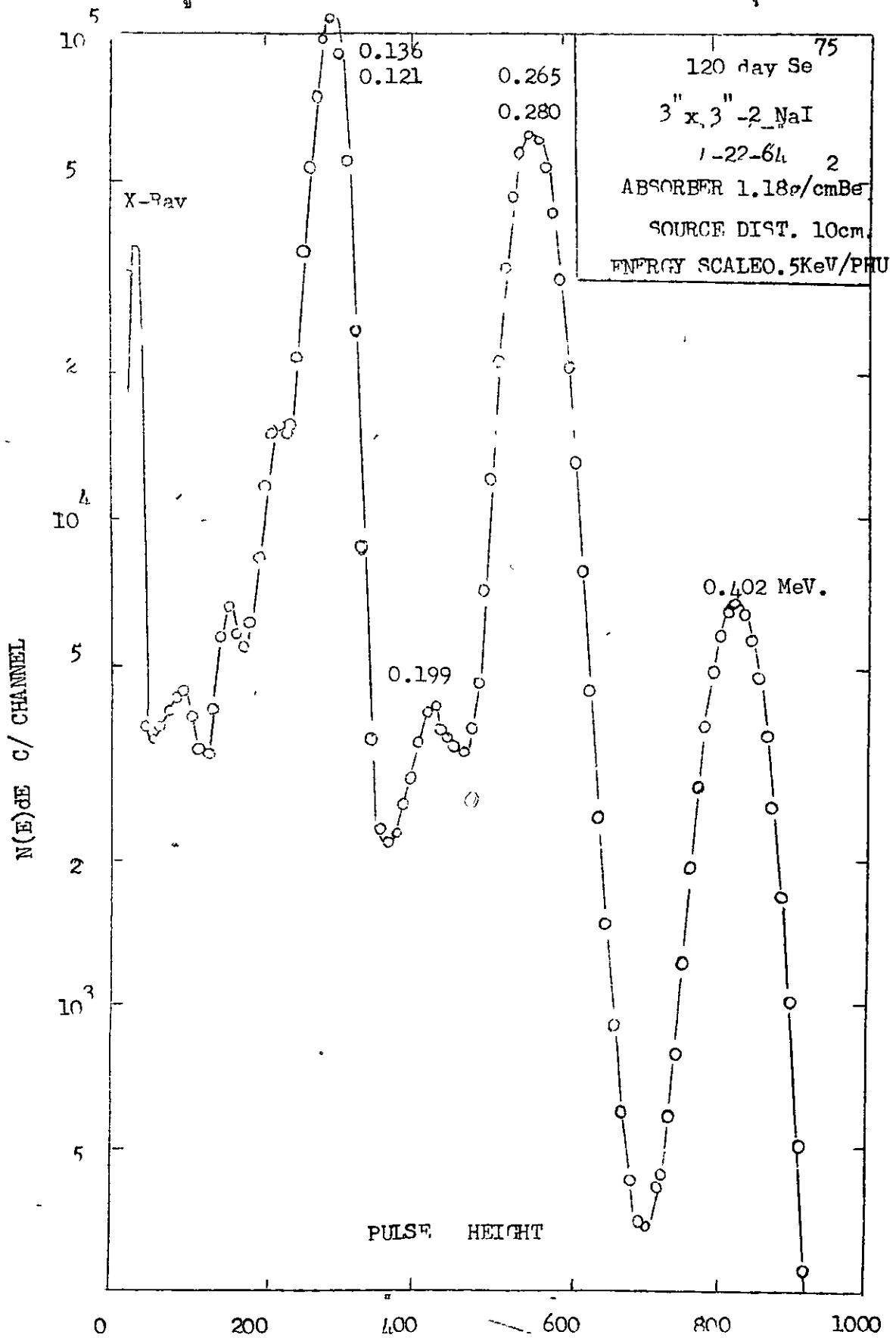
SELENIUM - 75



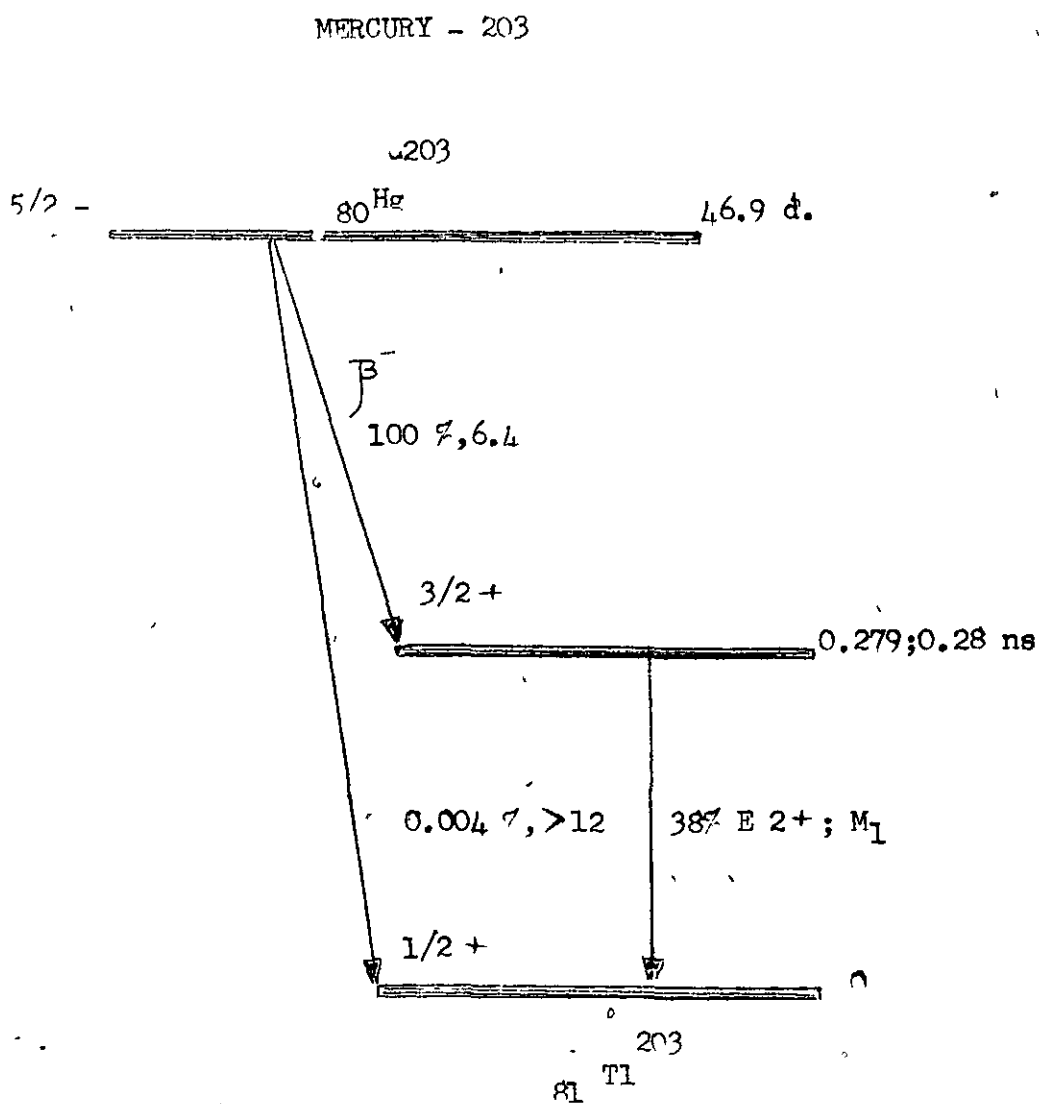
SELENIUM - 81



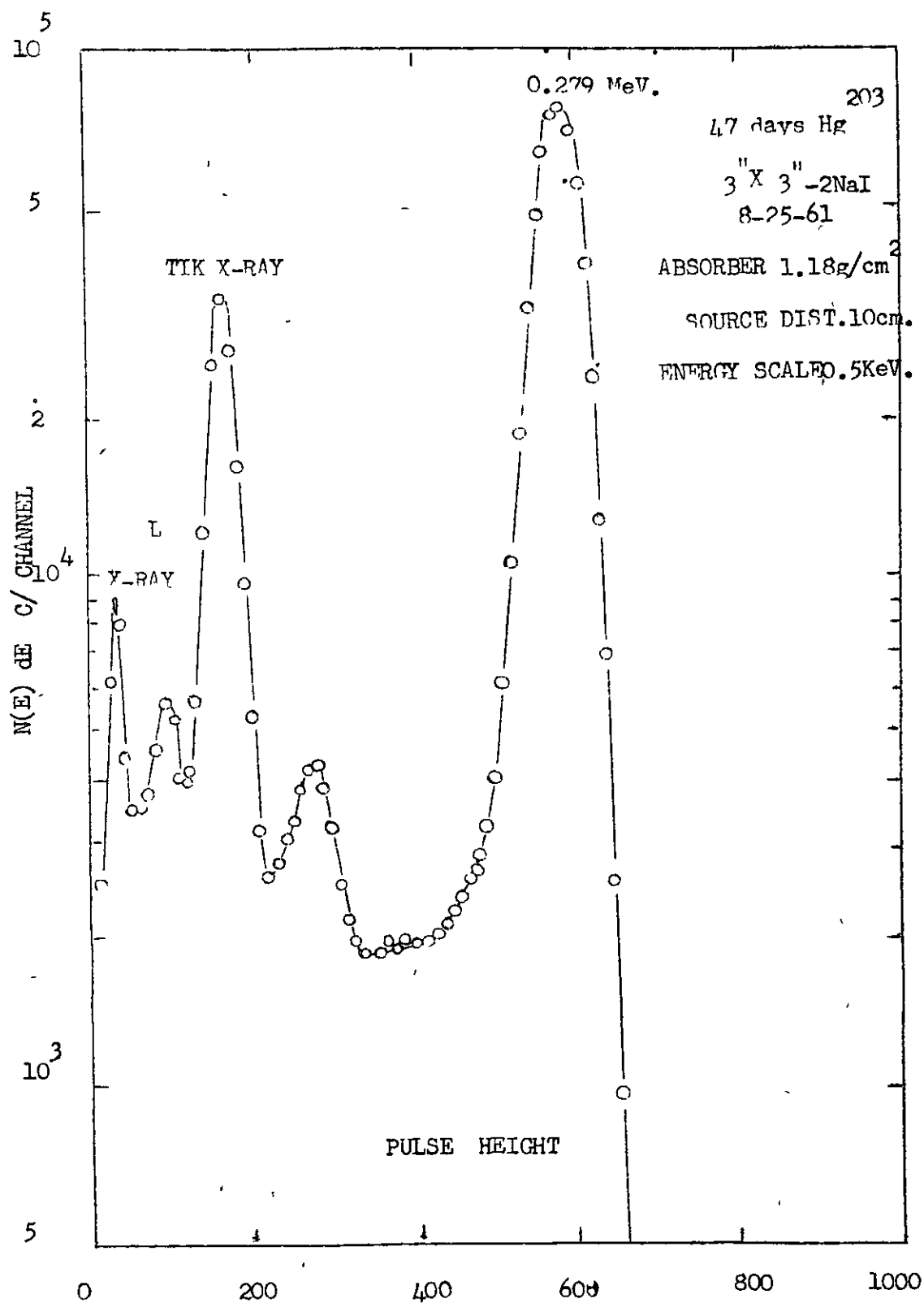
รูป 11 กราฟแสดงพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจากธาตุ Se^{75} (58)



รูป 12 โคออะแกรมแสดงการสลายตัว (Decay Scheme) ของ
นิวเคลียสของธาตุ Hg (60)



รูป 13 กราฟแสดงพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจากธาตุ Hg^{203} (58)



* การเตรียมสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ Cu และ As

1.1 นำสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในถุงร่อน (สัญลักษณ์ S) มา 100 มิลลิลิตร มาทำให้แห้งด้วย IR Lamp ที่อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส เมื่อแห้งแล้วละลายตะกอนที่ได้ ด้วย 0.1 มิลลิลิตร ของกรดไนตริกที่เข้มข้น และบริสุทธิ์ แล้วเติมน้ำกลั่นซึ่งกลั่นสามครั้งให้ครบ

1 มิลลิลิตร

1.2 บรรจุสารตัวอย่างในข้อ 1.1 ลงในขวด polyethylene ชนิด 1 มิลลิลิตร แล้วผนึกขวดด้วยความร้อน (heat sealing)

1.3 สารตัวอย่างน้ำที่เก็บในถุงร่อน (สัญลักษณ์ R) ก็เตรียมสารตัวอย่าง เหมือนถุงร่อน (ตามข้อ 1.1 และ 1.2)

1.4 บรรจุสารละลายของสารมาตรฐาน Cu^{+2} และ As^{+3} (มีปริมาณ Cu^{+2} 1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และ As^{+3} 0.5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลง ในขวด polyethylene แต่ละขวด แล้วผนึกขวดด้วยความร้อน เช่นเดียวกับสารตัวอย่าง

1.5 นำขวดสารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่ผนึกแล้วมาล้างให้สะอาดด้วยสารละลาย HNO_3 1% ทำให้แห้งแล้วบรรจุรวมกันในภาชนะที่ใช้อาบรังสี ซึ่งเรียกว่า rabbit เพื่อนำไป อาบรังสีนิวตรอนต่อไป

การนำสารตัวอย่างเข้าอาบรังสี

นำ rabbit ไปอาบรังสีนิวตรอนในห้อง pneumatic ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ซึ่งมี neutron flux เฉลี่ย ประมาณ 6×10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การเติม Carrier

ก. นำขวดสารตัวอย่างที่อาบรังสีแล้วมาล้างออกเป็น 2 ซีก และล้างให้ด้วยน้ำกลั่นเล็กน้อย แล้วเติม 6M.HCl จำนวน 5 ml. และเติม Carrier Cu^{+2} และ As^{+3} (มีปริมาณ Cu^{+2} 10 mg/ml. และ As^{+3} 20 mg/ml.) อย่างละ 1 ml. ลงในสารตัวอย่างแล้วอุ่นบน

hot plate จนกระทั่งเดือด แล้วแยกขวด polyethylene ออกทิ้ง

ข. นำขวดสารมาตรฐานที่อาบรังสีแล้วมาล้างออกเป็น 2 ซีก เช่นเดียวกับสารตัวอย่าง แล้วเติม carrier Cu^{+2} และ As^{+3} (มีปริมาณ Cu^{+2} 10 mg/ml. และ As^{+3} 20 mg/ml.) อย่างละ 1 ml. ลงในสารมาตรฐาน Cu และ As ตามลำดับ และเติม 6 M. HCl จำนวน 5 ml. แล้วตั้งบน hot plate จนกระทั่งเดือด และแยกขวด polyethylene ออกทิ้ง

การแยกธาตุ Cu และ As ให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีเคมี

1. นำสารละลายของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานมาผ่านแก๊ส H_2S ลงไป จะเกิดตะกอน CuS และ As_2S_3 แล้วอุ่นสารละลายให้เดือดประมาณ 5 นาที เพื่อไล่แก๊ส H_2S ต่อจากนั้นก็กรองตะกอนแล้วล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนและแอลกอฮอล์ ส่วน filtrate I เติงไป

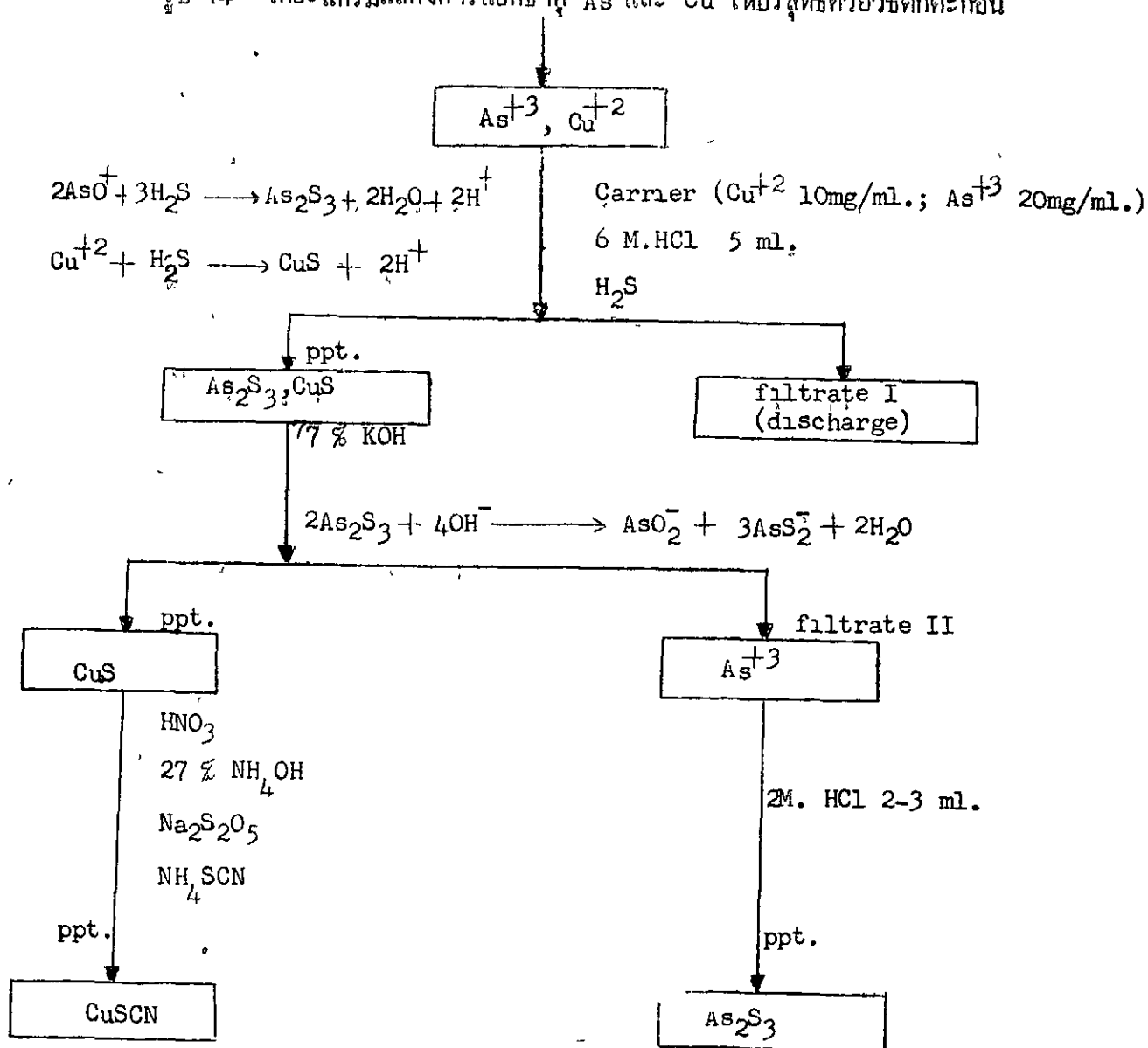
2. นำตะกอน CuS และ As_2S_3 มาละลายในสารละลาย KOH 7% และอุ่นให้เดือด จะสังเกตเห็นตะกอนสีค้ำของ CuS เหลืออยู่ ส่วนตะกอน As_2S_3 จะละลายในสารละลายข้าง กลายเป็น filtrate II กรองตะกอน CuS ล้างด้วยน้ำร้อนและแอลกอฮอล์ แล้วเก็บตะกอนไว้แยก Cu ให้บริสุทธิ์

3. ทำ filtrate II ให้เป็นกรดเล็กน้อยด้วย 2M. HCl ประมาณ 2-3 ml. จะได้ตะกอนสีเหลืองของ As_2S_3 อีกครั้งหนึ่ง ขณะเดียวกันก็ผ่านแก๊ส H_2S ลงในสารละลายของสารมาตรฐาน As^{+3} จะเกิดตะกอนสีเหลืองของ As_2S_3 เช่นกัน แล้วกรองตะกอนและล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน 3 ครั้ง และแอลกอฮอล์ 2 ครั้ง ต่อจากนั้นก็เก็บตะกอนไว้ใน planchet เพื่อวัดกัมมันตภาพรังสีต่อไป (ในการกรองตะกอนทดสอบการทดลองนี้ ทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน กรองตะกอนด้วย suction pump และใช้กระดาษกรองเบอร์ 42 พร้อมทั้งล้างกระดาษกรองอย่างละเอียด)

4. ละลายตะกอน CuS ใน HNO_3 (conc.) ประมาณ 1 ml. และอุ่นให้เดือดจนกระทั่งตะกอน CuS ละลายหมดแล้วทำให้สารละลายเจือจางด้วยน้ำกลั่นประมาณ 3 - 4 ml. ต่อจากนั้นทำสารละลายให้เป็นกลางควบคุมกับสารละลายของสารมาตรฐาน Cu โดยการเติม NH_4OH 27% สังเกตได้จากสารละลายเป็นสีน้ำเงินอ่อนอย่างถาวร จากนั้นก็ reduce Cu^{+2} ให้เป็น Cu^{+1} ด้วย

Sodium metabisulphite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) จนกระทั่งสีน้ำเงินจางหายไป แล้วเติมสารละลาย Ammonium thiocyanate (NH_4SCN) 5% ประมาณ 2 - 3 ml. จะเกิดตะกอน CuSCN ซึ่งมีสีขาวคล้ายขี้เถ้า ต่อจากนั้นก็กรองตะกอนแล้วล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง กับแอลกอฮอล์ 2 ครั้ง จากนั้นก็เก็บตะกอนไว้ใน planchet เพื่อวัดกัมมันตภาพรังสีต่อไป

รูป 14 ไกอะแกรมแสดงการแยกธาตุ As และ Cu ให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีตกตะกอน



2. การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ Se และ Hg

2.1 นำสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน (สัญลักษณ์ S) มา 1,000 มิลลิลิตร มาทำให้แห้งในตูบอบ (hot oven) ที่อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส ในทำนองเดียวกัน สารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน (สัญลักษณ์ R) ก็เตรียมสารตัวอย่างเช่นเดียวกัน จากน้ำตัวอย่าง 1,000 มิลลิลิตร หรือ 1 ลิตร เมื่อทำให้แห้งเพื่อ concentrate น้ำนั้น ปรากฏว่าได้ residue โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.33782 กรัม

2.2 บรรจุสารตัวอย่างน้ำในข้อ 2.1 ลงใน quartz แล้ว seal quartz ให้ปิดสนิท

2.3 บรรจุสารละลายของสารมาตรฐาน Hg^{+2} และ Se^{+4} (มีปริมาณ Hg^{+2} 10 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และ Se^{+4} 10 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 1 มิลลิลิตรลงใน quartz แต่ละ quartz แล้วทำสารละลายของสารมาตรฐาน Hg^{+2} และ Se^{+4} แต่ละ quartz ให้แห้งด้วย dry freezing เมื่อแห้งแล้วก็ seal quartz แต่ละ quartz ให้ปิดสนิท

2.4 นำ quartz สารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่ seal ปิดสนิทเรียบร้อยแล้ว มาบรรจุรวมกันในภาชนะที่ใช้อาบรังสี ซึ่งทำด้วย aluminium เพื่อนำไปอบรังสีนิวตรอนต่อไป

การนำสารตัวอย่างเข้าอบรังสี

นำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานในข้อ 2.4 ที่บรรจุรวมกันในภาชนะที่ใช้อาบรังสี ไปอบรังสีนิวตรอนในระบบ wet I.P. ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ซึ่งมี neutron flux เฉลี่ยประมาณ 10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 5 วัน

การเติม Carrier และการทำสารตัวอย่างให้ละลาย

ก. นำ quartz สารตัวอย่างที่อบรังสีเป็นเวลา 5 วันแล้วปล่อยให้ decay เป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ เพื่อให้ธาตุที่มีกัมมันตภาพรังสี หรือธาตุบางธาตุที่มารบกวน (interfere) กับธาตุที่ทำการวิเคราะห์สลายตัวออกไป แล้วเปิด quartz ที่ผนึกออกและเทสารตัวอย่างลงในบีกเกอร์ พร้อมทั้งล้าง quartz ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 2 ครั้ง และล้าง quartz ด้วยน้ำกลั่น

3 ครั้ง และเติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไปอีก 2 - 3 มิลลิลิตร เพื่อละลาย residue แล้วเติม Carrier Hg^{+2} และ Se^{+4} (มีปริมาณ Hg^{+2} 20 mg/ml. และ Se^{+4} 20 mg/ml.) อย่างละ 1 ml. ลงในสารตัวอย่างแล้วอุ่นบน hot plate จนกระทั่งเคื่อกจะได้สารละลายใส

ข. นำ quartz สารละลายมาตรฐานที่อาบรังสีเป็นเวลา 5 วัน พร้อมสารตัวอย่าง และปล่อยให้ decay เป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์เช่นเดียวกับสารตัวอย่าง มาเปิด quartz ที่ผนึกออก แล้วเติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไปใน quartz เพื่อล้างเอาสารมาตรฐาน Hg^{+2} และ Se^{+4} ออกมา ล้างด้วยกรดไนตริก 2 ครั้งแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง และเทลงในบีกเกอร์แต่ละบีกเกอร์ แล้วเติม Carrier Hg^{+2} และ Se^{+4} (มีปริมาณ Hg^{+2} 20 mg/ml. และ Se^{+4} 20 mg/ml.) อย่างละ 1 ml. ลงในสารมาตรฐาน Hg และ Se แต่ละบีกเกอร์ ตามลำดับ

* การแยกธาตุ Se และ Hg ให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีเคมี

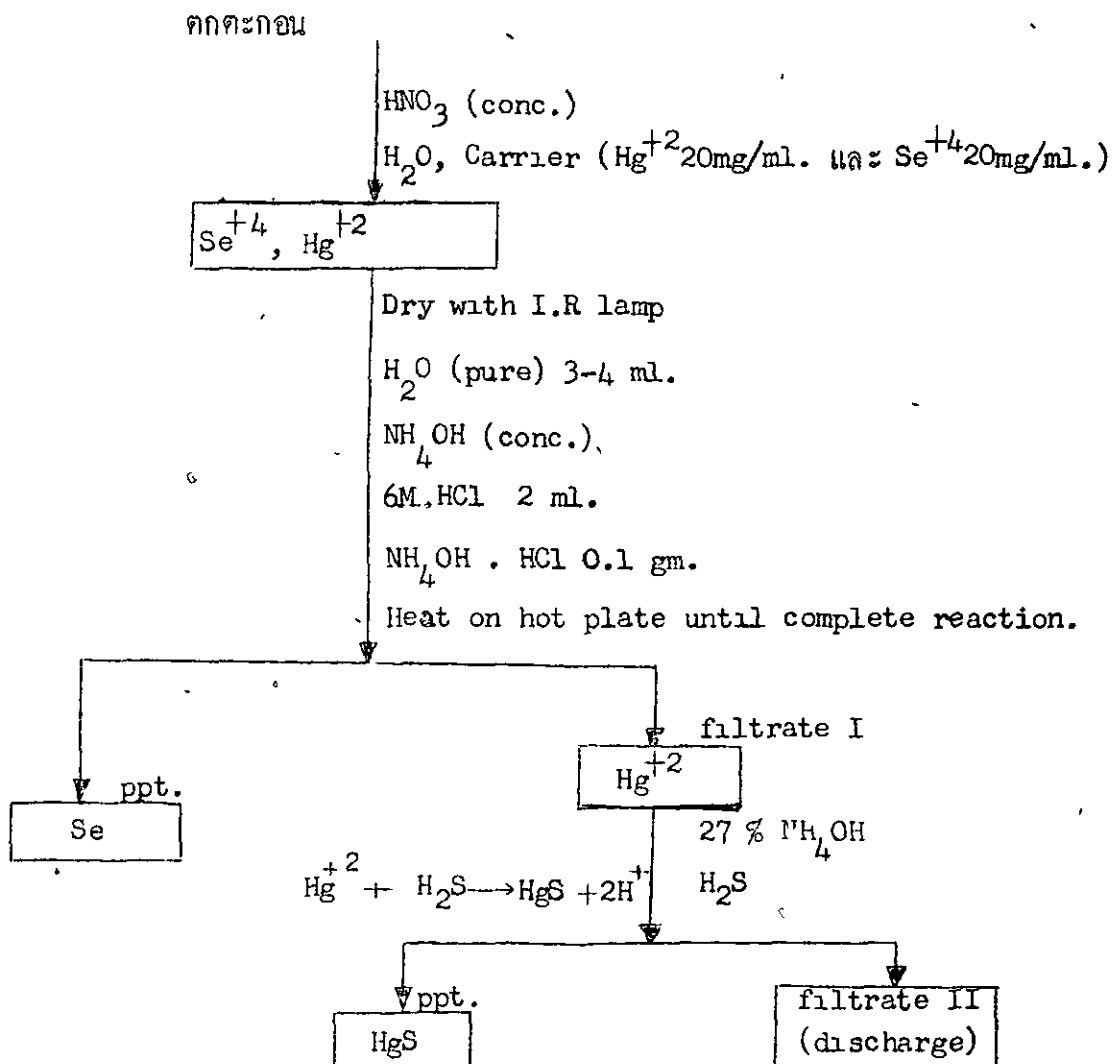
1. นำสารละลายของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่เติม Carrier เรียบร้อยแล้ว มาทำให้รวมแห้งหรือเกือบแห้ง เพื่อไลกรดไนตริกเข้มข้นออกไป เพราะธาตุ Se และ Hg ไม่ตกตะกอนในสารละลายที่มีกรดไนตริก เมื่อสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเกือบแห้งแล้วทำสารละลายที่เกือบแห้งให้เจือจางด้วยน้ำกลั่น 3 - 4 มิลลิลิตร พร้อมทำให้สารละลายของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานมีฤทธิ์เป็นกลางด้วย NH_4OH (conc.)

2. นำสารละลายของสารตัวอย่างที่มีฤทธิ์เป็นกลางแล้วมาเติม 6 M.HCl จำนวน 2 มิลลิลิตร เพื่อให้สารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดเพราะโลหะ Se จะตกตะกอนในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด HCl แล้วเติม Hydroxylamine Hydrochloride ($NH_2OH \cdot HCl$) ลงไปประมาณ 0.1 กรัม เพื่อ reduce โลหะ Se ออกมา พร้อมตั้งทิ้งบน hot plate ให้เคื่อกจนกระทั่งได้ตะกอนสีดำของโลหะ Se ส่วนสารละลายของสารมาตรฐาน Se ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกลางก็นำมาเติม 6 M.HCl จำนวน 2 มิลลิลิตร และเติม $NH_4OH \cdot HCl$ ลงไปประมาณ 0.1 กรัม และตั้งบน hot plate ให้เคื่อกเมื่อปฏิกิริยาเกิด complete จะได้ตะกอนสีดำของโลหะ Se เช่นกัน ต่อจากนั้นกรองตะกอนโลหะ Se ในสารตัวอย่างและสารมาตรฐานด้วย suction pump และใช้กระดาษกรองเบอร์ 42

ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน 2 ครั้ง และ ethyl alcohol 1 ครั้ง แล้วเก็บตะกอนไว้ใน planchet เพื่อนำไปวัดกับมัมตกภาพรังสีต่อไป ส่วน filtrate I นำไปแยกเพื่อหา Hg

3. ทำ filtrate I ให้มีฤทธิ์เป็นกลางด้วย 27% NH_4OH เมื่อ filtrate มีฤทธิ์เป็นกลางแล้ว นำ filtrate และสารละลายของสารมาตรฐาน Hg ที่มีฤทธิ์เป็นกลางเช่นกัน มาผ่านแก๊ส H_2S ลงไป จะเกิดตะกอนสีขาวของ HgS แล้วอุ่นสารละลายให้เดือดบน hot plate ประมาณ 5 นาที เพื่อไล่แก๊ส H_2S ออกจากเนื้อกรองตะกอน แล้วล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน 3 ครั้ง และเวกเกอร์ 2 ครั้ง เก็บตะกอนไว้ใน planchet เพื่อนำไปวัดกับมัมตกภาพรังสีต่อไป ส่วน filtrate II เติ้ง

รูป 15 ไคอะแกรมแสดงการแยกธาตุ Se และ Hg ให้บริสุทธิ์ด้วยวิธี



การวัดกัมมันตภาพรังสี

นำตะกั่ว HgS, As₂S₃, CuSCN และ Se ของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานมาวัดรังสีแกมมาด้วย 128 multichannel gamma spectrometer โดยตั้ง gain ที่ 80 Zero level ที่ 3 และใช้ High power supply ที่ 920 V. เวลารับ 1 นาทีสำหรับ HgS และ 4 นาทีสำหรับ As₂S₃, CuSCN และ Se และจำนวนนับต่อเวลาในแต่ละ channel จะพิมพ์ออกมาโดยเครื่องพิมพ์ IBM

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดกัมมันตภาพรังสี (ข้อมูลในภาคผนวก ข.)

- นำข้อมูลที่ได้จากการวัดกัมมันตภาพรังสีมาหาจุดในสารตัวอย่างมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับต่อเวลา กับ channel ในกระดาษ simlog เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ถ้าปรากฏว่าได้ peak ชัดเจนอยู่บน channel เดียวกับ peak ของสารมาตรฐาน แสดงว่ามีธาตุที่ต้องการวิเคราะห์อยู่จริง หรืออาจตรวจสอบจากพลังงานของรังสีแกมมาที่ส่งออกมา โดยเทียบกับ calibration curve ซึ่งอยู่ในภาคผนวก ก. และนอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบจากการติดตาม half-life ได้อีกด้วย
- กำหนดหาพื้นที่ใต้ peak จากผลรวมของจำนวนนับต่อเวลาของ channel ที่ประกอบเป็น peak แล้วเอาผลลัพธ์จากจำนวนนับต่อเวลาของ channel แปรรวมกับ channel สุดท้าย ของ peak แล้วหารด้วย 2 จะได้ค่าเฉลี่ยจำนวน channel ใน peak มาลบออก ก็จะได้เป็นพื้นที่ใต้ peak ทั้งหมด
- อบตะกั่วสารตัวอย่างและสารมาตรฐานให้แห้งใน desicator ชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหา 100 % yield แล้วตรวจแก้พื้นที่ใต้ peak(activity) ให้เป็น 100 % (ดูตัวอย่างในการคำนวณ)
- กำหนดหาปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง วากสูตร

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{กัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{กัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารมาตรฐาน}}$$

5. กำหนดหาน้ำหนักของสารตัวอย่างที่แท้จริง เพราะน้ำที่นำมาวิเคราะห์ไม่ได้เป็นน้ำบริสุทธิ์ ถึงแม้จะสรุปว่าน้ำ 1 มิลลิลิตรหนักเท่ากับ 1 กรัมไม่ได้ ในการทดลองครั้งนี้ น้ำนำตัวอย่างมาจำนวนหนึ่งมาชั่งแล้วคำนวณไปที่ 100 หรือ 1,000 มิลลิลิตร ก็จะได้น้ำหนักของสารตัวอย่างที่นำไปทำให้แห้ง แล้วนำมาวิเคราะห์ที่แท้จริง หรืออาจจะหา density ของน้ำตัวอย่างออกมาก่อนด้วยวิธีทาง physic แล้วใช้สูตร $D = \frac{M}{V}$ เมื่อ D = ความหนาแน่น, M = น้ำหนักที่แท้จริงของสารตัวอย่าง ส่วน V = ปริมาตร แต่ผลปรากฏว่าค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจะใช้วิธีไหนก็ได้

6. การทดลองครั้งนี้หาปริมาณธาตุ H_2 , As , Cu และ Se ออกมาเป็น ppm.

ตัวอย่างการคำนวณ

ก. การคำนวณหาปริมาณธาตุ Cu ในสารตัวอย่างน้ำถูกร้อน เบอร์ S.1

จากน้ำตัวอย่างถูกร้อน เบอร์ S.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ซึ่งเก็บในสัปดาห์แรก

๗. จุดเก็บที่ 1 ผลปรากฏว่า

น้ำหนักน้ำตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร เท่ากับ 99.72200 กรัม

น้ำหนักสารมาตรฐาน 1 μg .

น้ำหนักตะกอน $CuSCN$ ในสารตัวอย่าง 0.00915 กรัม

น้ำหนักตะกอน $CuSCN$ ในสารมาตรฐาน 0.01430 กรัม

การหาพื้นที่ใต้ peak (activity) จากรูป 16 ประกอบการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ใต้ peak ของ } Cu \text{ ในสารตัวอย่าง} &= (000035 + 000101 + 000349 \\
 &\quad + 000451 + 000359 + 000122) \\
 &\quad - \left[\frac{35 + 122}{2} \cdot 6 \right] \\
 &= 1417 - 471 \\
 &= 946
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ใต้ peak ของ } Cu \text{ ในสารมาตรฐาน} &= (000070 + 000150 + 000379 \\
 &\quad + 000421 + 000158 + 000046) \\
 &\quad - \left[\frac{(70 + 46) \cdot 6}{2} \right] \\
 &= 1224 - 348 = 876
 \end{aligned}$$

คำนวณหา 100 % yield

ถ้าตามทฤษฎี Cu^{+2} 63.54 มิลลิกรัมเกิดเป็น CuSCN = 121.6218 มิลลิกรัม

ถ้า Carrier Cu^{+2} 10 มิลลิกรัมเกิดเป็น CuSCN = $\frac{121.6218 \times 10}{63.54}$ มิลลิกรัม

= 19.14098 มิลลิกรัม

= 0.01914 กรัม

$\therefore$ 100 % yield ของ CuSCN = 0.01914 กรัม

คำนวณหา 100 % activity

ในสารมาตรฐาน CuSCN 0.01430 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak(activity) = 876

ถ้าสารตัวอย่าง CuSCN 0.01914 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak(activity)

$$= \frac{876 \times 0.01914}{0.01430}$$

$$= 1172.49230$$

ในสารตัวอย่าง CuSCN 0.00915 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak(activity) = 946

ถ้าสารตัวอย่าง CuSCN 0.01914 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak(activity)

$$= \frac{946 \times 0.01914}{0.00915}$$

$$= 1978.84590$$

จากสูตร

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{กัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{กัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารมาตรฐาน}}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง} &= \frac{1978.84590}{1172.49230} \times 1 \mu\text{g} \\ &= 1.68773 \mu\text{g} \end{aligned}$$

น้ำเค็มสารตัวอย่างน้ำในถุร้อน เบอร์ 1 ๗ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่จุด 1 จำนวน 1๗๐ มิลลิลิตร ซึ่งหนัก 99.722๐๐ กรัม มี Cu = 1.68773 μg

$$\begin{aligned} \text{ถ้าสารตัวอย่างหนัก 1 กรัม มี Cu} &= \frac{1.68773 \times 1}{99.72200} \mu\text{g} \\ &= 0.01692 \mu\text{g/g} \end{aligned}$$

$\therefore$ สารตัวอย่างน้ำในถุร้อนเบอร์ S.1 ปริมาณ Cu = 0.01692 ppm.

ข้อมูลที่ใช้ในการเขียนกราฟในรูป 16 (Sample)

SURFACE WATER SAMPLE S.1 IRR. TIME 1 H. /16/DEC./1974. GAIN 8:80H.V.
920/PPT. CuSCN.

040'00	000000	000701	000134	000807	001918	001782	001364
001192	001056	001025	000869	000819	000690	000599	000508
000434	000353	000380	000648	000718	000660	000399	000297
000305	000301	000290	000207	000174	000172	000158	000158
000151	000154	000151	000108	000135	000137	000116	000104
000120	000112	000090	000108	000091	000068	000077	000087
000082	000109	000092	000118	000085	000097	000074	000062
000031	000027	000040	000030	000025	000031	000028	000023
000021	000028	000014	000026	000010	000017	000016	000018
000012	000015	000029	000017	000014	000018	000015	000012
000011	000005	000008	000009	000009	000004	000009	000013
000016	000010	000014	000012	000011	000010	000011	000004
000009	000003	000000	000001	000001	000002	000000	000000
000000	000000	000000	000002	000000	000000	000002	000001
000000	000000	000002	000003	000000	000000	000000	000000
000001	000001	000000	000001	000000	000001	000000	000001

SUB.

099999	000000	000001	000011	000117	000129	000327	000167
000199	000158	000230	000177	000169	000092	000118	000097
000080	000035	000101	000349	000451	000359	000122	000027
000002	000029	000061	000009	000005	000026	000009	000014
000017	000004	000009	099984	000022	000025	099988	099977
099998	000002	099993	000034	000028	000005	000002	099995
099994	099990	099971	000009	000009	000035	000033	000034
099996	099998	000014	000004	099998	000010	000007	000002
000009	000016	000002	000007	099994	000006	099995	000006
099991	099991	000011	000001	099997	000009	000012	000006
000004	099997	000002	000004	000001	099994	099997	000002
099998	099995	000006	000004	000003	000006	000008	000004
000008	000002	099998	099998	099997	099998	099998	099998
000000	099997	000000	000002	099998	099998	000000	000000
000000	000000	000000	000002	099998	000000	099996	000000
000001	000000	000000	000001	000000	000000	099998	000000

ข้อมูลที่ใช้เขียนกราฟในรูป 16 (Standard)

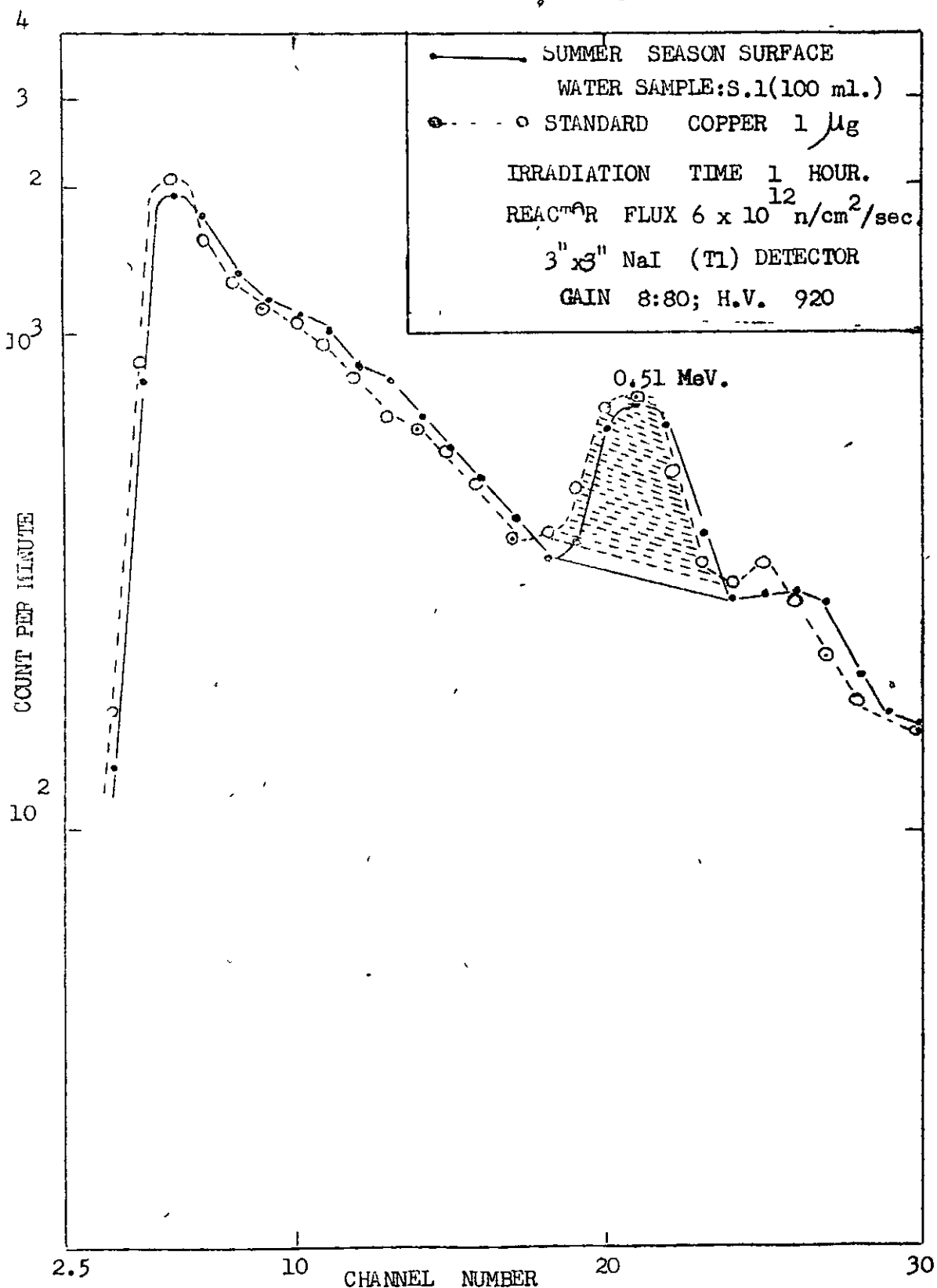
STD. Cu 1 MICROGRAM. IRRADIATION TIME 1 HOUR. GAIN 8 : 80 H.V. 920/16/DEC.
/1974. 2PPT.CuSCN

040000	000000	000000	000171	000861	002068	001551	001298
001150	001061	000942	000803	000672	000671	000599	000503
000387	000398	000483	000700	000715	000462	000342	000314
000349	000296	000227	000183	000172	000164	000159	000167
000143	000151	000141	000129	000114	000127	000134	000117
000117	000100	000089	000075	000090	000082	000097	000093
000123	000130	000093	000094	000072	000049	000027	000041
000034	000024	000027	000029	000025	000025	000021	000015
000016	000016	000010	000009	000011	000028	000017	000027
000013	000018	000022	000014	000013	000011	000019	000011
000007	000010	000014	000009	000017	000020	000010	000010
000013	000012	000010	000010	000006	000006	000002	000004
000005	000001	000001	000001	000001	000001	000001	000002
000001	000001	000001	000001	000001	000000	000000	000001
000000	000001	000001	000001	000001	000000	000000	000000
000001	000000	000001	000000	000000	000001	000002	000000

SUB.

099999	000000	099997	000047	000215	000235	000081	000108
000061	000137	000054	000058	000088	000141	000059	000077
099989	000070	000150	000370	000421	000158	000046	000054
000079	099992	099977	099962	000000	000002	000014	000044
099995	000011	000003	099993	099995	000009	099997	000004
000012	099989	099998	099996	000002	000005	000040	000028
000025	000029	099983	099987	099981	099994	099972	000011
099996	000000	000010	099993	099996	099997	000003	099997
000004	000003	099994	099992	000001	000014	000003	000011
099992	099993	000007	000000	000002	000003	000011	000001
099997	000002	000007	000002	000006	000012	000003	099994
000003	099995	000003	099997	099996	000000	099998	000002
000004	000000	000000	000000	000000	000001	000000	000001
000000	000001	000001	000000	000001	099998	099997	099998
099997	000001	000000	000000	099998	000000	000000	000000

รูป 16 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ของธาตุ Cu^{64}
 ในสารมาตรฐานและสารตัวอย่างน้ำจืดกรอนเบอร์ S. 1



* ข. การคำนวณหาปริมาณธาตุ As ในสารตัวอย่างน้ำหนัก 19

จากน้ำหนักตัวอย่างถูกร่อนเบอร์ S. 19 จำนวน 100 มิลลิลิตร ซึ่งเก็บในสัปดาห์
ที่ 3 ณ จุดเก็บที่ 5 ผลปรากฏว่า

น้ำหนักตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร	หนัก	99.68644 กรัม
น้ำหนักสารมาตรฐาน		0.5 $\mu\text{g.}$
น้ำหนักตะกอน As_2S_3 ในสารตัวอย่าง		0.01370 กรัม
น้ำหนักตะกอน As_2S_3 ในสารมาตรฐาน		0.03490 กรัม

คำนวณหาพื้นที่ใต้ peak (activity) กรุป 17 ประกอบการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ใต้ peak ของ As ในสารตัวอย่าง} &= (000065 + 000092 + \\
 &\quad 000159 + 000241 + 000213 + \\
 &\quad 000146 + 000067) - \\
 &\quad \left[\frac{(65+67) \cdot 7}{2} \right] \\
 &= 983 - 462 \\
 &= 521
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ใต้ peak ของ As ในสารมาตรฐาน} &= (000040 + 000097 + 000146 + \\
 &\quad 000241 + 000207 + 000110 + \\
 &\quad 000080) - \left[\frac{(40+80) \cdot 7}{2} \right] \\
 &= 921 - 420 \\
 &= 501
 \end{aligned}$$

คำนวณหา 100 % yield

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าตามทฤษฎี } \text{As}^{+3} \quad 149.8440 \text{ มิลลิกรัม} &\text{ เกิดเป็น } \text{As}_2\text{S}_3 = 246.0360 \text{ มิลลิกรัม} \\
 \text{ถ้า carrier } \text{As}^{+3} \quad 20 \text{ มิลลิกรัม} &\text{ เกิดเป็น } \text{As}_2\text{S}_3 = \frac{246.0360 \times 20}{149.8440} \text{ มิลลิกรัม} \\
 &= 32.83895 \text{ มิลลิกรัม} \\
 &= 0.03284 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

$$\therefore 100 \% \text{ yield ของ } \text{As}_2\text{S}_3 = 0.03284 \text{ กรัม}$$

กำหนดหา 100 % activity

ในสารมาตรฐาน As_2S_3 0.03490 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak(activity) = 501

$$\begin{aligned} \text{ถ้าสารมาตรฐาน } \text{As}_2\text{S}_3 \text{ 0.03284 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak(activity)} \\ &= \frac{501 \times 0.03284}{0.03490} \\ &= 471.42808 \end{aligned}$$

ในสารตัวอย่างน้ำ As_2S_3 0.01370 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak(activity) = 521

$$\begin{aligned} \text{ถ้าสารตัวอย่างน้ำ 0.03284 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak(activity)} \\ &= \frac{521 \times 0.03284}{0.01370} \\ &= 1248.87880 \end{aligned}$$

จากสูตร

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{กัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{กัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารมาตรฐาน}}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง} &= \frac{1248.87880}{471.42808} \times 0.5 \text{ } \mu\text{g.} \\ &= 1.32457 \text{ } \mu\text{g.} \end{aligned}$$

นํ้ากือสารตัวอย่างน้ำในถุร้อน เบอร์ 19 ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่จุด 5 จำนวน 100 มิลลิลิตร

$$\text{ซึ่งหนัก 99.68644 กรัม มี As} = 1.32457 \text{ } \mu\text{g}$$

$$\begin{aligned} \text{สารตัวอย่างน้ำหนัก 1 กรัม มี} &= \frac{1.32457 \times 1}{99.68644} \text{ } \mu\text{g} \\ &= 0.01329 \text{ } \mu\text{g/g.} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{สารตัวอย่างน้ำในถุร้อนเบอร์ 19 มีปริมาณ As} = 0.01329 \text{ ppm.}$$

ข้อมูลที่ใช้เขียนกราฟในรูป 17 (Standard & Sample)

SURFACE WATER SAMPLE S.19 /27/NOV./1974.IRR. TIME 1 H. GAIN 8:80

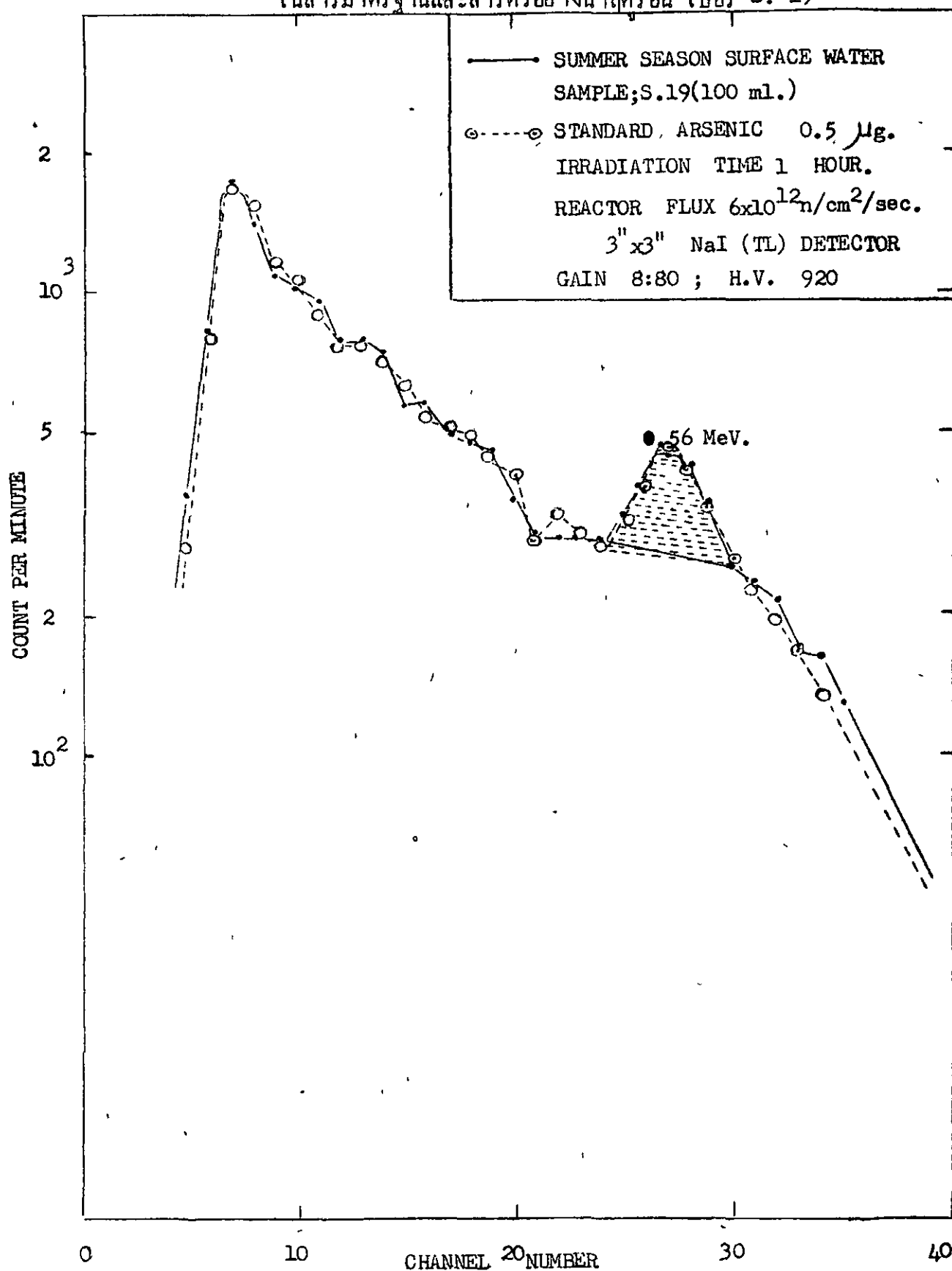
H.V. 920 PPT. As_2S_3

040000	000001	000000	000005	000364	000829	001708	001391
001091	001007	000947	000794	000792	000743	000570	000571
000492	000468	000448	000354	000293	000290	000296	000294
00322	000378	000445	000427	000351	000256	000238	000213
000165	000164	000128	000154	000137	000126	000137	000147
000139	000116	000146	000105	000125	000092	000109	000098
SUB.							
099999	000001	000000	000001	000090	000164	000178	000109
00048	000058	000128	000058	000148	000100	000073	000094
000066	000034	000062	000050	099990	000019	000037	000065
000092	000159	000241	000213	000146	000067	000007	000043
000005	000027	099983	000045	000012	000012	099995	000026
000026	099995	000023	099977	000031	099980	000025	000001

STD. As 0.5 MICROGRAM ./27/NOV./1974.IRR. TIME 1H. GAIN 8:80 H.V.920
PPT. As_2S_3

040000	000000	000000	000005	000279	000800	001657	001503
01140	001028	000893	000786	000795	000708	000634	000535
00514	000494	000445	000408	000289	000332	000300	000280
000328	000375	000461	000428	000340	000267	000225	000198
000169	000134	000135	000135	000132	000119	000113	000125
000123	000108	000125	000116	000105	000095	000108	000088
000108	000091	000090	000072	000075	000078	000067	000064
SUB.							
099999	000000	000000	000004	000010	000096	000096	000156
00113	000103	000092	000094	000093	000078	000115	000055
000059	000088	000050	000100	000019	000077	000051	000040
000097	000146	000241	000207	000110	000080	000014	000009
000013	099992	099990	000021	099987	000006	099985	099985
099994	099992	000022	000024	000011	000002	000028	099989
000001	099981	099997	000001	000009	000011	000004	000000
000004	000011	099984	099981	000001	000006	099990	099996
099994	099991	000005	099993	099997	000002	000001	099997

รูป 17 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ของธาตุ As^{76}
ในสารมาตรฐานและสารตัวอย่างน้ำผิวดิน เบอร์ S. 19



๒. การคำนวณหาปริมาณธาตุ Se ในสารตัวอย่างน้ำถูกร้อนเบอร์ S.1

จากตัวอย่างน้ำถูกร้อน เบอร์ S.1 จำนวน 1,000 มิลลิลิตร ซึ่งเก็บในสลิปแคต

แรก ณ จุดเก็บน้ำที่ 1 ผลปรากฏว่า

น้ำหนักน้ำตัวอย่าง 1,000 มิลลิลิตรหนัก	997.2200	กรัม
น้ำหนักสารมาตรฐาน	10	μg.
น้ำหนักตะกอนโลหะ Se ในสารตัวอย่าง	0.02180	กรัม
น้ำหนักตะกอนโลหะ Se ในสารมาตรฐาน	0.01860	กรัม

การหาพื้นที่ใต้ peak(activity) จากรูป 18 ประกอบการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ใต้ peak ของ Se ในสารตัวอย่าง} &= (000527 + 001116 + 003507 \\
 &\quad + 003010 + 000680 + 000231 \\
 &\quad - \left[\frac{(000527 + 000231) \cdot 6}{2} \right] \\
 &= 9071 - 2274 \\
 &= 6797
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ใต้ peak ของ Se ในสารมาตรฐาน} &= (000377 + 000940 + 002758 \\
 &\quad + 001862 + 000372 + 000165) \\
 &\quad - \left[\frac{(000377 + 000165) \cdot 6}{2} \right] \\
 &= 6474 - 1626 \\
 &= 4848
 \end{aligned}$$

คำนวณหา 100 % yield

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าตามทฤษฎี Se}^{+4} \text{ 78.96 มิลลิกรัม เกิดเป็นโลหะ Se} &= 78.96 \text{ มิลลิกรัม} \\
 \text{ถ้า carrier Se}^{+4} \text{ 20 มิลลิกรัม เกิดเป็นโลหะ Se} &= \frac{78.96 \times 20}{78.96} \text{ มิลลิกรัม} \\
 &= 20 \text{ มิลลิกรัม}
 \end{aligned}$$

$$\therefore 100 \% \text{ yield ของ Se} = 0.02000 \text{ กรัม}$$

คำนวณหา 100 % activity

$$\begin{aligned}
 \text{ในสารมาตรฐาน Se 0.01860 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak(activity) = 4848} \\
 \text{ถ้าสารมาตรฐาน 0.02000 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak(activity) = } &\frac{4848 \times 0.02000}{0.01860} \\
 &= 5212.90320
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ในสารตัวอย่าง Se 0.02180 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak(activity) = 6797} \\
 \text{ถ้าสารตัวอย่าง Se 0.02000 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak(activity) = } &\frac{6797 \times 0.02000}{0.02180} \\
 &= 6235.77980
 \end{aligned}$$

จากสูตร

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{กัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{กัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารมาตรฐาน}}$$

$$\therefore \text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง} = \frac{6235.77980}{5212.90320} \times 10 \mu\text{g}$$

$$= 11.96220 \mu\text{g}$$

น้ำหนักสารตัวอย่างน้ำในฤดูร้อนเบอร์ 1 ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่จุด : จำนวน
 1,000 มิลลิกรัม ซึ่งหนัก 997.22000 กรัม มี Se = 11.96220 μg .

ถ้าสารตัวอย่างหนัก 1 กรัม ก็ = $\frac{11.96220 \times 1}{997.22000} \mu\text{g}$

= 0.011995 μg

= 0.01200 $\mu\text{g/g}$

$\therefore$ สารตัวอย่างน้ำในฤดูร้อนเบอร์ S.1 มีปริมาณ Se = 0.01200 ppm.

ข้อมูลที่ใช้เขียนกราฟในรูป 18 (Sample)

SURFACE WATER SAMPLE. S. 1./16/JAN./1975.IRR.TIME 5 DAYS. DECAY TIME
2 WEEKS.GAIN 8:80 H.V.920.PPT. Se

040000	000000	000000	000081	001006	002577	003821	007840
03678	001491	001960	004232	003663	001255	000741	000996
001120	000661	000390	000328	000296	000292	000320	000295
000249	000247	000184	000175	000164	000159	000153	000148
000138	000145	000122	000125	000124	000131	000125	000139
000093	000076	000054	000076	000071	000089	000092	000111
000134	000120	000069	000058	000048	000034	000030	000041
000035	000036	000033	000022	000025	000015	000012	000013
000015	000015	000020	000019	000009	000018	000012	000016
000012	000018	000013	000009	000011	000004	000007	000012
000014	000011	000016	000017	000013	000012	000008	000006
000001	000004	000006	000000	000000	000001	000000	000001
000001	000000	000001	000000	000002	000001	000001	000002
000001	000000	000002	000001	000000	000002	000001	000000
000002	000000	000000	000001	000000	000001	000000	000000
000000	000001	000000	000002	000000	000000	000000	000000

SUB.

099999	000000	099998	000027	000366	000688	002219	006601
02561	000527	001116	003507	003010	000680	000231	000592
000780	000337	000061	000024	099993	099988	000063	099997
099996	000037	000000	000003	000000	099984	099992	099995
099979	099998	099992	099994	000000	000000	099995	000021
000008	099977	099975	099993	099983	099991	099989	000004
000016	000014	099984	000013	000002	099997	099994	000001
099993	000015	000005	099997	000005	000000	099992	099998
099996	000000	000003	000003	099989	000010	099989	099995
099996	000006	000002	000002	099998	000001	099998	000007
000002	000001	000008	099995	099995	000000	000001	099998
099998	000002	000004	099997	000000	000001	099998	000000
000001	099998	000001	099997	000002	000000	000000	000002
099996	099996	000000	000000	000000	000001	000001	099998
000002	099997	099998	000001	000000	099998	099998	000000
099997	000001	000000	000002	000000	000000	099998	099998

ข้อมูลที่ใช้เขียนกราฟในรูป 18 (Standard)

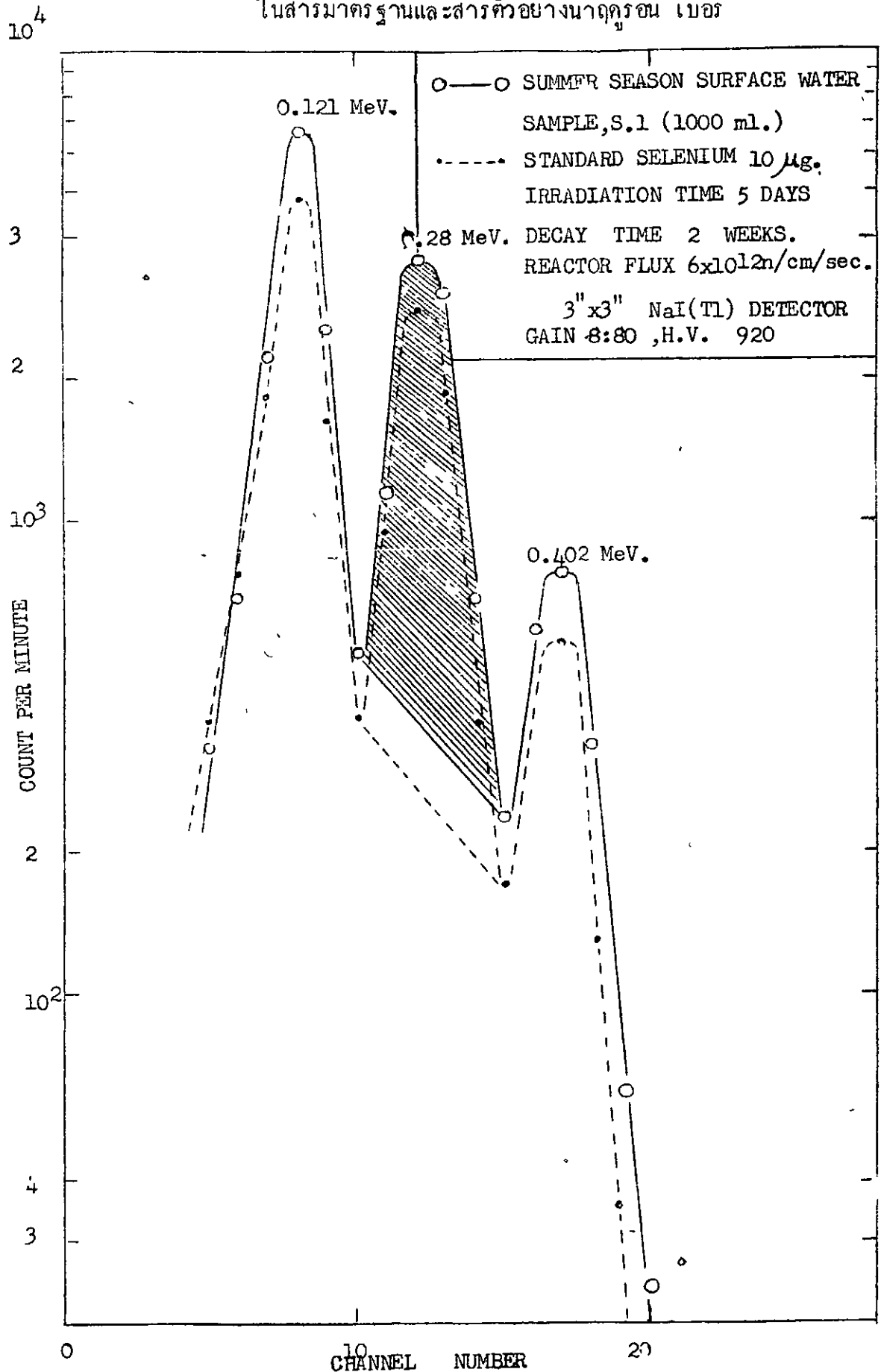
SRD. Se 10 MICROGRAM./16/JAN. /1975.IRR. TIME 5 DAYS. DECAYS TIME
2 WEEKS. GAIN 8:80 H.V. 920, PPT. Se.

040000	000001	000000	000058	000943	002566	003478	006024
002750	001382	001792	003434	002480	000976	000723	000976
000891	000493	000351	000318	000274	000329	000301	000298
000258	000234	000187	000172	000154	000159	000152	000128
000169	000155	000136	000122	000130	000138	000121	000104
000096	000073	000082	000092	000068	000107	000107	000108
000104	000081	000052	000046	000032	000051	000024	000025
000031	000032	000026	000022	000030	000020	000016	000013
000015	000017	000022	000012	000019	000025	000021	000021
000014	000014	000016	000011	000006	000002	000008	000012
000016	000020	000018	000007	000004	000007	000003	000006
000003	000000	000002	000002	000000	000000	000001	000000
000002	000002	000000	000001	000001	000002	000001	000003
000000	000002	000000	000001	000002	000000	000002	000000
000000	000000	000001	000001	000000	000000	000000	000000
000000	000000	000000	000000	000000	000000	000001	000001

SUB.

099999	000001	099998	000023	000373	000773	001834	004818
01636	000377	000940	002758	001862	000372	000165	000541
00541	000130	000037	099983	099974	000030	000018	000040
099986	000013	000007	099997	099987	099988	099988	099975
000036	000001	000000	000008	000007	000009	099979	099968
000009	099980	000002	000023	099994	000018	000004	099989
099989	099983	099958	099968	099971	000003	099996	099989
000003	000006	099990	099994	000011	000003	099998	099998
099996	000006	000010	099992	099998	000003	000009	000002
099991	099995	000001	099996	099997	099994	099994	099998
000009	000010	099997	099991	099992	099995	099993	099994
099998	099995	000000	000000	099997	099996	099998	099998
000002	000002	099997	000001	099997	000001	000001	000002
000000	000000	000000	099998	000000	000000	000001	000000
099998	099998	000001	000001	099998	099997	000000	099997
099998	099998	000000	099998	000000	000000	000000	099998

รูป 18 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ของธาตุ Se^{75}
ในสารมาตรฐานและสารตัวอย่างนาถุรอน เบอร์



ง. การคำนวณหาปริมาณธาตุ Hg ในสารตัวอย่างน้ำตะกอนเบอร์ R.6

จากน้ำตัวอย่างตะกอนเบอร์ R.6 จำนวน 1,000 มิลลิลิตร ซึ่งเก็บในสัปดาห์แรก ณ วันที่ 6 ผลปรากฏว่า

น้ำหนักน้ำตัวอย่าง 1,000 มิลลิลิตรหนัก 995.52600 กรัม

น้ำหนักสารมาตรฐาน 10 μg

น้ำหนักตะกอน HgS ในสารตัวอย่าง 0.01850 กรัม

น้ำหนักตะกอน HgS ในสารมาตรฐาน 0.02080 กรัม

การหาพื้นที่ใต้ peak(activity) กรุป 19 ประกอบการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ใต้ peak ของ Hg ในสารตัวอย่าง} &= (000152 + 000550 + 001295 \\
 &\quad + 001828 + 000933 + 000314) \\
 &\quad - \left[\frac{(000152 + 000314) \cdot 6}{2} \right] \\
 &= 5072 - 1398 \\
 &= 3674
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ใต้ peak ของ Hg ในสารมาตรฐาน} &= (000126 + 000176 + 000825 \\
 &\quad + 001678 + 000707 + 000092) \\
 &\quad - \left[\frac{(000126 + 000092) \cdot 6}{2} \right] \\
 &= 3604 - 654 \\
 &= 2950
 \end{aligned}$$

คำนวณหา 100 % yield

$$\begin{aligned}
 &\text{ถ้าตามทฤษฎี } \text{Hg}^{++} \quad 200.59000 \text{ มิลลิกรัม จะเกิดเป็น HgS} = 232.65400 \text{ มิลลิกรัม} \\
 &\text{ถ้า carrier } \text{Hg}^{++} \quad 20 \text{ มิลลิกรัม จะเกิดเป็น HgS} = \frac{232.65400 \times 20}{200.59000} \text{ มิลลิกรัม} \\
 &= 23.19697 \text{ มิลลิกรัม} \\
 &= 0.02320 \text{ กรัม} \\
 &\therefore 100 \% \text{ yield ของ HgS} = 0.02320 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

คำนวณหา 100 % activity

$$\begin{aligned}
 &\text{ในสารมาตรฐาน HgS } 0.02080 \text{ กรัม มีพื้นที่ใต้ peak(activity) } = 2950 \\
 &\text{ถ้าสารมาตรฐาน HgS } 0.02320 \text{ กรัม มีพื้นที่ใต้ peak} \\
 &\quad \text{(activity)} = \frac{2950 \times 0.02320}{0.02080} \\
 &= 3290.38460 \\
 &\text{ในสารตัวอย่างน้ำ HgS } 0.01850 \text{ กรัม มีพื้นที่ใต้ peak} \\
 &\quad \text{(activity)} = 3674 \\
 &\text{ถ้าสารมาตรฐาน HgS } 0.02320 \text{ กรัม มีพื้นที่ใต้ peak} \\
 &\quad \text{(activity)} = \frac{3674 \times 0.02320}{0.01850} \\
 &= 4607.39450
 \end{aligned}$$

จากสูตร

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{กัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{กัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารมาตรฐาน}}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง} &= \frac{4670.39450 \times 10}{3290.38460} \mu\text{g} \\ &= 14.00260 \mu\text{g} \end{aligned}$$

นั่นคือสารตัวอย่างน้ำในฤดูฝนเบอร์ 6 ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่จุด 6 จำนวน 1,000 มิลลิลิตร ซึ่งหนัก 995.52600 กรัม มี Hg = 14.00260 μg

$$\begin{aligned} \text{ถ้าสารตัวอย่างน้ำหนัก 1 กรัม มี Hg} &= \frac{14.00260 \times 1}{995.52600} \mu\text{g} \\ &= 0.0140655 \mu\text{g} \\ &= 0.01407 \mu\text{g/g.} \end{aligned}$$

$\therefore$ สารตัวอย่างน้ำในฤดูฝนเบอร์ R. 6 มีปริมาณ Hg = 0.01407 ppm.

ข้อมูลที่ใช้เขียนกราฟในรูป 19 (Sample)

SURFACE WATER SAMPLE, R. 6./16/JAN./1975. IRR. TIME 5 DAYS DECAY TIME
2 WEEKS. GAIN 8:80 H.V. 920 PPT. HgS.

010000	0 0000	000000	000013	000992	003117	002757	001396
001191	000869	000772	001477	001990	001076	000465	000205
000140	000152	000148	000151	000109	000118	000117	000105
000088	000075	000074	000071	000090	000088	000074	000060
000052	000040	000039	000044	000051	000052	000057	000055
000041	000036	000028	000039	000034	000034	000041	000035
000031	000022	000018	000012	000007	000012	000004	000008
000005	000013	000005	000007	000004	000002	000005	000003
000006	000002	000005	000002	000005	000004	000004	000005
000001	000008	000001	000002	000003	000003	000002	000001
000004	000003	000004	000003	000001	000003	000002	000001
000002	000000	000000	000000	000001	000001	000000	000000
000000	000001	000000	000000	000001	000000	000000	000001
000000	000001	000001	000001	000001	000001	000000	000000
000000	000000	000002	000000	000001	000000	000000	000000
000000	000000	000000	000000	000000	000001	000000	000000

SUB.

099999	000000	000000	000009	000854	002770	001161	001102
000921	000152	000550	001295	001828	000933	000314	000096
000050	000004	000065	000061	000019	000053	000034	000025
000024	000027	000031	000023	000058	000049	000031	000014
000020	000004	000014	000014	000013	000013	000019	000016
000011	000007	000008	000027	000019	000023	000017	000002
099996	099995	099994	099997	099996	000005	000001	000002
099998	000006	099996	099998	099994	000001	000001	099994
000004	099995	000000	000000	000002	099997	000002	000001
099992	000006	099996	000001	099998	000002	000001	099997
099998	099996	000001	099998	099996	000000	000000	099997
000002	099998	000000	000000	000000	000001	000000	000000
000000	000001	000000	000000	000000	000000	000000	000000
000000	000001	000001	000001	000001	000000	000000	000000
000000	000000	000001	000000	000001	000000	000000	000000
000000	000000	099998	000000	099998	000001	000000	000000

ข้อมูลที่ใช้เขียนกราฟในรูป 19 (Standard)

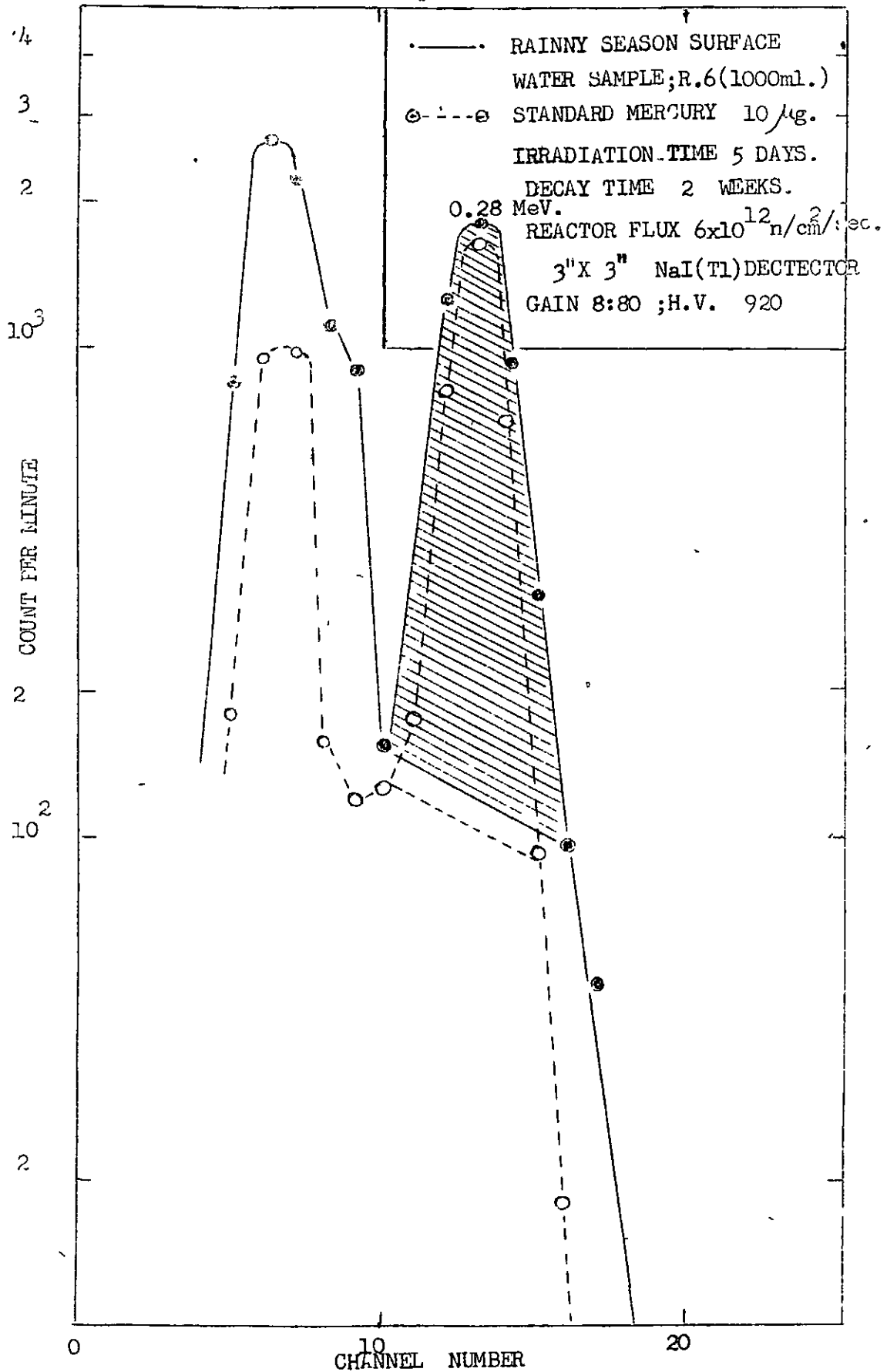
STD. Hg 10 MICROGRAM./16/JAN. 1975. IRR, TIME 5 DAYS. DECAY TIME 2 WEEKS
GAIN 8:80 H.V. 920, PPT. HgS.

010000	000000	000000	000001	000266	001372	001470	000484
000427	000371	000383	001002	001847	000867	000233	000108
000091	0 0081	000056	000085	000085	000084	000070	000050
000054	000060	000057	000049	000044	000036	000038	000042
000039	000043	000037	000026	000026	000039	000031	000021
000036	000030	000020	000020	000025	000029	000029	000029
000024	000023	000023	000019	000008	000012	000009	000001
000009	000009	000009	000004	000005	000005	000003	000004
000004	000002	000003	000007	000005	000006	000006	000005
000002	000004	000006	000003	000004	000005	000002	000003
000005	000003	000002	000004	000002	000003	000001	000004
000002	000001	000000	000000	000000	000001	000000	000000
000001	000000	000000	000003	000001	000000	000001	000000
000000	000000	000001	000000	000000	000000	000001	000000
000000	000000	000000	000000	000000	000000	000001	000000
000000	000000	000000	000000	000000	000000	000001	000000
000000	000000	000000	000000	000000	000000	000001	000000

SUB.

099999	000000	000000	099998	000179	000949	000981	000157
00120	000126	000175	000825	001578	000707	000092	000018
09996	099987	099953	000006	000014	000010	099989	099973
099992	000001	000018	000005	000001	099994	099997	000012
099995	000007	000004	099984	099991	000017	099997	000000
000003	000007	099998	000004	000009	000002	000007	000001
099995	099993	000001	000007	099996	000006	000001	099998
000002	000001	000001	000000	099996	000002	000000	099997
099997	000000	099998	000005	000003	000002	000002	099998
000000	000002	000000	000003	000000	000001	000000	000001
099998	000002	099997	000000	000001	099997	099998	000001
000001	000000	099998	000000	000000	000001	099998	099997
000000	000000	099998	000003	000001	000000	000001	000000
099998	000000	099998	000000	099997	000000	000001	000000
000000	099997	000000	000000	000000	000000	000001	000000
099998	000000	000000	000000	000000	099998	099998	099997

80
 รูป 19 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ของธาตุ Hg^{203} ในสารมาตรฐาน
 และสารตัวอย่างน้ำกุดฉุ่น เบอร์ R. 6



ตาราง 2 แสดงปริมาณธาตุ Hg, As, Cu และ Se ในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ
ซึ่งเก็บตัวอย่างน้ำในฤดูร้อน ในระหว่างเดือนมีนาคม ถึงเมษายน 2517

เบอร์ สารตัวอย่าง	ปริมาณธาตุในสารตัวอย่างน้ำเป็น ppm.			
	Hg	As	Cu	Se
S ₁	0.01054	0.00708	0.01692	0.01200
S ₂	0.02024	0.00936	0.07980	0.01282
S ₃	0.02120	0.00428	0.00838	0.00948
S ₄	0.01805	0.00061	0.02294	0.01490
S ₅	0.00949	0.00061	0.00345	0.01681
S ₆	0.00921	0.00030	0.00167	0.01637
S ₇	0.01563	0.00228	0.01238	0.00814
S ₈	0.01725	0.00375	0.00946	0.00690
S ₉	0.01834	0.00453	0.00428	0.00807
S ₁₀	0.01771	0.00480	0.00339	0.01826
S ₁₁	0.01774	0.00360	0.00454	0.01228
S ₁₂	0.03477	0.00586	0.01438	0.01642
S ₁₃	0.01393	0.00164	0.00351	0.00534
S ₁₄	0.01213	0.00165	0.00045	0.00560
S ₁₅	0.03410	0.00220	0.01834	0.01150
S ₁₆	0.02284	0.00270	0.00544	0.01769
S ₁₇	0.02500	0.00247	0.00111	0.01407
S ₁₈	0.01118	0.00623	0.04721	0.00821
S ₁₉	0.01990	0.01329	0.00528	0.01723
S ₂₀	0.01862	0.00184	0.00105	0.01095
S ₂₁	0.02288	0.02257	0.00990	0.01018

0

ตาราง 3 แสดงปริมาณธาตุ Hg, As, Cu และ Se ในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ
ซึ่งเก็บตัวอย่างน้ำในฤดูฝน ในระหว่างเดือนกันยายน ถึงตุลาคม 2517

เบอร์ สารตัวอย่าง	ปริมาณธาตุในสารตัวอย่างน้ำเป็น ppm.			
	Hg	As	Cu	Se
R ₁	0.02202	0.00476	0.00850	0.01138
R ₂	0.01996	0.00279	0.00142	0.00634
R ₃	0.00275	0.00397	0.00292	0.00734
R ₄	0.03040	0.00093	0.00293	0.01560
R ₅	0.01352	0.00377	0.00205	0.00722
R ₆	0.01407	0.00639	0.00124	0.00673
R ₇	0.02165	0.00653	0.00295	0.00032
R ₈	0.02253	0.00703	0.00581	0.00785
R ₉	0.01214	0.00680	0.00637	0.01112
R ₁₀	0.00818	0.00472	0.00293	0.00834
R ₁₁	0.01325	0.00169	0.00468	0.00697
R ₁₂	0.00967	0.00204	0.00149	0.00877
R ₁₃	0.01917	0.00105	0.00179	0.00629
R ₁₄	0.01311	0.00331	0.00378	0.00425
R ₁₅	0.01965	0.00197	0.00436	0.00928
R ₁₆	0.02335	0.00304	0.00379	0.01755
R ₁₇	0.01135	0.00383	0.01370	0.01489
R ₁₈	0.03350	0.00416	0.00579	0.00896
R ₁₉	0.01541	0.00056	0.00484	0.00488
R ₂₀	0.03089	0.00067	0.00957	0.00564
R ₂₁	0.02612	0.00045	0.00276	0.00407

บทที่ 4

การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ง.)

1. ค่าเฉลี่ย (mean)

- 1.1 หาค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Hg ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน
- 1.2 หาค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Hg ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน
- 1.3 หาค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ As ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน
- 1.4 หาค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ As ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน
- 1.5 หาค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Cu ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน
- 1.6 หาค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Cu ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน
- 1.7 หาค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Se ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน
- 1.8 หาค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Se ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน

โดยใช้สูตร
$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N}$$

เมื่อ $\bar{X}$ แทนค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ (หน่วยเป็น ppm.)

$\sum X$ แทนผลรวมทั้งหมดของปริมาณธาตุ

N แทนจำนวนสารตัวอย่าง

ตาราง 4 แสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Hg, As, Cu และ Se ในสารตัวอย่างน้ำ
ซึ่งเก็บในฤดูร้อน

ธาตุ	$\sum X$	N	$\bar{X}$
Hg	0.39075	21	0.01861
As	0.10170	21	0.00484
Cu	0.25388	21	0.01209
Se	0.24322	21	0.01158

ตาราง 5 แสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Hg, As, Cu และ Se ในสารตัวอย่างน้ำ
ซึ่งเก็บในฤดูฝน

ธาตุ	$\sum X$	N	$\bar{X}$
Hg	0.38040	21	0.01811
As	0.07246	21	0.00345
Cu	0.09367	21	0.00446
Se	0.17379	21	0.00828

2. สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation)

- 2.1 หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Hg ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บใน
ฤดูร้อน กับธาตุ Hg ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน
- 2.2 หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ As ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บใน
ฤดูร้อน กับธาตุ As ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน

- 2.3 หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Cu ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บใน
ถุกร่อน กับธาตุ Cu ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในถุคณ
- 2.4 หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Se ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บใน
ถุกร่อน กับธาตุ Se ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในถุคณ

โดยใช้สูตร

$$r = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2] [N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

เมื่อให้ r แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
 $\sum XY$ แทนผลรวมของผลคูณของปริมาณธาตุทั้งสอง ชนิด
 $\sum X \sum Y$ แทนผลคูณของผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด
 N แทนจำนวนสารตัวอย่าง

ตาราง 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างธาตุ Hg กับ Hg, As กับ As,
Cu กับ Cu และ Se กับ Se ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในถุกร่อน
กับถุคณ

ธาตุ		$\sum XY$	$\sum X \sum Y$	N	r
ถุกรอน	ถุคณ				
Hg	Hg	0.00692	0.14864	21	- 0.14158
As	As	0.00028	0.00737	21	- 0.33333
Cu	Cu	0.00096	0.02378	21	- 0.16032
Se	Se	0.00213	0.04227	21	+ 0.34795

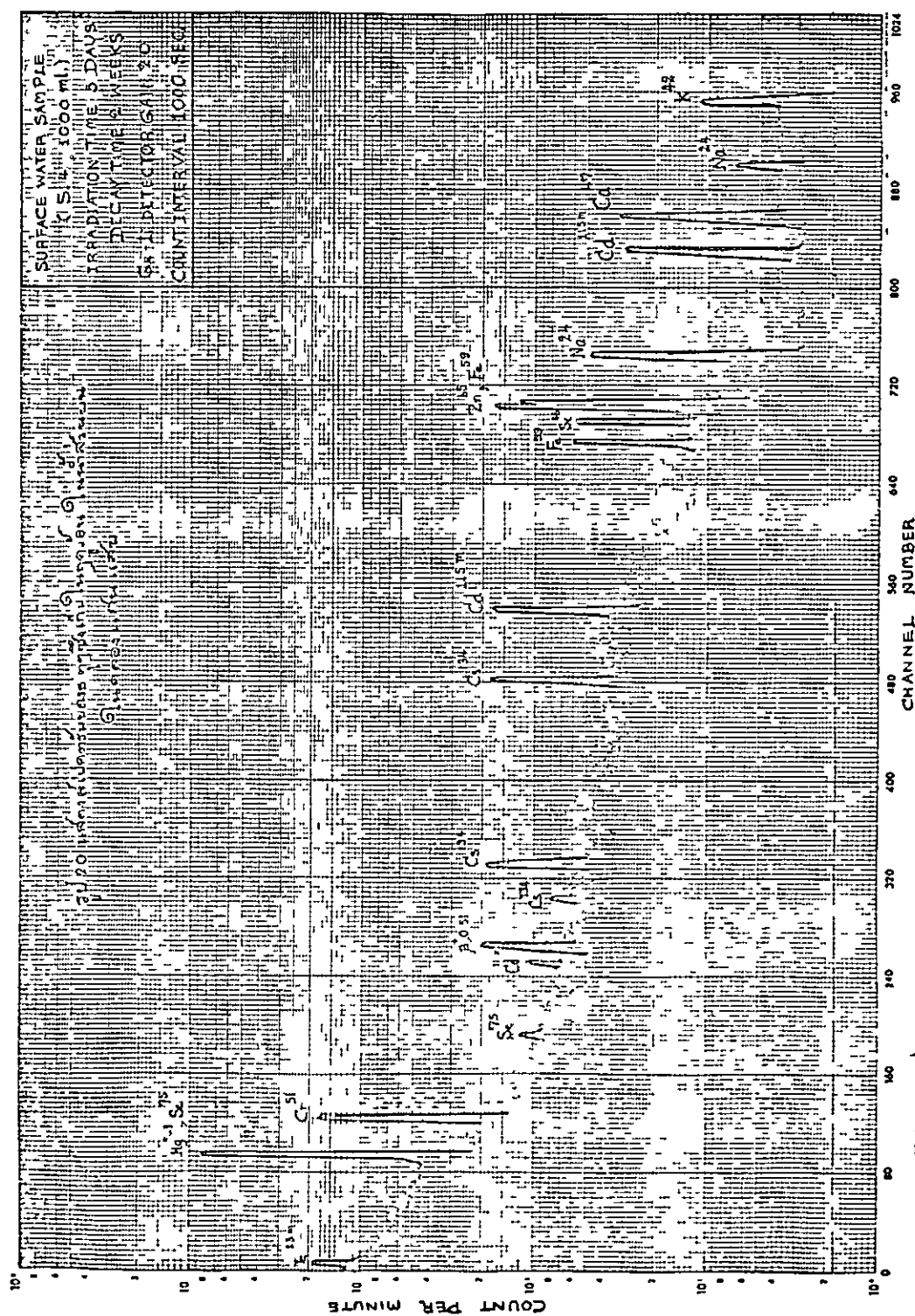
ผลการทดลอง

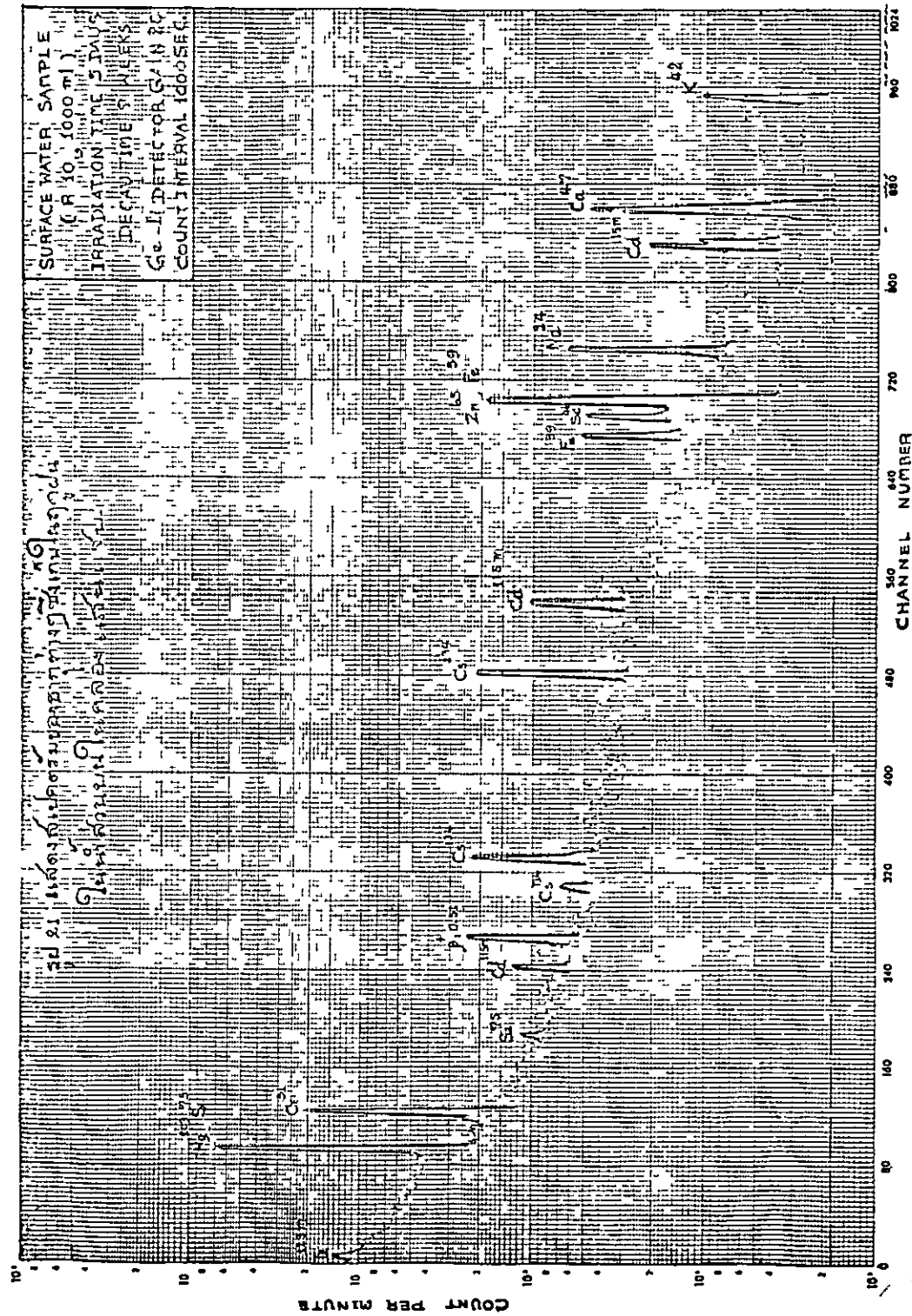
1. จากการทดลองวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นพิษ (poisonous trace elements) ในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน แบบ non-destructive neutron activation analysis ผลปรากฏว่าพบธาตุต่าง ๆ ดังนี้

$\text{Te}^{123\text{m}}$, Hg^{203} , Se^{75} , Cr^{51} , $\text{Cd}^{115\text{m}}$, Cu^{64} , As^{76} , Cs^{134} ,

Fe^{59} , Sc^{46} , Zn^{65} , Na^{24} , Ca^{47} , K^{42} , Mn^{56} , Br^{82} และ Cl^{38}

รูปที่ 20 และ 21 เป็นตัวอย่างแสดงสเปกตรัมของธาตุต่าง ๆ ที่พบในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ ซึ่งเก็บตัวอย่างน้ำในฤดูร้อนและฤดูฝน





2. จากการทดลองวิเคราะห์ธาตุที่เป็นพิษ (Poisonous trace elements) ในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน แบบ Destructive neutron activation analysis ทำการวิเคราะห์หาปริมาณเฉพาะธาตุ Hg, As, Cu และ Se ผลปรากฏดังนี้

2.1	ปริมาณเฉลี่ยของ Hg ในฤดูร้อน	=	0.01861	ppm.
2.2	ปริมาณเฉลี่ยของ Hg ในฤดูฝน	=	0.01811	ppm.
2.3	ปริมาณเฉลี่ยของ As ในฤดูร้อน	=	0.00484	ppm.
2.4	ปริมาณเฉลี่ยของ As ในฤดูฝน	=	0.00345	ppm.
2.5	ปริมาณเฉลี่ยของ Cu ในฤดูร้อน	=	0.01209	ppm.
2.6	ปริมาณเฉลี่ยของ Cu ในฤดูฝน	=	0.00446	ppm.
2.7	ปริมาณเฉลี่ยของ Se ในฤดูร้อน	=	0.01158	ppm.
2.8	ปริมาณเฉลี่ยของ Se ในฤดูฝน	=	0.00828	ppm.

3. จากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างธาตุในฤดูร้อนและฤดูฝน ผลปรากฏดังนี้

3.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Hg ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน กับธาตุ Hg ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝนมีค่าเท่ากับ - 0.14158

3.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ As ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน กับธาตุ As ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน มีค่าเท่ากับ - 0.33333

3.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Cu ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน กับธาตุ Cu ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝนมีค่าเท่ากับ - 0.16032

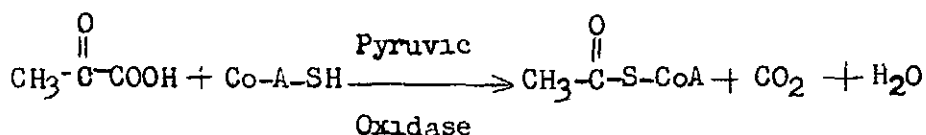
3.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Se ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน กับธาตุ Se ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน มีค่าเท่ากับ + 0.34795

อภิปรายผลการทดลอง

1. จากการทดลองในการวิเคราะห์ธาตุ Hg, As, Cu และ Se ในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ โดยวิธีวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันครั้งนี้ ปริมาณธาตุ Hg, As, Cu และ Se เฉลี่ยในฤดูร้อนจะมีปริมาณมากกว่าฤดูฝน ทั้งนี้อาจเนื่องจากในฤดูร้อน ความเข้มข้นและน้ำเสียมีสีค่าเข้มข้นตลอดคลอง ส่วนฤดูฝนนั้นฝนตกและปริมาณน้ำมีมาก น้ำในฤดูนี้จะค่อนข้างใส กังหันกวาดเข้มข้นจึงน้อยลง จึงทำให้การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในฤดูฝนนี้ได้น้อยลง แต่น่าสังเกตว่าปริมาณธาตุ Hg, Se, As และ Cu ในแต่ละจุด แต่ละอาทิตย์ซึ่งเก็บในแต่ละฤดู จะเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการไหลของกระแส น้ำตลอดจนการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และการทิ้งสิ่งปฏิกูลต่าง ๆ จากชุมชนที่อาศัยอยู่ริมสองฝั่งคลองนี้ก็เป็นได้

ส่วนในฤดูร้อนนั้น พบว่ามีปริมาณธาตุปรอทมากที่สุด รองลงมาคือทองแดง เซเลเนียม และสารหนูมีปริมาณน้อยที่สุด ส่วนในฤดูฝนก็พบว่ามีปริมาณธาตุปรอทมากที่สุด รองลงมาคือ เซเลเนียม ทองแดง และสารหนูมีปริมาณน้อยที่สุด

2. ธาตุที่น่าสนใจและมีปริมาณมากที่สุดของส่วนบนของน้ำในคลองแสนแสบก็คือปรอท ซึ่งฤดูร้อนมีปริมาณเฉลี่ย 0.01861 ppm. ส่วนฤดูฝนมีปริมาณเฉลี่ย 0.01811 ppm. ซึ่งทั้งสองฤดูสำหรับธาตุนี้แตกต่างกันน้อยมาก FAO ได้กำหนดให้อาหารและยามีปรอทได้ไม่เกิน 0.5 ppm. ในน้ำดื่มควรมีไม่เกิน 0.005 ppm. และมีขีดปลอดภัยในการบริโภคปรอทของถนนไม่ควรมีเกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อวัน ดังนั้นจะเห็นว่าน้ำในคลองแสนแสบมีปริมาณธาตุปรอทอยู่ในระดับไม่เป็นอันตราย แต่ธาตุนี้จะซึมเข้าออกน้อย ส่วนมากจะสะสมอยู่ในร่างกายมนุษย์ ธาตุปรอทเป็นพิษต่อร่างกาย เพราะว่าปกติใน Krebs Cycle ซึ่งเป็นวงจรที่อาหารถูกสลาย โดยตรงนั้นเมื่อถึงขั้นหนึ่งที่ pyruvic acid จะเข้าร่วมกับ Coenzyme-A โดยมี enzyme pyruvic oxidase เป็น catalyte ได้ acetyl coenzyme-A ดังปฏิกิริยา



เนื่องจาก Coenzyme-A มีซัลไฟริล (-SH) อยู่ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนของปรอทเกิดเป็น CoA-Hg-SH ซึ่งไม่รวมตัวกับ pyruvic acid ดังนั้น cell จะปรับตัวเองโดยเปลี่ยน acetyl CoA เป็น Lactic acid แทน ทำให้กล้ามเนื้อเมื่อยล้า และถ้าสภาพเป็นกรดมาก ๆ จะทำให้ cell ตายในที่สุด

3. ปริมาณธาตุทองแดงในสารตัวอย่างน้ำในถุกร้อน มีมากกว่าถุเย็น ธาตุทองแดงเป็นธาตุที่มีปริมาณน้อยในร่างกายของมนุษย์ แต่มีความจำเป็นต่อร่างกายมาก ร่างกายขาดไม่ได้ ถ้าขาดจะทำให้เกิดโรค Wilson's disease ซึ่งเป็นโรคที่เกี่ยวกับต่อมไทรอยด์ (pituitary gland) มีการผิดปกติเกิดขึ้น เนื่องจากการใช้ทองแดงของร่างกายถูกรบกวน (62) ทำให้เกิดอาการรวม ตัวเหลือง ตับโต ผลทำให้ Cu ในเลือดลดน้อยลง ในทางตรงข้าม ถ้า Cu เข้าสู่ร่างกายมากเกินไป จะมีอาการคลื่นไส้ อาเจียร ปวดศีรษะ ท้องเดิน ปวดท้อง ตัวเหลือง ทั้งนี้เพราะว่า Cu เป็นโลหะที่ทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารที่มีหมู่ซัลไฟริล (-SH) ซึ่งน้ำย่อยหลายชนิดในร่างกายมีหมู่ -SH อยู่ด้วย ถ้า Cu ไปจับกับหมู่-SH ในน้ำย่อย น้ำย่อยก็จะหมดประสิทธิภาพทันที (63)

4. ปริมาณของธาตุเซเลเนียม เป็นอีกธาตุหนึ่งที่มีปริมาณรองลงมาจากธาตุปรอท (ในถุกร้อน) ในน้ำตัวอย่างในคลองแสนแสบ ธาตุเซเลเนียมจัดว่าเป็น sub-trace level (64) ในร่างกายเช่นกัน แต่เซเลเนียมเป็นส่วนประกอบของน้ำย่อยที่สำคัญทำปฏิกิริยา Oxidation-reduction ที่ก่อให้เกิดการสังเคราะห์กรดอะมิโน Cystine และวิตามิน อี.

จากการศึกษา พบว่าคนที่กินเซเลเนียมเข้าไปจะเกิดอาการไข้ น้ำหนักตัวลด เติบโตช้า มีโลหิตจาง อาการต่อมาคือเกิดการหงิกงอของกระดูกส่วนยาว ๆ เช่นกระดูกแขน กระดูกขา เป็นต้น นอกจากนี้ธาตุเซเลเนียมเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะอยู่ในรูป SeO_3 , SeO_4 และ Se-methionine จากนั้นก็จะเปลี่ยนเป็น dimethylselenide หรือ $\text{Se}(\text{CH}_3)_2$ ซึ่งเป็นพิษในร่างกาย ร่างกายจะขจัดโดยการเปลี่ยน dimethylselenide เป็น trimethyl selenium ion หรือ $[\text{Se}(\text{CH}_3)_3]^+$ แล้วสก็ดออกมาทางปัสสาวะ เมื่ออัตราการเกิด dimethylselenide เพิ่มขึ้น อัตราการเปลี่ยนเป็น trimethylselenium ion ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย (14) นับเป็นกลไกที่สำคัญในการขจัดพิษของธาตุเซเลเนียมในร่างกาย

5. ปริมาณธาตุที่มีน้อยที่สุดในน้ำคลองแสนแสบก็คือธาตุอาร์เซนิก หรือสารหนู ซึ่งมีปริมาณเฉลี่ย 0.00484 ppm. (ในฤดูร้อน) และมีปริมาณเฉลี่ย 0.00345 ppm. (ในฤดูฝน) ธาตุอาร์เซนิกนี้ถ้าได้รับปริมาณมาก ๆ จะถึงตายทันที และธาตุอาร์เซนิกนี้ถ้าได้รับปริมาณน้อย ๆ จะเก็บสะสมในร่างกาย ขับถ่ายออกน้อย เพื่อสะสมมาก ๆ จะทำให้เกิดเป็นโรคมิน As ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิดด้วยกันคือ

5.1 ชนิดพิษเฉียบพลัน ส่วนใหญ่เกิดจากการกินยาฆ่าแมลง มีอาการคอแห้ง กลืนได้ อาเจียร ปวดท้อง ท้องเดินอย่างรุนแรง อุจจาระมีลักษณะคล้ายคนเป็นอหิวาตกโรค อาการต่อมาคือผู้ป่วยจะช็อคและตายอย่างรวดเร็ว แรงดันเลือดลดลง บัสสาวะเป็นไขขาว ตัวเย็น ปากเมื่อยตามมือและเท้า ปวดศีรษะและอ่อนเพลีย

5.2 ชนิดเรื้อรัง ส่วนใหญ่เกิดแก่ผู้ที่รับประทานยาไทย ยาจีน และผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับยาฆ่าแมลง อาการที่ปรากฏคือ อ่อนเพลีย ปวดท้อง ท้องเดินและผุกสลับกัน บัสสาวะมีไขขาว เปลือกตาล่างบวม ผอมลง และมีจุดสีเกิดขึ้นตามผิวหนัง

6. พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ปริมาณธาตุ Hg ในฤดูร้อนและฤดูฝน ปริมาณธาตุ As ในฤดูร้อนและฤดูฝน และปริมาณธาตุ Cu ในฤดูร้อนและฤดูฝน มีค่าเป็น - 0.14, - 0.33 และ - 0.16 ตามลำดับ ที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปริมาณธาตุต่าง ๆ ออกมาเป็นลบ ถือว่ามีสหสัมพันธ์เหมือนกัน แต่เป็นความสัมพันธ์กลับ (Inverse relationship) (65) หมายความว่าปริมาณธาตุในฤดูร้อนมาก ปริมาณธาตุในฤดูฝนจะน้อย ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปริมาณธาตุเซเลเนียมมีค่าเป็น + 0.34 ที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเป็นบวก ถือว่าข้อมูลสัมพันธ์กันโดยตรง (Direct relationship)

อย่างไรก็ตาม ปริมาณธาตุต่าง ๆ ในฤดูร้อนและฤดูฝนแต่ละจุดก็ไม่ได้มีความสัมพันธ์กัน เพราะว่ามีบางจุดในฤดูฝนมีปริมาณธาตุนั้นมากกว่าฤดูร้อน และบางจุดฤดูร้อนมากกว่าฤดูฝน ทั้งนี้ต้องขึ้นกับเวลาการเก็บตัวอย่างน้ำ การไหลของกระแสน้ำ ตลอดจนการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และสิ่งปฏิกูลต่าง ๆ แต่ค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุหนึ่ง ๆ นั้น ในฤดูร้อนมากกว่าฤดูฝน

ข้อผิดพลาดของการทดลอง

ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชัน ซึ่งอยู่ในขอบเขต ± 10 เปอร์เซ็นต์ (54) อันเนื่องมาจากสาเหตุต่าง ๆ ดังนี้

1. ความผิดพลาดเนื่องจากการชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน รวมทั้งการชั่งหา yield ในการวิเคราะห์แบบ destructive method ซึ่งถือว่าเป็น personal error ต้องใช้ความละเอียดของแต่ละคนในการชั่ง
2. ความผิดพลาดอาจเกิดจากการนับรังสี เรียกว่า statistical error ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีเป็นแบบ Random Phenomena ซึ่งมีค่า standard deviation เกือบเท่ากับรากที่สองของค่าเฉลี่ย ข้อผิดพลาดนี้เป็นข้อที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่จะลดน้อยลงเมื่อธาตุที่นำมาวัดมี activity ตั้งแต่ 100 cpm. ขึ้นไป
3. ความผิดพลาดเนื่องจาก flux distribution ค่าความผิดพลาดนี้อาจลดน้อยลงได้ถ้าใช้ปริมาณของสารตัวอย่างน้อย ๆ หรือไม่ก็อ่านรังสีสารตัวอย่างอื่น ๆ และสารมาตรฐานที่ตำแหน่งเดิม
4. ความผิดพลาดเนื่องจาก long-lived radioisotopes ที่ตกค้างอยู่ภายในห้องทดลอง การเตรียมสารตัวอย่าง การชั่งน้ำหนัก การบรรจุสารตัวอย่างจะต้องระมัดระวังการเปราะเปื้อน เนื่องจากเหตุนี้ และหลังการทดลองทุกครั้ง ส่วนที่เป็นกากกัมมันตรังสีจะต้องนำไปทิ้งในถังซัดกากกัมมันตรังสี มิฉะนั้นอาจจะไปเปราะเปื้อนการทดลองอื่น ๆ ได้
5. ความผิดพลาดเนื่องจาก Self-shielding ของสารตัวอย่าง โดยเฉพาะธาตุที่มี neutron absorption cross-section มาก ๆ ความเข้มของนิวตรอนที่กึ่งกลางสารตัวอย่างอาจมีก่าน้อยกว่าบริเวณรอบ ๆ กรณีที่สารมาตรฐานมีขนาดและรูปร่างไม่เหมือนกับสารตัวอย่าง แต่มีค่าความเข้มและการกระจายของธาตุเหมือนกัน ค่าความเข้มของนิวตรอนที่เปลี่ยนแปลงนี้ย่อมไม่ทำให้ผลการเปรียบเทียบผิดพลาดไป และการใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อย ๆ ก็จะลดความผิดพลาดนี้ลงได้ ส่วนสารมาตรฐานจะมีความผิดพลาดเนื่องจาก self-shielding ถ้ามีปริมาณมากกว่าหนึ่งมิลลิกรัม

6. ความผิดพลาดเนื่องจากปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์อื่น ๆ มารบกวน เช่นอาจมีปฏิกิริยา (n,p) และ (n,α) เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์โดยใช้ปฏิกิริยา (n,γ) ทั้งนี้เนื่องจากใน reactor มี fast neutron อยู่ส่วนหนึ่งและในสารตัวอย่างมีธาตุที่มีค่า fast neutron cross-section มาก แต่ความผิดพลาดนี้ไม่ค่อยพบในการทดลองเกี่ยวกับสารตัวอย่างทางชีววิทยา

บทย่อ สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า

การศึกษาค้นคว้านี้มีความมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นพิษ (Poisonous trace elements) เฉพาะในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ โดยใช้วิธีทางนิวเคลียร์ที่เรียกว่าวิธีวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน

สารตัวอย่าง

สารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ เก็บตัวอย่างน้ำในคลองแสนแสบ กรุงเทพมหานคร จำนวน 42 ตัวอย่างด้วยกัน คือในฤดูร้อน 21 ตัวอย่าง และในฤดูฝน 21 ตัวอย่าง

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้า

ในการวิเคราะห์ใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย - 1 สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ถนนวิภาวดี บางเขน กรุงเทพมหานคร เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน และใช้ Multichannel Gamma Spectrometer; Ge (Li) และ NaI (Tl) detector เป็นเครื่องวัดกัมมันตภาพรังสี

วิธีดำเนินการ

1. นำสารตัวอย่างน้ำในคลองแสนแสบมา 100 มิลลิลิตร และ 1,000 มิลลิลิตร มา Concentrate แล้วนำไปอบรังสีนิวตรอนในระยะเวลาต่าง ๆ กัน และปล่อยให้สลายตัว (decay) ในระยะเวลาต่าง ๆ กัน เพื่อศึกษาว่าในสารตัวอย่างน้ำ มีธาตุที่เป็นพิษอะไรอยู่บ้าง
2. นำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานมาอบรังสีนิวตรอน แล้วแยกธาตุในสารตัวอย่าง ให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีตกตะกอน ต่อจากนั้นวัดกัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารตัวอย่างเทียบกับสารมาตรฐาน ตรวจแก้กัมมันตภาพรังสีของธาตุให้เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ activity โดยเทียบจากเปอร์เซ็นต์ yield แล้วคำนวณหาปริมาณธาตุในสารตัวอย่างจากสูตร

$$\frac{\text{ปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{ปริมาณธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{กัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{กัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารมาตรฐาน}}$$

(รูป 14 - 15)

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลโดยหาค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Hg, As, Cu และ Se ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในถกूरून และถกူฝน รวมทั้งคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุที่วิเคราะห์ระหว่างเก็บตัวอย่างในถกूरून และถกူฝน ในธาตุเดียวกันว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่าไร เพื่อไปใช้ในการแปลผลการทดลอง

ผลการศึกษาค้นคว้า

1. จากการทดลองวิเคราะห์โดยวิธี Non-destructive neutron activation analysis ผลปรากฏว่า ในสารตัวอย่างในถกูงแสนแสบมีธาตุที่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์หลายธาตุ แต่ธาตุที่สำคัญและนำมาศึกษาหาปริมาณแบบ Destructive neutron activation analysis คือธาตุ Hg, As, Cu และ Se เท่านั้น

2. จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าในสารตัวอย่างน้ำถกูงแสนแสบมีปริมาณปรอทเฉลี่ย 0.01861 ppm. (ในถกूरून) และ 0.01811 ppm. (ในถกူฝน) มีปริมาณธาตุสารหนูเฉลี่ย 0.00484 ppm. (ในถกूरून) และ 0.00345 ppm. (ในถกူฝน) มีปริมาณธาตุทองแดงเฉลี่ย 0.01209 ppm. (ในถกूरून) และ 0.00446 ppm. (ในถกူฝน) และมีปริมาณธาตุเซเลเนียมเฉลี่ย 0.01158 ppm. (ในถกूरून) และ 0.00828 ppm. (ในถกူฝน)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Hg ในถกूरूनกับถกူฝนมีค่าเท่ากับ - 0.14158 ของ As ในถกूरूनกับถกူฝนมีค่าเท่ากับ - 0.33333 ของ Cu ในถกूरूनกับถกူฝนมีค่าเท่ากับ - 0.16032 และของ Se ในถกूरूनกับถกူฝนมีค่าเท่ากับ + 0.34795

3. ปริมาณธาตุ Hg, As, Cu และ Se แต่ละธาตุแต่ละอาทิตย์ และแต่ละจุดในการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ ผลปรากฏว่ามีปริมาณเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ อาจเนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้า และการปล่อยน้ำเสียลงสู่คลองแสนแสบก็เป็นได้ ในฤดูร้อนกับฤดูฝนของธาตุ Hg, As และ Cu มีความสัมพันธ์กลับ เรียก Inverse relationship เพราะค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ออกมาเป็นลบ ส่วน Se ออกมาเป็นบวก ดังนั้นเป็นแบบ Direct relationship.

ข้อเสนอแนะ

1. ในการทำการวิเคราะห์สารตัวอย่างน้ำในคลองแสนแสบโดยวิธีวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันครั้งต่อไป ควรเก็บสารตัวอย่างน้ำส่วนกันกลองมาวิเคราะห์ เพื่อเปรียบเทียบกับส่วนบนของน้ำว่ามีปริมาณของธาตุแตกต่างกันมากน้อยเท่าไร หรือมีความสัมพันธ์กันอย่างไร นอกจากนี้ควรทำการศึกษาทั้ง 3 ธาตุ คือ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว ตลอดจนการเก็บตัวอย่างน้ำนั้น ควรเก็บระยะเวลาให้ห่างออกไป เช่น เป็นเดือนหนึ่งเก็บทีหนึ่ง เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของน้ำเป็นต้น
2. ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่าง ๆ ในน้ำเสียนั้น ไม่ควรทำการ centrifuge การปล่อยให้น้ำตกตะกอนตามธรรมชาติ แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในตะกอนด้วย
3. ในการทำการวิเคราะห์แบบ Non-destructive neutron activation เพื่อหาว่ามีธาตุอะไรอยู่บ้างนั้น ส่วนมากธาตุที่มีปริมาณมาก ๆ เช่น Na, K, Br, Cl และอื่น ๆ จะรบกวน peak energy ของธาตุที่ศึกษา ดังนั้นอาจทำให้ peak energy ของธาตุที่เราศึกษามองไม่เห็น เช่น ถ้ามี Na มาก peak energy ของ ^{24}Na จะมารบกวน เราก็สามารถแก้ไขได้โดยนำสารตัวอย่างหลังจากอาบรังสีแล้วมากรองด้วย HAP. (Hydrated antimony pentoxide) ปริมาณธาตุ ^{24}Na จะลดลง ทำให้มองเห็น peak energy ของธาตุที่ศึกษาได้ ถึงอย่างไรก็ตาม การกรองด้วย HAP. นั้น เราก็ไม่แน่ใจว่า มี Trace elements อะไรบ้างที่ถูก absorbed โดย HAP. หรือธาตุบางธาตุอาจติดกระดาษกรองได้ ดังนั้นควรใช้วิธี Destructive neutron activation analysis เพราะอาศัยการแยกธาตุที่ศึกษาแต่ละธาตุออกมาก่อนด้วยวิธีการทางเคมี ซึ่งปราศจากการรบกวนจากธาตุอื่น ๆ

4. การทำปริมาณวิเคราะห์นั้น มีสิ่งที่จะต้องคำนึง เช่น การเลือกสารมาตรฐาน จะต้องไม่มีส่วนผสมอื่น ๆ มารบกวนธาตุที่กำลังศึกษา ส่วนมากนิยมใช้ special pure grade การเตรียมสารมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบจะต้องมีสถานะ (physical state) เหมือนกับสารตัวอย่าง ในกรณีที่จะต้องเตรียมสารละลายมาตรฐาน reagent ต่าง ๆ ที่ใช้ จะต้องไม่มีส่วนผสมมารบกวนธาตุที่กำลังศึกษา สารมาตรฐานจะต้องมีความเข้มข้นใกล้เคียงกับความเข้มข้นของธาตุที่วิเคราะห์ในสารตัวอย่างให้มากที่สุดเพื่อให้ค่าปริมาณรังสีที่วัดได้มีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก เป็นการป้องกันความผิดพลาดทางสถิติที่จะเกิดขึ้น นอกจากนี้การนำสารมาตรฐานเข้าอบรังสีพร้อมกับสารตัวอย่างที่ต้องการศึกษา จะต้องวางตำแหน่งของสารมาตรฐานและสารตัวอย่างในภาชนะที่จะนำเข้าอบรังสีให้อยู่ระดับเดียวกัน จะทำให้ได้รับนิวตรอนฟลักซ์เท่ากัน และการวัดรังสีของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะต้องมี geometry และ instrumental condition เหมือนกันทุกประการ

5. Trace elements ในน้ำที่สำคัญที่น่าสนใจทำให้เกิด environmental pollution เช่น Cd, As, Sn และ Cr (28) เป็นต้น ธาตุที่ควรศึกษาอีกธาตุ ก็คือ Cd เพราะธาตุนี้มีใน Kidneys และ Liver และมีประมาณ 2 - 3 ppm. ใน liver ของคนปกติ (61) และถ้า Cd มีปริมาณมากเกินไป จะทำให้เกิด toxic properties และ human hypertension นอกจากนี้ cadmium metabolism ก็น่าสนใจ และ Cd สามารถ interaction กับ Zn, Cu และ โลหะอื่น ๆ ที่เรา intakes เข้าไปอีกด้วย แต่ mechanism เรายังไม่ค่อยทราบแน่ชัดนัก

• บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- (1) Klein, L., River Pollution, Vol. III, Control Butterworth & Co., London, 1966.
- (2) Young, R. S., Industrial Inorganic Analysis, London, 1953.
- (3) เสริมพล รัตสุข, ดร., "น้ำเน่าในนครหลวง" วิทยาศาสตร์สัมพันธ์ครั้งที่ 7 ณ โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย, 2517
- (4) สุรัช นิมิตรวัณน์ "พิษของปรอทในสิ่งแวดล้อม" วิทยาศาสตร์ 25(11) : 739 - 742 พ.ย. 2514.
- (5) Tkachuk, Russel and Kuzina, F.D. "Mercury level in wheat and other cereals, oilseed and biological samples" J. of Sci. Ed. Agric. 23(10) : 1183-1195, Oct., 1972.
- (6) ชุติมา ภัสสรากุล "พิษของปรอทและการหาปริมาณ" วิทยาศาสตร์ 26(10): 49-50 ตุลาคม 2515.
- (7) Bidstrup, Sesley P., Toxicity of Mercury and its compounds, Elsevier Publishing Co., London, 1964. p. 112.
- (8) Jones, H. R., Mercury Pollution Control, Noyes data Corporation, New Jersey, U.S.A., 1971, p. 251.
- (9) Aaronson, Terri, "Mercury in the environment" Environment, 13:16, 1971.
- (10) Westoo, Gunnel, "Methyl mercury as percentage of total mercury in fish and viscera of salmon and Sea Trout of various ages" Science, 181 (4099) : 567-568, Aug.; 1973.
- (11) Yannai, Shmuel and Saltzman, Rachel, "Elimination of mercury from fish" J. Sci. Ed. Agric., 24(2) : 157-160, Feb, 1973.
- (12) Plumb, Robert C. and Strong, Lawrence Fo, "Mercury Poisoning" J. Chem. Ed. 49 : 28, 1972.
- (13) Kellershohn, C., Comer, D. and Poec, C. Le., "Determination of the mercury content of human blood by activation analysis," J. Lab. & Clin. Med. 66(1) : 168-176, 1965.
- (14) Parizek, J., "Toxicological studies involving trace elements" Nuclear Activation Technique in The Life-Science, IAEA, Vienna, 1972.

- (15) Cantarow, A., Schepartz, B., Biochemistry, W. B. Saunders Company, London, 1967.
- (16) Klein, David, H., "Some general and analytical aspects of environmental mercury contamination" J. Chem. Ed., 49(1) : 7-10 Jan., 1972.
- (17) Scollmann, T., A manual of Pharmacology, 8th edition, W.B. Saunders, Philadelphia, 1957, pp. 1337.
- (18) Cantarow, A., & Trumper, M., Lead Poisoning, Williams & Wilkins Company, 1944.
- (19) สัจจิรา นิมนานิตย์, พ.ญ., สุนีย์ จันทระอัมพร, พ.ญ., "ตะกั่วเป็นพิษ" รายงานวิชาการ โรงพยาบาลหญิงและเด็ก, 2505ง
- (20) United States Atomic Energy Commission, Guide to Activation Analysis, D. Van Nostrand Company, Inc., New Jersey, 1964, pp. 133-141.
- ✓ (21) Blanchard, R. L., Seddicotte, G. W., Moeller, D. W., "Neutron activation analysis of drinking water," Second United Nations, International Conference On the Peaceful Uses Of Atomic Energy. 28 : 511-516, 1958.
- ✓ (22) Bate, L. C., Wellwart, Y., Stokely, J. R., "A rapid chemical separation for radiomanganese" OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. Operated by union carbide corporation for the U.S. atomic energy commission, ORNL-TM-438, 64 : December 6, 1962.
- (23) Schutz, Donal F., and Turekian, Karl K., "Geographical and vertical distribution of several trace elements in sea water using neutron activation analysis" Chemical Abstracts, 62 : 15901, June 1965.
- ✓ (24) Nakasa H., Ohno H.; "Application of thermal-neutron activation analysis of dection of trace elements in the air, snow and natural water", Abstracts of Papers, The 8th Japan conference on radioisotopes; November 13-16, 1967, pp. 74-75.
- (25) Høgdahl, Ove T., and others, "Neutron activation analysis of Lanthanide Elements in Sea Water" Trace Inorganic in Water, 1967 pp. 308.
- (26) Japan Atomic Energy Research Institute, Nuclear Science Abstracts of Japan. 8(1) : 13, January, 1969.
- (27) Kawakami Hiroyasu, "Determination of microgram amounts of mercury in hot spring water by neutron activation analysis" Nuclear Science Abstracts of Japan, Japan atomic energy research institute, 8(5) : 248, September, 1969.
- (28) Tetsuo Mamuro, and others, "Activation Analysis of River Water" Annual Report of the radiation Center of Osaka Prefecture, 10 : 21-23, 1969.

- (29) Tetsuo Mamuro, and others, "Activation Analysis of Polluted River Water" Annual Report of the Radiation Center of Osaka Prefecture, 11 14-22, December 25, 1970
- × (30) Surinder K. Bhagat, and others, "Trace element analysis of environmental samples by neutron activation method" Journal Water Pollution Control, Washington D.C., 43(12) · 2414-2423, 1971.
- (31) Becknell, D. E., and others, "Use of anion exchange resin-loaded paper in the determination of trace mercury in water by neutron activation analysis" Analytical Chemistry 43(10) · 1230-1233, August, 1971.
- × (32) Fujinaga, T., and others, "Radioactivation analysis of aluminium, vanadium, copper, molybdenum, zinc and uranium in natural water samples using organic coprecipitants," Journal of Radioanalytical Chemistry, 13(2) : 301-311, February, 1973.
- (33) McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, McGraw-Hill Book Company, 1 · 69, 1971.
- (34) เอกสารสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, โรเนียว, 10 หน้า.
- (35) Lapp, R. E., Andrews, H. L., and Harward, L., Nuclear Radiation Physics, Prentice-Hall Inc. 1964, 532 pp.
- × (36) ฤทธิรงค์ กรฤททอง, การวิเคราะห์ธาตุบางชนิดในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์โดยวิธี DESTRUCTIVE NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS ปรินต์งานพิมพ์ กศ.ม. 2517.
- × (37) Lyon, Jr., William, S., Guide to Activation Analysis, D. Van Nostrand Co., Inc., New York, 1964, pp. 1-3.
- √ (38) Willard, H. H., Instrumental Method of Analysis, Van Nostrand, 1965, 784 pp.
- (39) อนงต์ นิลอมล, ม.ล., การวิเคราะห์แบบแอคติเวชัน, โรเนียว, 8 หน้า.
- ~~(40) Lenihan, J., and Thomson, S. J., Activation Analysis, Academic Press, London, 1965 211 pp.~~
- (41) Moeller, T.; Inorganic Chemistry, John Wiley and sons. Inc., New York, 1969, pp 70-74.
- (42) Litter, D. J., and Raffle, J. F., An Introduction to Reactor Physics, McGraw-Hill Book, New York, 1955, pp. 54.

- (43) Bowen, H.J.M., and Gibbons, D., Radioactivation Analysis, Oxford at the Clarendon Press, London, 1963, 295 pp.
- (44) ชุมพล พงษ์สุวรรณ, การวิเคราะห์ธาตุแมงกานีสและสังกะสีในอาหารไทยโดยวิธีทางนิวเคลียร์
ปริญญานิพนธ์ กศ.ม. วิทยาลัยวิชาการศึกษา ประสานมิตร, 2514, หน้า 11-14.
- (45) Lyon, Jr., William, S., Guide to Activation Analysis, D. Van Nostrand Co., Inc., New York, 1964, pp. 8-9.
- (46) เอกสารสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, โรเนียว, 78 หน้า.
- (47) ✓ ศักดิ์ ทรรพพันธ์, ดร. "เคมีรังสีประยุกต์" วิทยาศาสตร์, 11 : 935, 2511.
- (48) ก. หน้า 928 - 938.
- (49) กฤษณา ชูจิตา, ดร. "อัตราการสลายของธาตุกัมมันตรังสี" หลักเคมีทั่วไป มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์, 2517, หน้า 552.
- (50) Guinn, V. P., "Non-biological applications of neutron activation analysis in Forensic studies" Method of Forensic Science, 3 : 47-68, John Wiley & Sons, 1964.
- (51) อนงค์ นิลอบล, ม.ล., การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันและการแยกตัวกรรมวิธี
เคมีรังสี ตอน 2, เอกสารสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, โรเนียว, 12 หน้า.
- (52) Lenihan, J., "Radioactivation Analysis in Biochemistry and Medicine" Radioactivation Analysis, Butterworths, London, pp. 81-92, 1960.
- (53) Nixon, G.S., "Activation analysis in dental medicine" Activation Analysis, Academic Press, New York, pp. 133-137, 1965.
- (54) ประคิษฐ์ มีสุข, การวิเคราะห์ธาตุเซเลเนียม ทองแดง และอาร์เซนิกในเลือดโดยวิธี
นิวตรอนแอคติเวชัน, ปริญญานิพนธ์ กศ.ม. วิทยาลัยวิชาการศึกษา, 2517, หน้า 22.
- (55) Price, William J., Nuclear Radiation Detection, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1958, 382 pp.

- (56) สมเจตน์ แดงเที่ยง, อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้นเกี่ยวกับการวัดรังสี เอกสารสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (โรเนียว) หน้า 4.
- (57) International Atomic Energy Agency Joint Commission On Applied Radioactivity (I.C.S.U.), Radioactivation Analysis; Proceedings of the radioactivation analysis symposium held in Vienna, Austria, June 1959, London, 1960, p. 67.
- (58) Heath, R. L., Scintillation Spectrometry, Gamma-Ray Spectrum Catalogue, 2nd edition, Volume 2, Petroleum Company, U.S. Atomic Energy Commission, August, 1964.
- (59) Cuninghame, J. G., Radiochemistry of Arsenic, United States Atomic Energy Commission, U.S.A., 1965, p. 9.
- (60) Lederer, C.M., Hollander, J. M. and Perlman, I., Table of Isotopes, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1967, pp. 210-216.
- (61) Underwood, E. J., Trace Elements in Human And Animal Nutrition, 3rd edition, Academic Press, New York, London, 1971, pp. 267-278.
- (62) ออศ กฤดากร, "วิทยาศาสตร์ทันตกรรม" วิทยาศาสตร์, 10 : 33 - 42, 2516.
- (63) วิจิตร กงพล, "ความสำคัญของทองแดงในร่างกาย" วิทยาศาสตร์, 11 . 733-737, 2516.
- (64) Gunn, V. P., "The current status of neutron activation analysis applications", Modern trends in Activation Analysis, 2:679-697, 1969.
- (65) ลวน สายยศ และอังคณา ตันศิริตานนท์, สถิติวิทยาทางการศึกษา, ไทยวัฒนาพานิช, พระนคร, 2515, หน้า 168.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

STANDARD CURVE

โดยใช้เครื่องวัดรังสี Ge(Li) และ NaI(Tl)

ข้อมูล 20 พิภพเฉพาะ peak

SURFACE WATER SAMPLE, S.4 1000 ML. IRRADIATION TIME 5 DAYS. DECAY TIME 2 WEEKS. GAIN 20.

CONVERSION GAIN 1024./22./DEC./1974./CONTACT TIME 1000 SEC.

0	1000	1211	1165	1183	1160	1220	1517	1761	1590	1139
10	1009	949	914	870	944	909	834	842	812	805
90	567	860	2819	6641	7418	3611	888	211	212	197
100	217	207	211	213	201	201	191	201	212	197
120	231	413	1076	1634	1296	528	196	140	141	149
130	155	132	131	142	135	133	153	133	154	122
180	86	97	117	100	91	87	86	98	108	114
190	107	96	93	91	86	106	106	89	87	73
240	73	76	69	65	76	79	89	64	92	82
250	100	98	77	76	74	48	64	76	78	94
260	128	140	197	157	115	81	59	64	35	64
290	73	56	66	56	48	63	51	78	70	71
320	59	63	49	57	52	83	180	178	141	79
330	89	54	73	68	50	51	49	46	56	62
470	49	37	37	38	55	66	140	172	120	51
480	35	38	37	30	38	36	33	38	37	35
530	53	51	115	168	161	94	51	26	39	41
540	38	31	32	44	28	45	45	34	31	33
660	12	13	12	13	14	16	24	33	45	60
670	39	13	16	16	15	19	7	12	22	13
680	15	12	19	25	50	59	43	19	12	13
690	15	9	15	16	28	81	139	162	96	114
700	113	87	43	12	6	9	4	10	3	9
730	6	5	4	10	9	19	31	47	34	34
740	16	4	4	10	6	6	3	3	11	6
820	5	7	11	29	29	21	13	23	29	14
850	2	4	18	32	30	20	8	1	1	3
890	4	4	6	3	4	7	6	1	3	2
940	4	2	6	4	9	6	5	11	10	2

ข้อมูลในรูป 21 พิมพ์เฉพาะ peak

SURFACE WATER SAMPLE, R. 10, 1000 ML. IRRADIATION TIME 5 DAYS, DECAY TIME 2 WEEKS. GAIN 20.

CONVERSION GAIN 1024./22/DEC./1974./ CONTACT TIME 1000 SEC./

0	1000	1154	1093	1080	1058	1156	1237	1311	1260	1041
10	1007	890	920	882	878	868	889	845	799	865
90	485	728	2123	5360	6303	3475	871	240	204	221
100	214	194	219	199	230	210	212	222	186	206
120	236	463	1220	1982	1603	598	197	121	138	126
130	151	145	133	117	147	130	134	139	120	135
180	99	87	76	97	105	73	98	103	87	78
320	71	75	64	67	76	61	60	61	76	102
240	119	105	63	62	74	67	63	58	56	66
260	150	192	224	218	164	76	52	59	49	49
290	46	46	54	60	46	49	46	56	51	62
320	60	48	39	52	54	95	146	223	136	94
330	61	59	54	43	47	49	37	41	43	49
470	31	38	32	53	36	95	150	204	140	74
480	29	27	29	34	34	41	38	44	29	34
530	35	47	48	89	99	61	44	36	42	24
540	31	29	30	34	32	42	29	37	22	28
660	16	19	17	11	13	15	17	27	47	51
670	36	8	7	14	15	9	18	15	5	17
680	12	16	12	18	50	34	26	19	10	17
690	18	20	17	23	38	108	182	163	102	63
700	47	35	21	5	4	10	7	11	8	8
730	5	5	4	9	10	8	13	43	64	48
740	18	8	3	4	4	8	7	3	4	11
820	4	5	15	20	22	14	10	11	11	9
850	6	15	38	46	46	28	12	1	2	6
940	0	3	2	4	8	3	10	6	10	4

ឆ្នាំទី ២២

STD. Na²² GAIN 8 : 80 H.V. 920. /15/ DEC./ 1974.

010000	000000	000000	000004	000434	001098	001324	001092
001131	001119	001064	000970	000967	000939	000685	000553
000523	000765	002071	003608	002751	001063	000324	000247
000209	000217	000199	000200	000197	000201	000188	000196
000211	000178	000184	000161	000150	000120	000115	000144
000248	000437	000494	000541	000334	000207	000106	000060
000049	000045	000032	000026	000022	000025	000020	000028
000028	000042	000029	000030	000034	000022	000012	000005
000004	000003	000003	000004	000008	000003	000005	000002
000005	000001	000000	000003	000003	000004	000002	000004
000002	000006	000001	000003	000002	000003	000004	000000
000001	000000	000001	000001	000000	000001	000000	000001
000000	000000	000001	000001	000000	000000	000000	000000
000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000
000000	000000	000001	000000	000000	000000	000000	000000
000000	000000	000001	000000	000000	000000	000000	000000
000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000

STD, Co⁶⁰

010000	000001	000008	000013	000978	002475	002727	002235
002178	002273	002348	002165	002143	002116	002134	002030
001925	001810	001871	001797	001930	001827	001759	001805
001806	001832	001893	001533	002040	002124	002159	002072
001920	001630	001631	001447	001701	002293	003333	004100
003906	003023	002784	003133	003312	002683	001748	001042
000576	000307	000183	000111	000079	000058	000073	000066
000058	000059	000047	000062	000063	000039	000037	000052
000040	000055	000040	000045	000049	000043	000051	000049
000038	000030	000027	000031	000027	000026	000034	000041

ข้อมูลรูป 22 (ทศ)

STD. Co⁶⁰ (Cont.)

000046	000058	000050	000025	000017	000016	000008	000007
000004	000001	000001	000002	000002	000000	000001	000000
000000	000000	000001	000001	000000	000000	000000	000000
000000	000000	000000	000000	000001	000000	000000	000000
000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000
000000	000001	000000	000001	000000	000000	000000	000000

STD. Cs¹³⁷ GAIN 8.80 H.V 920/15/DEC. /1974.

010000	000002	000000	000025	007693	006794	005226	004530
004447	004945	004696	004505	004441	004404	004371	004313
004301	003859	002997	001792	001388	002087	006518	015450
019868	012169	003789	000576	000106	000061	000061	000063
000066	000050	000048	000049	000054	000042	000037	000056
000053	000041	000029	000034	000026	000031	000040	000038
000034	000026	000017	000010	000005	000014	000011	000008
000004	000012	000006	000007	000002	000006	000007	000002
000002	000007	000005	000004	000008	000003	000005	000002
000004	000002	000002	000001	000002	000001	000002	000002
000007	000004	000004	000004	000001	000001	000005	000002
000000	000002	000001	000002	000000	000000	000001	000000
000000	000000	000002	000001	000000	000000	000001	000000
000001	000001	000000	000001	000002	000000	000000	000001
000000	000000	000000	000000	000001	000000	000000	000000
000000	000000	000000	000001	000000	000000	000000	000000

ขอมลในรูป 22

SID. Na²² ,/16/JAN./1975./GAIN ' : ') H.V. 920

[illegible]

STD. Co⁶⁰

[illegible]

STD. Cs¹³⁷.

010000	000000	000004	000091	005909	004031	003308	002695
002796	003207	002995	002732	002660	002566	002519	002368
002405	001969	001116	000623	000687	002669	008080	012920
009875	003731	000708	000106	000069	000074	000048	000051
000049	000039	000051	000045	000039	000049	000045	000039
000022	000034	000025	000029	000026	000042	000040	000030
000021	000020	000012	000010	000011	000007	000014	000013
000007	000008	000001	000005	000002	000004	000006	000010
000006	000006	000007	000008	000008	000008	000004	000004
000005	000005	000002	000001	000002	000004	000003	000005
000004	000006	000003	000004	000000	000003	000003	000000
000001	000001	000000	000001	000000	000000	000000	000000
000000	000000	000001	000000	000000	000000	000000	000000
000002	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000
000000	000000	000001	000000	000000	000000	000000	000000
000000	000001	000000	000000	000000	000000	000000	000000

ข้อมูลรูป 23 พิมพ์เฉพาะ peak

STANDARD CURVE, Na²², Co⁶⁰, AND Cs¹³⁷, GAIN 20:00, CONVERSION GAIN
1024 H.V. 20000/

Ge L1 DETECTOR

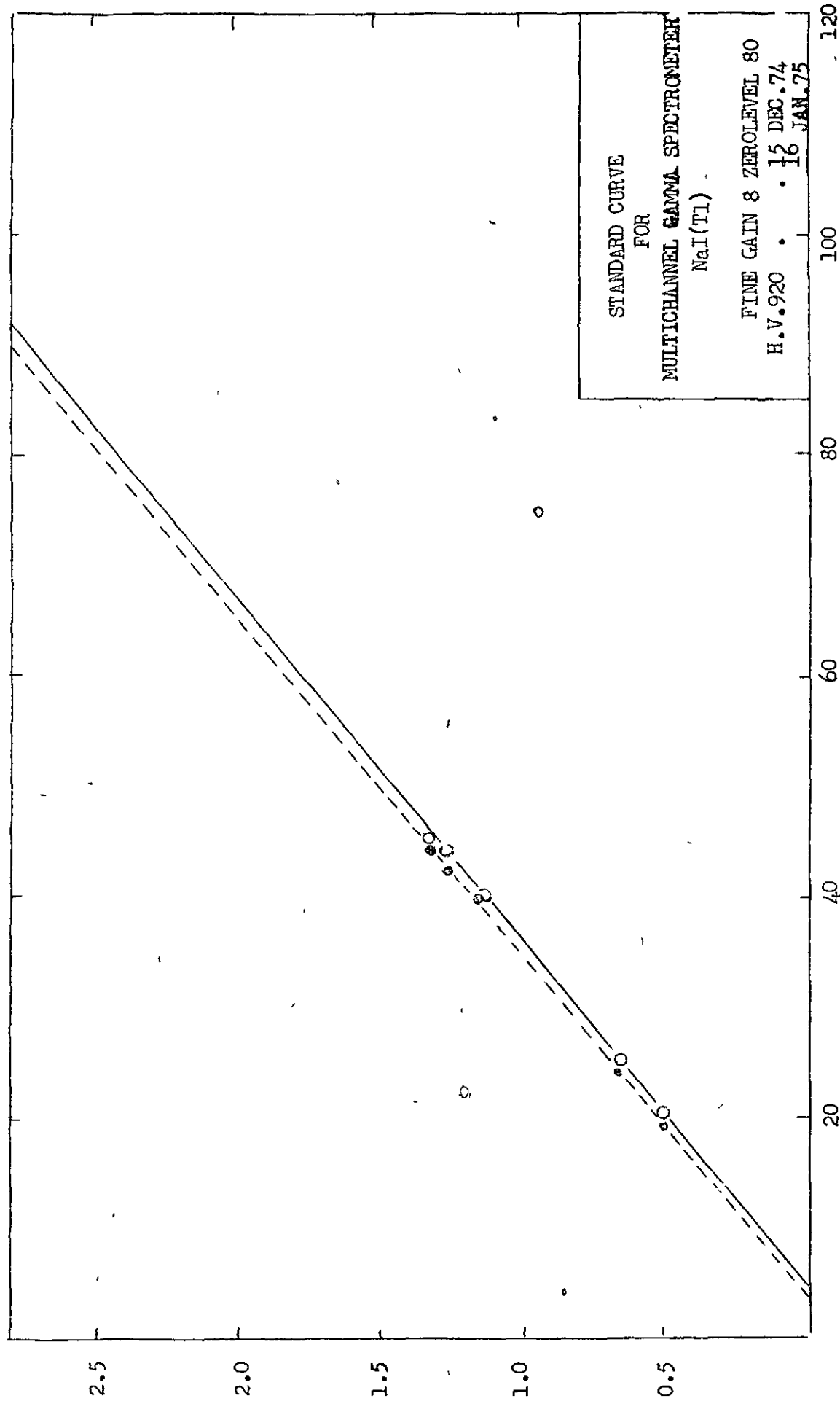
250	829	871	860	809	815	894	1230	2314	4528	5766
260	4561	2258	1130	789	681	660	640	651	676	615
360	568	577	576	634	776	1282	3440	8276	9579	5069
370	1471	494	436	418	441	437	387	407	403	405
730	221	230	256	297	719	1941	3778	3663	1837	549
800	65	67	58	62	58	73	81	161	389	940
810	1178	781	244	70	43	35	40	38	46	29
850	1062	2605	3283	2251	753	118	15	13	13	8
860	9	17	11	9	11	5	14	9	7	10

ตาราง 7 แสดงค่าพลังงานของรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจาก STANDARD Co⁶⁰,
Na²² และ Cs¹³⁷

วัน เดือน ปี	ธาตุ	Gain	เครื่องมือที่ใช้วัด กัมมันตภาพรังสี	พลังงานรังสีแกมมา ที่ส่งออกมา (MeV.)	Channel Number H.V. 920V.	Channel Number H.V. 2000V.
15 ธ.ค. 2517	Co ⁶⁰	8.80	NaI(Tl)	1.17 และ 1.332	40 และ 45	-
	Na ²²	8.80	NaI(Tl)	0.51 และ 1.27	20 และ 44	-
	Cs ¹³⁷	8.80	NaI(Tl)	0.66	25	-
16 ม.ค. 2518	Co ⁶⁰	8.80	NaI(Tl)	1.17 และ 1.332	40 และ 44	-
	Na ²²	8.80	NaI(Tl)	0.51 และ 1.27	40 และ 44	-
	Cs ¹³⁷	8.80	NaI(Tl)	0.66	24	-
				1.17 และ 1.332	-	737 และ 853
				0.51 และ 1.27	-	260 และ 811
				0.66	-	369

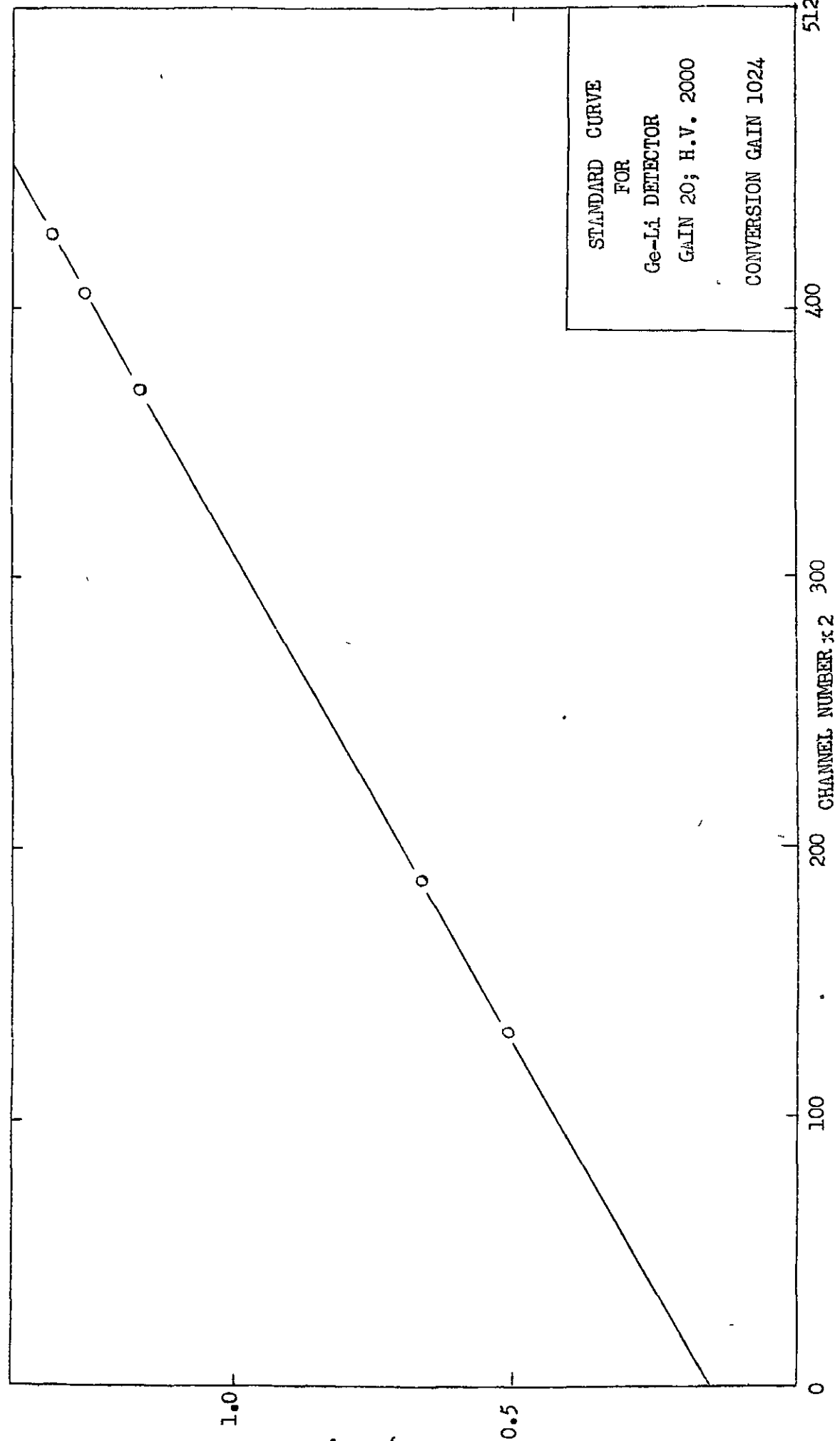
รูป 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจริงที่แกมมา และ

Channel Number จากเครื่องวัด NaI(Tl)



รูป. 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจริงสแกนมาส่งออกมา และ

Channel Number จากเครื่องวัด Ge-Li



*ภาคผนวก ข

ข้อมูลทดสอบหาปริมาณธาตุ Hg, As, Cu และ Se
ในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ ซึ่งเก็บตัวอย่างน้ำในฤดูร้อน
(ระหว่างเดือนมีนาคม ถึงเมษายน 2517)

ตาราง 8 แสดงข้อมูลการทดสอบหาปริมาณธาตุ Hg, As, Cu และ Se

ในน้ำส่วนบนในหลอดแสงแสง ซึ่งเก็บตัวอย่างในตู้ร้อน

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระชอน + น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	น้ำหนัก กระชอน กรอง (gm.)	น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (µg)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm.)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm.)
S ₁	Hg	5625	0.10325	0.04700	0.05625	2752.44440	10.50661	977.22000	0.01054
	Hg(Std.)	1816	0.06285	0.04665	0.01620	2600.69130	10.00000	-	-
	As	14	0.05460	0.04725	0.00835	55.06108	0.70629	99.72200	0.00708
	As(Std.)	20	0.06390	0.04705	0.01685	38.97923	0.50000	-	-
	Cu	946	0.05700	0.04785	0.00915	1978.84590	1.68773	99.72200	0.01692
	Cu(Std.)	876	0.06205	0.4775	0.01430	1172.49230	1.00000	-	-
	Se	6797	0.06840	0.04660	0.02180	6235.77980	11.96220	997.22000	0.01200
	Se(Std.)	4848	0.06610	0.04750	0.01860	5212.90320	10.00000	-	-
S ₂	Hg	6383	0.09650	0.04765	0.04885	3031.43500	20.16950	996.44400	0.02024
	Hg(Std.)	1422	0.06965	0.04770	0.02195	1502.97940	10.00000	-	-
	As	112	0.06140	0.04735	0.01405	261.78505	0.93278	99.64440	0.00936
	As(Std.)	72	0.06390	0.04705	0.01685	140.32522	0.50000	-	-
	Cu	5514	0.05890	0.04875	0.01015	10397.82800	7.95137	99.64440	0.07980
	Cu(Std.)	977	0.026050	0.04775	0.01430	1307.67690	1.00000	-	-
	Se	6260	0.06470	0.045900	0.01880	5659.57440	12.77517	996.44400	0.01282
	Se(Std.)	4848	0.06610	0.04750	0.01860	5212.90320	10.00000	-	-

ตาราง 8 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระจก บรรจุ + น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	น้ำหนัก กระจก กรอง (gm.)	น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	100 % activities	ปริมาณ ธาตุในสาร ตัวอย่าง (μg)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm.)	ปริมาณ ธาตุในสาร ตัวอย่าง (ppm.)
S ₃	Hg	8460	0.09820	0.04675	0.05145	3814.81040	21.16993	998.58880	0.02120
	Hg(Std)	1635	0.06760	0.04655	0.02105	1801.99520	10.00000	-	-
	As	56	0.06410	0.04875	0.01535	119.80716	0.42689	99.85888	0.00428
	As(Std)	72	0.06390	0.04705	0.01685	140.32522	0.50000	-	-
	Cu	845	0.06000	0.04710	0.01290	1253.74410	0.83709	99.85888	0.00838
	Cu(Std)	1119	0.06205	0.04775	0.01430	1497.73840	1.00000	-	-
	Se	4738	0.06585	0.04665	0.01920	4935.41660	9.46769	998.58880	0.00948
	Se(Std)	4848	0.06610	0.04750	0.00860	5212.90320	10.00000	-	-
S ₄	Hg	10027	0.10745	0.04710	0.06035	3854.62130	18.02737	998.97800	0.01805
	Hg(Std)	2023	0.06965	0.04770	0.02195	2138.20500	10.00000	-	-
	As	207	0.11990	0.04640	0.07350	92.48816	0.60000	99.89780	0.00061
	As(Std)	1976	0.13215	0.04795	0.08420	770.68693	0.50000	-	-
	Cu	3352	0.10080	0.04560	0.05520	1162.26950	2.29153	99.89780	0.02294
	Cu(Std)	1692	0.1175	0.04790	0.06385	507.20250	1.00000	-	-
	Se	5737	0.06635	0.04750	0.01885	6087.00260	14.88546	998.97800	0.01490
	Se(Std)	3987	0.06570	0.04620	0.01950	4089.23070	-	-	-

ตาราง 8 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระจก ร่อน + น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	น้ำหนัก กระจก ร่อน (gm.)	น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	100 % activities	ปริมาณ ธาตุในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm.)	ปริมาณ ธาตุในสาร ตัวอย่าง (ppm.)
S ₅	Hg	6076	0.04895	0.06380	0.06380	2209.45450	9.44277	995.38400	0.00949
	Hg(Std)	2123	0.06760	0.04655	0.02105	2339.83840	10.00000	—	—
	As	211	0.11910	0.04540	0.07370	94.01954	0.06099	99.53840	0.00061
	As(Std)	1976	0.13215	0.04793	0.08420	770.68693	0.50000	—	—
	Cu	549	0.11150	0.04640	0.06510	161.41105	0.34362	99.53840	0.00345
	Cu (Std)	1567	0.11175	0.04790	0.06385	469.73187	1.00000	—	—
	Se	7201	0.06925	0.04820	0.02105	6841.80520	16.73128	995.38400	0.01681
	Se (Std)	3987	0.06570	0.04620	0.01950	4098.23070	10.00000	—	—
S ₆	Hg	4948	0.07975	0.04665	0.03310	3468.03450	9.16956	995.48760	0.00921
	Hg (Std)	2641	0.06285	0.04665	0.01620	3782.17280	10.00000	—	—
	As	96	0.11490	0.04670	0.06820	46.22639	0.02999	99.54876	0.00030
	As (Std)	1976	0.13215	0.04795	0.08420	770.68693	0.50000	—	—
	Cu	117	0.11195	0.04900	0.06295	35.57395	0.16668	99.54876	0.00167
	Cu (Std)	712	0.11175	0.04790	0.06385	213.43273	1.00000	—	—
	Se	2578	0.06870	0.04880	0.01990	2590.95470	6.33604	995.48760	0.00637
	Se (Std)	3987	0.06570	0.04620	0.01950	4089.23070	10.00000	—	—

ตาราง 8 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระจก รอง # น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	น้ำหนัก กระจก รอง (gm.)	น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	100 % activities	ปริมาณ ธาตุในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm.)	ปริมาณ ธาตุในสาร ตัวอย่าง (ppm.)
S ₇	Hg	3469	0.07975	0.04805	0.03170	2538.82640	15.56731	995.96800	0.01563
	Hg (Std)	1543	0.06965	0.04770	0.02195	1630.87010	10.00000	-	-
	As	350	0.08030	0.04820	0.03210	358.06853	0.22671	99.59680	0.00228
	As (Std)	820	0.08185	0.04775	0.03410	789.70087	0.50000	-	-
	Cu	517	0.06305	0.04830	0.01475	670.87322	0.23702	99.59680	0.00238
	Cu (Std)	2307	0.06250	0.04690	0.01560	2830.51150	1.00000	-	-
	Se	3074	0.06855	0.04645	0.02210	2781.90040	8.10850	995.96800	0.00814
	Se (Std)	3448	0.06775	0.04765	0.02010	3430.84570	10.00000	-	-
S ₈	Hg	9580	0.07975	0.04905	0.03070	7239.60910	17.20641	997.44450	0.01725
	Hg (std)	2938	0.06285	0.04660	0.01620	4207.50610	10.00000	-	-
	As	120	0.05560	0.04750	0.00810	486.51851	0.03742	99.74445	0.00375
	As (std)	675	0.03185	0.04775	0.03410	650.05865	0.50000	-	-
	Cu	285	0.05950	0.04760	0.01190	458.39495	0.94347	99.74445	0.00946
	Cu (std)	396	0.06250	0.04690	0.01560	485.86153	1.00000	-	-
	Se	2340	0.06835	0.04850	0.01983	2360.06050	6.87895	997.44450	0.00690
	Se (std)	3448	0.06775	0.04765	0.02010	3430.84570	10.00000	-	-

ตาราง 8 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	activities	น้ำหนัก กระดูก ของ + น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	น้ำหนัก กระดูก ของ (gm.)	น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	100% activities	ปริมาณ ธาตุในสาร ตัวอย่าง (μg.)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm.)	ปริมาณ ธาตุในสาร ตัวอย่าง (ppm.)
S ₉	Hg	9560	0.08320	0.04665	0.03655	6068.18050	18.27907	996.87654	0.01834
	Hg (std)	3563	0.07240	0.04750	0.02490	3319.74290	10.00000	-	-
	As	519	0.07340	0.04830	0.02510	679.04223	0.45198	99.68765	0.00453
	As (std)	780	0.08185	0.04775	0.03410	751.17888	0.50000	-	-
	Cu	1015	0.06360	0.04750	0.01610	1206.65210	0.42630	99.68765	0.00428
	Cu (std)	2307	0.06250	0.04690	0.01560	2830.51150	1.00000	-	-
	Se	2607	0.06440	0.04550	0.01890	2758.73010	8.04096	996.87654	0.00807
	Se (std)	3448	0.06775	0.04765	0.02010	3430.84570	10.00000	-	-
S ₁₀	Hg	7017	0.07855	0.04650	0.03205	5079.38840	17.69421	998.87650	0.01771
	Hg (std)	3080	0.07240	0.04750	0.02490	2870.65060	10.00000	-	-
	As	117	0.05650	0.04625	0.01025	374.85658	0.47970	99.88765	0.00480
	As (std)	279	0.07010	0.04665	0.02345	390.70897	0.50000	-	-
	Cu	568	0.06325	0.04730	0.01595	680.60000	0.33836	99.88765	0.00339
	Cu (std)	1705	0.06395	0.04775	0.01620	2014.42590	1.00000	-	-
	Se	5267	0.06600	0.04715	0.01885	5588.32890	18.24111	998.87650	0.01826
	Se (std)	2987	0.06600	0.04650	0.01950	3063.58970	10.00000	-	-

ตาราง 8 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	activities	น้ำหนัก กระจก บรรจุ + น้ำหนัก ตะกอน (gm)	น้ำหนัก กระจก บรรจุ (gm)	น้ำหนัก ตะกอน (gm)	100 % activities	ปริมาณ ธาตุในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุในสาร ตัวอย่าง (Ppm)
S ₁₁	Hg	5168	0.07790	0.04770	0.03020	3970.11320	17.71864	998.99850	0.01774
	Hg (std)	2033	0.06760	0.04655	0.02105	2240.64600	10.00000	—	—
	As	659	0.08615	0.04930	0.03685	587.28792	0.35981	99.89985	0.00360
	As (std)	666	0.07425	0.04745	0.02680	816.09850	0.50000	—	—
	Cu	710	0.06435	0.04750	0.01685	819.62605	0.45362	99.89985	0.00454
	Cu (std)	1619	0.06435	0.04720	0.01715	1806.86060	1.00000	—	—
	Se	3270	0.06490	0.04750	0.01740	3758.62060	12.26868	998.99850	0.01228
	Se (std)	2987	0.06600	0.04650	0.01950	3063.58970	10.00000	—	—
S ₁₂	Hg	6416	0.08260	0.04780	0.03480	4277.33330	34.64789	996.53840	0.03477
	Hg (std)	1168	0.06965	0.04770	0.02195	1234.51480	10.00000	—	—
	As	1168	0.07900	0.04830	0.03070	1249.41750	0.58397	99.65384	0.00586
	As (std)	1031	0.07855	0.04690	0.03165	1069.76420	0.50000	—	—
	Cu	569	0.06080	0.04745	0.01335	815.77977	0.43637	99.65384	0.00438
	Cu (std)	1470	0.06220	0.04715	0.01505	1869.48830	0.00000	—	—
	Se	4812	0.06745	0.04825	0.01920	5012.50000	16.36153	886.53840	0.01642
	Se (std)	2987	0.06600	0.04630	0.01950	3063.58970	10.00000	—	—

ตาราง 8 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	activities	น้ำหนัก กระจก กรอง + น้ำหนัก ตะกอน (gm)	น้ำหนัก กระจก กรอง (gm)	น้ำหนัก ตะกอน (gm)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (µg)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (Ppm)
S ₁₃	Hg	5360	0.07360	0.04690	0.02670	4657.37820	13.87430	995.84795	0.01393
	Hg (std)	2344	0.06285	0.04665	0.01620	3356.83950	10.00000	—	—
	As	127	0.07605	0.04695	0.02910	143.32233	0.16289	99.58479	0.00164
	As (std)	424	0.07855	0.04690	0.03165	439.94186	0.50000	—	—
	Cu	202	0.06220	0.04695	0.01525	253.52655	0.34913	99.58479	0.00351
	Cu (std)	571	0.06220	0.04715	0.01505	726.17541	1.00000	—	—
	Se	2288	0.0661	0.04720	0.01890	2421.16400	5.31922	995.84795	0.00534
	Se (std)	3960	0.06305	0.04565	0.01740	4551.72410	10.00000	—	—
S ₁₄	Hg	3022	0.07580	0.04755	0.02825	2481.78400	12.08475	996.22485	0.01213
	Hg (std)	1943	0.06965	0.04770	0.02195	2053.64920	10.00000	—	—
	As	185	0.07805	0.04890	0.02915	205.41852	0.16459	99.62249	0.00165
	As (std)	562	0.07800	0.04885	0.02915	633.14168	0.50000	—	—
	Cu	43	0.05970	0.04730	0.01240	66.37258	0.04449	99.62249	0.00045
	Cu (std)	1216	0.06270	0.04710	0.01560	1491.93840	1.00000	—	—
	Se	2546	0.06635	0.04630	0.02005	2539.65080	5.57954	996.22485	0.00560
	Se (std)	3960	0.06305	0.04565	0.01740	4550.72410	10.00000	—	—

ตาราง 8 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	activities.	น้ำหนัก กระจก กรอง + น้ำหนัก ตะกอน (gm)	น้ำหนัก กระจก กรอง (gm)	น้ำหนัก ตะกอน (gm)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (µg)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (Ppm)
S ₁₅	Hg	7459	0.07975	0.04705	0.03270	5292.01220	34.01415	997.58640	0.03410
	Hg (std)	1472	0.06965	0.04770	0.02195	1555.82680	10.00000	—	—
	As	367	0.07735	0.04665	0.03070	392.58241	0.21944	99.75864	0.00220
	As (std)	794	0.07800	0.04885	0.02915	894.50977	0.50000	—	—
	Cu	1576	0.06460	0.04890	0.01570	1921.31460	1.82939	99.75864	0.01834
	Cu (std)	856	0.06270	0.04710	0.01560	1050.24610	1.00000	—	—
	Se	5037	0.06850	0.04920	0.01930	5219.68910	11.46750	997.58640	0.01150
	Se (std)	3960	0.06305	0.04565	0.01740	4551.72410	10.00000	—	—
S ₁₆	Hg	6295	0.08950	0.04825	0.04125	3540.46060	22.76947	996.95430	0.02284
	Hg (std)	1508	0.07130	0.04880	0.02250	1554.91550	10.00000	—	—
	As	67	0.06040	0.04695	0.01345	163.58959	0.26909	99.69543	0.00270
	As (std)	311	0.08140	0.04780	0.03360	303.96547	0.50000	—	—
	Cu	880	0.06155	0.04590	0.01565	1076.24280	0.54192	99.69543	0.00544
	Cu (std)	1904	0.06815	0.04980	0.01835	1085.97050	1.00000	—	—
	Se	6380	0.06070	0.04480	0.01590	8025.15720	17.63103	996.95430	0.01769
	Se (std)	3960	0.06305	0.04565	0.01740	4551.72410	10.00000	—	—

ตาราง 8 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	act- ivities	น้ำหนัก กระชาม กรอง + น้ำหนัก ตะกอน (gm)	น้ำหนัก กระชาม กรอง (gm)	น้ำหนัก ตะกอน (gm)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm)
S ₁₇	Hg	8779	0.08490	0.04795	0.03695	5512.11900	24.97310	998.85470	0.02500
	Ht (std)	2055	0.06925	0.04765	0.02160	2207.22220	10.00000	—	—
	As	476	0.08520	0.04735	0.03785	412.99445	0.24682	99.88547	0.00247
	As (std)	586	0.08140	0.04780	0.03360	836.63809	0.50000	—	—
	Cu	182	0.06635	0.04935	0.01700	204.91058	0.11118	99.88547	0.00111
	Cu (std)	1767	0.06815	0.04980	0.01835	1843.07240	1.00000	—	—
	Se	4517	0.06710	0.04730	0.01980	4562.62620	14.04946	998.85470	0.01407
	Se (std)	3142	0.06805	0.04870	0.01935	3247.54250	10.0 000	—	—
S ₁₈	Hg	6417	0.07985	0.04835	0.03150	4726.17140	11.18323	999.89576	0.01118
	Hg (std)	2951	1.16285	1.14665	0.01620	4226.12340	10.00000	—	—
	As	180	0.05935	0.04730	0.01205	490.55601	0.62776	99.98958	0.00628
	As (std)	279	0.07010	0.04665	0.02345	390.71897	0.50000	—	—
	Cu	9539	0.06640	0.047200	0.01920	9509.19060	4.72055	99.98958	0.04721
	Cu (std)	1705	0.06395	0.04775	0.01620	2014.42590	1.00000	—	—
	Se	2586	0.06615	0.04735	0.01800	2751.06380	8.47121	999.89576	0.00847
	Se (std)	3142	0.06805	0.04870	0.01935	3247.54520	10.00000	—	—

ตาราง 8 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	act- ivities	น้ำหนัก กระจก กรอง + น้ำหนัก ตะกอน (gm)	น้ำหนัก กระจก กรอง (gm)	น้ำหนัก ตะกอน (gm)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm)
S ₁₉	Hg	7626	0.07820	0.04960	0.02860	6186.12580	19.83298	996.86435	0.01990
	Hg (std)	3025	0.07060	0.04610	0.02250	3119.11110	10.00000	—	—
	As	521	0.06185	0.04815	0.01370	1248.87880	1.32457	99.68644	0.01329
	As (std)	501	0.08205	0.04715	0.03490	471.42808	0.50000	—	—
	Cu	944	0.06165	0.04795	0.01370	1318.84370	0.52590	99.68644	0.00528
	Cu (std)	1985	0.06110	0.04595	0.01515	2507.78210	1.00000	—	—
	Se	4965	0.06445	0.04665	0.01780	5578.65160	17.17806	996.86435	0.01723
	Se (std)	3142	0.06805	0.04870	0.01935	3247.54520	10.00000	—	—
S ₂₀	Hg	5290	0.07905	0.04655	0.03250	3776.24610	18.55058	996.25870	0.01862
	Hg (std)	1847	0.06760	0.04655	0.02105	2035.64840	10.00000	—	—
	As	351	0.09595	0.04750	0.04845	237.91207	0.18348	99.62587	0.00184
	As (std)	689	0.08205	0.04715	0.03490	648.33123	0.50000	—	—
	Cu	171	0.06125	0.04675	0.01450	225.72000	0.10497	99.62587	0.00105
	Cu (std)	1702	0.06110	0.04595	0.01515	2150.24950	1.00000	—	—
	Se	2586	0.06375	0.04915	0.01460	3542.46570	10.90813	996.25870	0.01095
	Se (std)	3142	0.06805	0.04870	0.01935	3247.54520	10.00000	—	—

ตาราง 8 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	act- ivities	น้ำหนัก กระจก กรอง + น้ำหนัก ตะกอน (gm)	น้ำหนัก กระจก กรอง (gm)	น้ำหนัก ตะกอน (gm)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μg)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm)
S ₂₁	Hg	3238	0.07190	0.04755	0.02435	3085.07590	22.80355	996.65425	0.02288
	Hg (std)	1280	0.06965	0.04770	0.02195	1352.89290	10.00000	—	—
	As	307	0.05605	0.04910	0.00695	1455.35530	2.24940	99.66543	0.02257
	As (std)	231	0.07010	0.04665	0.02345	323.49850	0.50000	—	—
	Cu	1279	0.05930	0.04730	0.01200	2040.07500	0.98666	99.66543	0.00990
	Cu (std)	1750	0.06395	0.04775	0.01620	2067.59250	1.00000	—	—
	Se	2564	0.06460	0.04810	0.01650	3107.87870	10.14457	996.65425	0.01018
	Se (std)	2987	0.06600	0.04650	0.01950	3063.58970	10.00000	—	—

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดสอบหาปริมาณธาตุ Hg, As, Cu และ Se -
ในน้ำส่วนบนในคลองแสนแสบ ซึ่งเก็บตัวอย่างน้ำ ในฤดูฝน
(ระหว่างเดือนกันยายนถึงตุลาคม 2517)

ตาราง 9 แสดงข้อมูลการทดสอบหาปริมาณธาตุ Hg, As, Cu และ Se ในน้ำส่วนบน
ในคลองแสนแสบ ซึ่งเก็บตัวอย่างน้ำในฤดูฝน

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	acti- vities.	น้ำหนัก กระภา ษกรอง + น้ำหนัก ตะกอน (gm)	น้ำหนัก กระภา ษกรอง (gm)	น้ำหนัก ตะกอน (gm)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μg)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm)
R ₁	Hg ₁	3870	0.06460	0.04720	0.01740	5160.00000	21.96679	977.53600	0.02202
	Hg (std)	2106	0.06990	0.04910	0.02080	2349.00000	10.00000	—	—
	As	1356	0.07775	0.04755	0.03020	1474.53770	0.47527	99.75360	0.00476
	As (std)	1325	0.07480	0.04675	0.02805	1551.26550	0.50000	—	—
	Cu	1438	0.06370	0.04940	0.01430	1924.70760	0.84793	99.75360	0.00850
	Cu (std)	1836	0.06320	0.04755	0.01565	2269.89390	1.00000	—	—
	Se	3573	0.06205	0.04950	0.01255	5375.29820	11.35451	997.53600	0.01138
	Se (std)	4308	0.06780	0.04960	0.01820	4734.06590	10.00000	—	—
R ₂	Hg	6346	0.07410	0.04765	0.02645	5566.24570	19.82533	993.39600	0.01996
	Hg (std)	2350	0.07100	0.04745	0.02355	2807.64330	10.00000	—	—
	As	710	0.07650	0.04940	0.02710	860.38376	0.27732	99.33960	0.00279
	As (std)	1325	0.07480	0.04675	0.02805	1551.26550	0.50000	—	—
	Cu	201	0.06215	0.04805	0.01410	272.84680	0.14129	99.33960	0.00142
	Cu (std)	1579	0.06320	0.04755	0.01565	1931.12200	1.00000	—	—
	Se	1586	0.06590	0.04840	0.01750	1584.00000	6.29853	993.39600	0.00634
	Se (std)	2452	0.06580	0.04630	0.01950	2514.87170	10.00000	—	—

ตาราง 9 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	activities	น้ำหนัก กระดาษ กรอง + น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	น้ำหนัก กระดาษ กรอง (gm.)	น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μg)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm.)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm.)
R ₃	Hg	2608	0.10140	0.04695	0.05445	1145.30020	2.74884	998.96800	0.00275
	Hg (Std)	3942	0.06965	0.04770	0.02165	4166.48740	10.00000	—	—
	As	1247	0.08165	0.04840	0.03325	1231.62340	0.39697	99.89680	0.00397
	As (Std)	1325	0.07480	0.04675	0.02805	1551.26550	0.50000	—	—
	Cu	591	0.06485	0.04775	0.01710	661.50526	0.29143	99.89680	0.00292
	Cu (Std)	1856	0.06320	0.04755	0.01565	2269.89390	1.00000	—	—
	Se	1605	0.06555	0.04815	0.01740	1844.82750	7.33567	998.96800	0.00734
	Se (Std)	2452	0.06580	0.04630	0.01950	2514.87170	10.00000	—	—
R ₄	Hg	6292	0.06385	0.04780	0.01605	9094.97810	30.35785	998.49875	0.03040
	Hg (Std)	2686	0.06990	0.04910	0.02080	2995.92300	10.00000	—	—
	As	14	0.05415	0.04625	0.00790	58.19747	0.09247	99.84988	0.00093
	As (Std)	172	0.06490	0.04695	0.01795	314.67855	0.50000	—	—
	Cu	957	0.06425	0.04735	0.01690	1083.84490	0.29298	99.84988	0.00293
	Cu (Std)	3769	0.06565	0.04615	0.01950	3699.41840	1.00000	—	—
	Se	3692	0.06725	0.04840	0.01885	3917.2413	15.57631	998.49875	0.01560
	Se (Std)	2452	0.06580	0.04630	0.01950	2514.87170	10.00000	—	—

ตาราง 9 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	activities.	น้ำหนัก กระดูก กรอง + น้ำหนัก ตะกอน (gm)	น้ำหนัก กระดูก กรอง (gm)	น้ำหนัก ตะกอน (gm)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (µg)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm)
R ₁	Hg	3841	0.06510	0.04750	0.01760	5063.13630	13.47495	996.53825	0.01352
	Hg (std)	3142	0.06705	0.04765	0.01940	3757.44320	10.00000	—	—
	As	73	0.05340	0.04670	0.00670	357.80895	0.37611	99.65383	0.00377
	As (std)	260	0.06490	0.04695	0.01795	475.67688	0.50000	—	—
	Cu	519	0.06010	0.04695	0.01315	755.41140	0.20420	99.65383	0.00205
	Cu (std)	3769	0.06565	0.04615	0.01950	3699.41840	1.00000	—	—
	Se	2090	0.06740	0.04750	0.01990	2100.50250	7.19715	996.53825	0.00722
	Se (std)	2758	0.06710	0.04820	0.01890	2918.51850	10.00000	—	—
P ₁	Hg	3078	0.06590	0.04740	0.01850	3859.97830	11.73109	995.52600	0.01178
	Hg (std)	2950	0.06990	0.04910	0.02080	3290.38460	10.00000	—	—
	As	117	0.05345	0.04710	0.00635	605.08346	0.63602	99.55260	0.00639
	As (std)	260	0.06490	0.04695	0.01795	475.67688	0.50000	—	—
	Cu	228	0.05785	0.04830	0.00955	456.95497	0.12352	99.55260	0.00124
	Cu (std)	3769	0.06565	0.04615	0.01950	3699.41840	1.00000	—	—
	Se	1950	0.06805	0.04810	0.01995	1954.88720	6.69822	995.52600	0.00673
	Se (std)	2758	0.06710	0.04820	0.01890	2918.51850	10.00000	—	—

ตาราง 9 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	activities	น้ำหนัก กระดูก กรอง + น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	น้ำหนัก กระดูก กรอง (gm.)	น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm.)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm.)
R ₇	Hg	5594	0.06555	0.04740	0.01815	7150.45730	21.57021	996.38420	0.02165
	Hg (Std)	2772	0.06705	0.04765	0.01940	3314.96900	10.00000	-	-
	As	131	0.05030	0.04675	0.00355	1211.84220	0.84998	99.63842	0.00853
	As (Std)	267	0.06085	0.04855	0.01230	712.86829	0.50000	-	-
	Cu	281	0.05830	0.04785	0.01045	514.67368	0.29349	99.63842	0.00295
	Cu (Std)	1695	0.06740	0.04890	0.01850	1753.63780	1.00000	-	-
	Se	832	0.06325	0.04550	0.01775	937.46478	0.32121	996.38420	0.00032
	Se (Std)	2758	0.06710	0.04820	0.01890	2918.51850	10.00000	-	-
R ₈	Hg	5051	0.07555	0.04885	0.02670	4388.88380	22.47208	997.45625	0.02253
	Hg (Std)	1751	0.06990	0.04910	0.02080	1953.03840	10.00000	-	-
	As	143	0.05290	0.04820	0.00470	999.17446	0.70081	99.74563	0.00703
	As (Std)	267	0.06085	0.04855	0.01230	712.86829	0.50000	-	-
	Cu	619	0.05980	0.04815	0.01165	1016.06650	0.57992	99.74563	0.00581
	Cu (Std)	1695	0.06740	0.04890	0.01850	1753.63780	1.00000	-	-
	Se	2669	0.06560	0.04640	0.01920	2780.20830	7.83300	997.45625	0.00785
	Se (Std)	3434	0.06670	0.04735	0.01935	3549.35400	10.00000	-	-

ตาราง 9 (ต่อ)

เลข สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	activities	น้ำหนัก กระถาง กรอง + น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	น้ำหนัก กระถาง กรอง (gm.)	น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm.)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm.)
R ₉	Hg	5702	0.09815	0.04825	0.04990	2651.03000	12.08777	995.48720	0.01214
	Hg (Std)	1971	0.06920	0.04835	0.02085	2193.15100	10.00000	—	—
	As	210	0.05580	0.04865	0.00715	964.53146	0.67651	99.54872	0.00680
	As (Std)	267	0.06085	0.04855	0.01230	712.86829	0.50000	—	—
	Cu	947	0.06460	0.04830	0.01630	1111.99870	0.63411	99.54872	0.00637
	Cu (Std)	1695	0.06740	0.04890	0.01850	1753.63780	1.00000	—	—
	Se	3390	0.06675	0.04950	0.01725	3930.43470	11.07366	995.48720	0.01112
	Se (Std)	3434	0.06670	0.04735	0.01935	3549.35400	10.00000	—	—
R ₁₀	Hg	9050	0.11715	0.04795	0.06920	3034.10400	8.16636	998.95450	0.00818
	Hg (Std)	3307	0.06925	0.04860	0.02065	3715.37040	10.00000	—	—
	As	123	0.05140	0.04555	0.00585	690.48205	0.47130	99.89545	0.00472
	As (Std)	561	0.07305	0.04790	0.02515	732.53439	0.50000	—	—
	Cu	487	0.05395	0.04520	0.00875	1065.27770	0.29293	99.89545	0.00293
	Cu (Std)	3192	0.06465	0.04785	0.01680	3636.60000	1.00000	—	—
	Se	2440	0.06495	0.04845	0.01650	2957.57570	8.33272	998.95450	0.00834
	Se (Std)	3434	0.06670	0.04735	0.01935	3549.35400	10.00000	—	—

ตาราง 9 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	activities	น้ำหนัก กระจก + น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	น้ำหนัก กระจก (gm.)	น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm.)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm.)
R ₁₁	Hg	6906	0.09910	0.04635	0.05275	3037.33080	13.21233	997.29870	0.01325
	Hg (Std)	2175	0.06955	0.01760	0.02195	2298.86100	10.00000	—	—
	As	269	0.06225	0.04650	0.01575	560.80634	0.16898	99.72987	0.00169
	As (Std)	1271	0.07305	0.04790	0.02515	1659.62780	0.50000	—	—
	Cu	2014	0.06635	0.04330	0.02305	1672.36260	0.46689	99.72987	0.00468
	Cu (Std)	3144	0.06465	0.04785	0.01680	3581.91420	1.00000	—	—
	Se	1752	0.06805	0.04660	0.02145	1635.56640	6.35330	997.29870	0.00697
	Se (Std)	2226	0.06775	0.04880	0.01895	2349.34030	10.00000	—	—
R ₁₂	Hg	7110	0.11810	0.04785	0.07025	2348.07110	9.63574	996.65652	0.00967
	Hg (Std)	2190	0.06920	0.04855	0.02065	2136.83450	10.00000	—	—
	As	43	0.05355	0.04805	0.00550	256.74909	0.20313	99.66565	0.00204
	As (Std)	184	0.07305	0.04790	0.02515	631.99045	0.50000	—	—
	Cu	457	0.06280	0.04725	0.01555	562.50675	0.14800	99.66565	0.00149
	Cu (Std)	3336	0.06465	0.04785	0.01680	3800.65710	1.00000	—	—
	Se	2004	0.06535	0.04545	0.01990	2054.27130	8.74404	996.65652	0.00877
	Se (Std)	2226	0.06775	0.04880	0.01895	2349.34030	10.00000	—	—

ตาราง 9 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	activities	น้ำหนัก กระจก กรอง + น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	น้ำหนัก กระจก กรอง (gm.)	น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (Mg)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm.)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm.)
R ₁₃	Hg	5127	0.09160	0.04750	0.04410	2697.19720	19.11148	996.95860	0.01917
	Hg (Std)	1609	0.07410	0.04765	0.02645	1411.29670	10.00000	—	—
	As	64	0.06630	0.04755	0.01875	112.09386	0.10450	99.69586	0.00105
	As (Std)	423	0.07250	0.04660	0.02590	536.34440	0.50000	—	—
	Cu	464	0.06275	0.04625	0.01650	538.24000	0.17875	99.69586	0.00179
	Cu (Std)	1581	0.05665	0.04660	0.01005	3010.97910	1.00000	—	—
	Se	1370	0.06785	0.04925	0.01860	1473.11820	6.27035	996.95860	0.00629
	Se (Std)	2226	0.06775	0.04880	0.01395	2349.34030	10.00000	—	—
R ₁₄	Hg	7433	0.10575	0.04740	0.05835	2955.36580	13.07450	997.42185	0.0311
	Hg (Std)	2124	0.06870	0.04690	0.02130	2260.40360	10.00000	—	—
	As	160	0.06235	0.04750	0.01485	353.63164	0.32985	99.74219	0.00331
	As (Std)	423	0.07250	0.04660	0.02590	536.34440	0.50000	—	—
	Cu	593	0.05985	0.04535	0.01450	732.76000	0.37673	99.74219	0.00378
	Cu (Std)	1091	0.05665	0.04660	0.01005	2077.78500	1.00000	—	—
	Se	998	0.06525	0.04705	0.01820	1096.70320	4.23393	997.42185	0.00425
	Se (Std)	2396	0.06400	0.04550	0.01850	2590.27020	10.00000	—	—

ตาราง 9 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระษ กรอง + น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	น้ำหนัก กระษ กรอง (gm.)	น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μg)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm.)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm.)
R ₁₅	Hg	6990	0.09075	0.04630	0.04445	3648.32390	19.60111	997.65320	0.01965
	Hg (Std)	1761	0.06955	0.04760	0.02195	1861.28470	10.00000	—	—
	As	51	0.06165	0.04355	0.01810	92.53260	0.19618	99.76532	0.00197
	As (Std)	186	0.07250	0.04660	0.02509	235.83938	0.50000	—	—
	Cu	1218	0.06185	0.04405	0.01780	1309.68210	0.43497	99.76532	0.00436
	Cu (Std)	1581	0.05665	0.04660	0.01005	3010.97910	1.00000	—	—
	Se	1967	0.06120	0.04480	0.01640	2398.78040	9.26073	997.65320	0.00928
	Se (Std)	2396	0.06400	0.04550	0.01850	2590.27020	10.00000	—	—
R ₁₆	Hg	6298	0.08835	0.04780	0.04055	3603.29460	23.28042	996.84275	0.02335
	Hg (Std)	1391	0.06920	0.04835	0.02085	1547.77930	10.00000	—	—
	As	335	0.07010	0.04715	0.02295	479.36383	0.30339	99.68428	0.00304
	As (Std)	771	0.07920	0.04715	0.03205	790.00436	0.50000	—	—
	Cu	401	0.06370	0.04760	0.01610	176.71677	0.37801	99.68428	0.00379
	Cu (Std)	1499	0.07050	0.04775	0.02275	1261.13670	1.00000	—	—
	Se	3874	0.06635	0.04925	0.01710	4530.99410	17.49236	996.84275	0.01755
	Se (Std)	2396	0.06400	0.04550	0.01850	2590.27020	10.00000	—	—

ตาราง 9 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	activities	น้ำหนัก กระป๋อง + น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	น้ำหนัก กระป๋อง (gm.)	น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μg)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm.)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm.)
R ₁₅	Hg	9946	0.09615	0.04865	0.04750	4357.83570	11.33393	998.87265	0.01135
	Hg (Std)	3815	0.06925	0.04860	0.02065	4286.10160	10.00000	-	-
	As	74	0.06135	0.04545	0.01590	152.84025	0.38247	99.88763	0.00383
	As (Std)	195	0.07920	0.04715	0.03205	199.80655	0.50000	-	-
	Cu	1788	0.06445	0.01605	0.01840	1859.90360	1.36801	99.88763	0.01370
	Cu (Std)	1616	0.07050	0.04775	0.02275	1359.57090	1.00000	-	-
	Se	2688	0.06510	0.04765	0.01745	3080.80220	14.87579	998.87625	0.01489
	Se (Std)	1983	0.06560	0.04645	0.01915	2071.01820	10.00000	-	-
R ₁₈	Hg	6568	0.07135	0.04840	0.02295	6659.76470	33.49783	999.84700	0.03350
	Hg (Std)	1381	0.06955	0.04760	0.02195	1983.11340	10.00000	-	-
	As	185	0.08085	0.04660	0.03425	177.38394	0.41615	99.98470	0.00416
	As (Std)	203	0.07920	0.04715	0.03205	213.12698	0.50000	-	-
	Cu	899	0.06925	0.04740	0.02185	787.49931	0.57923	99.98470	0.00579
	Cu (Std)	1616	0.07050	0.04775	0.02275	1395.57090	1.00000	-	-
	Se	1740	0.06450	0.04575	0.01875	1856.00000	8.96178	999.84700	0.00896
	Se (Std)	1983	0.06560	0.04645	0.01915	2071.01820	10.00000	-	-

ตาราง 9 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระดา กรอง + น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	น้ำหนัก กระดา กรอง (gm.)	น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm.)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm.)
R ₁₉	Hg	5041	0.06875	0.04690	0.02185	5352.45760	15.36093	996.76562	0.01541
	Hg (Std)	3124	0.06990	0.04910	0.02080	3484.46150	10.00000	—	—
	As	327	0.07660	0.04835	0.02825	380.13026	0.05565	99.67656	0.00056
	As (Std)	3094	0.07655	0.04690	0.02975	3415.36000	0.50000	—	—
	Cu	1528	0.06815	0.04555	0.02260	1294.06720	0.48213	99.67656	0.00484
	Cu (Std)	3611	0.07280	0.04705	0.02575	2684.05980	1.00000	—	—
	Se	798	0.06280	0.4695	0.01585	1006.94000	4.86205	996.76562	0.00488
	Se (Std)	1983	0.06560	0.04645	0.01315	2071.01820	10.00000	—	—
R ₂₀	Hg	5259	0.06725	0.04875	0.01850	6595.07020	30.76546	995.99980	0.03089
	Hg (Std)	2176	0.07100	0.04745	0.02355	2143.66020	10.00000	—	—
	As	128	0.07950	0.04775	0.03175	132.39433	0.06634	99.59998	0.00067
	As (Std)	904	0.07665	0.04690	0.02975	997.89445	0.50000	—	—
	Cu	3576	0.0756	0.04885	0.02675	2555.67810	0.95329	99.59998	0.00957
	Cu (Std)	3611	0.07280	0.04705	0.02575	2684.05980	1.00000	—	—
	Se	1336	0.06575	0.04655	0.01220	1391.66660	5.61927	995.99980	0.00564
	Se (Std)	2328	0.06450	0.04570	0.01880	2476.59570	10.00000	—	—

ตาราง 9 (ต่อ)

เบอร์ สาร ตัวอย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระดาษ กรอง + น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	น้ำหนัก กระดาษ กรอง (gm.)	น้ำหนัก ตะกอน (gm.)	100 % activities	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สาร ตัวอย่าง (gm.)	ปริมาณธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (ppm.)
B ₂₁	Hg	6415	0.07660	0.04830	0.02830	5258.93990	26.04038	996.84724	0.02612
	Hg (Std)	2050	0.07100	0.04745	0.02355	2019.53290	10.00000	-	-
	As	228	0.07285	0.04830	0.02455	304.99063	0.4465	99.68472	0.00045
	As (Std)	3094	0.07665	0.04690	0.02975	3415.36000	0.50000	-	-
	Cu	919	0.07000	0.04615	0.02385	737.51194	0.27478	99.68472	0.00276
	Cu (Std)	3611	0.07280	0.04705	0.02575	2684.05980	1.00000	-	-
	Se	876	0.06565	0.04820	0.01745	1004.01140	4.05400	996.84724	0.00407
	Se (Std)	2328	0.06450	0.04570	0.01880	2476.59570	10.00000	-	-

ภาคผนวก ง.
การคำนวณค่าสถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล

การคำนวณค่าสถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล

1. ค่าเฉลี่ย (mean) โดยใช้สูตร

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N}$$

- 1.1 คำนวณค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Hg ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน
- 1.2 คำนวณค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Hg ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน
- 1.3 คำนวณค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ As ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน
- 1.4 คำนวณค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ As ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน
- 1.5 คำนวณค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Cu ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน
- 1.6 คำนวณค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Cu ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน
- 1.7 คำนวณค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Se ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน
- 1.8 คำนวณค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Se ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน

2. ค่าความสัมพันธ์สหสัมพันธ์ (correlation) โดยใช้สูตร

$$r = \frac{N\sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{\{N\sum X^2 - (\sum X)^2\} \{N\sum Y^2 - (\sum Y)^2\}}}$$

- 2.1 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Hg ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน กับธาตุ Hg ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน
- 2.2 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ As ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน กับธาตุ As ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน
- 2.3 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Cu ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน กับธาตุ Cu ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน
- 2.4 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Se ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน กับธาตุ Se ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน

เมื่อให้	x	แทนปริมาณธาตุในสารตัวอย่างน้ำ หน่วย ppm.
	$\bar{x}$	แทนค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ หน่วย ppm.
	$\sum x$	แทนผลรวมทั้งหมดของ ปริมาณธาตุ
	N	แทนจำนวนสารตัวอย่าง
	$\sum x^2$ หรือ $\sum y^2$	แทนผลรวมทั้งหมดของ ปริมาณแต่ละธาตุในสารตัวอย่างยกกำลังสอง
	r	แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
	$\sum xy$	แทนผลรวมของ ผลคูณของ ปริมาณธาตุสองชนิด
	$\sum x \sum y$	แทนผลคูณของผลรวมของ ปริมาณธาตุแต่ละชนิด

ตาราง 10 แสดงข้อมูลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Hg ในตัวอย่างน้ำ
ที่เก็บในฤดูแล้ง

เบอร์ สารตัวอย่าง	X	วิธีคำนวณหาค่าเฉลี่ย
1	0.01054	ให้ X แทนปริมาณธาตุ Hg (หน่วยเป็น ppm.) $\Sigma X = 0.39075$ $N = 21$ จากสูตร $\bar{X} = \frac{\Sigma X}{N}$ $= \frac{0.39075}{21}$ $= 0.01861$
2	0.02024	
3	0.02120	
4	0.01805	
5	0.00949	
6	0.00921	
7	0.01563	
8	0.01725	
9	0.01834	
10	0.01771	
11	0.01774	
12	0.03477	
13	0.01393	
14	0.01213	
15	0.03410	
16	0.02284	
17	0.02500	
18	0.01118	
19	0.01990	
20	0.01862	
21	0.02288	
Σ	0.39075	

ตาราง 11 แสดงข้อมูลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Hg ในตัวอย่างน้ำ
ที่เก็บในฤดูฝน

เบอร์ สารตัวอย่าง	X	วิธีคำนวณหาค่าเฉลี่ย
1	0.02202	ให้ X แทนปริมาณธาตุ Hg (หน่วยเป็น ppm.) $\sum X = 0.38040$ $N = 21$ จากสูตร $\bar{X} = \frac{\sum X}{N}$ $= \frac{0.38040}{21}$ $= 0.01811$
2	0.01996	
3	0.00275	
4	0.03040	
5	0.01352	
6	0.01407	
7	0.02165	
8	0.02253	
9	0.01214	
10	0.00818	
11	0.01325	
12	0.00967	
13	0.01917	
14	0.01311	
15	0.01965	
16	0.02335	
17	0.01135	
18	0.02550	
19	0.01541	
20	0.03039	
21	0.02612	
Σ	0.38040	

ตาราง 12 แสดงข้อมูลจากการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ As ในตัวอย่างน้ำ
ที่เก็บในฤดูแล้ง

เบอร์ สารตัวอย่าง	X	วิธีการคำนวณหาค่าเฉลี่ย
1	0.00708	ให้ X แทนปริมาณธาตุ As (หน่วยเป็น ppm.) $\sum X = 0.10170$ $N = 21$ จากสูตร $\bar{X} = \frac{\sum X}{N}$ $= \frac{0.10170}{21}$ $= 0.00484$
2	0.00936	
3	0.00428	
4	0.00061	
5	0.00061	
6	0.00030	
7	0.00228	
8	0.00375	
9	0.00453	
10	0.00480	
11	0.00360	
12	0.00586	
13	0.00164	
14	0.00165	
15	0.00220	
16	0.00270	
17	0.00247	
18	0.00628	
19	0.01329	
20	0.00184	
21	0.02257	
Σ	0.10170	

ตาราง 13 แสดงข้อมูลการก่ำนวนหาค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ As ในตัวอย่างน้ำ
ที่เก็บในฤดูฝน

เบอร์ สารตัวอย่าง	X	วิธีการคำนวณหาค่าเฉลี่ย
1	0.00476	ให้ X แทนปริมาณธาตุ As (หน่วยเป็น ppm.) $\sum X = 0.07246$ $N = 21$ จากสูตร $\bar{X} = \frac{\sum X}{N}$ $= \frac{0.07246}{21}$ $= 0.00345$
2	0.00279	
3	0.00397	
4	0.00793	
5	0.00377	
6	0.00639	
7	0.00853	
8	0.00703	
9	0.00680	
10	0.00472	
11	0.00169	
12	0.00204	
13	0.00105	
14	0.00331	
15	0.00197	
16	0.00304	
17	0.00383	
18	0.00416	
19	0.00056	
20	0.00076	
21	0.00045	
$\sum$	0.07246	

ตาราง 14 แสดงข้อมูลการค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Cu ในตัวอย่างน้ำ
ที่เก็บในฤดูร้อน

เบอร์ สารตัวอย่าง	X	วิธีคำนวณค่าเฉลี่ย
1	0.01692	ให้ X แทนปริมาณธาตุ Cu (หน่วยเป็น ppm.) $\sum X = 0.25388$ $N = 21$ จากสูตร $\bar{X} = \frac{\sum X}{N}$ $= \frac{0.25388}{21}$ $= 0.01209$
2	0.07980	
3	0.00838	
4	0.02294	
5	0.00345	
6	0.00167	
7	0.00238	
8	0.00946	
9	0.00428	
10	0.00339	
11	0.00454	
12	0.00438	
13	0.00351	
14	0.00045	
15	0.01834	
16	0.00544	
17	0.00111	
18	0.04721	
19	0.00528	
20	0.00105	
21	0.00990	
$\sum$	0.25388	

ตาราง 15 แสดงข้อมูลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Cu ในตัวอย่างน้ำ
ที่เก็บในฤดูฝน

เบอร์ สารตัวอย่าง	X	วิธีการคำนวณหาค่าเฉลี่ย
1	0.00850	ให้ X แทนปริมาณธาตุ Cu (หน่วยเป็น ppm.) $\sum X = 0.09367$ $N = 21$ จากสูตร $\bar{X} = \frac{\sum X}{N}$ $= \frac{0.09367}{21}$ $= 0.00446$
2	0.00142	
3	0.00292	
4	0.00293	
5	0.00205	
6	0.00124	
7	0.00295	
8	0.00580	
9	0.00637	
10	0.00293	
11	0.00468	
12	0.00149	
13	0.00179	
14	0.00378	
15	0.00436	
16	0.00379	
17	0.01370	
18	0.00579	
19	0.00484	
20	0.00957	
21	0.00276	
Σ	0.09367	

ตาราง 16 แสดงข้อมูลการกำหนดค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Se ในตัวอย่างน้ำ
ที่เก็บในฤดูร้อน

เบอร์ สารตัวอย่าง	X	วิธีการกำหนดค่าเฉลี่ย
1	0.01200	ให้ X แทนปริมาณธาตุ Se (หน่วยเป็น ppm.) $\sum X = 0.24322$ $N = 21$ จากสูตร $\bar{X} = \frac{\sum X}{N}$ $= \frac{0.24322}{21}$ $= 0.01158$
2	0.01282	
3	0.00948	
4	0.01490	
5	0.01681	
6	0.00637	
7	0.00814	
8	0.00690	
9	0.00807	
10	0.01826	
11	0.01228	
12	0.01642	
13	0.00534	
14	0.00560	
15	0.01150	
16	0.01769	
17	0.01407	
18	0.00821	
19	0.01723	
20	0.01095	
21	0.01018	
$\sum$	0.24322	

ตาราง 17 แสดงข้อมูลการกำหนดค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Se ในตัวอย่างน้ำ
ที่เก็บในฤดูฝน

เบอร์ สารตัวอย่าง	X	วิธีการกำหนดค่าเฉลี่ย
1	0.01138	ให้ X แทนปริมาณธาตุ Se (หน่วยเป็น ppm.) $\sum X = 0.17379$ $N = 21$ จากสูตร $X = \frac{\sum X}{N}$ $= \frac{0.17379}{21}$ $= 0.00828$
2	0.00634	
3	0.00734	
4	0.01560	
5	0.00722	
6	0.00673	
7	0.00032	
8	0.00785	
9	0.01112	
10	0.00834	
11	0.00697	
12	0.00877	
13	0.00629	
14	0.00425	
15	0.00928	
16	0.00175	
17	0.01489	
18	0.00896	
19	0.00488	
20	0.00564	
21	0.00407	
$\sum$	0.17379	

ตาราง 18 แสดงข้อมูลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Hg
ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อนกับธาตุ Hg ในสารตัวอย่างน้ำ
ที่เก็บในฤดูฝน

เบอร์ สารตัวอย่าง	X	Y	XY	X ²	Y ²
1	0.01054	0.02202	0.00023	0.00011	0.00048
2	0.02024	0.01996	0.00040	0.00041	0.00039
3	0.02120	0.00275	0.00006	0.00045	0.00001
4	0.01805	0.03040	0.00055	0.00033	0.00092
5	0.00949	0.01352	0.00013	0.00009	0.00018
6	0.00921	0.01407	0.00011	0.00008	0.00014
7	0.01563	0.02165	0.00034	0.00024	0.00047
8	0.01725	0.02253	0.00039	0.00030	0.00051
9	0.01834	0.01214	0.00022	0.00034	0.00015
10	0.01771	0.00818	0.00014	0.00031	0.00007
11	0.01774	0.01325	0.00024	0.00032	0.00018
12	0.03477	0.00967	0.00034	0.00121	0.00009
13	0.01393	0.01917	0.00027	0.00019	0.00037
14	0.01213	0.01311	0.00016	0.00015	0.00017
15	0.03410	0.01965	0.00067	0.00116	0.00039
16	0.02284	0.02335	0.00053	0.00052	0.00055
17	0.02500	0.01135	0.00028	0.00063	0.00013
18	0.01118	0.03350	0.00037	0.00012	0.00112
19	0.01990	0.01541	0.00031	0.00040	0.00024
20	0.01862	0.03089	0.00058	0.00035	0.00095
21	0.02288	0.02612	0.00060	0.00052	0.00068
Σ	0.39075	0.38040	0.0692	0.0823	0.0819

ให้ X แทนปริมาณธาตุ Hg (หน่วยเป็น ppm.) ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในตุกร้อน

Y แทนปริมาณธาตุ Hg (หน่วยเป็น ppm.) ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในตุกเย็น

$$\sum X = 0.39075$$

$$\sum Y = 0.38040$$

$$\sum XY = 0.00692$$

$$\sum X^2 = 0.00823$$

$$\sum Y^2 = 0.00819$$

$$N = 21$$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากสูตร

$$\begin{aligned} r_{XY} &= \frac{N\sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{\{N\sum X^2 - (\sum X)^2\} \{N\sum Y^2 - (\sum Y)^2\}}} \\ &= \frac{(21 \times 0.00692) - (0.39075 \times 0.38040)}{\sqrt{\{(21 \times 0.00823) - (0.39075)^2\} \{(21 \times 0.00819) - (0.38040)^2\}}} \\ &= \frac{0.14532 - 0.14864}{\sqrt{(0.17283 - 0.15269)(0.17199 - 0.14470)}} \\ &= \frac{-0.00332}{0.02345} \\ &= -0.14158 \end{aligned}$$

∴ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Hg ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในตุกร้อน กับธาตุ Hg ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในตุกเย็นมีค่าเท่ากับ -0.14158

ตาราง 19 แสดงข้อมูลการคำนวณ ค่าความสัมพันธ์ของธาตุ As
ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน กับธาตุ As ในสารตัวอย่างน้ำ
ที่เก็บในฤดูฝน

เบอร์ สารตัวอย่าง	X	Y	XY	X ²	Y ²
1	0.00708	0.00476	0.00003	0.00005	0.00002
2	0.00936	0.00279	0.00003	0.00009	0.00001
3	0.00428	0.00397	0.00002	0.00002	0.00002
4	0.00061	0.00093	0.00000	0.00000	0.00000
5	0.00061	0.00377	0.00000	0.00000	0.00001
6	0.00030	0.00639	0.00000	0.00000	0.00004
7	0.00228	0.00853	0.00002	0.00001	0.00007
8	0.00375	0.00703	0.00003	0.00001	0.00005
9	0.00453	0.00680	0.00003	0.00002	0.00005
10	0.00480	0.00472	0.00002	0.00002	0.00002
11	0.00360	0.00169	0.00001	0.00001	0.00000
12	0.00586	0.00204	0.00001	0.00003	0.00000
13	0.00164	0.00105	0.00000	0.00000	0.00000
14	0.00165	0.00331	0.00001	0.00000	0.00001
15	0.00220	0.00197	0.00000	0.00001	0.00000
16	0.00270	0.00304	0.00001	0.00001	0.00001
17	0.00247	0.00383	0.00001	0.00001	0.00002
18	0.00628	0.00416	0.00003	0.00004	0.00002
19	0.01329	0.00056	0.00001	0.00018	0.00000
20	0.00184	0.00067	0.00000	0.00000	0.00000
21	0.02257	0.00045	0.00001	0.00051	0.00000
Σ	0.10170	0.07246	0.0028	0.0102	0.0035

ให้ X แทนปริมาณธาตุ As (หน่วยเป็น ppm.) ในสารตัวอย่างน้ำ
ที่เก็บในฤดูร้อน

Y แทนปริมาณธาตุ As (หน่วยเป็น ppm.) ในสารตัวอย่างน้ำที่
เก็บในฤดูฝน

$$\sum X = 0.10170$$

$$\sum Y = 0.07246$$

$$\sum XY = 0.00028$$

$$\sum X^2 = 0.00102$$

$$\sum Y^2 = 0.00035$$

$$N = 21$$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากสูตร

$$\begin{aligned} r_{XY} &= \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{\{N \sum X^2 - (\sum X)^2\} \{N \sum Y^2 - (\sum Y)^2\}}} \\ &= \frac{(21 \times 0.00028) - (0.10170 \times 0.07246)}{\sqrt{\{(21 \times 0.00102) - (0.10170)^2\} \{(21 \times 0.00035) - (0.07246)^2\}}} \\ &= \frac{0.00588 - 0.00737}{\sqrt{(0.02142 - 0.01034)(0.00735 - 0.00525)}} \\ &= \frac{-0.00149}{0.00447} \\ &= -0.33333 \end{aligned}$$

∴ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ As ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน
กับธาตุ As ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน มีค่าเท่ากับ - 0.33333

ตาราง 20 แสดงข้อมูลการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Cu
ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อนกับธาตุ Cu ในสารตัวอย่างน้ำ
ที่เก็บในฤดูฝน

เบอร์ สารตัวอย่าง	X	Y	XY	X ²	Y ²
1	0.01692	0.00850	0.00014	0.00029	0.00007
2	0.07980	0.00142	0.00011	0.00637	0.00000
3	0.00838	0.00292	0.00002	0.00007	0.00001
4	0.02294	0.00293	0.00007	0.00053	0.00001
5	0.00345	0.00205	0.00001	0.00001	0.00000
6	0.00167	0.00124	0.00000	0.00000	0.00000
7	0.00238	0.00295	0.00001	0.00001	0.00001
8	0.00946	0.00581	0.00006	0.00009	0.00003
9	0.00428	0.00637	0.00003	0.00002	0.00004
10	0.00339	0.00293	0.00001	0.00001	0.00001
11	0.00454	0.00468	0.00002	0.00002	0.00002
12	0.00438	0.00149	0.00001	0.00002	0.00000
13	0.00351	0.00179	0.00001	0.00001	0.00000
14	0.0045	0.00378	0.00000	0.00000	0.00001
15	0.01834	0.00436	0.00008	0.00034	0.00002
16	0.00544	0.00379	0.00002	0.00003	0.00001
17	0.00111	0.01370	0.00002	0.00000	0.00019
18	0.04721	0.00579	0.00027	0.00223	0.00003
19	0.00528	0.00484	0.00003	0.00003	0.00002
20	0.00105	0.00957	0.00001	0.00000	0.00009
21	0.00990	0.00276	0.00003	0.00010	0.00001
Σ	0.25388	0.09367	0.00096	0.01018	0.00058

ให้ X แทนปริมาณธาตุ Cu (หน่วยเป็น ppm.) ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูแล้ง

Y แทนปริมาณธาตุ Cu (หน่วยเป็น ppm.) ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน

$$\Sigma X = 0.25388$$

$$\Sigma Y = 0.09367$$

$$\Sigma XY = 0.00096$$

$$\Sigma X^2 = 0.01018$$

$$\Sigma Y^2 = 0.00058$$

$$N = 21$$

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากสูตร

$$\begin{aligned} &= \frac{N \Sigma XY - \Sigma X \Sigma Y}{\sqrt{\{N \Sigma X^2 - (\Sigma X)^2\} \{N \Sigma Y^2 - (\Sigma Y)^2\}}} \\ &= \frac{(21 \times 0.00096) - (0.25388 \times 0.09367)}{\sqrt{\{ (21 \times 0.01018) - (0.25388)^2 \} \{ (21 \times 0.00058) - (0.09367)^2 \}}} \\ &= \frac{0.02016 - 0.02378}{\sqrt{(0.21378 - 0.06446)(0.01218 - 0.00877)}} \\ &= \frac{-0.00363}{0.02258} \\ &= -0.16032 \end{aligned}$$

∴ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Cu ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูแล้ง กับธาตุ Cu ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน มีค่าเท่ากับ -0.16032

ตาราง 21 แสดงข้อมูลค่าความถ่วงถ่วงที่มีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ของธาตุ Se

ในสารตัวอย่างน้ำ ที่เก็บในฤดูร้อน กับธาตุSe ในสารตัวอย่างน้ำ
ที่เก็บในฤดูฝน

เบอร์ สารตัวอย่าง	X	Y	XY	X ²	Y ²
1	0.01200	0.01138	0.00014	0.00014	0.00013
2	0.01282	0.00634	0.00008	0.00016	0.00004
3	0.00948	0.00734	0.00007	0.00009	0.00005
4	0.01490	0.01560	0.00023	0.00022	0.00024
5	0.01681	0.00722	0.00012	0.00028	0.00005
6	0.00637	0.00673	0.00004	0.00004	0.00005
7	0.00814	0.00032	0.00000	0.00007	0.00000
8	0.00690	0.00785	0.00005	0.00005	0.00006
9	0.00807	0.01112	0.00009	0.00007	0.00012
10	0.01826	0.00834	0.00015	0.00033	0.00007
11	0.01228	0.00697	0.00009	0.00015	0.00005
12	0.01642	0.00877	0.00014	0.00027	0.00008
13	0.00534	0.00629	0.00003	0.00003	0.00004
14	0.00560	0.00425	0.00002	0.00003	0.00002
15	0.01150	0.00923	0.00011	0.00013	0.00009
16	0.01755	0.01755	0.00031	0.00031	0.00031
17	0.01407	0.01489	0.00021	0.00020	0.00022
18	0.00821	0.00896	0.00007	0.00007	0.00008
19	0.01723	0.00488	0.00008	0.00030	0.00002
20	0.01095	0.00564	0.00006	0.00012	0.00003
21	0.01018	0.00407	0.00004	0.00010	0.00002
Σ	0.24322	0.17379	0.00213	0.00316	0.00177

ให้ X แทนปริมาณธาตุ Se (หน่วยเป็น ppm.) ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บ
ในฤดูร้อน

แทนปริมาณธาตุ Se (หน่วยเป็น ppm.) ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บใน
ฤดูฝน

$$X = 0.24322$$

$$Y = 0.17379$$

$$XY = 0.00213$$

$$X^2 = 0.00316$$

$$Y^2 = 0.00177$$

$$N = 21$$

คำนวณหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากสูตร

$$\begin{aligned} r_{XY} &= \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \\ &= \frac{(21 \times 0.00213) - (0.24322 \times 0.17379)}{\sqrt{[(21 \times 0.00316) - (0.24322)^2][(21 \times 0.00177) - (0.17379)^2]}} \\ &= \frac{0.04473 - 0.04227}{\sqrt{(0.06636 - 0.05916)(0.03717 - 0.03020)}} \\ &= \frac{0.00246}{0.00707} \\ &= 0.34795 \end{aligned}$$

∴ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Se ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูร้อน
กับธาตุ Se ในสารตัวอย่างน้ำที่เก็บในฤดูฝน มีค่าเท่ากับ 0.34795

ประวัติของผู้เขียน

ผู้เขียนเกิดวันจันทร์ที่ 11 กันยายน 2493 ตรงกับปีชวด ณ บ้านเลขที่ 25 ตำบลไร่ขิง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม บิดาชื่อนายประทีป เสถียรยานนท์ มารดาชื่อนางเสมอ เสถียรยานนท์

ประวัติการศึกษา

- | | |
|------|--|
| 2503 | ชั้นประถมศึกษาปีที่ 4 จากโรงเรียนวัดท่าพุท (นครผลประชานุถด)
จังหวัดนครปฐม |
| 2509 | ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3 จากโรงเรียนวัดราชโอรส จังหวัด
กรุงเทพมหานคร |
| 2511 | ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 แผนกวิทยาศาสตร์ จากโรงเรียนวัดราชโอรส
จังหวัดกรุงเทพมหานคร |
| 2514 | การศึกษามัธยมศึกษา (เกียรตินิยม) เคมี-คณิตศาสตร์ จากมหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ บางแสน จังหวัดชลบุรี |
| 2515 | ภาควิชาชีวเคมี มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดกรุงเทพมหานคร |
| 2516 | เข้าศึกษาตามหลักสูตรการศึกษามัธยมศึกษา (เคมี) ณ มหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร จังหวัดกรุงเทพมหานคร |