

การหาปริมาณปรอทในน้ำทะเลโดยวิธีวิเคราะห์แบบ Destructive Neutron Activation

ปริญญานิพนธ์

ของ

สุนทร สุวรรณโณ

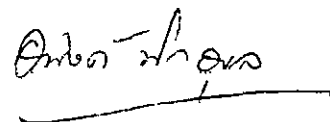
THE LIBRARY
COLLEGE OF EDUCATION
BANGKOK, THAILAND

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต

7 มีนาคม 2518

คณะกรรมการที่ปรึกษาประจำคณะนิติศาสตร์ได้พิจารณาปัญหานี้แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นประเด็นหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิชาการศึกษาทางนิติศาสตร์
ของมหาวิทยาลัย ไค.



ประธาน



กรรมการ

7 มีนาคม 2518

ประกาศคุณูปการ

การทำปริญญานิพนธ์ครั้งนี้ ได้รับความช่วยเหลือจากกองเคมี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงอุตสาหกรรม และได้รับคำแนะนำช่วยเหลือจาก อาจารย์ ม.ฉ.อนงค์ นิลอุบล หัวหน้ากองเคมี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ อาจารย์สมเกียรติ กรีทอง แผนกเคมี คณะวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ คุณเชาน์ รอดทองคำ นักวิทยาศาสตร์ กองเคมี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ผู้เขียนขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย.

สุนทร สุวรรณโณ

สารบัญ

บทที่	หน้า
๑ บทนำ	๑
คำนำ	๑
ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า	๔
ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า	๕
ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า	๖
คำจำกัดความและศัพท์เฉพาะ	๖
เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค้นคว้า	๗
๒ ทฤษฎี	๑๔
ทฤษฎีการวิเคราะห์แบบนิรนัยและอุปนัย	๑๔
๓ เครื่องมือและวิธีดำเนินการ	๒๔
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	๒๔
วิธีดำเนินการ	๓๕
๔ การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง	๕๑
สถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล	๕๑
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	๕๓
๕ บทขอ สรุป และขอเสนอแนะ	๕๖
บรรณานุกรม	๕๘
ภาคผนวก	๖๔

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
๑ แสดงคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของปรอท	๓๕
๒ แสดงการหาค่าเฉลี่ย (μ) และ Standard diviation (๑)	๕๒
๓ แสดงข้อมูลเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับ Literature	๕๔
๔ ข้อมูลการหาน้ำหนักน้ำทะเลที่ใช้วิเคราะห์	๖๕
๕ ข้อมูลการคำนวณหาปริมาณปรอท	๖๗
๖ ข้อมูลแสดงปริมาณปรอทเป็นไมโครกรัมในน้ำทะเล ๑ กรัม	๖๘

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
๑ แสดงหลักการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน	๑๗
๒ แสดงวิธีหา Total count rate จากกราฟ γ -ray spectrum	๒๗
๓ แสดงแผนผังการทำงานและส่วนประกอบของเครื่องวัดรังสี Ge (Li) - detector	๓๑
๔ ภาพเครื่องวัดรังสี Multichannel Analyzer และหัววัด Ge (Li)	๓๒
๕ แสดงแผนผังการทำงานและส่วนประกอบของ NaI (Tl) - Detector	๓๓
๖ ภาพแสดงเครื่องวัดรังสี Multichannel Analyzer และหัววัด NaI (Tl)	๓๔
๗ แสดง γ -ray spectrum ของ Hg^{203} จากคู่มือ	๓๗
๘ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง γ -ray Energy กับ Channel number ของ NaI (Tl) - Detector	๔๐
๙ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง γ -ray Energy กับ Channel number ของ Ge (Li) - Detector	๔๑
๑๐ แสดงเครื่องมือสำหรับกลั่นปรอท	๔๓
๑๑ แสดง γ -ray Spectrum ของ Hg^{203} วัดด้วยเครื่องวัดรังสี Ge (Li) - Detector หลังจากทำ Chemical Separation แล้ว	๔๕
๑๒ กราฟแสดงการทำ Half-Life ของ Hg^{203} (๔๗.๐ วัน)	๔๖
๑๓ แสดง Spectrum ของ Hg^{203} ในสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับ สารมาตรฐาน	๔๘

บทที่ 1

บทนำ

คำนำ

ความเจริญทางคาบวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในปัจจุบัน ได้ก่อให้เกิดปัญหาสภาพแวดล้อมเป็นพิษ ซึ่งเป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ เป็นอันมาก ปัญหาสภาพแวดล้อมเป็นพิษอันเนื่องมาจากธาตุโลหะหนักต่าง ๆ ก็กำลังเป็นปัญหาสำคัญ ซึ่งได้มีการศึกษาค้นคว้ากันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งปรอทซึ่งพบว่าเป็นธาตุที่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ มาก ไม่ว่าจะเป็นอยู่ในรูปโลหะปรอทหรือสารประกอบของปรอท ทั้งนี้เนื่องจากปรอทสามารถเข้าไปสะสมอยู่ในเซลล์หรือเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตได้นาน ได้มีการทดลองฉีดสารปรอทเข้าไปในร่างกายของคน พบว่าต้องใช้เวลานานถึง 70 วัน ปริมาณของปรอทในกระแสโลหิตจึงลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง (1) (3)

ความเป็นพิษ (Toxicity) ของสารประกอบปรอทแต่ละตัวนั้นมีมากน้อยต่างกัน ขึ้นอยู่กับการละลายและความสามารถในการดูดซึมของลำไส้ (2) แอลกิล เมอคิวรี (Alkyl mercury) เป็นสารประกอบของปรอทที่มีพิษร้ายแรงมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมทิลเมอคิวรี (Methyl mercury) เพราะวาลำไส้สามารถดูดซึมได้ดี

ปรอทและสารประกอบปรอทสามารถเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง เช่นทางปาก โดยเข้าไปกับอาหาร ยารักษาโรคต่าง ๆ ทางลมหายใจโดยการหายใจเอาอากาศที่มีไอปรอทหรือสารประกอบปรอทเข้าไป เนื่องจากปรอทมีความคงทนสูงมาก แม้ว่าจะถูกอนุมิต่ำก็สามารถระเหยได้ดี (2) ทางผิวหนัง โลหะปรอทและสารประกอบของมันสามารถซึมผ่านผิวหนังหรือบาดแผลเข้าสู่กระแสโลหิตได้

เมื่อปรอทเข้าสู่ร่างกาย จะเข้าสู่กระแสโลหิตและเข้าไปจับกับโคเอนไซม์ เอ (Coenzyme-A) เพราะวาลโคเอนไซม์ เอ มีหมู่ซัลไฟดริล (-SH) อยู่ โคเอนไซม์ประกอบ CoA-Hg-SH ซึ่งจะมาร่วมตัวกับกรดไพรูวิก (6) ดังนั้นเซลล์จะเปลี่ยน Acetyl-CoA

เป็นกรรมเลศคึกทำให้กลามเนือเมือยลา มีสภาพเป็นกรรมมากขึ้น และทำให้เชลตายในที่สุด(3)(7)

อาการของพิษปรอทที่มีต่อมนุษย์นั้น อาจจะแตกต่างกันไปบ้างเล็กน้อย เช่น มีแผลพุพอง ที่แก้ม ปาก บริเวณเหงือก ฟันหลุด ปวดท้อง กลืนเห็น อาเจียน เจ็บหน้าอก ปวดศีรษะอย่างมาก มีอาการเรื้อรังทางระบบประสาท ความจำเสื่อม เบื่ออาหาร มีกลิ่น เพื่อไม่ให้คลิตี สำหรับผู้ป่วยที่ได้รับสาร เมทิลเมอคิวรี ถ้าได้รับมากจะมีอาการคล้ายโรคพิษสุนัขบ้า เพราะพิษปรอทจะทำลายสมองที่เกี่ยวข้องกับความจำ ความรู้สึกนึกคิด การมองเห็น การได้ยิน การเคลื่อนไหว ซึ่งโรคพิษปรอทนี้สามารถติดต่อกันทางพันธุกรรมได้

รายงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับโรคพิษปรอท เมื่อปี ค.ศ. 1810 เรือสินค้าลำหนึ่งซึ่งมีลูกเรือประมาณ 200 คน ขณะที่กำลังเดินทางนั้นมีคนทำปรอทตกลงมาแตกกระจายบนพื้นเรือ ปรากฏว่าในเวลาต่อมามีคนลูกเรือเสียชีวิต 3 คน และยังมีคน วัว ควาย บนเรือเสียชีวิตอีกหลายตัว

เมื่อวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 1970 รัฐบาลแคนาดาประกาศห้ามจำหน่ายปลาที่จับจากทะเลสาบเซนต์แลล (4) เนื่องจากตรวจพบว่ามีปริมาณปรอทมากเกินไปจนเป็นพิษ

ในปี ค.ศ. 1953 - 1961 ชาวประมงญี่ปุ่นซึ่งอาศัยอยู่รอบ ๆ อ่าวมินามาตา ได้เกิดเป็นโรคพิษปรอทมีอาการอย่างรุนแรงถึง 121 คน ตาย 46 คน ทั้งนี้เนื่องจากจับประมงปลาที่จับได้บริเวณอ่าวมินามาตา ซึ่งมีโรงงานพลาสติกตั้งอยู่ และโรงงานนี้ปล่อยน้ำทิ้งซึ่งมีเกลือ-คลอไรด์ของปรอทจำนวนมากลงในอ่าวมินามาตา ทำให้ปลาบริเวณนั้นได้รับปรอทเข้าไปสะสมอยู่มาก เมื่อคนรับประทานปลาทำให้เกิดโรคพิษปรอทขึ้น ในปีเดียวกันนั้นที่เมืองนิอิกิตา ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกัน มีผู้ป่วยด้วยโรคพิษปรอทถึง 47 คน ตาย 6 คน (4)

เมื่อปี ค.ศ. 1956 ที่หมู่บ้านแห่งหนึ่งในประเทศอิรัก ใช้สารประกอบของปรอท พืชอาหาร ต้มอาหารที่มีผู้ป่วยด้วยโรคพิษปรอท 100 คน ตาย 14 คน ต่อมาในปี ค.ศ. 1960 มีชาวบ้านแห่งหนึ่งของอิรักเอาเมล็ดข้าวสาลีซึ่งเคลือบสารปรอทกันเชื้อรา มาบริโภค ทำให้มีผู้ป่วยเป็นโรคพิษปรอทถึง 221 คน ตาย 22 คน

ค.ศ. 1973 ดร. วัสโก วิจัยพบว่าปริมาณสารประกอบเมทิลเมอคิวรีในปลาจะมีมากขึ้นขึ้นอยู่กับอายุของปลา การรับประทานปลาที่มีปรอทมากก็จะทำให้เกิดโรคพิษปรอทได้ (5)

องค์การอาหารและยาแห่งสหประชาชาติ กำหนดให้อาหารและยามีปรอทได้ไม่เกิน-

0.5 ส่วนในล้านส่วน น้ำดื่มไม่เกิน 0.005 ส่วนในล้านส่วน และมีขีดปลอดภัยในการบริโภคของคนไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อวัน (6)

การกระจายของปรอทเข้าสู่สิ่งแวดล้อมนั้นสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งปรอทจะเกิดในรูปสารประกอบเกลือซัลไฟด์ (HgS) พบอยู่ในดิน หิน และสินแร่ที่เรียกว่าหินบาร เมื่อหินเหล่านี้ถูกน้ำกัดเซาะปรอทก็จะละลายปนมากับน้ำ ลงไปสะสมอยู่ในทะเล ซึ่งมีอัตราการเพิ่มไม่มากนัก (4) แต่การกระจายของปรอทเข้าสู่สภาพแวดล้อมโดยการกระทำของมนุษย์นั้นมีอัตราการเพิ่มสูงมาก

Klein และ Goldberg (1970) รายงานว่ามนุษย์ปล่อยปรอทเข้าสู่สิ่งแวดล้อมโดยไม่สามารถควบคุมได้ถึงปีละ 400 ตัน ซึ่งเกิดจากการนำปรอทไปใช้ในงานอุตสาหกรรม อุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ และอื่น ๆ (8) นอกจากนี้ยังเกิดจากปรอทซึ่งมีอยู่ในน้ำมันดิบ, ถ่านหิน เมื่อมนุษย์เอาทรัพยากรเหล่านี้มาใช้เป็นเชื้อเพลิง ปรอทที่ปนอยู่ก็จะถูกเผาไหม้และระเหยเป็นไอเข้าสู่บรรยากาศ

Dean, Bosqui และ Lanouette (1972) ได้ค้นคว้าหาวิธีแยกธาตุพวกโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งและรายงานว่า น้ำทิ้งจากโรงงานที่พบว่ามีปรอทได้แก่ โรงงานกระดาษ โรงงานผลิตสารเคมี โรงงานพลาสติก โรงงานผลิตโซดาไฟ และคลอรีน โรงกลั่นน้ำมัน โรงงานถลุงเหล็ก โรงงานผลิตเครื่องจักร เครื่องบิน โรงงานผลิตแก้วและอื่น ๆ

จากการสำรวจการใช้ปรอทตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900 - 1970 พบว่ามนุษย์ใช้ปรอทไปในงานต่าง ๆ รวม 163 ล้านปอนด์ (10) และในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ปริมาณปรอทในสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น 4 ถึง 6 ล้านปอนด์ ในปี ค.ศ. 1969 โรงงานผลิตก๊าซคลอรีนและโซดาไฟจากน้ำทะเล ปล่อยปรอทเข้าสู่สิ่งแวดล้อมถึง 1.2 ล้านปอนด์ โดยสูญหายไปเนื่องจากใช้ปรอทเป็นขั้วไฟฟ้าในกระบวนการแยกโซเดียมและคลอรีนด้วยไฟฟ้า

จากแผนผังแสดงความสัมพันธ์ของการกระจายของปรอทในสิ่งแวดล้อม และอิทธิพลที่มีต่อระบบนิเวศวิทยา ซึ่งออกแบบโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ (11) สรุปได้ว่าปรอทซึ่งปล่อยมากับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องมือและอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ เครื่องใช้ภายในบ้าน จากที่ใช้เป็นยาฆ่าแมลงหรือเวชภัณฑ์ในทันตกรรม จะถูกละลายไปสะสมอยู่ในน้ำ และไหล-

ลงสู่ทะเล พรอทจะสะสมอยู่ในน้ำทะเล ปลา และสัตว์ทะเลอื่น ๆ เมื่อมารับประทานปลาเหล่านี้ ก็อาจพลอยได้รับพิษจากพรอท นอกจากนั้นแผนผังยังแสดงการกระจายของพรอทไปสู่อาหาร น้ำดื่ม น้ำใช้และพืชผล การเปลี่ยนจากพรอทไปเป็นสารประกอบแอลคิลเมอคิวรีนั้น อาศัยแมคทีเรีย เป็นตัวช่วย ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าพรอทมาจากแหล่งต่าง ๆ ทั้งจากธรรมชาติและจากมนุษย์ ส่วนใหญ่ ก็จะถูกฝน น้ำพัดพาไปสะสมอยู่ในทะเล ดังนั้นปริมาณพรอทในน้ำทะเลจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

มนุษย์กำลังทำลายแหล่งอาหาร อันอุดมสมบูรณ์ของตัวเอง โดยไม่รู้ตัว มนุษย์หวังไว้ว่า เมื่อประชากรของโลกเพิ่มขึ้น พื้นที่ไม่เพียงพอผลิตอาหารได้ทันกับความต้องการ ก็จะใช้ ทองทะเลอันกว้างใหญ่ไพศาลและอุดมสมบูรณ์ช่วยผลิตอาหารอีกแรงหนึ่ง

อ่าวไทยเป็นอ่าวที่มีลักษณะ เกือบปิดกระแสน้ำในอ่าวไทยจะไหลวนเวียนไม่สามารถ ระบายออกไปสู่ทะเลเปิดได้สะดวก เพราะฉะนั้นถ้าปริมาณพรอทในอ่าวไทยสูงถึงขีดอันตราย ประเทศไทยจะประสบปัญหาขาดแคลนอาหารทะเลและผลิตภัณฑ์ทะเลอื่น ๆ ที่ได้จากอ่าวไทย ไปนานนับสิบปี ถ้าพรอทจะถูกกำจัดไปโดยธรรมชาติซึ่งอาศัยแมคทีเรียเป็นตัวช่วย

จากรายงานการศึกษาและสำรวจภาวะน้ำเสียในอ่าวไทยตอนบน ของคณะอนุกรรมการ การสำรวจน้ำเสียในอ่าวไทย ระหว่างวันที่ 11 - 13 เมษายน 2516 (12) พบว่ามีบางจุด ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะเกิดน้ำเสีย เช่นบริเวณถ้ำกลีบบัวปากแม่น้ำ พบคัตที่ในตะกอนสูง พบพรอทใน ปลาแปนเนื้อมากที่สุด 0.031 ส่วนในล้านส่วน ฉลามทูนมีคัตที่สูงถึง 0.103 ส่วนในล้านส่วน พบปลาหมึกกล้วยที่จับได้บริเวณกลางอ่าวมีพรอทสูงถึง 0.025 ส่วนในล้านส่วน นอกจากนั้นยังพบ ชาติบางชนิดที่เป็นสาเหตุทำให้หน้าเสียและเป็นพิษ เช่น สังกะสี โคร โหมยม เงิน ทองแดง แคลเซียม นิเกิล ตะกั่ว และยังพบว่าสัตว์น้ำในอ่าวไทยมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด และสัตว์ ทะเลที่จับได้บางจุดมีลักษณะผิดปกติเช่นมีตัวสีดำ ซึ่งอาจจะเนิ่นความเน่าเสียของน้ำทะเลในระยะ เริ่มต้นก็ได้

เนื่องจากธาตุที่เป็นพิษในน้ำทะเลโดย เฉพาะอย่างยิ่งพรอทนั้นมีปริมาณน้อยมาก เพราะ ฉะนั้นวิธีวิเคราะห์จะต้องมีความไวสูง (High sensitivity) มีความถูกต้อง (accurate) และวิธีการวิเคราะห์ต้องไม่ผ่านกระบวนการที่ยูยากสลับซับซ้อน เพื่อป้องกันการเปื้อน (Contaminated) หรือสูญหายไปซึ่งจะทำให้ได้ผลผิดพลาด

✓ การวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน เป็นวิธีที่มีความไวสูง (13) (14) การประกอบ-
เป็นระหว่างการทดลองมีน้อยมาก วิธีการไม่ยุ่งยากสลับซับซ้อน วิเคราะห์ได้รวดเร็ว (29) ✓

แต่ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันนั้น จะมีกัมมันตภาพรังสีจาก Na^{24} อยู่มาก เพราะว่ามีน้ำทะเลมีโซเดียมมาก เมื่อถูก Bombard ด้วยนิวตรอน จะเกิดเป็นโซเดียมกัมมันตรังสีโคบาย (15) ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ปรอทในน้ำทะเลโดยวิธี Non-destructive NAA ได้ ต้องหาวิธีแยกเอาปรอทออกมาจากตัวรบกวนแล้วทำให้บริสุทธิ์ก่อน จากนั้นจึงนำไปวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีของปรอทเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ก็จะทราบปริมาณได้

ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า

1. เพื่อค้นคว้าหาเทคนิคการวิเคราะห์ปรอทในน้ำทะเลโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน
2. เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณปรอทในน้ำทะเล
3. เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาเสียในอ่าวไทย ตามโครงการสำรวจน้ำเสียในอ่าวไทยตอนบน ของคณะกรรมการ การสำรวจน้ำเสียในอ่าวไทย คณะกรรมการวิทยาศาสตร์ทางทะเลแห่งชาติ

ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า

1. ผลของการศึกษาค้นคว้าจะทำให้ได้เทคนิคและขั้นตอนการในการวิเคราะห์หาปรอทในน้ำทะเลโดยวิธี Destructive neutron activation analysis
2. ผลของการศึกษาค้นคว้าจะทำให้ทราบปริมาณปรอทในน้ำทะเลตรงบริเวณสถานที่เก็บมาทดลอง ซึ่งจะได้นำไปเป็นแนวทางในการกำหนดวิธีการเก็บน้ำตัวอย่าง ตลอดจนกำหนดสถานที่เก็บต่อไป
3. ผลของการศึกษาค้นคว้า จะเป็นแนวทางที่ใช้พยากรณ์แหล่งที่มาของปรอท เพื่อหาทางแก้ไข มีในน้ำทะเลมีปริมาณของปรอทเกินขนาดที่อนุญาตให้มีได้
4. ผลของการศึกษาค้นคว้าจะทำให้ได้ความรู้ ความเข้าใจในทฤษฎี และภาคปฏิบัติในการวิเคราะห์แบบ Neutron activation analysis

5. เทคนิคและขบวนการที่ได้จากการค้นคว้าครั้งนี้ จะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์น้ำหนักโดยวิธี Neutron activation analysis

ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า

1. ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จะใช้เฉพาะวิธีวิเคราะห์แบบ Destructive neutron activation เท่านั้น
2. ในการใช้วิธีทางเคมีแยกปรอทออกจากสารตัวอย่างและการทำให้บริสุทธิ์นั้น จะเลือกใช้วิธีที่เสียค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด สามารถแยกปรอทได้บริสุทธิ์ วิธีการไม่ยุ่งยากซับซ้อน เพื่อจะได้ไม่เสียเวลาถ้าจะมีการวิเคราะห์สารตัวอย่างมาก ๆ
3. น้ำหนักตัวอย่างนั้น ทางคณะกรรมการสำรวจนำเสียในอ่าวไทยตอนบนเก็บให้พร้อมกับกลุ่มตัวอย่างอื่น ๆ ของที่ออกสำรวจ
4. การวิเคราะห์ครั้งนี้จะวิเคราะห์เฉพาะธาตุปรอทเท่านั้น

คำจำกัดความและศัพท์เฉพาะ

1. การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชัน (NAA) หมายถึงการวิเคราะห์โดยการยิง (bombard) นิวเคลียสของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์โดยอนุภาคนิวตรอน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุขึ้น (Nuclear reaction) อะตอมของธาตุเหล่านั้นจะเปลี่ยนเป็นไอโซโทปของธาตุเดิม หรือธาตุใหม่ซึ่งไอโซโทปที่เกิดขึ้นส่วนมากจะเป็นไอโซโทปที่มีรังสี (Radioisotope) เมื่อวัดปริมาณของรังสีเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ก็จะทราบปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างได้
2. Destructive NAA หมายถึงวิธีวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยการนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอบรังสีนิวตรอน แล้วใช้วิธีการทางเคมีแยกและทำให้สารกัมมันตรังสีที่ต้องการวิเคราะห์บริสุทธิ์ แล้วนำไปวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสี เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ก็จะทราบปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างได้
3. Non-destructive NAA หมายถึงวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยการนำสารตัวอย่างเข้าอบรังสีนิวตรอนพร้อมกับสารมาตรฐาน แล้วนำไปวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสี

เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการทางเคมี

4. ppm. (Part per milliton) หมายถึงอัตราส่วนเปรียบเทียบปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง ปริมาณธาตุ 1 ppm. หมายความว่าในสารตัวอย่าง 1 ล้านส่วนจะมีธาตุนั้น 1 ส่วนโดยน้ำหนัก

5. ppb. (Part per billton) หมายถึงอัตราส่วนเปรียบเทียบปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง ปริมาณธาตุ 1 ppb. หมายความว่า ในสารตัวอย่าง 1000 ล้านส่วน จะมีธาตุนั้น 1 ส่วนโดยน้ำหนัก

6. น้ำเสีย หมายถึงน้ำที่มีธาตุเป็นพิษละลายอยู่มากจนเกินระดับปลอดภัย และสามารถจะทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์หรือสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ได้

7. NaI (Tl) - Detector หมายถึงเครื่องมือสำหรับวัดกัมมันตภาพรังสี โดยใช้ผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (NaI) ซึ่งแอดติเวตด้วยเทลลูเรียม (Tl) เป็นหัววัดรังสี ใช้ประกอบกับ 128 multichannel pulse height analyzer model 110

8. Ge (Li) - Detector หมายถึงเครื่องมือสำหรับวัดกัมมันตภาพรังสี โดยใช้ผลึกเจอร์เมเนียม (Ge) ซึ่งแอดติเวตด้วยลิเทียม (Li) เป็นหัววัดรังสี ใช้ประกอบอยู่กับ 1024 multichannel pulse height analyzer (PHA)

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค้นคว้า

รายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ปรอทในน้ำทะเลและสิ่งแวดล้อมอื่น โดยวิธีวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอดติเวชันนี้ดังนี้

Sjostrand (1964) ทำการวิเคราะห์หาปรอทและสารหนูในสารตัวอย่างทางชีววิทยาโดยวิธีวิเคราะห์แบบ Destructive NAA (16) โดยการเอาสารตัวอย่างไปอบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู มี neutron flux ประมาณ 10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที โดยสารหนูใช้เวลา 30 นาที ส่วนปรอทใช้เวลา 14 ชั่วโมง แล้วเอาสารตัวอย่างมาแยกเอาสารหนูและปรอทออกโดยวิธีกลั่นออกมาในรูป $HgCl_2$ ที่อุณหภูมิระหว่าง $210 - 250^{\circ}C$ จากนั้นนำเอาสารที่กลั่นได้มาทำให้เป็นกลางด้วยแอมโมเนีย

แล้วตกตะกอนปรอทโดยผ่านก๊าซ H_2S ลงไป จะให้ตะกอน HgS ซึ่งมีสีดำ กรองออก แล้วทำให้แห้งด้วยแสงอินฟราเรด นำไปวัดปริมาณรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 0.077 Mev. ของ Hg^{197}

Suchat Mongkol phantha และคณะ (1973) ได้ใช้วิธีนิวตรอนแอคติเวชัน วิเคราะห์หาธาตุที่มีปริมาณอยู่ใน Standard kale (17) พบว่า Al, Ca, Mg, Cl, Mn, K, Na, Br, Fe, Zn, Ag และ Co สามารถวิเคราะห์โดยวิธี Non-destructive NAA สำหรับ Cu, As และ Hg ต้องใช้วิธีทางเคมีแยกออกเสียก่อน ส่วนปรอทนั้นใช้เวลาอบรังสี 14 ชั่วโมง มี neutron flux 10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที แล้วทิ้งให้สลายตัว 7 วัน แล้วนำเอามา digest ด้วย $H_2SO_4 + HNO_3$ (1:10) reflux ที่อุณหภูมิสูงกว่า $300^\circ C$ เติม $HClO_4 + glycine$ กลั่นปรอทออกมาในรูป $HgCl_2$ ที่อุณหภูมิ $250^\circ C$ ตกตะกอนเป็น HgS โดยผ่าน H_2S จากนั้นนำตะกอนไปวัดรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 0.279 Mev. ด้วย NaI (Tl) - Detector พบว่าใน Standard kale มีปรอท 0.1850 ± 0.0103 ไมโครกรัมต่อสารตัวอย่าง 1 กรัม

✓ Becknell, D.E. และคณะ (1971) ทำการวิเคราะห์ปรอทในน้ำโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน (18) โดยเติม HCl ที่มีความเข้มข้น 0.1 N ลงไปในน้ำตัวอย่าง เพื่อให้ปรอทเกิดเป็น $HgCl_2$ แล้วเอาสารตัวอย่างนี้ไปผ่าน Resin-load paper เบอร์ SB-2 โดยผ่าน 7 ครั้ง ปรอทจะถูกจับติดบนกระดาษ Resin ถึง 99% นำไปฝังลงไม้แห้ง จากนั้นเอาไปอบรังสีนิวตรอนที่มี neutron flux 1.3×10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้สลายตัว $3 - 4$ วัน จากนั้นจึงเอาไปวัดรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 0.077 Mev. ของ Hg^{197} ด้วย Ge (Li) - Detector พบว่าในน้ำมีปรอท $0.03 - 2 \text{ ppb.}$ เขากล่าวว่าสามารถวิเคราะห์ปรอทได้ต่ำสุดถึง 0.005 ไมโครกรัม วิธีนี้สามารถแยกปรอทออกจาก Na^{24} ได้ 100% และสามารถแยกโบรมีนออกได้ถึง 75%

Eiliv, Steinnes และ Oddvar, Johansen (1970) ทำการวิเคราะห์ปรอทโดยวิธีวิเคราะห์แบบ Destructive NAA (19) โดยการหึ่งสารตัวอย่างใส่ Silica ampoule เน้นด้วยความระมัดระวังให้สนิท แล้วเอาไปอบรังสีซึ่งมี neutron flux ประมาณ

2×10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 3 วัน แล้วทิ้งให้ธาตุเพิ่มครึ่งชีวิตสั้น ๆ สลายตัวเป็นเวลา 3 วัน เติม Carrier Hg แล้วนำมาละลายใน mixture ของ $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$ ปรับ pH ประมาณ 8 - 9 ด้วยแอมโมเนีย ตกตะกอนปรอทโดยเติม Thioacetamide ลงไปจะตกตะกอน HgS ทิ้งให้ปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์ประมาณ 2 ชั่วโมง จึงกรองเอาตะกอน HgS ไปวัดรังสีแกมมาพลังงาน 70 KeV. ของ Hg^{197} โดยใช้ 400 multichannel γ - Spectrometer

Ljunggren และคณะ (1970) ทำการวิเคราะห์ปรอทโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน (20) พบว่าสามารถวิเคราะห์ปรอทในน้ำได้โดยมีความไวถึง 0.03 ng/g โดยใช้น้ำตัวอย่างที่วิเคราะห์ 10 มิลลิลิตร การทดลองนำตัวอย่างควบกระดากกรอง เขาเสนอว่า อาจจะมีปรอทในกระดากกรองเปื้อนน้ำได้ ถ้าสารตัวอย่างเป็นสารอินทรีย์ให้ละลายในกรด HF เมื่อละลายหมดแล้วก็ทำให้เจือจางด้วยน้ำ เติม carrier ปรอท แล้วตกตะกอนเป็น HgS ด้วย H_2S ล้างตะกอนแล้วละลายใหม่ด้วยกรดผสม $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$ อัตราส่วน 9:1 ซึ่งมีกรด HCl 2 - 3 หยด แล้วทำให้เป็นกลางด้วยด่าง ตกตะกอนเป็น HgS นำไปวัดรังสีวิเคราะห์หาปริมาณ

Weiss, Herbert V. และคณะ (1972) ทำการวิเคราะห์หาปรอทในน้ำทะเลโดยวิธี Destructive NAA (21) โดยทำน้ำตัวอย่างให้เป็นกรด เติมสารละลายของ Cu carrier ลงไป แล้วผ่าน H_2S ซึ่ง CuS จะตกตะกอน กรองล้างด้วยกรด HNO_3 เจือจาง แล้วนำเอาตะกอน CuS ใส่ขวดโพลีเอทิลีน แล้วเอาไปอบรังสีที่มี neutron flux ประมาณ 2×10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เอาสารตัวอย่างที่อบรังสีแล้วนี้มาเติม carrier ปรอท ปรับ pH ด้วย NH_3 ประมาณ 1 - 2 แล้วเติมสารละลาย SnCl_2 (Sn 10 กรัมใน 30 มิลลิลิตร ของ HCl เข้มข้น) 5 มิลลิลิตร เอาสารละลายที่ได้ไปเข้าเครื่อง centrifuged แยกตะกอนออกมาละลายในกรดกลักทอน 5 - 10 มิลลิลิตร เติม carrier ทองแดงลงไป 10 มิลลิกรัม แล้วตกตะกอนด้วย SnCl_2 แยกตะกอนไปละลายในกรดกลักทอน ปรับ pH ประมาณ 7 แล้วผ่าน H_2S กรองตะกอนทิ้งไว้ 7 วัน แล้วเอามารังสีแกมมาพลังงาน 77 KeV. ต้องทำ blank ควบคู่ไปด้วย

เพื่อป้องกันความผิดพลาดจากสารเคมีที่ไม่บริสุทธิ์ ในการทดลองครั้งนี้พบปรอทในน้ำทะเลบริเวณ
 $83.2 \pm 9.3 \text{ ng of Hg}$ ก้อนน้ำทะเล 1 กิโลกรัม

Kosta, L. และ Byrne, A.R. (1969) ทำการวิเคราะห์หาปรอทในสารตัวอย่าง
 จากสิ่งมีชีวิตด้วยวิธีวิเคราะห์แบบแอคติเวชัน (22) โดยเอาสารตัวอย่างใส่ขวดโพลีเอทิลีน
 หลอมปิดควมความรั้น เอาไปอาบรังสีนิวตรอนที่มี neutron flux ประมาณ 10^{15} ถึง
 2×10^{15} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เอามาเผาในหลอดซิลิกา ซาตุพวกฮาโลเจน
 และกำมะถัน จะถูก adsorbed บนใยแก้วซึ่งฉาบด้วยเงิน ส่วนปรอทนั้นจะถูก adsorbed
 โดยกระบวนการของซึ่งเกิดออบคัยเซเลเนียม แล้วเอากระบวนการนี้ไปวัดรังสีแกมมาของปรอท สำหรับ
 มาตรฐานนี้ใส่ในหลอดซิลิกา อาบรังสี แล้วเอามาเติม carrier ปรอท นำมาสะกัดด้วย
 สารละลายของ dithizone ผู้วิจัยเสนอแนะว่า วิธีนี้สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างได้
 หลายชนิด เช่น เซลลูโลส ซิลิเคต ซีเมนต์ ปูน ทราย และน้ำ โดยอย่างมีประสิทธิภาพ
 ซึ่งมีข้อผิดพลาดเพียง 5 % เท่านั้น

Donald F. Schutz และ Karl K. Turekian แห่งมหาวิทยาลัยเยล ได้ทำ
 การวิเคราะห์หาธาตุปริมาณน้อย (Trace elements) ในน้ำทะเลโดยวิเคราะห์แบบนิวตรอน
 แอคติเวชัน (23) ในการทดลองครั้งนี้ได้นำน้ำทะเลตัวอย่างไปอาบรังสีนิวตรอน ใช้เวลา
 ไม่นานนัก แล้วนำมาวิเคราะห์กัมมันตภาพรังสี ปรากฏว่าพบธาตุต่าง ๆ เหล่านี้ คือ รูปีเดียม
 ซีเซียม แบเรียม ทอง ซีลีเนียม เงิน โคบอลต์ และนิกเกิล หลังจากอาบรังสีนิวตรอน
 นานถึง 150 ชั่วโมง มี neutron flux ประมาณ 2 ถึง 6×10^{10} นิวตรอนต่อตาราง
 เซนติเมตรต่อวินาที ได้พบธาตุต่าง ๆ อีกดังนี้ คือ ปรอท สังกะสี นิกเกิล โคบอลต์ เหล็ก
 แบเรียม และเงิน

Kawakami Hirayasu (1969) ทำการวิเคราะห์หาปริมาณปรอท เป็นจำนวน
 ไมโครกรัม ในน้ำพุร้อนในประเทศญี่ปุ่นโดยวิธีทางเคมี (Destructive-analysis) แล้ว
 ตามด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน (24) โดยนำน้ำตัวอย่างมา
 400 มิลลิลิตร ทำให้ pH 1.5 ด้วยกรด H_2SO_4 แล้วเอาสารตัวอย่างนี้มาสะกัดด้วยสาร
 ละลายของ Dithizone ในคลอโรฟอร์ม แล้วระเหยให้แห้งด้วยหลอดไฟอินฟราเรด-

ที่อุณหภูมิ 65°C แล้วเอาคลอโรฟอร์มมาแยกเอา mercury diethizonate ออกโดยการ
 คายระคายกร้อน หลังจากนั้นก็นำเอากระดวยกรองและสารประกอบมาตรฐาน มาใส่โพไลเอทิสีน
 ผลึกปิดปากขวดควมความมรณ แล้วเอาไปอาบรังสีนิวตรอนที่มี neutron flux ประมาณ
 2.1×10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลานาน 5 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้ธาตุ
 ฝัมนั้นตรึงสี่ครึ่งชีวิตสั้น ๆ สลายตัว 5 วัน จากนั้นนำเอาสารตัวอย่างไปวัดรังสีด้วย $1 \frac{3}{4} \times 10^4$
 NaI (TL) crystal กับ 400 channel pulse-height analyzer พบว่าในน้ำพุร้อน
 มีปรอทอยู่ $0.5 - 20 \text{ ng/g}$ ซึ่งมีข้อผิดพลาด 5 %

Korkisch, J. และ Orlandini, K.A. (1968) ได้ทำการค้นคว้าหาวิธี
 แยกธาตุโลหะซึ่งมีปริมาณน้อย (trace metals) ออกจากสารประกอบของไฮเดรียม เช่น
 น้ำทะเล เป็นต้น (25) วิธีการประกอบควมการสะกักแล้วติดตามควม Ton exchange
 ในขั้นแรกใช้ 2 - thenoyl - trifluoroacetone (TTA) สะกักไอออนของโลหะได้
 ดังนี้ Fe^{+3} Co^{+2} Ti^{+4} Sc^{+3} Y^{+3} Ce^{+3} Yb^{+3} UO_2^{+2} Pu^{+3} Pu^{+4} Th^{+4}
 ออกมาได้ถึง 99.9 % ส่วน Ni^{+2} Zr^{+4} Hf^{+4} Cu^{+2} และตะกั่วสามารถสะกักออกมา
 ได้ 99 %

ขั้นที่สองเอาส่วนที่เหลือจากสะกักด้วย TTA แล้วมาสะกักด้วย dithizone ใน
 benzene พบว่าสามารถสะกักไอออนของโลหะต่อไปได้เกิน 99 % คือ เงิน แคลเซียม
 พรอท เช่น ที่สะกักได้ทั้งใน TTA และ dithizone นี้อาจมีไฮเดรียมติดมา เขาแยก
 ออกโดยให้ผ่าน Cation exchange-resin Dowex AG W - x 8 (100 - 200 mesh,
 Hydrogen form) ซึ่งผู้วิจัยเสนอแนะว่าวิธีนี้สามารถเอามาใช้ในการแยก sodium
 interference ออกจากสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ได้หลายอย่าง เช่น น้ำทะเล
 เกลือแกง โลหะแอลคาไล สารระคายความมรณในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู หรือสารตัวอย่าง
 ทางชีววิทยาได้

Fletcher, L. Moore (1972) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการใช้ High-molecular
 weight amine สะกักเอาปรอทออกมาจากสารละลายของเกลือ (26) เขารายงานไว้ว่า
 สารประกอบพวก amine ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ มีประสิทธิภาพในการละลายแยกเอาปรอท

ออกมาจากสารละลายของเกลือ หรือสารละลายของพวกคลอไรด์ ใด ๆ ก็ได้ แม้ว่าในสารละลายของเกลือเหล่านี้จะมีปรอทอยู่น้อยกว่า 10^{-9} กรัมหรือมีปริมาณมาก ๆ ก็ตาม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Quaternary amine มีความสามารถในการสกัดปรอทออกจากเกลือในสารละลายที่เป็นค่างใดก็ได้ เท่ากับอยู่ในสารละลายของกรด การ regenerate amines กลับมาใช้ใหม่โดยเอา amine ที่สกัดปรอทมาแล้วนั้นไปผสมกับสารละลายของกรดในกรีก ethylene diamine หรือ propylene diamine ในการค้นคว้า เขาใช้ Hg^{203} เป็น tracer นอกจากนี้เขายังเสนอแนะว่าเราสามารถเอาไปใช้สกัดธาตุโลหะหนักอื่น ๆ นอกจากปรอทจากสารละลายของเกลือได้อีกด้วย เช่น แกลเลียม สังกะสี ตะกั่ว สารหนู และทองแดง ในการสกัดโลหะ เป็นพิเศษเหล่านี้มีได้สกัดได้เฉพาะในสารละลายของเกลือเพียงอย่างเดียว สามารถสกัดจากสารละลายพวกไนเตรต ซัลเฟต ฟอสเฟต สารอินทรีย์

Kim J.I. และ Sunoko (1973) ได้วิเคราะห์ปรอทในสารตัวอย่างทางชีววิทยาโดยวิธีแอคติเวชัน (27) เขาเอาสารตัวอย่างใส่ขวดโพลีเทธิลีนแล้วจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเสียก่อน แล้วจึงหลอมปิดปากขวดด้วยความร้อน เพื่อป้องกันปรอทหนีไป เอาไปอบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์แบบ FMR ขนาด 4 เมกกะวัตต์ ของมหาวิทยาลัย Munich Technical ซึ่งมี neutron flux ประมาณ 0.8 ถึง 2.3×10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที แล้วเอามาเติม carrier ปรอท และ Destruction mixture ซึ่งเขาทดลองใช้หลายอย่าง เช่นกรด HNO_3 เข้มข้น กรด $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$ $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ fewdrops เสร็จแล้วก็ heat ใน Destruction flask จนกระทั่งสารตัวอย่างละลายหมด ได้สารละลายใส เอามาทำให้เป็นกลางแล้วเติม HNO_3 $0.5 - 1.5$ N ลงไป เอาสารละลายนี้ไปผ่าน Column ซึ่งมี Cu sleeves หรือ Cu grains บรรจุอยู่ผ่านประมาณ 10 ครั้ง พบว่าปริมาณปรอทที่สกัดได้สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ คือประมาณ 2.3×10^{-9} กรัม

Byrne, Dermelj และ Kosta (1971) ได้ทำการวิเคราะห์หาปรอท ซึ่งกระจายอยู่ในปลา และสัตว์อื่น ๆ ในยูโกสลาเวีย (28) โดยการเอาสารตัวอย่างมาใส่ quartz หลอมปิดปากขวดด้วยความร้อน แล้วเอาไปอบรังสีนิวตรอนซึ่งมี flux ประมาณ 1.8×10^{12}

นิวตรอน อंतरาาง เชนติเมตรค่อวินาที ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูของ งามัน Triga Mark I
 อดรังสีนานประมาณ 5 - 24 ชั่วโมง แล้วแควำปริมาณปรอทในสารตัวอย่างมากน้อยเพียงใด
 แล้วเอามาแยกทางเคมีโดย เมาสารตัวอย่างที่อดรังสีแล้วที่ 400°C ในหลอดซิลิกา แล้วจับ
 (trap) ซาตุที่ระเหยไค้ตัวขึ้น ด้วยใย quartz ซึ่งกลั่นด้วยเงินที่ 300°C และจับปรอท
 โดยไ้ใช้กระดาษเชเลเนียมที่ 100°C แล้วเอากระดาษเชเลเนียมนี้ไปวัดรังสีหาปริมาณปรอท
 ด้วยเครื่องวัดรังสี

Degoey และคณะ (1972) ได้ทำการวิเคราะห์ศึกษาการกระจายของปรอทในสิ่ง
 แวดล้อมโดยไ้วิธีวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชัน (30) สารตัวอย่างที่วิเคราะห์มี คิน
 โคลน หญา น้ำ หอย ปลา แมวน้ำ เมล็ดพืช นกที่กินเมล็ดพืชเป็นอาหาร การวิเคราะห์
 เขาซังสารตัวอย่าง 0.1 - 1 กรัม ได้ quartz แล้วฉีกปิดด้วยความร้อน แล้วเอาไปอด
 รังสีนิวตรอนซึ่งมี flux ประมาณ 10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ึ่งไ้ให้สลาย
 ตัวระยะเวลาแล้วแต่นักทดลองสารตัวอย่าง จากนั้นนำเอา quartz มาแช่ในไนโตรเจนเหลว
 เพื่อลดความคั่นใน quartz พบ quartz เดิม carrier ปรอท 10 มิลลิกรัม และ
 เดิม oxidation mixture conc H_2SO_4 20 ml H_2O_2 37 % 5 ml ไ้ให้ความร้อน
 ทำการ reflux ที่ 220°C จนสารละลายไ้โต เดิม HBr เข้มข้น 15 ml แล้วกลั่น
 HgBr_2 ออกมาที่อุณหภูมิ 220°C ในขณะที่กำลังกลั่นก็ผ่านอากาศเข้าไปในขวด กลั่นตลอดเวลา
 นำส่วนที่กลั่นไ้เก็บในน้ำ 20 ml ซึ่งมี CH_3COONa 13.5 กรัม เพื่อเป็น buffer แล้ว
 เอามาแยกปรอทออกโดยวิธี Amalgam exchange ซึ่งไ้ได้ผล 97 - 98 % แล้วเอาไปวัด
 รังสีแกมมาพลังงาน 77 KeV. ของ ^{197}Hg half-life 65 ชั่วโมง โดยไ้ใช้ NaI
 (Tl) - detector

- ๐ จากรายงานการวิจัยเกี่ยวกับปรอทโดยวิธีนิวตรอนแอคทีเวชันนั้น จะเห็นไ้ควำ เป็นวิธี
 วิเคราะห์ที่มีความไว (Sensitivity) สูง สมควรจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์สาตุปรอท
 ในน้ำทะเล ซึ่งมีปริมาณน้อยมาก แต่ก็มีพิษค่อนข้างรุนแรงและสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ มาก.

การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน

การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน (Neutron Activation Analysis) เป็นวิธีการวิเคราะห์หาธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ ในสารตัวอย่าง โดยอาศัยปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุ (Nuclear transmutation) (31) และ Radioactive tracer technique (32) เป็นหลักการสำคัญ

หลักการเบื้องต้นในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน คือ ไอโซโทปเสถียร (Stable - isotope) ของธาตุจะถูก Activate ด้วยอนุภาคนิวตรอน (33) จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู หรือแหล่งกำเนิดอนุภาคอื่น ๆ ที่เหมาะสม จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ขึ้นภายในนิวเคลียส ไอโซโทปเสถียรจะแปรสภาพเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี (Radioactive isotope) ของธาตุเดิม หรือไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุใหม่ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคนิวตรอนที่ใช้เป็นตัวยิง (Bombardment) รูปที่ 1 - ข ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสภาวะ excited state ซึ่งไม่อยู่ตัว (35) นิวเคลียสของมันจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เรื่อย ๆ เพื่อกลับคืนเข้าสู่สภาวะที่อยู่นิ่งในกระบวนการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ นิวเคลียสจะคายพลังงานออกมาในรูปของการแผ่รังสี ซึ่งให้กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) ที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวออกมา (34) รูปที่ 1 - ค. จากการศึกษากัมมันตภาพรังสีที่ปลดปล่อยออกมา ก็จะสามารถวิเคราะห์หาอะตอมของธาตุเดิม (parent isotope) ที่มีอยู่ในสารเริ่มต้นทั้งทางด้านคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์ได้

แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ใช้วิเคราะห์แบบ NAA

1. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor)

นิวตรอนที่ผลิตได้จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมี 3 ประเภท (36) คือ

1.1 Fast neutron ความเร็วประมาณ 1.8×10^7 เมตรต่อวินาที และ

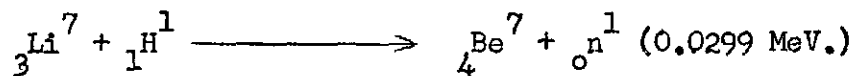
มีระดับพลังงานสูงกว่า 0.1 MeV.

1.2 Epithermal neutron ความเร็วปานกลางมีระดับพลังงาน 1 eV. ถึง 0.1 MeV.

1.3 Thermal neutron ความเร็วประมาณ 2,200 เมตรต่อวินาที มีระดับพลังงานต่ำกว่า 1 eV. ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะมี Thermal neutron ที่มีพลังงานเฉลี่ย 0.025 eV มากที่สุด

2. เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator)

เครื่องเร่งอนุภาคจะผลิตอนุภาคต่าง ๆ เช่น Proton, deuterium, tritium และ Alpha แล้วก็เร่งให้มีความเร็วสูงแล้วใช้ยิงเป้า (Target) ซึ่งทำจากธาตุบางชนิด จะเกิดปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์แล้วให้นิวตรอนออกมา เช่น (31)



3. Radioactive Source

ธาตุบางชนิดสามารถเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์กับอนุภาคบางอย่าง เช่น Alpha หรือ Gamma แล้วให้นิวตรอนออกมาได้ (37) ดังนั้นเมื่อผสมธาตุกับมันตรงสปีซีที่แผ่รังสี Alpha หรือ Gamma กับธาตุบางชนิดก็จะได้แหล่งกำเนิดนิวตรอน เช่น Polonium กับ Beryllium จะได้นิวตรอนมีพลังงานประมาณ 11 MeV.



โดยธาตุ Polonium จะให้รังสี Alpha ซึ่งรังสี Alpha จะยิงอะตอมธาตุ Beryllium และให้นิวตรอนออกมา

Nuclear Transformation

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า จึงสามารถที่จะยิงเข้าชนนิวเคลียสได้ง่ายไม่ถูกผลักจากอิเล็กตรอนที่อยู่รอบ ๆ นิวเคลียสหรือโปรตอนที่อยู่ในนิวเคลียส ดังนั้นไม่จำเป็นต้องเร่งให้มีความเร็วสูง ก็สามารถผ่าน Coulomb barrier ไปชนนิวเคลียสได้

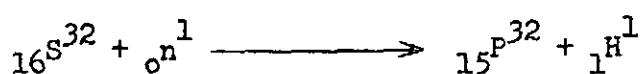
เมื่อยิงนิวตรอนเข้าไปชนนิวเคลียสของธาตุ จะเกิด Neutron-induced reaction ได้ 5 แบบคือ

1. (n- γ) reaction เป็นปฏิกิริยาของ Thermal neutron กล่าวถึงนิวเคลียสของธาตุจะจับนิวตรอนไว้ แล้วกลายเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีซึ่งจะปล่อยรังสีแกมมาออกมา เช่น

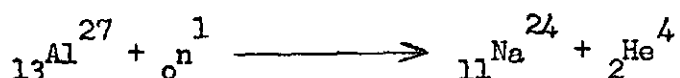


ปฏิกิริยานิวตรอน - แกมมา เกิดกับ Thermal neutron มากที่สุด และเป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบ NAA มากที่สุด

2. (n-p) reaction เป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากการยิงนิวตรอนเข้าไปชนนิวเคลียสของธาตุ และทำให้อะตอมของธาตุกลายเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี พร้อมทั้งปล่อยอนุภาคโปรตอนออกมา นิวตรอนที่ใช้ในปฏิกิริยานี้จะต้องมีพลังงานสูงพอที่จะชนนิวเคลียสของธาตุ และทำให้โปรตอนหลุดออกมาจากนิวเคลียสของธาตุนั้นได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ Fast neutron ซึ่งมีพลังงานสูงกว่า ปฏิกิริยานี้อาจนำไปใช้กับ NAA ได้ แต่ไม่มากนัก ส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตสารกัมมันตรังสีต่าง ๆ (38) เพราะว่าปฏิกิริยา (n,p) ทำให้เกิดไอโซโทปของธาตุใหม่ขึ้น ซึ่งสามารถแยกและทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย เช่น

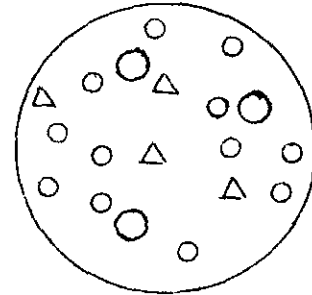


3. (n- α) reaction เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วอะตอมของธาตุเปลี่ยนไปเป็นไอโซโทปของธาตุใหม่ พร้อมทั้งปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมา นิวตรอนที่ใช้ต้องเป็น Fast neutron เช่นเดียวกับ (n,p) reaction



1 - a

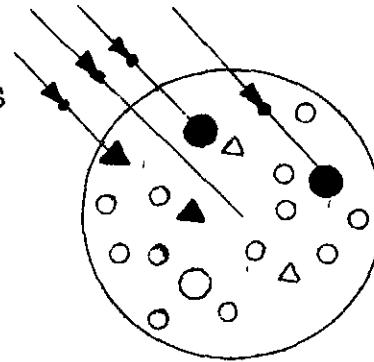
The sample consists of a base material $\circ$ with traces of another material Δ and $\bigcirc$



1 - b

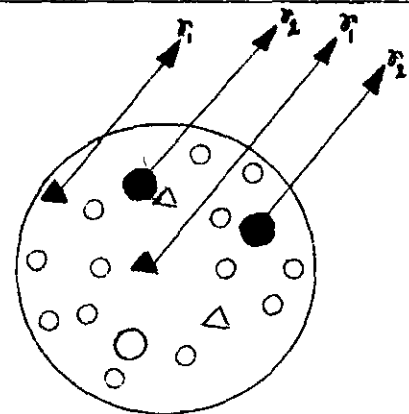
The sample is irradiated by neutrons, making some of the atoms in it radioactive, $\blacktriangle$ $\bullet$

NEUTRONS



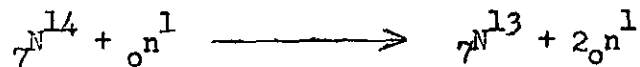
1 - c

The gamma rays given off by the sample reveal the identity of the trace element.

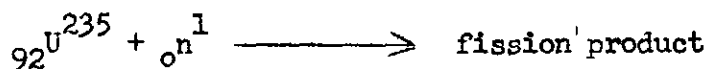


รูปที่ 1 แสดงหลักการวิเคราะห์แบบ neutron activation

4. (n-2n) reaction เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วอะตอมของธาตุนั้นจะกลายเป็นไอโซโทปที่มีมวลอะตอมของธาตุนั้นใหม่ พร้อมทั้งปล่อยนิวตรอนออกมา 2 ตัว ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้น Fast neutron เช่น



5. (n-fission) reaction เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วเกิด fission product ปฏิกิริยานี้ถ้าเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับ ${}^{235}_{92}\text{U}$ และ ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ Thermal neutron ก็มีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ แต่ถ้าเป็นปฏิกิริยาเกิดขึ้นกับ ${}^{238}_{92}\text{U}$, ${}^{231}_{91}\text{Pa}$ และ ${}^{232}_{90}\text{Th}$ จะต้องใช้ Fast neutron จึงจะเกิดปฏิกิริยา (31) เช่น



เทคนิคในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชัน มี 2 แบบ (38) คือ

1. Non-destructive Neutron Activation Analysis คือวิธีการวิเคราะห์ธาตุในสารตัวอย่าง โดยการนำสารตัวอย่างเข้าอานรังสีนิวตรอนพร้อมกับสารมาตรฐาน แล้ววัดรังสีเปรียบเทียบกับโดยไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี

2. Destructive Neutron Activation Analysis คือวิธีการวิเคราะห์ธาตุในสารตัวอย่าง โดยการนำเอาสารตัวอย่างเข้าอานรังสีพร้อมกับสารมาตรฐานแล้วแยกไอโซโทปที่มีมวลอะตอมสูงด้วยวิธีการทางเคมี เช่นการสกัดด้วยตัวทำละลาย การกลั่น การตกตะกอน ฯลฯ แล้วนำไปวัดปริมาณรังสีเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน

ในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชัน มีเงื่อนไขที่จำเป็นดังนี้ (39)

- 1) ธาตุในสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จะต้องมีค่า Neutron interaction cross-section ที่เหมาะสม
- 2) ธาตุที่จะวิเคราะห์เมื่อถูก Activate ด้วยนิวตรอนต้องเกิดไอโซโทปที่มีมวลอะตอมสูงซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมา

- 3) ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นต้องมีอายุครึ่งชีวิต (half life) ไม่นานหรือสั้นเกินไป
- 4) ธาตุที่จะวิเคราะห์ในสารตัวอย่างนั้นต้องมีปริมาณมากพอ
- 5) ลักษณะทางนิวเคลียร์ของธาตุในขณะที่ยังไม่เป็นธาตุกัมมันตรังสี และผลที่เกิดขึ้นจาก Activation เป็นสิ่งที่ต้องการทราบล่วงหน้า

อัตราการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสี (Rate of radioisotope production)

เมื่อนำสารที่จะวิเคราะห์ไปอาบรังสี Thermal neutron จะเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีขึ้น ในขณะที่เดียวกันไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะสลายตัวให้รังสีแกมมาออกมาตลอดเวลา ดังนั้นอัตราการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ได้ (32) จะเป็นไปตามสมการ .

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

เมื่อ P = อัตราการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสี

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

λ = ค่าคงที่ของการสลายตัว (Decay constant)

N^* = จำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ผลิตได้

ถ้าสารตัวอย่างถูกอาบรังสีเป็นระยะเวลา t_i โดยที่ค่า P ไม่เปลี่ยนแปลง เราอาจใช้ Integrating-factor method หากค่า N_{ti}^* จากสมการ (1) ได้ดังนี้

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

สมการ (2) คูณด้วย $e^{\lambda t_i}$ จะได้

$$e^{\lambda t_i} \frac{dN_{ti}^*}{dt} = P e^{\lambda t_i} - \lambda N_{ti}^* e^{\lambda t_i}$$

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

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

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

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

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

เมื่อ $t_i = 0$ จะได้ $C = -\frac{P}{\lambda}$
แทนค่า C ในสมการ (3) จะได้

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

ในการปฏิบัติเราต้องการทราบปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่ N_{ti}^* ปลดปล่อยออกมาต่อ
หนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งสมมติให้คือ A_{ti}

จากสมการ (4)

$$N_{ti}^* \lambda = P (1 - e^{-\lambda t_i})$$

$$A_{ti} = P (1 - e^{-\lambda t_i}) \dots\dots\dots (5)$$

สิ่งที่ต้องการทราบต่อไปคือ P ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

เมื่อนำสารตัวอย่างไปอาบรังสีนิวตรอน โอกาสที่นิวตรอนหนึ่งอนุภาคจะชนและเกิดปฏิกิริยากับนิวเคลียสของธาตุในสารตัวอย่างหาได้จากสูตร

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

เมื่อ N = จำนวนนิวเคลียสทั้งหมดในเป้า

σ = Thermal neutron cross-section มีหน่วยเป็น barn

$$(1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2)$$

ถ้า ϕ เป็นจำนวนนิวตรอนที่ชนเป้าในแนวตั้งฉากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อวินาที จะได้ว่า

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

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

จำนวนอะตอมหรือนิวเคลียสทั้งหมดที่นำไปอาบรังสี สามารถหาได้จาก (31)

$$N = \frac{N_0 W K}{M} \dots\dots\dots (7)$$

เมื่อ N_0 = Avogadro's number = $6.023 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$

W = น้ำหนักของธาตุเป็นกรัม

K = Fractional isotopic abundance

M = น้ำหนักอะตอมของธาตุ

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

$$A_{t_i} = \frac{6.023 \times 10^{23} W K \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i})}{M} \dots\dots\dots (8)$$

จากสมการ (8) จะเห็นว่าเราสามารถแปรผันระยะเวลาในการอาบรังสีเพื่อให้ได้ ปริมาณรังสี (Activity) ตามต้องการได้ เทอม $1 - e^{-\lambda t_i}$ เรียกว่า Saturation factor (31) ถ้า $t_i \gg T_{1/2}$ แล้วค่า Saturation factor จะเข้าใกล้ 1 ดังนั้น Saturation time (เวลาที่อัตราการผลิตและอัตราการสลายตัวของอะตอมกัมมันตรังสี มีค่าเท่ากัน) ค่า Activity ของไอโซโทปกัมมันตรังสีจะมีค่าสูงสุดตามสมการ

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

โดยทั่วไปจะเริ่มศึกษา Activity ได้ ภายหลังจากยิงด้วยอนุภาคนิวตรอนเป็นเวลา T อะตอมกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น จะสลายตัวเป็น factor ของ $e^{-\lambda T}$ ดังนั้นสมการ (8) อาจ จะเขียนใหม่เป็น

$$A_{t_i} = \frac{K \lambda \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) (e^{-\lambda T}) \times 6.023 \times 10^{23}}{M}$$

เพราะฉะนั้นปริมาณของธาตุคำนวณได้จากสมการ

$$W = \frac{M A_{t_i} e^{\lambda T}}{\lambda K (1 - e^{-\lambda t_i}) 6.023 \times 10^{23}} \dots\dots\dots (10)$$

จากสมการ (8) จะเห็นว่าสำหรับธาตุแต่ละชนิด ค่าของ M, W, K, λ , ϕ และ No (6.023×10^{23}) มีค่าคงที่ ดังนั้นค่า A_{t_i} จะแปรผันตาม t_i นั่นคือเราสามารถเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการอาบรังสีเพื่อให้ได้ปริมาณรังสีตามที่ต้องการได้

จากสมการ (10) สามารถคำนวณหา sensitivity (น้ำหนักของธาตุที่น้อยที่สุดที่นำไปอาบรังสี เพื่อให้ได้ปริมาณรังสีตามที่ต้องการ) ของธาตุใดดังนี้

$$\text{Sensitivity} = \frac{M A_{t_i} e^{\lambda T}}{\lambda K (1 - e^{-\lambda t_i}) \% \text{ emission} \times \epsilon \times 6.023 \times 10^{23}}$$

เมื่อ $\epsilon =$ ประสิทธิภาพของเครื่องวัด

% emission = คุณสมบัติในการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Radioactive decay)

การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสี มีสถานะตามหลักสถิติ การที่จะบอกให้ชัดเจนลงไปว่านิวไคลด์ตัวใดจะสลายตัวนั้นกระทำไม่ได้ เพราะนิวไคลด์มีขนาดเล็ก อยู่ในอาณาจักรควมมืด ดังนั้นจึงบอกได้แต่เพียงความน่าจะเป็นที่นิวไคลด์ตัวใดตัวหนึ่งจะสลายตัว (40) จากการทดลองพบว่า อัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนนิวเคลียสที่เหลืออยู่ขณะนั้น ดังนั้นอัตราการสลายตัวจึงลดลงตลอดเวลา เพราะว่าปริมาณของนิวเคลียสกัมมันตรังสีลดลงอยู่เรื่อย ๆ อันเนื่องมาจากการสลายตัว จนกระทั่งกลายเป็นไอโซโทปชนิดเสถียร ไอโซโทปกัมมันตรังสีแต่ละชนิดใช้เวลาในการสลายตัวไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติประจำตัวของธาตุกัมมันตรังสีที่เรียกว่าครึ่งชีวิต (Half life) ซึ่งหมายถึงระยะเวลาที่สารกัมมันตรังสีสลายตัวลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณเริ่มต้น

ถ้า $\lambda =$ ความน่าจะเป็นที่นิวไคลด์ 1 ตัวจะสลายตัวในช่วงเวลาที่กำหนดให้
เรียกว่า Probability มีหน่วยเป็น sec^{-1}

$N_0 =$ จำนวน parent nuclides เมื่อแรกเริ่ม $t = 0$

$N =$ จำนวน parent nuclides เมื่อเวลาผ่านไป t

$dN =$ จำนวนนิวไคลด์ที่สลายตัวในช่วงเวลา dt

โดยอาศัยนิยามของความน่าจะเป็น จะเห็นว่าในช่วงเวลา dt นิวไคลด์ตัวใดตัวหนึ่งย่อมมีโอกาสสลายตัวด้วยความน่าจะเป็น λdt

ดังนั้นถ้ามี N นิวไคลด์อยู่แล้วในช่วงเวลา dt ควรจะมีนิวไคลด์สลายตัวไป
 $= N (\lambda dt)$

เนื่องจากเดิมมี N นิวไคลด์ก็ย่อมเหลือ $N - dN$ นิวไคลด์

ดังนั้นความเปลี่ยนแปลง = จำนวนภายหลัง - จำนวนนิวไคลด์เดิม

$$= (N - dN) - N$$

$$= - dN$$

แต่ความเปลี่ยนแปลงนี้ คือจำนวนนิวไคลด์ที่สลายตัวไปในช่วงเวลา dt ดังนั้น

$$-dN = N\lambda dt$$

$$\frac{dN}{dt} = N\lambda \dots\dots\dots (11)$$

$$= \text{Activity}$$

$$= \text{อัตราการสลายตัวของ parent nuclides (dps)}$$

จากสมการ (11)

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

Integrate จาก $t = 0$ เมื่อ $N = N_0$ ถึงเวลาใด ๆ t เมื่อจำนวนของนิวไคลด์เหลือ N

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

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \dots\dots\dots (12)$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (13)$$

จากสมการ (12) ถ้า $t = \text{Half life } (T_{1/2})$ $N = \frac{1}{2} N_0$ จะได้

$$2.303 \log \frac{1}{2} \frac{N_0}{N_0} = -\lambda T_{1/2}$$

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

$$= \frac{0.693}{T_{1/2}} \dots\dots\dots (14)$$

สามารถหาค่า Activity (A) ได้จากสมการ (13) โดยอาศัยนิยามจาก (11) คือ

$$A = -\frac{dN}{dt} = -\frac{d}{dt} (N_0 e^{-\lambda t}) = N_0 \lambda e^{-\lambda t}$$

$$\therefore A = A_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (15)$$

เนื่องจากจำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสีไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดโดยตรงได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้การวัดปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลาแทนการวัดจำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสี

ในการคำนวณหาปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง โดยใช้ Activation equation สมการ (8) และ (10) ค่าที่ต้องการทราบคือ $M, \phi, K, \epsilon, \lambda, t_i, At_i$ และ $T_{1/2}$ ก็สามารถคำนวณหาปริมาณธาตุได้ แต่มีข้อยุ่งยากหลายประการ (41) คือ

1. ค่า Neutron cross-section ของธาตุต่าง ๆ ส่วนมากมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 5 – 15 %
2. ความเข้มของนิวตรอน (Neutron flux) มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอไม่คงที่ขณะอาบรังสี
3. ปริมาณรังสีที่วัดได้มีค่าไม่คงแน่นอน ซึ่งทำให้การวิเคราะห์โดยวิธีนี้ ได้ผลคลาดเคลื่อนประมาณ 20 %

ดังนั้นจึงนิยมใช้วิธี Comparative technique แทน โดยนำสารตัวอย่างเข้าอาบรังสีพร้อมกับสารมาตรฐาน แล้ววัดปริมาณรังสีเปรียบเทียบกัน ก็สามารถหาปริมาณธาตุในสารตัวอย่างได้ โดยอาศัยสมการ (8) และ (10) จะได้

$$\frac{W_x}{W_s} = \frac{A_x}{A_s} \dots\dots\dots (16)$$

แต่ $A = \epsilon R$

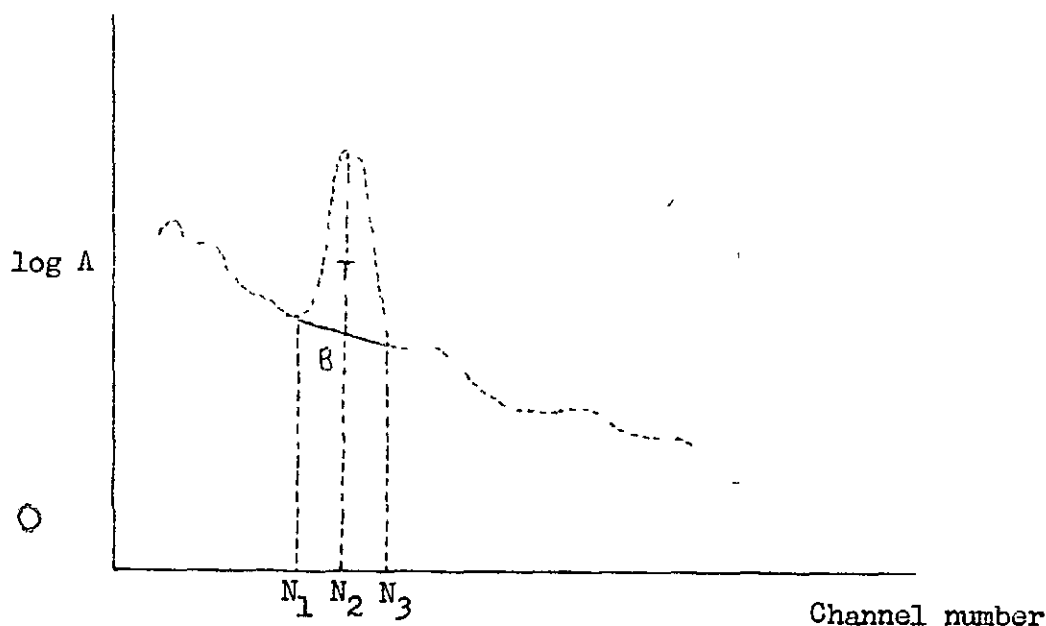
$$\therefore \frac{W_X}{W_S} = \frac{R_X}{R_S} \dots\dots\dots (17)$$

เมื่อ W_X = น้ำหนักของสารตัวอย่าง
 W_S = น้ำหนักของสารมาตรฐาน
 A_X = ปริมาณรังสีของสารตัวอย่าง
 A_S = ปริมาณรังสีของสารมาตรฐาน
 R_X = จำนวนนับรังสีของสารตัวอย่าง
 R_S = จำนวนนับรังสีของสารมาตรฐาน

การใช้วิธีเปรียบเทียบนี้ทำให้การวิเคราะห์ผิดพลาดน้อยลง

การคำนวณ Total Count Rate

เมื่อนำสารตัวอย่างไปวัดรังสีด้วย Multichannel analyser รังสีแกมมาที่ปล่อยออกมาจากไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุในสารตัวอย่าง จะถูกเปลี่ยนเป็น Electrical pulse และจำนวนนับตามลำดับ จำนวนนับนี้จะถูกเก็บไว้ในสมองอิเล็กทรอนิกส์ของ Multichannel analyser ซึ่งมีมากมาย สมองอิเล็กทรอนิกส์แต่ละหน่วยเรียกว่า Channel number (41) ซึ่งแต่ละ Channel number จะเก็บสัญญาณที่เป็นจำนวนนับของรังสีแกมมาที่มีระดับพลังงานค่าหนึ่ง ๆ ไว้จำนวนนับต่อหน่วยเวลา (count rate) ในแต่ละ channel number เรียกว่า Channel content หรือ pulse height เมื่อนำแต่ละ Channel number ทั้งหมดไปเขียนกราฟ โดยให้แต่ละ Channel number เรียงเป็นลำดับ ตามระดับของพลังงาน จาก Channel number ที่ระดับพลังงานต่ำไปสู่ Channel number ที่มีระดับพลังงานสูง จะได้สเปกตรัม ซึ่งแสดง Channel content หรือ pulse height ใน Channel number ทั้งหมดติดต่อกันไป ปรากฏเป็น peak ดังรูป 2



รูปที่ 2 แสดงวิธีหา Total count rate จากกราฟ γ - ray spectrum
 N_1 เป็น Channel number ทำสุดของฐาน photopeak N_2 เป็น
 Channel number ที่จุดยอดของ photopeak N_3 เป็น Channel
 number สูงสุดของฐาน photopeak

ดังนั้น Total count rate หาได้จากพื้นที่ใต้เส้นโค้งของ photopeak ซึ่งคำนวณได้

$$\text{Total count rate} = C - B \dots\dots\dots (18)$$

เมื่อ C = ผลรวมของ Channel content ภายใต้ photpeak

B = Background

ผลรวมของ Channel content, $C(N)$ คำนวณได้ดังนี้

$$C = \sum_{N_1=N_1}^{N_3} C(N)$$

ค่า background หาได้จากค่าเฉลี่ยของ channel content ทั้งสองข้างของ
photopeak ดังนี้ (42)

$$B = \left[\frac{C(N_1) + C(N_2)}{2} \right] N$$

เมื่อ $C(N_1)$ = Channel content ที่ N_1

$C(N_2)$ = Channel content ที่ N_2

N = จำนวน Channel number ภายใน photopeak

ค่า Total count rate ที่ได้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณของธาตุออกมา
อีกทีหนึ่ง

เครื่องมือและวิธีดำเนินการ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

การวิเคราะห์รังสีใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย 1 ของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน ซึ่งเมื่อเดินเครื่องเพิ่มกำลัง 1000 กิโลวัตต์ จะให้ความเข้มของนิวตรอน โดยเฉลี่ย 6×10^{12} นิวตรอน ต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

เครื่องวัดรังสีใช้ Multichannel Gamma Spectrometer ซึ่งประกอบด้วยหัววัดรังสี ต่างกัน ซึ่งมีประโยชน์ต่างกันดังจะได้อธิบายต่อไป

หลักการทำงานของ Multichannel Gamma Spectrometer

1. เมื่อรังสีแกมมาจากไอโซโทปกัมมันตรังสีที่นำมาวัด ผ่านเข้าไปในหัววัดรังสีจะเข้าไปชนกับอะตอมของสารที่ใช้เป็น Scintillator และมีการถ่ายเทพลังงานให้กับ Scintillator อิเล็กตรอนของ Scintillator เมื่อได้รับพลังงานจากรังสีแกมมาก็จะอยู่ใน excited states ซึ่งมีช่วงเวลาไม่น้อยกว่า 10^6 วินาทีแล้วอะตอมจะกลับคืนเข้าสู่ Ground states โดยการปลดปล่อยพลังงานทิ้งในรูปโฟตอนของแสง ซึ่งแสงที่เปล่งออกมาจะมีความถี่ต่างกัน ส่วนมาก อยู่ในย่านน้ำเงินหรือม่วง และพลังงานที่รังสีเหล่านี้จะต้องเสียไปใน Scintillator เป็นค่าไม่คงที่แล้วแต่หัววัด เช่น รังสีจะเสียพลังงานประมาณ 50 eV ต่อการเกิดโฟตอน 1 ตัวใน NaI (40) เมื่อรังสีผ่านเข้าไปในหัววัดจะเกิดปรากฏการณ์ดังนี้ (42)

1.1 Photoelectric effect เกิดจากการที่รังสีแกมมาถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนของผลึก NaI จนหมด ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเป็นอิสระ

1.2 Compton effect เกิดจากรังสีแกมมา ถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนของ NaI เพียงบางส่วน แล้วรังสีแกมมาจะเปลี่ยนทิศทางไป ซึ่งรังสีจะมีพลังงานลดลง อิเล็กตรอนที่รับพลังงานไปก็จะอยู่ใน excited states

1.3 Pair production เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีแกมมาเข้าไปในสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสของ Scintillator แล้วรังสีจะแตกตัวออกเป็น positron กับ electron อิเล็กตรอนนั้นจะกลายเป็นอิเล็กตรอนของ Scintillator ส่วน positron เมื่อหมดพลังงานก็จะจับกับอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้ ๆ กลายเป็นรังสีแกมมา มีพลังงาน 0.511 MeV ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV. ขึ้นไป

2. Light reflector ทำหน้าที่สะท้อนแสงที่เกิดใน Scintillator ให้เข้าไปตกกระทบบน photocathode ในหลอด photomultiplier เพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงที่ได้จากการ Scintillation ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วส่งเข้าเครื่องขยาย ส่วนใหญ่ Reflector ทำจากแผ่นอลูมิเนียม ทุ่มฉลิก Scintillator ไว้อีกทีหนึ่ง

3. ภาควิทยาสัญญาณ (Amplification) สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากหัววัดจะมีค่าต่ำมาก วัดยาก ดังนั้นจึงต้องตกแต่งสัญญาณแล้วขยายด้วย main amplifier ให้ได้ขนาดพอดีเสียก่อน (43) แล้วส่งสัญญาณที่ได้รับการตกแต่งและขยายแล้วไปยัง Analog to Digital Convertor (ADC)

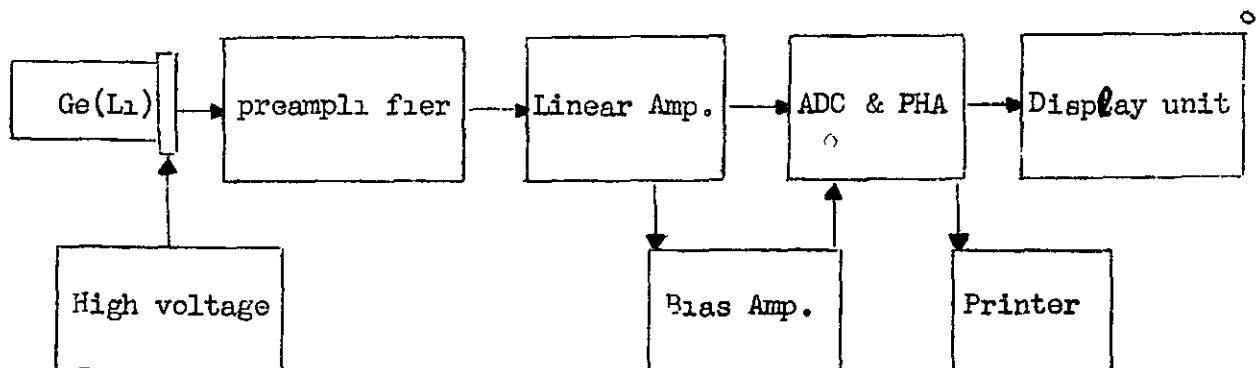
4. ADC จะเปลี่ยนสัญญาณให้เป็นจำนวนนับ ซึ่งจะถูกส่งไปบันทึกใน multichannel pulse height analyzer (PHA) PHA ประกอบด้วยส่วนที่เป็นสมองอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งแต่ละหน่วยเรียกว่า channel จะทำหน้าที่แยกและเก็บสัญญาณในช่วงหนึ่ง ๆ ไว้ เช่น สัญญาณที่มีขนาด 0 - 100 volts เมื่อส่งไปยัง multichannel analyzer ที่มี 100 channel สัญญาณที่มีขนาด 0 - 1 volts จะถูกส่งไปเก็บที่ channel ที่หนึ่ง สัญญาณที่มีขนาด 1 - 2 volts จะถูกส่งไปเก็บยัง channel ที่สอง เช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนถึงสัญญาณที่มีขนาด 99 - 100 volts จะถูกส่งไปเก็บไว้ที่ channel ที่หนึ่งร้อย (44)

5. การนำจำนวนนับออกจากสมองอิเล็กทรอนิกส์ จะแสดงเป็น spectrum บนจอ oscilloscope และพิมพ์ออกมาเป็นตัวเลขด้วยเครื่องพิมพ์ IBM แผนผังส่วนประกอบและการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 3 และรูปที่ 5

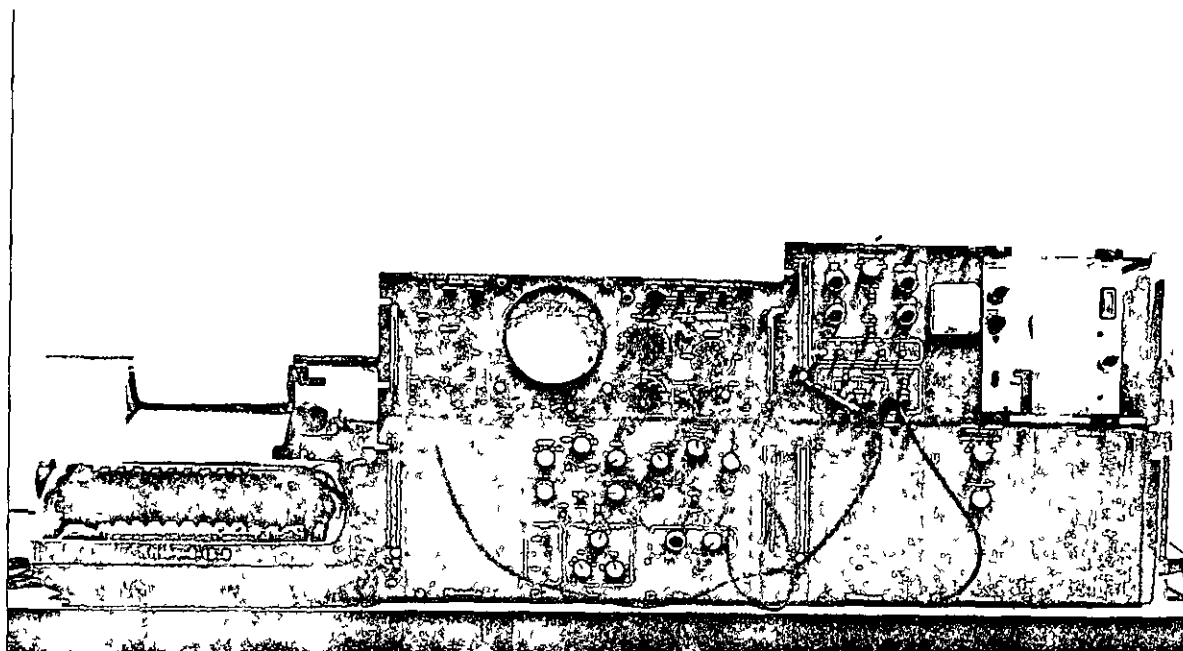
Ge(Li) - Detector

แผนผังแสดงการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 3 ภาพถ่ายของจริงของหัววัด Ge(Li) - detector แสดงไว้ในรูป 4 - ข และ Multichannel analyzer พร้อมทั้งเครื่องพิมพ์ IBM รูปที่ 4 - ก ส่วนประกอบมีดังนี้ (45)

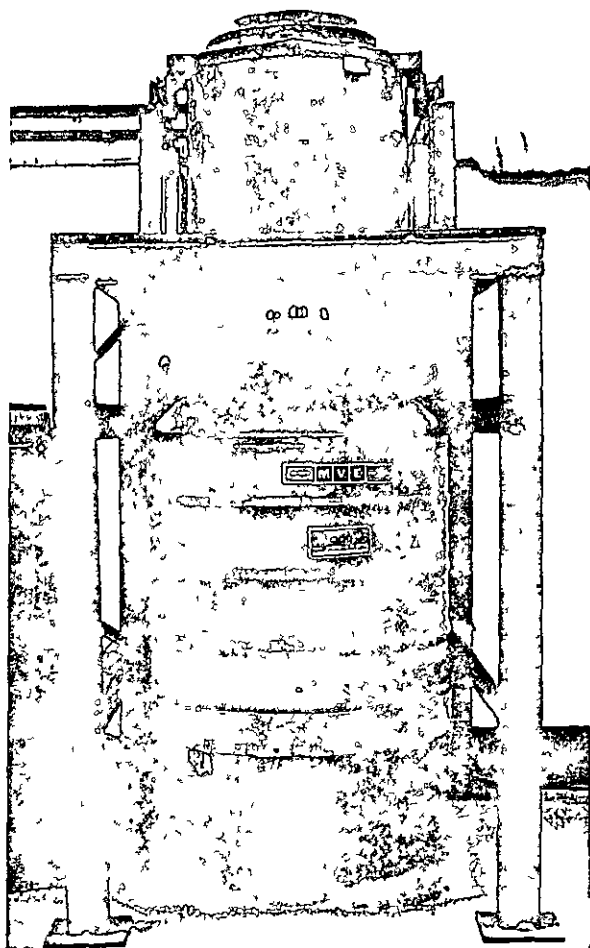
1. Detector แบบ solid state scintillator detector ของ ORTEC ซึ่งประกอบด้วย Ge(Li) Crystal ขนาด 26.3 c.c. กับ photomultiplier tube
2. Power Supply model 4950 ของ ORTEC
3. Preamplifier
4. Linear Amplifier model 761 ของ ORTEC
5. Bias Amplifier ของ Nuclear Data Inc.
6. Multichannel Pulse Height Analyser (PHA) และ Analog to Digital Converter (ADC) ของ Nuclear Data Inc.
7. Display Unit ประกอบด้วย Oscilloscope Type 503 ของ Nuclear Data Inc.
8. Printer ประกอบด้วยเครื่องพิมพ์อัตโนมัติของ IBM MD - 316 autofinger ของ Nuclear Data Inc.



รูปที่ 3 แสดงแผนผังการทำงานและส่วนประกอบของเครื่องวัดรังสี
Ge (Li) - Detector



รูปที่ 4 - ก แสดงเครื่องวัดรังสี Multichannel Analyzer
พร้อมทั้ง Oscilloscope และเครื่องพิมพ์



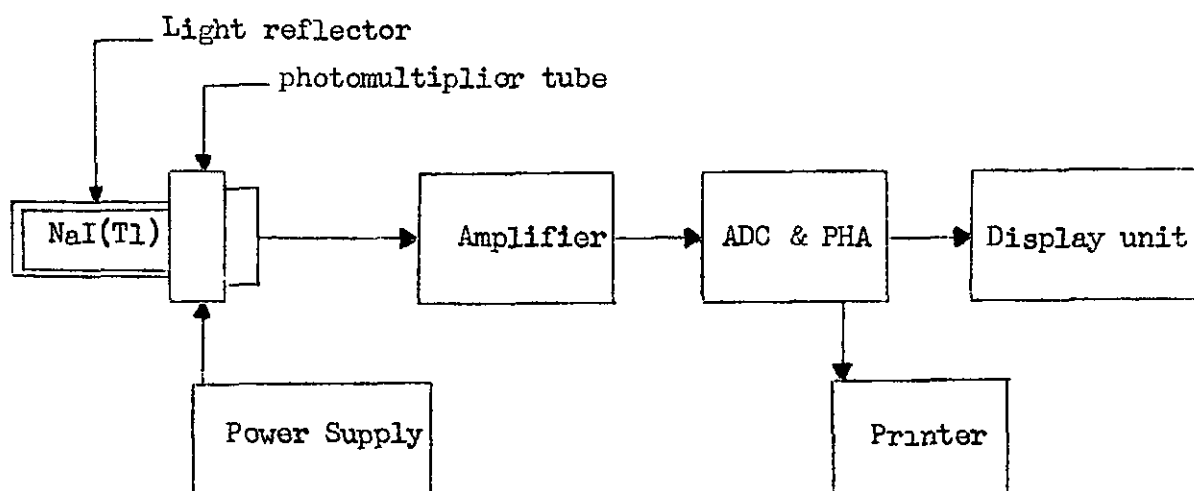
รูปที่ 4 - ข แสดงหัววัด Ge(Li)
อยู่ในเครื่องกำบังรังสี

NaI (Tl) - Detector

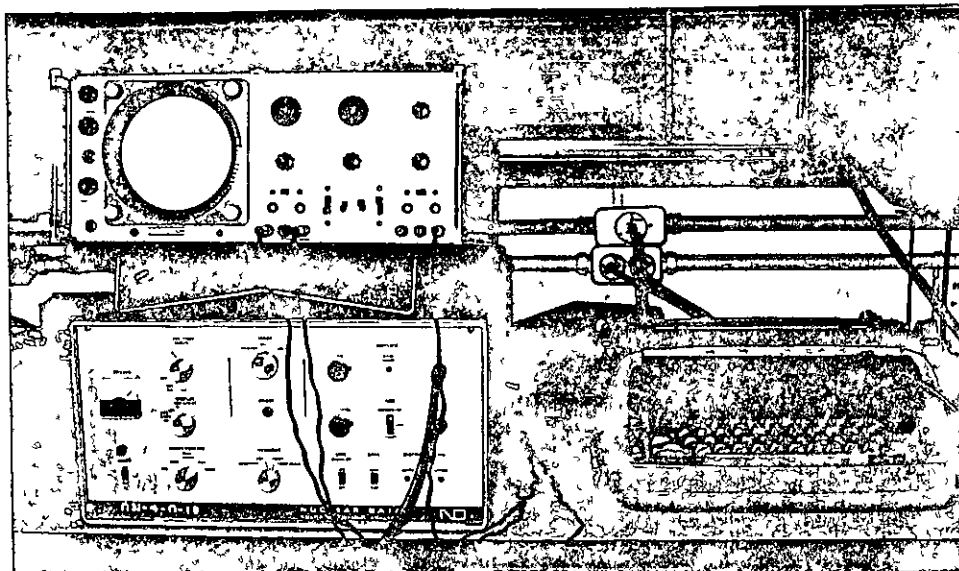
แผนผังการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 5 และภาพของจริงของหัววัดรังสี NaI (Tl) - detector แสดงไว้ในรูปที่ 6 - ข ส่วน Multichannel analyzer พร้อมทั้งเครื่องพิมพ์ IBM แสดงไว้ในรูปที่ 6 - ก

ส่วนประกอบของเครื่องวัดรังสี NaI (Tl) - Detector มีดังนี้

1. หัววัดรังสีแบบ Inorganic solid Scintillation detector ของ Harshaw type 12512 ซึ่งประกอบด้วย NaI (Tl) Crystal ขนาด 3"x 3" และหลอด photomultiplier
2. Power Supply model 312 A เป็นต้นกำเนิด High voltage ให้กับหลอด Photomultiplier
3. Amplifier ประกอบด้วย preamplifier และ main amplifier ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณและตกแต่งสัญญาณตามลำดับ
4. 128 multichannel pulse height analyzer model 110
5. Display unit ประกอบด้วย oscilloscope ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลและรูปร่าง spectrum กับบันทึกภาพรังสีของธาตุที่นำมาวัด



รูปที่ 5 แสดงแผนผังการทำงานและส่วนประกอบของ NaI(Tl) - Detector



รูปที่ 6-ก แสดงเครื่องวัดรังสี Multichannel Analyzer
พร้อมทั้ง Oscilloscope และเครื่องพิมพ์



รูปที่ 6-ข แสดงหัววัดรังสี 1aI(T1)
อยู่ในเครื่องกำบังรังสี

วิธีดำเนินการ

การวิเคราะห์หาปรอทในน้ำทะเลโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน ได้ดำเนินการเป็นขั้น ๆ ดังนี้

- ✓ 1. การศึกษาคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุที่จะวิเคราะห์
2. การเก็บสารตัวอย่าง
- ✓ 3. การวิเคราะห์ blank sample เพื่อหาระยะเวลา Facility, chemical separation technique และเครื่องวัดรังสีที่เหมาะสม
- ✓ 4. การทำ calibration curve
- ✓ 5. การเตรียมสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์
- ✓ 6. การนำสารตัวอย่างเข้าหาบรังสี
7. การทำ chemical separation
8. การวัดกัมมันตภาพรังสีของ sample และพิกัด photopeak energy ด้วย การติดตาม half-life และหา energy ของ peak
9. การวิเคราะห์ข้อมูลและคำนวณหาปริมาณ

การศึกษาคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของปรอท

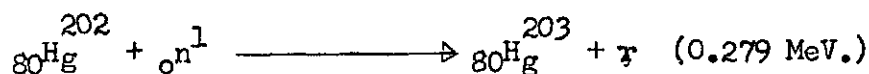
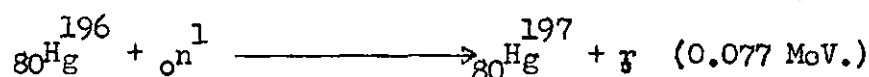
คุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุปรอทในธรรมชาติ ซึ่งมี 2 isotopes แสดงดังตาราง

ตาราง 1 แสดงคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของปรอท

คุณสมบัติทางนิวเคลียร์	Mercury Isotope	
	Hg ¹⁹⁶	Hg ²⁰²
Isotopic abundance (%)	0.146	29.80
neutron cross-section(barn)	880	3.8
ไอโซโทปที่เกิดขึ้น	Hg ¹⁹⁷	Hg ²⁰³

คุณสมบัติทางนิวเคลียร์	Mercury Isotope	
	$^{196}_{80}\text{Hg}$	$^{202}_{80}\text{Hg}$
Half-life	65 hr.	47 d.
พลังงานของรังสีแกมมาที่ส่งออกมา (MeV.)	0.077	0.279

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ (n,r) reaction เมื่อนำธาตุปรอทมาอาบรังสีนิวตรอนจะเกิดปรอทกัมมันตรังสี 2 ไอโซโทป คือ



γ -ray spectrum ของ $^{203}_{80}\text{Hg}$ จาก Hand book ซึ่งวัดด้วย NaI (Tl)-Detector แสดงดังรูปที่ 7 (46)

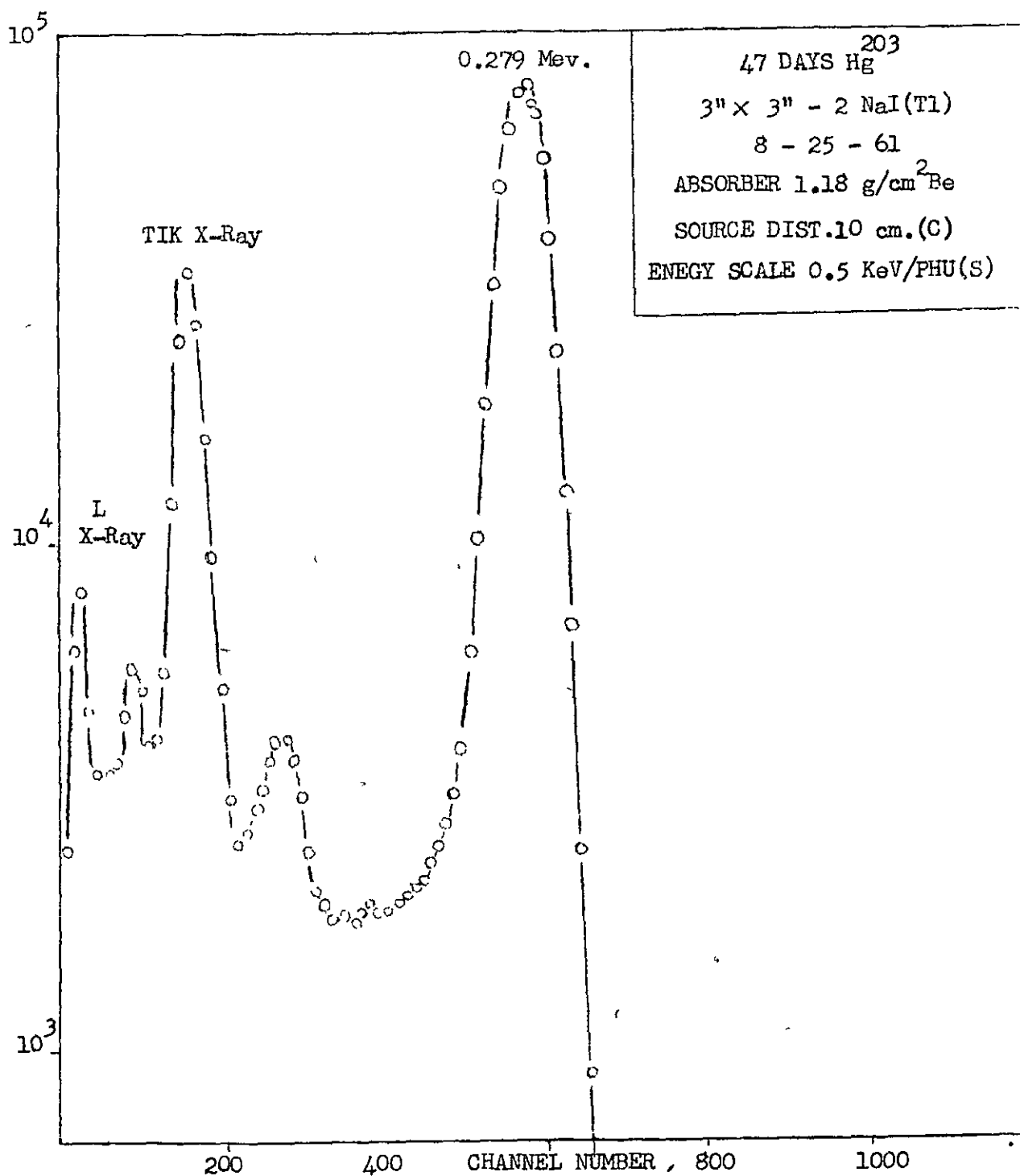
การเก็บสารตัวอย่าง

เก็บจากน้ำทะเลใช้ถังพลาสติกขนาด 15 ลิตร 2 ถัง ซึ่งน้ำทะเลตัวอย่างนี้ทางคณะกรรมการการสำรวจน้ำเสียในอ่าวไทย เก็บให้

การวิเคราะห์ blank sample

เพื่อหาระยะเวลา Facility เครื่องวัดรังสี และ chemical technique ที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาจากผลงานวิจัยและจาก Hand-book ปริมาณปรอทในน้ำทะเลมีประมาณ 0.1 - 0.3 ppb. ดังนั้นจึงทดลองเตรียมสารปรอทมาตรฐาน 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.5 ไมโครกรัม ไปอาบรังสีใน Wet I.P. เป็นระยะเวลา 3 วัน, 5 วัน และ 10 วัน

รูปที่ 7 แสดง γ - ray spectrum ของ $^{203}_{80}\text{Hg}$ 7700000



ปรากฏว่าระยะเวลา 10 วันเป็นเวลาที่เหมาะสมและให้ปริมาณรังสีมากพอเพียงในการวิเคราะห์

เครื่องวัดรังสีที่เหมาะสมคือ NaI (Tl)-Detector เพราะว่ามีประสิทธิภาพสูง สามารถวัดปริมาณรังสีได้มาก จึงเลือกใช้หัววัดแบบ NaI (Tl) ในการวิเคราะห์หาปริมาณ แต่เนื่องจากหัววัด NaI (Tl) มี Resolution ทำเกรงว่าจะมีซากกัมมันตรังสีซึ่งมี photopeak energy ใกล้เคียงกับ ^{203}Hg รบกวนได้ จึงใช้เครื่องวัดรังสีแบบ Ge(Li) - Detector ตรวจจุดตะกอนปรอทที่แยกออกมาแล้วดูเสียก่อนว่ามี photo peak energy ของกัมมันตรังสีอื่นอยู่ใกล้ ๆ หรือไม่ จากการทดลองพบว่าไม่มี แต่ไม่สามารถใช้เครื่องวัดแบบ Ge(Li) - Detector ในการวิเคราะห์หาปริมาณได้ เนื่องจากวัดปริมาณรังสีได้น้อยมาก ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดในทางคำนวณมาก

สำหรับวิธีการทำ Chemical Separation เพื่อแยกตัวรบกวนออกนั้น พบว่าวิธีการกลั่นแยกปรอทออกมาจะเหมาะสมที่สุดเนื่องจากได้ปรอทบริสุทธิ์ ไซสารเคมีราคาไม่แพง เครื่องมือไม่แพง เมื่อกลั่นแล้วก็ตกตะกอนปรอทออกมาในรูป HgS แล้วนำไปวัดรังสีสำหรับการทำ Chemical โดยวิธีอื่น ๆ เช่นสกัดโซเดียมออกด้วย HAP พบว่าค่าใช้จ่ายสูงมากต้องใช้ HAP จำนวนมาก การสกัดด้วย dithizone ก็ทำลำบากเพราะเราทำให้ sample เป็นสารละลายได้ยาก ละลายในกรดคลินประสีว+ กรดกำมะถัน 20 % ที่อุณหภูมิ 140°C และจะเกิดการสลาย NO ออกมาปริมาณมาก ดังนั้นวิธีการกลั่นจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสม

การทำ Calibration curve

ใช้สารกัมมันตรังสีมาตรฐาน คือ Na^{22} Cs^{137} และ Co^{60} ไปวัดในเครื่องวัดรังสี Ge(Li) - Detector และ NaI (Tl) - Detector

Ge(Li) - Detector ใช้ Coarse gain 50 Fine gain 00

High voltage 2000 volts

ADC conversion gain 1024 channel

NaI (Tl) - Detector ใช้ Gain 10:00 Zero Level 8:00

High voltage 1000 volts

ADC 128 Channel

พิมพ์ข้อมูลออกมาด้วยเครื่องพิมพ์ IBM แล้วนำข้อมูลไปวิเคราะห์ plot กราฟระหว่าง photopeak energy กับ Channel number จะได้กราฟเส้นตรงดังกราฟรูปที่ 8 และรูปที่ 9

การเตรียมสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

การเตรียมสารตัวอย่าง ใช้น้ำทะเล ⁵⁰⁰ 1000-ml ทำให้แห้งด้วยแสง Infra-red ที่ระยะทาง 16 นิ้ว อุณหภูมิที่ผิวน้ำทะเล 42°C จนเกือบแห้งใช้เวลา 46 ชั่วโมง แล้วเอาไปทำให้แห้งสนิทโดย freeze drying เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วชั่งเปลี่ยนใส่ quartz คำนวณว่าเฉพาะที่นำไปอาบรังสีคิดเป็นน้ำทะเลเท่าไร บันทึกด้วยความร้อน

การเตรียมสารมาตรฐาน ใช้สารละลายมาตรฐานปรอท 0.5 ไมโครกรัม ใส่ quartz ทำให้แห้งด้วย freeze drying แล้วบันทึกปากหลอดด้วยความร้อน

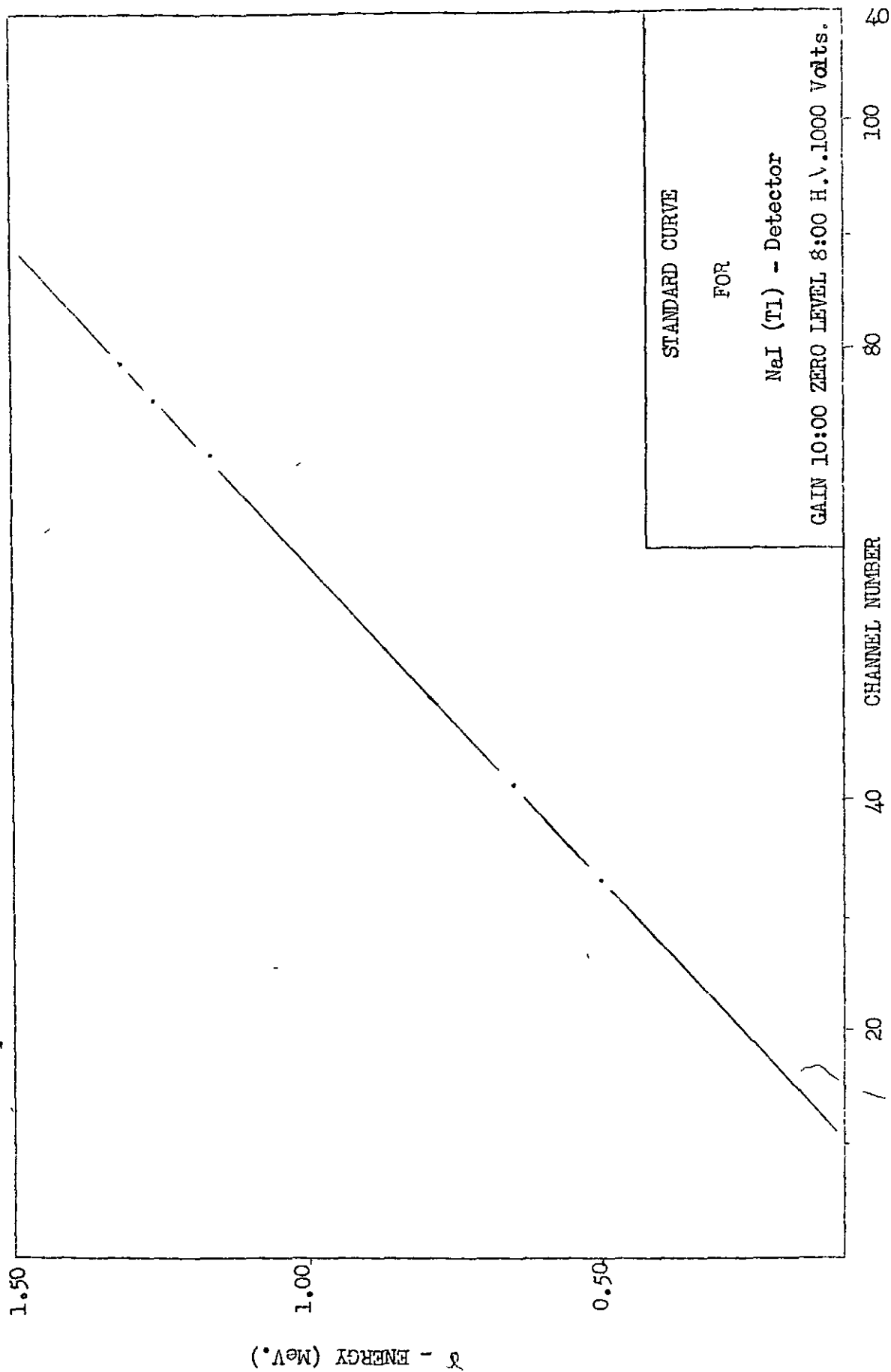
การนำสารตัวอย่างเข้าอาบรังสี

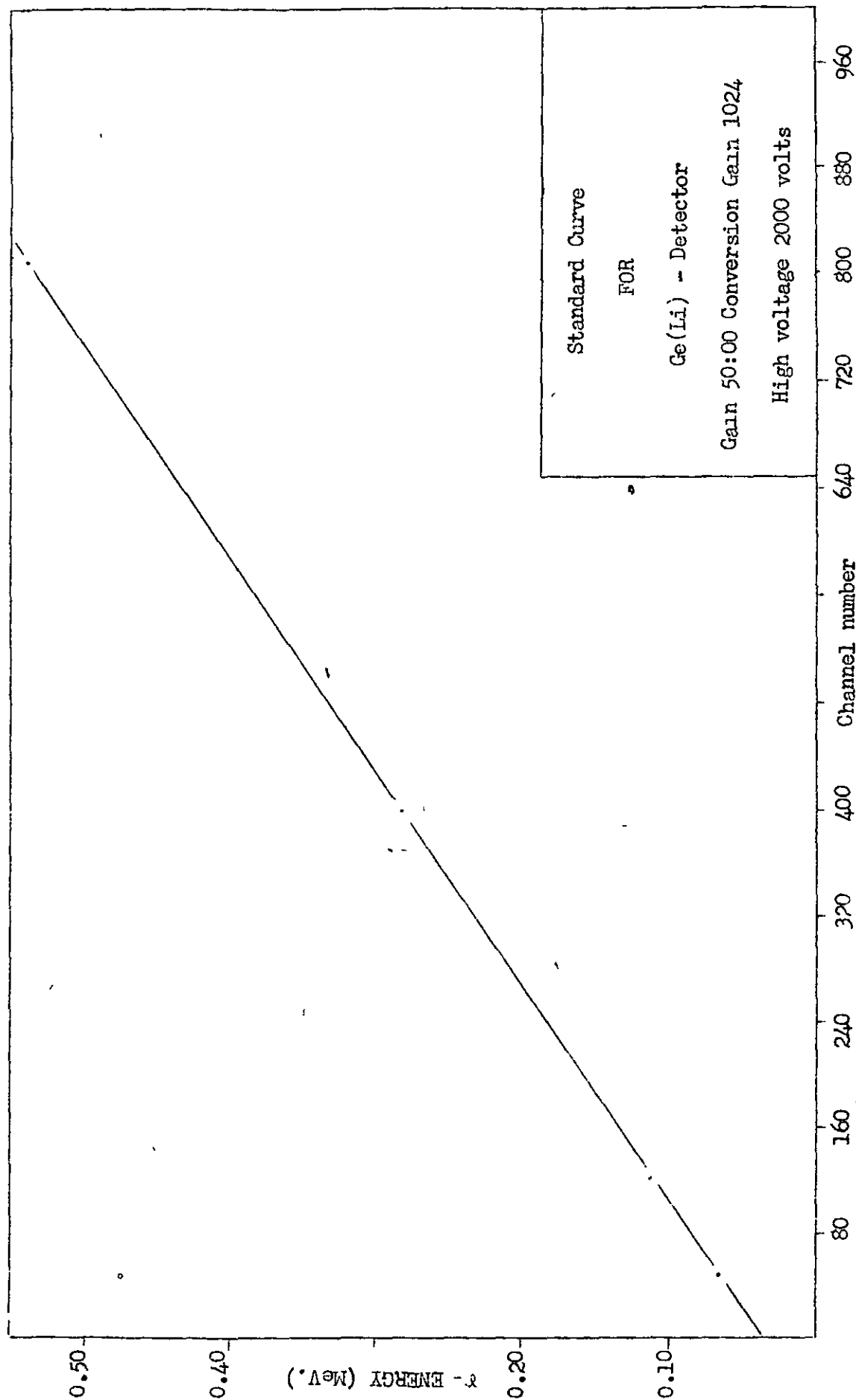
นำสารตัวอย่างผูกติดกับสารปรอทมาตรฐานบรรจุใน Aluminium container แล้วนำไปอาบรังสีใน Wet I.P. facility เป็นเวลา 10 วัน แล้ว cooled ไว้ในช่องปฏิกรณ์ประมาณ 2 สัปดาห์

การทำ Chemical Separation (16)

1. นำสารตัวอย่างมา cooled ด้วย Liquid Nitrogen 10 นาที แล้วตัด quartz ด้วยเครื่องตัด เทใส่ขวดกลั่น 2 คอขนาด 500 ml ซึ่งมี Carrier Hg^{+2} 20 mg
2. แล้วนำไปติดตั้งเพื่อเตรียมกลั่นปรอทดังรูปที่ 10 ในตู้เย็น เพื่อป้องกันมิให้ก๊าซฟองกระจายออกมาภายนอก
3. เติมน้ำ oxidation mixture ซึ่งประกอบด้วย conc. H_2SO_4 20 % ใน conc. HNO_3 เติมลงไป 200 ml
4. ปิด two way tap ทำการ Reflux ที่ 120°C จนกระทั่ง HNO_3 ออกไปอยู่ใน two way tap หมก เติมน้ำจนกระทั่งเกิน 300°C จะได้สารละลายใสทั้งไว้ประมาณ 15 นาที แล้วปิดไฟทิ้งไว้ให้เย็น เปิด two way tap ลงไปในขวดกลั่นใหม่ ทำการ Reflux อีก 2 ครั้ง

รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง γ - ray Energy กับ Channel number





รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Channel number กับ Energy (MeV) สำหรับ Ge(Li) - Detector

5. เติม HClO_4 70 % ลงไป ^{2.5} 5 ml และ glycine 0.5 กรัมในน้ำ ¹⁰ 10 ml ลงไปในขวดกลั่น แล้วกลั่นปรอทออกมาในรูป HgCl_2 ที่อุณหภูมิระหว่าง $150 - 250^\circ\text{C}$
 6. นำส่วนที่กลั่นได้มาทำให้เป็นกลางด้วย แอมโมเนีย 25 % แล้วผ่านก๊าซ H_2S ลงไป จะได้ตะกอนสีดำของ HgS อุณหภูมิให้ตะกอนเกาะกันและไล่แอมโมเนียเล็กน้อย
 7. กรองตะกอน ล้างด้วย ethanol และ ether
 8. ทำให้แห้งด้วยแสง Infra-red ที่ระยะห่าง 16 นิ้ว อุณหภูมิประมาณ 40°C ประมาณ 6 ชั่วโมง
 9. ชั่งตะกอนและนำไปวัดปริมาณรังสี
- สำหรับสารมาตรฐานก็ทำเช่นเดียวกับสารตัวอย่าง

การวัดกัมมันตภาพรังสีของสารตัวอย่าง และพิสูจน์ photpeak energy ด้วยการติดตาม half-life และหา energy ของ peak

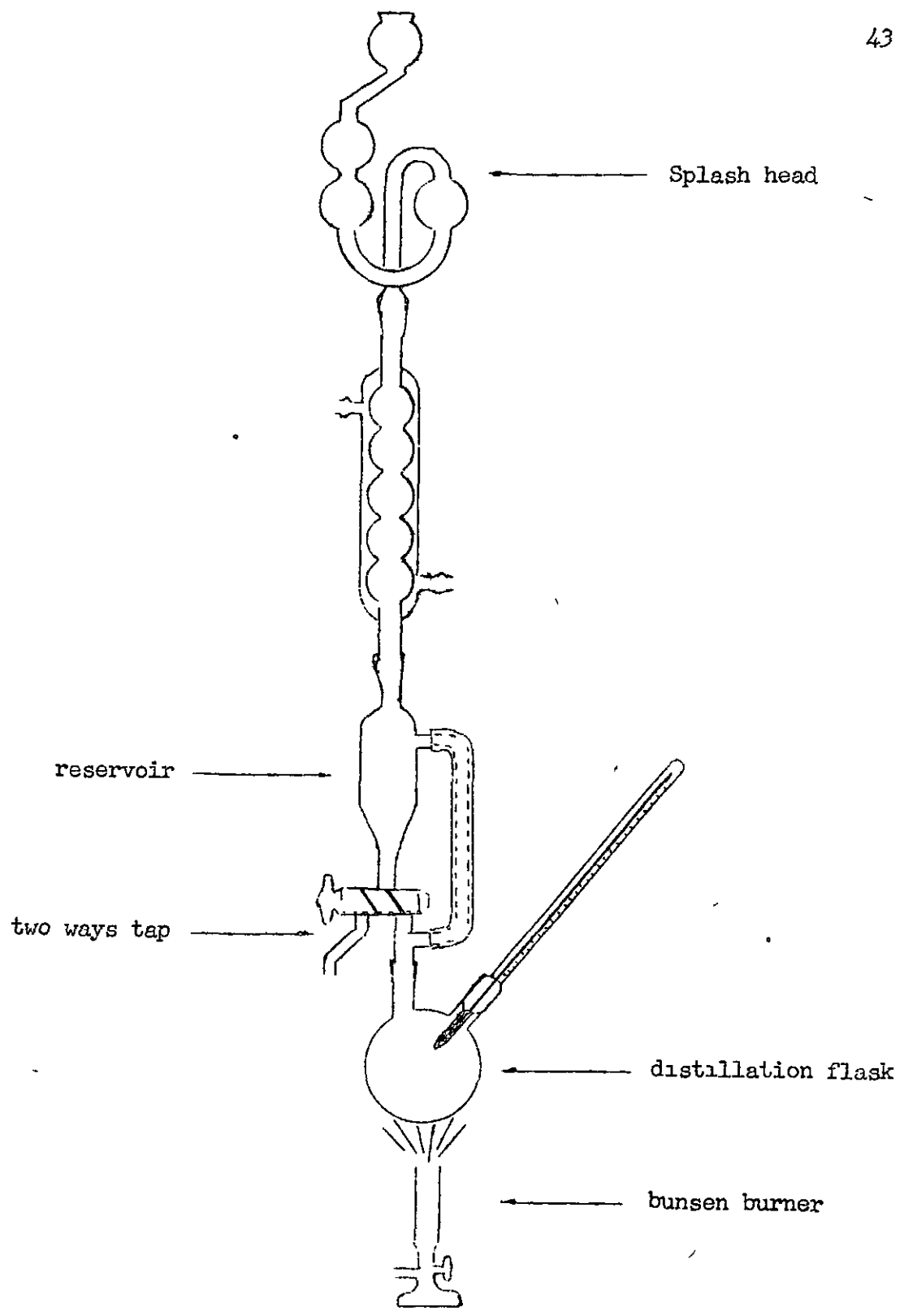
นำตะกอน HgS ไปวัดรังสีด้วยเครื่องวัดรังสี Ge(Li) - Detector เพื่อดูว่ามีกัมมันตรังสีของธาตุอื่นรบกวนหรือไม่ ปรากฏว่าไม่มีการรบกวนเลย ตะกอน HgS ที่แยกออกมาได้บริสุทธิ์ดังกราฟรูปที่ 11 ซึ่งหาพลังงานของ peak โดยเทียบกับ standard curve ได้เท่ากับ 0.279 MeV. ตรงกับ Hg^{203}

นำตะกอนไปวัดปริมาณรังสีด้วยเครื่องวัด NaI (Tl) - Detector เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ดังรูปที่ 12 ใช้เวลาวัด 20 นาที ลบ Background อีก 20 นาที โดยตั้ง Gain 10:00 Zero Level 8:00 High voltage supply 1000 volts แล้วพิมพ์ออกมาด้วยเครื่องพิมพ์ IBM

หา energy ของ peak โดยการเปรียบเทียบกับ Standard curve รูปที่ 8 แล้วติดตาม half-life ว่าเป็น peak ของ Hg^{203} หรือไม่ ดังรูปที่ 13

การวิเคราะห์ข้อมูลและการคำนวณ

1. นำข้อมูลที่ได้อจากการวัดกัมมันตภาพรังสีของธาตุปรอทในสารตัวอย่างมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับต่อเวลากับ channel number ในกระดาษ semilog เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ปรากฏว่าได้ peak ชัดเจนอยู่ใน channel number เดียวกันกับ -



รูปที่ 10 แสดงเครื่องมือสำหรับกลั่นปรอท

peak ของสารปรอทมาตรฐาน คูณกราฟที่ 12 และจากการตรวจสอบ photopeak energy และติดตาม half-life (รูปที่ 13) ปรากฏว่าได้ตรงกับ Hg^{203} (Half-life = 47.0 วัน)

2. การคำนวณหาปริมาณรังสีใต้ peak จากผลคูณระหว่างรายเฉลี่ยของจำนวนนับต่อเวลาของ channel แรก และ channel สุดท้ายของ peak กับจำนวน channel ใน peak แล้วหักออกจากผลรวมของจำนวนนับต่อเวลา ของ Channel content ในพื้นที่ใต้ peak ดังสมการ (18)

3. Dry ตะกอนให้แห้งด้วยแสงอินฟราเรดที่ระยะห่าง 16 นิ้ว อุณหภูมิที่ผิวตะกอน ประมาณ $42^{\circ}C$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ใน desicator แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ตะกอน คำนวณเปรียบเทียบหา % yield แล้วตรวจแก้ Activity 100 % yield

4. คำนวณหาปริมาณธาตุในสารตัวอย่างจากสูตร (17)

$$\frac{W_x}{W_s} = \frac{R_x}{R_s}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

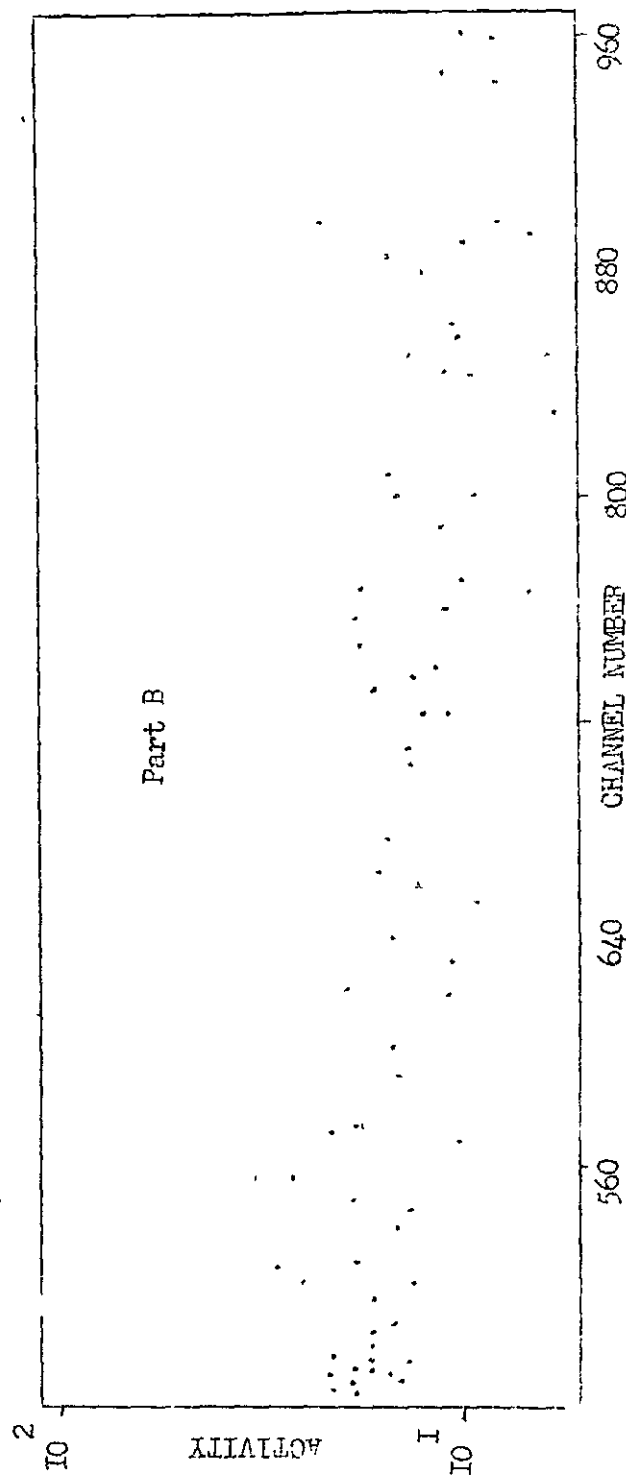
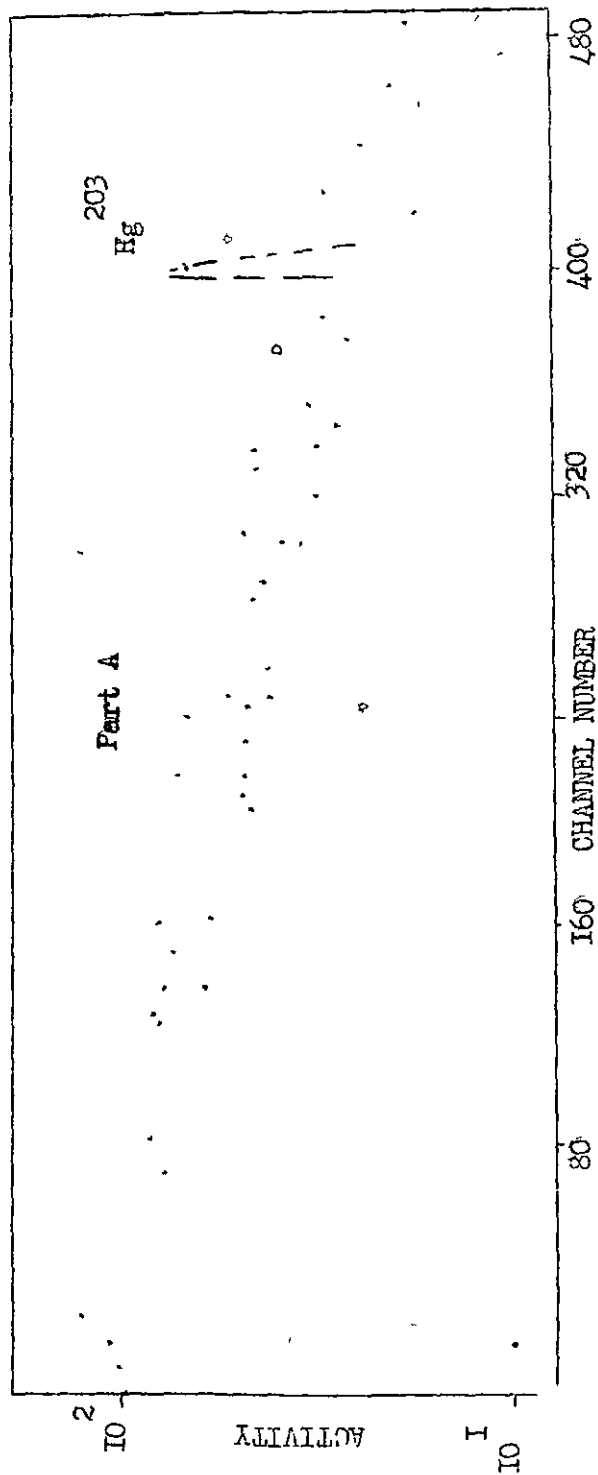
ในการคำนวณหาปริมาณปรอทในน้ำทะเลตัวอย่างเบอร์ 1 ซึ่งมีข้อมูลดังนี้

น้ำหนักเกลือที่ได้จากน้ำทะเล 1 ลิตร	=	34.4612	กรัม
น้ำหนักเกลือที่เอามาอบรังสี	=	33.2484	กรัม
ความหนาแน่นของน้ำทะเล	=	1.015456	กรัม/มิลลิลิตร
น้ำหนักสารปรอทมาตรฐาน	=	0.5	ไมโครกรัม
น้ำหนักตะกอน HgS ในสารตัวอย่าง	=	0.01815	กรัม
น้ำหนักตะกอน HgS ในสารมาตรฐาน	=	0.01425	กรัม

1. การคำนวณหา Activity ใต้ peak รูป 12 ประกอบการคำนวณใช้สมการที่(18)

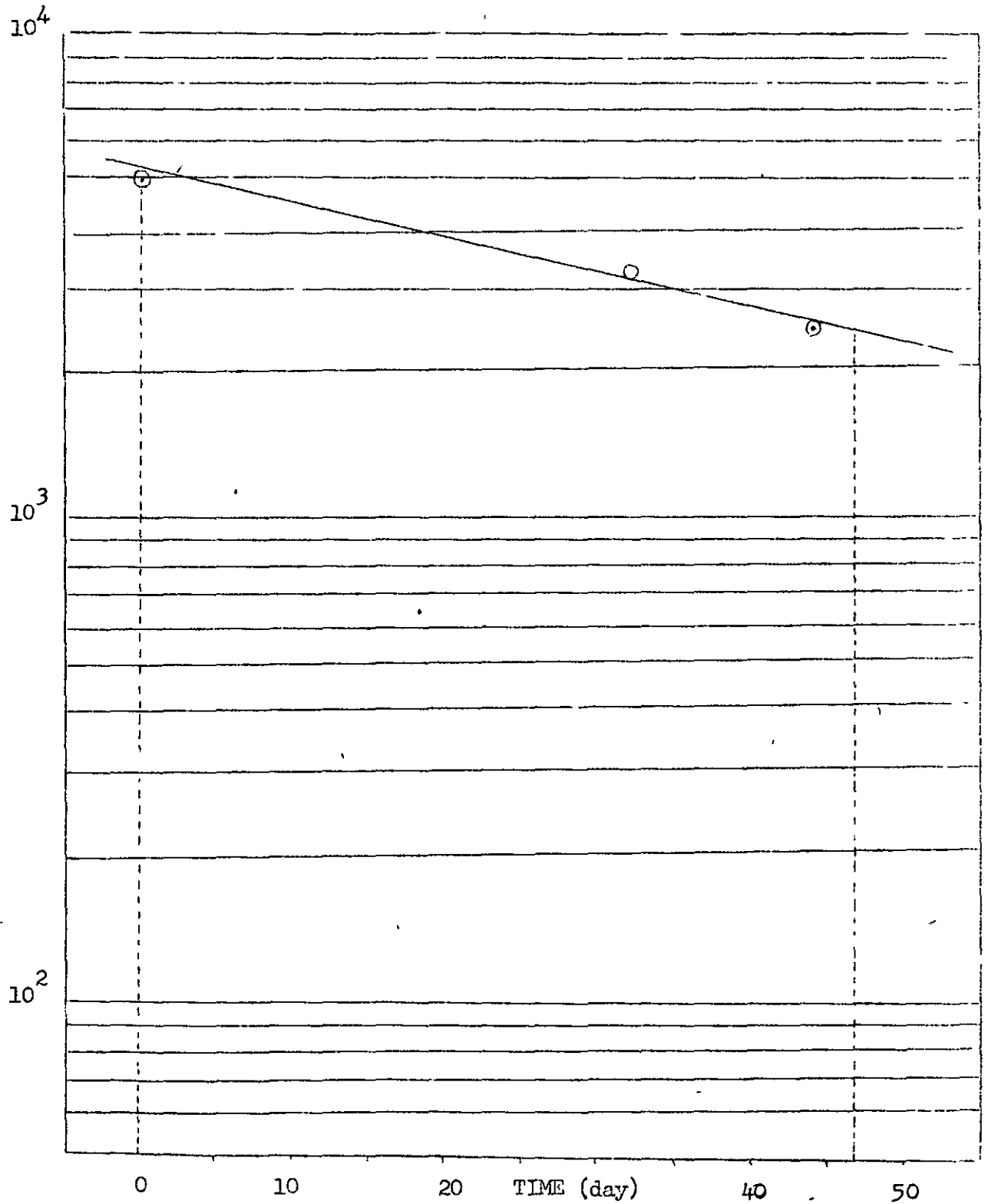
○

$$\text{Total count rate} = C - \text{Background}$$



เซลล์การดูดกลืน γ -ray spectrum ของวัสดุ Ge(Li) ~ Detector ^{76}Ge จากทำ Chemical separation แล้ว

รูปที่ 13 กราฟแสดงการหา half-life ของ $^{203}_{80}\text{Hg}$ (47.0 วัน)



Activity ใต้ peak ของสารปรอทมาตรฐาน

$$= \left[533 + 925 + 1678 + 2090 + 1679 + 1031 + 439 \right] - \left[\frac{(533 + 439)}{2} \times 7 \right]$$

$$= 4273 \text{ count}$$

Activity ใต้ peak ของสารตัวอย่างเบอร์ 1

$$= \left[102 + 316 + 700 + 1097 + 1009 + 668 + 283 \right] - \left[\frac{(102 + 283)}{2} \times 7 \right]$$

$$= 2828 \text{ count}$$

คำนวณหา 100 % yield

ถ้าตามทฤษฎี Hg^{+2} 200.59 มิลลิกรัม จะเกิดเป็น HgS = 232.654 มิลลิกรัม

ถ้า carrier Hg^{+2} 20 มิลลิกรัม จะเกิด HgS = $\frac{232.654}{200.59} \times 20$ มิลลิกรัม

= 23.1969 มิลลิกรัม

$\therefore$ 100 % yield ของ HgS = 0.0231969 กรัม

คำนวณหา 100 % Activity

ในสารมาตรฐาน HgS 0.01425 กรัม มี Activity ใต้ peak = 4273 count

ถ้าสารมาตรฐาน HgS 0.0231969 กรัม มี Activity ใต้ peak = $\frac{4273 \times 0.0231969}{0.01425}$

= 6955.544 count

ในสารตัวอย่าง HgS 0.01815 กรัม มี Activity ใต้ peak = 2828 count

ถ้าสารตัวอย่าง HgS 0.0231969 กรัม มี Activity ใต้ peak = $\frac{2828 \times 0.0231969}{0.01815}$

= 3614.320 count

คำนวณหาปรอทในสารตัวอย่าง

จากสูตร

$$\frac{W_x}{W_s} = \frac{R_x}{R_s}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักปรอทในสารตัวอย่าง} &= \frac{3614}{6955} \times 0.5 \quad \text{ไมโครกรัม} \\ &= 0.2598 \quad \text{ไมโครกรัม} \end{aligned}$$

คำนวณหาน้ำหนักน้ำทะเลตัวอย่าง

$$\begin{aligned} \text{เกลือ} \quad 34.4612 \quad \text{กรัม คิคเป็นน้ำทะเล} &= 1000 \quad \text{มิลลิลิตร} \\ \text{ถ้าใช้เกลือ} \quad 33.2484 \quad \text{กรัม คิคเป็นน้ำทะเล} &= \frac{1000}{34.4612} \times 33.2484 \quad \text{มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

$$= 964.806 \quad \text{มิลลิลิตร}$$

$$\text{น้ำทะเลมีความหนาแน่น} = 1.015456 \quad \text{กรัม/มิลลิลิตร}$$

$$\text{น้ำทะเล } 964.806 \quad \text{มิลลิลิตร หนัก} = 964.806 \times 1.015456 \quad \text{กรัม}$$

$$= 979.7219 \quad \text{กรัม}$$

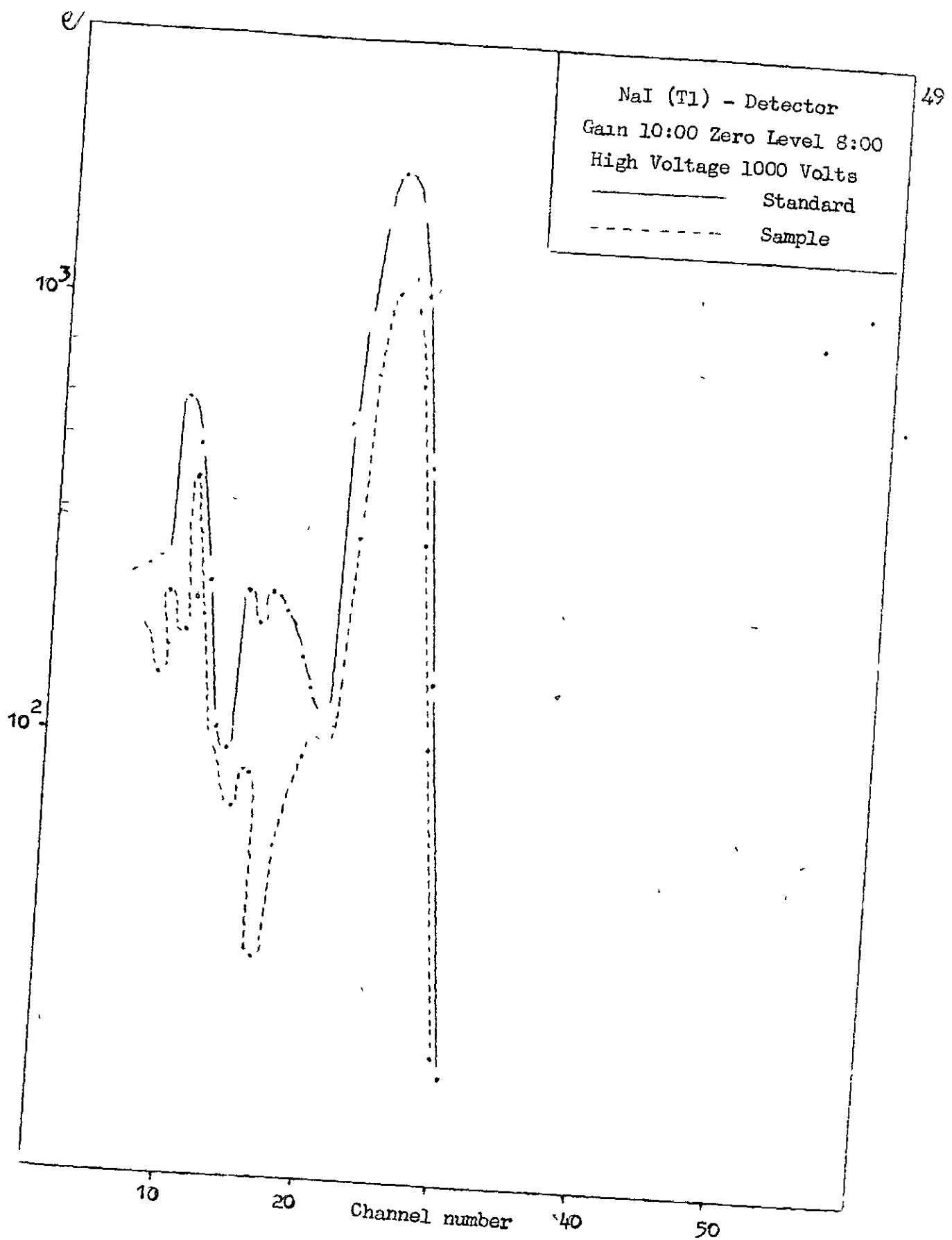
$$\text{นั่นคือน้ำทะเลตัวอย่างหนัก } 979.7219 \quad \text{กรัมมีปรอท} = 0.2598 \quad \text{ไมโครกรัม}$$

$$\text{ถ้าน้ำทะเลตัวอย่างหนัก } 1 \quad \text{กรัม จะมีปรอท} = \frac{0.2598}{979.7219} \times 1 \quad \text{ไมโครกรัม}$$

$$= 0.0002651 \quad \text{ไมโครกรัม}$$

$$\text{หรือ} = 0.2651 \quad \text{ไมโครกรัม/1000 กรัม}$$

$$= 0.2651 \quad \text{ppb}$$



รูปที่ 12 แสดง Spectrum ของ Hg^{203} ในสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน

ขอมกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีแกมมาที่ส่งออกมา กับ Channel number

ขอมกราฟรูปที่ 12

Gain 10:00 Z.L. 8:00 H.V. 1000 volts

S₁ (Std. Hg 0.5 μ g)

099999	000000	000012	003237	000229	000231	000253	000268
000615	000469	000232	000108	000094	000224	000178	000231
000204	000159	000117	000180	000533	000925	001678	002090
001679	001031	000439	000140	099982	000010	000014	000003
099963	099974	099979	099992	000030	000034	000006	099981
099981	000030	000000	099968	000027	000008	000045	000022
099996	000021	000000	000010	099977	099987	000042	000020
099985	000027	000015	099985	000007	099989	099988	000054
099998	099957	099981	099971	099977	099966	000024	099970
000005	099994	099995	099978	000013	000005	099981	099998
000034	099997	000007	000030	099996	000022	099970	099988
099992	000013	099995	099975	099994	099971	099989	099985
000005	099991	099981	099982	099967	000019	099973	000014
099967	099992	000018	000048	000027	000003	000011	000023
000006	000012	000001	000006	000007	000005	000009	099991
099995	099995	099989	000001	099983	099993	099988	099991

Sample no 1

099999	000000	000998	099942	000453	000188	000136	000234
000179	000409	000186	000103	000099	000068	000088	000032
000056	099965	000094	000102	000316	000700	001097	001009
000668	000283	000097	000019	099984	000031	099961	000038
000037	000044	099966	099994	000022	000008	000011	099993
000013	000008	000002	000026	000040	000003	000012	099973
000013	099988	099985	000005	099984	099995	000024	000004
000002	099962	000027	099991	099980	099985	000013	099987
000010	099993	000019	000014	000006	099986	099983	099988
099982	099995	099981	099980	000005	000004	000007	000021
099994	000005	099984	099981	000005	099993	000001	099998
000016	000008	099977	000003	099976	000004	000012	099979
099991	000002	000017	000021	000028	000003	000018	000006
000002	000004	099986	000011	000005	099984	099990	099990
000005	000002	099997	000002	000008	099992	000014	000001
000005	000007	000005	000006	099997	099997	099988	000007

การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

1. ค่าเฉลี่ย (Mean)

ค่าเฉลี่ยของปริมาณปรอทในน้ำทะเลตัวอย่างทั้งหมดที่วิเคราะห์ โดยใช้สูตร (47)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

เมื่อ $\bar{X}$ คือค่าเฉลี่ยของปริมาณปรอทในน้ำทะเล

$\sum_{i=1}^N X_i$ คือผลรวมของปริมาณธาตุในสารตัวอย่างทุกตัวอย่าง

N = จำนวนสารตัวอย่าง

จากตารางที่ 3 ปริมาณปรอทในน้ำทะเลเฉลี่ย

$$\bar{X} = \frac{5.3559}{21}$$

$$= 0.25504 \text{ ppb}$$

2. ความแปรปรวนและความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Variance and Standard deviation)

การวัดการกระจายแบบนี้กำลังเป็นที่นิยมกันแพร่หลาย เพราะเป็นการวัดการกระจาย

ที่มีความหมายที่สุด จากข้อมูลตาราง 4

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N}$$

ตาราง 4 แสดงการหาค่า Mean (μ) และ Standard divation (σ)

เบอร์สำรตัวอย่าง	ปริมาณปรอทในน้ำทะเล	$x - \mu$	$(x - \mu)^2$
1	0.2651	0.01006	0.0001012
2	0.2452	- 0.00984	0.0000968
3	0.2805	0.02946	0.0008678
4	0.2735	0.01846	0.0003407
5	0.2438	- 0.01124	0.0001263
6	0.2323	- 0.02274	0.0005171
7	0.2397	- 0.01534	0.0002353
8	0.2640	0.00896	0.0000802
9	0.2498	- 0.00524	0.0000274
10	0.2448	- 0.01024	0.0001048
11	0.2606	0.00556	0.0000309
12	0.2599	0.00486	0.0000236
13	0.2605	0.00546	0.0000298
14	0.2689	0.01386	0.0001920
15	0.2627	0.00766	0.0000586
16	0.2439	- 0.01114	0.0001240
17	0.2609	0.00586	0.0000343
18	0.2430	- 0.01204	0.0001449
19	0.2608	0.00576	0.0000331
20	0.2470	- 0.00804	0.0000646
21	0.2490	- 0.00604	0.0000364
$\mu = 0.25504$ ppb			$\sum (x - \mu)^2 = 0.0032698$

เมื่อ μ = ค่าเฉลี่ย (Mean) ของประชากร
จากข้อมูลการคำนวณตารางที่ 4 จะได้

$$s^2 = \frac{0.0032698}{21}$$

$$= 0.00015570$$

นั่นคือการวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน = 0.00015570 ppb

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \mu)^2}{N}}$$

จากข้อมูลตาราง 4

$$s = \sqrt{\frac{0.0032698}{21}}$$

$$= 0.01247798 \text{ ppb}$$

ผลการทดลอง

จากการทดลองวิเคราะห์น้ำทะเลตัวอย่าง 21 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังตาราง 4 ซึ่ง
ปริมาณปรอทในน้ำทะเลเฉลี่ย = 0.25504 ppb ความแปรปรวน 0.00015570 ppb
ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.01247798 ppb

อภิปรายผลการทดลอง

เปรียบเทียบผลการทดลองวิเคราะห์ปรอทในน้ำทะเลกับ Literature ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับ Literature

ผู้ทดลอง	ปริมาณปรอทในน้ำทะเล (ppb)
David H. Klein (4) วิจัยพบว่าปริมาณปรอทในน้ำทะเลย่านที่ไม่มีปรอท contaminated	0.10
จาก Hand Book (48) กล่าวถึงปริมาณปรอทในน้ำทะเลว่ามี	0.30
การทดลองครั้งนี้พบว่าปริมาณปรอทในน้ำทะเลมี	0.25504

จากตารางเปรียบเทียบผลการทดลอง จะเห็นว่าใกล้เคียงกับ Literature แสดงว่า เทคนิคการวิเคราะห์หาปรอทในน้ำทะเลโดยวิธี Destructive neutron activation analysis แล้วทำ chemical separation โดยการกลั่นเอาปรอทออกมาจาก Interference ได้ผลน่าเชื่อถือ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.01247798 ppb. จะเห็นว่ามีความน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยมาก ๆ ขนาดน้อยกว่า 1 ppb. ซึ่งถือว่ามีความเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อย

ข้อผิดพลาดของการทดลอง

ความผิดพลาดในการวิเคราะห์แบบ Neutron activation analysis อาจเกิดขึ้นขึ้นเนื่องมาจากสาเหตุต่าง ๆ ดังนี้

1. ความผิดพลาดเนื่องจากปฏิกิริยาแทรกซ้อน เช่นอาจมี (n, P) reaction (n, α) reaction ทำให้สามารถที่จะเกิด transmutation ของธาตุขึ้นมาเป็น Hg^{203} ได้ ทั้งนี้ก็เพราะว่าในเครื่องปฏิกรณ์ Fast neutron ด้วย

2. ความผิดพลาดเนื่องจาก Flux distribution เพราะไม่ผูกสารตัวอย่างให้ติดกับสารมาตรฐาน ทำให้ตำแหน่งในการอาบรังสีต่างกัน เลยทำให้ Neutron flux ของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานไม่เท่ากัน

3. ความผิดพลาดทางสถิติการนับรังสี (Statistical error) เกิดจากการที่สารกัมมันตรังสีมีการสลายตัวแบบ Random phenomena ซึ่งมีค่า Standard deviation เกือบเท่า square root ของค่าเฉลี่ยซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่จะลดน้อยลงเมื่อธาตุที่นำมาวัดมี Activity ตั้งแต่ 100 cpm. ขึ้นไป

4. ความผิดพลาดเนื่องจาก Self-shielding ของสารตัวอย่าง โดยเฉพาะธาตุที่มี Neutron absorption cross-section มาก ๆ ความเข้มของนิวตรอนที่กึ่งกลางสารตัวอย่าง อาจมีค่าน้อยกว่าบริเวณผิวรอบ ๆ กรณีที่สารมาตรฐานมีขนาดและรูปร่างไม่เหมือนกับสารตัวอย่าง ก็ส่งผลทำให้ Neutron flux แตกต่างกันได้ เพราะฉะนั้นควรจะใช้สารตัวอย่างน้อย ๆ จะลดความผิดพลาดนี้ได้

ส่วนสารมาตรฐานนั้น ถ้ามีปริมาณมากกว่า 1 มิลลิกรัม ความผิดพลาดแบบนี้จะมีมากขึ้น (39)

5. ความผิดพลาดในการเตรียมสารตลอดจนการชั่งน้ำหนัก ซึ่งถือว่าเป็น personal error ต้องใช้ความละเอียดรอบคอบ

6. ความผิดพลาดอันเนื่องมาจาก Long-Lived radioisotope ที่ตกค้างอยู่ในห้องนับรังสี เพราะฉะนั้นเมื่อทดลองแล้วต้องเอา sample ออกกัมมันตรังสีทิ้งในถังจัดกาก แต่ความผิดพลาดกรณีนี้ สามารถแก้ไขได้โดยการลบ Background ของเครื่องวัดรังสี

บทขอ สรุปผลและขอเสนอแนะ

ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า

1. เพื่อค้นคว้าหา เทคนิคการวิเคราะห์หาปรอทในน้ำทะเล โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน
2. เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณปรอทในน้ำทะเล
3. เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทในอาหารไทยตามโครงการสำรวจหาปริมาณปรอทในอาหารไทยของคณะกรรมการการสำรวจหาปริมาณปรอทในอาหารไทย คณะกรรมการวิทยาศาสตร์ทางทะเลแห่งชาติ

กลุ่มตัวอย่าง

น้ำทะเลตัวอย่าง ทางคณะกรรมการการสำรวจหาปริมาณปรอทในอาหารไทยตอนบน เก็บให้พร้อมกับกลุ่มตัวอย่างอื่น ๆ ขณะออกสำรวจ

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้า

1. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย 1 ของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติเป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน
2. เครื่องวัดรังสี Ge(Li) - Detector และ NaI (Tl) - Detector
3. หลอดไฟฟ้าอินฟราเรด เครื่อง freeze drying และเครื่องมือกลั่นปรอทตามรูปที่ 10

วิธีดำเนินการ

เอาน้ำทะเลตัวอย่างมา Concentrated ด้วยแสงอินฟราเรดที่อุณหภูมิประมาณ 42°C จนเกือบแห้ง แล้วทำให้แห้งด้วยเครื่อง freeze drying แล้วชั่งน้ำหนักเกลือใส่ quartz พร้อมกับสารปรอทมาตรฐาน $0.5 \mu\text{g}$ ยาวรังสีใน Wet I.P. เป็นเวลา 10 วัน แล้วทิ้งให้โซเดียมกับมันทรีดิสลายตัว 2 สัปดาห์ จากนั้นนำ quartz มาทำให้เป็นควย Liquid nitrogen พู quartz ใส่ขวดกลั่น แล้วกลั่นแยกปรอทออกมา แล้วตกตะกอนเป็น HgS

นำตะกอนไปหึ่งและวัดปริมาณรังสีคำนวณหาปริมาณปรอทในน้ำทะเลจากสูตร

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

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลโดยค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง

ผลการศึกษาค้นคว้า

จากการวิเคราะห์พบว่าในน้ำทะเลในอ่าวไทยมีปริมาณปรอทเฉลี่ย 0.25504 ppb ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองเท่ากับ 0.01277 ppb

ข้อเสนอแนะ

1. การ concentrated น้ำทะเลด้วยแสงอินฟราเรด ควรจะมีเทอร์โมมิเตอร์วัดที่ผิวน้ำตัวอย่าง ไม่ควรเกิน 65°C เพื่อป้องกันมิให้ปรอทสูญหายไป
2. การนำสารตัวอย่างเข้าอบรังสีไม่ควรเกิน 3 ตัวอย่างต่อ container 1 อัน เพื่อป้องกันการ shield กัน เนื่องจากสารตัวอย่างมีปริมาณมาก
3. ระยะเวลาในการอบรังสีไม่ควรน้อยกว่า 10 วัน และไม่ควรถึงให้สลายตัวนานเกิน 1 เดือน เพราะจะทำให้ Activity ของปรอทมีน้อยลงเกินไป แต่ก็ไม่ควรน้อยกว่า 2 สัปดาห์ เนื่องจากมีรังสีแรงจะทำให้เกิดอันตรายกับผู้ที่ทำการวิเคราะห์ได้ พบว่าเมื่อทิ้งให้สลายตัว 2 สัปดาห์ น้ำทะเล 3 ตัวอย่าง มีรังสีแรงถึง 20 mR/hr
4. การกลั่นปรอท ต้องทำในตู้ควันเพราะเกิดกาซ NO ซึ่งเป็นการพิษเป็นจำนวนมาก
5. การกรองตะกอน HgS ควรใช้กระดาษกรองชนิดไม่ดูดน้ำ เพื่อความสะดวกในการทำตะกอนแห้ง เพราะตะกอน HgS ใช้ความระมัดระวังสูงไม่ได้
6. ถ้าจะมีการวิเคราะห์สารตัวอย่างเป็นจำนวนมาก ๆ ก็สามารถทำติดต่อกันได้ โดยทำพร้อม ๆ กัน จะกลั่นแยกปรอทได้วันละ 2 ตัวอย่าง และสารมาตรฐานสามารถกลั่นได้ถึง 4 ตัวอย่าง .

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

1. Parizek J., "Toxicological Studies Involving Trace Elements" Nuclear Activation Technique in The Life - Science, IAEA, Vienna, 1972, p. 182.
2. ชูพินา ภัตสรากุล "พิษของปรอทและการหาปริมาณ" วิทยาศาสตร์ 11 : 47 - 51
ตุลาคม 2515.
3. "New Focus on Mercury" Chemistry 43 (10) : 18 - 20 November 1970.
4. Klein, David H. "Some General and Analytical Aspects of Environmental Mercury Contamination" Journal of Chemical Education 49 (1) : 7 - 10 January 1972.
5. 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 - August 1973.
6. สุรัช นิมิจิรวัฒน์ "พิษของปรอทในสิ่งแวดล้อม" วิทยาศาสตร์ 25 (11) : 739 - 742
พฤศจิกายน 2514.
7. รายงานประชาชาติ "โรงงานเปโตรเคมีคิด การสร้างสรรค่นรบนดิน" ประชาชาติ
42 : 24 - 34 กันยายน 2517.
8. Klein, P.H. and Goldberg, E.D. Environmental Science and Technology 4 : 765 (1970).
9. Dean, John G., Bosqui, Frank L. and Lanouette, Kenneth H. "Removing Heavy Metals from Waste Water" Environmental Science and Technology 6(6) : 518 - 522 June 1972.
10. Goldwater, Leonard J. "Mercury in the Environments" Scientific America 224(5) : 15 - 21 May 1971.
11. Reiniger P., Frissel M.J., Poelstra P. and Beck H. "A Hierarchy of models for the Behaviour of Mercury in the Ecosystem" Nuclear Techniques in Environmental Pollution IAEA, Vienna, 1971. pp. 407 - 413.

12. คณะกรรมการการสำรวจน้ำเสียในอ่าวไทย รายงานและสรุปผลการสำรวจน้ำเสียของอ่าวไทย ตอนบน ครั้งที่ 1 คณะกรรมการวิทยาศาสตร์ทางทะเลแห่งชาติ กรุงเทพฯ 2516.
13. Girardi F. and Margaret, Merlini "Studies on the Distribution of Trace Elements in a Mollusk from a Freshwater Environment by Activation Analysis" European Atomic Energy Community 1963, 26 p.
14. Bowen, H.J.M. and Gibbons D. Radioactivation Analysis Oxford University Press, Amen House, London, 1963, 295 p.
15. Girardi F. and Sabbioni E. "Selective Removal of Radio-Sodium from Neutron-Activated Materials by Retention on Hydrated Antimony Pentoxide" Journal of Radioanalytical Chemistry 1 : 169 - 178 October, 1968.
16. Sjostrand, B., "Simultaneous Determination of Mercury and Arsenic in Biological and Organic Materials by Activation Analysis" Analytical Chemistry 36(4) pp. 814 - 1891.
17. Suchat Mongkolphatha and Others "The Determination of Trace Elements in a Standard Kale Sample by Neutron Activation Analysis" Office of Atomic Energy for Peace, Bangkok, 1973, 14 p.
18. Becknell, D.E., Marsh, R.H., and William Allie, Jr. "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.
19. Elliv, Steinnes and Oddvar, Johansen "Neutron Activation Method for Determination of Mercury" Nord. hyg. Tidskr. 50(2) : 71 - 74, 1969.
20. Ljunggren, Knut, Sjostrand B. Daisy Hagman and Torbjarn Westermarck "Activation Analysis for Mercury" Analytical Abstract, Vol. 19, 1970.
21. Weiss, Herbert. V. and Cragier, Thomas E., "Determination of Mercury in Sea Water by Radioactivation" Analytical Abstract Vol. 23 No.2050, 1972.
22. Kosta, L. and Byrne A.R. "Activation Analysis for Mercury in Biological Sample at The nanograms Level Talanta 16(9) : 1297 - 1303, 1969.

23. Seitz, Donald F. and Turelian, Karl K. "Geographical and Vertical distribution of several trace elements in sea water using neutron activation analysis" Chemical Abstract 62 : 15901 - 1965.
24. Kawakami Hiragasu "The Determination of microgram amounts of mercury in hot spring water by by neutron activation analysis" Nuclear Science Abstracts of Japan Japan Atomic Energy Research Institute, 8(5) : 248 September, 1969.
25. Korkisch, J. and Orlandini K.A. "Separation of Traces of Metal Ions from Sodium Matrices" Argonne National Laboratory, Illinois, 1968, 7 p.
26. Moore, Fletcher L. "Solvent Extraction of Mercury from Brine Solutions with High Molecular - Weight Amines" Environmental Science and Technology 6(6) : 525 - 529 June, 1972.
27. Kim J.L. and Sunoko S.R. "Activation Analysis of Mercury in Biological Samples" Journal of Radioanalytical Chemistry Vol. 6 No. 1, 257 - 267, October 1972.
28. Byrne, A.R., Dermelj M. and Kosta L. "A Neutron Activation Study of Environmental Contamination and Distribution of Mercury in Animals and Fish" Nuclear Techniques in Environmental Pollution, IAEA, Vienna, 1971.
29. Lisk, Ronald J. "Recent Developments in the Analysis of Toxic Elements" Science Vol. 184, No. 4142, 1137 - 1141 June, 1974.
30. De Goey, J.J.M. and Others "Mercury Distribution Levels Observed in Various Ecosystems as Determined by Neutron - Activation Analysis" Nuclear Activation Techniques in the Life Sciences IAEA, Vienna, 1972, 295 - 307 pp.
31. Lyon, Jr., William, S. Guide to Activation Analysis, D. Vannostrand Co., Inc., New York, 1964, pp. 1 - 3.
32. Lapp, R.E., Andrews, H.L. and Harward, L., Nuclear Radiation Physics, Practice - Hall Inc., 1954, 532 pp.
33. Bowen, H.J.M., and Gibbons, D., Radioactivation Analysis, Oxford At The Clarendon Press, London, 1963, 295 pp.
34. Willard, H.H., Instrumental Method of Analysis, 4th Ed., Princeton Van Nostrand, 1965, 784 p.
35. Corliss, William R., Neutron Activation Analysis USAEC Division of Technical Information Extension, Oak Ridge, Tennessee, 1963, 27 p.

36. Cronthamel, C.E. Applied Gamma - ray Spectrometry, Pergamon Press Inc, 1960, 443 pp.
37. Friedlander, Gerhart and Kennedy, Joseph W. Nuclear and Radiochemistry, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1957, 468 p.
38. อนงค์ นิลอุบล, ม.ล. การวิเคราะห์แบบแอกติเวชัน เอกสารสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, บางเขน, กรุงเทพฯ. 8 หน้า.
39. Lenihan, J.M.A., and Thomson, S.J., Activation Analysis, Academic Press, London, 1965, 211 pp.
40. เบ็ญใจ เลหาตนิช ฟิสิกส์ยุคใหม่เบื้องต้น คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพฯ. 2515. 308 หน้า.
41. Kemper, A., and Kempen, G.A., "A Simple Computer Program for High Resolution Gamma Spectra" Journal of Radioanalytical Chemistry 6 : 461 - 475, 1970.
42. ประสิทธิ์ มีสุข การวิเคราะห์ธาตุเซเลเนียม ทองแดง และอาร์เซนิกในเลือดโดยวิธีนิวตรอน แอกติเวชัน. วิทยานิพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต, วิทยาลัยวิชาการศึกษา, 2517
43. สมเจตน์ แสงเพียง อิเล็กตรอนิกส์เบื้องต้นเกี่ยวกับการวัดรังสี, เอกสารสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, กรุงเทพฯ. หน้า 4.
44. ชุมพล พัฒนสุวรรณ การวิเคราะห์ธาตุแมงกานีสและสังกะสี ในอาหารไทย โดยวิธีทางนิวเคลียร์ วิทยานิพนธ์ กศ.ม. วิทยาลัยวิชาการศึกษา 2514 หน้า 6.
45. กฤษดา กรุกทอง การวิเคราะห์ธาตุบางชนิดในน้ำมันหอยด้วยเครื่องวัดโดยไม่ทำลาย - Non-destructive neutron activation analysis, วิทยานิพนธ์ กศ.ม. วิทยาลัยวิชาการศึกษา 2517, 69 หน้า.

46. He th, R.L. Scintillation Spectrometry Gamma-Ray Spectrum Catalogue
2nd ed. vol. 2 U.S. Atomic Energy Commission 1964, Plate no.
80 - 203 - 2.
47. ลวน สายยศ และ อังคณา ตันติรัตนานนท์ สถิติวิทยาทางการศึกษา วัฒนาพานิช
สารานุกรม กรุงเทพฯ 2515. 276 หน้า.
48. Weast, Robert C. and Selby, Samuel M. Handbook of Chemistry and
Physics 48th Edition, The Chemical Rubber Co., Ohio, 1962,
pp. F-136.

ภาคผนวก

ตารางที่ 6 ข้อมูลการหาน้ำหนักน้ำทะเลที่ใช้ในการวิเคราะห์

เบอร์สารตัวอย่าง	น.น.เกลือทั้งหมด (กรัม)	น.น.เกลือที่ใช้ (กรัม)	ปริมาณน้ำทะเล (มิลลิลิตร)	น.น.น้ำทะเล (กรัม)
1	34.4612	33.2484	964.806	979.7219
2	29.5784	29.3598	992.609	1007.9547
3	28.2785	28.1713	996.209	1011.6103
4	28.8115	28.6935	995.904	1011.3007
5	26.9780	26.8154	993.972	1009.3388
6	28.6425	28.5593	997.095	1012.5100
7	28.3189	28.2251	996.687	1012.0957
8	27.9467	27.5730	986.628	1001.8812
9	27.8208	27.5779	991.269	1006.5940
10	27.2901	27.0237	990.238	1005.5470

เบอร์สารตัวอย่าง	น.น.เกลือทั้งหมด (กรัม)	น.น.เกลือที่ใช้ (กรัม)	ปริมาณน้ำทะเล (มิลลิลิตร)	น.น.น้ำทะเล (กรัม)
11	28.5613	28.4399	995.749	1011.1432
12	28.5963	28.3928	992.883	1008.2329
13	28.5992	28.4740	995.622	1011.0143
14	28.4438	28.4170	999.057	1014.5024
15	28.4113	28.3740	998.681	1014.1206
16	27.8017	27.7913	999.625	1015.0792
17	28.1964	27.7376	983.728	998.9364
18	28.7796	28.3851	986.292	1001.5400
19	28.9467	28.5621	986.713	1001.9675
20	28.7010	28.2110	982.927	998.1230
21	29.5784	29.2144	987.693	1002.9627

ตารางที่ 7 ข้อมูลการคำนวณหาปริมาณปรอท

เบอร์สารตัวอย่าง	ปริมาณรังสี peak	น.น.ตะกอน HgS (กรัม)	%100 yield	ปริมาณปรอท (ไมโครกรัม)
1	2828	0.01815	3614.320	0.2598
S ₁	4273	0.01425	6599.544	
2	2328	0.01570	3439.508	0.2472
S ₁	4273	0.01425	6555.544	
3	1834	0.01800	2363.414	0.2838
S ₂	2944	0.01640	4163.964	
4	1882	0.01895	2303.687	0.2766
S ₂	2944	0.01640	4163.964	
5	1089	0.01420	1778.904	0.2461
S ₃	2725	0.01750	3611.948	
6	1092	0.01490	1700.002	0.2353
S ₃	2725	0.01750	3611.948	
7	1285	0.01700	1753.344	0.2426
S ₃	2725	0.01750	3611.948	
8	850	0.01430	1378.783	0.2645
S ₄	1600	0.01425	2604.463	
9	618	0.01755	816.816	0.2515
S ₄	1600	0.01425	2604.463	
10	808	0.01320	1419.876	0.2462
S ₅	2081	0.01675	2881.843	

เบอร์ตัวอย่าง	ปริมาณรังสีได้ peak	น.น.ตะกอน HgS (กรัม)	%100 yield	ปริมาณปรอท (ไมโครกรัม)
11	927	0.01415	1519.624	0.2636
S ₅	2081	0.01675	2881.843	
12	689	0.01780	897.867	0.2621
S ₆	1033	0.01400	1711.533	
13	392	0.01815	499.704	0.2634
S ₇	519	0.01270	947.931	
14	399	0.01790	517.050	0.2729
S ₇	519	0.01270	947.931	
15	364	0.01070	789.097	0.2665
S ₈	986	0.01545	1480.340	
16	411	0.01300	733.350	0.2476
S ₈	986	0.01545	1480.340	
17	316	0.01720	426.159	0.2607
S ₉	603	0.01710	817.964	
18	535	0.01715	707.376	0.2434
S ₁₀	767	0.01225	1452.353	
19	394	0.01670	547.258	0.2614
S ₁₁	787	0.01745	1046.146	
20	375	0.01685	516.231	0.2466
S ₁₁	787	0.01745	1046.146	
21	911	0.01700	1243.032	0.2498
S ₁₂	1882	0.01755	2487.457	

ตารางที่ 8 ข้อมูลแสดงปริมาณปรอทเป็นไมโครกรัมในน้ำทะเล 1 กรัม

เบอร์สารตัวอย่าง	ปริมาณปรอท(μg)	น้ำทะเลที่ใช้ (กรัม)	ปริมาณปรอทเป็น μg ในน้ำทะเล 1 กรัม
1	0.2598	979.7219	0.0002651
2	0.2472	1007.9547	0.0002452
3	0.2838	1011.6103	0.0002805
4	0.2766	1011.3007	0.0002735
5	0.2461	1009.3388	0.0002438
6	0.2353	1012.5100	0.0002323
7	0.2426	1012.0957	0.0002397
8	0.2645	1001.8812	0.0002640
9	0.2515	1006.5940	0.0002498
10	0.2462	1005.5470	0.0002448
11	0.2636	1011.1432	0.0002606
12	0.2621	1008.2329	0.0002599
13	0.2634	1011.0143	0.0002605
14	0.2729	1014.5024	0.0002689
15	0.2665	1014.1206	0.0002627
16	0.2476	1015.0792	0.0002439
17	0.2607	998.9364	0.0002609
18	0.2434	1001.5400	0.0002430
19	0.2614	1001.9675	0.0002608
20	0.2466	998.1230	0.0002470
21	0.2498	1002.9627	0.0002490

$$\text{ปริมาณปรอทในน้ำทะเล 1 กรัม เฉลี่ย} = 0.25504 \times 10^{-3} \mu\text{g}$$

$$\text{หรือ} = 0.25504 \text{ ppb}$$

$$\text{ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน} = 0.0124779 \times 10^{-3} \mu\text{g}$$

$$\text{หรือ} = 0.0124779 \text{ ppb}$$

การคำนวณหาค่าเฉลี่ย

$$\text{ค่าเฉลี่ย (Mean)} = \sum_{i=1}^N X_i$$

$$= \frac{0.0053559}{21}$$

$$\text{ปริมาณปรอทในน้ำทะเลเฉลี่ย} = 0.00025504 \text{ ppm.}$$

$$\text{หรือ} = 0.25504 \text{ ppb}$$

$$= \sqrt{\frac{\sum (X - \mu)^2}{N}}$$

$$= \sqrt{\frac{0.0032698}{21}}$$

$$\text{ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง} = 0.0124779 \text{ ppb}$$

ข้อมูล
Standard Curve

ข้อมูลกราฟรูปที่ 8

NaI (Tl) - Detector Gain 10:00 Zero Level 8:00 H.V. 1000 volts

Cs¹³⁷ 0.6612 MeV:

010000	000000	000006	000047	003316	000646	000626	000767
000888	000729	000705	000815	000862	000887	000966	000908
000806	000825	000715	000687	000692	000640	000641	000685
000699	000693	000616	000631	000624	000505	000380	000307
000210	000176	000175	000158	000228	000505	001383	000316
003239	003195	002376	001225	000442	000138	000066	000035
000020	000021	000017	000018	000018	000020	000015	000020
000019	000019	000024	000014	000017	000020	000023	000012
000012	000013	000015	000014	000012	000017	000012	000013

Na²² 0.511, 1.274 MeV.

010000	000000	000001	000054	002120	000234	000237	000262
000357	000272	000325	000364	000331	000318	000286	000263
000245	000256	000221	000218	000219	000196	000202	000245
000260	000199	000131	000105	000105	000143	000271	000476
000644	000533	000306	000121	000075	000050	000054	000060
000056	000051	000048	000049	000038	000043	000038	000043
000045	000038	000036	000046	000042	000046	000040	000037
000041	000047	000037	000046	000025	000039	000022	000029
000025	000028	000027	000020	000030	000024	000027	000049
000071	000073	000113	000093	000075	000072	000041	000025
000017	000018	000007	000019	000022	000013	000010	000010
000016	000012	000012	000005	000008	000005	000004	000004
000016	000001	000003	000003	000005	000008	000006	000004
000005	000002	000003	000003	000001	000001	000001	000000

Co⁶⁰ 1.17, 1.332 MeV.

010000	000000	000002	000068	002766	000422	000457	000468
000514	000432	000482	000507	000500	000486	000545	000576
000570	000495	000447	000448	000384	000361	000386	000422
000445	000372	000318	000303	000305	000248	000249	000269
000299	000273	000266	000288	000253	000275	000256	000258
000260	000285	000296	000259	000254	000269	000262	000265
000293	000307	000311	000294	000305	000322	000266	000313
000278	000252	000245	000205	000196	000176	000179	000212
000230	000323	000430	000627	000690	000705	000625	000460
000298	000269	000319	000448	000523	000615	000557	000472
000359	000223	000127	000071	000049	000025	000018	000014
000017	000009	000009	000012	000004	000004	000005	000004
000005	000009	000003	000004	000005	000005	000004	000003
000007	000006	000002	000002	000003	000004	000004	000001

ข้อมูลกราฟรูปที่ 13

NaI (Tl) - Detector Gain 10:00 Zero Level 8:00 H.V. 1000 volts

สารตัวอย่างเบอร์ 0 เวลาวัดรังสี $t = 0$ days

099999	000000	000012	003237	000229	000231	000253	000268
000615	000469	000232	000108	000094	000224	000178	000231
000204	000159	000117	000180	000533	000925	001678	002090
001679	001031	000439	000140	099982	000010	000014	000003
099963	099974	099979	099992	000030	000034	000006	099981
099981	000030	000000	099968	000027	000008	000045	000022
099966	000021	000000	000010	099977	099987	000042	000020
099985	000027	000015	099985	000007	099989	099988	000054
099998	099957	099981	099971	099977	099966	000024	099970
000005	099994	099995	099978	000013	000005	099981	000998
000034	099997	000007	000030	099996	000022	099970	099988

สารตัวอย่างเบอร์ 0 เวลาวัดรังสี $t = 32$ days

099999	000000	000014	001625	099854	000012	000193	000176
000059	000124	000013	000120	000195	000189	000062	000080
000015	000325	000948	001175	000642	000226	000061	000098
000147	000000	099991	000076	099968	000011	000011	000017
099964	000034	000023	099985	099965	000022	000055	000035
099989	099997	000002	099965	099995	000045	000020	000006
000005	099972	000023	000057	000035	000003	099989	099953
099948	099982	000041	099982	000002	000011	099978	000022
000025	099976	000044	000008	000002	000035	000046	000016
099996	000012	099973	099982	000045	000006	000002	099973
099984	000001	000003	000039	099992	000022	000004	000013

สารตัวอย่างเบอร์ 0 เวลาวัดรังสี $t = 44$ days

099999	000000	099978	002951	097912	000107	000261	000412
000016	000060	000261	000040	000178	000177	000034	000020
000143	000363	001008	000940	000366	000095	000053	000047
099963	099969	099982	000025	000028	099998	099958	000002
000003	000035	099983	000001	000011	000002	099987	099973
099956	099931	099991	099983	000003	000010	000033	099989
000038	099982	099975	099995	000032	099980	099982	000011
099974	099978	000003	099994	000010	000028	000000	099992
000003	000000	099983	000035	000032	000003	000050	000025
099992	099978	000015	000027	000022	099983	099974	099973
099982	000001	000013	000040	099967	000019	099988	000010