

THE LIBRARY
COLLEGE OF EDUCATION
BANGKOK, THAILAND

การวิเคราะห์ธาตุเซเลเนียม ทองแดง และอาร์เซนิกในเลือดโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน

ปริญญานิพนธ์

ของ

ประคิษฐ์ มีสุข

20 ค.ย. 2517

เสนอต่อวิทยาลัยวิชาการศึกษา
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต

7 มีนาคม 2517

คณะกรรมการที่ปรึกษาประจำตัวนิสิตได้พิจารณาปัญหานี้เรียบร้อยแล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต
ของวิทยาลัยวิชาการศึกษา ได้.

ศาสตราจารย์ ดร. ประธาน

ศาสตราจารย์ ดร. กรรมการ

7 มีนาคม 2517

ประกาศคุณูปการ

การทำปฏิญาณพันธกิจนี้ได้รับพระราชทาน เงินทุนช่วยเหลือการวิจัยจากทุนภูมิพล
ผู้วิจัยรู้สึกสำนึกในพระมหากรุณาธิคุณ เป็นล้นเกล้าล้นกระหม่อม ทั้งได้รับความช่วยเหลือจาก
กอง เเคมี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงอุตสาหกรรม ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้
ปฏิญาณพันธกิจนี้สำเร็จลงด้วยดีเนื่องจากผู้เขียนได้รับคำแนะนำและช่วยเหลือ
จาก อาจารย์ ม.ล.อนงค์ นิลอุบล หัวหน้ากอง เเคมี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ
อาจารย์สมเกียรติ กรีทอง คณะวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ วิทยาลัยวิชาการศึกษา
ประสานมิตร และคุณเชาวน์ รอดทองคำ นักวิทยาศาสตร์กอง เเคมี สำนักงานพลังงาน
ปรมาณูเพื่อสันติ ผู้เขียนขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ประสิทธิ์ มีสุข

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
คำนำ	1
ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า	4
ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า	4
ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า	5
คำจำกัดความและศัพท์เฉพาะ	5
เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค้นคว้า	6
2 ทฤษฎี	13
ทฤษฎีการวิเคราะห์แบบนิเวศรอนแอคติเวชัน	13
3 เครื่องมือและวิธีดำเนินการ	21
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	21
วิธีดำเนินการทดลอง	25
4 การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง	48
สถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล	48
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	53
5 บทขอ สรุป และขอเสนอแนะ	60
บรรณานุกรม	64
ภาคผนวก ก.	71
ภาคผนวก ข.	78
ภาคผนวก ค.	93

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุ Cu, As และ Se	25
2 แสดงปริมาณธาตุ Cu, As และ Se ในสารตัวอย่าง	47
3 แสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Cu, As และ Se ในเลือด	48
4 แสดงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณธาตุ Cu, As และ Se	49
5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างธาตุ Cu กับ As, Cu กับ Se และ As กับ Se	50
6 การแจกแจงความถี่ของปริมาณธาตุ Cu แบบจัดเป็นกลุ่มโดยมีอันตรภาค ชั้น $0.2 \mu\text{g}$	50
7 การแจกแจงความถี่ของปริมาณธาตุ As แบบจัดเป็นกลุ่มโดยมีอันตรภาค ชั้น $0.05 \mu\text{g}$	51
8 การแจกแจงความถี่ของปริมาณธาตุ Se แบบจัดเป็นกลุ่มโดยมีอันตรภาค ชั้น $0.05 \mu\text{g}$	52
9 เปรียบเทียบผลการทดลองหาปริมาณธาตุ Cu ในเลือดกับ Literature	54
10 เปรียบเทียบผลการทดลองหาปริมาณธาตุ As ในเลือดกับ Literature	54
11 เปรียบเทียบผลการทดลองหาปริมาณธาตุ Se ในเลือดกับ Literature	55
12 แสดงค่าพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจาก Standard Co^{60} , Na^{22} และ Cs^{137}	74
13 แสดงข้อมูลการทดลอง	79
14 ข้อมูลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ ปริมาณธาตุ Cu ในเลือด	96
15 ข้อมูลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของปริมาณธาตุ As ในเลือด	98

ตาราง		หน้า
16	ข้อมูลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของปริมาณธาตุ Se ในเลือด	100
17	ข้อมูลการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Cu และ As ในเลือด	102
18	ข้อมูลการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Cu และ Se ในเลือด	105
19	ข้อมูลการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ As และ Se ในเลือด	108

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แผนผัง เครื่องปฏิบัติการปริมาณธาตุวิจัย 1	21
2 Block Diagram แสดงส่วนประกอบของ multichannel γ -spectrometer	23
3 โค้ดแกรมแสดงการสลายตัวของนิวเคลียสของธาตุ Cu	27
4 กราฟแสดงพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจากธาตุ Cu	28
5 โค้ดแกรมแสดงการสลายตัวของนิวเคลียสของธาตุ As	29
6 กราฟแสดงพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจากธาตุ As	30
7 โค้ดแกรมแสดงการสลายตัวของนิวเคลียสของธาตุ Se	31
8 กราฟแสดงพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจากธาตุ Se	32
9 โค้ดแกรมแสดงการแยกธาตุ Se, As และ Cu ให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีเคมี	35
10 แสดงการ เปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ของธาตุ Cu ในสารมาตรฐาน และสารตัวอย่าง เบอร์ 4	39
11 แสดงการ เปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ของธาตุ As ในสารมาตรฐาน และสารตัวอย่าง เบอร์ 17	43
12 แสดงการ เปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ของธาตุ Se ในสารมาตรฐาน และสารตัวอย่าง เบอร์ 11	46
13 การแจกแจงความถี่แบบฮิสโตแกรมของปริมาณธาตุ Cu ในเลือด	51
14 การแจกแจงความถี่แบบฮิสโตแกรมของปริมาณธาตุ As ในเลือด	52
15 การแจกแจงความถี่แบบฮิสโตแกรมของปริมาณธาตุ Se ในเลือด	53
16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรังสีแกมมาส่งออกมา และ Channel number	75

คำนำ

การวิเคราะห์เป็นวิธีหนึ่งที่ใ้คนหาข้อเท็จจริงทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (technology) ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาและสร้างความก้าวหน้าในสาขาวิชาการต่าง ๆ ทั้งในทาง การแพทย์ การเกษตร อุตสาหกรรม ฯลฯ การวิเคราะห์ธาตุเริ่มมีมาตั้งแต่คริสต์ศตวรรษ ที่ 5 - 6 อันเป็นยุคของการเล่นแร่แปรธาตุ (alchemy period) การวิเคราะห์กระทำ โดยใช้ประสาทสัมผัส (7) ต่อมาเมื่อวิชาฟิสิกส์เจริญมากขึ้น ทำให้วิธีการวิเคราะห์ธาตุอย่างมี หลักเกณฑ์เกิดขึ้นมากมาย เช่น gravimetric, colorimetric spectrographic และ mass spectroscopy แต่วิธีการดังกล่าวนี้ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยกว่า 10^{-15} อะตอมได้ (43)

ต่อมาปี ค.ศ. 1936 George Hevesy ซึ่งขณะนั้นทำงานอยู่ในสถาบันฟิสิกส์ของ มหาวิทยาลัยแมสซาชูเซตส์ ได้พบวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของ อะตอมของธาตุเป็นสำคัญ Hevesy ร่วมกับ H. Levi หาปริมาณธาตุ dysprosium ในธาตุ yttrium ที่ไม่บริสุทธิ์ โดยนำสารตัวอย่าง yttrium เขาอาบรังสีนิวตรอนจาก แหล่งกำเนิด radium-beryllium แล้วนับกัมมันตภาพรังสีด้วย Geiger-Muller tube ปรากฏว่ามี dysprosium ประมาณ 1% (63) การทดลองนี้นับเป็นจุดเริ่มต้นของการ วิเคราะห์โดยวิธีทางนิวเคลียร์ซึ่งเป็นงานแขนงหนึ่งในสาขาวิชาเคมีรังสี (Radiochemistry) อันเป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีความไว (sensitive) สูง คือสามารถตรวจหาธาตุที่มีปริมาณเพียง 10^{-9} อะตอม (43) หรือขนาด 10^{-6} กรัมได้ (8) Clark และ Overman เรียกการ วิเคราะห์นี้ว่า "การวิเคราะห์แบบแอคติเวชัน" (activation analysis)

ในปี ค.ศ. 1938 G.T. Seaborg ร่วมกับ J.J. Livingood เขียนรายงาน เผยแพร่การวิเคราะห์แบบแอคติเวชันเป็นครั้งแรกในสหรัฐอเมริกา นอกจากนี้ Seaborg และ

Livingood ยังหาความไม่บริสุทธิ์ของเหล็ก โดยนำสารตัวอย่างเหล็กเข้าอบรังสี neutron จาก cyclotron วัดอนุภาคเบตาที่ส่งออกมาจากธาตุไอโซโทปด้วย Lauritsen electro-scope พบว่าในเหล็กมี gallium 6 ppm. (63)

การใช้ธาตุบางชนิด เช่น โปรตอน อัลฟา และรังสีแกมมาเป็นตัวยิงเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุจะต้องใช้พลังงานมากเพื่อเร่งอนุภาคเหล่านั้นให้มีความเร็วเพียงพอที่จะผ่านเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุได้ แต่ถ้าวัดธาตุนิวตรอนเป็นตัวยิงไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานมากนัก เพราะนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ นักวิทยาศาสตร์จึงนิยมใช้นิวตรอนเป็นตัวยิงมากที่สุด เรียกเทคนิคการวิเคราะห์นี้ว่า "การวิเคราะห์แบบนิวตรอน-แอคทีเวชัน" (neutron activation analysis) เรียกย่อเป็นภาษาอังกฤษว่า NAA

ต่อมาในปี ค.ศ. 1949 G.E. Boyd อภิปรายและจัดพิมพ์ผลงานเกี่ยวกับ NAA ขึ้น เป็นเหตุให้ผู้สนใจการวิเคราะห์แบบนี้มาก การวิเคราะห์แบบ NAA นี้ ได้ขยายขอบเขตอย่างกว้างขวาง มีการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ สำหรับประเทศไทยตั้งเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (Office of the Atomic Energy for Peace) ซึ่งตั้งอยู่ที่ถนนศรีวิชัย อำเภอบางเขน กรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2505 เริ่มทำงานเป็นประจำหลังจากเดินเครื่องถึงขั้นวิกฤตเป็นครั้งแรก เมื่อวันที่ 27 ตุลาคม พ.ศ. 2505

ปัจจุบันนี้ NAA นำไปใช้เป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น วิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยในดินและพืช เพื่อช่วยพิจารณาการขาดอาหารของพืช โรคพืช และบอกลักษณะความสมบูรณ์ของดินในทางเกษตรกรรม วิเคราะห์เขม่าดินปืนที่ตกค้างอยู่ในมืออาชญากรในทางอาชญาวิทยา (Forensic Science) การหาความไม่บริสุทธิ์ของพลาสติกและโลหะผสมในทางอุตสาหกรรม และวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อย (trace elements) ที่มีอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของร่างกายมนุษย์และสัตว์ในทางการแพทย์ เป็นต้น /

ในร่างกายมนุษย์มีธาตุอยู่มากมายหลายชนิดด้วยกัน บางชนิดมีปริมาณมาก บางชนิดมีปริมาณน้อย บางชนิดมีความจำเป็นต่อร่างกาย แต่บางชนิดก็ไม่ได้มีความจำเป็นต่อร่างกาย

J.M.A. Lenihan (29) สรุปว่า ธาตุชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่ในร่างกายมนุษย์แบ่งออกได้เป็น-

5 ประเภท คือ

1. ธาตุที่มีปริมาณมาก ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของร่างกาย มี 10 ธาตุ คือ O, C, H, N, Ca, P, K, S, Na และ Cl
2. ธาตุที่มีปริมาณน้อยที่จำเป็นต่อร่างกาย มี 2 ธาตุ คือ Mg และ Fe
3. ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายและมีปริมาณน้อย ๆ (sub-trace levels) มี 7 ธาตุ คือ Zn, Cu, Mn, Mo, I, Co และ Se
4. ธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ ซึ่งบางครั้งก็มีความจำเป็นต่อร่างกาย มี 8 ธาตุ คือ Cr, F, Ni, Si, V, Cd, Al และ Sn
5. ธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ อื่น ๆ อีก 49 ธาตุ

ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณมากซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของร่างกายเท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเลือด เพื่อประโยชน์ทางการแพทย์ ดังเช่น แผนกโลหิตวิทยา โรงพยาบาลรามาธิบดี วิเคราะห์ธาตุ Na และ K ในเลือดคนปกติ ด้วยวิธี Flame Photometry พบว่าในเลือด 1 ลิตร มี Na 138 - 146 mEq มี K 3.8 - 5.1 mEq วิเคราะห์ธาตุ Ca และ Mg ด้วยวิธี atomic absorption spectrophotometry พบว่ามี Ca 9.5 - 10.5 mg % มี Mg 1.5 - 2.5 mEq/l และวิเคราะห์ธาตุ Fe ด้วยวิธีของ Hycel พบว่ามี Fe 57 - 159 $\mu\text{g} \%$ ซึ่งผลการวิจัยในต่างประเทศพบว่าในเลือดมีธาตุ Na, K, Ca และ Mg เท่ากับ 132 - 144 mEq/l, 3.6 - 4.8 mEq/l, 8.5 - 11.5 mg/100 ml และ 5.4 - 7.8 mg % ตามลำดับ และพบว่ามี Fe 45 mg ต่อน้ำหนักร่างกาย 1 กิโลกรัม (21) สำหรับธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ มีการวิเคราะห์ไว้ดังนี้

กรมวิทยาศาสตร์ กระทรวงอุตสาหกรรม วิเคราะห์ตะกั่วในเลือดด้วยวิธี dithizone ผลการวิเคราะห์ปรากฏว่าไม่พบตะกั่วในเลือดคนปกติ แต่ในเลือดผู้ป่วยที่ต้องสงสัยว่าเป็นโรคพิษตะกั่ว พบว่ามีตะกั่วอยู่ 0.94 ppm. (14)

ค.ศ. 1966 สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติแห่งประเทศไทยร่วมกับโรงพยาบาลศิริราช วิเคราะห์ธาตุ Mn ในเลือด น้ำปัสสาวะ และน้ำไขสันหลังของคนปกติและผู้ป่วยที่สงสัยว่าจะเป็นโรคพิษแมงกานีส (manganese poisoning) พบว่าในเลือดคนปกติ 100 มิลลิลิตร มี Mn

อยู่ 0.002 – 0.007 มิลลิกรัม แต่ในเลือดผู้ป่วยที่สงสัยว่าจะเป็นโรคพิษแมงกานีส มี Mn 0.005 – 0.02 มิลลิกรัม ในเลือด 100 กรัม (50, 51) จากผลการทดลองที่กล่าวมานี้เป็นเครื่องชี้ให้เห็นว่าในประเทศไทยยังมีการศึกษาธาตุปริมาณน้อย ๆ ในเลือดไม่มากนัก

ทว่าเหตุนี้ผู้เขียนจึงมีความคิดว่าควรจะวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ ในเลือดคนไทยเพิ่มขึ้นอีก เพื่อให้ทราบปริมาณธาตุดังกล่าว อันจะเป็นประโยชน์ในการแพทย์ เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบกับผู้ป่วย ซึ่งเป็นสมมุติฐานของโรคต่อไป กล่าวคือ การที่แพทย์จะวินิจฉัยผู้ป่วยที่สงสัยว่าถูกวางยาพิษหรือป่วยด้วยธาตุเป็นพิษเพราะรับประทานยาพิษ หรือทำงานในโรงงานอุตสาหกรรมบางแห่ง แพทย์จะต้องนำเลือด น้ำปัสสาวะ หรือน้ำไขสันหลังของผู้ป่วยมาวิเคราะห์หาธาตุที่สงสัยนั้น จะทำให้แน่นอนโดยอาศัยวิธี NAA (11)

ธาตุที่ผู้เขียนเลือกศึกษาคือ As, Cu และ Se เพราะว่า As เป็นธาตุที่เป็นพิษ (toxic) ในร่างกาย ส่วน Cu และ Se เป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย แต่ถ้ามามากเกินไปหรือน้อยเกินไป จะให้โทษทำให้เกิดโรคบางชนิดได้

ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเซเลเนียม (Se) ทองแดง (Cu) และ อาร์เซนิก (As) ในเลือด โดยใช้วิธีทางนิวเคลียร์ที่เรียกว่าวิธีวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน

ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า

1. ผลการศึกษาค้นคว้านี้จะทำให้ทราบปริมาณธาตุเซเลเนียม ทองแดง และอาร์เซนิกในเลือดของคนปกติ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการแพทย์เกี่ยวกับสมมุติฐานของการเกิดโรค
2. เทคนิคและวิธีการที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าและทดลองในเรื่องนี้ สามารถนำไปใช้ในการเรียนการสอนวิชานิวเคลียร์ฟิสิกส์ และวิชาเคมีระดับอุดมศึกษาได้

ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า

การศึกษาค้นคว้ามี่ขอบเขตดังนี้

1. ศึกษาเฉพาะเลือดคนไทยปกติ จำนวน 40 ตัวอย่าง ด้วยการสุ่มตัวอย่างจากศูนย์บริจาคโลหิตที่ศูนย์บริจาคโลหิตโรงพยาบาลศิริราช และโรงพยาบาลรามาธิบดี กรุงเทพมหานคร
2. ศึกษาเฉพาะธาตุเซเลเนียม ทองแดง และอาร์เซนิก
3. ในการวิเคราะห์ครั้งนี้วิเคราะห์หาปริมาณวิเคราะห์ (quantitative analysis) โดยวิธี NAA แบบ destructive method และใช้ Multichannel Gamma Spectrometer วัดกัมมันตภาพรังสี

คำจำกัดความและศัพท์เฉพาะ

1. เลือด หมายถึง เนื้อเยื่อที่ไหลเวียนอยู่ในวงจรปิดในหลอดเลือด ประกอบด้วยพลาสมาและเม็ดเลือดซึ่งมีอยู่ 3 ชนิด คือ เม็ดเลือดแดง เม็ดเลือดขาว และเกล็ดเลือด (platelet)
2. เซรัม (Serum) หมายถึง พลาสมาที่แยกเอาไฟบริโนเจน (fibrinogen) ออก
3. การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน หมายถึง การยิง (bombard) อนุภาคนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุและจะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุนั้น (nuclear reaction) อะตอมของธาตุนั้นจะเปลี่ยนเป็นไอโซโทปของธาตุเดิมหรือธาตุใหม่ ส่วนมากไอโซโทปที่เกิดขึ้นจะเป็นไอโซโทปชนิดที่มีรังสี (radioisotope) เมื่อวัดความแรงรังสีเทียบกับสารมาตรฐานก็จะทราบปริมาณของธาตุในสารเดิม
4. destructive NAA หมายถึง วิธีวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยนำสารมาตรฐานและสารตัวอย่างอาปรังสีนิวตรอน แล้วอาศัยวิธีการทางเคมี (chemical separation) แยกเอาสารกัมมันตรังสีที่ต้องการหรือไม่ต้องการออกมา แล้วตรวจแบบไทเทรตควบคู่กัน แล้วนำเอาธาตุกัมมันตรังสีที่ต้องการซึ่งไม่มีสารรังสีชนิดอื่นเจือปนไปวัดหา กัมมันตภาพรังสี

5. Non-destructive NAA หมายถึงวิธีวิเคราะห์ปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยนำสารมาตรฐานและสารตัวอย่างอาบรังสีนิวตรอน แล้วนำมาวัดรังสีซึ่งไม่ต้องผ่านกระบวนการทางเคมี

6. กัมมันตภาพรังสี (radioactivity) หมายถึงขบวนการซึ่งนิวเคลียสบางชนิดเกิดการสลายตัวส่งพลังงานออกมาแล้วกลายเป็นนิวไคลด์ชนิดใหม่ พลังงานที่ส่งออกมาจะอยู่ในรูปการแผ่รังสีชนิดต่าง ๆ

7. สารตัวอย่างทางชีววิทยา (biological sample) หมายถึงส่วนต่าง ๆ ของร่างกายมนุษย์และสัตว์ เช่น เลือด น้ำปัสสาวะ น้ำไขสันหลัง ตับ หัวใจ ปอด ม้าม ฯลฯ

8. ppm (part per million) หมายถึงหน่วยเปรียบเทียบปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง ปริมาณธาตุหนึ่ง ppm หมายถึงมีธาตุนั้นหนึ่งในล้านในสารตัวอย่างหนึ่งล้านส่วน

กลุ่มตัวอย่าง

เลือดที่ทบทวนในครั้งนี้นำตัวอย่างมาจากผู้ป่วยโรคโลหิตที่โรงพยาบาลศิริราช และโรงพยาบาลรามาธิบดี กรุงเทพมหานคร จำนวน 40 ตัวอย่าง ซึ่งกลุ่มตัวอย่างมีคุณสมบัติดังนี้

1. อายุ 18 - 45 ปี
2. น้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 45 กิโลกรัม
3. ฮีโมโกลบิน (ความเข้มข้นของโลหิต) ไม่ต่ำกว่า 80 %
4. ไม่จำกัดเพศ
5. ความดันโลหิตไม่ต่ำกว่า 100 มิลลิเมตรของปรอท
6. ไม่มีประวัติเคยเป็นไข้ตัวเหลือง (Homologuse Serum Jasundice) และไข้มาเลเรีย (Malaria) ในระยะ 2 - 3 ปีนี้
7. มีสุขภาพสมบูรณ์ไม่เป็นโรคหัวใจ โรคไต และโรคติดต่ออื่น ๆ

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค้นคว้า

A.A. Smales และ B.D. Pate (55) ทดลองหาปริมาณธาตุ As ในสารตัวอย่างทางชีววิทยาลักษณะ destructive NAA เมื่อปี ค.ศ. 1951 โดยใช้สารตัวอย่าง-

เลือด 0.2 มิลลิลิตร อามรังสีนิวตรอนความเข้ม 10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าในเลือดมี As อยู่ 0.09 - 0.50 ppm. ในปี ค.ศ. 1956 H.J.M. Bowen (16) ใช้ NAA หาปริมาณธาตุ Mn ในสารตัวอย่างทางชีววิทยา ผลการทดลองปรากฏว่าในเลือด 100 มิลลิลิตร มี Mn $2.4 \mu\text{g}$ และในปีเดียวกันนี้ H.J.Koch, E.R. Smith, N.F. Shimp และ J. Connor (40) ร่วมกันวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยในเนื้อเยื่อมนุษย์ด้วยวิธี NAA ธาตุที่ศึกษาในเลือดมี 5 ธาตุ คือ Co, Cu, Cr, Pb และ Zn พบว่าในเลือด 100 มิลลิลิตรมี Cu 50 - 188 μg

R.P. Spencer, T.G. Mitchell และ E.R. King (57) วิเคราะห์ธาตุ Na, Mg, P, Cl, K, Ca, Fe, Br, I, Zn, Co, Rb, Mn, Al, Si และ Cd ในเลือดมนุษย์ด้วยวิธี Non-destructive NAA ปี ค.ศ. 1957 โดยใช้เซรุ่ม 10 มิลลิลิตรอามรังสีนิวตรอนความเข้ม 2.5×10^8 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าในเซรุ่ม 10 มิลลิลิตรมี Cu 10^{-2} mg ต่อมาในปี ค.ศ. 1959 H.J.M. Bowen (17) หาปริมาณธาตุ Cl, Br และ I ในสารตัวอย่างทางชีววิทยาคับวิธี destructive NAA โดยใช้สารตัวอย่างเลือด 1 มิลลิลิตร อามรังสีนิวตรอนความเข้ม 10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีเป็นเวลา 30 นาที สำหรับ Cl และ I และ 4 ชั่วโมง สำหรับ Br ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ

ค.ศ. 1960 J. Pijick, J. Gillis และ J. Hoste (54) วิเคราะห์ธาตุ Cu, Cr, Zn และ Co ในเซรุ่มด้วยวิธี destructive NAA พบว่า
 $\text{Cu} = 165 \pm 1.3 \mu\text{g}/\%$ $\text{Cr} = 20.8 \pm 0.6 \mu\text{g}/\%$ $\text{Zn} = 226 \pm 2.3 \mu\text{g}/\%$ และ
 $\text{Co} = 25.9 \pm 0.5 \mu\text{g}/\%$ หลังจากนั้น P.S. Papavasiliou และ G.C. Cotzias (52) หาปริมาณ Mn โดยวิธี destructive NAA ในปี ค.ศ. 1961 ผลปรากฏว่าในเลือดมนุษย์ 1 ลิตร มี Mn 9.01 - 14.50 μg และในปีเดียวกันนี้ U.S. Atomic Energy Commission ใช้วิธี Destructive NAA เพื่อหาปริมาณของโลหะในเซรุ่ม ใช้สารตัวอย่างเลือด 2 มิลลิลิตร อามรังสีนิวตรอนความเข้ม 7×10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 15 นาที ถึง 1 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าในเซรุ่ม 1 มิลลิลิตรมี Cu = 2 μg และมี Mn 0.1 μg

E.L. Kanabrocki, T. Fields, C.F. Decker, L.F. Case, E.B. Miller E. Kaplan และ Y.T. Oester (37) แผนกรังสีบริการโรงพยาบาล Hines แห่งรัฐอิลลินอยส์ สหรัฐอเมริกา ศึกษา Mn และ Cu ในเลือดและน้ำไขสันหลังของมนุษย์ด้วยวิธี destructive NAA ในปี ค.ศ. 1963 ใช้สารตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร อารังสีนิวตรอนความเข้ม 2×10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 30 นาที พบว่าในเลือดมนุษย์มี Cu $164 \pm 41 \mu\text{g} \%$ และมี Mn $1.3 \pm 0.2 \mu\text{g} \%$ ต่อมา P.O. Waster, D. Burne และ K. Samsahl (62) ร่วมกันศึกษาการแยกธาตุในสารตัวอย่างทางชีววิทยาโดยอาศัยวิธีเคมีรังสี ธาตุที่ศึกษามี Ag, As, Au, Ba, Br, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Fe, Hg, La, Mo, P, Rb, Sb, Se, Sc, Sn, Te, W และ Zn ในปีเดียวกันนี้ K.G. Kjellin (39) ใช้วิธี destructive NAA หาปริมาณธาตุ Cu ในสารตัวอย่างทางชีววิทยา พบว่าในเซรัม 1 มิลลิลิตร มี Cu $0.01 - 0.09 \mu\text{g}$

ค.ศ. 1964 C. Kellershohn, D. Comer และ C.L. Poec (38) ชาวฝรั่งเศส หาปริมาณธาตุ Hg ในเลือดมนุษย์ด้วยวิธี destructive NAA ใช้สารตัวอย่างเลือด 1 - 1.5 มิลลิลิตร อารังสีนิวตรอนความเข้ม 1.5×10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ผลปรากฏว่าในเลือด 1 กรัมมี Hg เฉลี่ย $5.2 \times 10^{-3} \mu\text{g}$

D. Brune (20) ชาวสวีเดน ศึกษา The Szilard-Chalmers reaction ของสารตัวอย่างทางชีววิทยา โดยวิธี destructive NAA ในปี ค.ศ. 1965 ธาตุที่ศึกษาคือ As, Au, Br, Ca, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Mo, Na, P, Rb, Se และ Zn สารตัวอย่างที่ไ้ศึกษาคือเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ เนื้อเยื่อตับและเลือดหมู โดยใช้สารตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ทำให้แห้งแล้วนำไปอารังสีนิวตรอนความเข้ม 2×10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 2 - 3 วัน และอารังสีนิวตรอนความเข้ม 2×10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองเป็นที่น่าพึงพอใจ ในปีเดียวกันนี้ M.C. Haven, G.T. Haven และ A.L. Dunn (32) หาปริมาณธาตุ Ca, Cu, Mn และ Mg ในเลือดมนุษย์ด้วยวิธี destructive NAA โดยเลือกสารตัวอย่างจาก Nebraska State Hospital Laboratory และ Clinical Laboratory of Hospital จากผล-

การทดลองพบว่าปริมาณธาตุโดยเฉลี่ยในเลือดของกลุ่มตัวอย่างทั้งสองแตกต่างกันเล็กน้อย

D. Brune และ O. Landstrom ชาวสวีเดน หาปริมาณธาตุ Hg ในเลือดคนมนุษย์ ในปี ค.ศ. 1965 อีกเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังหาปริมาณธาตุ Sb, As, Br, Ca, Cu, Hg, Mo, Se, Na, W และ U ในน้ำคยวิธี NAA พบว่า ในเลือด 1 กรัม มี Hg โดยเฉลี่ย $0.011 \mu\text{g}$ และในปี R.H. Tomlinson และ R.C. Dickson (61) ใช้วิธี destructive NAA หาปริมาณธาตุ Se ในเลือดคนมนุษย์ พบว่าในเลือดคนปกติ 15 มิลลิลิตร มี Se $2.94 \mu\text{g}$.

ค.ศ. 1966 C.C. Thomson, G.P. Tercho และ J.A. Sandel (59) นักวิทยาศาสตร์ประจำศูนย์วิจัยทางนิวเคลียร์ที่เมืองนิวยอร์ก หาปริมาณธาตุ Cu และ Zn ในเลือดคนมนุษย์ด้วยวิธี destructive NAA โดยใช้สารตัวอย่างเลือด 0.5 มิลลิลิตร อาบรังสีนิวตรอนความเข้ม $(1 - 4) \times 10^{12}$ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ปรากฏว่าในเซรัมมี Cu 1.54 ppm. และมี Zn 1.20 ppm ส่วนในเลือดทั้งหมด (Whole blood) มี Cu 1.25 ppm. และมี Zn 8.13 ppm. ในปีเดียวกันนี้ T.E.F. Carr และ Alice Sutton (34) ศึกษาธาตุ Sr และ Ba ในพลาสมาของมนุษย์ด้วยวิธี destructive NAA โดยนำสารตัวอย่างมาอบในแท่งแล้วอาบรังสีนิวตรอนความเข้ม 1.4×10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปรากฏว่าปริมาณของ Sr ในพลาสมาของมนุษย์ไม่ขึ้นอยู่กับการควบคุมของร่างกายเหมือนกับ Ca แต่มีค่าคงที่ภายใต้การบริโภคอาหารตามปกติ

S. Giovannetti, O. Maggiore และ R. Malvano (35) ศึกษาธาตุ As, Au, Cu, Hg, Sb และ Zn ในพลาสมาของคนปกติและคนป่วยเป็นโรค Chronic uraemia ด้วยวิธี destructive NAA เมื่อปี ค.ศ. 1967 โดยห่อสารตัวอย่างด้วยแผ่น Al บริสุทธิ์บาง ๆ แล้วนำไปอาบรังสีนิวตรอนความเข้ม 10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 120 ชั่วโมง ผลการทดลองปรากฏว่าปริมาณธาตุ As ในคนป่วยและคนปกติมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในปีเดียวกันนี้ R.C. Dickson และ R.H. Tomlinson (26) แห่งมหาวิทยาลัยแมกมาสเตอร์ อونتาริโอ ประเทศแคนาดา วิเคราะห์

หาปริมาณธาตุ Se ในสารตัวอย่างทางชีววิทยาด้วยวิธี Non-destructive NAA โดยใช้สารตัวอย่างอาบรังสีนิวตรอนความเข้ม 10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 20 วินาที พบว่าในเลือดคนปกติ 15 มิลลิลิตร มี Se เฉลี่ย $2.73 \mu\text{g}$ ในปลายปีเดียวกันนี้ K.Fritze และ R. Robertson (27) แผนกเคมี มหาวิทยาลัยแมกมาสเตอร์ คานาดา ศึกษาธาตุที่มีปริมาณน้อยในธรรมชาติของมนุษย์ด้วยวิธี Non-destructive NAA ธาตุที่ศึกษามี Al, Ca, Mg, Mn, As, Ag, Au, Co, Cr, Cd, Mo, Sb และ Sr โดยนำสารตัวอย่างอาบรังสีนิวตรอนความเข้ม ประมาณ 10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 3 นาที 150 นาที และ 125 ชั่วโมง พบว่ามี As อยู่ 3 ppb.

ค.ศ. 1968 J. Thomson และ L.V. Kristensen (60) ชาวเดนมาร์ก หาปริมาณธาตุ As ในสารตัวอย่างทางชีววิทยาโดยกัมมันตรังสีสังเคราะห์ สารตัวอย่างที่ศึกษา คือ เลือด น้ำไขกระดูก ไต กระดูก และเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ โดยใช้สารตัวอย่าง 1 - 5 กรัม อาบรังสีนิวตรอนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองได้นำไปใช้เป็นแนวทางในการวินิจฉัยโรคพิษของ As ในร่างกายมนุษย์ D. Behne (15) ชาวเยอรมัน วิเคราะห์ธาตุ Cr และ Zn ในสารตัวอย่างทางชีววิทยา โดยใช้สารตัวอย่างอาบรังสีนิวตรอนความเข้ม 7×10^{11} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 100 ชั่วโมง พบว่าในเลือด 1 กรัม มี Cr 1×10^{-8} กรัม และมี Zn 1×10^{-7} กรัม

W.A. Haller และ R.H. Filby (31) แห่งมหาวิทยาลัยของรัฐอริซัน สหรัฐอเมริกา ใช้วิธี Non-destructive NAA หาปริมาณธาตุในเลือดมนุษย์ ธาตุที่ศึกษา มี Br, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mn, Na, P, Rb, Se และ Zn ผลการทดลองที่น่าสนใจ คือพบว่าในเลือด 1 กรัมมี Cu $1.1 \mu\text{g}$ และมี Se $0.176 \mu\text{g}$ M.Simkova และ M. Krivanek (1) ชาวเชโกสโลวาเกีย หาปริมาณ Cr ในเลือดมนุษย์ด้วยวิธี destructive NAA โดยใช้สารตัวอย่างเลือดอาบรังสีนิวตรอนความเข้ม 10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 4 สัปดาห์ ผลปรากฏว่าปริมาณ Cr ในเลือดคนมนุษย์อยู่ระหว่าง 1.03×10^{-2} ถึง 5.2×10^{-2} ppm.

I. Hadjistelios และ A.P. Grimanis (30) นักวิทยาศาสตร์แผนกเคมีของศูนย์วิจัยนิวเคลียร์เดโมคริตอส (Democritos) เมืองเอเธนส์ ประเทศกรีซ หาปริมาณ As,

Sb และ Hg ในสารตัวอย่างทางชีววิทยาโดยวิธี destructive NAA โดยใช้สารตัวอย่าง
 อารังสีนิวตรอนความเข้ม 1.5×10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 20 ชั่วโมง
 พบว่าในเลือดสัตว์ 1 กรัมมี As 20ng A.A. Samra และ G.W. Leddicotte (56)
 แห่งมหาวิทยาลัยมิสซูรี ใช้วิธี destructive NAA เพื่อหาปริมาณ Te ในเนื้อเยื่อมนุษย์
 พบว่าในเลือดคนมี Te 35 - 39 ppb.

D. Comar, C. Crouzel, M. Chasteland, R. Riviere และ Kellers
 shohn (24) แห่งโรงพยาบาล Frederic Joliot ประเทศฝรั่งเศส ใช้วิธี Non-
 destructive NAA เพื่อการวิเคราะห์ธาตุในสารตัวอย่างทางชีววิทยา ธาตุที่วิเคราะห์ คือ
 H, Cl, N, K, Na, B, S, Fe, P และ Ca ซึ่งผลการวิเคราะห์เป็นที่น่าพึงพอใจ A.P.
 Grimanis (28) แผนกเคมี ศูนย์วิจัยทางนิวเคลียร์เคมอร์คอตส ประเทศกรีซ หาปริมาณ
 ธาตุ As และ Cu ในอากาศและในสารตัวอย่างทางชีววิทยา โดยวิธี destructive NAA
 พบว่าในเลือดสัตว์ 1 กรัมมี As $0.019 \mu\text{g}$ และมี Cu $2.38 \mu\text{g}$ K. Liebscher และ
 H. Smith (45) ชาวสกอตแลนด์ หาปริมาณธาตุที่มีปริมาณน้อย ซึ่งมีความจำเป็นต่อร่างกาย
 และที่ไม่มีความจำเป็นต่อร่างกายในสารตัวอย่างทางชีววิทยาคือวิธี NAA ธาตุที่ศึกษา คือ
 Sb, As, Hg, Cu, Zn และ Se พบว่าในเลือดแห้ง (dry) ของมนุษย์ มี As 0.920 -
 0.001 ppm. และมี Cu 15.6 - 4.10 ppm.

ค.ศ. 1969 C.B. Stephen (58) ชาวอเมริกัน หาปริมาณธาตุ U ในสารตัวอย่างทางชีววิทยาคอยเทคนิคติดตามทางนิวเคลียร์ (nuclear track technique) พบว่า
 ในเลือดคนมี U 86.1 ppb ในปีเดียวกันนี้ K. Heydorn (33) ชาวเดนมาร์ก ศึกษา
 ระดับ As ในเลือดของคนไต้หวัน โดยเฉพาะผู้ป่วยที่อาศัยอยู่ในเมือง Blackfoot เปรียบ
 เทียบกับระดับ As ของคนเดนมาร์ก การตรวจหา As ใช้วิธี destructive NAA ซึ่งใช้
 สารตัวอย่างเลือด 9 มิลลิลิตร อารังสีนิวตรอนความเข้ม 7×10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร
 ต่อวินาทีเป็นเวลา 45 นาที ผลการวิเคราะห์พบว่าระดับ As ในร่างกายของผู้ป่วยซึ่งอยู่ในเมือง
 Blackfoot สูงกว่าระดับ As ในร่างกายของคนที่อยู่ในเดนมาร์ก ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำดื่ม
 ในเมือง Blackfoot ไตวันมี As อยู่ด้วย และในปีเดียวกันนี้เอง การากานต์ ซานีโรซานต์
 (23) นักวิทยาศาสตร์ประจำสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติประเทศไทย วิเคราะห์ธาตุ Mn,

Cu, Zn, Fe และ Mo ในเลือดสัตว์ด้วยวิธี destructive NAA โดยใช้สารตัวอย่างอาบรังสี นิวตรอนความเข้ม 10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที โดยใช้เวลา 30 นาที สำหรับวิเคราะห์ธาตุ Mn, Cu และ Zn ใช้เวลา 7 ชั่วโมง สำหรับการวิเคราะห์ Fe และ ใช้เวลา 20 ชั่วโมง สำหรับการวิเคราะห์ Mo แยกสารให้บริสุทธิ์ด้วย ion exchange technique ผลการทดลองพบว่าในเลือด 1 กรัม มี Cu $1.4146 \pm 0.0025 \mu\text{g}$.

ค.ศ. 1972 เซวณ รอดทองคำ (4) นักวิทยาศาสตร์กองเคมี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติประเทศไทย หาปริมาณธาตุ Mn, Cu และ Zn ในสารตัวอย่างเลือดด้วยวิธี destructive NAA โดยใช้สารตัวอย่างเลือดจากโรงพยาบาลศิริราชประมาณ 1 กรัม อาบรังสี นิวตรอนความเข้ม 10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีเป็นเวลา 25 - 30 นาที แยกสารให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีตกตะกอน พบว่าในเลือดคนปกติ 100 กรัม มี Mn, Cu และ Zn เท่ากับ 0.001 - 0.002 mg, 0.1 - 0.7 mg และ 0.011 - 0.019 mg ตามลำดับ

จากรายงานการวิจัยเหล่านี้จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน สามารถวิเคราะห์ธาตุในสารตัวอย่างทางชีววิทยาได้มากมายหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นวิธี destructive NAA หรือ Non-destructive NAA ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุส่วนประกอบที่ปะปนอยู่ในสารตัวอย่าง และชนิดของสารตัวอย่าง.

ทฤษฎีการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน

การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันถือหลักที่ว่า เมื่อนำสารตัวอย่างเข้าอบรังสีนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน อะตอมของธาตุในสารตัวอย่างบางอะตอมจะทำปฏิกิริยากับอนุภาคนิวตรอนที่ใช่เป็นทวีป ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุ เรียกว่า nuclear transformation (46) เกิดเป็นไอโซโทปของธาตุเดิมหรือไอโซโทปของธาตุใหม่ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของนิวตรอนที่ใช่เป็นทวีป ส่วนมากไอโซโทปที่เกิดขึ้นเป็นไอโซโทปชนิดที่มีรังสี (radioisotope) ถ้าสามารถนับรังสีจากไอโซโทปเหล่านั้นเทียบกับสารมาตรฐาน ก็จะทราบถึงปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$\frac{\text{ปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{ปริมาณของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ปริมาณกัมมันตภาพรังสีในสารตัวอย่าง}}{\text{ปริมาณกัมมันตภาพรังสีในสารมาตรฐาน}}$$

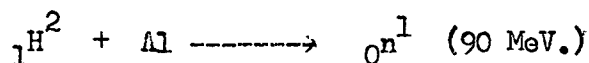
แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ใช่กับ NAA มีดังนี้

1. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (nuclear reactor) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูสามารถผลิตนิวตรอนได้ทั้ง 3 ประเภท (12) คือ

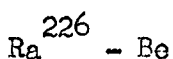
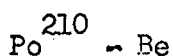
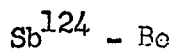
- 1) Fast neutron มีพลังงานมากกว่า 0.1 MeV.
- 2) Epithermal neutron มีพลังงานระหว่าง 0.1 MeV. ถึง 1 eV.
- 3) Slow neutron หรือ thermal neutron มีพลังงานต่ำกว่า 1 eV.

ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะมี thermal neutron ที่มีพลังงานเฉลี่ย 0.025 eV. มากที่สุด

2. เครื่องเร่งอนุภาค (accelerator) เครื่องเร่งอนุภาคใช้เร่งอนุภาค proton, deuterium, tritium และ alpha ให้มีพลังงานสูง แล้วใช้ยิงเป้า (target) เพื่อให้ได้นิวตรอนออกมาใช้ เช่น



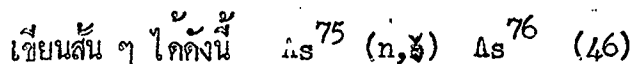
3. Isotopic Source ใส่วัสดุไอโซโทปชนิดที่สามารถทำปฏิกิริยากับอนุภาค alpha หรือรังสี gamma แล้วให้นิวตรอนซึ่งมีพลังงานระดับต่าง ๆ สามารถนำมาใช้กับ NAA ได้เช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู แต่ต้องมี Be เป็น Target material เช่น



Nuclear Transformation

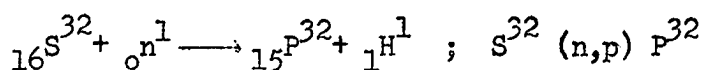
เมื่อนิวเคลียสของอะตอมของธาตุทำปฏิกิริยากับอนุภาคนิวตรอนที่ใช้เป็นตัวยิง จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นหลายแบบ คือ

1. ปฏิกิริยานิวตรอน - แกมมา เขียนย่อเป็น (n, γ) คือปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุ อะตอมของธาตุจะเปลี่ยนเป็นเรกติโอไอโซโทปของธาตุเดิมพร้อมทั้งปล่อยรังสีแกมมาออกมา โอกาสที่นิวตรอนวิ่งชนนิวเคลียสจะขึ้นอยู่กับ cross-section ของนิวเคลียส ซึ่งจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วของนิวตรอนลดลง (n, γ) จะเกิดมากที่สุดถ้าใช้ thermal neutron เป็นตัวยิง ปฏิกิริยาแบบนี้นิยมใช้มากที่สุดใน NAA ตัวอย่างเช่น ถ่านนำ $^{75}_{33}\text{As}$ ไปอาบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

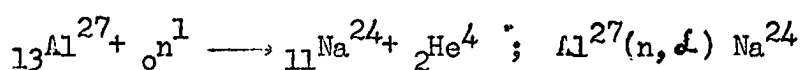


2. ปฏิกิริยานิวตรอน - โปรตอน เขียนย่อเป็น (n, p) คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุแล้วอะตอมของธาตุเปลี่ยนเป็นเรกติโอไอโซโทปของธาตุใหม่ พร้อมทั้งปล่อยอนุภาคโปรตอนออกมา นิวตรอนที่ใช้ในปฏิกิริยานี้จะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุนั้น ๆ และทำให้โปรตอนหลุดออกมาจากนิวเคลียสของธาตุนั้นได้ จึงต้องใช้ fast neutron ปฏิกิริยานี้อาจนำไปใช้กับ NAA ได้เช่นกัน แต่ไม่มากนัก

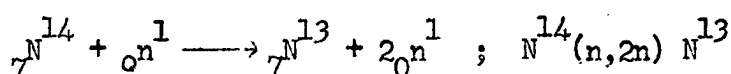
ส่วนมากนิยมใช้ในการผลิตสารกัมมันตรังสีต่าง ๆ (12) เพราะว่าปฏิกิริยา (n,p) ทำให้เกิดไอโซโทปของธาตุใหม่ขึ้นมา ซึ่งสามารถแยกได้บริสุทธิ์ได้ง่าย ตัวอย่างปฏิกิริยา เช่น



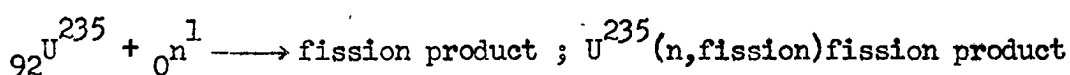
3. ปฏิกิริยานิวตรอน - อัลฟา เขียนย่อเป็น (n,α) คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วอะตอมของธาตุเปลี่ยนเป็นไอโซโทปของธาตุใหม่ พร้อมทั้งปล่อยอนุภาคอัลฟาออกมา ปฏิกิริยา (n,α) ต้องใช้ fast neutron เช่นเดียวกับปฏิกิริยา (n,p) จึงไม่ค่อยนิยมใช้ใน NAA ตัวอย่างปฏิกิริยา (n,α)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



4. ปฏิกิริยานิวตรอน - นิวตรอน เขียนย่อเป็น $(n,2n)$ คือปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วอะตอมของธาตุเปลี่ยนเป็นเรกิโอไอโซโทปของธาตุใหม่พร้อมทั้งปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกมา ปฏิกิริยานี้ต้องใช้ fast neutron เป็นตัวยิง ตัวอย่างปฏิกิริยา $(n,2n)$ คือ



5. ปฏิกิริยานิวตรอน - ฟิชชัน เขียนย่อเป็น $(n, \text{fission})$ คือปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุแล้วเกิด fission product ปฏิกิริยานี้ถ้าเป็นปฏิกิริยากับ ${}_{92}\text{U}^{235}$ และ ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ thermal neutron ก็มีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ แต่ถาเป็นปฏิกิริยากับ ${}_{92}\text{U}^{238}$, ${}_{91}\text{Pa}^{231}$ และ ${}_{90}\text{Th}^{232}$ ต้องใช้ fast neutron จึงจะเกิดปฏิกิริยา (49) ตัวอย่างปฏิกิริยา $(n, \text{fission})$ คือ



อัตราการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสี (Rate of radioisotope production)

เมื่อนำสารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ไปอาบรังสี thermal neutron จะเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีขึ้น ในขณะที่ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะสลายตัวให้รังสีแกมมาออกมา ดังนั้น การผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ได้ (41) จะเป็นไปตามสมการ

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

เมื่อ P = อัตราการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสี

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

λ = ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant)

N^* = จำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่ผลิตได้

ถ้านำสารตัวอย่างไปอาบรังสีเป็นเวลา 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

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

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

$$1) \qquad \qquad \qquad = P e^{\lambda t_1}$$

$$1) \qquad \qquad \qquad = \int P e^{\lambda t_1} dt$$

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

$$= \frac{P}{\lambda} + C e^{-\lambda t_1} \dots\dots [3]$$

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 $N_{t_1}^*$ ปลดปล่อยออกมาต่อหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งสมมติให้ค่า Δt_1

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

$$\Delta t_1 = \frac{P (1 - e^{-\lambda t_1})}{N_{t_1}^* \lambda} \dots \dots \dots [5]$$

สิ่งที่ต้องการทราบต่อไปคือ P ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

เมื่อนำสารตัวอย่างไปอาบรังสีนิวตรอน 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

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

$$\therefore \text{อัตราการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสี} = N\sigma\phi \dots \dots \dots [6]$$

จำนวนอะตอมหรือนิวเคลียสทั้งหมดที่นำไปอาบรังสีสามารถหาได้จาก (47)

$$N = \frac{N_0 W K}{\Delta t \cdot \text{wt.}} \dots \dots \dots [7]$$

เมื่อ N_0 = Avogadro's number

W = น้ำหนักของธาตุเป็นกรัม

K = fractional isotopic abundance

At.Wt. = น้ำหนักอะตอมของธาตุนั้น

แทนสมการ [6] และ [7] ในสมการ [5] จะได้

$$\Lambda_{t_1} = \frac{6.02 \times 10^{23} K \phi (1 - e^{-\lambda t_1})}{\text{At.Wt.}} \dots\dots\dots [8]$$

จากสมการ [8] จะเห็นได้ว่าเราสามารถเปลี่ยนระยะเวลาการอาบรังสีเพื่อให้ได้ค่า activity ตามต้องการได้ เทอม $1 - e^{-\lambda t_1}$ เรียกว่า saturation factor (47) ถ้า $t_1 \gg T_{1/2}$ แล้วค่า saturation factor จะเข้าใกล้ 1 ดังนั้นที่ saturation time (เวลาที่อัตราการผลิตและอัตราการสลายตัวของอะตอมกัมมันตรังสีมีค่าเท่ากัน) ค่า activity ของไอโซโทปกัมมันตรังสีจะมีค่าสูงสุดตามสมการ

$$\Lambda = N \phi \dots\dots\dots [9]$$

โดยทั่วไปจะเริ่มศึกษา activity ใดภายหลังจากที่ยังอนุภาคเป็นเวลา T อะตอมกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะสลายตัวเป็น factor ของ $e^{-\lambda T}$ ดังนั้นสมการ [8] อาจเขียนใหม่เป็น

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

เพราะฉะนั้นปริมาณของธาตุคำนวณได้จากสมการ

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

แต่ในทางปฏิบัติแล้วได้นำเอาสารมาตรฐานซึ่งทราบน้ำหนักแน่นอนเข้าอาบรังสีพร้อมด้วยสารตัวอย่าง ฉะนั้นสูตรที่ใช้ในการคำนวณจึงเหลือเพียง

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ปริมาณกัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{ปริมาณกัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารมาตรฐาน}}$$

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Radioactive Decay)

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี เป็น Random phenomena คือไม่สามารถบอกได้ว่า ณ ที่นั้นอะตอมใดจะสลายตัวหรือให้รังสีออกมา แต่เมื่อคำนึงถึงอะตอมเป็นจำนวนนับล้านอะตอมตามหลักวิชาสถิติทำให้กล่าวได้ว่าจะมีกี่อะตอมที่จะสลายตัวในนาที่นี้ (๑) จากการทดลองพบว่า อัตราการให้อนุภาคของสารกัมมันตรังสีเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนนิวเคลียสที่เหลืออยู่ขณะนั้น และเป็นเช่นนั้นตลอดไป ดังนั้นอัตราการสลายตัวจึงลดลงตลอดเวลา เพราะว่าปริมาณของนิวเคลียสกัมมันตรังสีลดลงอยู่เรื่อย ๆ อันเนื่องมาจากการสลายตัว จนกระทั่งกลายเป็นไอโซโทปชนิดเสถียร (Stable isotope) เรกิโอไอโซโทปแต่ละชนิดใช้เวลาในการสลายตัวไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติประจำตัวของธาตุไอโซโทปที่เรียกว่าครึ่งชีวิต (Half life) เมื่อทิ้งสารกัมมันตรังสีไว้เป็นเวลาคึ่งชีวิตจะพบว่าปริมาณของนิวเคลียสลดลง เหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณตั้งต้น การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีในทาง Kinetic ถือว่าเป็น first-order process

ถ้าจำนวนอะตอม ΔN สลายตัวในระยะเวลา Δt และ N เป็นอะตอมที่ยังเหลืออยู่ จะได้ว่า $-\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N$ (ใช้เครื่องหมายลบเพราะว่าเป็นอัตราการลดลง)

$$\therefore \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \quad \text{เมื่อ } \lambda = \text{decay constant}$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \text{Activity ของไอโซโทปกัมมันตรังสี}$$

ถ้าใช้วิชา calculus เข้าช่วย เมื่อ $t \rightarrow 0$ จะแทนได้ดังนี้

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \dots\dots\dots [1]$$

ถ้าให้จำนวนของอะตอมที่ขณะตั้งต้นการทดลอง = N_0 เราก็อาจหาค่า N คือจำนวนของอะตอมที่เหลือเมื่อเวลาผ่านไป = t ได้จากการ Integrate สมการ [1] นั้นคือ

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_{t_0}^t \lambda dt$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = - \lambda t \dots\dots\dots [2]$$

$$2.303 \log \frac{N}{N_0} = - \lambda t \dots\dots\dots [3]$$

$$\log N = \log N_0 - \frac{\lambda t}{2.303} \dots\dots\dots [4]$$

จากสมการ [3] ถ้า $t =$ ครึ่งชีวิต $= T_{1/2}$, N จะ $= \frac{1}{2} N_0$ เราจะได้

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

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

สมการ [4] เป็นสมการเส้นตรง ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log N$ (ส่วนมากจะใช้แทนเป็นปริมาณกัมมันตภาพรังสี หรือที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือจำนวน "นับ" เพราะทั้งสองจำนวนนี้เป็นปริมาณตรงกับจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่มีอยู่นั้น) และเวลา t โดยให้ $\log N$ เป็นแกน Y เวลา t เป็นแกน X จะได้กราฟเส้นตรงโดยมี $\log N_0$ เป็น Intercept บนแกน Y และมี $\text{slope} = - \frac{\lambda}{2.303}$ ถ้าเราต้องการหา $T_{1/2}$ ของไอโซโทปต่างๆ หาได้โดยการเขียนกราฟดังกล่าว และหาช่วงเวลาที่จะลดปริมาณกัมมันตรังสีลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของปริมาณที่มีอยู่ ณ เวลาใดก็ได้

หน่วยกัมมันตภาพรังสี

ความเข้มของกัมมันตภาพรังสี วัดได้จากจำนวนอะตอมของสารที่สลายตัวต่อหน่วยเวลา หน่วยมาตรฐานของกัมมันตภาพรังสีคือ คูรี (Curie)

$$1 \text{ Curie (Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ disintegrations/sec (dps)}$$

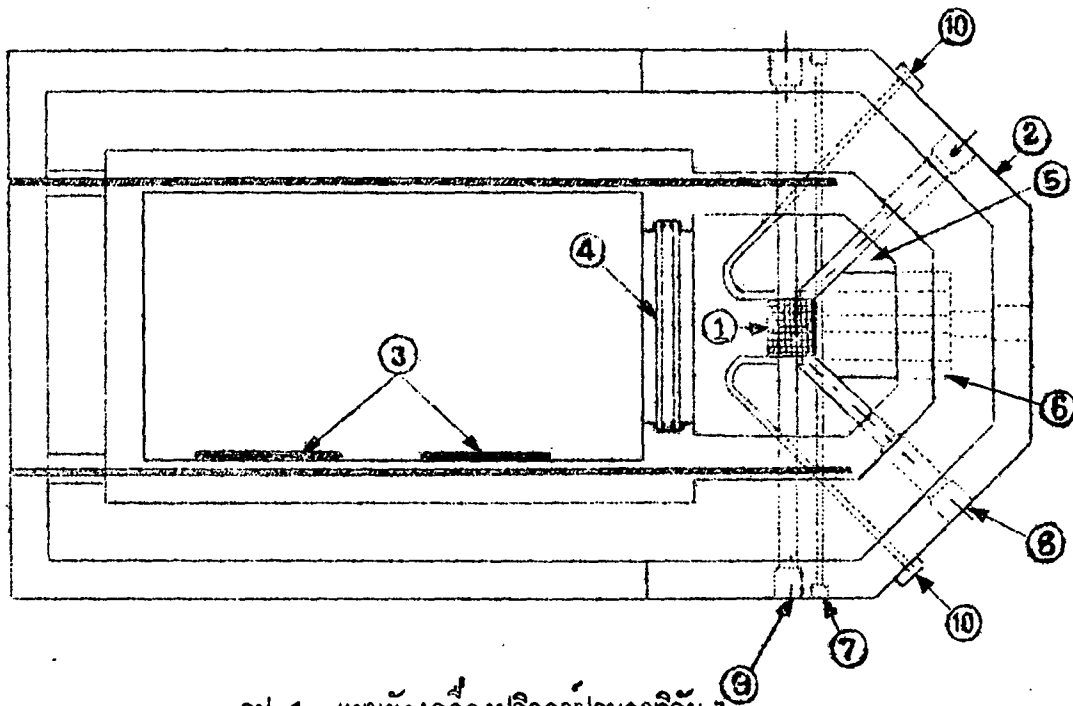
บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีดำเนินการ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

การวิเคราะห์ครั้งนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย 1 ของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน และใช้ Multichannel Gamma Spectrometer เป็นเครื่องวัดกัมมันตภาพรังสี

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย 1 (ปว-1) มีส่วนประกอบตามแผนผังข้างล่างนี้



รูป 1 แผนผังเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1

- | | |
|--------------------------------|--------------------|
| 1. แกนเชื้อเพลิง | 6. Thermal Column |
| 2. คอนกรีตหนัก | 7. Beam Tube 2" |
| 3. ชั้นสำหรับปักแท่งเชื้อเพลิง | 8. Beam Tube 6" |
| 4. กระจก | 9. Beam Tube 8" |
| 5. บ่อเครื่องปฏิกรณ์ | 10. Pneumatic Tube |

ทฤษฎีการทำงานของ ปภ-1 โดยย่อ

เครื่องปรมาณูแบบ ปภ-1 เป็นระบบที่เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ นิวเคลียร์ติดต่อกันไปซึ่งสามารถควบคุมได้ เชื้อเพลิงที่ใช้คือ U^{235} ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนทำให้อะตอมแยกออก ในกระบวนการนี้จะมีนิวตรอน 2 - 3 ตัวหลุดออกมา นิวตรอนที่หลุดออกมาจะทำให้อะตอมอื่นของ U^{235} เกิดการแตกตัว (fission) ต่อไปอีก เป็นดังนี้เรื่อย ๆ ไป ผลสุดท้ายจะได้นิวตรอนปริมาณมาก การที่ U^{235} แตกตัวจะปล่อยพลังงานจำนวนมากออกมาในรูปรังสีและความร้อน ความร้อนจะกระจายไปควยระบบระบายความร้อน

นิวตรอน 2 - 3 ตัวที่หลุดออกมาถึงกล่าวจะมีความเร็ว 1.8×10^7 เมตรต่อวินาที จะต้องทำให้ช้าลงเหลือความเร็วเพียง 2.2×10^3 เมตรต่อวินาที จึงจะสามารถทำปฏิกิริยากับ U^{235} อะตอมอื่น ๆ ต่อไปได้ กระบวนการนี้เกิดขึ้นใน ปภ-1 โดยการแช่เชื้อเพลิง U^{235} ไว้ในน้ำ จะทำให้นิวตรอนที่วิ่งไปมาลดความเร็วลง น้ำที่ใช้ใน ปภ-1 นอกจากจะลดความเร็วของนิวตรอนลงแล้วยังช่วยระบายความร้อนและป้องกันอันตรายจากรังสีอีกด้วย

ปภ-1 ควบคุมควยแท่งควบคุม 4 แท่ง แท่งหนึ่งทำควยเหล็กกล้ากันสลาย ทำหน้าที่ปรับระดับกำลัง (Regulating Rod) ส่วนอีก 3 แท่งทำควยเหล็กกล้ากันสลายผสมกับโลหะโบรอน ทำหน้าที่เป็นแท่งปลอดภัย (Safety Rod) แท่งควบคุมเหล่านี้สามารถเคลื่อนขึ้นลงไ้ระหว่างแถวของแท่งเชื้อเพลิง และจะกุดนิวตรอนจากเครื่องเพื่อจ้กควบคุมจำนวนนิวตรอนให้ไ้ตามความต้องการ ปภ-1 ทำงานเต็มที่ควยกำลัง 1000 กิโลวัตต์ และความเข้มของนิวตรอนโดยเฉลี่ย 6×10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

Multichannel Gamma Spectrometer มีส่วนประกอบดังนี้

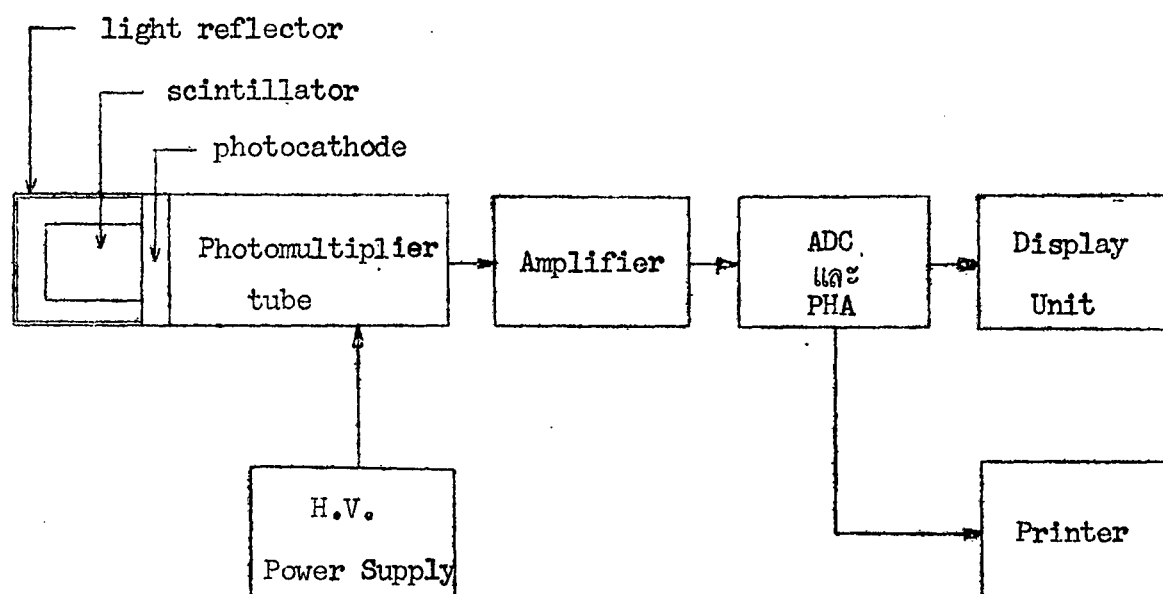
1. หัววัดรังสีแบบ Inorganic solid scintillation detector ของ Harshaw Type 12512 ประกอบด้วย NaI (Tl) crystal ขนาด $3" \times 3"$ และหลอด Photomultiplier

2. H.V. Supply detector หรือ power supply model 312 A เป็นต้นกำเนิด high voltage ให้กับหลอด Photomultiplier ในหัววัดรังสี การทดลองนี้ใช้ high voltage 1000 และ 1100 v.

3. Amplifier ประกอบด้วย preamplifier และ main amplifier ทั้ง ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและตกแต่งสัญญาณ ตามลำดับ

4. 128 multichannel pulse height analyzer model No. 110

5. Display unit ประกอบด้วย oscilloscope ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลและ ปรุปร่าง spectrum กับมันภาพรังสีของธาตุที่นำมาวัด



รูป 2 Block Diagram แสดงส่วนประกอบของ Multichannel X - Spectrometer

หลักการทํางานโดยย่อของ Multichannel Gamma Spectrometer

ขั้นที่ 1 เมื่อรังสีแกมมาจากไอโซโทปกัมมันตรังสีที่นำมาวัดผ่านเข้าไปในหัววัดรังสี พลังงานของรังสีแกมมาที่ผ่านเข้าไปจะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ต่อไปนี้

- 1) Photoelectric effect เกิดจากรังสีแกมมาถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนของผลึก NaI จนหมดสิ้น ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา
- 2) Compton effect เกิดจากรังสีแกมมาถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนของ NaI เพียงบางส่วน แล้วรังสีแกมมาจะเปลี่ยนทิศทางไปซึ่งจะมีพลังงานลดลง ส่วนอิเล็กตรอน

ที่รับพลังงานไปจะหมุนอยู่รอบ ๆ ผลึก NaI คอยพลังงานส่วนที่รับไปจากรังสีแกมมา

3) pair production เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีแกมมาผ่านเข้าไปในสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสของ NaI แล้วตัวรังสีแกมมาก็จะแตกตัวออกเป็น positron กับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะกลายเป็นอิเล็กตรอนของ NaI ส่วน positron เมื่อหมดพลังงานลงก็จะรับอิเล็กตรอนแล้วกลายเป็นรังสีแกมมา pair production นี้เกิดขึ้นได้เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานเกิน 1.02 MeV.

พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่เกิดจาก photoelectric effect และ Compton effect จะเปลี่ยนเป็นพลังงานแสงเมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่สภาพเดิม (ground state) และปริมาณแสงที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยารวมกับพลังงานรังสีแกมมาที่ผ่านเข้าไป

ขั้นที่ 2 Light reflector คือ แผ่นอลูมิเนียมผลึก NaI (Tl) จะทำให้แสงที่เกิดขึ้นใน scintillator สะท้อนผ่านเข้าไปตกกระทบบน photocathode ของหลอด photomultiplier ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจาก photocathode เรียกว่า photoelectron ซึ่งจะถูกทวีคูณเพิ่มขึ้นหลายเท่าตัวโดยกลไกของหลอด photomultiplier ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าแล้วส่งให้แก่ amplifier

ขั้นที่ 3 สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากทวีคูณรังสีโดยทั่วไปก็มีค่าต่ำ ไม่สามารถทำให้ scaler หรือ counting ratemeter ทำงานได้ (10) ดังนั้นจึงต้องขยายสัญญาณด้วย preamplifier ก่อน จากนั้นก็ส่งสัญญาณไปยัง main amplifier เพื่อตกแต่งสัญญาณให้ไคขนาดพอดีที่จะทำให้ scaler ทำงานได้ แล้วส่งสัญญาณไปยัง Analog to Digital Converter (ADC)

ขั้นที่ 4 ADC จะเปลี่ยนสัญญาณให้เป็นจำนวนนับ ซึ่งจะถูกส่งไปยังทีกใน multichannel pulse height analyzer (PHA) PHA ประกอบด้วยส่วนที่เป็นสมอง อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งแต่ละตัวเรียกว่า channel จะทำหน้าที่แยกและเก็บสัญญาณในช่วงหนึ่ง ๆ ไว้ ตัวอย่างเช่น สัญญาณที่ขยายให้ขนาด 0 - 100 V. เมื่อส่งไปยัง multichannel analyzer ที่มี 100 channel สัญญาณที่มีขนาดตั้งแต่ 0 - 1 V. จะถูกส่งไปเก็บยัง channel ที่หนึ่ง สัญญาณที่มีขนาดตั้งแต่ 1 - 2 V. จะถูกส่งไปเก็บยัง channel ที่สอง เช่นนี้เรื่อย ๆ ไปจนถึงสัญญาณขนาดตั้งแต่ 99 - 100 V. จะถูกส่งไปเก็บไว้ที่ channel ที่หนึ่งร้อย (2)

ขั้นที่ 5 การนำจำนวนนับออกจากสมองอิเล็กทรอนิกส์ อาจพิมพ์ออกมาอย่างอัตโนมัติด้วยเครื่องพิมพ์ IBM หรืออาจแสดงเป็น spectrum บนจอของ oscilloscope ก็ได้

วิธีดำเนินการ

ในการทดลองแบ่งวิธีการทดลองเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

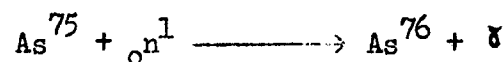
1. การศึกษาคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุที่จะวิเคราะห์
2. การเตรียมสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์
3. การนำสารตัวอย่างเข้าอานรังสี
4. การเพิ่ม carrier และการทำสารตัวอย่างให้ละลาย
5. การแยกธาตุให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีเคมี
6. การวัดกัมมันตภาพรังสี
7. การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดกัมมันตภาพรังสี

การศึกษาคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุที่จะวิเคราะห์

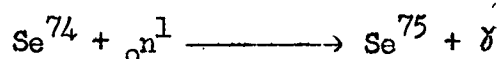
ตาราง 1 แสดงคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุ Cu, As และ Se

คุณสมบัติ	ธาตุที่จะวิเคราะห์			
	Cu	As	Se	
ไอโซโทปในธรรมชาติ	Cu - 63	As - 75	Se - 74	Se - 80
Isotopic abundance (%)	69.17	100	.87	49.82
cross section (barns)	4.7	4.3	58	.08 + 53
ไอโซโทปที่เกิดขึ้น	Cu - 64	As - 76	Se - 75	Se - 81
ครึ่งชีวิต	12.8 hr.	26.5 hr.	120 d.	18 min.
พลังงานของรังสีแกมมา	0.511, 1.34	0.559, 0.657,	0.136, 0.265,	0.103, 0.28,
ที่ส่งออกมา (MeV)		1.21	0.402	0.55, 0.83

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

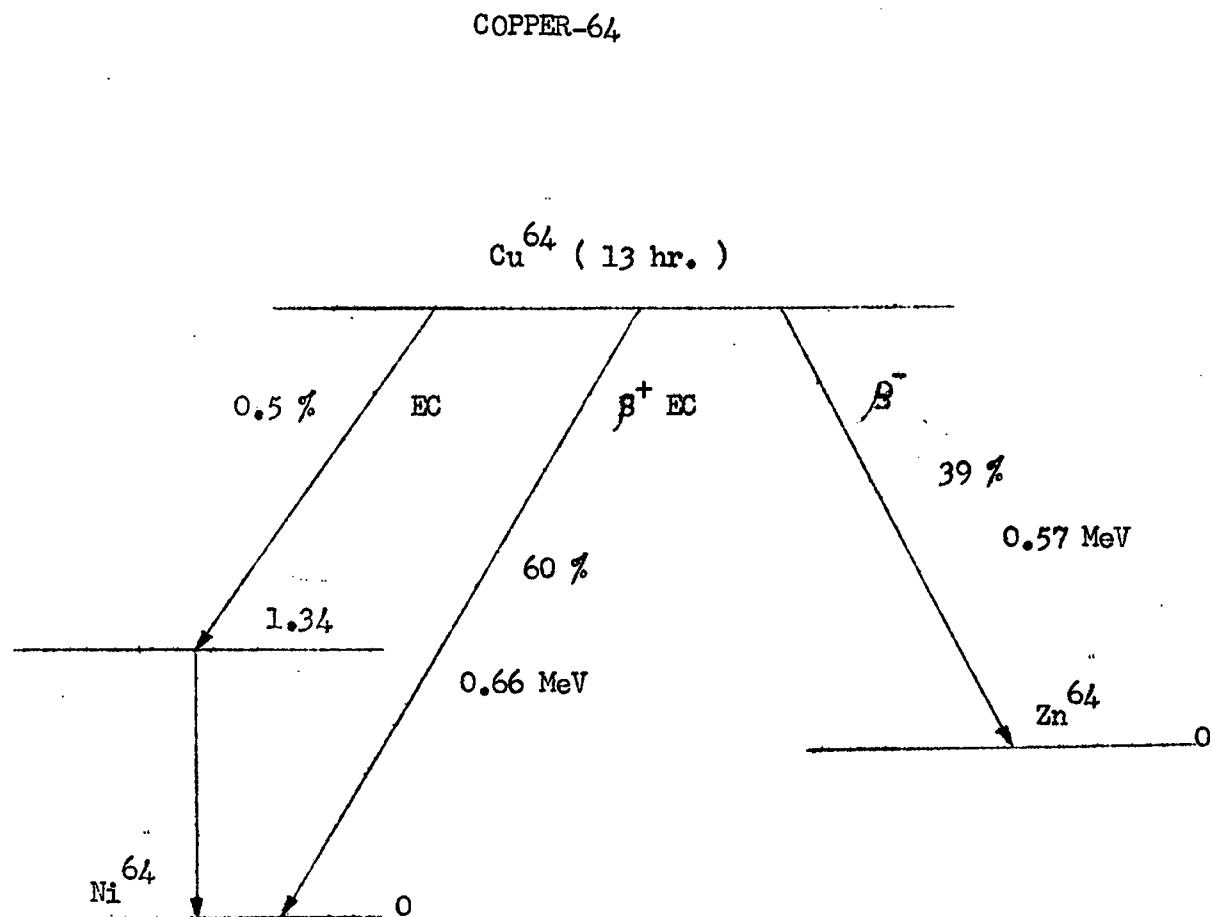


สำหรับธาตุ Se จากการศึกษพบว่า มี 2 stable isotope คือ Se^{74} และ Se^{80} ดังนั้น เมื่อนำ Se เข้าอบรังสีนิวตรอนจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

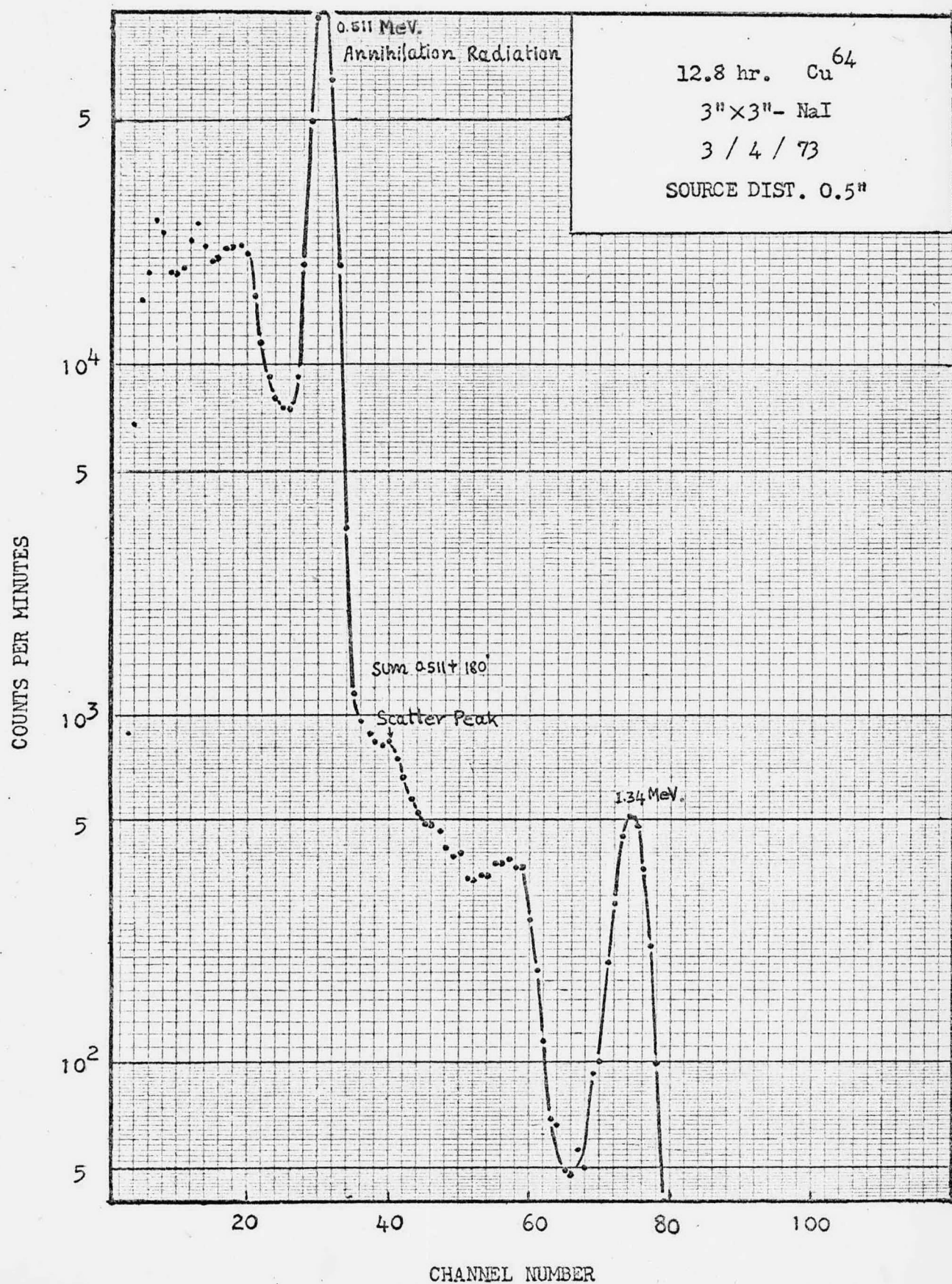


Cu^{64} , As^{76} , Se^{75} และ Se^{81} จะสลายตัวตามโคะแกรมการสลายตัวรูป 3 รูป 5 และรูป 7 และจะปล่อยพลังงานรังสีแกมมาออกมาดังแสดงในรูป 4 รูป 6 และรูป 8 ตามลำดับ (ข้อมูลที่นำมาเขียนกราฟรูป 4, 6 และ 8 อยู่ในภาคผนวก ก.) ซึ่งศึกษาจากการนำธาตุ Cu 10 mg, As 20 mg และ Se 20 mg อบรังสีนิวตรอนเป็นเวลา 30 นาที แล้ววัดรังสีแกมมาที่ส่งออกมาด้วย Multichannel Gamma Spectrometer

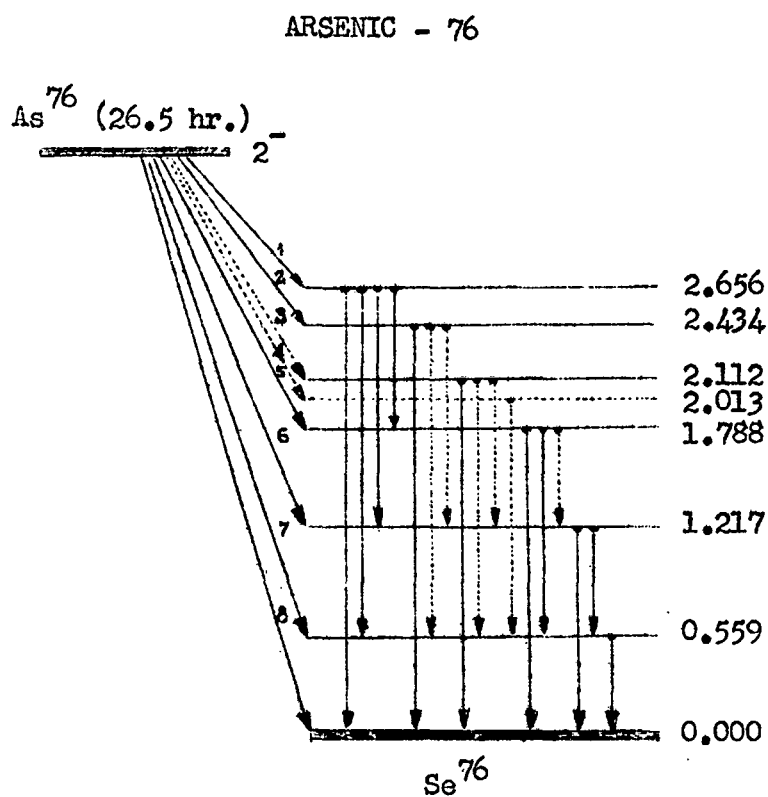
รูป 3 โค้ดแกรมแสดงการสลายตัว (Decay scheme) ของนิวไคลด์ของธาตุ Cu



รูป 4 กราฟแสดงพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจากธาตุ Cu^{64}

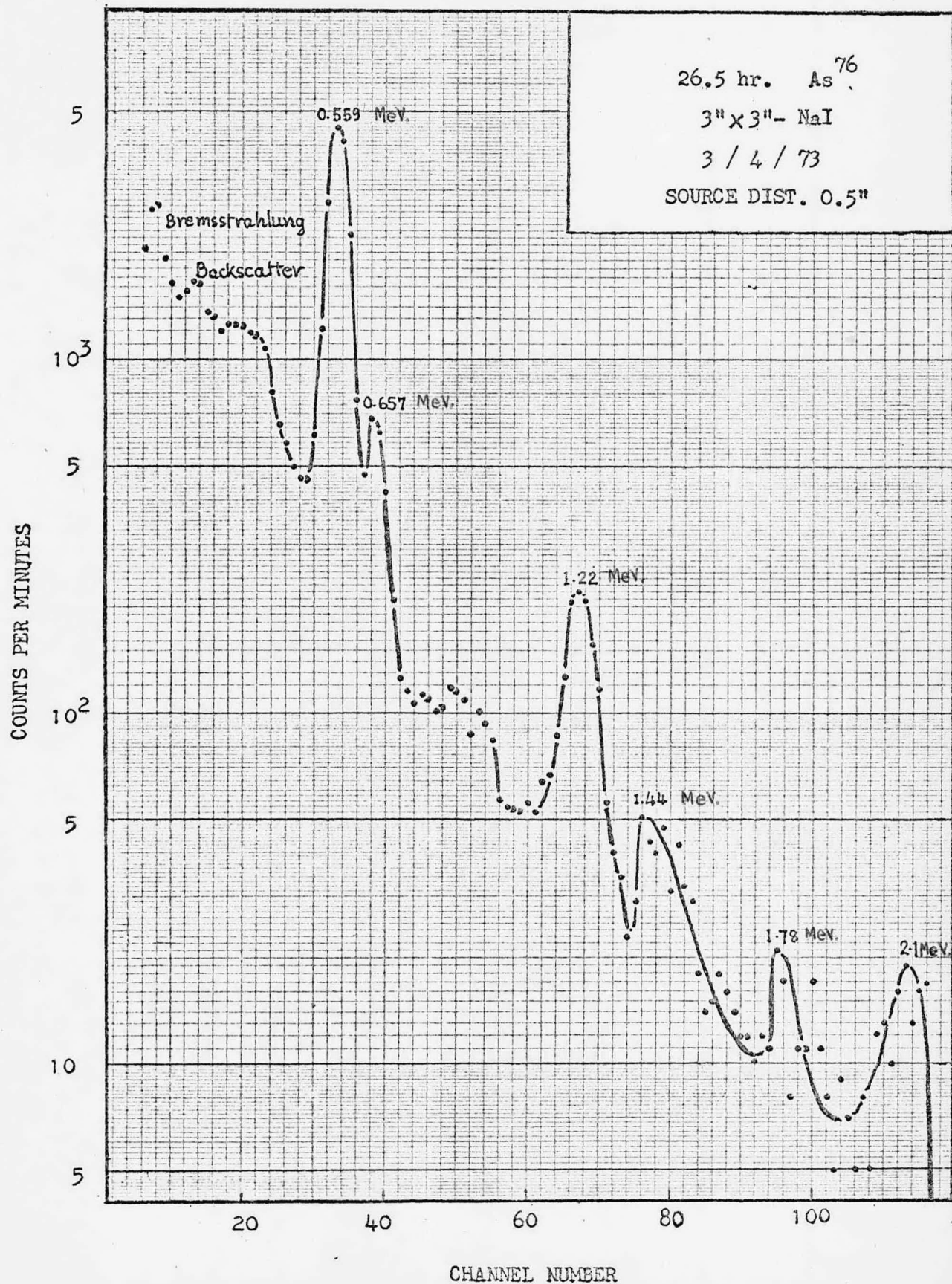


รูป 5 โคออะแกรมแสดงการสลายตัวของนิวเคลียสของธาตุ As (25)



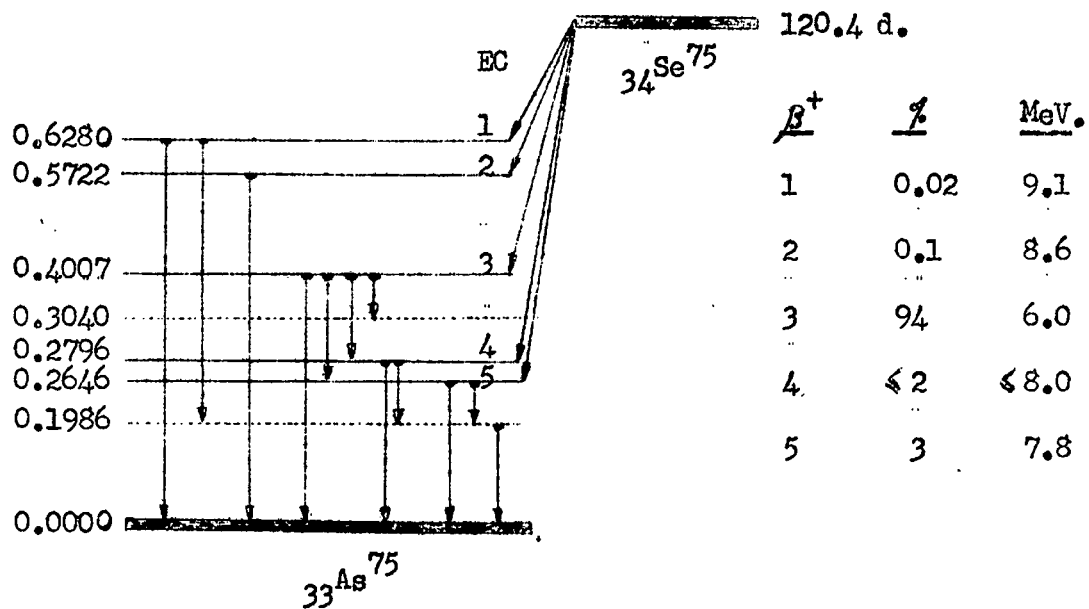
β^-	%	MeV.
1	1.2	0.309
2	1.0	0.530
3	0.6	0.853
4	0.2	0.952
5	2.1	1.177
6	6.9	1.748
7	35	2.405
8	53	2.965

รูป 6 กราฟแสดงพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจากธาตุ As^{76}

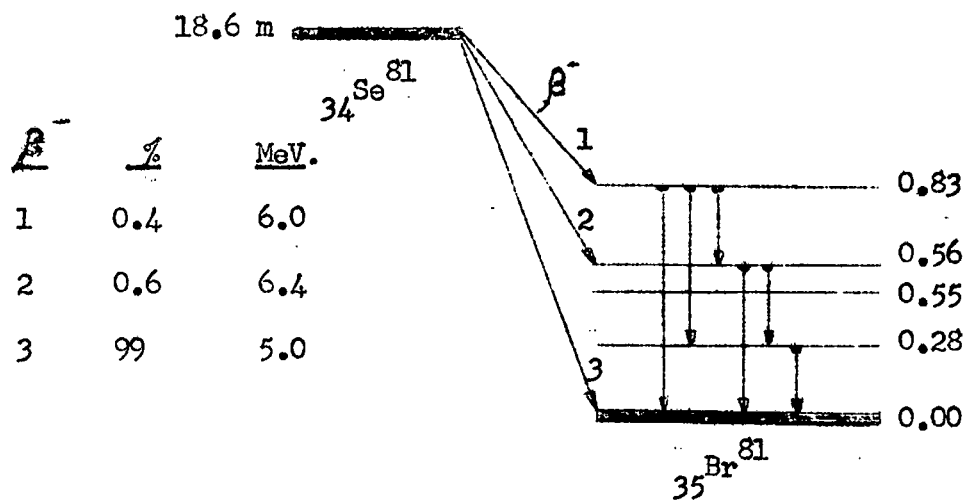


รูป 7 ไคอะแกรมแสดงการสลายตัวของนิวเคลียสของธาตุ Se (42)

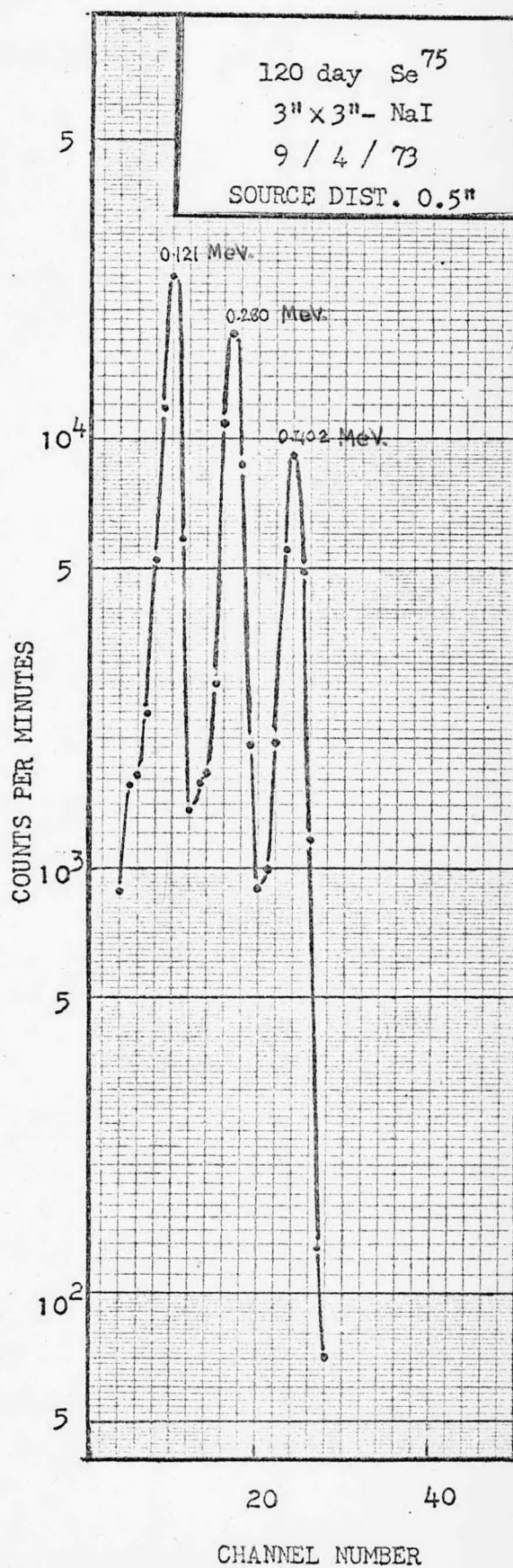
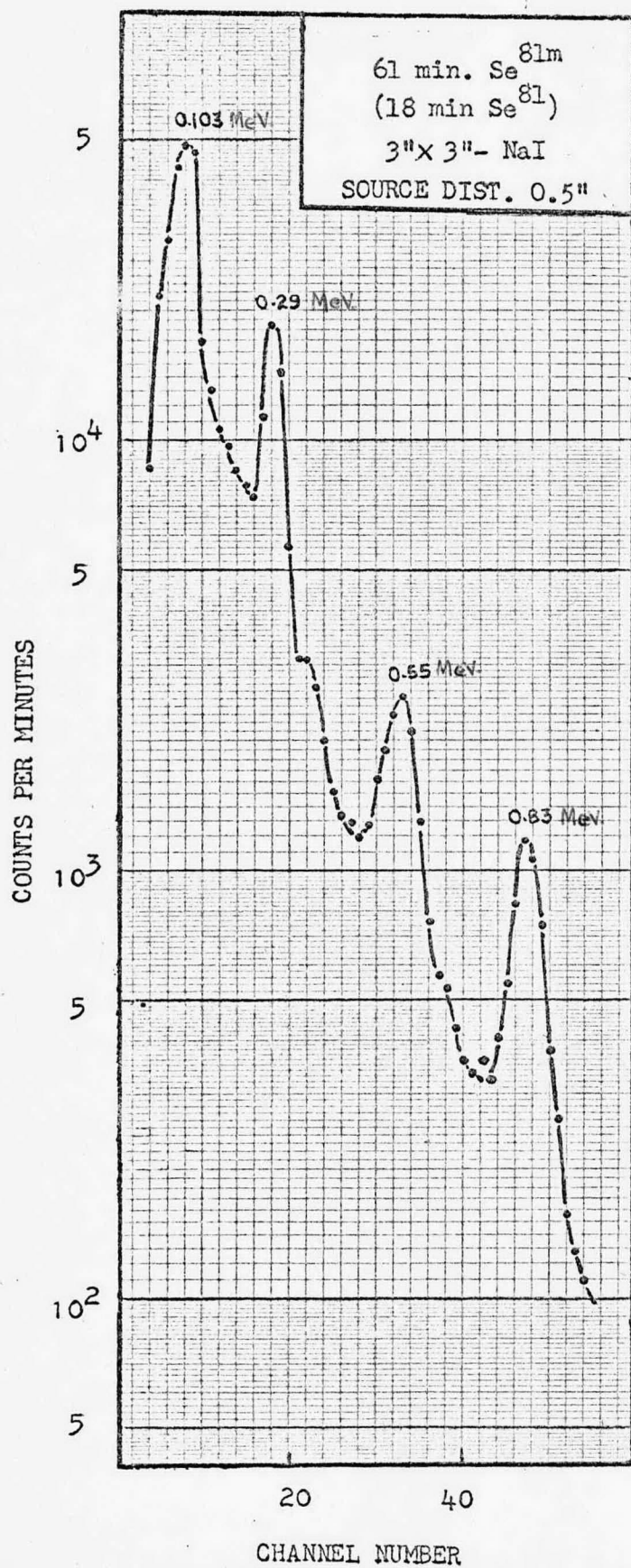
SELENIUM - 75



SELENIUM - 81



รูป 8 กราฟแสดงพลังงานรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจากธาตุ Se^{81} และ Se^{75}



การเตรียมสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

ก. บรรจุสารตัวอย่างลงในขวด polyethylene ชนิด 1 cc. ซึ่งน้ำหนักแล้วผนึกขวดด้วยความร้อน (heat sealing)

ข. บรรจุสารละลายของสารมาตรฐาน Cu^{+2} , As^{+3} และ Se^{+4} (มีปริมาณ Cu^{+2} $1\mu\text{g/ml}$, As^{+3} $0.5\mu\text{g/ml}$ และ Se^{+4} $0.5\mu\text{g/ml}$) ปริมาตร 1 ml ลงในขวด polyethylene แต่ละขวด ผนึกขวดด้วยความร้อนเช่นเดียวกับสารตัวอย่าง

ค. นำขวดสารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่ผนึกแล้วมาล้างให้สะอาดด้วยสารละลาย HNO_3 1% ทำให้แห้ง บรรจุรวมกันในภาชนะที่ใช้ฉาบรังสี ซึ่งเรียกว่า rabbit เพื่อนำไปฉาบรังสีนิวตรอนต่อไป

การนำสารตัวอย่างเข้าฉาบรังสี

นำ rabbit ไปฉาบรังสีนิวตรอนในห้อง pneumatic ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย 1 ซึ่งมี neutron flux เฉลี่ยประมาณ 6×10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 30 นาที

การเติม carrier และการทำสารตัวอย่างให้ละลาย

ก. นำขวดสารตัวอย่างที่ฉาบรังสีแล้วมาฉีกออกเป็น 2 ซีก ล้างมีดด้วยน้ำกลั่นเล็กน้อย เติม carrier Cu^{+2} , As^{+3} และ Se^{+4} (มีปริมาณ Cu^{+2} 10 mg/ml, As^{+3} 20 mg/ml และ Se^{+4} 20 mg/ml) อย่างละ 1 ml ลงในสารตัวอย่างพร้อมทั้งทำสารตัวอย่างให้ละลายด้วย HCl เข้มข้น อุณหภูมิบน hot plate จนกระทั่งสารละลายใส

ข. นำขวดสารมาตรฐานที่ฉาบรังสีแล้วมาฉีกออกเป็น 2 ซีก เช่นเดียวกับสารตัวอย่าง เติม carrier Cu^{+2} , As^{+3} , Se^{+4} อย่างละ 1 ml ลงในสารมาตรฐาน Cu, As และ Se ตามลำดับ และเติม HCl 5 M. 5 ml ตั้งบน hot plate จนกระทั่งเดือด แยกขวด polyethylene ออกทิ้ง

การแยกธาตุโพแทสเซียมด้วยวิธีเคมี

การแยก Se

นำสารละลายของสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน Se มา reduce ด้วย gas SO_2 จะได้ตะกอนสีดำของโลหะ Se คั้นสารละลายให้เดือดเพื่อไล่ SO_2 กรองตะกอน Se ในสารตัวอย่างและสารมาตรฐานแบบ suction ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างตะกอนด้วย HCl ร้อน 2 ครั้ง น้ำร้อน 2 ครั้ง และ ethyl alcohol 1 ครั้ง เก็บตะกอนไว้ใน panchette เพื่อวัดกับมันคาพาฟรังสี ส่วน filtrate I นำไปแยก Cu และ As ต่อไป

การแยก As และ Cu

1. นำ filtrate I ซึ่งประกอบด้วย Cu^{+2} และ As^{+3} มาอุ่นให้ร้อนทำให้สารละลายเป็นกลางด้วย NH_4OH 6 M. (ทดสอบด้วยกระดาษ litmus) แล้วเติม HCl 2 M. ลงไปอีก 4 - 5 หยด อุณหภูมิเดือด ผ่าน gas H_2S ลงไปจะเกิดตะกอน CuS และ As_2S_3 อุณหภูมิให้เดือด ประมาณ 5 นาทีเพื่อไล่ gas H_2S กรองตะกอน ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน และ alcohol เท filtrate IIทิ้ง

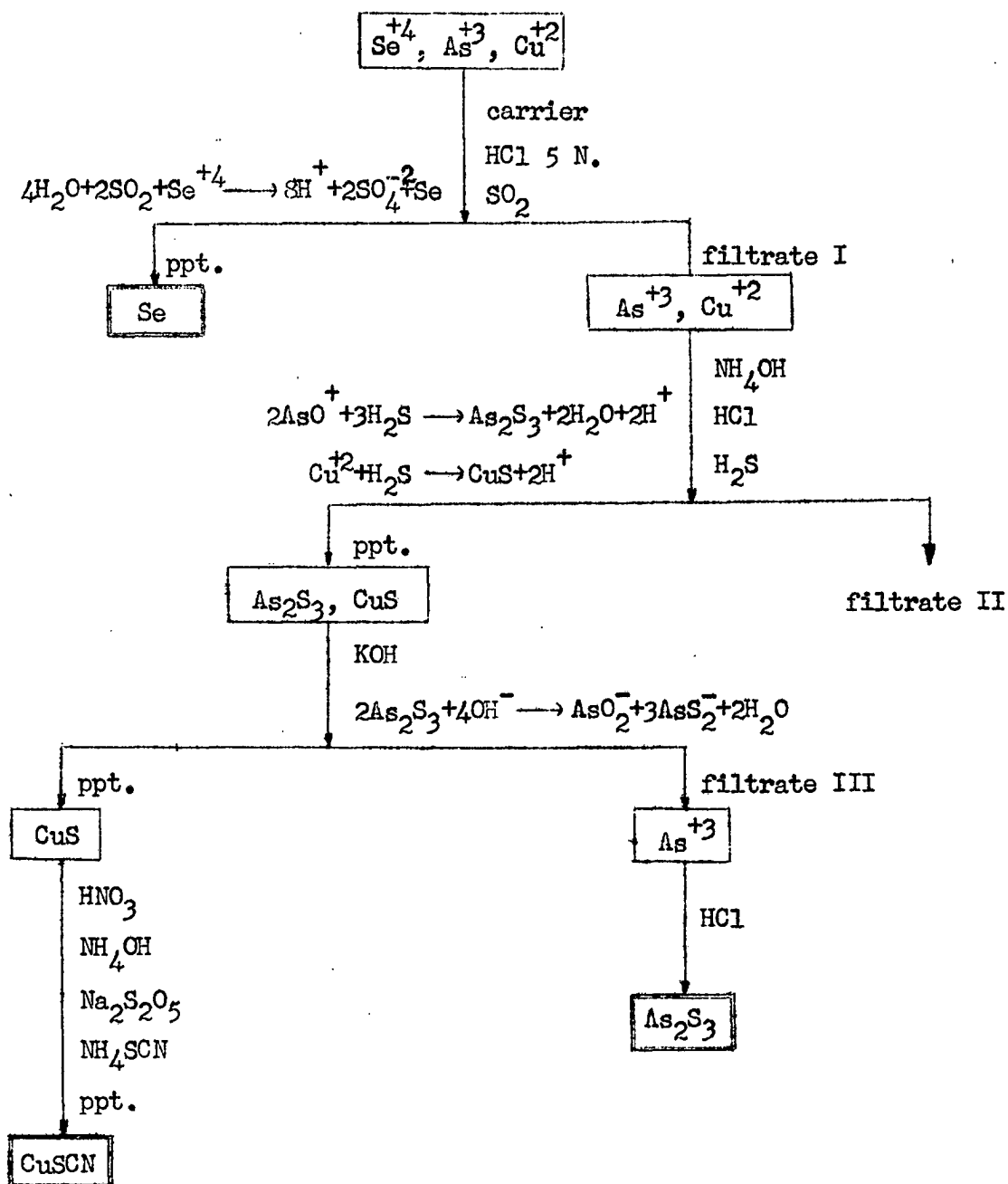
2. นำตะกอน CuS และ As_2S_3 มาละลายในสารละลาย NaOH 2 % อุณหภูมิให้เดือด จะสังเกตเห็นตะกอนสีดำของ CuS เหลืออยู่ ส่วนตะกอน As_2S_3 จะละลายเป็น filtrate III กรองตะกอน CuS ล้างด้วยน้ำร้อนและ alcohol เก็บตะกอนไว้แยก Cu โพแทสเซียม

3. ทำ filtrate III ให้เป็นกรดเล็กน้อยด้วย HCl จะได้ตะกอนสีเหลืองของ As_2S_3 อีกครั้งหนึ่ง ขณะเดียวกันก็ผ่าน gas H_2S ลงในสารละลายของสารมาตรฐาน As^{+3} จะเกิดตะกอนสีเหลืองของ As_2S_3 เช่นกัน กรองตะกอน แล้วล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน และ alcohol เก็บตะกอนไว้วัดกับมันคาพาฟรังสี

4. ละลายตะกอน CuS ใน HNO_3 เจือจางอุณหภูมิให้เดือด ทำสารละลายให้เป็นกลางควบคุมไปกับสารละลายของสารมาตรฐาน Cu โดยการเติม NH_4OH 27 % สังเกตได้จากสารละลายเป็นสีน้ำเงินอ่อนอย่างถาวร จากนั้นก็ reduce Cu^{+2} ให้เป็น Cu^+ ด้วย Sodium metabisulphite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) ประมาณ 0.1 กรัม จะสังเกตเห็นสีน้ำเงินอ่อน

จางหายไป เติมสารละลาย Ammonium thiocyanate (NH_4SCN) 5 % ประมาณ 2-3 ml
 จะเกิดตะกอน CuSCN ซึ่งมีสีขาวคล้ายน้ำมัน กรองตะกอน ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง
 alcohol 2 ครั้ง เก็บตะกอนไว้วัดกับมันเตภาพรังสี

รูป 9 ไคอะแกรมแสดงการแยกธาตุ Se, As และ Cu ให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีตกตะกอน



การวัดกัมมันตภาพรังสี

นำตะกอน Se , As_2S_3 และ CuSCN ของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานมาวัดรังสี-
แกมมาด้วย 128 multichannel gamma spectrometer โดยตั้ง gain ที่ 80 Zero
level ที่ 8 High power supply ที่ 1000 หรือ 1100 V. เวลารับ 2 นาที สำหรับ
 CuSCN 8 นาทีสำหรับ As_2S_3 และ 10 - 20 นาที สำหรับ Se จำนวนนับต่อเวลาใน
แต่ละ Channel จะพิมพ์ออกมาโดยเครื่องพิมพ์ IBM

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดกัมมันตภาพรังสี (ข้อมูลอยู่ในภาคผนวก ข.)

- นำข้อมูลที่ได้อาจจากการวัดกัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารตัวอย่างมาเขียนกราฟความ
สัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับต่อเวลา กับ channel ในกระดาษ semilog เปรียบเทียบกับ
สารมาตรฐาน ถ้าปรากฏว่าได้ peak ชัดเจนอยู่บน channel เดียวกับ peak ของสาร
มาตรฐาน แสดงว่ามีธาตุที่ต้องการวิเคราะห์อยู่จริง หรืออาจตรวจสอบจากพลังงานของรังสีแกมมา
ที่ส่งออกมาโดยเทียบกับ calibration curve ซึ่งอยู่ในภาคผนวก ก. และนอกจากนี้ยัง
สามารถตรวจสอบจากการติดตาม half life ได้อีกด้วย
- กำหนดหาพื้นที่ใต้ peak จากผลคูณระหว่างรายละเอียดของจำนวนนับต่อเวลาของ
channel แรก และ channel สุดท้ายของ peak กับจำนวน channel ใน peak
แล้วหักออกจากผลรวมของจำนวนนับต่อเวลาของ channel ที่ประกอบเป็น peak
- อบตะกอนสารตัวอย่างและสารมาตรฐานให้แห้งใน desiccator ซึ่งน้ำหนัก
คำนวณเทียบหา % yield แล้วตรวจแก้พื้นที่ใต้ peak (activity) ให้เป็น 100 %
- กำหนดหาปริมาณธาตุในสารตัวอย่างจากสูตร

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

ตัวอย่างการคำนวณ

ก. การคำนวณหาปริมาณธาตุ Cu ในสารตัวอย่างเบอร์ 4 ซึ่งมีข้อมูลดังนี้

น้ำหนักสารตัวอย่างเลือก 1.2636 กรัม

น้ำหนักสารมาตรฐาน 1 μg

น้ำหนักตะกอน CuSCN ในสารตัวอย่าง 0.0188 กรัม

น้ำหนักตะกอน CuSCN ในสารมาตรฐาน 0.0186 กรัม

การหาพื้นที่ใต้ peak (activity) คูณ 10 ประกอบการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ใต้ peak ของ Cu ในสารมาตรฐาน} &= (000108 + 000161 + 000271 \\
 &\quad + 000450 + 000543 + 000588 \\
 &\quad + 000525 + 000377 + 000232 \\
 &\quad + 000157 + 000105 + 000090 \\
 &\quad + 000081 + 000075) \\
 &\quad - \left[\frac{(108 + 75)}{2} \cdot 14 \right] \\
 &= 3763 - 1311 \\
 &= 2452
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ใต้ peak ของ Cu ในสารตัวอย่าง} &= (000134 + 000159 + 000261 \\
 &\quad + 000479 + 000718 + 000941 \\
 &\quad + 000922 + 000662 + 000419 \\
 &\quad + 000211 + 000133 + 000093 \\
 &\quad + 000090 + 000087) \\
 &\quad - \left[\frac{(134 + 87)}{2} \cdot 14 \right] \\
 &= 5311 - 1547 \\
 &= 3764
 \end{aligned}$$

คำนวณหา 100 % yield

$$\begin{aligned}
 &\text{ค่าตามทฤษฎี } \text{Cu}^{+2} \text{ 63.54 มิลลิกรัม เกิดเป็น CuSCN} = 121.6218 \text{ มิลลิกรัม} \\
 &\text{ถ้า carrier } \text{Cu}^{+2} \text{ 10 มิลลิกรัม เกิดเป็น CuSCN} = \frac{121.6218 \times 10}{63.54} \text{ มิลลิกรัม} \\
 &= 19.14243 \text{ มิลลิกรัม} \\
 &= 0.0191 \text{ กรัม} \\
 \therefore 100 \% \text{ yield ของ CuSCN} &= 0.0191 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

คำนวณหา 100 % activity

$$\begin{aligned}
 &\text{ในสารมาตรฐาน CuSCN 0.0186 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak (activity) = 2452} \\
 &\text{ถ้าสารมาตรฐาน CuSCN 0.0191 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak (activity) = } \frac{2452 \times 0.0191}{0.0186} \\
 &= 2517.7136 \\
 &\text{ในสารตัวอย่าง CuSCN 0.0188 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak (activity) = 3764} \\
 &\text{ถ้าสารตัวอย่าง CuSCN 0.0191 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak (activity) = } \frac{3764 \times 0.0191}{0.0188} \\
 &= 3823.8476
 \end{aligned}$$

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

$$\therefore \text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง} = \frac{3823.8476}{2517.7136} \times 1 \mu\text{g}$$

$$= 1.5187 \mu\text{g}$$

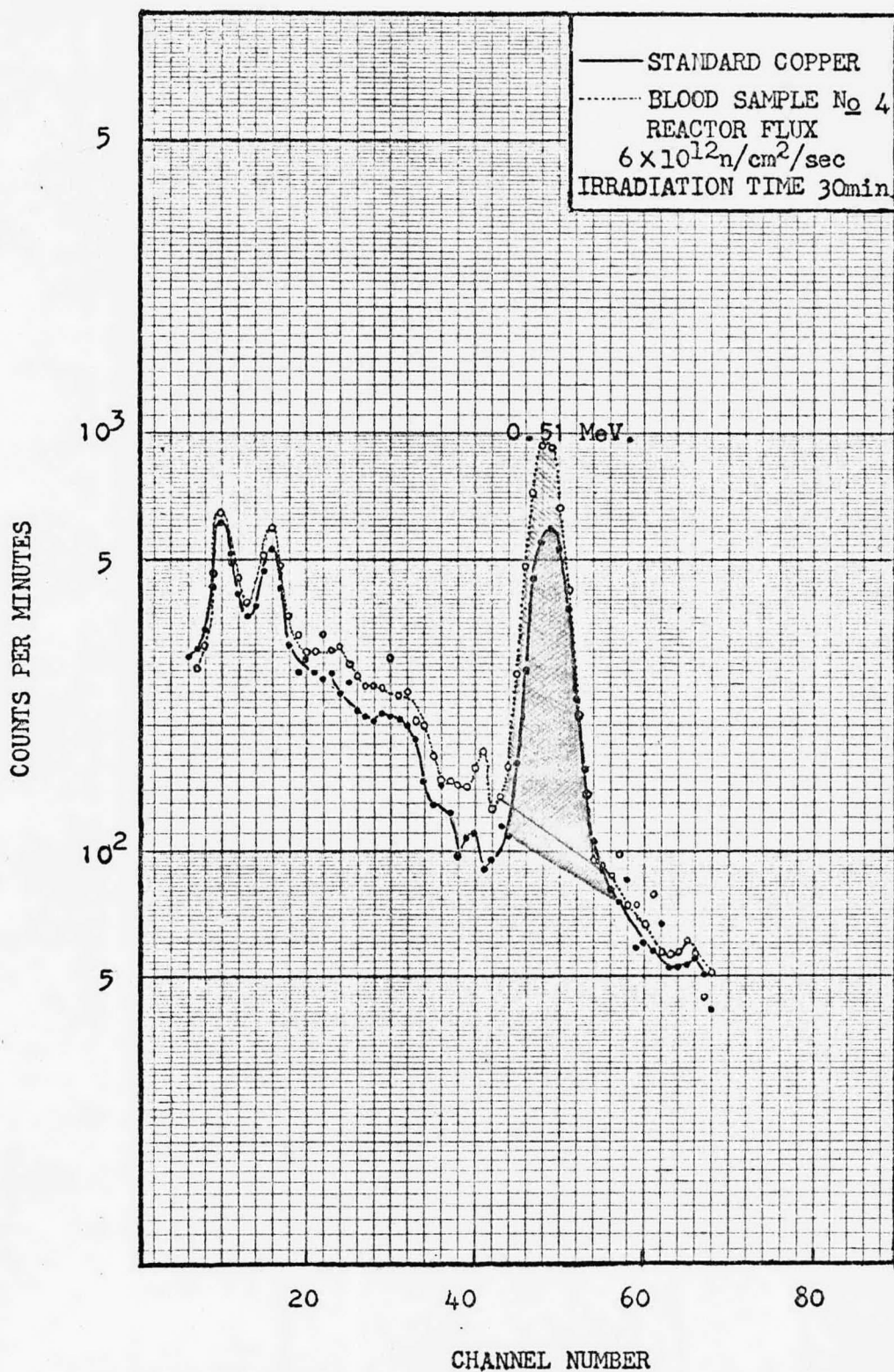
$$\text{นั่นคือ สารตัวอย่างหนัก 1.2636 กรัม มี Cu} = 1.5187 \mu\text{g}$$

$$\text{ถ้า สารตัวอย่างหนัก 1 กรัม มี Cu} = \frac{1.5187 \times 1}{1.2636} \mu\text{g}$$

$$= 1.2018 \mu\text{g}$$

$$\therefore \text{สารตัวอย่างเบอร์ 4 มีปริมาณ Cu} = 1.2018 \mu\text{g/g}$$

รูป 10 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ของธาตุ Cu^{64}
ในสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง เบอร์ 4



ข้อมูลที่ใช้เขียน curve ในรูป 10

19/5/73

Std. Cu

Gain 8.80 2 min. count.

020000	000000	000000	000009	000322	000415	000289	000306
000338	000430	000608	000514	000408	000366	000385	000469
000527	000426	000311	000267	000288	000267	000258	000265
000238	000252	000216	000210	000205	000212	000210	000206
000199	000182	000146	000129	000143	000122	000097	000107
000110	000090	000095	000113	(000108	000161	000271	000450
000543	000588	000525	000377	000232	000157	000105	000090
000081	000075)	000086	000058	000060	000057	000067	000052
000052	000053	000055	000050	000041	000047	000039	000047
000044	000047	000041	000043	000047	000030	000043	000051
000049	000041	000035	000045	000048	000047	000044	000041
000039	000046	000033	000028	000035	000030	000030	000032
000026	000038	000041	000027	000025	000023	000040	000033
000023	000030	000025	000027	000025	000029	000018	000025
000021	000013	000019	000022	000021	000024	000031	000028
000029	000029	000026	000027	000026	000030	000028	000025

S4

020000	000000	000000	000018	000353	000366	000336	000271
000306	000460	000638	000488	000454	000394	000386	000506
000594	000477	000354	000329	000300	000300	000333	000301
000309	000280	000216	000247	000248	000244	000293	000233
000240	000206	000200	000169	000144	000145	000143	000142
000159	000172	000124	(000134	000159	000261	000479	000718
000941	000922	000662	000419	000211	000133	000093	000090
000087)	000098	000074	000074	000067	000079	000057	000056
000057	000061	000056	000045	000051	000043	000052	000054
000044	000049	000039	000053	000044	000047	000057	000047
000049	000059	000046	000043	000046	000045	000041	000046
000041	000045	000036	000031	000036	000039	000037	000034
000033	000043	000034	000039	000037	000045	000057	000069
000042	000059	000048	000043	000031	000039	000028	000017
000030	000033	000033	000051	000045	000048	000038	000045
000048	000042	000034	000036	000034	000030	000028	000032

ข. การคำนวณหาปริมาณ As ในสารตัวอย่างเบอร์ 17 ซึ่งมีข้อมูลดังนี้

น้ำหนักสารตัวอย่างเลือก 1.1156 กรัม

น้ำหนักสารมาตรฐาน 0.5 μg

น้ำหนักตะกอน As_2S_3 ในสารตัวอย่าง 0.0301 กรัม

น้ำหนักตะกอน As_2S_3 ในสารมาตรฐาน 0.0283 กรัม

คำนวณหาพื้นที่ใต้ peak เช่นเดียวกับ Cu (กรุป 11 ประกอบ)

พื้นที่ใต้ peak ในสารตัวอย่าง = 799 และ

พื้นที่ใต้ peak ในสารมาตรฐาน = 1156

คำนวณหา 100 % yield

ค่าตามทฤษฎี As^{+3} 149.8400 มิลลิกรัม จะเกิดเป็น As_2S_3 = 246.0360 มิลลิกรัม
 ถ้า carrier As^{+3} 20 มิลลิกรัม จะเกิดเป็น As_2S_3 = $\frac{246.0360 \times 20}{149.844}$ มิลลิกรัม

= 32.882 มิลลิกรัม

$\therefore$ 100 % yield ของ As_2S_3 = 0.0329 กรัม

คำนวณหา 100 % activity

ในสารมาตรฐาน As_2S_3 0.0283 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak = 1156

ถ้าสารมาตรฐาน As_2S_3 0.0329 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak = $\frac{1156 \times 0.0329}{0.0283}$

= 1343.8500

ในสารตัวอย่าง As_2S_3 0.0301 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak = 799

ถ้าสารตัวอย่าง As_2S_3 0.0329 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak = $\frac{799 \times 0.0329}{0.0301}$

= 874.1060

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

$$\therefore \text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง} = \frac{874.1060}{1343.8500} \times 0.5 \mu\text{g}$$

$$= 0.3252 \mu\text{g}$$

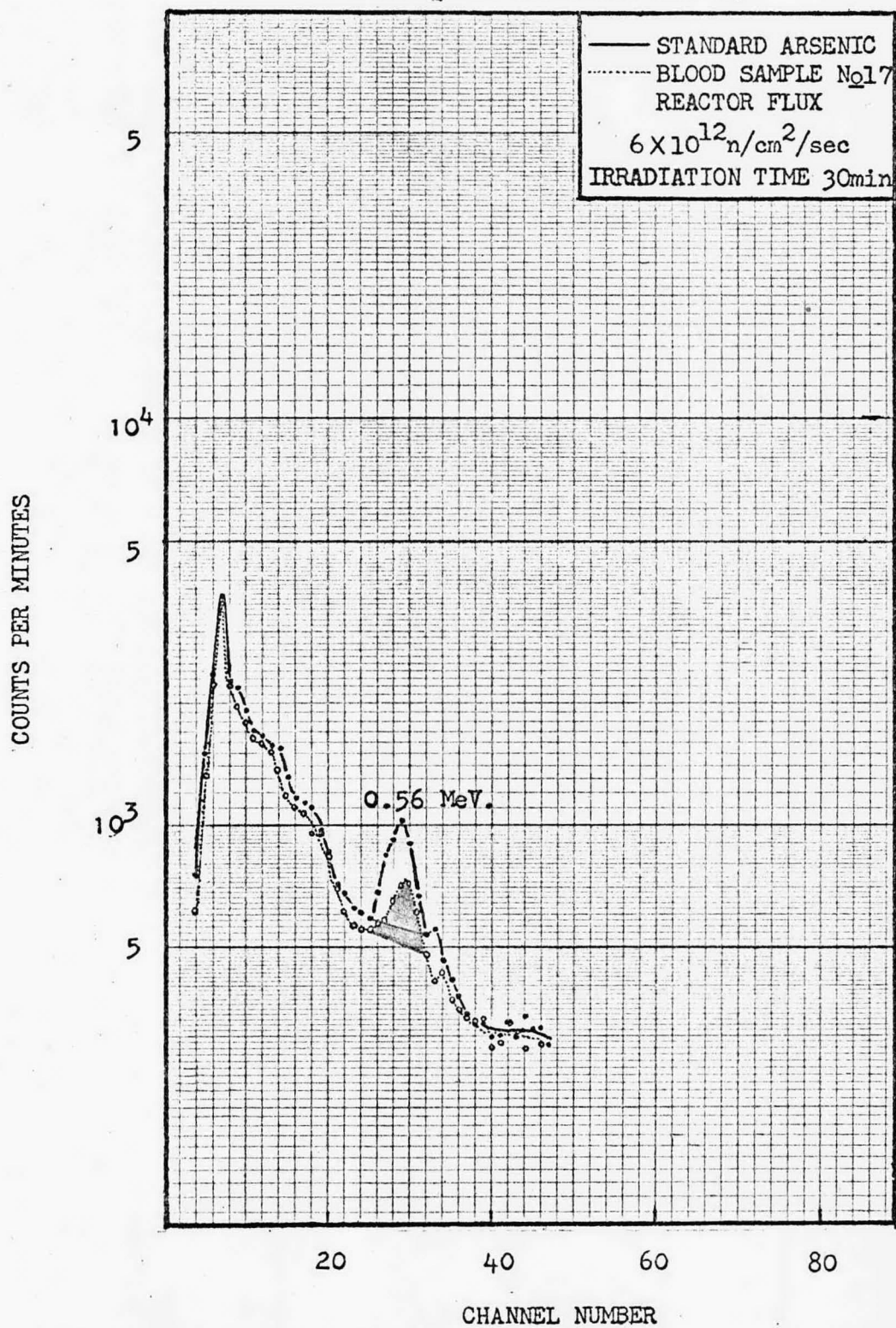
$$\text{นั่นคือสารตัวอย่าง 1.1156 กรัม มี As} = 0.3252 \mu\text{g}$$

$$\text{ถ้า สารตัวอย่าง 1 กรัม มี As} = \frac{0.3252 \times 1}{1.1156} \mu\text{g}$$

$$= 0.2914 \mu\text{g}$$

$$\therefore \text{สารตัวอย่างเบอร์ 17 มีปริมาณ As} = 0.2914 \mu\text{g/g}$$

รูป 11 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ของธาตุ As^{76}
ในสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง เบอร์ 17



ค. การคำนวณหาปริมาณธาตุ Se ในสารตัวอย่างเบอร์ 11 ซึ่งมีขบวนการดังนี้

น้ำหนักสารตัวอย่างเลือก 1.1405 กรัม

น้ำหนักสารมาตรฐาน 0.5 μg

น้ำหนักตะกอนโลหะ Se ในสารตัวอย่าง 0.0192 กรัม

น้ำหนักตะกอนโลหะ Se ในสารมาตรฐาน 0.0167 กรัม

คำนวณหาพื้นที่ใต้ peak เช่นเดียวกับ Cu (ดูรูป 12 ประกอบ)

พื้นที่ใต้ peak ในสารตัวอย่าง = 248 และ

พื้นที่ใต้ peak ในสารมาตรฐาน = 407

คำนวณหา 100 % yield

ค่าตามทฤษฎี Se^{+4} 78.96 มิลลิกรัม เกิดเป็นโลหะ Se = 78.96 มิลลิกรัม

ถ้า carrier Se^{+4} 20 มิลลิกรัม เกิดเป็นโลหะ Se = $\frac{78.96 \times 20}{78.96}$ มิลลิกรัม

= 20 มิลลิกรัม

= 0.020 กรัม

$\therefore$ 100 % yield ของ Se = 0.020 กรัม

การคำนวณหา 100 % activity

ในสารมาตรฐาน Se 0.0167 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak = 407

ถ้าสารมาตรฐาน Se 0.020 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak = $\frac{407 \times 0.020}{0.0167}$

= 488.6810

ในสารตัวอย่าง Se 0.0192 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak = 248

ถ้าสารตัวอย่าง Se 0.020 กรัม มีพื้นที่ใต้ peak = $\frac{248 \times 0.020}{0.0192}$

= 258.3168

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

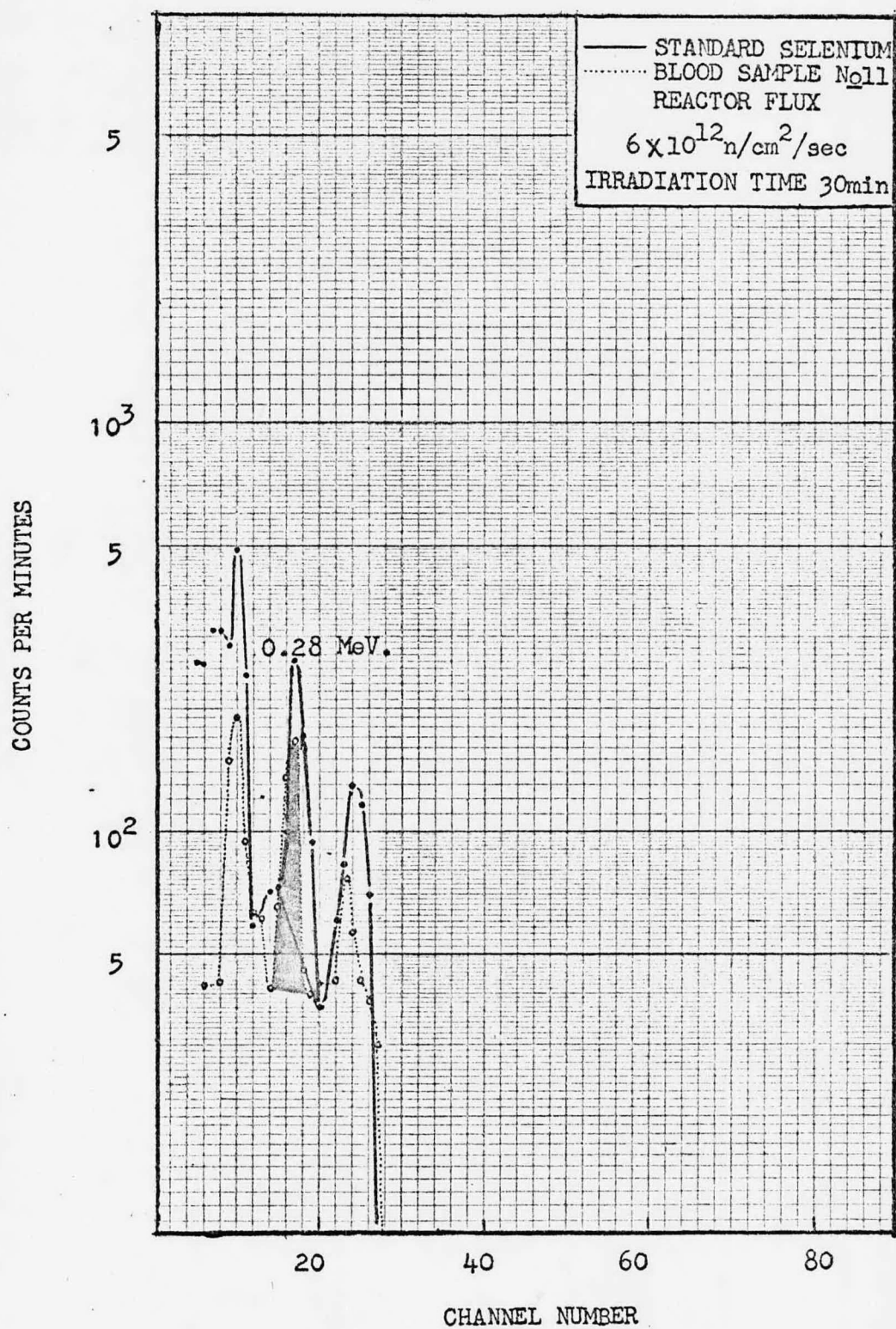
$$\begin{aligned} \therefore \text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง} &= \frac{258.3168}{488.6810} \times 0.5 \mu\text{g} \\ &= 0.2643 \mu\text{g} \end{aligned}$$

$$\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง } 1.1405 \text{ กรัม มี Se} = 0.2643 \mu\text{g}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ถาสารตัวอย่าง } 1 \text{ กรัม มี Se} &= \frac{0.2643 \times 1}{1.1405} \mu\text{g} \\ &= 0.2317 \mu\text{g} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{สารตัวอย่างเบอร์ 11 มีปริมาณ Se} = 0.2317 \mu\text{g/g}$$

รูป 12 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้ peak ของธาตุ Se^{75}
ในสารมาตรฐานและสารตัวอย่างเบอร์ 11



ตาราง 2 แสดงปริมาณธาตุ Cu, As และ Se ในสารตัวอย่าง

เบอร์ สารตัวอย่าง	ปริมาณธาตุหน่วย $\mu\text{g/g}$			เบอร์ สารตัวอย่าง	ปริมาณธาตุหน่วย $\mu\text{g/g}$		
	Cu	As	Se		Cu	As	Se
1	1.3816	0.1395	0.1534	21	0.9988	0.1401	0.2151
2	1.4375	0.1600	0.1680	22	0.9431	0.1319	0.2761
3	1.2153	0.1459	0.1749	23	0.0730	0.1741	0.3725
4	1.2018	0.1988	0.1427	24	0.7213	0.1877	0.4523
5	1.3215	0.2248	0.1406	25	1.1261	0.1241	0.2004
6	1.5675	0.2170	0.1390	26	1.2845	0.2292	0.1545
7	1.1824	0.1365	0.1001	27	1.1973	0.1471	0.1696
8	1.2220	0.1493	0.1269	28	1.2569	0.1525	0.1564
9	0.9652	0.1699	0.0710	29	1.4887	0.1487	0.4133
10	1.2613	0.1805	0.2706	30	1.1003	0.1552	0.1337
11	0.8913	0.1532	0.2317	31	1.0477	0.1476	0.1676
12	1.0419	0.1837	0.1278	32	1.1484	0.0832	0.2107
13	1.1871	0.1846	0.1398	33	1.2489	0.1142	0.1721
14	1.1066	0.1352	0.0895	34	0.8569	0.1305	0.1446
15	1.0741	0.1036	0.1447	35	1.3957	0.0658	0.1390
16	1.1369	0.1361	0.1729	36	1.0782	0.0429	0.1503
17	1.3468	0.2914	0.1508	37	0.7820	0.0734	0.1844
18	1.0037	0.1975	0.1422	38	0.7385	0.0435	0.1488
19	0.8692	0.3031	0.1549	39	0.8799	0.0652	0.1998
20	0.8845	0.1703	0.2370	40	0.7169	0.1267	0.2119

การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ค.)

1. ค่าเฉลี่ย (mean)

1.1 หาค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุ Cu ในสารตัวอย่าง

1.2 หาค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุ As ในสารตัวอย่าง

1.3 หาค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุ Se ในสารตัวอย่าง

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

เมื่อ $\bar{X}$ แทนค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ หน่วย $\mu\text{g/g}$

$\sum X$ แทนผลรวมทั้งหมดของปริมาณธาตุ

N แทนจำนวนสารตัวอย่าง

ตาราง 3 แสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Cu, As และ Se ในเลือด

ธาตุ	$\sum X$	N	$\bar{X}$
Cu	40.3813	40	1.1095
As	6.0645	40	0.1516
Se	7.3516	40	0.1873

2. ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)

2.1 หาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณธาตุ Cu

2.2 หาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณธาตุ As

2.3 หาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณธาตุ Se

โดยใช้สูตร

$$s = \sqrt{\frac{N\sum x^2 - (\sum x)^2}{N(N-1)}}$$

เมื่อ s แทน ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$\sum x$ แทน ผลรวมทั้งหมดของปริมาณธาตุ

$\sum x^2$ แทน ผลรวมทั้งหมดของปริมาณธาตุในแต่ละสารตัวอย่างยกกำลังสอง

N แทน จำนวนสารตัวอย่าง

ตาราง 4 แสดงค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณธาตุ Cu, As และ Se

ธาตุ	$\sum x$	$\sum x^2$	N	s
Cu	44.3813	51.0142	40	0.2131
As	6.0645	1.0435	40	0.0565
Se	7.3516	1.5952	40	0.0791

5. สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation)

3.1 หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Cu และ As

3.2 หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Cu และ Se

3.3 หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ As และ Se

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 แทน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

$\sum xy$ แทน ผลรวมของผลคูณของปริมาณธาตุทั้ง 2 ชนิด

$\sum x \sum y$ แทน ผลคูณของผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

N แทน จำนวนสารตัวอย่าง

ตาราง 5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างธาตุ Cu กับ As, Cu กับ Se และ As กับ Se

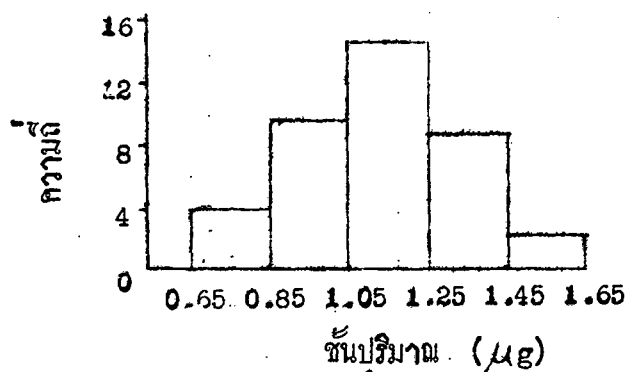
ธาตุ	ΣXY	$\Sigma X \Sigma Y$	N	r
Cu กับ As	6.8391	269.1504	40	0.28
Cu กับ Se	8.0525	326.2735	40	- 0.16
As กับ Se	1.1433	44.5838	40	0.16

การนำเสนอข้อมูลแบบการแจกแจงความถี่ด้วยรูปภาพ (Histogram)

ตาราง 6 การแจกแจงความถี่ของปริมาณธาตุ Cu แบบจัดเป็นกลุ่ม โดยมี
อันตรภาคชั้นละ $0.2 \mu g$

ชั้นปริมาณธาตุ (μg)	รอยความถี่	ความถี่ (f)
1.45 - 1.64		2
1.25 - 1.44		9
1.05 - 1.24		15
0.85 - 1.04		10
0.65 - 0.84		4

นำข้อมูลจากตาราง 6 มาสร้างกราฟแบบฮิสโตแกรม ได้ดังนี้

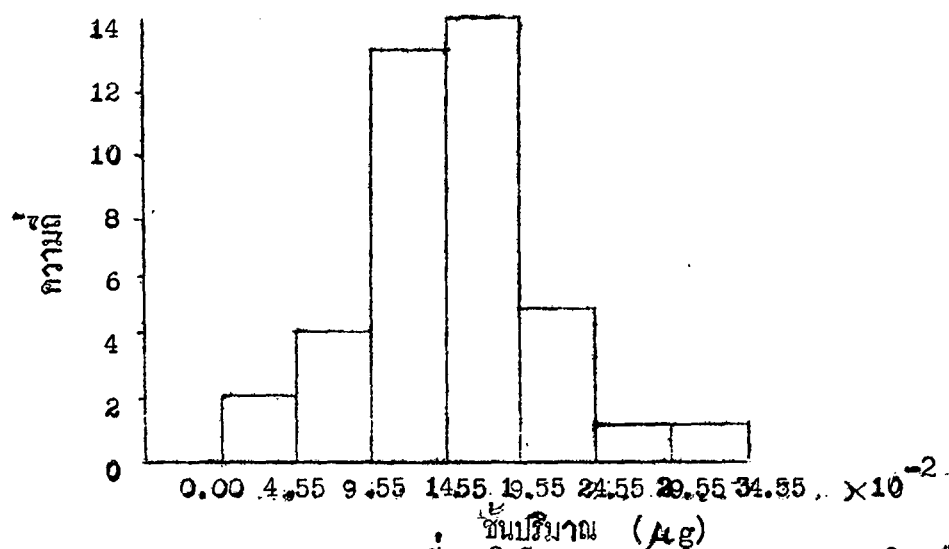


รูป 13. การแจกแจงความถี่ฮิสโตแกรมของปริมาณธาตุ Cu ในเปลือก

ตาราง 7 แสดงการแจกแจงความถี่ของปริมาณธาตุ As แบบจัดเป็นกลุ่ม โดยมี
อันตรภาคชั้นละ $0.05 \mu g$

ชั้นปริมาณธาตุ (μg)	รอยความถี่	ความถี่ (f)
.300 - .345	I	1
.250 - .295	I	1
.200 - .245	II	5
.150 - .195	II II III	14
.100 - .145	II II II	13
.050 - .095	III	4
.000 - .045	II	2

นำข้อมูลจากตาราง 7 มาสร้างกราฟแบบฮิสโตแกรม ได้ดังนี้

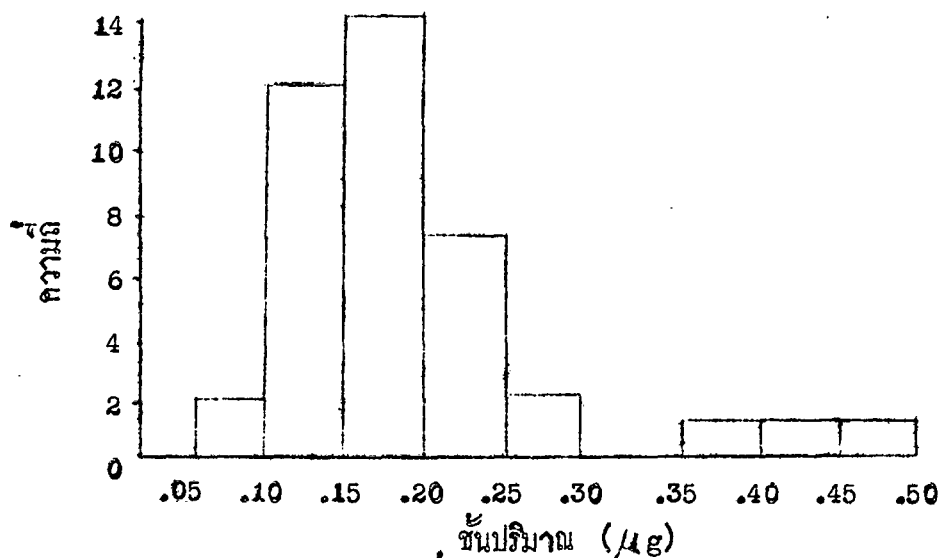


รูป 14. การแจกแจงความถี่แบบฮิสโตแกรมของปริมาณธาตุ As ในปลือก

ตาราง 8 แสดงการแจกแจงความถี่ของปริมาณธาตุ Se แบบจัดเป็นกลุ่ม โดยที่
 อัตรากาชันละ $0.05 \mu g$

ชั้นปริมาณธาตุ (μg)	รอยความถี่	ความถี่ (f)
.45 - .495	I	1
.40 - .445	I	1
.35 - .395	I	1
.30 - .345		0
.25 - .295	II	2
.20 - .245	III II	7
.15 - .195	III III III	14
.10 - .145	III III II	12
.05 - .095	II	2

นำข้อมูลจากตาราง 8 มาสร้างกราฟแบบฮิสโตแกรม ดังนี้



รูป 15. การแจกแจงความถี่แบบฮิสโตแกรมของปริมาณธาตุ Se ในเลือด

ผลการทดลอง

1. จากการทดลองพบว่าในสารตัวอย่าง เลือด 1 กรัม มีปริมาณธาตุ Cu, As และ Se ดังนี้

ปริมาณเฉลี่ยของ Cu = $1.11 \mu g$ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.21

ปริมาณเฉลี่ยของ As = $0.15 \mu g$ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.06

ปริมาณเฉลี่ยของ Se = $0.19 \mu g$ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.08

2. ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปริมาณธาตุ Cu กับ As, Cu กับ Se, และ As กับ Se เป็น 0.28, - 0.16 และ 0.16 ตามลำดับ

อภิปรายผลการทดลอง

1. เปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าตาม Literature

ตาราง 9 เปรียบเทียบผลการทดลองหาปริมาณธาตุ Cu ในเลือดกับ Literature

ผู้ทดลอง	วิธีการวิเคราะห์	ปริมาณธาตุ
R.P. Spencer, T.G. Mitchell และ E.R. King (57)	Non-destructive NAA	1.1 $\mu\text{g/g}$
C.C. Thomson, G.P. Tercho และ J.A. Sandel (59)	Destructive NAA	1.25 ppm.
W.A. Haller และ R.H. Filby (31)	Non destructive NAA	1.1 $\mu\text{g/g}$
R.E. Jervis และ K.Y. Wong (36)	Destructive NAA	1.1 $\mu\text{g/g}$
H.J.M. Bowen (19) เสนอค่าที่ใช้อย่างอิง	NAA	1.1 $\mu\text{g/g}$
This experiment	Destructive NAA	1.11 $\mu\text{g/g}$

ตาราง 10 เปรียบเทียบผลการทดลองหาปริมาณธาตุ As ในเลือดกับ Literature

ผู้ทดลอง	วิธีการวิเคราะห์	ปริมาณธาตุ
A.A. Smales และ B.D. Pate (55)	Destructive NAA	0.09-0.50 ppm.
K. Fritze และ R. Robertson (27)	Non destructive NAA	0.003 $\mu\text{g/g}$
I. Hadjestelivs และ A.P. Grimanis (30)	Destructive NAA	0.02 $\mu\text{g/g}$
H.J.M. Bowen (19) เสนอค่าที่ใช้อย่างอิง	NAA	0.5 $\mu\text{g/g}$
This experiment	Destructive NAA	0.15 $\mu\text{g/g}$

ตาราง 11 เปรียบเทียบผลการทดลองหาปริมาณธาตุ Se ในเลือดกับ Literature

ผู้ทดลอง	วิธีการวิเคราะห์	ปริมาณธาตุ
R.H. Tomlinson และ R.C. Dickson (61)	Destructive NAA	0.208 $\mu\text{g/g}$
W.A. Haller และ R.H. Filby (31)	Nondestructive NAA	0.176 $\mu\text{g/g}$
H.J.M. Bowen (19) เสนอค่าที่ใช้อ้างอิง	NAA	0.2 $\mu\text{g/g}$
This experiment	Destructive NAA	0.187 $\mu\text{g/g}$

จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ Cu และ Se ในเลือดโดยวิธี NAA ใกล้เคียงกับการวิจัยใน Literature มาก แสดงว่าปริมาณธาตุ Cu และ Se ในเลือดคนไทยมีปริมาณใกล้เคียงกับคนต่างประเทศ จึงเป็นการสนับสนุนผลการค้นคว้าของ J.M.A. Lenihan (29) ที่ว่า Cu และ Se เป็นธาตุที่มีปริมาณน้อยและจำเป็นต่อร่างกาย ซึ่งร่างกายของคนปกติจะมีระบบที่ทำหน้าที่ควบคุมการดูดซึมและการขับถ่ายสารพวกโลหะต่าง ๆ อยู่ (6) เพื่อให้ปริมาณของโลหะในร่างกายคงที่

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ As ในเลือดของคนไทยด้วยวิธี NAA แตกต่างจากผลการวิจัยในต่างประเทศ ซึ่งในแต่ละผลการวิจัยของต่างประเทศก็แตกต่างกันมาก เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากธาตุ As เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะสะสมอยู่ในร่างกายเป็นส่วนใหญ่ มีส่วนน้อยที่สกัดออกทางทางผิวหนัง เส้นผม และเล็บ (19) ดังนั้นปริมาณธาตุ As ในร่างกายจึงขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุ As ในสภาพแวดล้อม ดังที่ K. Heydorn (33) ได้ศึกษาระดับ As ในเลือดคนที่อาศัยอยู่ในเมือง Blackfoot ไคท์วัน เปรียบเทียบกับระดับ As ในเลือดคนในเดนมาร์ก พบว่าระดับ As ในเลือดคนไคท์วันสูงกว่าระดับ As ในเลือดคนที่อยู่ในเดนมาร์ก ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำดื่มในเมือง Blackfoot มี As อยู่ด้วยนั่นเอง

2. เมื่อพิจารณาจากความเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะเห็นได้ว่าปริมาณธาตุ Cu, As และ Se ในเลือดมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อย หมายความว่าข้อมูลมีการกระจายออกจากค่าเฉลี่ย-

น้อย แสดงว่าปริมาณความแตกต่างของธาตุ Cu, As และ Se ในเลือดของแต่ละคนมีน้อย จากการนำเสนอข้อมูลแบบฮิสโตแกรม สรุปได้ดังนี้

ก. การกระจายของปริมาณ Cu ในเลือดเกือบเป็นการกระจายแบบปกติ (normal distribution) มีความถี่สูงสุด (mode) อยู่ในช่วงปริมาณ $1.05 - 1.25 \mu\text{g}$ แสดงว่าปริมาณธาตุ Cu ในเลือดของคนส่วนใหญ่อยู่ในช่วง $1.05 - 1.25 \mu\text{g}$ และการกระจายจากค่าเฉลี่ยในทางบวกและลบเกือบเท่ากัน

ข. การกระจายของปริมาณ As ในเลือดจะโค้งแบบ Leptokurtic มีความถี่สูงสุดอยู่ในช่วง $0.1455 - 0.1955 \mu\text{g}$ และความถี่รองลงมาอยู่ในช่วง $0.0955 - 0.1455 \mu\text{g}$ ซึ่งความถี่ทั้งสองช่วงดังกล่าวนี้สูงกว่าช่วงอื่น ๆ มาก แสดงว่าปริมาณธาตุ As ในเลือดของคนส่วนใหญ่อยู่ในช่วง $0.0955 - 0.1955 \mu\text{g}$ ซึ่งกระจายออกจากค่าเฉลี่ยในทางบวกและลบเกือบเท่ากัน

ค. การกระจายของปริมาณ Se ในเลือดจะโค้งแบบ Leptokurtic และเบ้ไปทางบวก (positive skewed) มีความถี่สูงสุดอยู่ในช่วง $0.15 - 0.20 \mu\text{g}$ และความถี่รองลงมาอยู่ในช่วง $0.10 - 0.15 \mu\text{g}$ ส่วนช่วงอื่น ๆ มีความถี่ต่ำ แสดงว่าปริมาณธาตุ Se ในเลือดคนส่วนใหญ่อยู่ในช่วง $0.10 - 0.20 \mu\text{g}$ ซึ่งกระจายออกจากค่าเฉลี่ยไปในทางบวกมากกว่าทางลบ

3. ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ปริมาณธาตุ Cu กับ As, Cu กับ Se และ Se กับ As เป็น 0.28 , -0.16 และ 0.16 ตามลำดับนั้น ถือว่าสัมพันธ์กันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เพราะค่ากรดสองสารตัวอย่าง 40 ตัวอย่าง จะต้องมีความสัมพันธ์สหสัมพันธ์ ± 0.394 ขึ้นไป จึงจะถือว่าสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และจะควรมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ± 0.393 ขึ้นไป จึงจะถือว่าสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์ (5)

เหตุที่ธาตุทั้ง 3 ไม่สัมพันธ์กันก็เนื่องจาก Cu เป็น sub-trace level ในร่างกาย ซึ่งเป็นส่วนประกอบของน้ำย่อย (enzyme) หลายชนิดในการเร่งปฏิกิริยาเกี่ยวกับโปรตีนในระบบต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น

amine oxidase มีความสำคัญในการสร้าง elastin และ collagen
 Tyrosinase ทำหน้าที่เปลี่ยนกรดอะมิโนชื่อ Tyrosine ให้เป็น melanin
 Transferrin และ ceruloplasmin ทำหน้าที่ในกระบวนการสร้าง

Haemoglobin

Cytochrome oxidase ทำหน้าที่ผลิตพลังงาน adenosin triphosphate
 ส่วนธาตุ Se ก็จัดว่าเป็น sub-trace level (29) ในร่างกายเช่นกัน แต่ Se
 เป็นส่วนประกอบของน้ำย่อยที่จำเป็นสำหรับปฏิกิริยา oxidation-reduction ที่ก่อให้เกิด
 การสังเคราะห์กรดอะมิโน cystine และ Vitamin E (22)

สำหรับ As เป็นธาตุที่เป็นพิษ (toxic) ในร่างกาย ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุชนิดใด
 ใด ๆ ในร่างกายทั้งสิ้น

4. จากการทดลองทำให้ทราบปริมาณธาตุ Cu ในเลือดคนไทย ปกติสามารถนำไป
 เปรียบเทียบกับปริมาณในเลือดผู้ป่วยที่ต้องสงสัยว่าเป็นโรค Wilson's disease ซึ่งเป็นโรค
 ที่เกี่ยวกับต่อมใต้สมอง (pituitary gland) มีการผิดปกติเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ทองแดง
 ของร่างกายถูกรบกวน (13) ทำให้เกิดอาการบวม ตัวเหลือง ตับโต ผลทำให้ Cu ในเลือด
 ลดลงลง ในทางตรงข้ามถ้า Cu เข้าร่างกายมากเกินไป จะมีอาการคลื่นไส้ อาเจียร ปวด
 ศีรษะ ทองแดง ปวดท้อง ตัวเหลือง ทั้งนี้เพราะว่า Cu เป็นโลหะที่ทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารที่มี
 หมู่ sulfhydryl (-SH) ซึ่งน้ำย่อยหลายชนิดในร่างกายมีหมู่ -SH อยู่ด้วย ถ้า Cu
 ไปจับกับหมู่ -SH ในน้ำย่อย น้ำย่อยก็จะหมดประสิทธิภาพทันที (6)

ในกรณีของธาตุ As เมื่อทราบปริมาณในคนปกติแล้ว สามารถใช้เป็นสมมุติฐานในการ
 เปรียบเทียบกับปริมาณในเลือดของผู้ป่วยที่สงสัยว่าเป็นโรคพิษ As ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิดด้วยกันคือ

ก. ชนิดพิษฉับพลัน ส่วนใหญ่เกิดจากการกินยาฆ่าแมลง มีอาการคอแห้ง คลื่นไส้
 อาเจียร ปวดท้อง ทองแดงอย่างรุนแรง อูจจวจะมีลักษณะคล้ายคนเป็นอหิวาตกโรค อาการที่พบ
 คือผู้ป่วยจะช็อคลงอย่างรวดเร็ว แขนงคัมเลือดคลั่ง บัสสาวะเป็นสีขาว ตัวเย็น ปวดเมื่อยตาม
 มือและเท้า ปวดศีรษะและอ่อนเพลีย

ข. ชนิดพิษเรื้อรัง ส่วนใหญ่เกิดแก่ผู้ที่รับประทานยาไทย ยาจีน และผู้ที่ทำงาน
 เกี่ยวข้องกับยาฆ่าแมลง อาการที่ปรากฏคือ อ่อนเพลีย ปวดท้อง ทองแดงและผูกสลับกัน บัสสาวะ

มีโซขาว เปลือกตาลางขาว ผอมลงและมีจุดสีเกิดขึ้นตามผิวหนัง

กรณีของธาตุ Se เมื่อทราบปริมาณในคนปกติก็สามารถนำไปเปรียบเทียบกับผู้ป่วยที่สงสัยว่าจะเป็นโรคพิษ Se ได้ จากการศึกษาพบว่าคนที่กิน Se เข้าไป จะเกิดอาการไข้ น้ำหนักตัวลด เทียบโตช้า มีโลหิตจาง อาการต่อมาคือเกิดการหงิกงอของกระดูกส่วนยาว ๆ (เช่น กระดูกแขน กระดูกขา)

ข้อผิดพลาดของการทดลอง

ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในการวิเคราะห์แบบ NAA ซึ่งอยู่ในขอบเขต ± 10 เปอร์เซ็นต์ (9) อันเนื่องมาจากสาเหตุต่าง ๆ ดังนี้

1. ความผิดพลาดเนื่องจากการนับรังสี เรียกว่า statistical error เกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีเป็นแบบ Random Phenomena ซึ่งมีค่า standard deviation เกือบเท่ากับรากที่สองของค่าเฉลี่ย ข้อผิดพลาดนี้เป็นข้อที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่จะลดน้อยลงเมื่อธาตุที่นำมาวัดมี activity ตั้งแต่ 100 cpm ขึ้นไป
2. ความผิดพลาดเนื่องจากการปฏิกิริยาแซกซอน เช่นอาจมีปฏิกิริยา (n,p) และ (n,α) เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์โดยใช้ปฏิกิริยา (n,γ) ทั้งนี้เนื่องจากใน reactor มี fast neutron อยู่ส่วนหนึ่ง และในสารตัวอย่างมีธาตุที่มีค่า fast neutron cross-section มากแต่ความผิดพลาดนี้ไม่ค่อยพบในการทดลองเกี่ยวกับสารตัวอย่างทางชีววิทยา
3. ความผิดพลาดเนื่องจาก flux distribution ค่าความผิดพลาดนี้อาจลดน้อยลงได้ถ้าใช้ปริมาณของสารตัวอย่างน้อย ๆ หรือไม่ก็อาจรังสีสารตัวอย่างอื่น ๆ และสารมาตรฐานที่ทำแทนเงิ
4. ความผิดพลาดเนื่องจาก self-shielding ของสารตัวอย่าง โดยเฉพาะธาตุที่มี neutron absorption cross-section มาก ๆ ความเข้มของนิวตรอนที่กึ่งกลางสารตัวอย่างอาจมีค่าน้อยกว่าบริเวณรอบ ๆ กรณีที่สารมาตรฐานมีขนาดและรูปร่างไม่เหมือนกับสารตัวอย่าง แต่มีความเข้มและการกระจายของธาตุเหมือนกัน ค่าความเข้มของนิวตรอนที่เปลี่ยนแปลงนี้ย่อมไม่ทำให้ผลการเปรียบเทียบผิดพลาดไป และการใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อย ๆ ก็จะช่วยลดความผิดพลาดนี้ลงได้ แต่ก็ยังไม่มีรายงานที่แสดงว่าความผิดพลาดนี้เกิดขึ้นกับสารตัวอย่างทางชีววิทยา (3)

ส่วนในสารมาตรฐานนั้นจะมีความผิดพลาดเนื่องจาก self-shielding ถ้ามีปริมาณมากกว่า 1 มิลลิกรัม (44)

5. ความผิดพลาดเนื่องจากการชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน รวมทั้งการชั่งหา yield ในการวิเคราะห์แบบ destructive method ซึ่งถือว่าเป็น personal error ต้องใช้ความละเอียดของแต่ละคนในการชั่ง

6. ความผิดพลาดเนื่องจาก long-lived radioisotopes ที่ตกค้างอยู่ในห้องนับรังสี ฉะนั้นหลังจากการทดลองทุกครั้งส่วนที่เป็นกากกัมมันตรังสีจะต้องนำไปทิ้งในถังจัดกากกัมมันตรังสี เพื่อป้องกันข้อผิดพลาดดังกล่าว

บทย่อ สรุปผล และข้อเสนอแนะ

ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า

การศึกษาค้นคว้ามีความมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเซเลเนียม ทองแดง และอาร์เซนิกในเลือด โดยใช้วิธีนิวตรอนแอคติเวชัน แบบ destructive method

สารตัวอย่าง

สารตัวอย่างเลือดที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้จากผู้บริจาคโลหิตที่โรงพยาบาลรามธิบดี 28 ตัวอย่าง และจากผู้บริจาคโลหิตที่โรงพยาบาลศิริราช 12 ตัวอย่าง รวม 40 ตัวอย่าง

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้า

ในการวิเคราะห์ใช้เครื่องปรมาณูวิจัย 1 ของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน และใช้ Multichannel Gamma Spectrometer เป็นเครื่องวัดกัมมันตภาพรังสี

วิธีดำเนินการ

นำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานอาร์กอนนิวตรอน แยกธาตุในสารตัวอย่างให้บริสุทธิ์ ด้วยวิธีตกตะกอน วัดกัมมันตภาพรังสีของธาตุในสารตัวอย่างเทียบกับสารมาตรฐาน ตรวจแก้กัมมันตภาพรังสีของธาตุให้เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ activity โดยเทียบจากเปอร์เซ็นต์ yield แล้วคำนวณหาปริมาณธาตุในสารตัวอย่างจากสูตร

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

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลโดยหาค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณธาตุทั้ง 3 ชนิดในสารตัวอย่างเลือด รวมทั้งคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุที่วิเคราะห์

ผลการศึกษาค้นคว้า

1. จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าในสารตัวอย่างเลือด 1 กรัม มีปริมาณธาตุเซเลเนียมเฉลี่ย $0.19 \mu\text{g}$ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.08 มีปริมาณธาตุทองแดงเฉลี่ย $1.11 \mu\text{g}$ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.21 และมีปริมาณธาตุอาร์เซนิกเฉลี่ย $0.15 \mu\text{g}$ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.06

2. ปริมาณธาตุเซเลเนียม ทองแดง และอาร์เซนิกในเลือดไม่เป็นปกติ

ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองขึ้นเตรียมสารตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อความสะดวกตรวจสอบสารตัวอย่างจากโรงพยาบาลครั้งละหลาย ๆ สารตัวอย่างใส่ขวด polyethylene ซึ่งทราบน้ำหนัก ผนึกด้วยความร้อนแล้วเก็บไว้ในตู้เย็น

2. สารตัวอย่างเลือดที่ผสมตัวอย่างมาทดลอง ควรขอทราบรายละเอียดเกี่ยวกับประวัติ ทำเลที่อยู่อาศัย และประวัติการใช้ยาบางชนิด เพื่อเป็นประโยชน์ในการแปลผลการทดลอง

3. เมื่อนำธาตุ Se เข้าอานรังสีนิวตรอนจะเกิดเป็นธาตุกัมมันตภาพรังสีขึ้น 2 ไอโซโทป คือ Se^{81} มี half life 18 นาที และ Se^{75} ซึ่งมี half life 120 วัน เนื่องจาก Se^{81} มี half life สั้น หลังจากอานรังสีแล้วใช้เวลาแยกธาตุไพบูลิทธิประมาณ 1 ชั่วโมงจะสลายตัวเหลือ activity น้อย ส่วน Se^{75} มี half life มากถึง 120 วัน เมื่อใช้เวลาอานรังสี 30 นาที โอกาสที่จะเกิด Se^{75} ก็มีน้อยอีกเช่นกัน ทำให้ activity ของธาตุ Se ในการทดลองนี้ต่ำ ต้องใช้เวลาอานรังสี 20 นาที ใช้เวลาแยก back ground 20 นาที เมื่ออานรังสีเทียบกับสารมาตรฐานก็ต้องใช้เวลาอีก 40 นาที สรุปแล้วใช้เวลาอานรังสี 80 นาทีต่อหนึ่งสารตัวอย่าง ซึ่งเสียเวลามาก ฉะนั้นการทดลองหาปริมาณธาตุ Se ในสารตัวอย่างทางชีววิทยา ควรใช้สารตัวอย่างแยกอีกชุดหนึ่งอานรังสี 2 - 3 วันจึงจะได้ activity สูง ใช้เวลาอานรังสีเพียง 1 - 2 นาที ซึ่งเวลาที่ใช้ในการอานรังสีของธาตุเพื่อให้ได้ activity ตามต้องการนั้นสามารถคำนวณได้จากค่า Sensitivity ของธาตุตามสูตรต่อไปนี้ (12)

$$S = \frac{M}{f \sigma \phi E} \frac{d/s}{(1 - e^{-\lambda t}) 6.02 \times 10^{23}}$$

ในเมื่อ	S	=	ความไวหรือน้ำหนักของธาตุที่น้อยที่สุดที่จะทำให้เครื่องวัดทำงานได้
	M	=	น้ำหนักของอะตอมของธาตุที่ต้องการหา
	W	=	น้ำหนักของธาตุที่ต้องการหา (หน่วยน้ำหนัก)
	λ	=	ค่าคงที่ = $0.693/T_{1/2}$
	σ	=	neutron cross-section มีหน่วยเป็นบาร์น
	ϕ	=	ความเข้มของนิวตรอน (หน่วยนิวตรอน / cm^2 / sec)
	f	=	ปริมาณของไอโซโทปนั้นที่มีในธรรมชาติคิดเป็นเปอร์เซ็นต์
	$T_{1/2}$	=	ครึ่งชีวิตของเรดิโอไอโซโทปนั้น (หน่วย เวลา)
	t	=	เวลาที่ใช้ในการฉายรังสี
	6.02×10^{23}	=	Avogadro's number
	d/s	=	ความแรงรังสีที่พอจะนับได้ คืออัตราการสลายตัวของธาตุก่อกวนที่
	E	=	ประสิทธิภาพของเครื่องนับรังสี

4. การติดตาม Half life ของธาตุที่มี Half life ยาว ๆ เช่น Se^{75}
 ถ้าหากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง activity กับ Zero time ต้องใช้เวลามาก ควร
 ใช้การวัด activity ใน 2 ช่วงเวลาที่ต่างกันพอสมควร แล้วคำนวณหาจากสูตร

$$T_{1/2} = \frac{0.693 \times t_e}{2.303 \log \frac{A_{t1}}{A_{t2}}}$$

เมื่อ	$T_{1/2}$	=	Half life ของเรดิโอไอโซโทปนั้น
	0.693	=	ค่าคงที่
	t_e	=	เวลาระหว่างช่วงการวัดกับมันตามภาพรังสี
	A_{t1}	=	activity ของการวัดเมื่อ zero time = t_1
	A_{t2}	=	activity ของการวัดเมื่อ zero time = t_2

5. การหาปริมาณ Trace element ในสารตัวอย่างทางชีววิทยา ถ้าใช้วิธี

Nondestructive NAA ธาตุที่มีปริมาณมากเช่น Na, K, Ca, Cl จะรบกวน peak energy ของธาตุที่ศึกษา ควรใช้วิธี Destructive NAA เพราะอาศัยการแยกธาตุที่ศึกษาแต่ละธาตุออกมาด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งปราศจากการรบกวนจากธาตุอื่น ๆ

6. Trace element ในเลือดที่น่าสนใจอีกธาตุหนึ่งคือ Co ซึ่งเป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย แต่หาปริมาณมากเกินไปจะทำให้การทำงานของตับอ่อนเสื่อมลง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดโรคความผิดปกติในเลือดที่เรียกว่า polycythemia อีกด้วย ฉะนั้นควรศึกษาปริมาณ Co ในเลือดเปรียบเทียบกับผู้ป่วยที่เป็นโรค polycythemia ว่าแตกต่างกันหรือไม่ เพื่อใช้เป็นข้อวินิจฉัยการเกิดโรคดังกล่าว

7. เนื่องจากธาตุ Se เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะอยู่ในรูป SeO_3 , SeO_4 และ Se-methionine จากนั้นก็จะเปลี่ยนเป็น dimethylselenide หรือ $\text{Se}(\text{CH}_3)_2$ ซึ่งเป็นพิษในร่างกาย ร่างกายจะขจัดโดยการเปลี่ยน dimethylselenide เป็น trimethylselenium ion หรือ $[\text{Se}(\text{CH}_3)_3]^+$ แล้วสกัดออกมาทางปัสสาวะ เมื่ออัตราการเกิด dimethylselenide เพิ่มขึ้น อัตราการเปลี่ยนเป็น trimethylselenium ion ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย (53) นับเป็น Mechanism ที่สำคัญในการขจัดพิษของธาตุ Se ในร่างกาย ดังนั้นจึงควรจะศึกษาปริมาณธาตุ Se ในปัสสาวะของคนปกติเปรียบเทียบกับผู้ป่วยที่เป็นโรคพิษ Se ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ เพื่อใช้เป็นสมมุติฐานของการเกิดโรคพิษ Se ต่อไป

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- (1) ชุมพล พัฒนสุวรรณ การวิเคราะห์ธาตุแมงกานีสและสังกะสีในอาหารไทยโดยวิธีทางนิวเคลียร์ ปรินูญานิพนธ์ กศ.ม. วิทยาลัยวิชาการศึกษา ประสาเมิตร 2514, หน้า 6.
- (2) ก. หน้า 20.
- (3) ก. หน้า 35.
- (4) เขาวน รอดทองคำ "การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุแมงกานีส ทองแดง และสังกะสีในเลือดตัวอย่าง" THAI AEC - 61 : 30 - 36, (1972).
- (5) ล้วน สายยศ และ อังคณา ตันศิริตานนท์ สถิติวิทยาทางการศึกษา ไทยวัฒนาพานิช ประสนคร 2515, หน้า 275.
- (6) วิจิตร กงพล "ความสำคัญของทองแดงในร่างกาย" วิทยาศาสตร์ 11 : 733 - 737, 2514.
- (7) วัฒน ตันตนาตระกูล การเปรียบเทียบวิธีทางเคมีและวิธีทางนิวเคลียร์ในการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดในน้ำประปา เพื่อการสอนวิชาวิทยาศาสตร์ ปรินูญานิพนธ์ กศ.ม. วิทยาลัยวิชาการศึกษา ประสาเมิตร 2513, หน้า 1.
- (8) ศัลักษณ์ ทรรพนันท์ "ประโยชน์ของกัมมันตรังสีในคานการวิเคราะห์" วิทยาศาสตร์ 5 : 358 - 363, 2507.
- (9) ศัลักษณ์ ทรรพนันท์ "เคมีรังสีประยุกต์" วิทยาศาสตร์ 11 : 928 - 938, 2511.
- (10) สมเจตน์ แดงเพ็ญ, อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้นเกี่ยวกับการวัดรังสี เอกสารสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (โรเนียว) หน้า 4.
- (11) สุชาติ มงคลพันธ์ "ประโยชน์ของการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชันในทางการแพทย์" วิทยาศาสตร์ 11 : 913 - 917, 2511.

- (12) อองค์ นิลอุบล, ม.ล., การวิเคราะห์แบบแอทีเวชัน เอกสารสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (โรเนียว) 8 หน้า.
- (13) ออค กฤดากร "วิทยาศาสตร์ทันตกรรม" วิทยาศาสตร์ 10 : 33 - 42, 2516.
- (14) อุตสาหกรรม, กระทรวง กรมวิทยาศาสตร์ รายงานกิจกรรม 25 : 67 - 70, 2505.
- (15) Behne, D., "Aktivierungsanalytische Bestimmung Von Chrom and Zink" in biologischem Material," J. Radioanal. Chem. 3 : 17 - 24 (1969).
- (16) Bowen, H.J.M., "The Determination of Manganese in Biological Material by activation analysis with a note on the gamma spectrum of blood," J. Nuclear Energy 3 : 18 - 24 (1956)
- (17) Bowen, H.J.M., "The Determination of Chlorine, Bromine and Iodine in Biological Material by Activation Analysis," Biochem. J. 73 : 381 - 384 (1959).
- (18) Bowen, H.J.M., "The biochemistry of the trace element" Nuclear Activation Techniques in the life Sciences, Vienna, 1972, p. 401.
- (19) Bowen, H.J.M. and Cawse, P.A., The determination of inorganic elements in Biological Tissue by Activation analysis, United Kingdom Atomic Energy Authority, 1963, 40 pp.
- (20) Brune, D., "The szilard-chalmers effect applied in the neutron activation analysis of biological samples," Anal. Chem. Acta. 34 : 447 - 455 (1966).
- (21) Cantarow, A., Schepartz, B., Biochemistry, W.B. Saunders Company, London, 1967, pp. 625 - 643.
- (22) Ibid., 1967, p. 647.
- (23) Chamnirokasarn, D., Determination of Mn, Cu, Zn, Fe and Mo in Animal Blood Sample by Neutron Activation Analysis, Office of the Atomic Energy for Peace, Bangkok, 1969, 5 pp.
- (24) Comar, D. and Others., "The use of neutron capture gamma radiations for the analysis of biological samples," Modern Trends in Activation Analysis 1 : 114 - 127 (1969).
- (25) Cuninghame, J.G., Radiochemistry of Arsenic, United states Atomic Energy Commission, U.S.A., 1965, p. 9.

- (26) Dickson, R.C. and Tomlinson, R.H., "Instrumental Radioactivation Analysis of Selenium in Biological Materials," Intern. J. Appl. Radiation isotopes 18 : 153 - 159 (1967).
- (27) Fritze, K. and Robertson, R., "Instrumental and Radiochemical Neutron Activation Analysis Techniques for Protein bound Trace metals in Human Serum," J. Radioanal. Chem. 1 : 463 - 473 (1968).
- (28) Grimanis, A.P., "Simultaneous Determination of Arsenic and Copper in Wines and Biological material by Neutron Activation Analysis," Modern Trends in Activation Analysis 1 : 203 - 206 (1969).
- (29) Guinn, V.P., "The current status of neutron activation analysis applications," Modern trends in Activation Analysis 2 : 679 - 697 (1969).
- (30) Hadjisteliios, I. and Grimanis, A.P., "Simultaneous determination of Arsenic, Antimony and Mercury in biological materials by neutron activation analysis," Modern Trends in Activation Analysis 1 : 184 - 189 (1969).
- (31) Haller, W.A. and Filby, R.H., "The determination of elemental concentration," Nuclear Applications 6(4) : 365 - 370 (1969).
- (32) Haven, M.C., Haven, G.T. and Dunn, A.L., "Simultaneous determination of calcium, copper, manganese and Magnesium in serum by neutron activation analysis," Anal. Chem. 38(1) : 141 - 143 (1966).
- (33) Heydorn, K. "Environmental variation of Arsenic levels in Human Blood," Clin. Chem. Acta. 28(2) : 349 - 357 (1970).
- (34) International Atomic Energy Agency, Nuclear Activation Techniques in the Life Science, Vienna, 1967, pp. 445 - 454.
- (35) Ibid., 1967, pp. 511 - 515.
- (36) Jervis, R.E. and Wong, K.Y., "Chromatographic group separation scheme used with gamma spectrometry for multi-element activation analysis surveys," Nuclear Activation Techniques in the life Science, 8 : 137 - 152 (1967).
- (37) Kanabrocki, E.L. and Others, "Neutron Activation Studies of Biological Fluids : Manganese and Copper," Intern. J. Appl. Radiation isotopes 15 : 175 - 189 (1964).
- (38) 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).

- (39) Kellin, K.G., "Determination of sub-microgram quantities of copper in biological material by neutron activation analysis," Intern. J. Appl. Radiation isotopes 15(8) : 461 - 468 (1964)
- (40) Koch, H.J. and Others, "Analysis of trace elements in human tissues," Cancer 9 : 499 - 511 (1956)
- (41) Lapp, R.E. and Andrews, H.L., Nuclear Radiation Physics, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1954, pp. 353 - 354.
- (42) Lederer, C.M., Hollander, J.M. and Perlman, I., Table of Isotopes, John Wiley & sons, Inc. New York, 1967 pp. 210 - 216.
- (43) Lenihan, J.M.A. and Thomson, S.J., Activation Analysis, Academic press, London, 1965, pp. 6 - 7.
- (44) Ibid., 1965, p. 12.
- (45) Liebscher, K. and Smith, H., "A method of Determining Whether an Element is Essential or Nonessential in Human Tissue," Arch Environ Health 17 : 881 - 890 (1968).
- (46) Lyon, Jr., William, S., Guide to Activation Analysis, D. Vannostrand Co., Inc., New York, 1964, pp. 1 - 3.
- (47) Ibid., 1964, pp. 8 - 9.
- (48) Maggiore, Q., Giovannetti, S. and Malvano, R., "Neutron activation analysis of trace elements in plasma from normal subjects and from chronic uraemic," Neutron Activation Techniques in the life Sciences, 8 : 511 - 515, (1967).
- (49) Moeller, T., Inorganic Chemistry, John Wiley & sons, Inc., New York, 1969, pp. 70 - 74.
- (50) Nilubol, Anong, M.L. and others. "Manganese Toxication in the Human Body as Determination by Activation Analysis," J. Nucl. Med. 4 : 178 - 179 (1968).
- (51) Nilubol, Anong, M.L. and Others. "Manganese Toxication in the Human Body as Determination by Activation Analysis," THAI. AEC - 7, 1966, 9 pp.
- (52) Papavasiliou, P.S. and Cotzias, G.C., "Neutron Activation Analysis : The Determination of Manganese," J. Biological Chem. 236(8) : 2365 - 2369 (1961).

- (53) Parizek, J., "Toxicological studies involving trace elements" Nuclear Activation Techniques in the Life Sciences, Vienna, 1972, pp. 177 - 194.
- (54) Pijick, J., Gillis, J. and Hoste, J., "La Determination du Cu, Cr, Zn, et Co dans le Serum par Radioactivation," Intern. J. Appl. Radiation isotopes 10 : 149 - 157 (1961).
- (55) Samles, A.A. and Pate, B.D., "The Determination of Arsenic in Biological Material," The Analyst 77 : 196 - 202 (1952).
- (56) Samra, A.A. and Leddicotte, G.W., "A useful neutron activation analysis method for the determination of Tellurium in human tissue," Modern Trends in Activation Analysis 1 : 134 - 137 (1969)
- (57) Spencer, R.P., Mitchell, T.G. and King, E.R., "Medical Applications of Neutron Activation Analysis," Intern. J. Appl. Radiation isotopes 3(2) : 104 - 112 (1958).
- (58) Stephen, C.B., "Determination of Trace Quantities of Uranium in Biological Material by the Nuclear Track Technique," Modern Trend in Activation Analysis 2 : 942 - 945 (1969).
- (59) Thomson, C.C., Tercho, G.P. and Sandel, J.A., "Neutron Activation Analysis of Blood and Blood serum for Copper and Zinc," Nucl. Appl. 3(1) : 53 - 57 (1967).
- (60) Thomson, J. and Kristensen, L.V., "Determination of Arsenic in Biological Material by Radioactivation Analysis," Acta Medica Scandinavica Supplement 496 : 23 - 26 (1969).
- (61) Tomlinson, R.H. and Dickson, R.C., "Determination of selenium in human tissues by means of activation analysis," Modern Trends in Activation Analysis 2 : 19 - 22 (1965).
- (62) Waster, P.O., Burne, D. and Samsahl, K., "Radiochemical Recovery Studies of a Separation Scheme for 23 Element in Biological Material," Intern. J. Appl. Radiation isotopes 15(2) : 59 - 67 (1964).
- (63) Yult, H.P., "Computation of experimental results in activation analysis," Modern Trends in Activation Analysis 2 : 1155 - 1176 (1969).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

Standard curve และ

ข้อมูลกราฟรูป 4 รูป 6 และรูป 8

Standard curve

28/5/73

Std Co⁶⁰

Gain 8.80 1 min. Count. H.V. 1100 V.

010000	000000	000000	000036	000431	000475	000440	000416
000442	000559	000857	000643	000530	000467	000449	000426
000377	000441	000431	000449	000520	000578	000612	000735
000680	000608	000484	000459	000410	000401	000391	000373
000371	000393	000347	000340	000324	000274	000320	000302
000317	000272	000294	000267	000259	000270	000272	000283
000267	000275	000259	000291	000286	000323	000302	000275
000301	000285	000307	000302	000279	000298	000290	000269
000304	000260	000317	000279	000298	000291	000293	000325
000336	000294	000316	000357	000312	000349	000359	000377
000355	000362	000353	000332	000305	000282	000277	000235
000248	000243	000232	000213	000208	000221	000249	000222
000236	000276	000311	000379	000528	000634	000742	000868
000951	000908	000827	000661	000469	000329	000258	000237
000277	000342	000473	000590	000703	000749	000776	000706
000563	000384	000302	000175	000112	000075	000034	000021

Std. Na²²

010000	000000	000000	000016	000270	000307	000315	000271
000278	000440	000601	000440	000347	000319	000287	000317
000280	000333	000410	000465	000445	000365	000342	000357
000358	000357	000328	000349	000278	000288	000273	000249
000223	000170	000149	000113	000134	000109	000085	000092
000102	000111	000119	000178	000266	000550	000918	001314
001428	001361	000921	000479	000206	000081	000075	000061
000074	000058	000066	000051	000070	000056	000057	000058
000057	000060	000062	000052	000067	000056	000054	000061
000047	000060	000047	000047	000060	000069	000062	000060
000055	000044	000057	000055	000057	000060	000056	000063
000053	000053	000049	000057	000034	000041	000030	000032
000030	000036	000029	000031	000012	000028	000030	000026
000036	000050	000044	000074	000093	000150	000173	000191
000232	000195	000193	000158	000090	000077	000044	000028
000016	000018	000012	000012	000011	000015	000014	000010

Std. Cs¹³⁷

010000	000002	000002	000030	000577	001198	005187	001943
000985	001085	001445	001171	000870	000765	000809	000803
000832	000856	000981	001095	001437	001581	001294	001091
000911	000885	000902	000879	000867	000887	000835	000812
000725	000724	000711	000679	000709	000710	000704	000687
000783	000729	000727	000656	000578	000433	000325	000263
000199	000159	000144	000125	000132	000125	000158	000242
000432	000856	001539	002603	003822	004949	005081	004367
003042	001757	000810	000310	000105	000042	000027	000021
000021	000025	000024	000022	000022	000017	000015	000017

5/6/73

Std. Co⁶⁰

Gain 8.80 1 min. Count. H.V. 1000 V.

010000	000000	000000	000006	000367	000650	000901	001294
000835	000791	000733	000773	000846	000940	001160	001224
001138	000926	000760	000594	000510	000498	000441	000439
000417	000384	000419	000439	000417	000414	000396	000405
000382	000411	000395	000399	000399	000373	000457	000436
000443	000440	000460	000447	000491	000469	000497	000423
000429	000364	000351	000292	000318	000305	000338	000384
000531	000880	001195	001226	000986	000601	000335	000336
000519	000805	000985	000913	000607	000335	000119	000044
000038	000023	000028	000018	000010	000003	000008	000007

Na²²

010000	000000	000000	000009	000236	000435	000664	000901
000623	000562	000553	000632	000832	000781	000676	000547
000500	000449	000361	000357	000252	000186	000156	000143
00161	000239	000680	001557	001938	001000	000247	000125
000111	000084	000099	000118	000084	000100	000090	000096
000065	000088	000081	000079	000084	000083	000087	000089
000090	000080	000095	000083	000073	000049	000047	000047
000037	000040	000046	000059	000085	000134	000233	000266
000234	000169	000098	000064	000016	000016	000021	000022
000024	000025	000021	000019	000014	000008	000012	000008

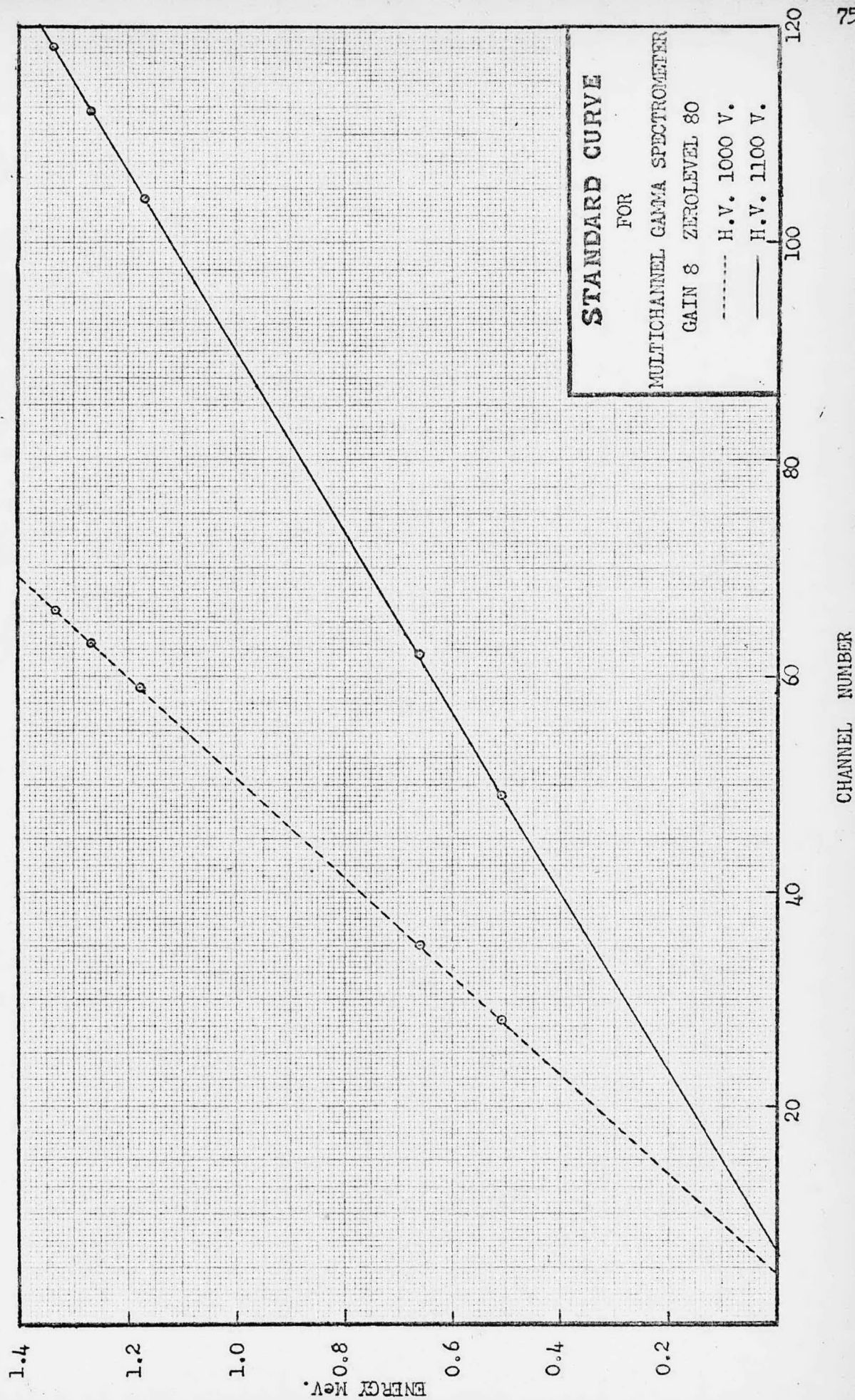
Cs¹³⁷

010000	000002	000004	000022	001533	004425	001532	002197
001425	001405	001410	001618	002263	002535	002421	001759
001409	001333	001146	001011	000980	001009	000978	000962
001032	000798	000569	000366	000261	000172	000170	000307
000791	002396	005333	006896	004834	001720	000275	000055
000039	000031	000036	000028	000026	000038	000035	000039
000035	000031	000037	000031	000022	000033	000037	000026
000028	000030	000030	000020	000027	000018	000022	000012
000017	000022	000017	000022	000013	000014	000022	000013

ตาราง 12 แสดงค่าพลังงานของรังสีแกมมาที่ส่งออกมาจาก Standard Co⁶⁰, Na²² และ Cs¹³⁷

ธาตุ	พลังงานรังสีแกมมา ที่ส่งออกมา (MeV.)	Channel number เมื่อใช้ H.V.=1000V.	Channel number เมื่อใช้ H.V.=1100V.
Co ⁶⁰	1.17 และ 1.332	59 และ 66	104 และ 118
Na ²²	0.51 และ 1.27	28 และ 63	48 และ 112
Cs ¹³⁷	0.66	35	62

รูป 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ตกมาต่อท่อ และ Channel number



✓
ข้อมูลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรังสีแกมมาที่ธาตุส่งออกมา กับ Channel number

✓
ข้อมูลกราฟรูป 4

3/4/73

Cu⁶⁴

Gain 8.80 1 min. Count. H.V. 1100 V. Zero time 4 hr. 5 min.

000000	000014	000413	000885	006759	015122	018214	025642
023793	018277	018247	018814	022573	024926	021511	019517
020157	021216	021588	021669	020197	015645	011656	009120
008096	007514	007387	009348	019060	049557	097850	010681
064249	019034	003439	001143	000953	000882	000839	000805
000832	000753	000661	000577	000521	000486	000478	000461
000413	000385	000401	000339	000332	000347	000346	000371
000372	000383	000366	000366	000257	000182	000114	000068
000066	000049	000047	000056	000050	000092	000100	000193
000287	000449	000513	000479	000360	000215	000099	000040
000019	000012	000011	000005	000002	000000	000010	000007

✓
ข้อมูลกราฟรูป 6

3/4/73

As⁷⁶

Gain 8.80 1 min. Count. H.V. 1100 V. Zero time 4 hr. 20 min.

010000	000000	000002	000003	000259	001296	002045	002568
002754	001926	001637	001490	001573	001659	001611	001349
001299	001199	001240	001243	001233	001180	001158	001073
000808	000653	000584	000499	000466	000459	000612	001221
002769	004428	004128	002245	000769	000471	000681	000614
000422	000208	000126	000114	000107	000113	000109	000101
000106	000122	000113	000109	000087	000101	000095	000083
000057	000054	000053	000052	000056	000052	000064	000067
000087	000127	000208	000221	000209	000156	000117	000055
000040	000034	000023	000029	000051	000043	000040	000047
000031	000042	000032	000029	000018	000014	000015	000018
000016	000014	000012	000012	000010	000012	000011	000021
000017	000008	000011	000011	000017	000011	000008	000005
000009	000007	000005	000008	000005	000012	000013	000010
000016	000019	000013	000016	000017	000003	000004	000005

ν
ข้อมูลกราฟ 8

3/4/73

Se⁸¹

Gain 8.80 1 min. Count. H.V. 1100 V. Zero time 4 hr. 24 min.

099999	000005	000049	000488	008615	021729	029294	042569
048265	046387	016999	013028	010586	009667	008506	007842
007401	011328	018500	014377	005638	003096	003081	002673
002000	001529	001339	001292	001200	001287	001621	001892
002300	002528	002111	001294	000765	000574	000532	000432
000359	000336	000357	000323	000406	000546	000833	001168
001072	000753	000387	000262	000156	000128	000110	000120
000119	000100	000125	000111	000118	000113	000111	000087
000084	000083	000053	000083	000081	000085	000110	000114
000130	000166	000151	000165	000168	000128	000089	000052
000043	000052	000056	000042	000047	000028	000056	000049
000055	000067	000062	000085	000055	000040	000041	000044
000031	000035	000032	000032	000048	000040	000052	000036
000042	000040	000021	000033	000025	000025	000024	000033
000033	000029	000025	000031	000046	000049	000041	000040

9/4/73

Se⁷⁵

Gain 8.80 1 min. Count. H.V. 1100 V. Zero time 6 day.

010000	000000	000008	000059	000882	001572	001637	002275
005207	011811	024190	005866	001357	001575	001667	002688
010929	017744	003664	001948	000889	000985	001981	005561
009201	005913	001159	000129	000071	000079	000086	000073
000074	000062	000057	000057	000055	000067	000048	000038
000035	000031	000031	000030	000028	000025	000025	000043
000039	000029	000029	000021	000025	000020	000024	000023
000027	000021	000026	000033	000028	000021	000022	000019

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลการทดลองหาปริมาณธาตุ Cu, As และ Se ในสารตัวอย่าง

ตาราง 13 แสดงข้อมูลการทดลองหาปริมาณธาตุ Cu, As และ Se ในสารตัวอย่าง

เบอร์ สารตัว อย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระป๋อง + ppt. (gm)	น้ำหนัก กระป๋อง (gm)	น้ำหนัก ppt. (gm)	100 % acti- vities	ปริมาณ ธาตุ ในส่วน ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สารตัว อย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุ ในส่วน ตัวอย่าง (μ g/g)
1	Cu	694	0.0648	0.0464	0.0184	720.372	1.7101	1.2377	1.3816
	Cu(std)	408	0.0645	0.0460	0.0185	421.2192	1.0000	-	-
	Se	96	0.0663	0.0476	0.0187	102.6720	0.1899	1.2377	0.1534
	Se(std)	246	0.0660	0.0472	0.0182	270.3294	0.5000	-	-
	As	14	0.0770	0.0464	0.0306	15.0514	0.1727	1.2377	0.1395
	As(std)	32	0.0692	0.0448	0.0244	43.5770	0.5000	-	-
2	Cu	2260	0.0636	0.0460	0.0176	2452.100	1.7143	1.1925	1.4375
	Cu(std)	1386	0.0650	0.0465	0.0185	1430.352	1.0000	-	-
	Se	55	0.0650	0.0452	0.0178	61.7925	0.2004	1.1925	0.1680
	Se(std)	299	0.0657	0.0463	0.0194	308.2391	1.0000	-	-
	As	366	0.0709	0.0458	0.0251	479.7162	0.1909	1.1925	0.1600
	As(std)	928	0.0698	0.0455	0.0243	1256.4192	0.5000	-	-
3	Cu	1895	0.0648	0.0470	0.0178	2033.35	1.4210	1.1691	1.2153
	Cu(std)	1386	0.0650	0.0465	0.0185	1430.91	1.0000	-	-
	Se	382	0.0643	0.0471	0.0172	444.1514	0.2045	1.1691	0.1749
	Se(std)	1053	0.0657	0.0463	0.0194	1085.5377	0.5000	-	-
	As	314	0.0709	0.0468	0.0241	428.6414	0.1706	1.1691	0.1459
	As(std)	928	0.0698	0.0455	0.0243	1256.4192	0.5000	-	-

ตาราง 13 (ต่อ)

เบอร์ สารตัว อย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระดาษ กรอง + ppt. (gm)	น้ำหนัก กระดาษ กรอง (gm)	น้ำหนัก ppt. (gm)	100 % acti- vities	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μg)	น้ำหนัก สารตัว อย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง ($\mu\text{g/g}$)
4	Cu	3764	0.0650	0.0462	0.0188	3823.8476	1.5187	1.2636	1.2018
	Cu(std)	2452	0.0652	0.0466	0.0186	2517.7136	1.0000	-	-
	Se	238	0.0652	0.0467	0.0185	257.278	0.1804	1.2636	0.1427
	Se(std)	688	0.0656	0.0463	0.0193	712.9056	0.5000	-	-
	As	65	0.0741	0.0448	0.0293	72.9820	0.2513	1.2636	0.1988
	As(std)	98	0.0688	0.0466	0.0222	145.2262	0.5000	-	-
5	Cu	3692	0.0653	0.0470	0.0183	3853.3404	1.5304	1.1589	1.3215
	Cu(std)	2452	0.0652	0.0466	0.0186	2517.7136	1.0000	-	-
	Se	233	0.0653	0.0480	0.0173	269.3480	0.1630	1.1589	0.1406
	Se(std)	832	0.0656	0.0463	0.0193	862.1184	0.5000	-	-
	As	643	0.0781	0.0479	0.0302	700.4842	0.2606	1.1589	0.2248
	As(std)	907	0.0688	0.0466	0.0222	1344.0833	0.5000	-	-
6	Cu	2751	0.0616	0.0451	0.0165	3184.2825	1.7867	1.1398	1.5675
	Cu(std)	1605	0.0622	0.0450	0.0172	1782.1920	1.0000	-	-
	Se	210	0.0651	0.0476	0.0175	239.9880	0.1585	1.1398	0.1390
	Se(std)	740	0.0661	0.0466	0.0195	758.9440	0.5000	-	-
	As	41	0.0789	0.0478	0.0311	43.3698	0.2474	1.1398	0.2170
	As(std)	65	0.0672	0.0428	0.0244	87.6395	0.5000	-	-

ตาราง 13 (ต่อ)

เบอร์ สารตัว อย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระภา กรอง+ ppt. (gm)	น้ำหนัก กระภา กรอง (gm)	น้ำหนัก ppt. (gm)	100 % acti- vities	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สารตัว อย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g/g).
7	Cu	1674	0.0590	0.0450	0.0140	2283.6708	1.2812	1.0835	1.1824
	Cu(std)	1605	0.0622	0.0450	0.0172	1782.3702	1.0000	-	-
	Se	53	0.0650	0.0475	0.0175	60.5684	0.1085	1.0835	0.1001
	Se(std)	272	0.0661	0.0466	0.0195	278.9632	0.5000	-	-
	As	64	0.0674	0.0463	0.0211	99.7888	0.1480	1.0835	0.1365
	As(std)	250	0.0672	0.0428	0.0244	337.0750	0.5000	-	-
8	Cu	2417	0.0628	0.0462	0.0166	2781.0002	1.3664	1.1181	1.2220
	Cu(std)	1950	0.0645	0.0462	0.0183	2035.2150	1.0000	-	-
	Se	73	0.0628	0.0452	0.0176	82.9499	0.1419	1.1181	0.1269
	Se(std)	286	0.0660	0.0465	0.0195	293.3216	0.5000	-	-
	As	1218	0.0770	0.0470	0.0300	1335.6588	0.1670	1.1181	0.1493
	As(std)	5274	0.0757	0.0453	0.0304	5707.5228	0.5000	-	-
9	Cu	2217	0.0640	0.0451	0.0189	2240.2185	1.1007	1.1399	0.9656
	Cu(std)	1950	0.0645	0.0462	0.0183	2035.2150	1.0000	-	-
	Se	43	0.0641	0.0460	0.0181	47.5107	0.0809	1.1399	0.0710
	Se(std)	286	0.0660	0.0465	0.0195	293.3216	0.5000	-	-
	As	2090	0.0788	0.0477	0.0311	2210.8020	0.1937	1.1399	0.1699
	As(std)	5274	0.0757	0.0453	0.0304	5707.5228	0.5000	-	-

ตาราง 13 (ต่อ)

เบอร์ สารตัว อย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระดูก กรอง + ppt. (gm)	น้ำหนัก กระดูก กรอง (gm)	น้ำหนัก ppt. (gm)	100 % acti- vities	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สารตัว อย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g/g)
10	Cu	3025	0.0618	0.0455	0.0163	3544.3925	1.3584	1.0769	1.2613
	Cu(std)	2336	0.0640	0.0469	0.0171	2609.0784	1.0000	-	-
	Se	86	0.0632	0.0461	0.0171	100.5770	0.2915	1.0769	0.2706
	Se(std)	163	0.0646	0.0457	0.0189	172.4866	0.5000	-	-
	As	1721	0.0710	0.0449	0.0261	2169.3205	0.1944	1.0769	0.1805
	As(std)	5105	0.0769	0.0468	0.0301	5579.7650	0.5000	-	-
11	Cu	2361	0.0625	0.0455	0.0170	2652.5835	1.0166	1.1405	0.8913
	Cu(std)	2336	0.0640	0.0469	0.0171	2609.0784	1.0000	-	-
	Se	248	0.0651	0.0459	0.0192	258.3168	0.2643	1.1405	0.2317
	Se(std)	407	0.0624	0.0457	0.0167	488.6810	0.5000	-	-
	As	1832	0.0771	0.0462	0.0309	1950.5304	0.1748	1.1405	0.1532
	As(std)	5105	0.0769	0.0468	0.0301	5579.7650	0.5000	-	-
12	Cu	2328	0.0629	0.0456	0.0173	2570.3448	1.2632	1.2123	1.0419
	Cu(std)	1907	0.0645	0.0466	0.0179	2034.7690	1.0000	-	-
	Se	15	0.0633	0.0459	0.0174	17.2410	0.1550	1.2123	0.1278
	Se(std)	52	0.0632	0.0445	0.0187	55.6140	0.5000	-	-
	As	920	0.0793	0.0477	0.0313	967.0120	0.2227	1.2123	0.1837
	As(std)	1980	0.0751	0.0451	0.0300	2171.2680	0.5000	-	-

ตาราง 13 (ต่อ)

เบอร์ สารตัว อย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระดาษ กรอง + ppt. (gm)	น้ำหนัก กระดาษ กรอง (gm)	น้ำหนัก ppt. (gm)	100 % acti- vities	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สารตัว อย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g/g)
13	Cu	1630	0.0649	0.0461	0.0188	1655.9170	1.5541	1.5093	1.1871
	Cu(std)	887	0.0628	0.0469	0.0159	1065.4644	1.0000	-	-
	Se	346	0.0638	0.0461	0.0177	390.9455	0.1831	1.3093	0.1393
	Se(std)	1030	0.0659	0.0466	0.0193	1067.2860	0.5000	-	-
	As	26	0.0763	0.0478	0.0285	30.0118	0.2417	1.3093	0.1846
	As(std)	57	0.0766	0.0464	0.0302	62.0958	0.5000	-	-
14	Cu	1001	0.0649	0.0466	0.0183	1044.7437	1.4252	1.2879	1.1066
	Cu(std)	687	0.0633	0.0454	0.0179	733.0290	1.0000	-	-
	Se	195	0.0655	0.0463	0.0192	203.1120	0.1153	1.2879	0.0895
	Se(std)	867	0.0650	0.0453	0.0197	880.1784	0.5000	-	-
	As	34	0.0727	0.0449	0.0278	40.2356	0.1742	1.2879	0.1352
	As(std)	106	0.0760	0.0458	0.0302	115.4764	0.5000	-	-
15	Cu	1275	0.0606	0.0450	0.0156	1560.9825	0.9303	0.8661	1.0741
	Cu(std)	1669	0.0650	0.0460	0.0190	1677.8457	1.0000	-	-
	Se	108	0.0626	0.0464	0.0162	133.3260	0.1254	0.8661	0.1447
	Se(std)	513	0.0650	0.0457	0.0193	531.5706	0.5000	-	-
	As	105	0.0748	0.0461	0.0287	120.3615	0.0898	0.8661	0.1036
	As(std)	595	0.0761	0.0469	0.0292	670.3865	0.5000	-	-

ตาราง 13 (ต่อ)

เบอร์ สารตัว อย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระดาษ กรอง+ ppt. (gm)	น้ำหนัก กระดาษ กรอง (gm)	น้ำหนัก ppt. (gm)	100 % acti- vities	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สารตัว อย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g/g)
16	Cu	5448	0.0626	0.0453	0.0173	6015.1368	1.1672	1.0266	1.1369
	Cu(std)	2941	0.0537	0.0428	0.0109	5153.2202	1.0000	-	-
	Se	46	0.0614	0.0446	0.0168	54.7584	0.1775	1.0266	0.1729
	Se(std)	145	0.0630	0.0442	0.0188	154.2510	0.5000	-	-
	As	805	0.0742	0.0449	0.0293	903.8540	0.1398	1.0266	0.1361
	As(std)	2987	0.0739	0.0435	0.0304	3232.5314	0.5000	-	-
17	Cu	1740	0.0595	0.0456	0.0139	2390.9340	1.5025	1.1156	1.3468
	Cu(std)	1258	0.0599	0.0448	0.0151	1591.2442	1.0000	-	-
	Se	218	0.0620	0.0437	0.0183	238.2304	0.1683	1.1156	0.1508
	Se(std)	690	0.0659	0.0464	0.0195	707.6640	0.5000	-	-
	As	799	0.0736	0.0435	0.0301	874.1060	0.3252	1.1156	0.2914
	As(std)	1156	0.0723	0.0440	0.0283	1343.8500	0.5000	-	-
18	Cu	2975	0.0592	0.0457	0.0135	4209.0300	1.1395	1.1351	1.0037
	Cu(std)	2688	0.0605	0.0466	0.0139	3693.5808	1.0000	-	-
	Se	171	0.0612	0.0455	0.0157	217.8198	0.1615	1.1351	0.1422
	Se(std)	563	0.0623	0.0456	0.0167	674.2488	0.5000	-	-
	As	91	0.0761	0.0453	0.0308	97.1971	0.2243	1.1351	0.1975
	As(std)	203	0.0757	0.0453	0.0304	216.6866	0.5000	-	-

ตาราง 13 (ต่อ)

เบอร์ สารตัว อย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระดาษ กรอง + ppt. (gm)	น้ำหนัก กระดาษ กรอง (gm)	น้ำหนัก ppt. (gm)	100 % acti- vities	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สารตัว อย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g/g)
19	Cu	1965	0.0595	0.0142	0.0147	2553.1245	0.8336	0.9590	0.8692
	Cu(std)	2261	0.0585	0.0444	0.0141	3062.7506	1.0000	—	—
	Se	211	0.0593	0.0443	0.0150	281.3263	0.1486	0.9590	0.1549
	Se(std)	890	0.0627	0.0439	0.0188	946.7820	0.5000	—	—
	As	137	0.0743	0.0449	0.0294	153.3030	0.2907	0.9590	0.3031
	As(std)	234	0.0735	0.0443	0.0292	263.6478	0.5000	—	—
20	Cu	2071	0.0571	0.0442	0.0129	3066.3226	1.0011	1.1317	0.8845
	Cu(std)	2261	0.0585	0.0444	0.0141	3062.7506	1.0000	—	—
	Se	470	0.0634	0.0449	0.0185	508.0700	0.2683	1.1317	0.2370
	Se(std)	890	0.0627	0.0439	0.0188	946.7820	0.5000	—	—
	As	494	0.0722	0.0449	0.0273	595.3194	0.1928	1.1317	0.1703
	As(std)	1370	0.0735	0.0443	0.0292	1543.5790	0.5000	—	—
21	Cu	2900	0.0585	0.0450	0.0135	4102.9200	1.1852	1.1866	0.9988
	Cu(std)	2936	0.0617	0.0455	0.0162	3461.5440	1.0000	—	—
	Se	30	0.0643	0.0455	0.0188	31.9140	0.2553	1.1866	0.2151
	Se(std)	60	0.0622	0.0430	0.0192	62.4960	0.5000	—	—
	As	1001	0.0754	0.0459	0.0295	1116.3152	0.1663	1.1866	0.1401
	As(std)	3112	0.0750	0.0445	0.0305	3356.6032	0.5000	—	—

ตาราง 13 (ต่อ)

เบอร์ สารตัว อย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระดาษ กรอง + ppt. (gm)	น้ำหนัก กระดาษ กรอง (gm)	น้ำหนัก ppt. (gm)	100 % acti- vities	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สารตัว อย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g/g)
22	Cu	2925	0.0586	0.0458	0.0128	4364.3925	1.2608	1.3363	0.9431
	Cu(std)	2936	0.0617	0.0455	0.0162	3461.5440	1.0000	—	—
	Se	80	0.0609	0.0437	0.0172	93.0160	0.3690	1.3363	0.2761
	Se(std)	121	0.0622	0.0430	0.0192	126.0336	0.5000	—	—
	As	1090	0.0748	0.0445	0.0303	1183.5220	0.1763	1.3363	0.1319
	As(std)	3112	0.0750	0.0445	0.0305	3356.6032	0.5000	—	—
23	Cu	4424	0.0596	0.0444	0.0152	5558.7560	1.2765	1.1896	1.0730
	Cu(std)	2941	0.0557	0.0428	0.0129	4354.4446	1.0000	—	—
	Se	119	0.0605	0.0431	0.0174	136.7786	0.4432	1.1896	0.3725
	Se(std)	145	0.0630	0.0442	0.0188	154.2510	0.5000	—	—
	As	1193	0.0730	0.0437	0.0293	1339.5034	0.2072	1.1896	0.1741
	As(std)	2987	0.0739	0.0435	0.0304	3232.5314	0.5000	—	—
24	Cu	980	0.0559	0.0449	0.0110	1701.5740	0.6717	0.9312	0.7213
	Cu(std)	2268	0.0615	0.0444	0.0171	2533.1292	1.0000	—	—
	Se	686	0.0603	0.0433	0.0170	797.6122	0.4212	0.9312	0.4523
	Se(std)	890	0.0627	0.0439	0.0188	946.7820	0.5000	—	—
	As	74	0.0704	0.0440	0.0264	92.2188	0.1748	0.9312	0.1877
	As(std)	234	0.0735	0.0443	0.0292	263.6478	0.5000	—	—

ตาราง 13 (ต่อ)

เบอร์ สารตัว อย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระดูก กรอง+ ppt. (gm)	น้ำหนัก กระดูก กรอง (gm)	น้ำหนัก ppt. (gm)	100 % acti- vities	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สารตัว อย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g/g)
25	Cu	2101	0.0604	0.0451	0.0153	2622.6783	1.4190	1.2601	1.1261
	Cu(std)	1258	0.0599	0.0469	0.0130	1848.2536	1.0000	—	—
	Se	118	0.0644	0.0461	0.0183	128.9504	0.2526	1.2601	0.2004
	Se(std)	245	0.0649	0.0457	0.0192	255.1920	0.5000	—	—
	As	104	0.0755	0.0449	0.0306	111.8104	0.1564	1.2601	0.1241
	As(std)	277	0.0723	0.0468	0.0255	357.3577	0.5000	—	—
26	Cu	5267	0.0612	0.0455	0.0157	6358.6455	1.2339	0.9606	1.2845
	Cu(std)	2941	0.0537	0.0428	0.0109	5153.2202	1.0000	—	—
	Se	35	0.0600	0.0459	0.0141	49.6440	0.1485	0.9606	0.1545
	Se(std)	145	0.0630	0.0457	0.0173	167.6200	0.5000	—	—
	As	1238	0.0717	0.0462	0.0255	1597.1438	0.2202	0.9606	0.2292
	As(std)	2987	0.0739	0.0468	0.0271	3626.2180	0.5000	—	—
27	Cu	4812	0.0625	0.0455	0.0180	5106.0132	1.2650	1.0565	1.1973
	Cu(std)	2874	0.0595	0.0459	0.0136	4036.2456	1.0000	—	—
	Se	139	0.0627	0.0460	0.0167	166.4664	0.1792	1.0565	0.1696
	Se(std)	404	0.0628	0.0454	0.0174	464.3576	0.5000	—	—
	As	1314	0.0741	0.0479	0.0271	1595.1960	0.1555	1.0565	0.1471
	As(std)	4849	0.0774	0.0463	0.0311	5129.2722	0.5000	—	—

ตาราง 13 (ต่อ)

เบอร์ สารตัว อย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระดาษ กรอง + ppt. (gm)	น้ำหนัก กระดาษ กรอง (gm)	น้ำหนัก ppt. (gm)	100 % acti- vities	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สารตัว อย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g/g)
28	Cu	5060	0.0624	0.0471	0.0153	6316.3980	1.5649	1.2450	1.2569
	Cu(std)	2874	0.0595	0.0459	0.0136	4036.2456	1.0000	—	—
	Se	73	0.0619	0.0460	0.0159	91.8194	0.1948	1.2450	0.1564
	Se(std)	205	0.0628	0.0454	0.0174	235.6270	0.5000	—	—
	As	1723	0.0749	0.0450	0.0291	1947.8515	0.1299	1.2450	0.1525
	As(std)	4849	0.0774	0.0463	0.0311	5129.2732	0.5000	—	—
29	Cu	5960	0.0641	0.0469	0.0172	6617.9840	1.6396	1.1013	1.4887
	Cu(std)	2874	0.0595	0.0459	0.0136	4036.2456	1.0000	—	—
	Se	408	0.0661	0.0468	0.0193	422.7696	0.4552	1.1013	0.4133
	Se(std)	404	0.0628	0.0454	0.0174	464.3576	0.5000	—	—
	As	1430	0.0737	0.0457	0.0280	1680.2500	0.1638	1.1013	0.1487
	As(std)	4849	0.0774	0.0463	0.0311	5129.2732	0.5000	—	—
30	Cu	4288	0.0558	0.0435	0.0123	6658.4064	1.3389	1.2168	1.1003
	Cu(std)	2874	0.0537	0.0427	0.0110	4972.7632	1.0000	—	—
	Se	71	0.0626	0.0461	0.0165	86.2591	0.1623	1.2168	0.1337
	Se(std)	230	0.0645	0.0461	0.0174	264.4620	0.5000	—	—
	As	43	0.0730	0.0453	0.0277	51.0711	0.1839	1.2168	0.1552
	As(std)	120	0.0770	0.0478	0.0223	135.2040	0.5000	—	—

ตาราง 13 (ต่อ)

เบอร์ สารตัว อย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระดูก กรอง + ppt. (gm)	น้ำหนัก กระดูก กรอง (gm)	น้ำหนัก ppt. (gm)	100 % acti- vities	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μg)	น้ำหนัก สารตัว อย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง ($\mu\text{g/g}$)
31	Cu	2384	0.0620	0.0458	0.0162	2810.7360	1.1367	1.0849	1.0477
	Cu(std)	2395	0.0642	0.0457	0.0185	2472.5980	1.0000	—	—
	Se	63	0.0636	0.0475	0.0161	78.2586	0.1819	1.0849	0.1676
	Se(std)	199	0.0649	0.0464	0.0185	215.1190	0.5000	—	—
	As	703	0.0701	0.0460	0.0241	959.6653	0.1602	1.0849	0.1476
	As(std)	2231	0.0718	0.0473	0.0245	2995.7868	0.5000	—	—
32	Cu	2361	0.0611	0.0450	0.0161	2800.8543	1.1327	0.9863	1.1484
	Cu(std)	2395	0.0642	0.0457	0.0185	2472.5980	1.0000	—	—
	Se	68	0.0619	0.0467	0.0152	89.4676	0.2079	0.9863	0.2107
	Se(std)	199	0.0649	0.0464	0.0185	215.1190	0.5000	—	—
	As	347	0.0700	0.0468	0.0232	492.0807	0.0821	0.9863	0.0832
	As(std)	2231	0.0718	0.0473	0.0245	2995.7868	0.5000	—	—
33	Cu	3071	0.0612	0.0450	0.0162	3620.7090	1.4643	1.1724	1.2489
	Cu(std)	2395	0.0642	0.0457	0.0185	2472.5980	1.0000	—	—
	Se	66	0.0620	0.0468	0.0152	86.8362	0.2018	1.1724	0.1721
	Se(std)	199	0.0649	0.0464	0.0185	215.1190	0.5000	—	—
	As	717	0.0763	0.0469	0.0294	802.3230	0.1339	1.1724	0.1142
	As(std)	2231	0.0718	0.0473	0.0245	2995.7868	0.5000	—	—

ตาราง 13 (ต่อ)

เบอร์ สารตัว อย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระดาษ กรอง + ppt. (gm)	น้ำหนัก กระดาษ กรอง (gm)	น้ำหนัก ppt. (gm)	100 % acti- vities	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สารตัว อย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g/g)
34	Cu	4674	0.0660	0.0477	0.0183	4878.2538	1.0470	1.2218	0.8569
	Cu(std)	4586	0.0639	0.0451	0.0188	4658.9174	1.0000	—	—
	Se	100	0.0621	0.0472	0.0149	134.2200	0.1767	1.2218	0.1446
	Se(std)	357	0.0659	0.0471	0.0188	379.7766	0.5000	—	—
	As	1630	0.0750	0.0465	0.0285	1881.5090	0.1595	1.2218	0.1305
	As(std)	4517	0.0731	0.0461	0.0252	5896.9435	0.5000	—	—
35	Cu	6380	0.0620	0.0470	0.0150	8123.6540	1.7436	1.2492	1.3957
	Cu(std)	4586	0.0639	0.0451	0.0188	4658.9174	1.0000	—	—
	Se	95	0.0611	0.0467	0.0144	131.9360	0.1737	1.2492	0.1390
	Se(std)	357	0.0659	0.0471	0.0188	379.7766	0.5000	—	—
	As	658	0.0690	0.0467	0.0223	970.7474	0.0823	1.2492	0.0658
	As(std)	4517	0.0713	0.0461	0.0252	5896.9435	0.5000	—	—
36	Cu	5227	0.0646	0.0478	0.0168	5942.5763	1.2684	1.1763	1.0782
	Cu(std)	4586	0.0639	0.0451	0.0188	4658.9174	1.0000	—	—
	Se	92	0.0634	0.0494	0.0140	131.4220	0.1769	1.1763	0.1503
	Se(std)	357	0.0659	0.0471	0.0188	397.7766	0.5000	—	—
	As	489	0.0735	0.0465	0.0270	595.8465	0.0505	1.1763	0.0429
	As(std)	4517	0.0713	0.0461	0.0252	5896.9435	0.5000	—	—

ตาราง 13 (ต่อ)

เบอร์ สารตัว อย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระดาษ กรอง + ppt. (gm)	น้ำหนัก กระดาษ กรอง (gm)	น้ำหนัก ppt. (gm)	100 % acti- vities	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สารตัว อย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g/g)
37	Cu	4951	0.0628	0.0470	0.0148	6389.2655	0.9762	1.2483	0.7820
	Cu(std)	5037	0.0625	0.0478	0.0147	6544.5741	1.0000	—	—
	Se	332	0.0650	0.0483	0.0167	397.6032	0.2303	1.2483	0.1844
	Se(std)	803	0.0646	0.0460	0.0186	863.3856	0.5000	—	—
	As	464	0.0730	0.0466	0.0264	578.2368	0.1834	1.2483	0.0734
	As(std)	2864	0.0769	0.0470	0.0299	3151.2592	0.5000	—	—
38	Cu	2791	0.0559	0.0457	0.0102	5226.1475	0.7985	1.0811	0.7385
	Cu(std)	5037	0.0625	0.0478	0.0147	6544.5741	1.0000	—	—
	Se	250	0.0640	0.0460	0.0180	277.7750	0.1609	1.0811	0.1488
	Se(std)	803	0.0646	0.0460	0.0186	863.3856	0.5000	—	—
	As	250	0.0745	0.0468	0.0277	296.9250	0.0471	1.0811	0.0435
	As(std)	2864	0.0769	0.0470	0.0299	3151.2592	0.5000	—	—
39	Cu	2160	0.0583	0.0428	0.0155	2661.5520	1.0064	1.1437	0.8799
	Cu(std)	2520	0.0621	0.0439	0.0182	2644.4880	1.000	—	—
	Se	118	0.0657	0.0469	0.0188	125.5284	0.2286	1.1437	0.1998
	Se(std)	265	0.0658	0.0465	0.0193	274.5930	0.5000	—	—
	As	144	0.0760	0.0470	0.0290	158.8896	0.0746	1.1437	0.0652
	As(std)	912	0.0734	0.0460	0.0274	1065.0336	0.5000	—	—

ตาราง 13 (ต่อ)

เบอร์ สารตัว อย่าง	ธาตุ	acti- vities	น้ำหนัก กระดาษ กรอง + ppt. (gm)	น้ำหนัก กระดาษ กรอง (gm)	น้ำหนัก ppt. (gm)	100 % acti- vities	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g)	น้ำหนัก สารตัว อย่าง (gm)	ปริมาณ ธาตุ ในสาร ตัวอย่าง (μ g/g)
40	Cu	1492	0.0574	0.0440	0.0130	2192.0464	0.8289	1.1562	0.7169
	Cu(std)	2520	0.0621	0.0439	0.0182	2644.4880	1.0000	—	—
	Se	56	0.0648	0.0487	0.0161	69.5632	0.2450	1.1562	0.2119
	Se(std)	137	0.0658	0.0465	0.0193	141.9594	0.5000	—	—
	As	245	0.0716	0.0465	0.0251	312.3505	0.1466	1.1562	0.1267
	As(std)	912	0.0734	0.0466	0.0274	1065.0336	0.5000	—	—

ภาคผนวก ค.

การคำนวณค่าสถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล

การคำนวณค่าสถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล

1. ค่าเฉลี่ย (mean) โดยใช้สูตร

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

- 1.1 ค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Cu ในสารตัวอย่าง
- 1.2 ค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ As ในสารตัวอย่าง
- 1.3 ค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ Se ในสารตัวอย่าง

2. ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) โดยใช้สูตร

$$s = \sqrt{\frac{N\sum X^2 - (\sum X)^2}{N(N-1)}}$$

- 2.1 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณธาตุ Cu
- 2.2 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณธาตุ As
- 2.3 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณธาตุ Se

3. ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation) โดยใช้สูตร

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

- 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Cu และ As
- 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Cu และ Se
- 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ As และ Se

เมื่อให้ X แทนปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง หน่วย $\mu\text{g/g}$

$\bar{X}$ แทนค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ หน่วย $\mu\text{g/g}$

$\sum X$ แทนผลรวมทั้งหมดของปริมาณธาตุ

N แทนจำนวนสารตัวอย่าง

s	แทนความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ΣY^2 หรือ ΣX^2	แทนผลรวมทั้งหมดของปริมาณแต่ละชาติในสารตัวอย่างยกกำลังสอง
r	แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
ΣXY	แทนผลรวมของผลคูณของปริมาณชาติ 2 ชนิด
$\Sigma X \Sigma Y$	แทนผลคูณของผลรวมของปริมาณชาติแต่ละชนิด

ตาราง 14 ข้อมูลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณ
ธาตุ Cu ในเลือด

เบอร์ สารตัวอย่าง	X	X ²	เบอร์ สารตัวอย่าง	X	X ²
1	1.3816	1.9088	21	0.9988	0.9976
2	1.4375	2.0664	22	0.9431	0.8894
3	1.2153	1.4769	23	1.0730	1.1513
4	1.2018	1.4443	24	0.7213	0.5202
5	1.3215	1.7463	25	1.1261	1.2682
6	1.5675	2.4570	26	1.2845	1.6499
7	1.1824	1.3980	27	1.1973	1.4335
8	1.2220	1.4932	28	1.2569	1.5797
9	0.9652	0.9316	29	1.4887	2.2162
10	1.2613	1.5908	30	1.1003	1.2106
11	0.8913	0.7944	31	1.0477	1.0976
12	1.0419	1.0855	32	1.1484	1.3188
13	1.1871	1.4092	33	1.2489	1.5597
14	1.1066	1.2245	34	0.8569	0.7342
15	1.0741	1.1536	35	1.3957	1.9479
16	1.1369	1.2925	36	1.0782	1.1625
17	1.3468	1.8138	37	0.7820	0.6115
18	1.0037	1.0074	38	0.7385	0.5453
19	0.8692	0.7555	39	0.8799	0.7742
20	0.8845	0.7823	40	0.7169	0.5139
Σ				44.3813	51.0142

ในที่นี้ $\bar{x}$ แทนปริมาณธาตุ Cu

$$\sum x = 44.3813$$

$$N = 40$$

$$\sum x^2 = 51.0142$$

ก. การคำนวณค่าเฉลี่ย

$$\text{จากสูตร } \bar{x} = \frac{\sum x}{N}$$

$$\bar{x} = \frac{44.3813}{40}$$

$$= 1.1095$$

ข. การคำนวณค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } s &= \sqrt{\frac{N\sum x^2 - (\sum x)^2}{N(N-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{(40 \times 51.0142) - (44.3813)^2}{40(40-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{2040.5680 - 1969.6997}{40 \times 39}} \\ &= \sqrt{\frac{70.8683}{1560}} \\ &= \sqrt{0.045428} \\ &= 0.2131 \end{aligned}$$

ตาราง 15 ข้อมูลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณ
ธาตุ As ในเลือด

เบอร์ สารตัวอย่าง	X	X ²	เบอร์ สารตัวอย่าง	X	X ²
1	0.1395	0.0195	21	0.1401	0.0196
2	0.1600	0.0256	22	0.1319	0.0174
3	0.1459	0.0213	23	0.1741	0.0303
4	0.1988	0.0395	24	0.1877	0.0352
5	0.2248	0.0505	25	0.1241	0.0154
6	0.2170	0.0471	26	0.2292	0.0525
7	0.1365	0.0186	27	0.1471	0.0216
8	0.1493	0.0223	28	0.1525	0.0233
9	0.1699	0.0289	29	0.1487	0.0221
10	0.1805	0.0326	30	0.1552	0.0241
11	0.1532	0.0235	31	0.1476	0.0218
12	0.1837	0.0337	32	0.0832	0.0069
13	0.1846	0.0341	33	0.1142	0.0130
14	0.1352	0.0183	34	0.1305	0.0170
15	0.1036	0.0107	35	0.0658	0.0043
16	0.1361	0.0185	36	0.0429	0.0018
17	0.2914	0.0849	37	0.0734	0.0054
18	0.1975	0.0390	38	0.0435	0.0019
19	0.3031	0.0919	39	0.0652	0.0043
20	0.1703	0.0290	40	0.1267	0.0161
Σ				6.0645	1.0435

ในชั้น X แทนปริมาณธาตุ As

$$\Sigma X = 6.0645$$

$$N = 40$$

$$\Sigma X^2 = 1.0435$$

ก. การคำนวณค่าเฉลี่ย

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } \bar{X} &= \frac{\Sigma X}{N} \\ &= \frac{6.0645}{40} \\ &= 0.1516 \end{aligned}$$

ข. การคำนวณค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } s &= \sqrt{\frac{N\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2}{N(N-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{(40 \times 1.0435) - (6.0645)^2}{40(40-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{41.7560 - 36.7781}{40 \times 39}} \\ &= \sqrt{\frac{4.9779}{1560}} \\ &= \sqrt{0.0031909} \\ &= 0.0565 \end{aligned}$$

ตาราง 16 ข้อมูลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณ
ธาตุ Se ในเลือด

เบอร์ สำรวจ	X	X ²	เบอร์ สำรวจ	X	X ²
1	0.1534	0.0235	21	0.2151	0.0463
2	0.1680	0.0282	22	0.2761	0.0762
3	0.1749	0.0306	23	0.3725	0.1388
4	0.1427	0.0204	24	0.4523	0.2046
5	0.1406	0.0198	25	0.2004	0.0402
6	0.1390	0.0193	26	0.1545	0.0239
7	0.1001	0.0100	27	0.1696	0.0288
8	0.1269	0.0161	28	0.1564	0.0245
9	0.1710	0.0050	29	0.4133	0.1708
10	0.2706	0.0732	30	0.1337	0.0179
11	0.2317	0.0537	31	0.1676	0.0281
12	0.1278	0.0163	32	0.2107	0.0444
13	0.1398	0.0195	33	0.1721	0.0296
14	0.0895	0.0080	34	0.1446	0.0209
15	0.1447	0.0209	35	0.1390	0.0193
16	0.1729	0.0299	36	0.1503	0.0226
17	0.1508	0.0227	37	0.1844	0.0340
18	0.1422	0.0202	38	0.1488	0.0221
19	0.1549	0.0240	39	0.1998	0.0399
20	0.2370	0.0561	40	0.2119	0.0449
Σ				7.3516	1.5952

ในที่นี้ $\bar{x}$ แทนปริมาณธาตุ Se

$$\sum x = 7.3516$$

$$N = 40$$

$$\sum x^2 = 1.5952$$

ก. การคำนวณค่าเฉลี่ย

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } \bar{x} &= \frac{\sum x}{N} \\ &= \frac{7.3516}{40} \\ &= 0.1873 \end{aligned}$$

ข. การคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } s &= \sqrt{\frac{N\sum x^2 - (\sum x)^2}{N(N-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{(40 \times 1.5952) - (7.3516)^2}{40(40-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{63.8080 - 54.0460}{40 \times 39}} \\ &= \sqrt{\frac{9.7620}{1560}} \\ &= \sqrt{0.0062576} \\ &= 0.0791 \end{aligned}$$

ตาราง 17 ข้อมูลการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Cu และ As ในเลือด

เบอร์สาร ตัวอย่าง	X	Y	XY	X ²	Y ²
1	1.3816	0.1395	0.1927	1.9088	0.0195
2	1.4375	0.1600	0.2300	2.0664	0.0256
3	1.2153	0.1459	0.1773	1.4769	0.0213
4	1.2018	0.1988	0.2389	1.4443	0.0395
5	1.3215	0.2248	0.2971	1.7463	0.0505
6	1.5675	0.2170	0.3401	2.4570	0.0471
7	1.1824	0.1365	0.1614	1.3980	0.0186
8	1.2220	0.1493	0.1824	1.4932	0.0223
9	0.9652	0.1699	0.1639	0.9316	0.0289
10	1.2613	0.1805	0.2277	1.5908	0.0326
11	0.8913	0.1532	0.1365	0.7944	0.0235
12	1.0419	0.1837	0.1914	1.0855	0.0337
13	1.1871	0.1846	0.2191	1.4092	0.0341
14	1.1966	0.1352	0.1496	1.2245	0.0183
15	1.0741	0.1036	0.1113	1.1536	0.0107
16	1.1369	0.1361	0.1547	1.2925	0.0185
17	1.3468	0.2914	0.3924	1.8138	0.0849
18	1.0037	0.1975	0.1982	1.0074	0.0390
19	0.8692	0.3031	0.2634	0.7555	0.0919
20	0.8845	0.1703	0.1506	0.7823	0.0290

ตาราง 17 (ต่อ)

เบอร์สาร ตัวอย่าง	X	Y	XY	X ²	Y ²
21	0.9988	0.1401	0.1399	0.9976	0.0196
22	0.9431	0.1319	0.1244	0.8894	0.0174
23	1.0730	0.1741	0.1868	1.1513	0.0303
24	0.7213	0.1877	0.1354	0.5202	0.0352
25	1.1261	0.1241	0.1397	1.2682	0.0154
26	1.2845	0.2292	0.2939	1.6499	0.0525
27	1.1973	0.1471	0.1761	1.4335	0.0216
28	1.2569	0.1525	0.1917	1.5797	0.0233
29	1.4887	0.1487	0.2214	2.2162	0.0221
30	1.1003	0.1552	0.1768	1.2106	0.0241
31	1.0477	0.1476	0.1546	1.0976	0.0218
32	1.1484	0.0832	0.0955	1.3188	0.0069
33	1.2489	0.1142	0.1426	1.5597	0.0130
34	0.8569	0.1305	0.1118	0.7342	0.0170
35	1.3957	0.0658	0.0918	1.9479	0.0043
36	1.0782	0.0429	0.0463	1.1625	0.0018
37	0.7820	0.0734	0.0574	0.6115	0.0054
38	0.7385	0.0435	0.0321	0.5433	0.0019
39	0.8799	0.0652	0.0574	0.7742	0.0043
40	0.7169	0.0267	0.0908	0.5139	0.0161
Σ	44.3813	6.0645	6.8391	51.0142	1.0435

ในที่นี้ X แทนปริมาณธาตุ Cu

Y แทนปริมาณธาตุ As

$$\sum X = 44.3813$$

$$\sum Y = 6.0645$$

$$\sum XY = 6.8391$$

$$\sum X^2 = 51.0142$$

$$\sum Y^2 = 1.0435$$

$$N = 40$$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } r_{XY} &= \frac{N\sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[N\sum X^2 - (\sum X)^2][N\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \\ &= \frac{(40 \times 6.8391) - (44.3813 \times 6.0645)}{\sqrt{[(40 \times 51.0142) - (44.3813)^2][(40 \times 1.0435) - (6.0645)^2]}} \\ &= \frac{273.5640 - 269.1504}{\sqrt{(2040.5680 - 1969.6997)(41.7560 - 36.7781)}} \\ &= \frac{4.4136}{\sqrt{70.8683 \times 4.9779}} \\ &= \frac{4.4136}{\sqrt{352.7753}} \\ &= \frac{4.4136}{\sqrt{15.89}} \\ &= 0.28 \end{aligned}$$

ตาราง 18 ข้อมูลการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ Cu และ Se ในเลือด

เบอร์สาร ตัวอย่าง	X	Y	XY	X ²	Y ²
1	1.3816	0.1534	0.2119	1.9088	0.0235
2	1.4375	0.1680	0.2415	2.0664	0.0282
3	1.2153	0.1749	0.2126	1.4769	0.0306
4	1.2018	0.1427	0.1715	1.4443	0.0204
5	1.3215	0.1406	0.1858	1.7463	0.0198
6	1.5675	0.1390	0.2179	2.4570	0.0193
7	1.1824	0.1001	0.1184	1.3980	0.0100
8	1.2220	0.1269	0.1551	1.4932	0.0161
9	0.9652	0.0710	0.0685	0.9316	0.0050
10	1.2613	0.2706	0.3413	1.5908	0.0732
11	0.8913	0.2317	0.2065	0.7944	0.0537
12	1.0419	0.1278	0.1332	1.0855	0.0163
13	1.1871	0.1398	0.1659	1.4092	0.0195
14	1.1066	0.0895	0.0990	1.2245	0.0080
15	1.0741	0.1447	0.1554	1.1536	0.0209
16	1.1369	0.1729	0.1966	1.2925	0.0299
17	1.3468	0.1508	0.2031	1.8138	0.0227
18	1.0037	0.1422	0.1427	1.0074	0.0202
19	0.8692	0.1549	0.1346	0.7555	0.0240
20	0.8845	0.2370	0.2096	0.7823	0.0561

ตาราง 18 (ต่อ)

เบอร์สาร ตัวอย่าง	X	Y	XY	X ²	Y ²
21	0.9988	0.2151	0.2148	0.9976	0.0463
22	0.9431	0.2761	0.2604	0.8894	0.0762
23	1.0730	0.3725	0.3997	1.1513	0.1388
24	0.7213	0.4523	0.3262	0.5202	0.2046
25	1.1261	0.2004	0.2256	1.2682	0.0402
26	1.2845	0.1545	0.1985	1.6499	0.0239
27	1.1973	0.1696	0.2031	1.4335	0.0288
28	1.2569	0.1564	0.1966	1.5797	0.0245
29	1.4887	0.4133	0.6153	2.2162	0.1708
30	1.1003	0.1337	0.1471	1.2106	0.0179
31	1.0477	0.1676	0.1756	1.0976	0.0281
32	1.1484	0.2107	0.2419	1.3188	0.0444
33	1.2489	0.1721	0.2149	1.5597	0.0296
34	0.8569	0.1446	0.1238	0.7342	0.0209
35	1.3957	0.1390	0.1940	1.9479	0.0193
36	1.0782	0.1503	0.1621	1.1625	0.0226
37	0.7820	0.1844	0.1442	0.6115	0.0340
38	0.7385	0.1488	0.1099	0.5453	0.0221
39	0.8799	0.1998	0.1758	0.7742	0.0399
40	0.7169	0.2119	0.1519	0.5139	0.0449
Σ	44.3813	7.3516	8.0525	51.0142	1.5952

ในขั้น X แทนปริมาณธาตุ Cu

Y แทนปริมาณธาตุ Se

$$\Sigma X = 44.3813$$

$$\Sigma Y = 7.3516$$

$$\Sigma XY = 8.0525$$

$$\Sigma X^2 = 51.0142$$

$$\Sigma Y^2 = 1.5952$$

$$N = 40$$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } r_{XY} &= \frac{N\Sigma XY - \Sigma X\Sigma Y}{\sqrt{[N\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2][N\Sigma Y^2 - (\Sigma Y)^2]}} \\ &= \frac{(40 \times 8.0525) - (44.3813 \times 7.3516)}{\sqrt{[(40 \times 51.0142) - (44.3813)^2][(40 \times 1.5952) - (7.3516)^2]}} \\ &= \frac{322.1000 - 326.2735}{\sqrt{(2040.5680 - 1969.6997)(63.8080 - 54.0460)}} \\ &= - \frac{4.1735}{\sqrt{70.8683 \times 9.7620}} \\ &= - \frac{4.1735}{\sqrt{691.8163}} \\ &= - \frac{4.1735}{\sqrt{26.302}} \\ &= - 0.16 \end{aligned}$$

ตาราง 19 ข้อมูลการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของธาตุ As และ Se ในเลือด

เบอร์สาร ตัวอย่าง	X	Y	XY	X ²	Y ²
1	0.1534	0.1395	0.0214	0.0235	0.0195
2	0.1680	0.1600	0.0269	0.0282	0.0256
3	0.1749	0.1459	0.0255	0.0306	0.0213
4	0.1427	0.1988	0.0284	0.0204	0.0395
5	0.1406	0.2248	0.0316	0.0198	0.0505
6	0.1390	0.2170	0.0302	0.0193	0.0471
7	0.1001	0.1365	0.0137	0.0100	0.0186
8	0.1269	0.1493	0.0189	0.0161	0.0223
9	0.0710	0.1699	0.0121	0.0050	0.0289
10	0.2706	0.1805	0.0488	0.0732	0.0326
11	0.2317	0.1532	0.0355	0.0537	0.0235
12	0.1278	0.1837	0.0235	0.0163	0.0337
13	0.1398	0.1846	0.0258	0.0195	0.0341
14	0.0895	0.1352	0.0212	0.0080	0.0183
15	0.1447	0.1036	0.0150	0.0209	0.0107
16	0.1729	0.1361	0.0235	0.0299	0.0185
17	0.1508	0.2914	0.0439	0.0227	0.0849
18	0.1422	0.1975	0.0281	0.0202	0.0390
19	0.1549	0.3031	0.0469	0.0240	0.0919
20	0.2370	0.1703	0.0404	0.0561	0.0290

ตาราง 19 (ต่อ)

เบอร์สาร ตัวอย่าง	X	Y	XY	X ²	Y ²
21	0.2151	0.1401	0.0310	0.0463	0.0196
22	0.2761	0.1319	0.0364	0.0762	0.0174
23	0.3725	0.1741	0.0648	0.1388	0.0303
24	0.4523	0.1877	0.0849	0.2046	0.0352
25	0.2004	0.1241	0.0429	0.0402	0.0154
26	0.1545	0.2292	0.0354	0.0239	0.0525
27	0.1696	0.1471	0.0249	0.0288	0.0216
28	0.1564	0.1525	0.0239	0.0245	0.0233
29	0.4133	0.1487	0.0614	0.1708	0.0221
30	0.1336	0.1552	0.0208	0.0179	0.0241
31	0.1676	0.1476	0.0247	0.0281	0.0218
32	0.2107	0.0332	0.0175	0.0444	0.0069
33	0.1721	0.1142	0.0197	0.0296	0.0130
34	0.1446	0.1305	0.0189	0.0209	0.0170
35	0.1390	0.0658	0.0095	0.0193	0.0043
36	0.1503	0.0429	0.0064	0.0226	0.0018
37	0.1844	0.0734	0.0135	0.0340	0.0054
38	0.1488	0.0435	0.0065	0.0221	0.0019
39	0.1998	0.0652	0.0130	0.0399	0.0043
40	0.2119	0.1267	0.0268	0.0449	0.0161
Σ	7.3516	6.0645	1.1433	1.5952	1.0435

ในที่นี้ X แทนปริมาณธาตุ Se

Y แทนปริมาณธาตุ As

$$\sum X = 7.3516$$

$$\sum Y = 6.0645$$

$$\sum XY = 1.1433$$

$$\sum X^2 = 1.5952$$

$$\sum Y^2 = 1.0435$$

$$N = 40$$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } r_{XY} &= \frac{N\sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[N\sum X^2 - (\sum X)^2][N\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \\ &= \frac{(40 \times 1.1433) - (7.3516 \times 6.0645)}{\sqrt{[(40 \times 1.5952) - (7.3516)^2][(40 \times 1.0435) - (6.0645)^2]}} \\ &= \frac{45.7320 - 44.5838}{\sqrt{(63.8080 - 54.0460)(41.7560 - 36.7781)}} \\ &= \frac{1.1482}{\sqrt{9.7620 \times 4.9779}} \\ &= \frac{1.1482}{\sqrt{48.5943}} \\ &= \frac{1.1482}{6.97} \\ &= 0.16 \end{aligned}$$

ประวัติของผู้เขียน

ผู้เขียนเกิดวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2492 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี พ.ศ. 2508
สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนกรรณสูต คีฬาลย์สุพรรณบุรี พ.ศ. 2512
สำเร็จประกาศนียบัตรวิชาการศึกษาระดับสูง จากวิทยาลัยครูพระนครศรีอยุธยา จังหวัดอยุธยา
และ พ.ศ. 2514 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นมัธยมศึกษา 1 จากวิทยาลัยวิชาการศึกษา
สงขลา จังหวัดสงขลา

จากนั้นผู้เขียนเข้ารับราชการเป็นอาจารย์ประจำแผนกเคมี คณะวิทยาศาสตร์และ
คณิตศาสตร์ วิทยาลัยวิชาการศึกษา สงขลา และเมื่อวันที่ 3 มิถุนายน พ.ศ. 2515
ได้ลาศึกษาต่อการศึกษาหาบัณฑิต สาขาอุทกศึกษาและการฝึกหัดครู วิชาสามัญเคมี ที่
วิทยาลัยวิชาการศึกษา ประสานมิตร กรุงเทพมหานคร.