



โครงการแนวปฏิบัติการวิจัย
การประยุกต์เทคนิคนิวเคลียร์ในงานอุตสาหกรรมและการพัฒนาแหล่งทรัพยากรธรรมชาติ
ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

539.7523
B431ค
ฯ.3



งานวิจัยหมายเลข NTIA - 002



เครื่องวัดความหนาของโลหะชุบ

รศ. ดร. ถิชชัย สุมิตร

ผศ. นเรศร์ จันทน์ขาว

ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรกฎาคม 2532

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนา เครื่องวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวที่มีราคาประหยัด เคลื่อนย้ายได้สะดวก และให้ผลรวดเร็วโดยใช้เทคนิคนิวเคลียร์ ได้ใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา และเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ในการศึกษาการวัดความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดงในช่วงความหนา 0.83-8.05 ไมครอน และคีมุกที่เคลือบบนแผ่นเหล็กในช่วงความหนา 3.9-10.9 กรัมต่อตารางเมตร ต้นกำเนิดรังสีเบตาที่ใช้มี 3 ชนิดซึ่งให้พลังงานของรังสีเบตาต่างกัน คือ คาร์บอน-14 คลอรีน-36 และสตรอนเชียม-90 โดยใช้หัววัดรังสีไกเกอร์-มูลเลอร์วัดรังสีเบตา สำหรับการวัดรังสีเอกซ์ใช้หัววัดรังสีเอกซ์แบบพรอพอร์ชันนัลบรรจุก๊าซซีนอน ในการทำให้เกิดรังสีเอกซ์ เรืองของคีมุกได้ใช้ต้นกำเนิดรังสีเหล็ก-55 ความแรง 740×10^6 เบคเคอร์เรล เป็นตัวกระตุ้น และรังสีเอกซ์เรืองของเหล็ก ทองแดง และคีมุก ใช้ต้นกำเนิดรังสีอะเมริเชียม-241 ความแรง 1.11×10^9 เบคเคอร์เรล เป็นตัวกระตุ้น

ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นว่า เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์มีความไวสูงกว่าเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา แต่เทคนิคทั้งสองสามารถใช้ในการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวได้ทั้งคู่ ทั้งในช่วงต่ำกว่าและในช่วงเป็นไมครอนโดยที่ความถูกต้องขึ้นอยู่กับชิ้นงานมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบ อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีคลอรีน-36 และสตรอนเชียม-90 ไม่สามารถใช้วัดความหนาของคีมุกในช่วงนี้ได้เนื่องจากรังสีเบตามีพลังงานสูงเกินไป โดยเหตุที่ว่าเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตาใช้วัสดุอุปกรณ์ที่ถูกลงกว่าการเรืองรังสีเอกซ์ประมาณ 10 เท่า จึงได้เลือกพัฒนา เครื่องต้นแบบซึ่งใช้เทคนิคนี้ โดยใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีราคาประหยัดซึ่งหาได้ในประเทศ ยกเว้น หัววัดรังสีและสารรังสีสำหรับการทำต้นกำเนิดรังสี เครื่องต้นแบบประกอบด้วย ต้นกำเนิดรังสี 2 ชนิด คือ คาร์บอน-14 ความแรง 5.5×10^6 เบคเคอเรล และสตรอนเชียม-90 ความแรง 37×10^6 เบคเคอเรล หัววัดรังสีแบบไกเกอร์-มูลเลอร์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร และเครื่องนับรังสี NT-1801 พร้อมเครื่องพิมพ์ และอุปกรณ์เชื่อมโยงสัญญาณ ต้นกำเนิดรังสีคาร์บอน-14 ใช้สำหรับวัดความหนาของทองคำในช่วงต่ำกว่า 3 ไมครอน และคีมุกในช่วงต่ำกว่า 10 กรัมต่อตารางเมตร โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 0.11 ไมครอน และ 0.4 กรัมต่อตารางเมตรตามลำดับ เมื่อวัดรังสี นาน 5 นาที และมีต้นกำเนิดรังสีสตรอนเชียม-90 สำหรับวัดความหนาของทองคำในช่วงสูงกว่า 3 ไมครอน โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 0.5 ไมครอน ในช่วงความหนา 3-8 ไมครอน เมื่อใช้เวลานับรังสี 3 นาที

ABSTRACT

The purpose of this research was to develop a portable, low-cost instrument for rapid measurement of coating thickness using nuclear technique. The measurements of gold plated on copper in the range of 0.83-8.05 μm and tin on steel in the range of 3.9-10.9 g/m^2 were investigated by using beta backscattering and x-ray fluorescence (XRF) techniques. To provide different beta energies, three beta sources were used i.e. C-14, Cl-36 and Sr-90. The Sn L x-rays were excited by a 740 MBq Fe-55 source while Fe K x-rays, Cu K x-rays and Au L x-rays were excited by a 1.11 GBq Am-241. A GM counter and a Xe-filled proportional counter were used for beta and x-ray measurements respectively.

The results indicated that the XRF technique was superior to the beta backscattering technique in terms of sensitivity of the measurements. Furthermore, the two techniques showed their capabilities in the measurement of coating thickness in submicron range to micron range with accuracy depending upon the standards used in the calibration procedure. However, the measurement of tin thickness in this range could not be done with Cl-36 and Sr-90 sources since the beta energies were too high. A prototype of the beta backscatter gauge was finally designed and constructed using low-cost components locally available except for the GM tube and the radioactive materials used for beta sources. This would be about 10 times less expensive than the XRF equipment. The prototype developed consists of a 5.5 MBq C-14 and a 37 MBq Sr-90 sources; a 3 cm diameter and 4 cm long GM tube; and NT-1801 portable counter; and a printer with a printer interface.

The C-14 source was used for measuring gold thickness below 3 microns and tin thickness below 10 g/m^2 with errors of less than 0.11 micron and 0.4 g/m^2 respectively for 5 minute counting time. The Sr-90 was used for measuring gold thickness above 3 microns. For gold thickness between 3-8 microns and 3-minute counting time the error was found to be less than 0.5 micron.



กิติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้เป็นผลสำเร็จลงได้ด้วยดีเนื่องจากความสนับสนุนของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการจัดตั้งหน่วยปฏิบัติการวิจัยการประยุกต์เทคนิคนิวเคลียร์ ในงานด้านอุตสาหกรรมและการพัฒนาแหล่งทรัพยากรธรรมชาติ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท แผ่นเหล็กวิลาสไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างแผ่นเหล็ก เคลือบตีบุกความหนาต่าง ๆ กัน ตลอดจนการตรวจสอบความหนาด้วยเครื่องวัดความหนาตีบุกของบริษัท ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการตรวจสอบความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ คุณเรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์ คุณณฤพวัจน์ เงินวิจิตร และคุณเสมา สอนประสม ที่ช่วยเหลืองานวิจัยบางส่วน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ ขอบเขต และวิธีดำเนินงาน	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 เทคนิคนิวเคลียร์กับการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิว	4
2.1 เทคนิคการกระเจิงกลับรังสีเบตา	5
2.2 เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา	15
2.3 เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	26
3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยและการตรวจสอบชิ้นงาน	26
3.2 การศึกษาการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา	27
3.3 การศึกษาการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์	30
3.4 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ	33
บทที่ 4 ผลการวิจัย	36
4.1 ผลการตรวจสอบชิ้นงาน	36
4.2 ผลการศึกษาการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา	42
4.3 ผลการศึกษาการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุป วิจารณ์ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	62
ก. X-Ray Critical Absorption and Emission Energies	62
ข. วงจรเครื่องนับรังสี NT-1801	64

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การจัดค้นกำเนิดรังสี หัววัดรังสี และชิ้นงาน แบบ backscatter geometry	4
2.2	การกระเจิงกลับของรังสีเบตาจากตัวอย่าง	5
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเบตากระเจิงกลับกับความหนาของตัวอย่าง	6
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสูงสุดของรังสีเบตากระเจิงกลับกับเลขอะตอม	10
2.5	อิทธิพลของเลขอะตอมต่อการเลื่อนของสเปกตรัมพลังงานรังสีเบตากระเจิงกลับ	10
2.6	การกระเจิงกลับของรังสีเบตาจากโลหะเคลือบผิวและโลหะฐาน	12
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเบตากระเจิงกลับกับความหนาของ โลหะเคลือบผิว	13
2.8	อิทธิพลของเลขอะตอมและความหนาของตัวอย่างต่อความเข้มของรังสีที่ กระเจิงจากรังสีแกมมาพลังงาน 60 keV	17
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีแกมมากระเจิงกลับกับความหนาของ โลหะเคลือบผิว	19
2.10	แผนภาพแสดงการเกิดรังสีเอกซ์ เรือง	21
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์ เรืองของโลหะเคลือบผิว และโลหะฐานกับความหนาของโลหะเคลือบผิว	24
3.1	ค้นกำเนิดรังสีเบตา คาร์บอน-14 คลอรีน-36 และสตรอนเชียม-90	28
3.2	แผนผังการจัดอุปกรณ์เพื่อศึกษาการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วย เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา	28
3.3	แผนผังการจัดอุปกรณ์เพื่อศึกษาการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วย เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์	31
3.4	แผนภาพเครื่องต้นแบบของเครื่องวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวโดยใช้ เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา	34
3.5	เครื่องต้นแบบเครื่องวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวโดยใช้เทคนิคการ กระเจิงกลับของรังสีเบตา	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	ตัวอย่างภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของชิ้นงานทองคำเคลือบบนทองแดง	37
4.2	ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีเอกซ์เรืองของชิ้นงานทองคำเคลือบบนทองแดงเมื่อวัดด้วยหัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง	38
4.3	ตัวอย่างภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของชิ้นงานคีมุกเคลือบบนแผ่นเหล็ก	39
4.4	ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีเอกซ์เรืองของชิ้นงานคีมุกเคลือบบนแผ่นเหล็กเมื่อวัดด้วยหัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง	40
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเบตากระเจิงกลับกับความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดง	45
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเบตากระเจิงกลับกับความหนาของคีมุก เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีคาร์บอน-14	45
4.7	สเปกตรัมของรังสีเอกซ์เรืองของทองแดงและทองคำเมื่อวัดด้วยหัววัดพรอพอร์ชันนัล	46
4.8	สเปกตรัมของรังสีเอกซ์เรืองของคีมุก รังสีเอกซ์กระเจิงกลับของแมงกานีส และรังสีเอกซ์เรืองของเหล็กจากแผ่นเหล็กเคลือบด้วยคีมุกความหนาต่างกััน	48
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์เรืองของทองแดงและทองคำกับความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดง	50
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์เรืองของคีมุกกับความหนาของคีมุกที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก	50
4.11	ก. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์เรืองของเหล็กกับความหนาของคีมุกที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก	51
	ข. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์กระเจิงกลับของแมงกานีสกับความหนาของคีมุกที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.12	ผลการปรับเทียบเครื่องค้นแบบสำหรับการวัดความหนาของทองคำ ที่เคลือบบนทองแดง และคัมภีร์ที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก เมื่อใช้ต้นกำเนิด รังสีคาร์บอน-14	53
4.13	ผลการปรับเทียบเครื่องค้นแบบสำหรับการวัดความหนาของทองคำ ที่เคลือบบนทองแดง เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีสตรอนเชียม-90	54
ข.1	วงจรของเครื่องนับรังสี NT-1801	67



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ต้นกำเนิดรังสีเบตาบางชนิดที่ใช้สำหรับเทคนิคการกระเจิงกลับรังสีเบตา	8
2.2	ค่า Saturation Backscatter Coefficient สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอม 1-100	9
2.3	ต้นกำเนิดรังสีเบตาบางชนิดและช่วงการใช้งานในการวัดความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดงด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา	15
2.4	ต้นกำเนิดรังสีบางชนิดที่นิยมใช้สำหรับเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา และเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์	20
4.1	ความเข้มรังสีเบตาการกระเจิงกลับจากทองแดงที่เคลือบด้วยทองคำหนา 0-8.05 ไมครอน	44
4.2	ความเข้มรังสีเบตาการกระเจิงกลับจากแผ่นเหล็กที่เคลือบด้วยดีบุกหนา 0-10.9 กรัม/ตร.ม.	44
4.3	ความเข้มรังสีเอกซ์ของทองแดงและทองคำจากตัวอย่างทองแดงที่เคลือบด้วยทองคำหนา 0-8.05 ไมครอน	49
4.4	ความเข้มรังสีเอกซ์ของดีบุก รังสีเอกซ์เรืองของเหล็ก และรังสีเอกซ์การกระเจิงกลับของแมงกานีส จากตัวอย่างแผ่นเหล็กที่เคลือบด้วยดีบุกหนา 0-10.9 กรัม/ตร.ม.	49
4.5	ผลการเปรียบเทียบเครื่องต้นแบบสำหรับการวัดความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดง และดีบุกที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีคาร์บอน-14	52
4.6	ผลการเปรียบเทียบเครื่องต้นแบบสำหรับการวัดความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดง เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีตรอนเนียม-90	52



1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเราได้ใช้ประโยชน์ และพบเห็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นโลหะเคลือบผิวอยู่เป็นประจำ ไม่ว่าจะเป็นภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ ชิ้นส่วนเครื่องประดับบ้าน เครื่องประดับบุรุษ และสตรี แผ่นพิมพ์วงจร ตลอดจนของใช้อื่น ๆ อีกนานาชนิด เช่น ปากกา กรอบแว่นตา สายนาฬิกา เป็นต้น โดยทั่วไปจุดประสงค์หลักของการเคลือบผิวโลหะก็คือ การประหยัดเนื้อวัสดุที่มีราคาสูง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสวยงาม มีคุณค่า มีคุณภาพตามความต้องการ และ/หรือเพิ่มความคงทน

การควบคุมคุณภาพของโลหะเคลือบผิว นอกจากคุณภาพของเนื้อโลหะแล้วยังต้องควบคุมให้มีความหนาตามต้องการ กล่าวคือไม่บางเกินไปจนทำให้คุณภาพหรือความคงทนลดลง และไม่หนาเกินไปจนทำให้สิ้นเปลืองเนื้อวัสดุโดยไม่จำเป็น การวัดความหนาโลหะเคลือบผิวมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีชั่งน้ำหนัก (gravimetric method) การวัดภาคตัดขวาง (cross-sectional measurement) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา (beta backscatter technique) เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (x-ray fluorescence technique) และเทคนิคการกระเจิงกลับรังสีแกมมาหรือเอกซ์ (gamma or x-ray backscatter technique) ซึ่งแต่ละวิธีมีหลักการ ข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกันไป สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา และเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลได้รวดเร็ว ถูกต้อง และไม่ทำลายตัวอย่าง เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดความหนาของโลหะเคลือบผิวที่สามารถแสดงผลได้รวดเร็ว มีความแม่นยำสูงและสามารถใช้งานในภาคสนามได้

อนึ่ง ในการศึกษาการใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ จะได้ศึกษาการใช้เทคนิคการสะท้อนรังสีเอกซ์ควบคู่กันไปด้วยหากมีความเหมาะสมและสามารถใช้อุปกรณ์ชุดเดียวกันได้

1.2 วัตถุประสงค์ ขอบเขต และวิธีการดำเนินงาน

1.2.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตาและเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ในการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวบางชนิด ในแง่ของผลตอบสนอง ความไว ข้อจำกัด และการจัดระบบวัดรังสีที่เหมาะสม สำหรับเป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถอ่านผลได้ทันทีและมีความแม่นยำสูง
2. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องวัดความหนาโลหะเคลือบผิวขนาดเล็กที่สามารถอ่านผลได้ถูกต้อง รวดเร็ว และสะดวกในการใช้งาน

1.2.2 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาชิ้นงาน 2 ชนิดเป็นตัวอย่าง คือ ทองคำเคลือบบนทองแดง และดีบุกเคลือบบนเหล็ก เนื่องจากเป็นโลหะเคลือบผิวที่ใช้ประโยชน์กันอยู่กว้างขวาง และสามารถหาชิ้นงานที่มีความหนาของโลหะเคลือบผิวต่างกันได้สะดวก (โลหะเคลือบทองคำที่ใช้กันอยู่ส่วนมากเป็นทองคำเคลือบบนทองแดง เช่น เครื่องประดับ กรอบแว่นตา สายนาฬิกา ฯลฯ ส่วนดีบุกเคลือบบนแผ่นเหล็กมีใช้กันแพร่หลายมาก ในการทำภาชนะใส่ผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น กระจบองนม กระจบองสี กระจบองใส่อาหาร ฯลฯ

1.2.3 วิธีดำเนินการวิจัย แบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

- ก. หาชิ้นงานโลหะเคลือบผิวที่มีความหนาต่างๆ กัน ในที่นี้ คือ ทองคำเคลือบบนทองแดง และดีบุกเคลือบบนเหล็ก ทองคำเคลือบบนทองแดงนั้น ได้ว่าจ้างบริษัทแห่งหนึ่งทำการชุบโดยควบคุมเวลาชุบให้ได้ความหนาต่างๆ กันตามที่ต้องการ ส่วนดีบุกเคลือบบนเหล็กได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทแผ่นเหล็กวิลาสไทย จำกัด ซึ่งมีตัวอย่างมาตรฐานและอุปกรณ์วัดความหนาของดีบุกที่เคลือบบนแผ่นเหล็กโดยใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

- ข. ตรวจสอบความหนาของโลหะเคลือบผิว โดยวิธีการดูภาคตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ตรวจสอบความสม่ำเสมอของความหนาและส่วนประกอบของโลหะเคลือบผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์ เรืองแบบที่ใช้หัววัดรังสีกึ่งตัวนำ
- ค. ศึกษาการจัดระบบวัดรังสีกับต้นกำเนิดรังสีเบตา และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีกระเจิงกับความหนาของโลหะเคลือบผิว
- ง. ศึกษาการจัดระบบวัดรังสีกับต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ เรืองของโลหะเคลือบผิวและโลหะฐานกับความหนา โดยใช้อัตราวัดรังสีแบบพรอพอร์ชันนัล
- จ. เปรียบเทียบความเหมาะสมของเทคนิคทั้งสอง และสรุปผล
- ฉ. ออกแบบและสร้างเครื่องวัดความหนาของโลหะเคลือบผิว

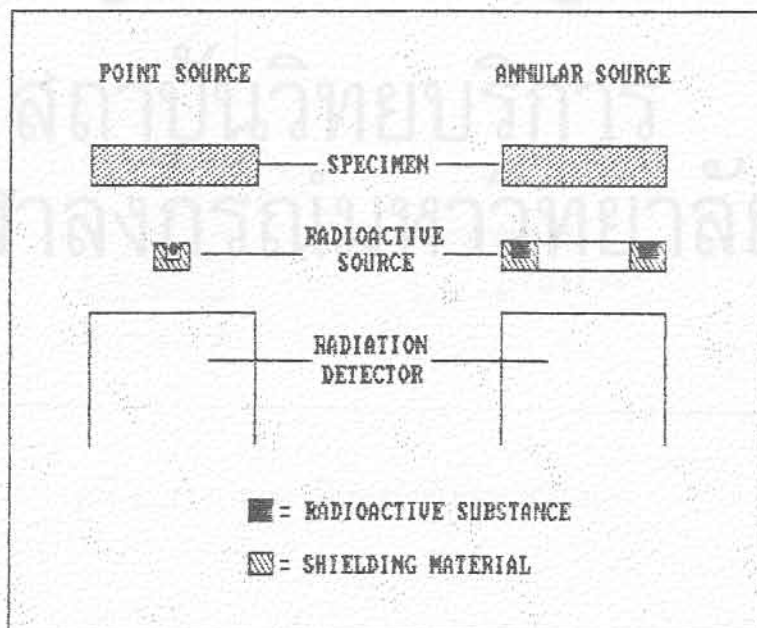
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1.3.1 ได้ทราบข้อมูลทางเทคนิค ในการใช้เทคนิคนิวเคลียร์ต่าง ๆ กัน สำหรับวัดความหนาของโลหะเคลือบผิว
- 1.3.2 เพิ่มขีดความสามารถของผู้วิจัยให้สามารถออกแบบ และสร้างอุปกรณ์วัดความหนาของโลหะเคลือบผิวที่มีความแม่นยำในราคาประหยัด
- 1.3.3 เป็นพื้นฐานในการศึกษาวิจัยและออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้หลักการเดียวกันได้ เช่น การวัดปริมาณแร่ในถ่านหิน การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในโลหะผสม เป็นต้น
- 1.3.4 เป็นการเพิ่มข้อมูลและปรับปรุงอุปกรณ์สำหรับการเรียนการสอนในวิชาที่เกี่ยวข้องกับการวัดรังสี และการประยุกต์เทคนิคนิวเคลียร์ในงานอุตสาหกรรม

เทคนิคนิวเคลียร์กับการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิว

เทคนิคนิวเคลียร์ที่ใช้ในการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิว ได้แก่ เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา รังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมา และเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ เทคนิคเหล่านี้มีความไวสูง ให้ผลรวดเร็ว และสามารถใช้ในการควบคุมความหนาในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องได้ บริษัทบางแห่งในประเทศได้ใช้เทคนิคนิวเคลียร์ในการควบคุมความหนาของโลหะเคลือบผิว เช่น บริษัทแผ่นเหล็กวิลาสไทยจำกัด ใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ในการควบคุมความหนาของคืบที่ชุบบนแผ่นเหล็กในระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีบริษัทที่ใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตาสำหรับวัดความหนาของทองคำในการทำเครื่องประดับและของใช้บางชนิด เช่น แหวน สายนาฬิกา เป็นต้น

เครื่องวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวที่ใช้เทคนิคนิวเคลียร์ประกอบด้วย ส่วนสำคัญ ดังนี้คือ ต้นกำเนิดรังสี หัววัดรังสีกับระบบวัดรังสี และส่วนแสดงผล โดยส่วนใหญ่จะใช้การจัดต้นกำเนิดรังสี หัววัดรังสี และชิ้นงานแบบ backscatter geometry ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งในการใช้เทคนิคนิวเคลียร์เหล่านี้ก็คือ ต้องการแผ่นความหนามาตรฐาน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบอุปกรณ์ เนื่องจากมิได้เป็นวิธีสัมบูรณ์ (absolute method) อย่างเช่นการวัดความหนาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์



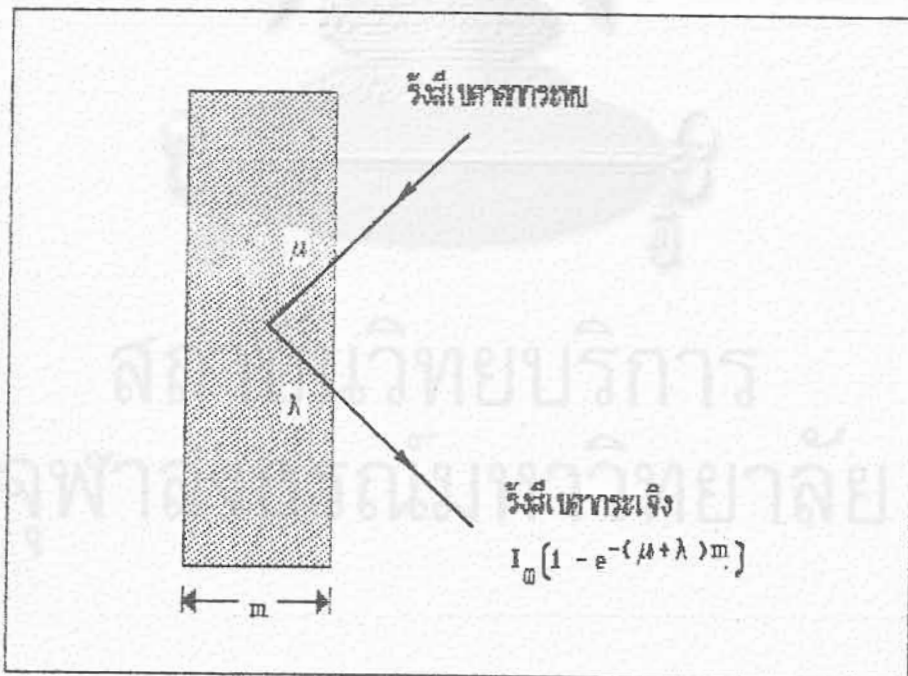
รูปที่ 2.1 การจัดต้นกำเนิดรังสี หัววัดรังสี และชิ้นงานแบบ backscatter geometry

2.1 เทคนิคการกระเจิงกลับรังสีเบตา

ในการกระเจิงของรังสีเบตาจากตัวอย่างผิวเรียบพบว่า ความเข้มของรังสีเบตากระเจิงที่เกิดจากการชนระหว่างรังสีเบตากับอิเล็กตรอนของอะตอม ประมาณได้ว่าไม่ขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของตัวอย่าง แต่การกระเจิงจากการชนระหว่างรังสีเบตากับนิวเคลียสของอะตอมแปรผันตามเลขอะตอม กลไกในการเกิดการกระเจิงของรังสีเบตากับอิเล็กตรอนและกับนิวเคลียสค่อนข้างยุ่งยากสลับซับซ้อน แต่ก็มีสูตรสำเร็จสำหรับการคำนวณได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และแม่นยำ การกระเจิงกลับหมายถึงการกระเจิงที่เปลี่ยนทิศทางไปจากแนวรังสีตกกระทบประมาณ 180 องศา

ความเข้มของรังสีเบตาที่กระเจิงกลับจากตัวอย่างขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ 3 ประการ คือ

- ก. ความหนาของตัวอย่าง
- ข. เลขอะตอมของตัวอย่าง
- ค. พลังงานของรังสีเบตา



รูปที่ 2.2 การกระเจิงของรังสีเบตาจากตัวอย่าง

ถ้าให้ I_m = ความเข้มของรังสีเบตาที่กระเจิงกลับ

I_∞ = ความเข้มสูงสุดของรังสีเบตาที่กระเจิงกลับ เมื่อความหนาของตัวอย่างมีค่าอนันต์ (infinite thickness)

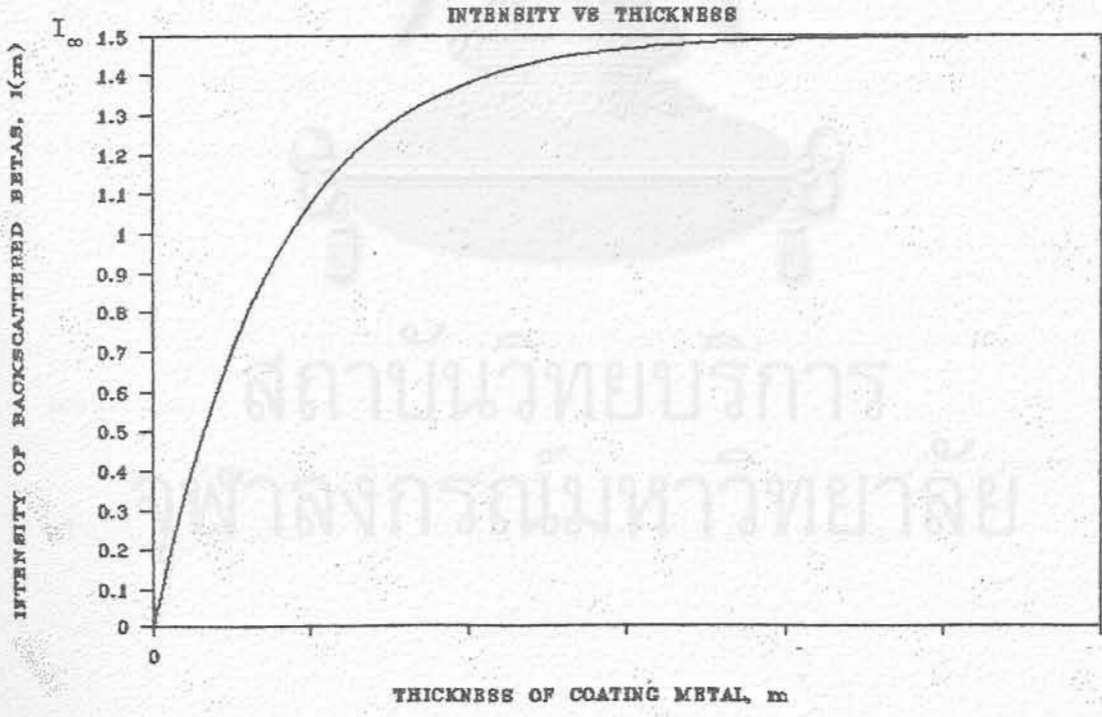
μ = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเบตาตกกระทบ

λ = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเบตากระเจิง

และ m = ความหนาของตัวอย่าง

จะได้

$$I_m = I_\infty [1 - e^{-(\mu + \lambda)m}] \dots\dots\dots(2.1)$$



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเบตาที่กระเจิงกลับกับความหนาของตัวอย่าง

จากสมการ (2.1) ถ้าให้ $m_{\frac{1}{2}}$ เป็น half-thickness ของการดูดกลืนรังสีเบตา สามารถเขียนใหม่ได้เป็น :

$$I_m = I_{\infty} [1 - e^{-2m/m_{\frac{1}{2}}}] \dots\dots\dots(2.2)$$

ถ้าแทนค่า $I = 95\%$ ของ I_{∞} จะได้

$$0.95 I_{\infty} = I_{\infty} [1 - e^{-2m/m_{\frac{1}{2}}}]$$

$$\text{ดังนั้น } m \approx 1.5 m_{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(2.3)$$

เราสามารถประมาณค่าความหนาวิกฤต (critical thickness) ของตัวอย่างได้ โดยใช้สมการ (2.3) ตัวอย่างเช่น จากตารางที่ 2.1 ค่า half-thickness ของ $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ เท่ากับ 120 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นค่ามวลวิกฤตของตัวอย่างมีค่าประมาณ $1.5 \times 120 = 180$ มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะให้ความเข้มรังสีกระเจิง 95% ของความเข้มสูงสุด

ความเข้มสูงสุดของรังสีเบตากระเจิง (I_{∞}) ขึ้นอยู่กับเลขอะตอม (Z) ตาม Tittle's formular ซึ่งให้ไว้ดังนี้

$$G = 1 - e^{-Z/40} \dots\dots\dots(2.4)$$

เมื่อ G คือค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับสูงสุด (Saturation backscatter coefficient) ของรังสีเบตา

สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 20 ขึ้นไป เราสามารถใช้ความสัมพันธ์ง่าย ๆ คือ ความเข้มสูงสุดของรังสีเบตากระเจิง จะแปรผันตามรากที่สองของเลขอะตอม

ตารางที่ 2.1 ต้นกำเนิดรังสีเบตาบางชนิดที่ใช้สำหรับเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา

ไอโซโทปรังสี	ครึ่งชีวิต (ปี)	พลังงานรังสีเบตาสูงสุด (MeV)	Half-Thickness (mg/cm ²)
¹⁴ C	5760	0.16	2.7
¹⁴⁷ Pm	2.6	0.22	4.5
⁸⁵ Kr	10.6	0.67	23
³⁶ Cl	3x10 ⁵	0.76	25
²⁰⁴ Tl	3.6	0.77	28
⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	28	2.28	120

เลเซอร์คอมนอกจากจะมีผลต่อความเข้มรังสีเบตากระเจิงกลับแล้ว ยังมีผลต่อการเลื่อน (shift) ของสเปกตรัมพลังงานรังสีเบตาด้วย (ดังแสดงในรูปที่ 2.5) กล่าวคือ สเปกตรัมของรังสีเบตาที่กระเจิงกลับโดยธาตุที่มีเลเซอร์คอมสูงจะมีพลังงานเฉลี่ยสูงกว่า จากปรากฏการณ์นี้หากใช้แผ่นกรองรังสีที่เหมาะสม หรือ เลือกวัดรังสีในช่วงพลังงานที่เหมาะสม จะทำให้สามารถเพิ่มความไวแก่การใช้ประโยชน์เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตาได้

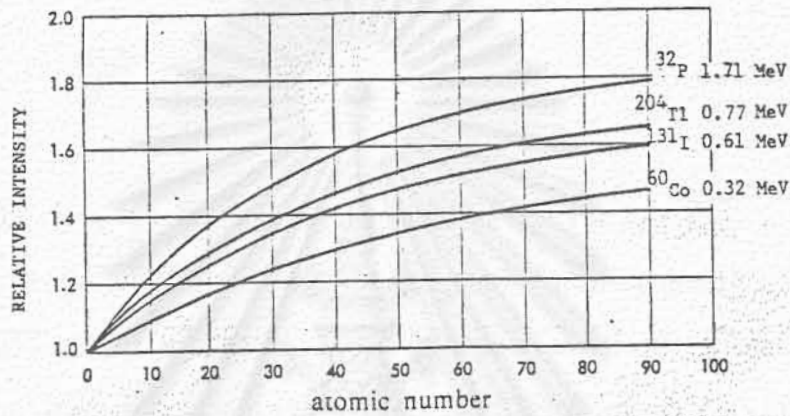
นอกจากนี้ การกระเจิงกลับของรังสีเบตายังขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีเบตาที่ตกกระทบ ตัวอย่าง โดยที่รังสีเบตาพลังงานสูงจะมีการกระเจิงกลับสูงกว่ารังสีเบตาพลังงานต่ำกว่า ดังจะเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 2.4

ในทางปฏิบัติ สมการ (2.3) มีประโยชน์ในการคำนวณค่าความหนาวิกฤตของตัวอย่าง ซึ่งจะทำให้ทราบขีดจำกัดการใช้งานและทำให้ใช้ประโยชน์อย่างถูกต้อง ในกรณีที่ต้องการใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตาวัดความหนาวัสดุหรือโลหะเคลือบผิว ค่าความหนาวิกฤตจะบอกให้ทราบถึงความหนาสูงสุดที่สามารถใช้งานได้สำหรับต้นกำเนิดรังสีเบตาแต่ละชนิด ชนิด ในกรณีที่ต้องการวัดรังสีเบตากระเจิงเพื่อคู่อธิพลจากเลเซอร์คอม เช่น ในการวัดส่วนผสมผสมของโลหะ การวัดปริมาณเข้าในด้านหิน ความหนาวิกฤตจะบ่งบอกความหนาของตัวอย่างที่ต้องใช้

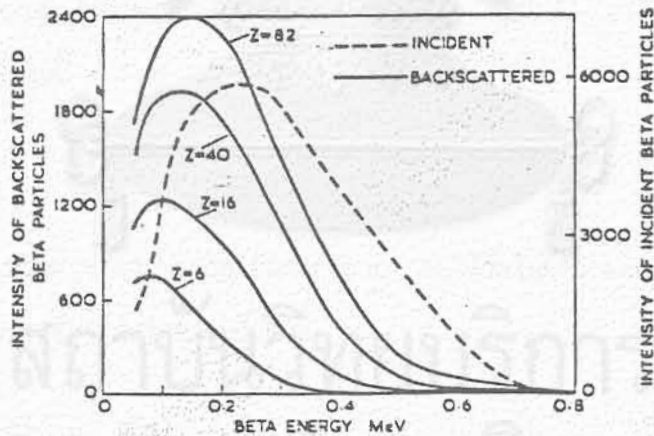
ตารางที่ 2.2 ค่า Saturation Backscatter Coefficient (G) สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอม 1-100 (คำนวณจาก Tittle's Formular)

ATOMIC NO. (Z)	SATURATION BACKSCAT- TER COEFFICIENT, G	ATOMIC NO. (Z)	SATURATION BACKSCAT- TER COEFFICIENT, G
1	0.024690	51	0.720569
2	0.048771	52	0.727468
3	0.072257	53	0.734197
4	0.095163	54	0.740760
5	0.117503	55	0.747160
6	0.139292	56	0.753403
7	0.160543	57	0.759492
8	0.181269	58	0.765430
9	0.201484	59	0.771221
10	0.221199	60	0.776870
11	0.240428	61	0.782379
12	0.259182	62	0.787752
13	0.277473	63	0.792992
14	0.295312	64	0.798103
15	0.312711	65	0.803088
16	0.329680	66	0.807950
17	0.346230	67	0.812692
18	0.362372	68	0.817316
19	0.378115	69	0.821827
20	0.393469	70	0.826226
21	0.408445	71	0.830517
22	0.423050	72	0.834701
23	0.437295	73	0.838782
24	0.451188	74	0.842763
25	0.464739	75	0.846645
26	0.477954	76	0.850431
27	0.490844	77	0.854124
28	0.503415	78	0.857726
29	0.515675	79	0.861239
30	0.527633	80	0.864665
31	0.539296	81	0.868006
32	0.550671	82	0.871265
33	0.561765	83	0.874444
34	0.572585	84	0.877544
35	0.583138	85	0.880567
36	0.593430	86	0.883516
37	0.603469	87	0.886392
38	0.613259	88	0.889197
39	0.622808	89	0.891933
40	0.632121	90	0.894601
41	0.641204	91	0.897203
42	0.650062	92	0.899741
43	0.658702	93	0.902217
44	0.667129	94	0.904631
45	0.675348	95	0.906986
46	0.683363	96	0.909282
47	0.691181	97	0.911522
48	0.698806	98	0.913706
49	0.706242	99	0.915837
50	0.713495	100	0.917915

ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงสูงสุดของรังสีเบตาตามสมการ (2.4) มีประโยชน์ในการคำนวณความเข้มรังสีเบตาที่กระเจิงจากธาตุที่มีเลขอะตอมต่าง ๆ กันได้ เช่น ถ้าวัดรังสีเบตากระเจิงกลับจากทองแดงได้ 10,000 ต่อหน้าที่ สามารถคำนวณได้ว่า ถ้าวัดทองคำจะได้ความเข้มรังสีเบตากระเจิงกลับสูงสุด เท่ากับ $10,000 \times \frac{G_{Au}}{G_{Cu}} = 10,000 \times \frac{0.861238}{0.515675} \approx 167000$ ต่อหน้าที่ เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสูงสุดของรังสีเบตากระเจิงกลับกับเลขอะตอม



รูปที่ 2.5 อิทธิพลของเลขอะตอมต่อการเลื่อนของสเปกตรัมพลังงานรังสีเบตากระเจิงกลับ (ต้นกำเนิดรังสี Tl-204)

2.1.1 การคำนวณทางสถิติในการนับรังสีเบตากระเจิงกลับ

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, σ) ในการนับรังสีครั้งเดียวสามารถคำนวณได้จาก

$$\sigma(n) \approx \sqrt{n} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

เมื่อ $\sigma(n)$ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

n เป็นค่าจำนวนนับรังสี

ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (relative standard deviation)

สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\sigma(n)}{n} = \frac{\sqrt{n}}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

ถ้า $n = 100$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์จะมีค่า $= 1/\sqrt{100} = 0.1$ หรือเท่ากับ 10% ของค่าจำนวนนับรังสี ถ้า $n = 10,000$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์จะมีค่า $= 1/\sqrt{10,000} = 0.01$ หรือเท่ากับ 1% ของค่าจำนวนนับรังสี การนับรังสีให้มีค่าจำนวนนับรังสีสะสมสูงจะทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ลดลง ทำให้มีความแม่นยำ (precision) สูงขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับรังสี (counting rate, R) จำนวนนับรังสี (n) และเวลา (t) เป็นดังนี้

$$R = \frac{n}{t} \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

ในกรณีที่ t สามารถวัดได้แม่นยำมาก คิดได้ว่าไม่มีความผิดพลาดจาก t ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตรานับรังสีจะเป็นดังนี้

$$\sigma(R) = \frac{\sigma(n)}{t} \approx \frac{\sqrt{n}}{t} = \frac{Rt}{t} = \frac{R}{t} \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

ในการวัดความหนาด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับรังสีเบตา อัตรานับรังสีขึ้นอยู่กับความหนาของตัวอย่างตามสมการ (1) ถ้าให้ $\mu + \lambda$ ค่าคงที่ใหม่ = k สามารถเขียนสมการ (1) ใหม่ได้เป็น

$$R_m = R_\infty (1 - e^{-km}) \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

R_m และ R_∞ เป็นอัตรานับรังสีที่ความหนา m และความหนานันต์ ตามลำดับ ดังนั้นความผิดพลาดในการวัดความหนา m สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\sigma(m)}{\sigma(R)} = \frac{\partial m}{\partial R}$$

$$\therefore \frac{\sigma(m)}{m} = \frac{1}{m} \frac{m}{R} \cdot \sigma(R)$$

แทนค่า $\sigma(R)$ จากสมการ (9) และ R จากสมการ (10) จะได้

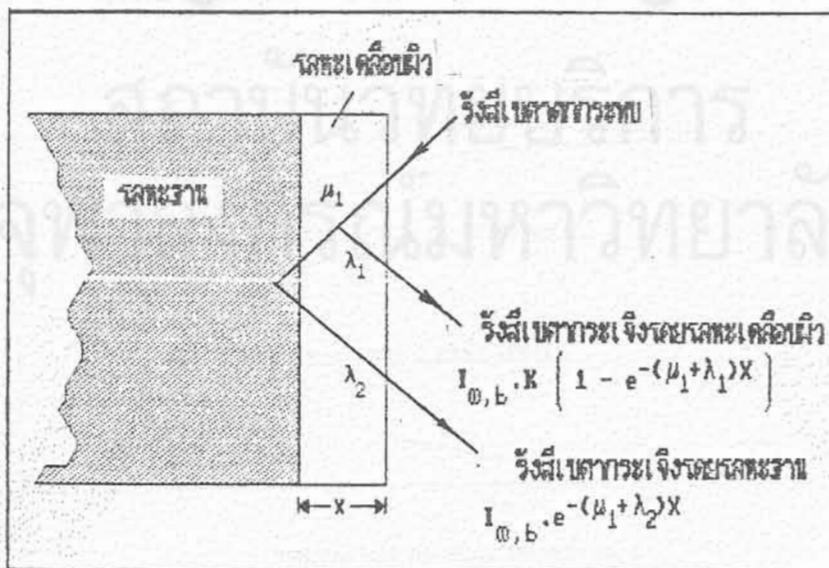
$$\frac{\sigma(m)}{m} = \frac{1}{m} \frac{e^{km}}{R_\infty k} \frac{R_\infty(1-e^{-km})}{t} \dots\dots(2.10)$$

ค่าต่ำสุดของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพันธ์ตามสมการ (11) หาได้โดย differentiate สมการ (11) เทียบกับค่า k และให้เท่ากับศูนย์ จะได้

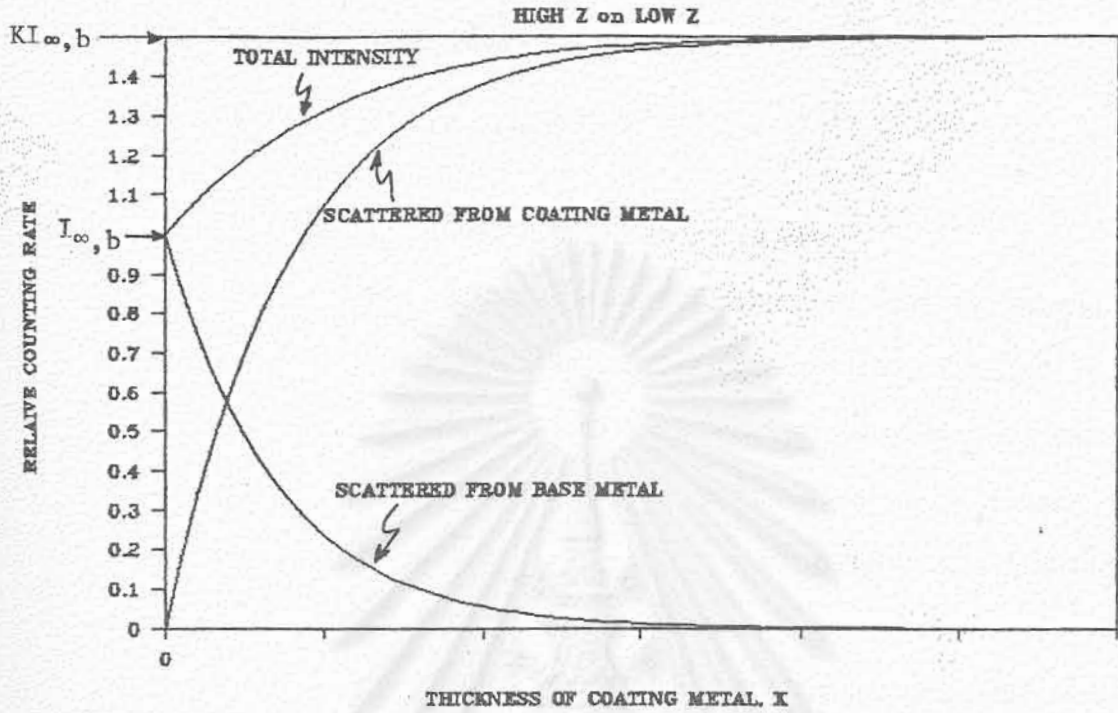
$$km = \frac{2e^{km}(e^{km}-1)}{e^{km}(2e^{km}-1)}$$

ซึ่งจะหาค่า km ได้ = 0.65 นั่นคือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพันธ์มีค่าต่ำสุด เมื่อ $km = 0.65$

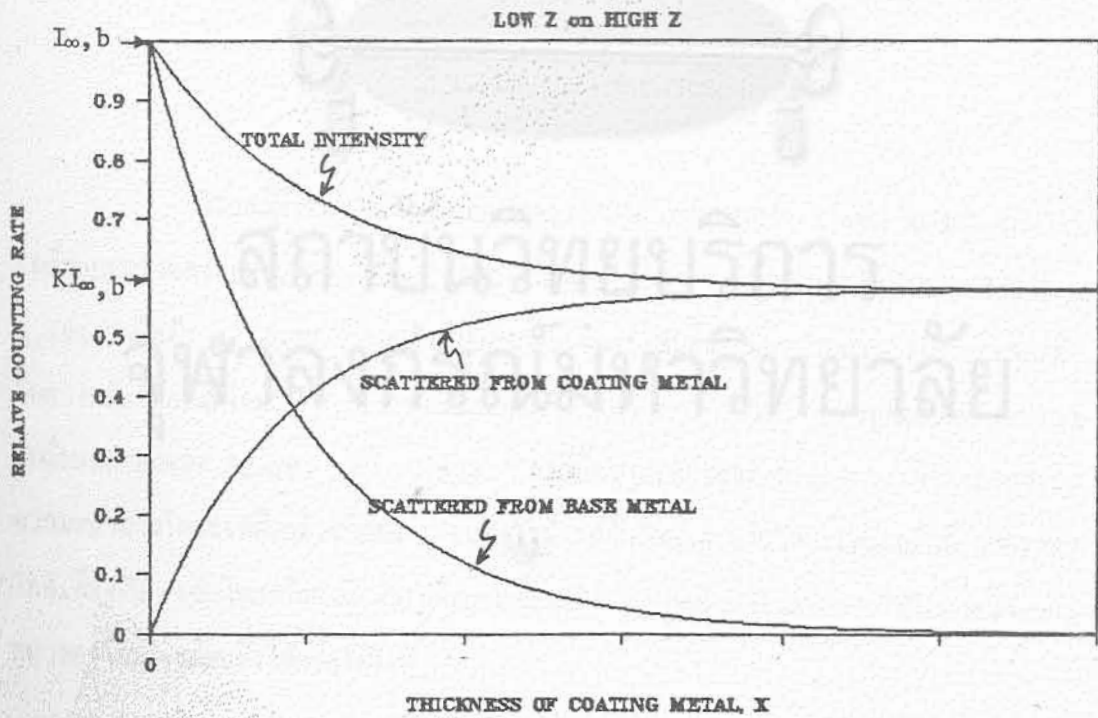
2.1.2 การวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวโดยใช้เทคนิคการกระเจิงกลับรังสีเบตา



รูปที่ 2.6 การกระเจิงกลับของรังสีเบตาจากโลหะเคลือบผิวและโลหะฐาน



(ก) เมื่อโลหะหนักเคลือบบนโลหะเบา



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเบตากระเจิงกลับกับความหนาของโลหะเคลือบผิว

ความเข้มรังสีเบตาที่กระเจิงกลับจากโลหะเคลือบผิว และโลหะฐานที่มีความหนา
เกินความหนาวิกฤตเป็นไปตามสมการดังนี้

$$I_x = I_{\infty, b} [K 1 - e^{-(\mu_1 + \lambda_1)X} + e^{-(\mu_1 + \lambda_2)X}] \dots (2.11)$$

เมื่อ I_x เป็นความเข้มรังสีเบตากระเจิงกลับ

$I_{\infty, b}$ เป็นความเข้มสูงสุดของรังสีเบตาที่กระเจิงกลับจากโลหะฐาน
(เมื่อไม่มีโลหะเคลือบผิวและโลหะฐานมีความหนานันต์)

K เป็นอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับสูงสุดของโลหะ
เคลือบผิวต่อโลหะฐาน นั่นคือ $G(\text{coating}) / G(\text{base})$

$\therefore I_{\infty, b} \cdot K = I_{\infty, c} =$ ความเข้มสูงสุดของรังสีเบตาที่
กระเจิงจากโลหะเคลือบผิว

μ_1 เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเบตาตกกระทบของโลหะเคลือบผิว

λ_1 เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเบตาที่กระเจิงจากโลหะเคลือบผิว
ของโลหะเคลือบผิว

λ_2 เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเบตาที่กระเจิงจากโลหะฐานของ
โลหะเคลือบผิว

และ X เป็นความหนาของโลหะเคลือบผิว

ในกรณีโลหะหนักเคลือบบนโลหะเบา K มีค่ามากกว่า 1 เช่น ทองคำ ($Z=79$)

- เคลือบบนทองแดง ($Z = 29$) $K = 1.670$ ที่บุก ($Z=50$) เคลือบบนเหล็ก ($Z = 26$) $K = 1.494$ เป็นต้น ความเข้มของรังสีเบตากระเจิงจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของโลหะเคลือบผิวในทางกลับกันกรณีโลหะเบาเคลือบบนโลหะหนัก ค่า $K = 0.976$ อลูมิเนียม ($Z=13$) เคลือบบนทองแดง ($Z=29$) $K = 0.538$ กรณีความเข้มของรังสีเบตากระเจิงจะลดลงเมื่อความหนาของโลหะเคลือบผิวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าโลหะฐานกับโลหะเคลือบผิวมีเลขอะตอมใกล้เคียงกัน เช่นในกรณีของนิกเกิลเคลือบบนทองแดง เทคนิคนี้ก็ไม่สามารถใช้ในการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวได้หรือได้ไม่ดี



ตารางที่ 2.3* ตันกำเนิดรังสีเบตาบางชนิดและช่วงการใช้งานในการวัดความหนาของทองคำ
ที่เคลือบบนทองแดงด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา

ตันกำเนิดรังสี	พลังงานสูงสุดของ รังสีเบตา (meV)	ความหนาของทองคำบนทองแดง (μ)	
		ช่วงที่ใช้งานได้	ช่วงที่ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง
^{14}C	0.16	0 - 1.9	0.26 - 1.6
^{147}Pm	0.22	0.1 - 3	0.4 - 2.5
^{204}Tl	0.77	1.3 - 15	2 - 13
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	2.28	5 - 30	8 - 25

* จาก "Thickness and Hardness Measurements of Electrodeposits" โดย
T. Cullen และ P. Petrana ใน PLATING : Journal of American Electro-
depositer's Society (September 1967) หน้า 1039-1043.

2.2 เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา

การวัดความหนาด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา อาศัยหลัก
การเกิดอันตรกิริยาแบบต่าง ๆ ของรังสีประเภทนี้กับวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีและเลข
อะตอมของวัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (photo-
electric attenuation coefficient, μ_{pe}) จะแปรผันตามกำลังสี่ของเลขอะตอม
(Z^4) และแปรผกผันกับกำลังสามของพลังงานรังสี (E^3) ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของอันตร
กิริยาคอมป์ตัน เอฟเฟกต์ (Compton attenuation coefficient, μ_c) ไม่ขึ้นอยู่กับเลข
อะตอม แต่จะแปรผกผันกับพลังงานรังสี เมื่อพลังงานรังสีสูง (มากกว่า 1 MeV) การชนแบบ
คอมป์ตันจะทำให้มีการสูญเสียพลังงานมาก ในทางกลับกันเมื่อรังสีมีพลังงานต่ำ (น้อยกว่า 10
keV) จะสูญเสียพลังงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การชนของรังสีกับอะตอมของวัสดุอาจไม่มีการ
สูญเสียพลังงานเลย ซึ่งเรียกรวมกันว่า "การกระเจิงโคฮีเรนต์ (coherent scat-
tering)" ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของการกระเจิงโคฮีเรนต์ ขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของวัสดุ
แต่มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการกระเจิงแบบคอมป์ตัน ยกเว้นในกรณีที่รังสีน้อยกว่า 100 keV
ลงมา

ความเข้มของรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาที่กระเจิงจากตัวอย่างขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้

ก. ความหนาของตัวอย่าง

ข. เลขอะตอมของธาตุนั้นและธาตุที่เป็นส่วนประกอบ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีที่กระเจิงกลับกับความหนาของตัวอย่างหนึ่ง จะ

เป็นดังนี้

$$I(m) = k I_0 \left(\frac{\mu_c + \mu_{coh}}{\mu + \mu'} \right) [1 - e^{-(\mu + \mu') m}] \dots(2.12)$$

เมื่อ I_m เป็นความเข้มรังสีที่กระเจิงจากตัวอย่างที่มีความหนา m

μ_c และ μ_{coh} เป็นสัมประสิทธิ์เชิงมวลของการทะลุผ่าน (mass attenuation coefficient) ของอันตรกิริยาแบบคอมป์ตัน และ โครซีเรนท ตามลำดับ

k เป็นประสิทธิภาพในการวัดรังสี

I_0 เป็นความเข้มรังสีตกกระทบ

μ และ μ' เป็นสัมประสิทธิ์เชิงมวลรวมของการทะลุผ่าน (total mass attenuation coefficient) ของตัวอย่างที่พลังงานรังสีตกกระทบ และรังสีที่กระเจิงตามลำดับ ($\mu = \mu_{pe} + \mu_c + \mu_{coh}$ และ $\mu' = \mu'_{pe} + \mu'_c + \mu'_{coh}$)

กราฟของสมการ (2.12) มีลักษณะเช่นเดียวกับของสมการ (2.1) ดังแสดงในรูปที่

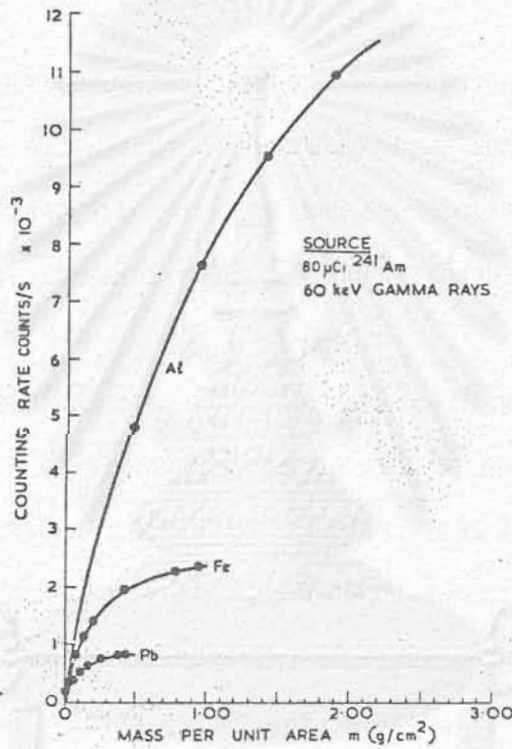
2.2 เมื่อความหนาของตัวอย่างมีค่ามาก ๆ จะให้ความเข้มของรังสีสะท้อนสูงสุด (saturation intensity, I_{sat}) ดังนั้นสมการ (2.12) จะเหลือเพียง

$$I_{sat} = k I_0 \frac{\mu_c + \mu_{coh}}{\mu + \mu'} \dots\dots\dots(2.13)$$

ถ้า I มีค่าเท่ากับ 95% ของ I_{sat} จะได้

$$m \approx \frac{3}{\mu + \mu'} \dots\dots\dots(2.14)$$

สมการ (2.14) ใช้ในการประมาณค่าความหนาวิกฤตของตัวอย่าง (m_{sat}) ที่จะทำให้ความเข้มการสะท้อนสูงสุด I_{sat} และ m_{sat} ขึ้นอยู่กับทั้งพลังงานของรังสีและเลขอะตอมของตัวอย่าง รูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นอิทธิพลของเลขอะตอมและความหนาของตัวอย่างต่อความเข้มรังสีที่กระเจิงจากรังสีแกมมาพลังงาน 60 keV ของอะเมริเซียม-241



รูปที่ 2.8 อิทธิพลของเลขอะตอมและความหนาของตัวอย่างต่อความเข้มของรังสีที่กระเจิงจากรังสีแกมมาพลังงาน 60 keV

การวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา มีลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของความเข้มรังสีที่กระเจิงกับความหนาของโลหะเคลือบผิว ทำนองเดียวกับเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา ดังสมการที่ (2.11) และรูปที่ 2.7 โดยต่างกันตรงที่ความเข้มรังสีเบตากระเจิงกลับแปรผันตรงตามเลขอะตอมของตัวอย่างส่วนความเข้มรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์กระเจิงกลับแปรผกผันกับเลขอะตอม

ถ้าให้ $I_{sat,b}$ เป็นความเข้มสูงสุดของรังสีที่กระเจิงกลับจากโลหะฐาน

$I_{sat,c}$ เป็นความเข้มสูงสุดของรังสีที่กระเจิงกลับจากโลหะเคลือบผิว

μ_i และ μ_s เป็นสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านโลหะเคลือบผิวของรังสีตกกระทบและรังสีกระเจิง

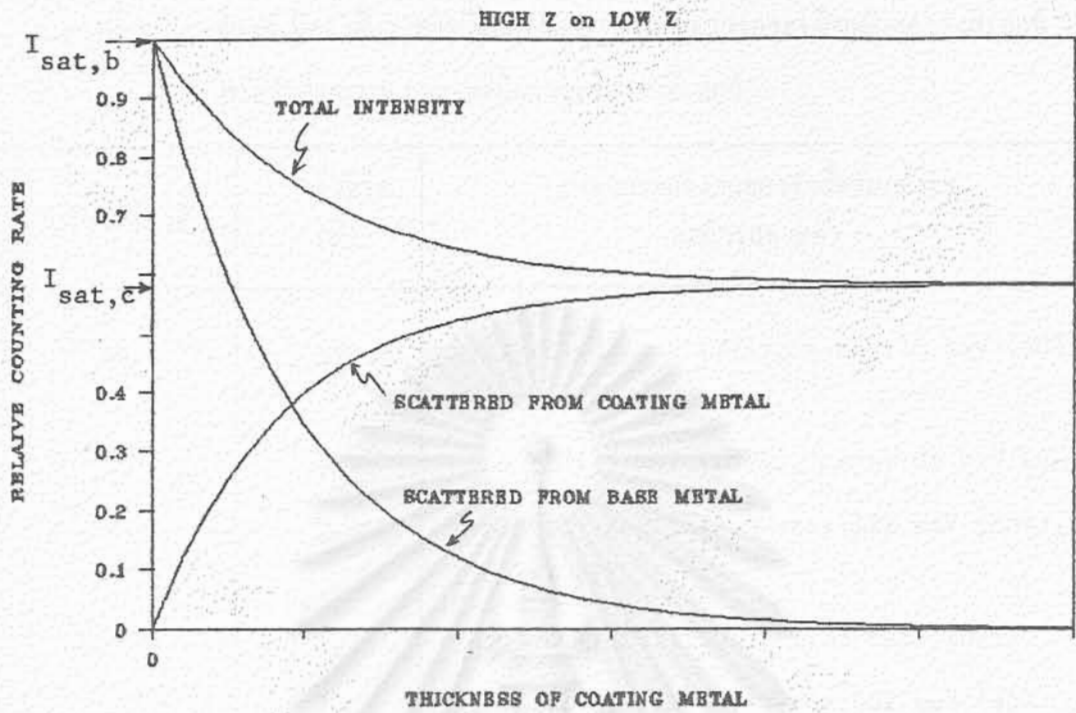
$I(x)$ เป็นความเข้มรวมของรังสีกระเจิงจากโลหะฐานและโลหะเคลือบผิว ความหนา X

$$I(x) = K[I_{sat,c}(1 - e^{-(\mu_i + \mu_s)X}) + I_{sat,b} \cdot e^{-(\mu_i + \mu_s)X}] \dots (2.15)$$

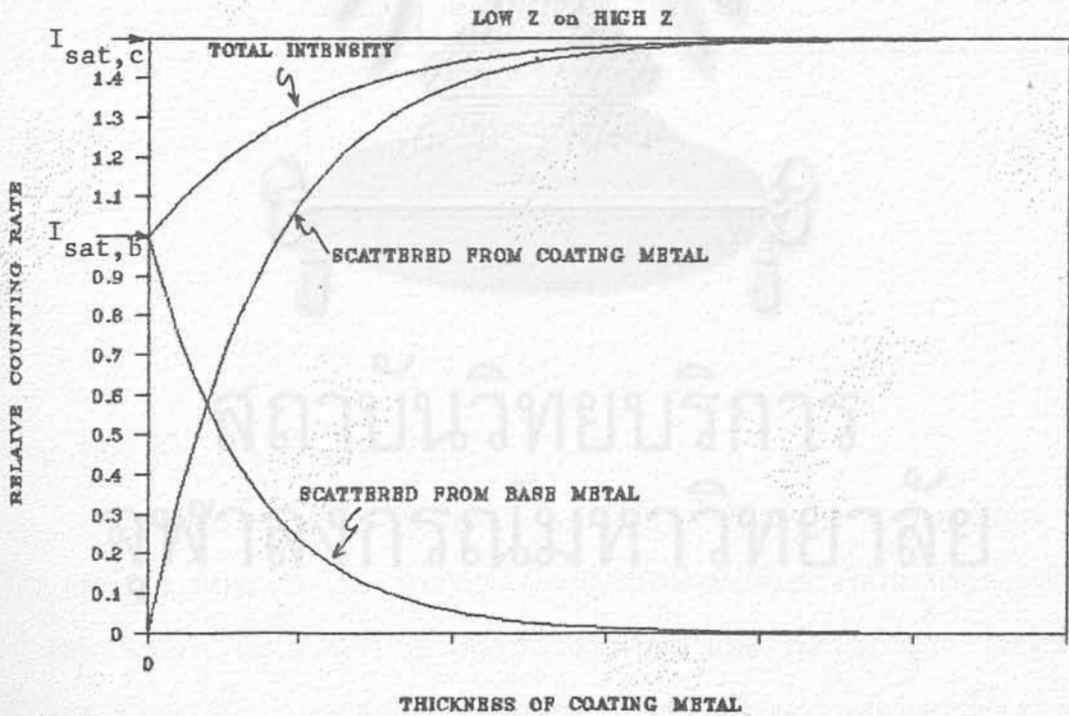
กรณีที่เลขอะตอมของโลหะเคลือบผิวสูงกว่าโลหะฐาน ความเข้มของรังสีกระเจิงจะลดลงตามความหนาของโลหะเคลือบผิว ในทางกลับกันกรณีที่โลหะเคลือบผิวมีเลขอะตอมต่ำกว่าโลหะฐาน ความเข้มรังสีกระเจิงจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของโลหะเคลือบผิว เมื่อโลหะเคลือบผิวและโลหะฐานมีเลขอะตอมใกล้เคียงกัน เทคนิคนี้จะไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ดีพอที่จะใช้ประโยชน์ได้

พลังงานของรังสีกระเจิงกลับมีความสำคัญต่อข้อจำกัดในการใช้งานมากเนื่องจากผลจากการกระเจิงแบบคอมป์ตันทำให้รังสีมีพลังงานลดลง จึงมีผลต่อการเพิ่มของสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีกระเจิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่พลังงานสูงกว่า 1 MeV พลังงานของรังสีกระเจิงจะลดลงมาก ตัวอย่างเช่น เมื่อใช้โคบอลต์-60 รังสีตกกระทบมีพลังงาน 1.77 และ 1.33 MeV ส่วนรังสีกระเจิงมีพลังงานเพียงประมาณ 0.2 MeV เท่านั้น ความหนาสูงสุดของตัวอย่างที่สามารถวัดได้ คือ เหล็กกราว 2 เซนติเมตร หรือตะกั่วกราว 3 มิลลิเมตร แต่ในการใช้โคบอลต์-60 อิทธิพลของเลขอะตอมต่อความเข้มรังสีกระเจิงมีน้อยจึงใช้ประโยชน์ได้ต่อเมื่อเลขอะตอมของโลหะฐานกับโลหะเคลือบผิวต่างกันมาก ช่วงรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ระหว่าง 10-100 keV เป็นช่วงที่ใช้ประโยชน์ได้ดีเพราะเลขอะตอมมีอิทธิพลมากต่อความเข้มรังสีกระเจิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเลขอะตอมต่ำ ๆ และช่วงกลาง ๆ

นอกจากนี้มุมกระเจิงกลับก็มีผลต่อความเข้มรังสีด้วย มุมกระเจิงกลับ 180 องศา เป็นมุมที่ทำให้ความเข้มของรังสีกระเจิงกลับสูงสุด ดังนั้นการจัดระบบแบบ backscatter geometry ตามรูปที่ 2.1 จึงให้ประสิทธิภาพในการวัดรังสีกระเจิงกลับสูงสุด



(ก) เมื่อโลหะหนักเคลือบบนโลหะเบา



(ข) เมื่อโลหะเบาเคลือบบนโลหะหนัก

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีแกมมากระเจิงกลับกับความหนาของโลหะเคลือบผิว

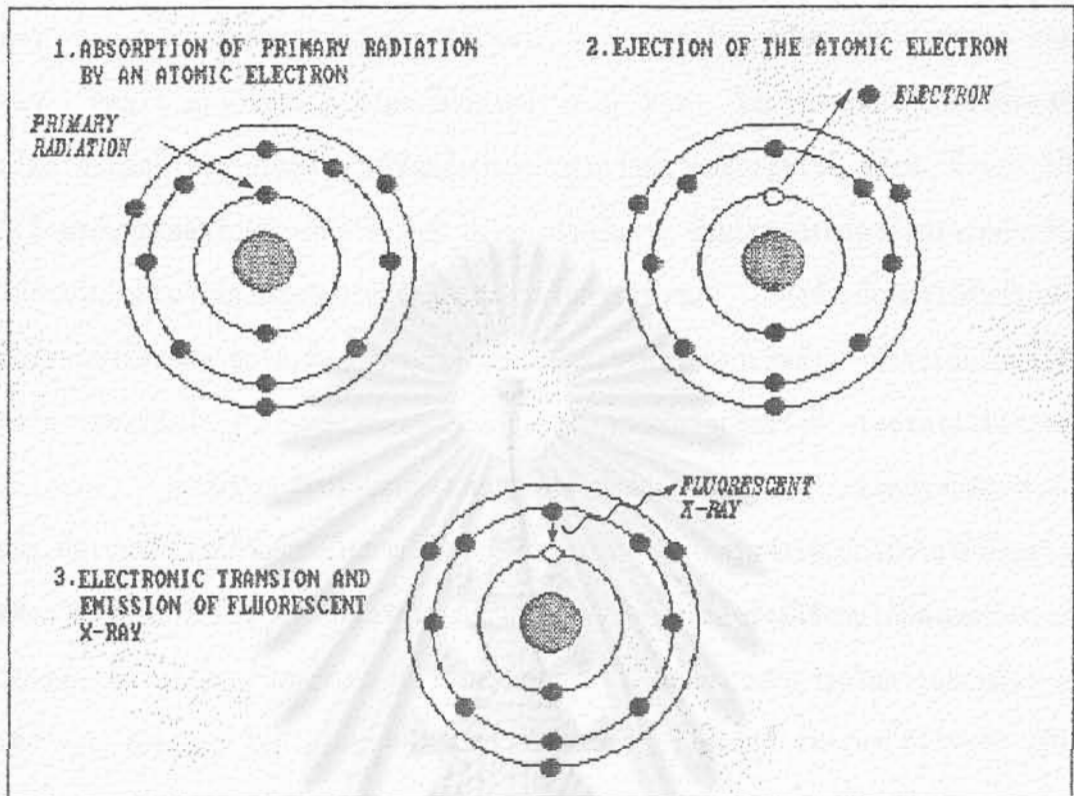
ตารางที่ 2.4 ต้นกำเนิดรังสีบางชนิดที่นิยมใช้สำหรับเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมา และเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

ไอโซโทปรังสี	ครึ่งชีวิต (ปี)	ชนิดและพลังงานของรังสีพร้อมทั้ง % ต่อการสลายตัว
^{241}Am	458	x-ray:14-22 keV (37%), γ -ray:26 keV (40%), 60 keV (36%)
^{109}Cd	1.3	x-ray:22-25 keV (107%), γ -ray:88 keV (4%)
^{57}Co	0.7	x-ray:6.4 keV(51%), γ -ray:122 keV (85%), 136 keV (11%)
* ^{60}Co	5.3	x-ray:1.17 MeV(100%), 1.33 MeV (100%)
* ^{137}Cs	30	x-ray:32 keV (10%), γ -ray:662 keV (95%)
^{55}Fe	2.6	x-ray:5.9 keV (26%)
^{238}Pu	80	x-ray:12-20 keV (10%)

* ใช้สำหรับเทคนิคการกระเจิงกลับเท่านั้น

2.3 เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์เป็นเทคนิควิเคราะห์ธาตุที่ใช้กันแพร่หลายมากเทคนิคหนึ่ง ด้วยเหตุที่มีข้อดีบางประการ เช่น สามารถวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่างได้ไม่ว่าเป็นของแข็งของเหลว หรือก๊าซ ให้ผลรวดเร็ว ใช้วิเคราะห์ในงานภาคสนามได้และมีความไวสูง เทคนิคนี้ใช้วิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่เลขอะตอม 9 คือฟลูออรีน ขึ้นไป แต่ในงานภาคสนามการวิเคราะห์ธาตุเลขอะตอมตั้งแต่ 15 (คือฟอสฟอรัส) ลงไป ทำได้ยากเนื่องจากรังสีเอกซ์เรืองมีพลังงานต่ำมาก (2 keV ลงไป)



รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงการเกิดรังสีเอกซ์เรือง

หลักการของเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ ก็คือ ทำให้อิเล็กตรอนวงโคจรใน ๑ วง (โคจร K หรือ L) หลุดออกนอกอะตอม โดยการยิงอนุภาคจากภายนอกเข้าไป เช่น อิเล็กตรอน โปรตอน รังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมา เมื่ออิเล็กตรอนวงโคจรในหลุดออกไปจะทำให้ อิเล็กตรอนวงนอก ๆ ซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่ากระโดดลงไปแทนที่ แล้วปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นของรังสีเอกซ์ ซึ่งเรียกว่า "รังสีเอกซ์เรือง (fluorescent x-ray)" หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray)" เนื่องจากการที่รังสีเอกซ์เรืองมีค่าพลังงานเฉพาะสำหรับธาตุแต่ละธาตุ ซึ่งทำให้สามารถใช้ในการวิเคราะห์ธาตุได้ โดยที่พลังงานจะเป็นตัวบ่งชี้ของธาตุและความเข้มรังสีเอกซ์เรืองเป็นตัวบ่งชี้ความเข้มข้นหรือปริมาณของธาตุ

จากตารางที่ 1 ในภาคผนวก แสดงให้เห็นว่า K x-rays มีพลังงานสูงสุดราว 140 keV L x-rays มีพลังงานสูงสุดราว 25 keV K absorption edge มีค่าสูงสุดราว 142 keV และ L absorption edge มีค่าสูงสุดราว 28 keV ในการกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์ เรือง จะต้องมีการถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนสูงกว่าค่า absorption edge จึงจะทำให้ อิเล็กตรอนหลุดออกไปแล้วเกิดรังสีเอกซ์ เรืองของธาตุนั้น ๆ ด้วยเหตุว่าเครื่องวิเคราะห์สำหรับ ใช้งานในภาคสนามต้องมีขนาดกะทัดรัดและสะดวกในการใช้งาน จึงจำเป็นต้องใช้ต้นกำเนิด รังสีเอกซ์หรือแกมมาขนาดเล็ก สำหรับหัววัดรังสีและระบบวิเคราะห์พลังงานนั้นจะเป็นแบบที่ใช้ หัววัดพรอพอร์ชันนัล (proportional counter) หรือหัววัดเรืองรังสี (scintillation counter) ต่อกับระบบวิเคราะห์พลังงานแบบที่ไม่ใช้ผลึกแยกพลังงาน (nondispersion) เมื่อเป็นเช่นนี้ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานมากขึ้น เช่น หัววัดพรอพอร์ชันนัลใช้งานได้ดีในช่วง พลังงานรังสีเอกซ์ เรือง 2-40 keV โดยประมาณ หัววัดแบบเรืองรังสีใช้งานได้ดีตั้งแต่ประมาณ 20 keV ขึ้นไป (ขึ้นอยู่กับความหนาของผลึกเรืองรังสี) แต่มีความสามารถในการแยกพลังงาน (ค่า resolution) ไม่ดี ต้องอาศัยเทคนิคการใช้แผ่นกรองรังสีเอกซ์ (x-ray filter) เข้า ช่วย

ความเข้มรังสีเอกซ์ เรืองของธาตุนั้นๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้

- ก ความหนาของตัวอย่าง
- ข ความเข้มข้นของธาตุนั้น และธาตุที่เป็นส่วนประกอบ

ความเข้มของรังสีเอกซ์ เรืองของธาตุที่สนใจกับความหนาของตัวอย่าง มีความสัมพันธ์ กันตามสมการ ดังนี้

$$I_f = I_{sat} [1 - e^{-(\mu_e + \mu_f) m}] \dots\dots\dots(2.16)$$

เมื่อ I_f เป็นความเข้มรังสีเอกซ์ เรืองของธาตุที่สนใจเมื่อตัวอย่างมีความ หนา m

I_{sat} เป็นความเข้มรังสีเอกซ์ เรืองสูงสุดของธาตุที่สนใจเมื่อตัวอย่างมี ความหนานั้นต์

μ_e และ μ_f เป็นสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านเชิงมวลของตัวอย่างต่อรังสีปฐมภูมิ ที่ใช้กระตุ้น และรังสีเอกซ์ เรืองตามลำดับ

ทำนองเดียวกับเทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาที่ผ่านมา เมื่อ I มีค่าเท่ากับ 95% ของ I_{sat} จะได้

$$m = \frac{3}{\mu_e + \mu_f} \dots\dots(2.17)$$

ซึ่งจะใช้คำนวณค่า saturation thickness (m_{sat}) ของตัวอย่าง

ในการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ ทำให้ตัวอย่างมีความหนาของโลหะเคลือบผิว = x โลหะฐานมีความหนานั้นจะได้

$$I_{f,c} = I_{sat,c} [1 - e^{-(\mu_e + \mu_{f,c}) X}] \dots\dots(2.18)$$

$$I_{f,b} = I_{sat,b} [1 - e^{-(\mu_e + \mu_{f,b}) X}] \dots\dots(2.19)$$

เมื่อ $I_{f,c}$ และ $I_{f,b}$ เป็นความเข้มรังสีเอกซ์เรืองของโลหะเคลือบผิวและโลหะฐานตามลำดับ

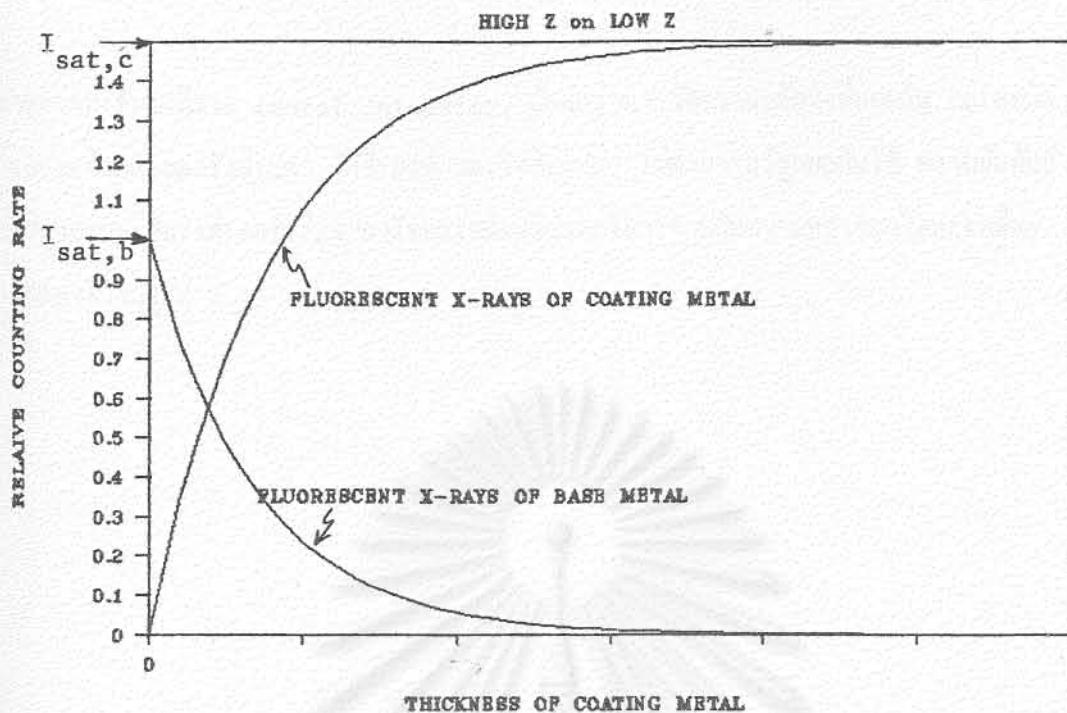
$I_{sat,c}$ เป็นความเข้มสูงสุดของโลหะเคลือบผิวเมื่อโลหะเคลือบผิวมีความหนานั้น

$I_{sat,b}$ เป็นความเข้มสูงสุดของโลหะฐานเมื่อไม่มีโลหะเคลือบผิวและโลหะฐานมีความหนานั้น

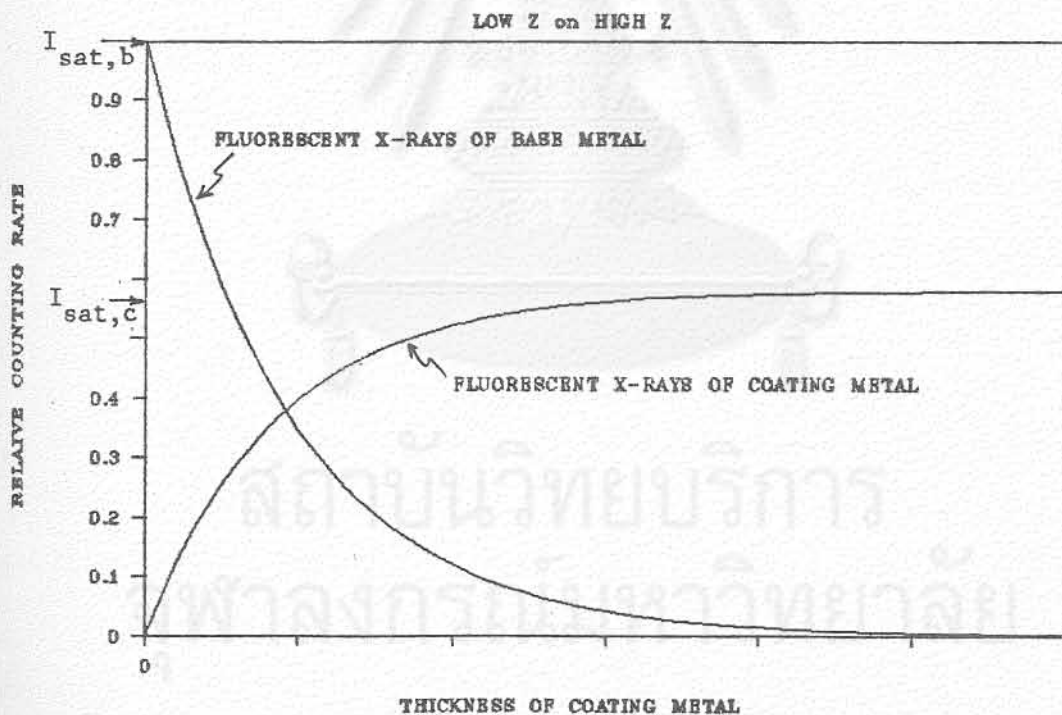
μ_e และ $\mu_{f,c}$ เป็นสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านเชิงมวลของโลหะเคลือบผิวต่อรังสีปฐมภูมิที่ใช้กระตุ้น และรังสีเอกซ์เรืองของโลหะเคลือบผิวตามลำดับ

$\mu_{f,b}$ เป็นสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านเชิงมวลของโลหะเคลือบผิวต่อรังสีเอกซ์เรืองของโลหะฐาน

การที่รังสีเอกซ์เรืองของโลหะเคลือบผิวและโลหะฐานมีพลังงานต่างกัน เป็นผลให้สามารถวัดความเข้มรังสีแยกกันได้ ซึ่งทำให้เทคนิคนี้มีความไวดีกว่า เพราะสามารถเลือกวัดรังสีเอกซ์เรืองที่เหมาะสมกว่า หากพิจารณากราฟรูปที่ 2.7 และ 2.9 จะเห็นได้ชัดว่าความชันของ



(ก) เมื่อโลหะหนักเคลือบบนโลหะเบา



(ข) เมื่อโลหะเบาเคลือบบนโลหะหนัก

รูปที่ 2.11 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์เรืองของโลหะเคลือบผิว และโลหะฐานกับความหนาของโลหะเคลือบผิว

กราฟความเข้มรังสีรวม (total intensity) น้อยกว่าการวัดความเข้มรังสีแยกกัน แต่เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา ไม่สามารถวัดแยกกันได้ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์เรืองของโลหะเคลือบผิวและโลหะฐานกับความหนาของโลหะเคลือบผิว แสดงไว้ในรูปที่ 2.11



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยและการตรวจสอบชิ้นงาน

การวิจัยนี้ได้เลือกชิ้นงานโลหะเคลือบผิว 2 ชนิดที่ใช้กันอยู่กว้างขวางมาเป็นตัวอย่างในการศึกษาวิจัย คือ ทองคำเคลือบบนทองแดง และทึบเคลือบบนเหล็ก ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1

- ชิ้นงานทองคำเคลือบบนทองแดง ได้ว่าจ้างบริษัทแห่งหนึ่งชุบแผ่นทองแดงขนาด 3 ซม. \times 3 ซม. \times 0.2 ซม. ด้วยทองคำ โดยบริษัทได้ใช้การควบคุมเวลาชุบเพื่อให้ได้ความหนาต่าง ๆ กัน การชุบทองคำนี้บริษัทได้ชุบนิเกิลก่อนแล้วจึงชุบทองคำ ชิ้นงานทั้ง 6 ชิ้นถูกตัดแบ่งไปขนาด 1 ซม. \times 1 ซม. เพื่อนำไปตรวจสอบความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งเป็นวิธีสัมบูรณ์ (absolute method) เพื่อหาความหนาที่ถูกต้อง นอกจากนี้ยังต้องตรวจสอบส่วนประกอบของทองคำและความสม่ำเสมอในการชุบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรือง (x-ray fluorescence analyzer) แบบหัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (high purity germanium detector) ผลการตรวจสอบแสดงไว้ในหัวข้อ 4.1
- ชิ้นงานทึบเคลือบบนเหล็ก ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท แผ่นเหล็กวิลาส ไทยจำกัด ในการทำชิ้นงาน 5 ชิ้น ขนาด 10 ซม. \times 20 ซม. \times 0.25 มม. เคลือบทึบทั้งสองด้าน ซึ่งได้ตรวจสอบความหนากับเครื่องวัดความหนาของทึบบนแผ่นเหล็ก ด้วยเทคนิครังสีเอกซ์เรืองของบริษัทเทียบกับแผ่นความหนามาตรฐาน ทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่ง ตรวจสอบส่วนประกอบของทึบ และความสม่ำเสมอของความหนาทึบทุกตัวอย่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ กันด้วยเครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองแบบหัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง ผลการตรวจสอบแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.1

3.2 การศึกษาการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- ก. แผ่นทองแดงเคลือบด้วยทองคำ 6 ตัวอย่าง (คงได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2) และแผ่นทองแดงที่ไม่ได้เคลือบทองคำ 1 แผ่น
- ข. แผ่นเหล็กเคลือบด้วยดีบุก 5 ตัวอย่าง (คงได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.2) และแผ่นเหล็กที่ไม่ได้เคลือบดีบุก 1 แผ่น
- ค. ต้นกำเนิดรังสีเบตา

- คาร์บอน-14 ความแรง 5.5 MBq (150 มิลลิคูรี) ทำด้วยโพลี-เมทิลเมทาครีเลต [poly (methyl-C14) methacrylate] หนา 1 มิลลิเมตร ตัดให้มีลักษณะเป็นวงแหวนโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางในและนอกเท่ากับ 2 และ 3 เซนติเมตร ตามลำดับ

- คลอรีน-36 เป็นต้นกำเนิดรังสีแบบจุด (point source) 3 ตัวอย่าง 25 MBq (0.67 ไมโครคูรี) แต่ละตัวบรรจุอยู่ในแผ่นพลาสติก

- สตรอนเทียม-90 ความแรง 37 MBq (1 ไมโครคูรี) เตรียมจากสารละลายสตรอนเทียม-90 โดยหยดใส่ภาชนะรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางในและนอกเท่ากับ 1.2 และ 3.8 เซนติเมตร ตามลำดับ มีความหนา 0.5 เซนติเมตร (รวมทั้งแผ่นพลาสติกปิดหน้าสำหรับป้องกันการเปราะเปื้อนรังสี)

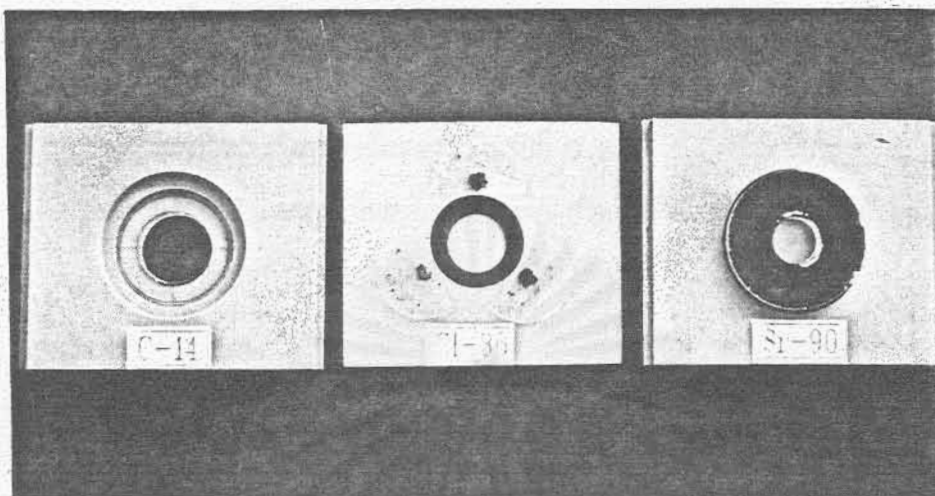
ง. หัววัดแบบไกเกอร์ มุลเลอร์ (Geiger-Muller tube) Nuclear-Chicago Corp. Model 014849 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว ยาว 2.5 นิ้ว มีหน้าต่างอยู่ด้านปลายหัววัด (end-window tube) ทำด้วยพลาสติกมายลาร์ (mylar) หนา 1.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

จ. ชุดนับรังสี 1 ชุด ประกอบด้วย :

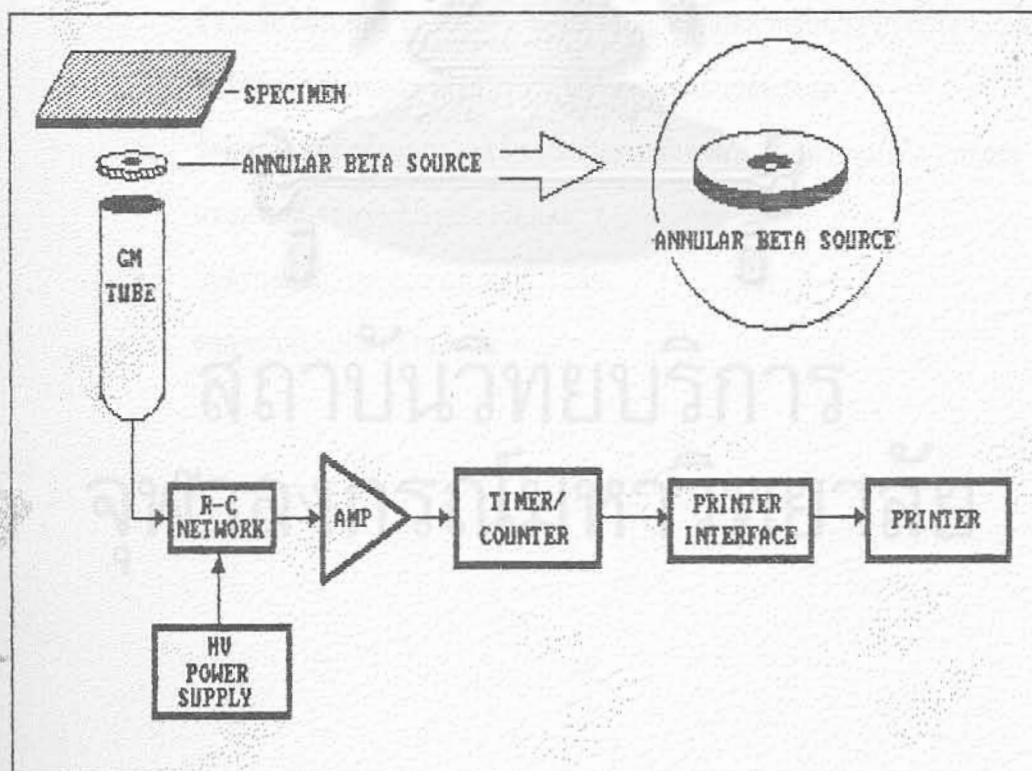
-CANBERRA PAD 814 (ใช้เฉพาะ Amplifier กับ Discriminator)

-CANBERRA COUNTER/TIMER 1772

-NUCLEAR TECHNOLOGY PRINTER INTERFACE NT 2603



รูปที่ 3.1 ต้นกำเนิดรังสีเบตา คาร์บอน-14 คลอรีน-36 และสตรอนเชียม-90



รูปที่ 3.2 แผนผังการจําคูปรณ์เพื่อศึกษาการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา

-CASIO HR-8 CALCULATOR/PRINTER ซึ่งคัดแปลงมาใช้เป็น
เครื่องพิมพ์ข้อมูล

-ORTEC 9330 HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY

แผนผังการจัดอุปกรณ์แสดงไว้ในรูปที่ 3.2

ฉ. แผ่นตะกั่ว อะลูมิเนียม และพลาสติก สำหรับกำบังรังสี และใช้ในการจัด
วางหัววัดรังสี ต้นกำเนิดรังสี และชิ้นงาน

3.2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบต้นกำเนิดรังสี 3 ชนิด ในการวัดความหนา
ของโลหะเคลือบผิว ซึ่งมีวิธีดำเนินการวิจัยเหมือนกันดังนี้

- ก. จัดหัววัดรังสี ต้นกำเนิดรังสี และชิ้นงาน แบบ backscatter geometry
ดังในรูปที่ 3.2 โดยใช้แผ่นโลหะเจาะรูรองต้นกำเนิดรังสีที่วางบนหัววัด
รังสีเพื่อให้แมกกราวด์ค่า และหาระยะที่คิดที่สุดสำหรับการวางชิ้นงานเพื่อ
ให้ได้อัตราส่วนของรังสีเบตากระเจิงต่อแมกกราวด์สูงสุด
- ข. วัดความเข้มรังสีเบตากระเจิงจากชิ้นงานทั้งหมด โดยควบคุมให้ความแปร
ปรวนในการวัดรังสีน้อยกว่าร้อยละ 1
- ค. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการวิจัย
ผลการวิจัยแสดงไว้ในหัวข้อ 4.2

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การศึกษาการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- ก. ชิ้นงานเช่นเดียวกับ 3.2.1 ก. และ ข.
- ข. ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบวงแหวน เหล็ก-55 และอะเมริเซียม-241 ความแรง 10 และ 30 มิลลิคูรี ตามลำดับ
- ค. หัววัดรังสีเอกซ์แบบพรอพอร์ชันนัลบรรจุก๊าซซีนอน LND ขนาด 1.8 ซม. x 1.8 ซม. x 6.3 ซม. โดยมีหน้าต่างเบริลเลียมด้านข้าง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร
- ง. เครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดี่ยว (single channel analyzer, SCA)

1 ชุด ประกอบด้วย :

CANBERRA PREAMPLIFIER 2006E

ORTEC AMPLIFIER 575A

CANBERRA SCA 2030

CANBERRA DUAL COUNTER TIMER 2071A

ORTEC VOLTAGE POWER SUPPLY 456

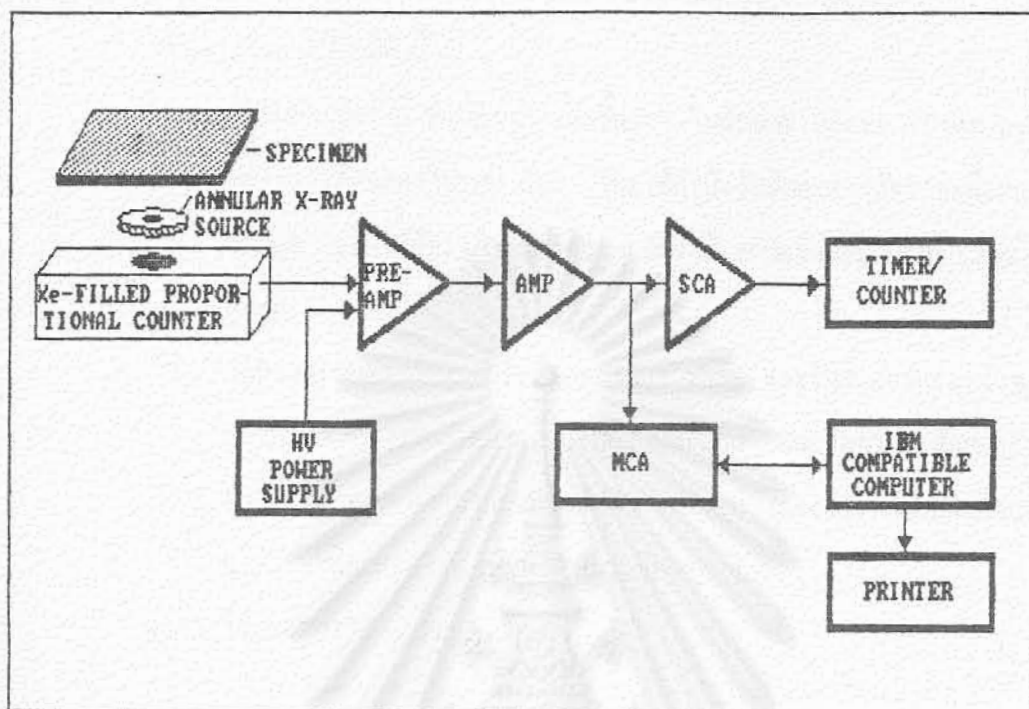
แผนผังการจับอุปกรณ์แสดงไว้ในรูปที่ 3.2

- จ. เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (multichannel analyzer, MCA)

CANBERRA 35 PLUS พร้อม IBM Compatible Computer และ EPSON FX-80 PRINTER

- ฉ. แผ่นตะกั่ว ทองแดง อะลูมิเนียม และพลาสติก สำหรับกำบังรังสี บีบลำรังสี และใช้ในการจี้ควางหัววัดรังสี ต้นกำเนิดรังสี และชิ้นงาน

อนึ่ง การวิจัยครั้งนี้เลือกใช้หัววัดรังสีแบบพรอพอร์ชันนัล และเครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดี่ยวในการศึกษา ทั้งนี้เพราะเครื่องต้นแบบจะใช้อุปกรณ์ 2 ส่วนนี้ เพื่อให้สามารถใช้งานในภาคสนามได้และราคาไม่สูง สำหรับเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องนั้นใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและให้มีความสะดวกในการวิจัยเท่านั้น



รูปที่ 3.3 แผนผังการจัดอุปกรณ์เพื่อศึกษาเทคนิคการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

3.3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นรังสีเอกซ์เรืองของทั้งโลหะเคลือบผิว (คือ ทองคำ และ ดีบุก) และของโลหะฐาน (คือ ทองแดง และ เหล็ก) กับความหนาของโลหะเคลือบผิวทั้งสองชนิด ในการวัดความเข้มข้นรังสีเอกซ์เรืองของดีบุก เลือกวัด L x-rays เนื่องจากหัววัดพรอพอร์ชันนัลมีประสิทธิภาพในการวัดรังสีสูงกว่าการวัด K x-rays ของดีบุก โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีเหล็ก-55 เป็นตัวกระตุ้น นอกจากนี้ยังสามารถวัดความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ระเจิง คือ K x-rays ของแมงกานีสที่ปลดปล่อยจากเหล็ก-55 เพื่อเปรียบเทียบกับ การวัดความเข้มข้นรังสีเอกซ์เรืองของโลหะเคลือบผิวและโลหะฐานไปพร้อมกันด้วย สำหรับการวัดความเข้มข้นรังสีเอกซ์เรืองของเหล็ก (K x-rays) ทองแดง (K x-rays) และทองคำ (L x-rays) เลือกใช้อะเมริเซียม-241 เป็นตัวกระตุ้น เนื่องจากมีพลังงานเหมาะสม และมีครึ่งชีวิตยาวมากถึง 458 ปี

ขั้นตอนในการวิจัยมีดังนี้

- ก. จัดตั้งกำเนิดรังสี หัววัดรังสี และชิ้นงาน ในลักษณะ backscatter geometry ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยใช้กำบังรังสีและการจัดระยะที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้อัตราส่วนของความเข้มรังสีเอกซ์ เรืองต่อแบคกราวนด์มีค่าสูงสุด
- ข. วัดความเข้มของรังสีเอกซ์ เรืองของคีมุก เหล็ก และรังสีเอกซ์กระเจิงของแมงกานีส สำหรับตัวอย่างคีมุกเคลือบบนเหล็ก และวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ เรืองของทองแดงและทองคำสำหรับตัวอย่างทองคำเคลือบบนทองแดง การวัดรังสีควมคุมให้ความแม่นยำน้อยกว่าร้อยละ 1

ผลการวิจัยแสดงไว้ในหัวข้อ 4.3

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 การออกแบบและสร้างเครื่องวัดความหนาของโลหะเคลือบผิว

การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบได้เลือกใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา ถึงแม้ว่า จากผลการวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่า มีความไวต่ำกว่าเทคนิคเครื่องรังสีเอกซ์ แต่ก็สามารถใช้งานได้ดี หากใช้ต้นกำเนิดรังสีที่เหมาะสม และยังมีต้นทุนต่ำกว่าถึงประมาณ 10 เท่า สำหรับเครื่องนับรังสีนั้น ได้สร้างตามแบบเครื่องนับรังสีขนาดเล็กรุ่น NT 1801 ซึ่งภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีได้พัฒนาขึ้นมาก่อนหน้านี้แล้ว แต่ได้เพิ่มเติมส่วนของเครื่องพิมพ์ข้อมูลเข้าไป เพื่อให้มีความสะดวกในการบันทึกผล หัววัดรังสีไกเกอร์-มูลเลอร์ที่ใช้ในเครื่องต้นแบบได้เปลี่ยนจากที่ใช้ในการวิจัยที่ผ่านมาเป็น PHILIPS Model ZP 1431 ที่จัดซื้อใหม่ ซึ่งเป็นแบบหน้าต่างปลาย มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร หัววัดรังสีที่ได้มาใหม่นี้มีความยาวน้อยกว่าหัววัดเดิม แต่มีเส้นผ่าศูนย์กลางใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถออกแบบหัววัดความหนาได้กระทัดรัดขึ้น โดยมีประสิทธิภาพการวัดรังสีใกล้เคียงกัน

เครื่องวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวที่ออกแบบและสร้างประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนดังนี้

ก. หัววัดความหนา เป็นส่วนที่สัมผัสกับชิ้นงานในขณะที่วัดความหนา ประกอบด้วยหัววัดรังสีแบบไกเกอร์-มูลเลอร์ ต้นกำเนิดรังสีเบตา กำบังรังสี และแผ่นโลหะเจาะรูขนาดต่าง ๆ กัน สำหรับจำกัดพื้นที่ที่ต้องการวัดความหนา หัววัดความหนาสำหรับจำกัดพื้นที่ที่ต้องการวัดความหนา หัววัดความหนาสำหรับเครื่องต้นแบบสามารถเปลี่ยนต้นกำเนิดรังสีได้ 2 ชนิด คือ คาร์บอน-14 และ สตรอนเชียม-90 ส่วนต้นกำเนิดรังสีคลอรีน-36 ที่ใช้ในการวิจัยที่ผ่านมาเป็นต้นกำเนิดรังสีแบบจุด (point source) จึงไม่เหมาะกับการออกแบบหัววัดความหนาให้มีความกระทัดรัด สามารถใช้งานได้สะดวก

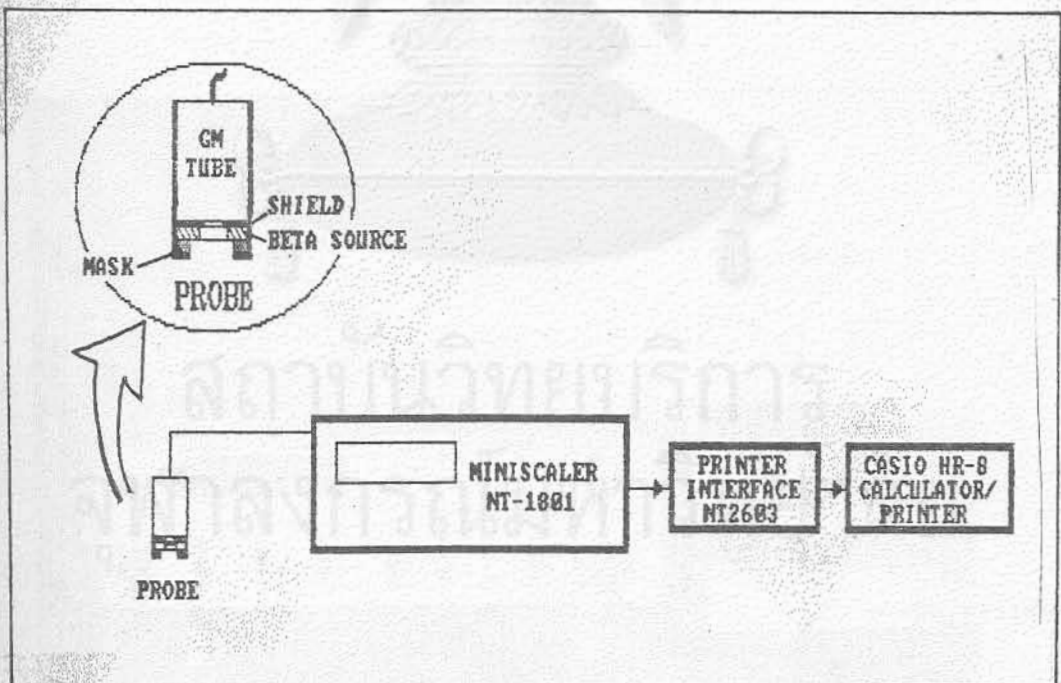
ข. เครื่องนับรังสีขนาดเล็กแบบ NT 1801 เป็นส่วนจ่ายศักดาไฟฟ้าสูงให้แก่หัววัดรังสี รับสัญญาณจากหัววัดรังสี และแสดงผลจำนวนนับรังสี ภายในประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ คือ แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง แอมพลิฟายเออร์ เครื่องนับและเครื่องตั้ง

เวลา รวมทั้งเรทมิเตอร์ (ratemeter) ข้อมูลจำนวนนับรังสีจะแสดงออกมาเป็นตัว เลขสูงสุด 6 หลัก โดยใช้ LED (light emitting diode) รายละเอียดของ เครื่องนับรังสี NT1801 พร้อมทั้งแผนผังวงจร แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

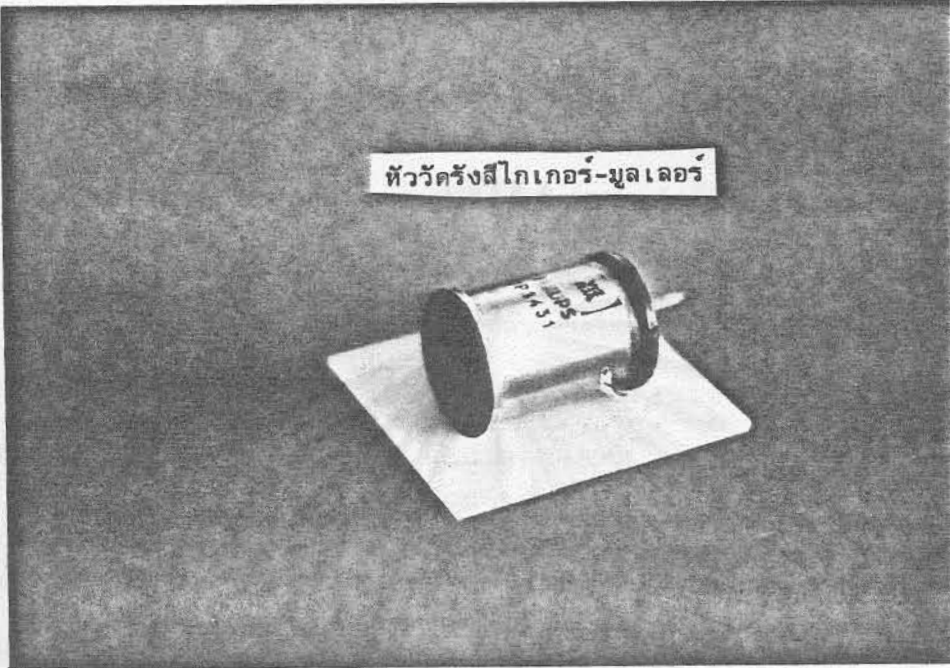
ก. อินเตอร์เฟสของเครื่องพิมพ์ เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อสัญญาณสำหรับการส่งข้อมูล จากเครื่องนับรังสีไปยังเครื่องพิมพ์ข้อมูล

ง. เครื่องพิมพ์ข้อมูล เป็นเครื่อง CASIO HR-8 โดยดัดแปลงให้สามารถรับ ข้อมูลจากเครื่องนับรังสีผ่านทางอินเตอร์เฟส

แผนภาพเครื่องต้นแบบแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 และผลการปรับเทียบเครื่องต้นแบบสำหรับ การวัดความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดงและดีบุกที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก แสดงไว้ในตารางที่ 4. และกราฟในรูปที่ 4.12, 4.13



รูปที่ 3.4 แผนภาพเครื่องต้นแบบของเครื่องวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิค การกระเจิงกลับรังสีเบตา

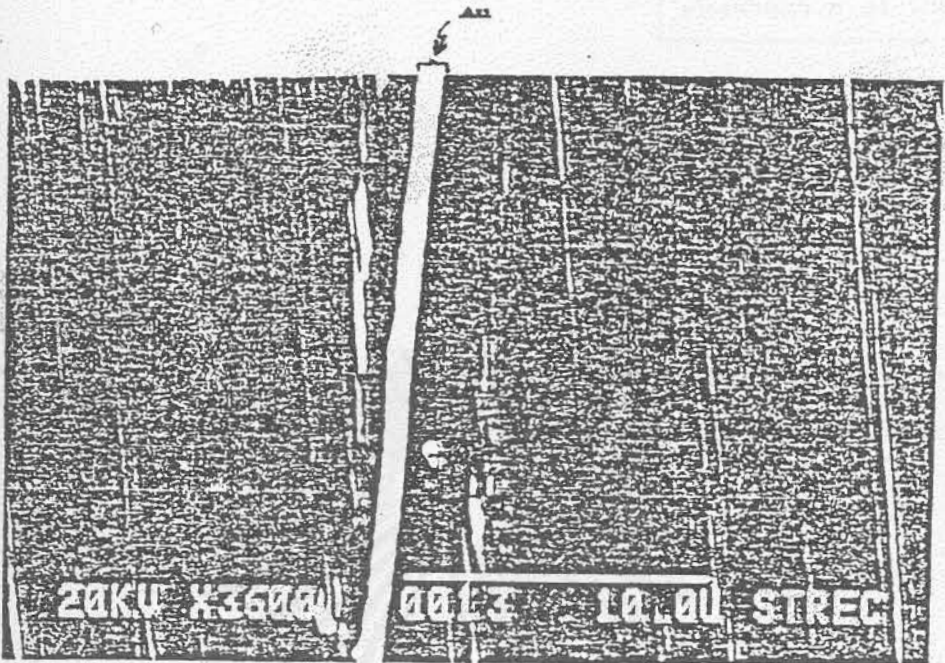


รูปที่ 3.5 เครื่องต้นแบบของเครื่องวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา

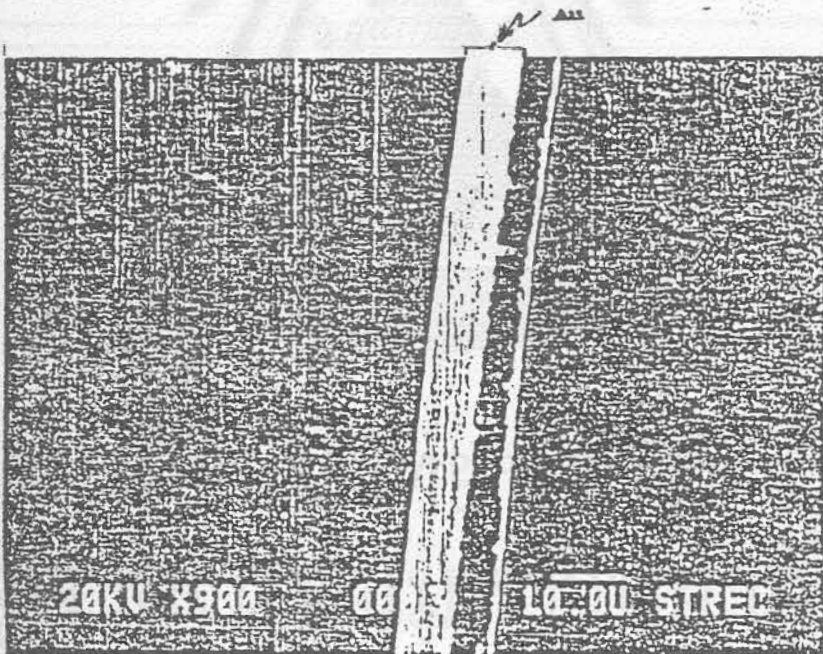
4.1 ผลการตรวจสอบชิ้นงาน

การตรวจสอบความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดง 6 ตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าแต่ละชิ้นงานมีความหนาของทองคำสม่ำเสมอ โดยมีความหนา 0.83, 1.00, 1.69, 2.37, 3.20 และ 8.05 ไมครอน ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.1 ผลการตรวจสอบส่วนประกอบของทองคำและความสม่ำเสมอของความหนาแต่ละชิ้นงาน พบว่าทองคำมีเงินและทองแดงปนอยู่ในทุกชิ้นงานในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน และเห็นรังสีเอกซ์เรืองของนิเกิลซึ่งชุบแผ่นทองแดงไว้บ้าง ก่อนการชุบทอง ความเข้มรังสีเอกซ์เรืองของทองคำ ทองแดงที่ตำแหน่งต่าง ๆ กันบนชิ้นงานมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกินร้อยละ 4 ในขณะที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสถิติการนับรังสีถูกควบคุมให้มีได้ไม่เกินร้อยละ 1 แสดงว่าความหนาของทองคำของชิ้นงานแต่ละชิ้นค่อนข้างสม่ำเสมอ

สำหรับการตรวจสอบความหนาของคัตบุคด้วยเครื่องวัดความหนาด้วยรังสีเอกซ์เรืองของบริษัท แผ่นเหล็กวิลาสไทย จำกัด ได้ค่าความหนาคัตบุค 3.9, 4.0, 4.2, 5.1, 5.2, 5.6, 8.5, 10.6, 10.9 และ 10.9 กรัมต่อตารางเมตร แต่การตรวจสอบความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไม่สามารถอ่านค่าได้แน่นอน ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.2 เพราะการขัดและการเตรียมตัวอย่างทำได้ไม่ดี สืบเนื่องจากคัตบุคเป็นโลหะอ่อนและชิ้นงานมีความหนาของคัตบุคน้อยมาก (อยู่ในช่วงราว 0.5-1.5 ไมครอน) การตรวจสอบส่วนประกอบของคัตบุคทุกชิ้นงานพบว่าไม่มีธาตุใดปนอยู่ในปริมาณสูงพอที่จะเห็นได้ แสดงว่าคัตบุคมีความบริสุทธิ์สูงและความเข้มรังสีเอกซ์เรืองของเหล็กกับคัตบุค (รังสีเอกซ์ K) ที่บริเวณต่างๆกันบนแผ่นเดียวกัน มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกินร้อยละ 1 ซึ่งไม่เกินค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสถิติในการนับรังสีของสถิติในการนับรังสี แสดงว่า ความหนาของคัตบุคแต่ละแผ่นสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น อนึ่งในการวัดความเข้มรังสีเอกซ์ K ของคัตบุค ความหนาของคัตบุคที่อยู่ด้านหลังมีส่วนเพิ่มความเข้มรังสีด้วยเนื่องจากมีพลังงานสูงพอที่จะทะลุผ่านแผ่นเหล็กหนา 0.25 มิลลิเมตรมาได้

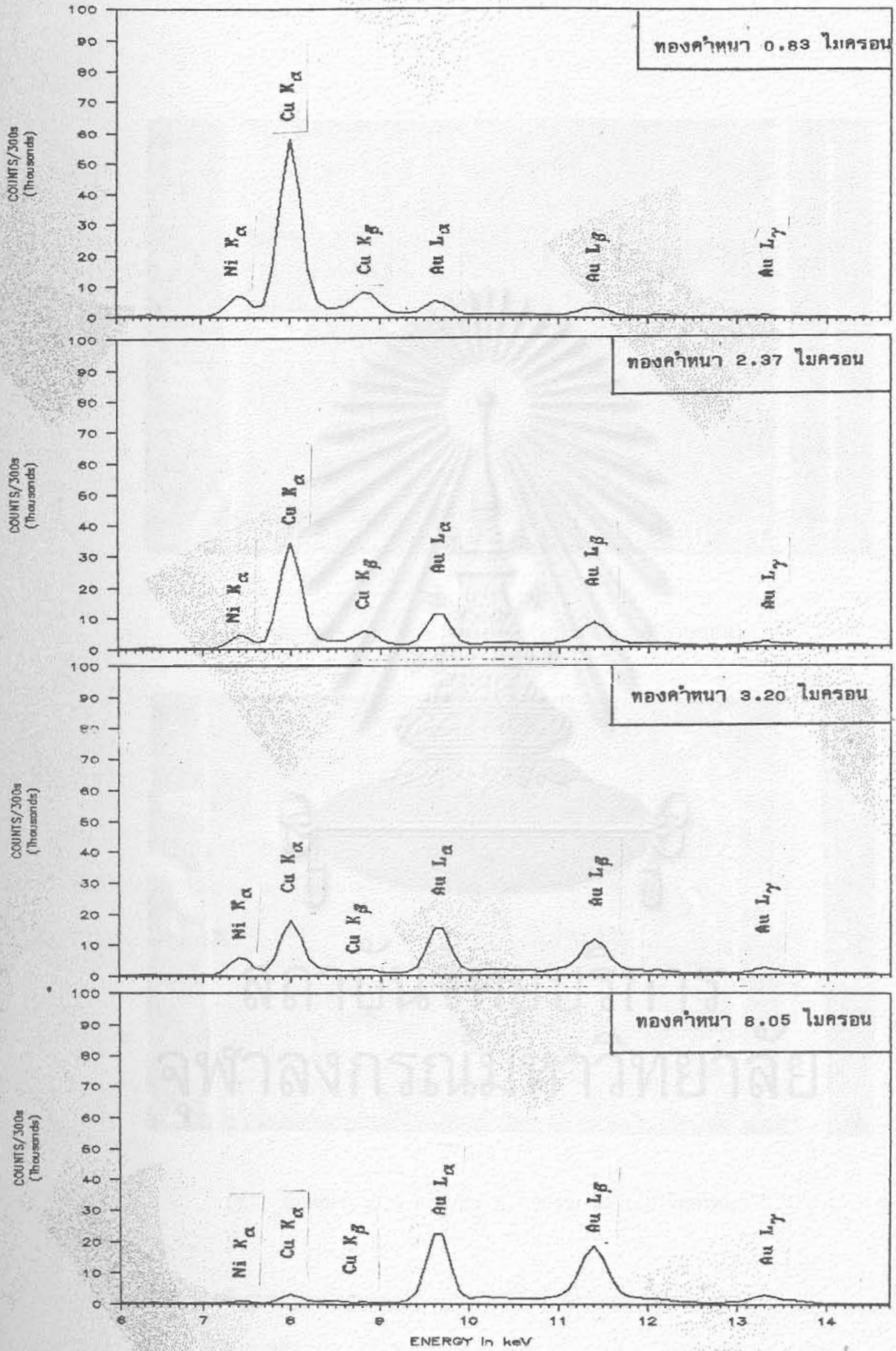


(ก) ท้องคำหนา 0.83 ไมครอน

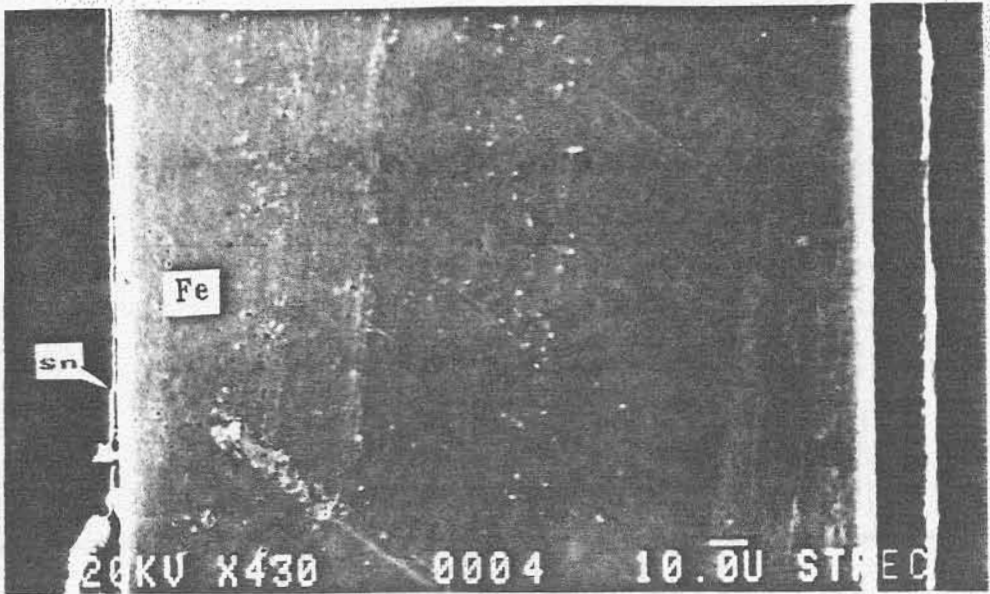


(ข) ท้องคำหนา 8.05 ไมครอน

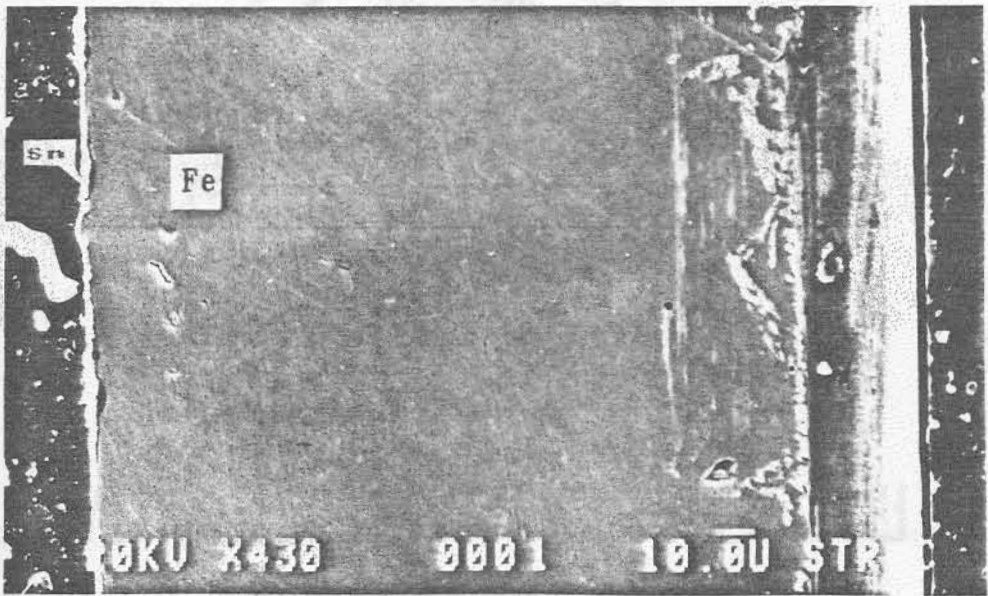
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของชิ้นงาน
ทองคำเคลือบบนทองแดง



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีเอกซ์เรืองของชิ้นงานทองคำเคลือบบนทองแดง เมื่อวัดด้วย
ตัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงและใช้ต้นกำเนิดรังสีแคดเมียม-109

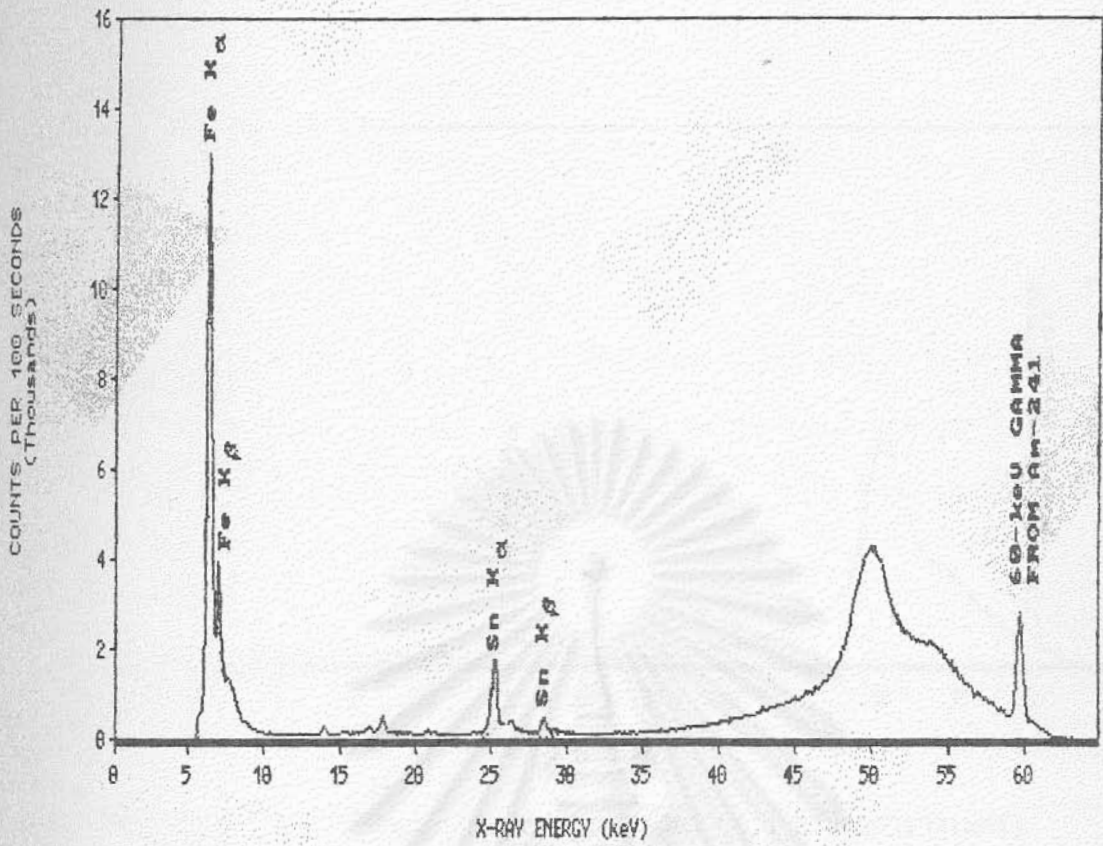


(ก) ดีบุกหนา 3.9 กรัม/ตร.ม. (ประมาณ 0.5 ไมครอน)

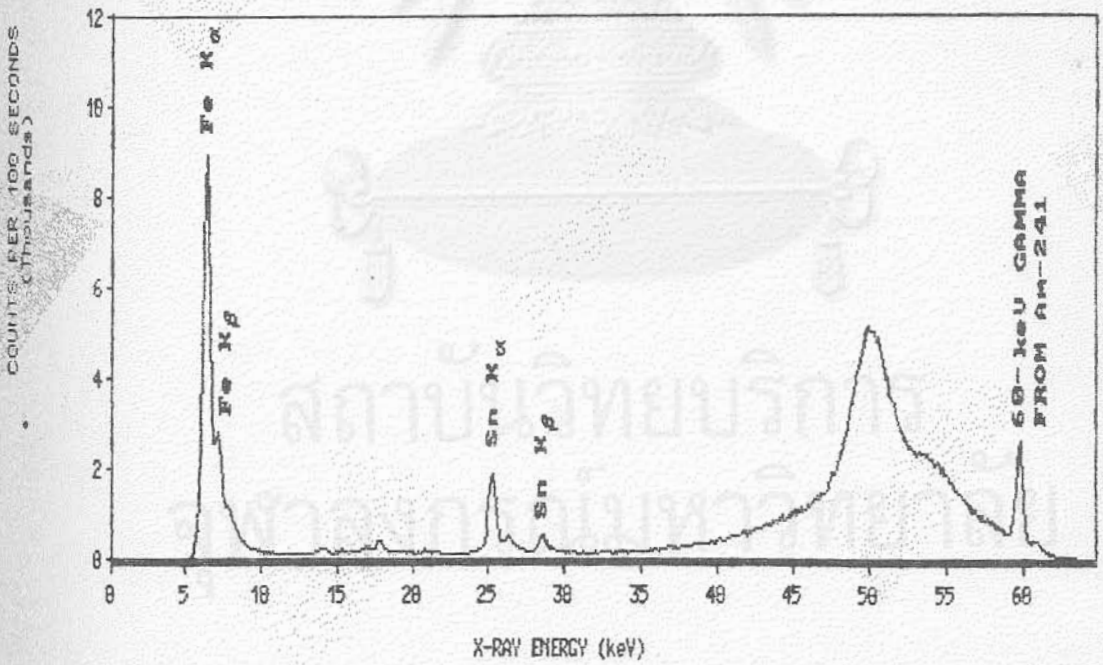


(ข) ดีบุกหนา 10.9 กรัม/ตร.ม. (ประมาณ 1.5 ไมครอน)

รูปที่ 4.3 ตัวอย่างภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของชิ้นงานดีบุกเคลือบบนแผ่นเหล็ก

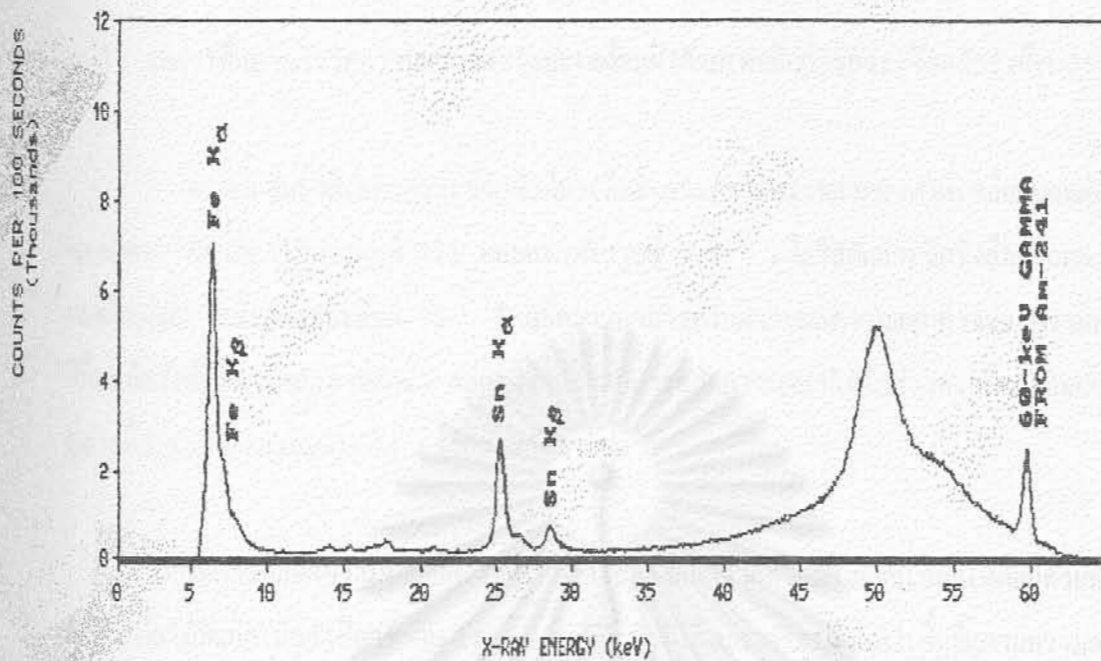


(ก) ตัวอย่าง 3.9 กรัมต่อตารางเมตร (ด้านหลังหนา 4.2 กรัมต่อตารางเมตร)

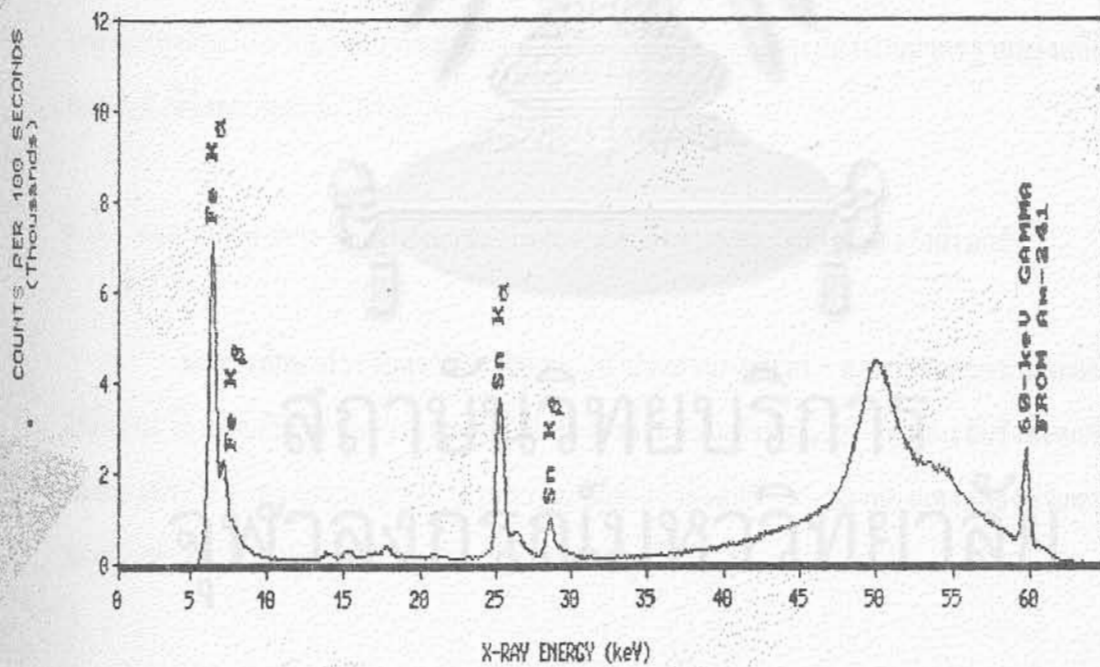


(ข) ตัวอย่าง 5.2 กรัมต่อตารางเมตร (ด้านหลังหนา 4.1 กรัมต่อตารางเมตร)

รูปที่ 4.4 ตัวอย่างสเปกตรัมของชิ้นงานคืบกเคลือบบนแผ่นเหล็ก เมื่อบำบัดด้วยหัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงและใช้ต้นกำเนิดรังสีอะเมริเชียม-241



(ค) ที่บุกหนา 8.5 กรัมต่อตารางเมตร (ด้านหลังหนา 5.1 กรัมต่อตารางเมตร)



(ง) ที่บุกหนา 10.9 กรัมต่อตารางเมตร (ด้านหลังหนา 10.9 กรัมต่อตารางเมตร)

รูปที่ 4.4 (ต่อ)

4.2 ผลการศึกษาการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับรังสีเบตา

ความเข้มรังสีเบตากระเจิงกลับมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของทองคำที่เคลือบบนแผ่นทองแดง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และกราฟในรูปที่ 4.5 เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีคาร์บอน-14 คลอรีน-36 และสตรอนเชียม-90 โดยที่ความสามารถในการแยกความแตกต่างของความหนาดีขึ้นเมื่อรังสีเบตามีพลังงานต่ำลง แต่พลังงานต่ำสามารถวัดความหนาได้ในช่วงความหนาน้อยกว่า กล่าวคือ จะถึง saturation เร็วกว่าพลังงานสูง

ในการศึกษาความเข้มของรังสีเบตากระเจิงกลับจากตัวอย่างแผ่นเหล็กเคลือบด้วยดีบุก พบว่าเมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีคาร์บอน-14 ความเข้มรังสีเบตากระเจิงกลับเพิ่มขึ้นตามความหนาของดีบุก แต่เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีคลอรีน-36 และ สตรอนเชียม-90 มีค่าแปรปรวนไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ ซึ่งก็เพราะพลังงานของรังสีเบตาสูงเกินไป สำหรับความหนาของดีบุกในช่วงราว 0.5-1.5 ไมครอนนี้ กล่าวคือความแตกต่างของความเข้มรังสีเบตากระเจิงจากดีบุกที่เคลือบบนแผ่นเหล็กในช่วงความหนานี้มีค่าน้อยไป เมื่อเทียบกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสถิติในการนับรังสีซึ่งควบคุมให้มีได้ไม่เกินร้อยละ 1

4.3 ผลการศึกษาการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

ผลการศึกษาการวัดความหนาของทองคำบนทองแดงพบว่า สามารถแยกความแตกต่างได้ดีมากเมื่อเทียบกับเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตาในหัวข้อ 4.2 ความเข้มรังสีเอกซ์ L ของทองคำเพิ่มขึ้นตามความหนา ส่วนความเข้มของรังสีเอกซ์ K ของทองแดงลดลงตามความหนาของทองคำ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9

ผลการศึกษาการวัดความหนาของคืบกบนแผ่นเหล็กพบว่า เป็นไปในทำนองเดียวกัน คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ L ของคืบกแปรผันตามความหนา และความเข้มรังสีเอกซ์ K ของเหล็ก ลดลงตามความหนาของคืบก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.10-4.11 จากการศึกษา ความเข้มรังสีเอกซ์ K ของแมงกานีสที่กระเจิงกลับ เมื่อใช้คั่นกำเนิดรังสีเหล็ก-55 พบว่า ความเข้มรังสีเอกซ์ที่กระเจิงกลับลดลงตามความหนาของคืบก และมีความสามารถแยกความแตกต่าง ของความหนาได้ ใกล้เคียงกับการวัดรังสีเอกซ์เรืองของโลหะฐานคือเหล็ก ดังแสดงไว้ในตาราง ที่ 4.4 และรูปที่ 4.11



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นสีเบตากระเจิงกลับจากทองแดงที่เคลือบด้วยทองคำหนา 0 ถึง 8.05 ไมครอน

ความหนาของทองคำ (ไมครอน)	ความเข้มข้นสีเบตากระเจิงกลับ *					
	คาร์บอน-14		คลอรีน-36		สตรอนเชียม-90	
	ต่อ 10 นาที	เทียบกับทองแดง**	ต่อ 10 นาที	เทียบกับทองแดง**	ต่อ 5 นาที	เทียบกับทองแดง**
0 (แผ่นทองแดง)	15030	100.00	14075	100.00	46176	100.00
0.83	21995	146.34	14670	104.23	47934	103.81
1.00	23568	156.81	15060	107.00	48536	105.11
1.69	25268	168.12	15511	110.20	49564	107.34
2.37	26265	174.75	15876	112.79	50753	109.91
3.20	27166	180.75	16975	120.60	52635	113.99
8.05	27198	180.96	19774	140.49	57798	125.17

* แก่ Resolving time และหักแบคกราวนด์ออกแล้ว

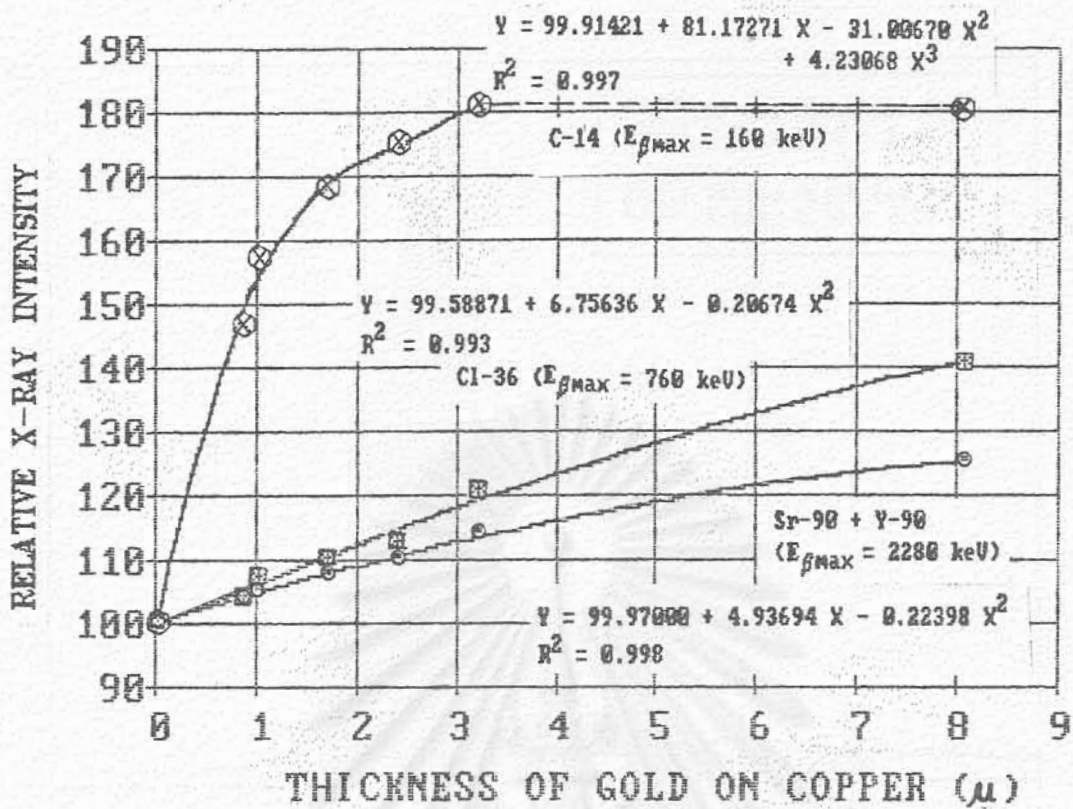
** เทียบให้การกระเจิงกลับจากทองแดงเป็น 100

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นสีเบตากระเจิงกลับจากแผ่นเหล็กเคลือบด้วยคูปุกหนา 0 ถึง 10.9 กรัมต่อตารางเมตร

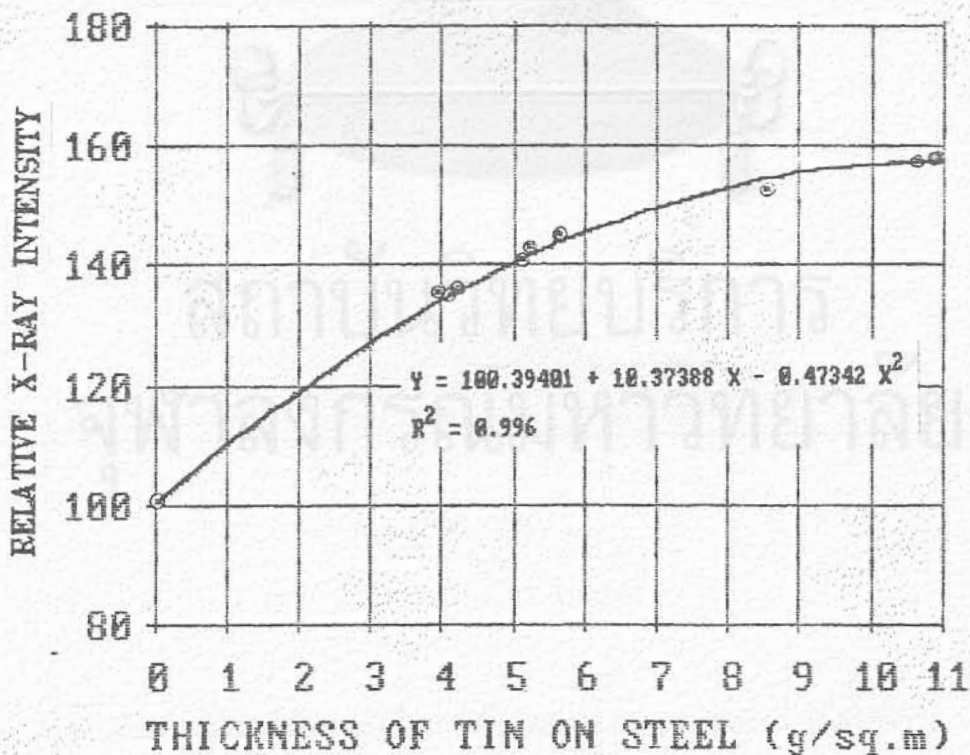
ความหนาของคูปุก (กรัม/ตร.ม.)	ความเข้มข้นสีเบตากระเจิงกลับ *					
	คาร์บอน-14		คลอรีน-36		สตรอนเชียม-90	
	ต่อ 10 นาที	เทียบกับเหล็ก**	ต่อ 10 นาที	เทียบกับเหล็ก**	ต่อ 5 นาที	เทียบกับเหล็ก**
0	14504	100.00	15290	100.00	55185	100.00
3.9	19587	135.05	15821	103.47	54491	98.74
4.1	19499	134.44	15754	103.03	55925	101.34
4.2	19642	135.43	15768	103.13	54121	98.07
5.1	20317	140.08	16133	105.51	55983	101.45
5.2	20686	142.62	15855	103.70	56270	101.97
5.6	20929	144.29	16049	104.96	54344	98.48
8.5	22089	152.30	15995	104.61	56366	102.14
10.6	22767	156.97	16140	105.56	55631	100.81
10.9	22929	158.08	16180	105.82	55874	101.25
10.9	22845	157.51	16035	104.87	55142	101.25

* แก่ Resolving time และหักแบคกราวนด์ออกแล้ว

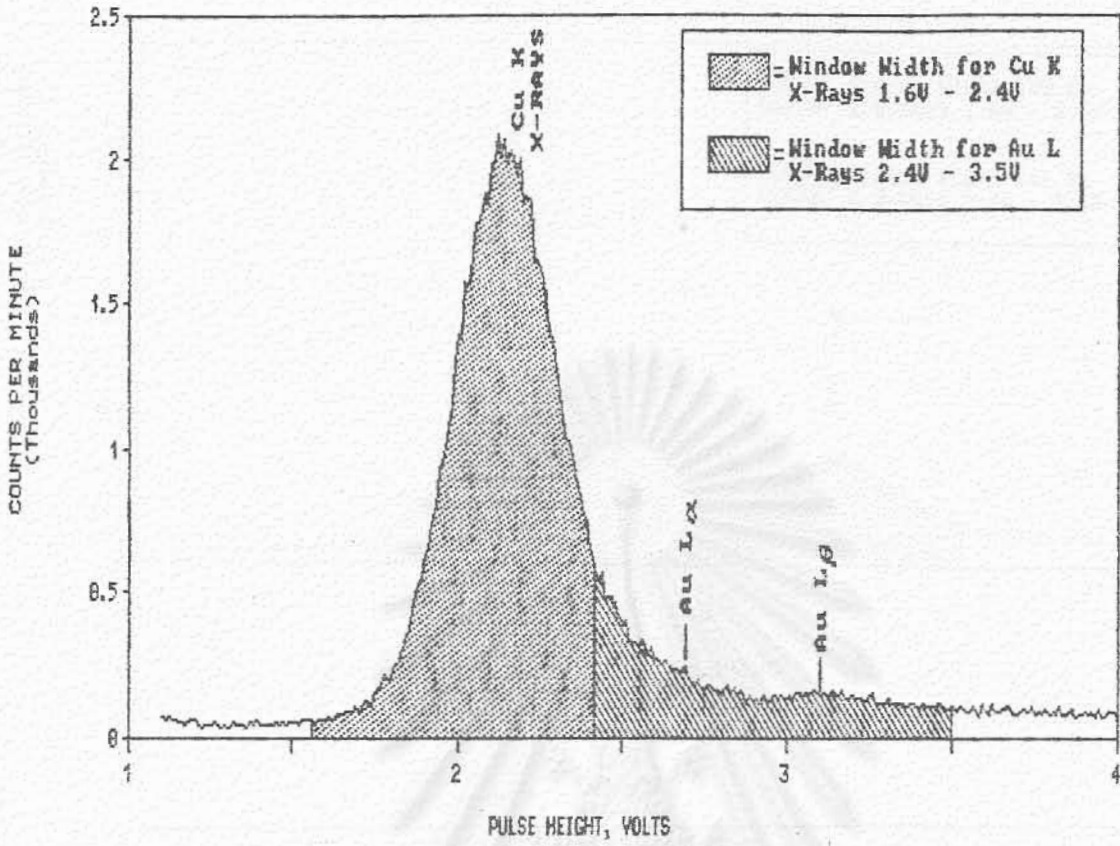
** เทียบให้การกระเจิงกลับจากเหล็กเป็น 100



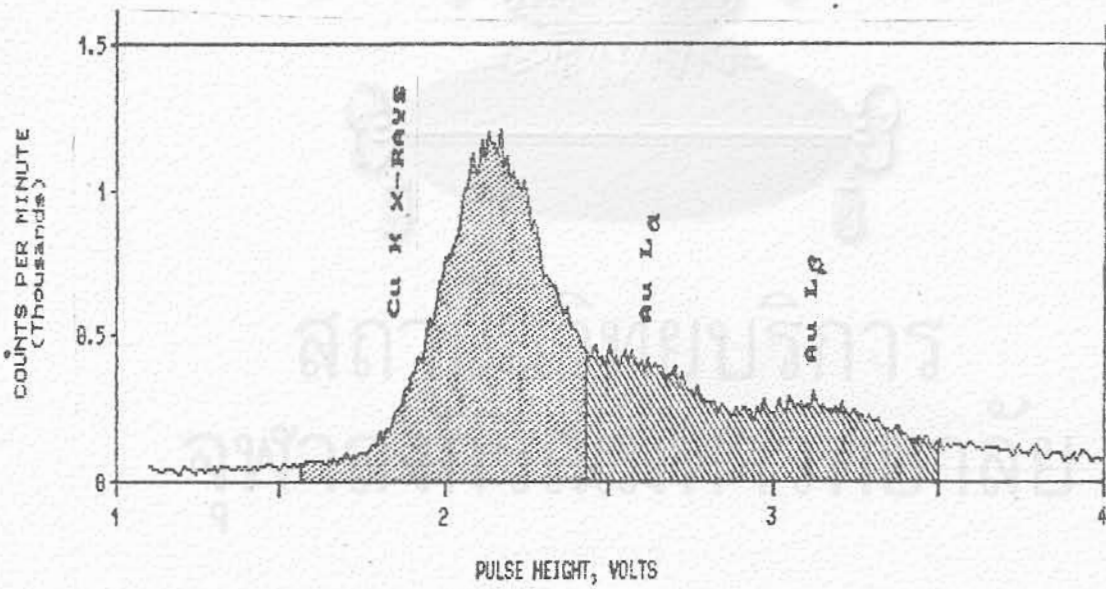
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเบตากระเจิงกลับกับความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดง



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเบตากระเจิงกลับกับความหนาของตะกั่วที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีคาร์บอน-14

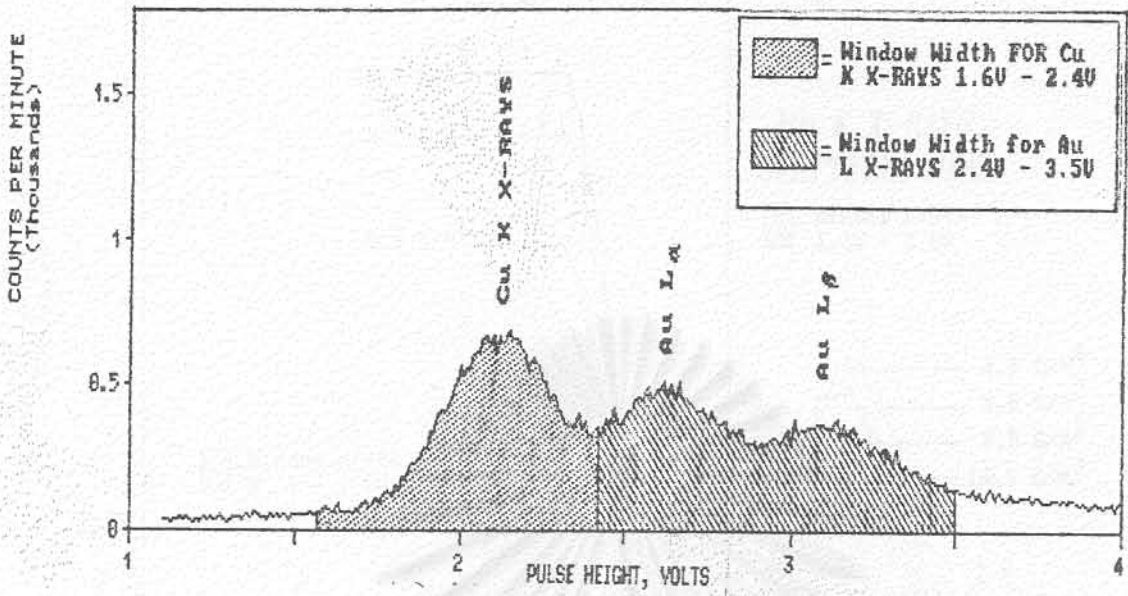


(ก) ทองคำหนา 0.83 ไมครอน

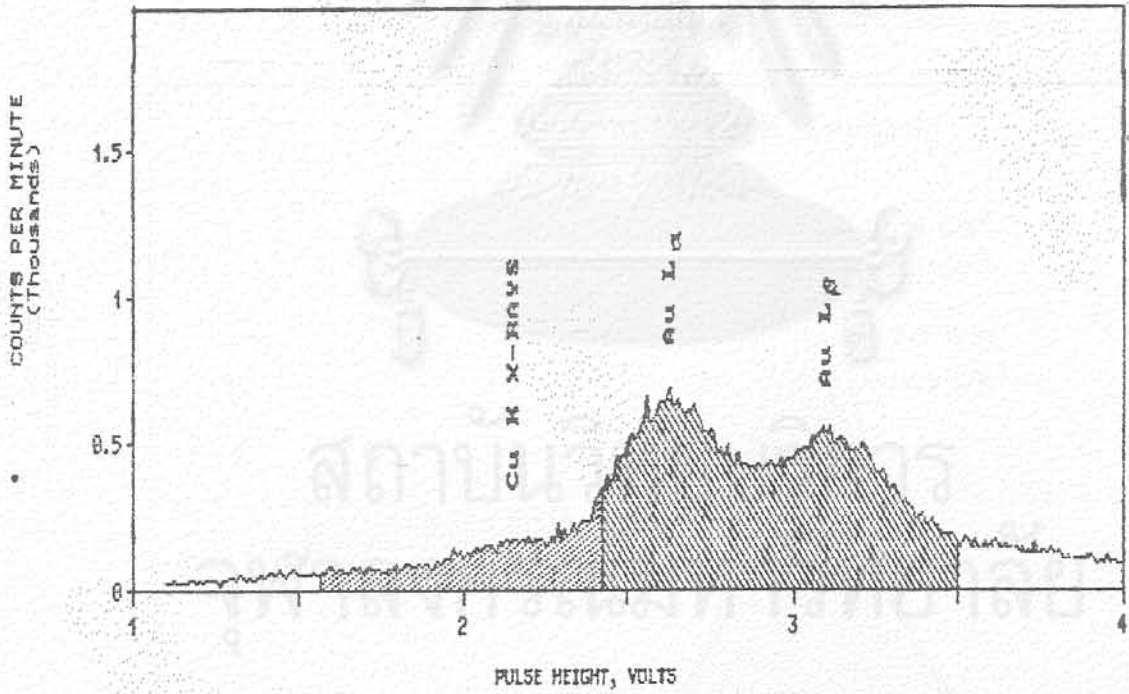


(ข) ทองคำหนา 2.37 ไมครอน

รูปที่ 4.7 ตัวอย่างสเปกตรัมของรังสีเอกซ์เรืองของทองแดงและทองคำ เมื่อใช้หัววัดพรอพอร์ชันนัลและต้นกำเนิดรังสีอะเมริเซียนัม

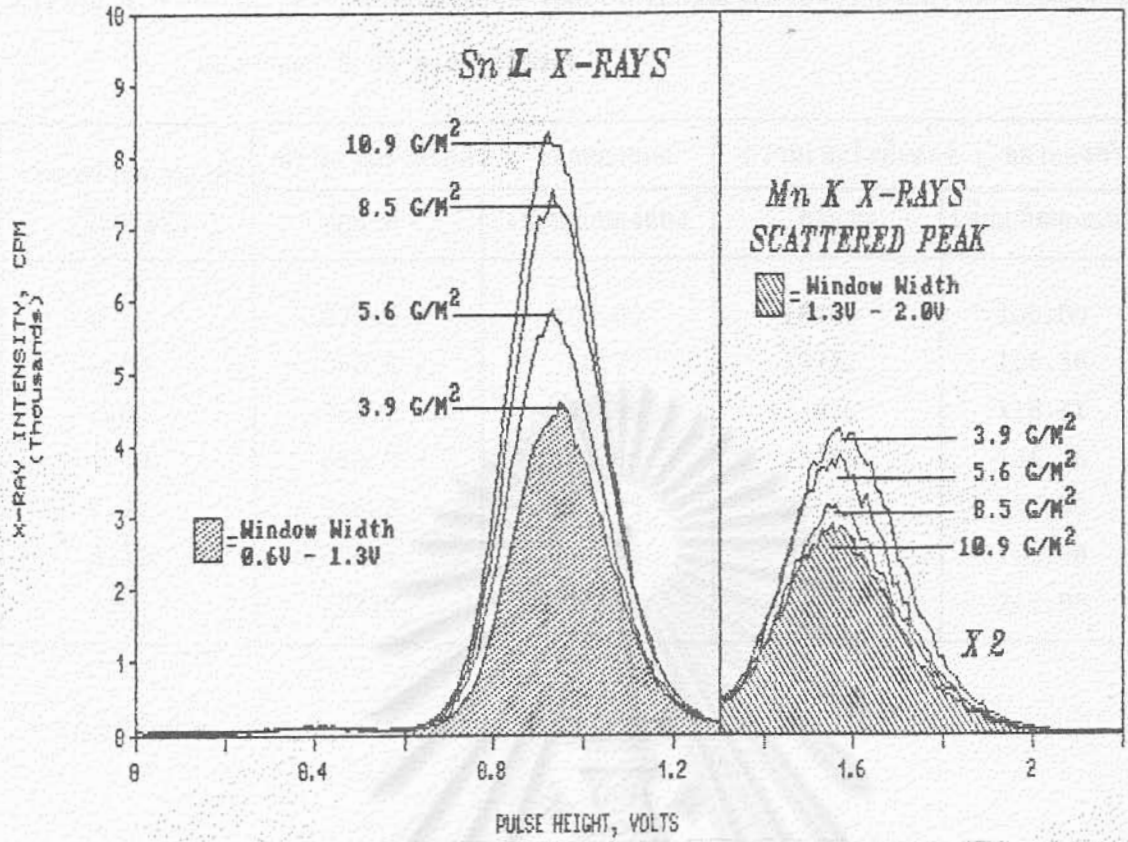


(ค) ทองคำหนา 3.20 ไมครอน

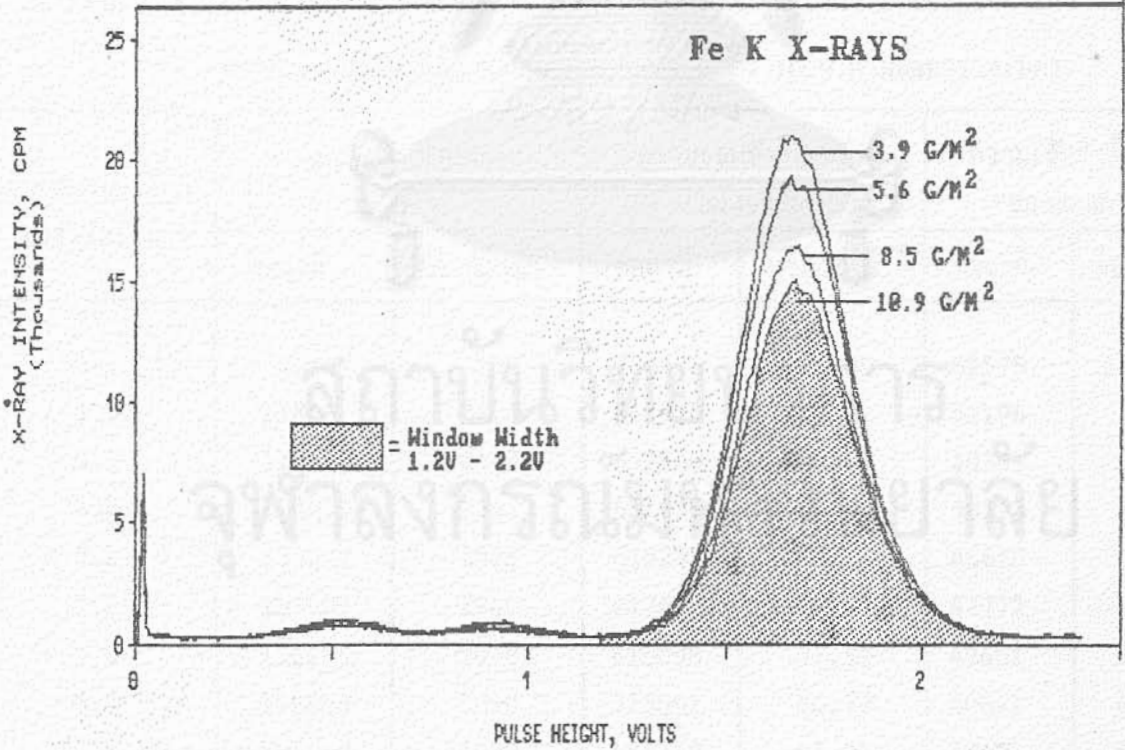


(ง) ทองคำหนา 8.05 ไมครอน

รูปที่ 4.7 (ต่อ)



ก. รังสีเอกซ์เรืองของตะกั่วและรังสีเอกซ์กระเจิงของแมงกานีส



ข. รังสีเอกซ์เรืองของเหล็ก

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบสเปกตรัมของรังสีเอกซ์เรืองของตะกั่ว รังสีเอกซ์กระเจิงของแมงกานีส และรังสีเอกซ์เรืองของเหล็กจากแผ่นเหล็กเคลือบด้วยตะกั่วหนาต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นรังสีเอกซ์ของทองแดงและรังสีเอกซ์ของทองคำจากตัวอย่างทองแดงเคลือบด้วยทองคำหนา 0 ถึง 8.05 ไมครอน

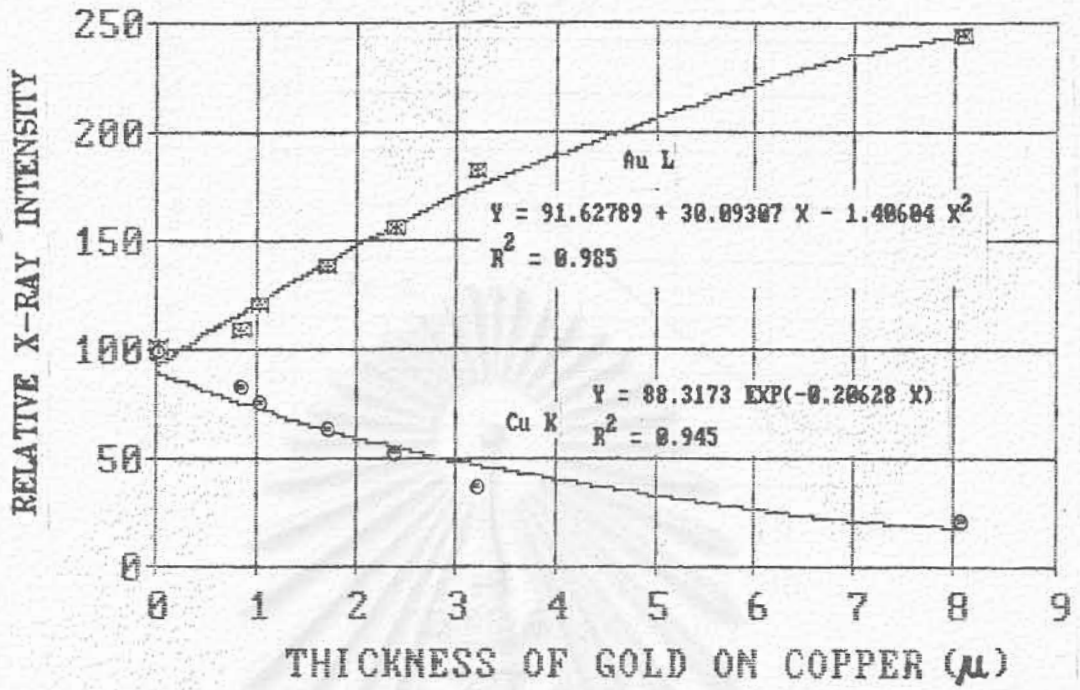
ความหนาของทองคำ (ไมครอน)	ความเข้มข้นรังสีเอกซ์ K ของทองแดง		ความเข้มข้นรังสีเอกซ์ L ของทองคำ	
	ค่าที่	เทียบกับทองแดง*	ค่าที่	เทียบกับทองแดง*
0	107588	100.00	18499	100.00
0.83	86836	80.71	19712	106.56
1.00	78497	72.96	21850	118.11
1.69	66330	61.65	25226	136.36
2.37	54602	50.75	28452	153.80
3.20	37914	35.24	33405	180.58
8.05	20239	18.81	44763	241.98

* เทียบให้แผ่นทองแดงเป็น 100

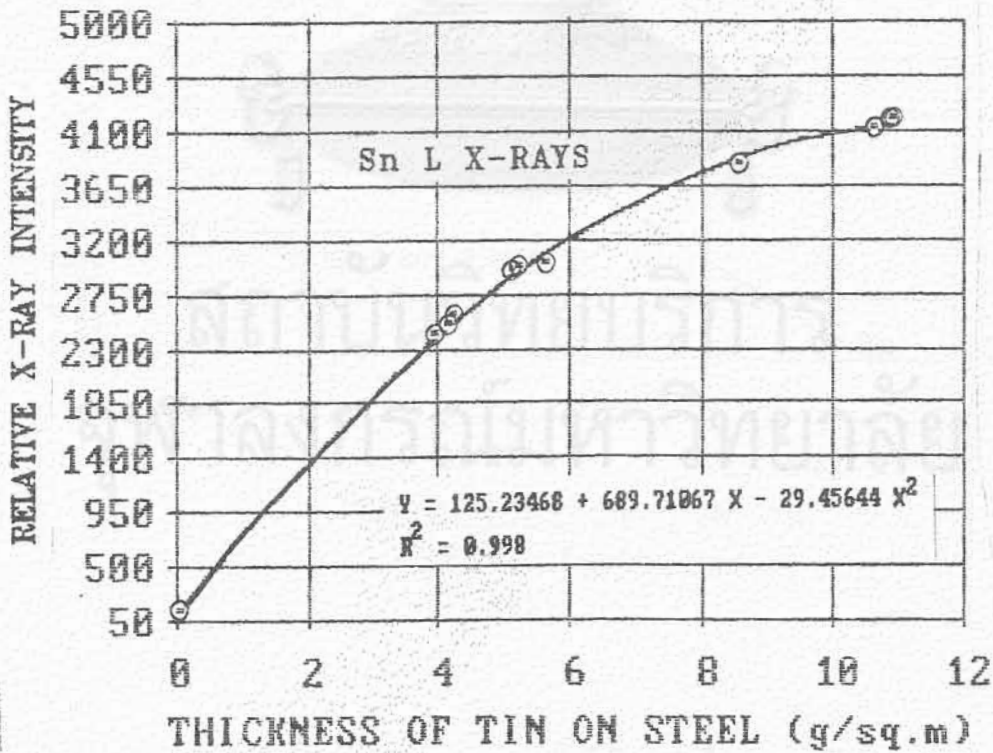
ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นรังสีเอกซ์ของดีบุก รังสีเอกซ์ของเหล็ก และรังสีเอกซ์กระเจิงของแมงกานีสจากตัวอย่างแผ่นเหล็กเคลือบด้วยดีบุกหนา 0 ถึง 10.9 กรัมต่อตารางเมตร

ความหนาของดีบุก (กรัม/ตร.ม.)	ความเข้มข้นรังสีเอกซ์ L ของดีบุก		ความเข้มข้นรังสีเอกซ์ K ของเหล็ก		ความเข้มข้นรังสีเอกซ์ K ของแมงกานีส	
	ค่าที่	เทียบกับเหล็ก*	ค่าที่	เทียบกับเหล็ก*	ค่าที่	เทียบกับเหล็ก*
0	4660	100	786476	100.00	62575	100.00
3.9	11846	2400	663920	84.42	51196	81.82
4.1	114759	2463	652848	83.01	50381	80.51
4.2	118479	2542	651639	82.86	50375	80.50
5.1	136373	2926	615242	78.23	46610	74.49
5.2	137003	2940	613657	78.03	47772	76.34
5.6	138286	2968	610098	77.57	47451	75.83
8.5	176618	3790	525091	66.77	40641	64.95
10.6	191017	4099	480119	61.05	38425	61.41
10.9	194477	4173	470953	59.88	37763	60.35
10.9	194810	4180	470254	59.79	38118	60.92

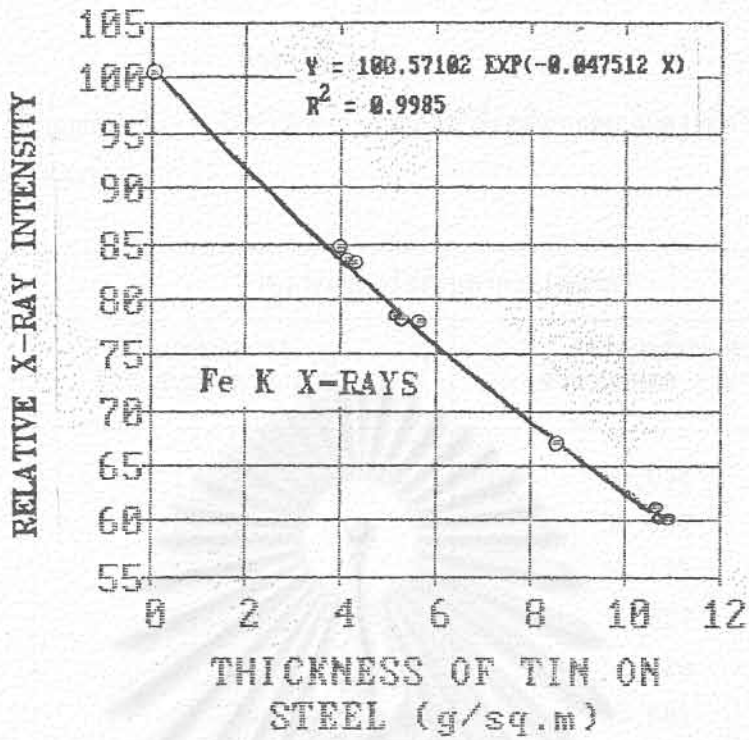
* เทียบให้แผ่นเหล็กเป็น 100



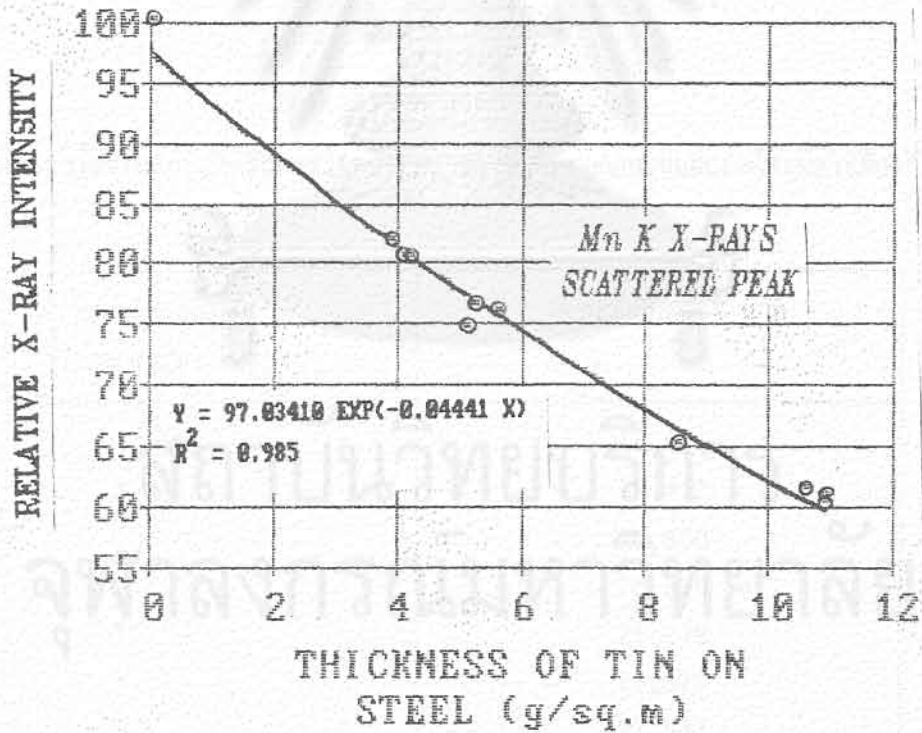
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์เรืองของทองแดงและทองคำกับความหนาของทองคำที่เคลือบบนแผ่นทองแดง



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์เรืองของดีบุกกับความหนาของดีบุกที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก



(n)



(ข)

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ความเข้มรังสีเอกซ์เรืองของเหล็กและ (ข) ความเข้มรังสีเอกซ์กระเจิงของแมงกานีสกับความหนาของฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก

ตารางที่ 4.5

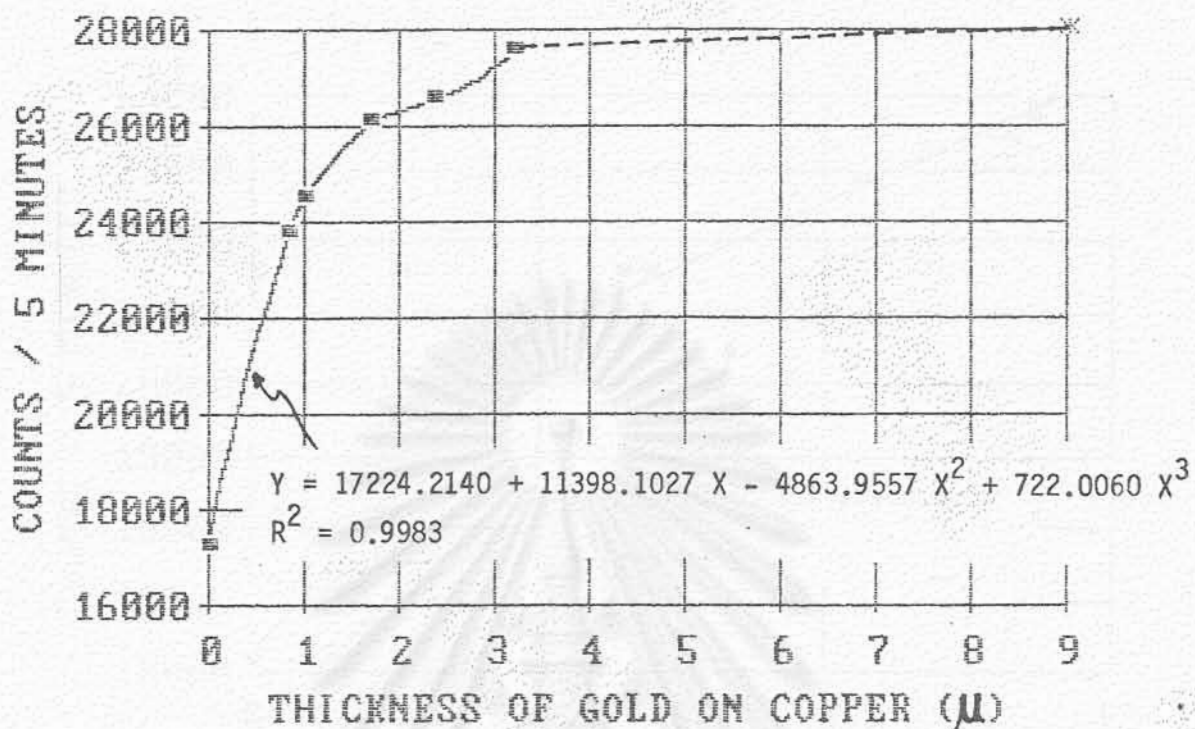
ผลการเปรียบเทียบเครื่องต้นแบบสำหรับการวัดความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดงเมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีคาร์บอน-14 และสตรอนเชียม-90

ความหนาของทองคำ (ไมครอน)	ความเรืองรังสีเบตากระเจิงกลับ	
	คาร์บอน-14 (จำนวนนับต่อ 5 นาที)	สตรอนเชียม-90 (จำนวนนับต่อ 3 นาที)
0	17,222	50,058
0.83	23,591	50,557
1.00	24,729	51,121
1.69	25,920	51,527
2.37	26,614	52,426
3.20	27,534	53,881
8.05	27,658	57,124

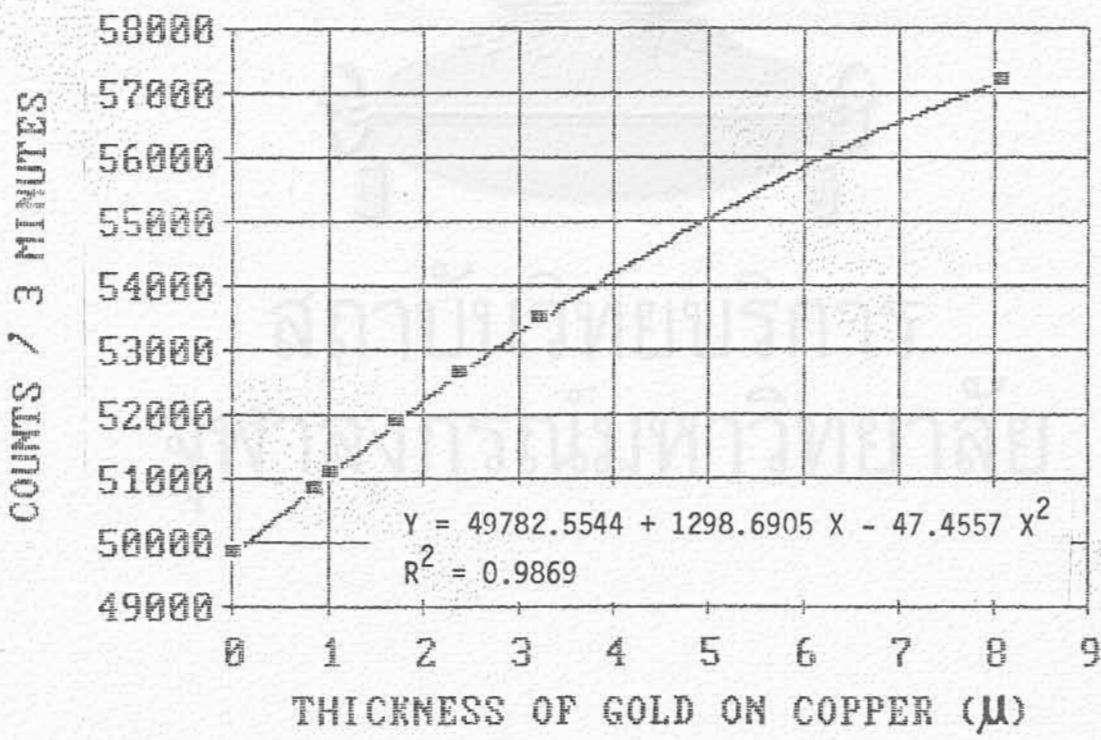
ตารางที่ 4.6

ผลการเปรียบเทียบเครื่องต้นแบบสำหรับการวัดความหนาของดีบุกที่เคลือบบนแผ่นเหล็กเมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีคาร์บอน-14

ความหนาของดีบุก (กรัม/ตร.ม.)	จำนวนนับต่อ 5 นาที
0	16,074
3.9	20,612
4.0	20,800
4.2	20,879
5.1	21,278
5.2	21,523
5.6	21,532
8.5	22,821
10.6	23,410
10.9	23,835
10.9	23,677

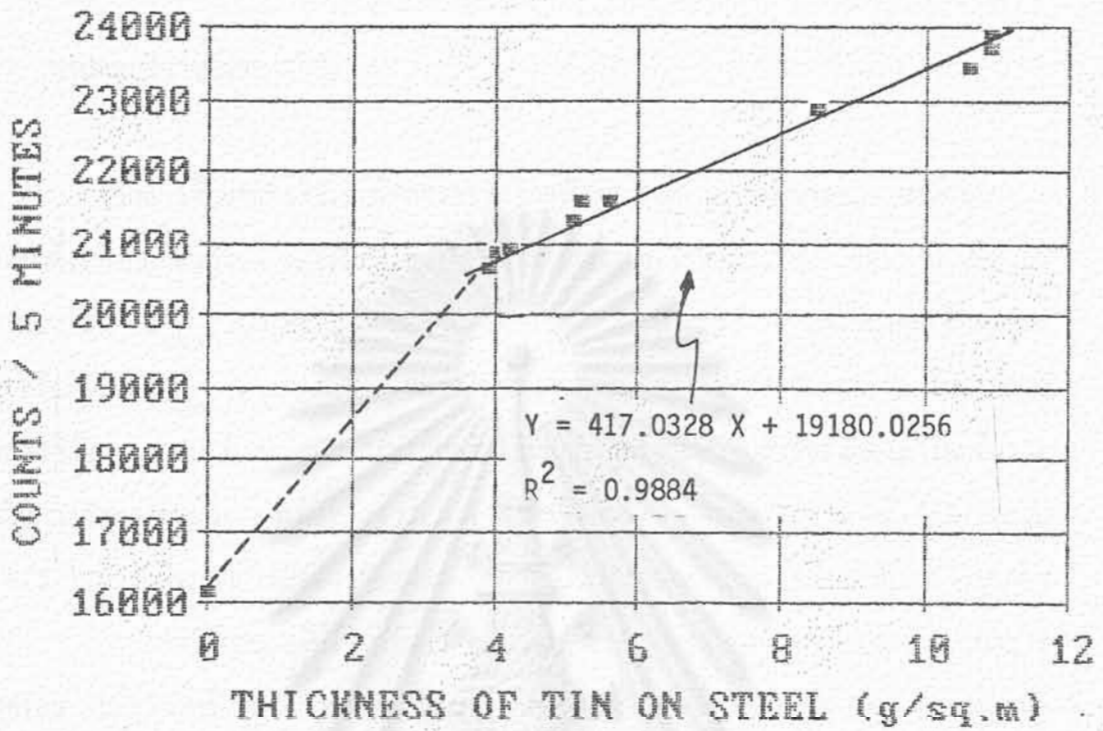


(ก) เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีคาร์บอน-14



(ข) เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีสตรอนเชียม-90

รูปที่ 4.1.2 กราฟเปรียบเทียบของเครื่องต้นแบบสำหรับการวัดความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดง



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบของเครื่องต้นแบบสำหรับการวัดความหนาของ
ทินกที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีคาร์บอน-14

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1 สรุปและวิจัยผลการวิจัย

จากการศึกษาการใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตาวัดความหนาของตัวอย่าง ทองคำที่เคลือบบนทองแดง และคัมภีร์ที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีเบตา 3 ชนิด คือ คาร์บอน-14 (E_{max} 160 keV) คลอรีน-14 (E_{max} 760 keV) และสตรอนเชียม-90/อิตเทรียม-90 (E_{max} 2.28 MeV) พบว่าในช่วงความหนาของทองคำ 0.8-8.05 ไมครอน ที่ทำการวิจัย ความเข้มรังสีเบตากระเจิงกลับเป็นปฏิกิริยาตรงกับความหนาของทองคำโดยที่ความไวในการวัดความหนาลดลงเมื่อพลังงานของรังสีเบตาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5 เมื่อรังสีเบตาที่ใช้มีพลังงานต่ำลง ความหนาสูงสุดของโลหะเคลือบผิวที่วัดได้จะลดลงไปด้วย ดังจะเห็นได้จากกรณีที่ใช้คาร์บอน-14 ความหนาสูงสุดของทองคำที่วัดได้มีค่าประมาณ 3 ไมครอน เนื่องจากถึงจุดอิ่มตัวของการกระเจิงกลับแล้ว แต่เมื่อใช้คลอรีน-36 และสตรอนเชียม-90 ยังไม่ถึงจุดอิ่มตัวในช่วงความหนาที่ทำการวิจัย แสดงให้เห็นว่าต้นกำเนิดรังสีทั้งสองยังสามารถใช้วัดความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดงในช่วงสูงกว่านี้ได้ ผลการวัดความหนาของคัมภีร์ที่เคลือบบนแผ่นเหล็กในช่วงความหนาของคัมภีร์ราว 0.5-1.5 ไมครอน หรือ 4-11 กรัมต่อตารางเมตร พบว่ามีเพียงคาร์บอน-14 เท่านั้นที่สามารถแยกความแตกต่างความหนาในช่วงนี้ได้ เนื่องจากคลอรีน-36 และสตรอนเชียม-90/อิตเทรียม-90 ให้รังสีเบตาที่มีพลังงานสูงเกินไป เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 4.6 แสดงว่าเมื่อใช้คาร์บอน-14 ความหนาสูงสุดของคัมภีร์ที่เคลือบบนเหล็กที่สามารถวัดได้จะอยู่ในช่วงราว 1.5 ไมครอน หรือ 10 กรัมต่อตารางเมตร นอกจากนี้ยังแสดงว่าสามารถใช้วัดความหนาของคัมภีร์ในช่วง 0-0.5 ไมครอน (0-4 กรัมต่อตารางเมตร) ได้ดีด้วย

การศึกษาการใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ในการวัดความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดงและคัมภีร์ที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก โดยใช้ตัวอย่างชุดเดียวกัน พบว่าเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์มีความไวในการวัดความหนาสูงกว่า ในการวัดความหนาของทองคำเมื่อวัดรังสีเอกซ์เส้น L ของทองคำ ความเข้มรังสีแปรผันตรงกับความหนาของทองคำ โดยมีอัตราส่วนระหว่างความ

เข้มรังสีจากแผ่นทองคำหนา 8.05 ไมครอน ต่อความเข้มรังสีจากแผ่นที่ไม่ได้เคลือบทองคำ ประมาณ 2.4 ในขณะที่ในการวัดความเข้มรังสีเอกซ์เส้น ของทองแดงความเข้มรังสีแปรผกผันกับความหนาของทองคำ โดยความเข้มรังสีจากแผ่นที่เคลือบทองคำหนา 8.05 ไมครอน ลดลงเหลือราวร้อยละ 19 ของแผ่นทองแดงที่ไม่ได้เคลือบทองคำ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และกราฟรูปที่ 4.9 สำหรับการวิเคราะห์เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์วัดความหนาของคีมุกพบว่ามีความไวสูงทั้งการวัดรังสีเอกซ์เส้น L ของคีมุก และรังสีเอกซ์เส้น K ของเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 4.4 รูปที่ 4.10 และ 4.11 ก. โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เส้น L ของคีมุก พบว่ามีความไวสูงมาก อัตราส่วนความเข้มรังสีจากแผ่นคีมุกหนา 1.5 ไมครอน (10 กรัมต่อตารางเมตร) กับแผ่นเหล็กที่ไม่ได้เคลือบคีมุกมีค่าสูงถึง 40 เท่า แต่ในช่วงความหนาของคีมุกใกล้ 1.5 ไมครอน ความชันของกราฟเริ่มลดลง แสดงว่าใกล้จะถึงจุดอิ่มตัวของการเกิดรังสีเอกซ์เรืองของคีมุกแล้ว เมื่อวัดรังสีเอกซ์เส้น K ของเหล็ก ความเข้มรังสีจากแผ่นที่เคลือบคีมุกหนา 1.5 ไมครอน ลดลงเหลือราวร้อยละ 60 ของแผ่นที่ไม่ได้เคลือบคีมุก แต่ยังมีแนวโน้มที่จะใช้งานได้ในช่วงความหนาของคีมุกมากกว่านั้นมาก สำหรับการวัดความเข้มรังสีเอกซ์กระเจิงกลับของแมงกานีสจากต้นกำเนิดรังสีเหล็ก-55 ให้ผลใกล้เคียงกับการวัดความเข้มรังสีเอกซ์เหล็กของเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.11

การที่ความไวในการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์สูง เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา ก็ด้วยเหตุผลที่สำคัญคือ เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์สามารถวัดผลของรังสีจากโลหะเคลือบผิวและโลหะฐานแยกกันได้ โดยอาศัยความแตกต่างของพลังงาน ในขณะที่เทคนิคการกระเจิงกลับรังสีเบตาไม่สามารถทำได้ ดังได้เห็นมาแล้วในกราฟรูปที่ 2.7 และ 2.11 เนื่องจากรังสีเบตามีสเปกตรัมแบบต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามการใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตาก็สามารถใช้งานได้หากเลือกใช้ต้นกำเนิดรังสีที่เหมาะสม สิ่งที่จะต้องพิจารณาค้นคว้าแรกในการใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตาวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวก็คือ ความแตกต่างระหว่างเลขอะตอมของโลหะเคลือบผิวและโลหะฐานต้องมากพอ หากเลขอะตอมมีค่าใกล้เคียงกันแล้ว ความเข้มของรังสีเบตากระเจิงสูงสุดจะมีค่าใกล้เคียงกัน (พิจารณาได้จากตารางที่ 2.2) จนไม่สามารถใช้ในการวัดความหนาได้ ต่อจากนั้นจึงพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ต่อไป ได้แก่ ชนิดและความหนาของโลหะเคลือบผิว ชนิดของโลหะฐาน และพลังงานของรังสีเบตา

การวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวโดยใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ที่มีความไวสูงกว่าเมื่อใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น แต่มีต้นทุนสูงกว่าประมาณ 10 เท่าเมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไอโซโทปรังสี สิ่งที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาในการใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์วัดความหนาก็คืออย่างน้อยโลหะฐาน หรือ โลหะเคลือบผิวตัวใดตัวหนึ่งต้องมีเลขอะตอมสูงพอที่จะทำให้รังสีเอกซ์เรืองที่เกิดขึ้นมีพลังงานสูงพอที่จะวัดได้ง่าย ในทางปฏิบัติ (สำหรับการใช้งานในภาคสนาม) เลขอะตอมสูงกว่า 15 ขึ้นไปจึงจะวัดรังสีเอกซ์ได้ง่าย ในกรณีที่โลหะเคลือบผิวและโลหะฐานมีเลขอะตอมต่ำกว่านั้นลงไป เช่น ชิ้นงานอะลูมิเนียมเคลือบบนพลาสติก พลาสติกเคลือบบนอะลูมิเนียมหรือสีเคลือบบนอะลูมิเนียม ไม่สามารถใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ได้ แต่สามารถใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตาหรือรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆที่กล่าวมาแล้วด้วย

ในการวิจัยที่ได้ใช้ชิ้นงานที่เป็นโลหะหนักเคลือบบนโลหะที่เบากว่าทั้งสองชุด สำหรับชิ้นงานที่เป็นโลหะเบาเคลือบบนโลหะหนัก ก็สามารถใช้นิเทศทั้งสองได้เช่นเดียวกัน แต่ความสัมพันธ์ของความเข้มรังสีที่จะวัดได้กับความหนาของโลหะเคลือบผิวจะตรงกันข้ามกับที่ปรากฏในผลการวิจัยนี้

เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นได้เลือกใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา ก่อน เนื่องจากมีต้นทุนต่ำกว่าอุปกรณ์สำหรับเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ราว 10 เท่า ประกอบกับได้พิจารณาถึงความสามารถในการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวตามผลการวิจัยและตามทฤษฎีแล้ว พบว่าสามารถในการวัดความหนาได้ถูกต้อง แม่นยำ และมีความไวสูงเช่นกัน ทั้งนี้ความเหมาะสมขึ้นอยู่กับตัวอย่างที่ต้องการวัดความหนาว่าเป็นโลหะเคลือบผิวและโลหะฐานชนิดใดมีความหนาเท่าใด ต้นกำเนิดรังสีที่เลือกใช้มี 2 ชนิด คือ คาร์บอน-14 ความแรง 5.5 MBq โดยได้ทำการสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับการวัดความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดง และดีบุกที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก ใช้ช่วง 0-8.05 ไมครอน และ 0-10.9 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ แต่เนื่องจากคาร์บอน-14 มีพลังงานต่ำเพียง 160 keV จึงวัดความหนาของทองคำได้ไม่เกินราว 3 ไมครอน ส่วนการวัดความหนาของดีบุกในช่วงนี้ไม่สามารถใช้สตรอนเชียม-90 ได้ เพราะ

มีพลังงานสูงเกินไป จึงใช้ได้เพียงคาร์บอน-14 เท่านั้น ลักษณะเฉพาะของเครื่องต้นแบบมีดังต่อไปนี้ :

ลักษณะเฉพาะที่สำคัญของเครื่องต้นแบบ

ต้นกำเนิดรังสี :

- คาร์บอน-14 ความแรง 5.5 MBq สำหรับทองคำในช่วงไม่เกิน 3 ไมครอน และคัมพูกในช่วง 0-10 กรัมต่อตารางเมตร
- สตรอนเชียม-90 ความแรง 37 MBq สำหรับทองคำในช่วง 3 ไมครอนขึ้นไป

หัววัดรังสี : หัววัดไกเกอร์-มูลเลอร์ Philips ZP 1431 เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร

ขนาดตัวอย่าง :

- ไม่น้อยกว่า 4.5 ตารางเซนติเมตร สำหรับทองคำ
- ไม่น้อยกว่า 9.6 ตารางเซนติเมตร สำหรับคัมพูก

ความผิดพลาด (1σ)

- ทองคำเคลือบบนทองแดง มีความผิดพลาดไม่เกิน 0.05 และ 0.14 ไมครอน ที่ความหนา 1.0 และ 3.0 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีคาร์บอน-14 วัดรังสีนาน 5 นาที
มีความผิดพลาดไม่เกิน 0.25 และ 0.5 ไมครอน ที่ความหนา 3.0 และ 8.0 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีสตรอนเชียม-90 วัดรังสีนาน 3 นาที
- คัมพูกที่เคลือบบนแผ่นเหล็ก มีความผิดพลาดไม่เกิน 0.4 กรัมต่อตร.ม. ในช่วงความหนา 4 ถึง 10 กรัม ต่อตร.ม. เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีคาร์บอน-14 วัดรังสีนาน 5 นาที

เครื่องนับรังสี : NT 1801 พร้อมเครื่องพิมพ์ข้อมูลและอุปกรณ์เชื่อมโยงสัญญาณ

ลักษณะเฉพาะของเครื่องต้นแบบที่แสดงไว้ข้างต้นเป็นลักษณะเฉพาะที่ได้จากผลการวิจัยกับตัวอย่างที่นำมาใช้ โดยได้ออกแบบอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับตัวอย่างที่มีอยู่ ดังนั้นในการนำไปใช้งานสามารถดัดแปลงให้เหมาะสมกับตัวอย่างแต่ละชนิดได้ เช่น ในกรณีที่ต้องการวัดความหนาของทองคำที่เคลือบบนทองแดงเมื่อตัวอย่างมีขนาดเล็กกว่าที่กำหนดไว้ คือ 4.5 ตารางเซนติเมตรก็สามารถทำได้โดยเปลี่ยนไปใช้หน้ากาก (mask) ปิดหน้าตัวอย่างที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งจะต้องทำในลักษณะเดียวกันนี้ในการปรับเทียบด้วย สำหรับความผิดพลาดที่ระบุไว้ก็เช่นกัน สามารถลดลงได้เมื่อเพิ่มเวลานับรังสี หากในกรณีที่ต้องการวัดรังสีในระยะเวลาสั้นแต่ต้องการให้มีข้อผิดพลาดน้อยกว่านี้ก็สามารถทำได้โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีที่มีความแรงสูงขึ้น ซึ่งจะต้องพิจารณาประกอบกับค่า resolving time ของหัววัดรังสีด้วย ค่าผิดพลาดที่แสดงไว้คือที่ 1 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนนับรังสี (1σ) ที่แต่ละจุด และคิดว่าไม่มีข้อผิดพลาดจากการสร้างกราฟปรับเทียบ ในการคำนวณหาสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้คาร์บอน-14 วัดความหนาของทองคำ ใช้ข้อมูลเฉพาะช่วง ถึง 3.20 ไมครอน เท่านั้น เนื่องจากช่วงที่เกินนี้ไปไม่สามารถใช้วัดความหนาได้ นอกจากนี้ในการวัดความหนาของคิงุกได้ใช้ข้อมูลในช่วงความหนาของคิงุก 3.9-10.9 กรัมต่อตารางเมตรเท่านั้น เนื่องจากจุดที่ความหนาของคิงุกเท่ากับศูนย์ (แผ่นเหล็กไม่ได้เคลือบคิงุก) อยู่ห่างออกไปมาก

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่า เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเอกซ์ และเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ สามารถใช้ในการวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวในช่วงความหนาเป็นไมครอนและต่ำกว่าได้ และให้ผลรวดเร็ว แต่มีความเหมาะสมในการใช้งานต่างกันตามชนิดและความหนาของโลหะเคลือบผิว ตลอดจนชนิดของโลหะฐาน ส่วนความถูกต้องขึ้นอยู่กับตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้ในการปรับเทียบเป็นสำคัญ ความแปรปรวนเนื่องจากสถิติในการนับรังสีและอุปกรณ์นับรังสีนั้นสามารถควบคุมให้อยู่ในช่วงไม่เกินร้อยละ 1 ได้ จึงมิได้เป็นสาเหตุของข้อผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น ในกรณีที่ชิ้นงานมีความหนาไม่สม่ำเสมอ ค่าความหนาที่วัดได้จะเป็นค่าเฉลี่ยของความหนาบริเวณที่ทำการวัด ข้อมูลและความชำนาญที่คณะผู้วิจัยได้รับจากการวิจัยนี้จะพื้นฐานในการพัฒนาเครื่องวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวจากเครื่องต้นแบบให้มีคุณภาพดีและมีความสะดวกในการใช้งานมากยิ่งขึ้นต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาถึงการใช้แผ่นกรองรังสี (filter) เพื่อช่วยเพิ่มความไวให้แก่การวัดความหนาของโลหะเคลือบผิวด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา โดยอาศัยการเลื่อน (shift) ของสเปกตรัมรังสีเบตา เมื่อเลชอะตอมของตัวกลางต่างกัน

5.2.2 เนื่องจากหัววัดรังสีเอกซ์แบบพรอพอร์ชันนัล มีความสามารถในการแยกพลังงานไม่ดี (resolution ไม่ดี) ในกรณีที่โลหะฐานกับโลหะเคลือบผิวมีเลชอะตอมใกล้เคียงกันย่อมมีปัญหาในการวัดรังสี การศึกษาการใช้แผ่นกรองรังสีช่วยจะมีประโยชน์ในกรณีดังกล่าว

5.2.3 ควรศึกษาและออกแบบหัววัดความหนาให้สามารถวัดตัวอย่างขนาดเล็กได้ เช่น เครื่องประดับ แหวน ฯลฯ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์โลหะเคลือบผิวที่มีขนาดเล็ก

5.2.4 เนื่องจากการกระเจิงกลับของรังสีเบตา เป็นปฏิภาคกับความหนาและเลชอะตอมของตัวกลาง ดังนั้นการศึกษการใช้ประโยชน์ของเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตา ในการหาส่วนประกอบของวัสดุจึงเป็นเรื่องที่ควรศึกษาวิจัยต่อไป เช่น การหาปริมาณเงินในถ่านหิน การหาส่วนประกอบของโลหะผสมสองชนิด เป็นต้น ทั้งนี้เพราะอุปกรณ์ที่ใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีเบตามีต้นทุนการผลิตต่ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. T. Cullen and P. Petruna, **Plating**, (Sept 1967) 1039.
2. R.P. Gardner and R.L. Ely Jr., **Radioisotope Measurements Applications in Engineering**, Reinhold Publishing, New York, 1967.
3. R. Tertian and F. Claisse, **Principles of Quantitative X-Ray Fluorescence Analysis**, Heyden & Son, London, 1982.
4. R.D. Evans, **The Atomic Nucleus**, TATA McGraw-Hill, New Delhi, 1976.
5. C.G. Clayton and J. F. Cameron, in Proceedings of the IAEA Symposium on Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics Vol. I, Warsaw 1965, IAEA, Vienna, 1966, p.15.
6. H. Miwa, T. Mizukoshi and M. Shimizu, in Proceedings of the IAEA Symposium on Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics Vol. I, Warsaw 1965, IAEA, Vienna, 1966, p.213.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

X-RAY CRITICAL ABSORPTION AND EMISSION ENERGIES (keV)

By S. FINE and C. F. HENDEE *
Philips Laboratories
Irvington on Hudson, New York

Increased use of energy-proportional detectors for X-rays has created a need for a table of energy values of K and L absorption and emission series.

The table presented here includes all elements. Most values were obtained by a conversion to keV of tabulated experimental wavelength values (1-3); some are from previous energy-value compilations (4, 5). Where a choice existed, the value chosen was the one derived from later work. Certain values were determined by interpolation, using Moseley's law. (All this is annotated in footnotes.)

The conversion equations relating energy and wavelength used are (6)

$$E \text{ (keV)} = (12.39644 \pm 0.00017) \lambda(\text{\AA}) \\ = 12.39644 \cdot 1.002020 \lambda(\text{kX unit})$$

In computing values the number of places retained sufficed to maintain the uncertainty in the original source value. The values in the table have been listed uniformly to 1 ev. However, chemical form may shift absorption edges as much as 10-20 ev (4, 5).

To discover computational errors a fit was made to Moseley's law. In general the values were consistent, however there were a few irregularities due to the deviation of some input values (1). These were retained in the

body of the table but a set of values calculated to fit better are footnoted.

The authors wish to express their appreciation to W. Parrish for helpful suggestions and to H. Kasper for performing the computation in connection with this work.

BIBLIOGRAPHY

1. Y. Cauchois, H. Huihui, "Tables de Constantes et Donnees Numeriques, I. Longueurs D'Onde des Emissions X et des Discontinuites D'Absorption X" (Hermann et Cie, Paris France, 1947)
2. A. H. Compton and S. K. Allison, "X-rays in Theory and Experiment" (D. Van Nostrand Co., Inc., New York, 1951)
3. C. E. Moore, "Atomic Energy Levels," NBS 467 (National Bureau of Standards, U. S. Department of Commerce, Washington, D. C., 1949)
4. Y. Cauchois, *J. Phys. Radium* 13, 113 (1952)
5. R. D. Hill, E. L. Church, and J. W. Mihelich, *Rev. Sci. Instr.* 33, 523 (1952)
6. J. W. M. DuMond, E. R. Cohen, *Phys. Rev.* 83, 555 (1951)

X-Ray Critical-Absorption and Emission Energies in keV

Atomic Number	Element	K series					L series							
		K _{ab}	Kβ ₂	Kβ ₁	Kα ₁	Kα ₂	L _{1,2}	L _{11,2}	L _{11,3}	Lγ ₁	Lβ ₂	Lβ ₁	Lα ₁	Lα ₂
1	Hydrogen	0.0136†												
2	Helium	0.0246†												
3	Lithium	0.055				0.052								
4	Beryllium	0.116‡				0.110								
5	Boron	0.192†				0.185								
6	Carbon	0.283				0.282								
7	Nitrogen	0.399				0.392								
8	Oxygen	0.531				0.523								
9	Fluorine	0.687†				0.677								
10	Neon	0.874*				0.851‡	0.048†	0.022†	0.022†					
11	Sodium	1.08*		1.067		1.041	0.055‡	0.034‡	0.034‡					
12	Magnesium	1.303		1.297		1.254	0.063	0.050	0.049					
13	Aluminum	1.559		1.553	1.487	1.486	0.087	0.073**	0.072**					
14	Silicon	1.838		1.832	1.740	1.739	0.118*	0.099**	0.098**					
15	Phosphorus	2.142		2.136	2.015‡	2.014‡	0.153*	0.129‡	0.128‡					
16	Sulphur	2.470		2.464	2.308	2.306	0.193*	0.164**	0.163**					
17	Chlorine	2.819‡		2.815	2.622	2.621	0.238*	0.203‡	0.202‡					
18	Argon	3.203		3.192‡	2.957	2.955	0.287*	0.247**	0.245**					
19	Potassium	3.607		3.589	3.313	3.310	0.341*	0.297**	0.294**					
20	Calcium	4.038		4.012	3.691	3.688	0.399*	0.352	0.349					
21	Scandium	4.496		4.460	4.090	4.085	0.462*	0.411**	0.406**		0.344		0.341	
22	Titanium	4.964		-4.931	4.510	4.504	0.530*	0.460**	0.454**		0.399		0.395	
23	Vanadium	5.463		-5.427	4.952	4.944	0.604*	0.519**	0.512**		0.458		0.452	
24	Chromium	5.988		-5.946	5.414	5.405	0.679*	0.583**	0.574**		0.519		0.510	
25	Manganese	6.537		6.490	5.898	5.887	0.762*	0.650**	0.639**		0.581		0.571	
26	Iron	7.111		7.057	6.403	6.390	0.849*	0.721**	0.708**		0.647		0.636	
27	Cobalt	7.709		7.649	6.930	6.915	0.929*	0.794**	0.779**		0.717		0.704	
28	Nickel	8.331	8.328	8.264	7.477	7.460	1.015*	0.871**	0.853**		0.790		0.775	
29	Copper	8.980	8.976	8.904	8.047	8.027	1.100*	0.953	0.933		0.866		0.849	
30	Zinc	9.660	9.657	9.571	8.638	8.615	1.200*	1.045	1.022		0.948		0.928	
											1.032		1.009	

*Nucleonics, 13(3)36, 1955

Atomic Number	Element	K series					L series						
		$K_{\alpha 2}$	$K_{\beta 1}$	$K_{\beta 2}$	$K_{\gamma 1}$	$K_{\gamma 2}$	$L_{I\alpha 2}$	$L_{II\alpha 2}$	$L_{III\alpha 2}$	$L_{\gamma 1}$	$L_{\beta 1}$	$L_{\beta 2}$	$L_{\alpha 1}$
31	Gallium	10.368	10.365	10.263	9.251	9.234	1.30*	1.134**	1.117**			1.122	1.096
32	Germanium	11.103	11.100	10.981	9.885	9.854	1.42*	1.248**	1.217**			1.216	1.186
33	Arsenic	11.863	11.863	11.725	10.543	10.507	1.529	1.359	1.323			1.317	1.282
34	Selenium	12.652	12.651	12.495	11.221	11.181	1.652	1.473	1.434			1.419	1.379
35	Bromine	13.475	13.465	13.290	11.923	11.877	1.794§	1.599**	1.552**			1.526	1.480
36	Krypton	14.323	14.313	14.112	12.648	12.597	1.931§	1.727**	1.675**			1.638§	1.587**
37	Rubidium	15.201	15.184	14.960	13.394	13.335	2.067	1.866	1.806			1.752	1.694
38	Strontium	16.106	16.083	15.834	14.164	14.097	2.221	2.008	1.941			1.872	1.806
39	Yttrium	17.037	17.011	16.736	14.957	14.882	2.369	2.154	2.079			1.996	1.922
40	Zirconium	17.998	17.969	17.666	15.774	15.690	2.547	2.305	2.220	2.302	2.219	2.124	2.042
41	Niobium	18.987	18.951	18.621	16.614	16.520	2.706	2.467**	2.374	2.462	2.367	2.257	2.166
42	Molybdenum	20.002	19.964	19.607	17.478	17.373	2.884	2.627	2.523	2.623	2.518	2.395	2.293
43	Technetium	21.054§	21.012§	20.585*	18.410*	18.328*	3.054§	2.795§	2.677§	2.792§	2.674§	2.538§	2.424§
44	Ruthenium	22.118	22.072	21.655	19.278	19.149	3.236§	2.966	2.837	2.964	2.836	2.683	2.558
45	Rhodium	23.224	23.169	22.721	20.214	20.072	3.419	3.145	3.002	3.144	3.001	2.834	2.696
46	Palladium	24.347	24.297	23.816	21.175	21.018	3.617	3.329	3.172	3.328	3.172	2.990	2.838
47	Silver	25.517	25.454	24.942	22.162	21.988	3.810	3.528	3.352	3.519	3.348	3.151	2.984
48	Cadmium	26.712	26.641	26.093	23.172	22.982	4.019	3.727	3.538	3.716	3.528	3.316	3.133
49	Indium	27.928	27.859	27.274	24.207	24.000	4.237	3.939	3.729	3.920	3.713	3.487	3.287
50	Tin	29.190	29.106	28.483	25.270	25.042	4.464	4.157	3.928	4.131	3.904	3.662	3.444
51	Antimony	30.486	30.387	29.723	26.357	26.109	4.697	4.381	4.132	4.347	4.100	3.843	3.605
52	Tellurium	31.809	31.698	30.993	27.471	27.200	4.938	4.613	4.341	4.570	4.301	4.029	3.769
53	Iodine	33.164	33.016	32.292	28.610	28.315	5.190	4.856	4.559	4.800	4.507	4.220	3.937
54	Xenon	34.579	34.446*	33.644	29.802*	29.485*	5.452	5.104	4.782	5.036§	4.720§	4.422§	4.111§
55	Cesium	35.959	35.819	34.984	30.970	30.623	5.720	5.358	5.011	5.280	4.936	4.620	4.286
56	Barium	37.410	37.255	36.376	32.191	31.815	5.995	5.623	5.247	5.531	5.156	4.828	4.467
57	Lanthanum	38.931	38.728	37.799	33.440	33.033	6.283	5.894	5.489	5.789	5.384	5.043	4.651
58	Cerium	40.449	40.231	39.255	34.717	34.276	6.561	6.165†	5.729	6.052	5.613	5.262	4.840
59	Praseodymium	41.998	41.772	40.746	36.023	35.548	6.846	6.443	5.968	6.322	5.850	5.489	5.034
60	Neodymium	43.571	43.295*	42.269	37.359	36.845	7.144	6.727	6.215	6.602	6.090	5.722	5.230
61	Promethium	45.207§	44.955§	43.945*	38.649*	38.160*	7.448§	7.018§	6.466§	6.891§	6.336§	5.956	5.431
62	Samarium	46.846	46.553†	45.400	40.124	39.523	7.754	7.281†	6.721	7.180	6.587	6.206	5.636
63	Europium	48.515	48.241	47.027	41.529	40.877	8.069	7.624	6.953	7.478	6.842	6.456	5.846
64	Gadolinium	50.229	49.961	48.718	42.983	42.280	8.393	7.940	7.252	7.788	7.102	6.714	6.059
65	Terbium	51.998	51.737	50.391	44.470	43.737	8.724	8.258	7.519	8.104	7.368	6.979	6.275
66	Dysprosium	53.789	53.491	52.178	45.985	45.193	9.083	8.621*	7.850*	8.418	7.638	7.249	6.495
67	Holmium	55.615	55.292**	53.934§	47.528	46.686	9.411	8.920	8.074	8.748	7.912	7.528	6.720
68	Erbium	57.483	57.085	55.690	49.099	48.205	9.776	9.263	8.364	9.059	8.188	7.810	6.948
69	Thulium	59.335†	58.969**	57.576*	50.730	49.762	10.144	9.628	8.652	9.424	8.472	8.103	7.181
70	Ytterbium	61.303	60.959	59.352	52.360	51.326	10.486	9.977	8.943	9.779	8.758	8.401	7.414
71	Lutecium	63.304	62.946	61.282	54.063	52.959	10.867	10.345	9.241	10.142	9.048	8.708	7.654
72	Hafnium	65.313	64.936	63.209	55.757	54.579	11.264	10.734	9.556	10.514	9.346	9.021	7.898
73	Tantalum	67.400	66.999	65.210	57.524	56.270	11.676	11.130	9.876	10.892	9.649	9.341	8.145
74	Tungsten	69.508	69.090	67.233	59.310	57.973	12.090	11.535	10.198	11.283	9.959	9.670	8.396
75	Rhenium	71.662	71.220	69.298	61.131	59.707	12.522	11.955	10.531	11.684	10.273	10.008	8.651
76	Osmium	73.860	73.393	71.404	62.991	61.477	12.965	12.383	10.869	12.094	10.596	10.354	8.910
77	Iridium	76.097	75.605	73.549	64.886	63.278	13.413	12.819	11.211	12.509	10.918	10.706	9.173
78	Platinum	78.379	77.866	75.736	66.820	65.111	13.873	13.268	11.559	12.939	11.249	11.069	9.441
79	Gold	80.713	80.165	77.968	68.794	66.980	14.353	13.733	11.919	13.379	11.582	11.439	9.711
80	Mercury	83.106	82.526	80.258	70.821	68.894	14.841	14.212	12.285	13.828	11.923	11.823	9.987
81	Thallium	85.517	84.904	82.558	72.860	70.820	15.346	14.697	12.657	14.288	12.268	12.210	10.266
82	Lead	88.001	87.343	84.922	74.957	72.794	15.870	15.207	13.044	14.762	12.620	12.611	10.549
83	Bismuth	90.521	89.833	87.335	77.097	74.805	16.393	15.716	13.424	15.244	12.977	13.021	10.836
84	Polonium	93.112	92.386	89.809	79.296	78.868	16.935	16.244	13.817	15.740	13.338	13.441	11.128
85	Astatine	95.740	94.976	92.319	81.525	78.956	17.490	16.784	14.215	16.248	13.705	13.873	11.424
86	Radon	98.418	97.616	94.877	83.800	81.080	18.058	17.337	14.618	16.768	14.077	14.316	11.724
87	Francium	101.147	100.305	97.483	86.119	83.243	18.638	17.904	15.028	17.301	14.459	14.770	12.029
88	Radium	103.927	103.048	100.136	88.485	85.446	19.233	18.481	15.442	17.845	14.839	15.233	12.338
89	Actinium	106.759	105.838	102.846	90.894	87.681	19.842	19.078	15.865	18.405	15.227	15.712	12.650
90	Thorium	109.630	108.671	105.592	93.334	89.942	20.460	19.688	16.296	18.977	15.620	16.200	12.966
91	Protactinium	112.581	111.575	108.408	95.851	92.271	21.102	20.311	16.731	19.559	16.022	16.700	13.291
92	Uranium	115.591	114.549	111.289	98.428	94.648	21.753	20.943	17.163	20.163	16.425	17.218	13.613
93	Neptunium	118.619	117.533	114.181	101.005	97.023	22.417	21.598	17.614	20.774	16.837	17.740	13.945
94	Plutonium	121.720	120.592	117.146	103.653	99.457	23.097	22.262	18.066	21.401	17.254	18.278	14.279
95	Americium	124.876	123.706	120.163	106.351	101.832	23.793	22.944	18.525	22.042	17.677	18.829	14.618
96	Curium	128.088	126.875	123.235	109.098	104.448	24.503	23.640	18.990	22.699	18.106	19.393	14.961
97	Berkelium	131.357	130.101	126.362	111.896	107.023	25.230	24.352	19.461	23.370	18.540	19.971	15.309
98	Californium	134.683	133.383	129.544	114.745	109.603	25.971	25.080	19.938	24.058	18.980	20.562	15.618
99		138.067	136.724	132.781	117.645	112.244	26.729	25.824	20.422	24.758	19.426	21.166	16.018
100		141.510	140.122	136.075	120.598	114.926	27.503	26.584	20.912	25.475	19.879	21.785	16.379

For $Z \leq 68$, values without symbols are derived from (1). Values prefixed with a - sign are $K_{\beta 1,2}$.
 For $Z \geq 70$, absorption-edge values are from (4) in the case of $Z = 70-83, 88, 90$, and 92; remaining absorption edges to $Z = 100$ are obtained from these by least-squares quadratic fitting. All emission values for $Z \geq 70$ are derived from the preceding absorption edges, and others based on (4), using the transition relations $K_{\alpha 1} = K_{\alpha 2} - L_{III}$, $K_{\alpha 2} = K_{\alpha 1} - L_{II}$, $K_{\beta 1} = K_{\alpha 2} - M_{III}$, etc.
 * Obtained from E. D. Hill, E. L. Church, J. W. Mielich (5). † Derived from Compton and Allison (6). ‡ Derived from C. E. Moore (3).
 § Values derived from Cauchois and Hulubei (1) which deviate from the Moseley law. Better-fitting values are: $Z = 17$, $K_{\alpha 2} = 2.826$; $Z = 43$, $K_{\alpha 1} = 12.370$, $K_{\alpha 2} = 12.250$, $K_{\beta 1} = 20.612$; $Z = 54$, $K_{\alpha 1} = 29.779$, $K_{\alpha 2} = 29.463$, $K_{\beta 1} = 34.398$; $Z = 60$, $K_{\beta 1} = 43.349$; $Z = 61$, $K_{\alpha 1} = 32.726$, $K_{\alpha 2} = 32.180$, $K_{\beta 1} = 43.811$; $Z = 82$, $K_{\alpha 1} = 48.581$, $L_{II} = 7.312$; $Z = 66$, $L_{II} = 8.591$, $L_{III} = 7.790$; $Z = 69$, $K_{\alpha 2} = 59.382$, $K_{\beta 1} = 57.487$.
 ‡ Calculated by method of least squares. ** Calculated by transition relations.

ภาคผนวก ข.

วงจรเรอิ่งนั้ร้งสี่ NT-1801

เรอิ่งนั้ร้งสี่ขนาดเล็กรประกอบด้ว้วงจรรย้อย 8 ส่วน ด้้แก่ แหล่งจ่ายศักคาไฟฟ้า สูงแบบปร้บค้่า ส่วนวัคร์งสี่ ส่วนชยายและแต่งรูปสั้ญญาณให้เป็้นลจจิก ส่วนคววมเกท ส่วน นั้บและแสดงผล 6 หลั้ก ส่วนตั้งเวลา เรทมิเตอร์ และแหล่งจ่ายศักคาค้่า ตั้งแสดงในรูปที่ ข.1 มีการทำงาน ตั้งนี้

1. แหล่งจ่ายศักคาไฟฟ้าสูง

ทำหน้าที่จ่ายไบอัสให้หัววัคไกเกอร์ วงจรก้่าเนคค้ลันสี่เหล็ยมคววมถึ 2 kHz (CV_1) ส่งสั้ญญาณผ่าน Q_8, Q_9 เพ็้ช้บหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ซึ่งรับศักคาไฟฟ้าจากส่วนคววมศักคาปร้บ ค้่าด้้จาก Q_{10} IC_9 เป็้นวงจรรวมทำหน้าที่เป็้รียบเทียบศักคาจากค้่าแบ่งศักคาป้อนกลับที่ R_{21} และ R_{24} กับศักคาอ้างอิง ปร้บค้่าด้้ที่ VR_8 ทำให้เป็้ลียนค้่าศักคาของ T_1 ด้้ ศักคาไฟฟ้า ทางชคชุตยภูมิของ T_1 จะส่งไปวงจรวั้ศักคา 4 เท้า ซึ่งประกอบด้วย $C_{16} - C_{19}$ และ $D_1 - D_4$ เพ็้จ่ายศักคาไฟฟ้าทางออกชวง 250-1250 โวลท์

2. ส่วนวัคร์งสี่

หัววัคไกเกอร์เป็้นหัววัคบรรจุก้่าช ประกอบด้วยแอนคและแคโทด ซึ่งรับไบอัสผ่าน R_1 ประมาณ 900 โวลท์ ณ จุดทำงาน เม็้ออนภาคนิวเคล็ยร์ศกกระทบหัววัคก้่าชภายในนั้นจะ แตกตัวเป็้นกลุ่มของไอออนบวก และอิเล็้กตรอน ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า กลุ่มอิเล็้กตรอน • ประจุไฟฟ้าลบ จะถูกประจุนค้่าเทียบเท้าคาปาซิเตอร์จากกู่ชานของแคโทดและแอนค หลัง การคูกกลันพลังงานจนลันจะคลายประจุผ่านอิมพีแดนซ์ทางอิมพุทของส่วนชยายสั้ญญาณ $R_1 // (R_2 + R_3 // R_{in})$ เกิดเป็้นพัลซ์ไฟฟ้าส่งผ่าน C_1 ไปยังส่วนชยายสั้ญญาณ

3. ส่วนชยายสั้ญญาณและแต่งรูปลจจิก

สั้ญญาณจากหัววัคร์งสี่ จะถูกชยายด้ว้ส่วนชยายสั้ญญาณ ซึ่งประกอบด้วย Q_1, Q_2 คววมต้านทาน และคาปาซิเตอร์ สั้ญญาณจะกลับชั้ว และปร้บอ้ศรชยายให้เหมาะสมด้ว้ VR_1 Q_3, Q_4 เป็้นวงจรระศุนชมิทท์ (schmitt) ทำให้ด้้สั้ญญาณลจจิกส่งให้ส่วนนั้ร้งสี่

4. ส่วนนับและแสดงผลเชิงเลข

IC₁₁ และ IC₁₂ เป็นวงจรมับสิบเรียงลำดับ 6 หลักจาก 10⁰-10⁵ ได้จำนวนนับสูงสุด 10⁶ - 1 ครั้ง สัญญาณ BCD แต่ละหลักนับจะถูกถอดรหัสให้เป็นรหัสเลข 7 ส่วน ขับไดโอดเปล่งแสงผ่านวงจรถ่วงศูนย์หลักหน้า (leading zero suppress) เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า อินพุทของหลักหน่วยเกทไว้ด้วย IC₁₀ เพื่อให้ได้ข้อมูลจำนวนนับต่อหน่วยเวลา ซึ่งตั้งเวลาได้ทั้งภายในและใช้นาฬิกาจับภายนอก

5. เรทมิเตอร์

เป็นส่วนแสดงผลการนับด้วยมิเตอร์ แบบค่าเฉลี่ยจำนวนนับต่อหน้าที่ อาศัยหลักการสมดุลย์ของการประจุและคลายประจุ จากอัตรานับรังสีที่คาปาซิเตอร์ C₉ โดย Q₅ และ Q₆ เป็นทรานซิสเตอร์ขับประจุให้ C₉ = IC₈ ประกอบกันเป็นวงจรมอนอสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ (monostable multivibrator) เลือกค่าความกว้างของพัลส์ (pulse width) 4 ค่า เพื่อให้สัมพันธ์กับอัตรานับเต็มสเกล ซึ่งเลือกได้ x 10, 100, x 1 K

6. ส่วนควบคุมเกท

IC₇ a,b เป็นวงจรรีเลย์ เอส ฟลิปฟลอป ควบคุมการเซทด้วย SW₅ และรีเซทด้วยวงจรถึงเวลา IC₃ b ผ่านเกท IC₇ c นอกจากนี้ยังสามารถเลือกตั้งเวลาจากภายนอกด้วยตำแหน่งของ SW₄

7. ส่วนตั้งเวลา

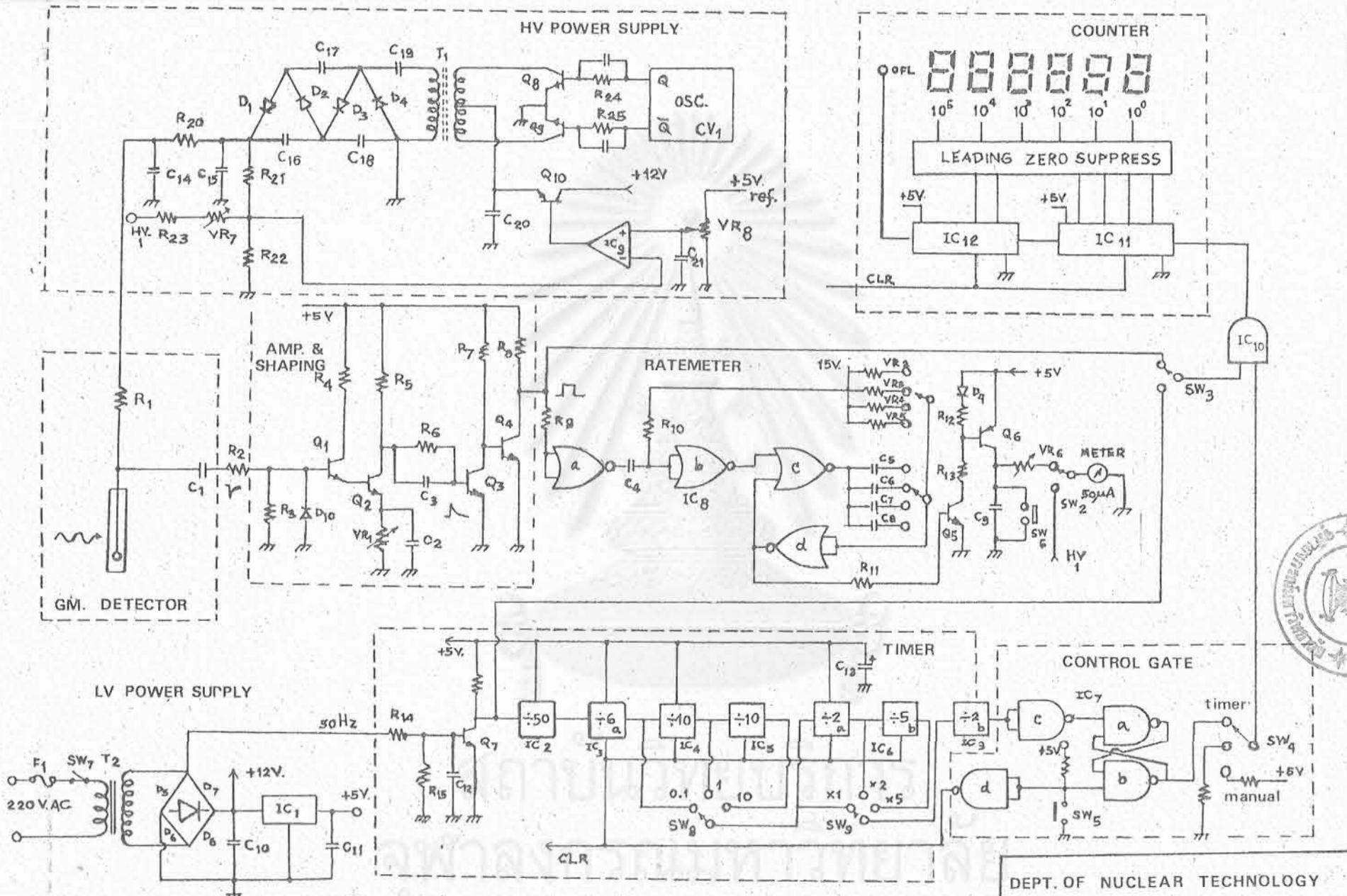
ใช้ฐานเวลา 50 Hz จากไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งคลื่นผ่าน D₆ โดย Q₇ ทำหน้าที่แต่งรูปสัญญาณไซน์เป็นสี่เหลี่ยม IC₂ เป็นวงจรถึงเวลา 50 เพื่อให้ได้สัญญาณนาฬิกา 1 Hz บ้อนให้ IC₃ a ทาร 6 IC₄ และ IC₅ ทาร 10 ความถี่ที่เลือกมายัง SW₉ จะเป็น 10, 1 และ 0.1 cpm ตามลำดับ หรือคิดเป็นคาบเวลา (period) จะได้ 0.1, 1 และ 10 นาที สัญญาณนี้จะนำไปทารต่อด้วย IC₂ คือทาร 2 และทาร 5 บ้อนให้กับ SW₉ เพิ่มการเลือกเวลาเป็น x2 และ x5 นาที ทำให้สามารถเลือกตั้งเวลาได้จาก (0.1 x 1) ถึง (10 x 50) นาที ส่วน IC₃ เป็นวงจรถึงเวลา 3 ทำหน้าที่ปรับช่วงเวลาให้ถูกต้อง

8. แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าต่ำ

เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ส่วนต่างๆ ในเครื่องนับรังสี ประกอบด้วย T_1 เป็นหม้อแปลงลดศักดาไฟฟ้า จาก 220 โวลต์ เป็น 9 โวลต์ เรียงกระแสแบบบริดจ์ (bridge) ด้วย D_5-D_7 กรองกระแสด้วย C_{10} ทำให้ค่าศักดาไฟฟ้า $9 \times \sqrt{2} = 12$ โวลต์ IC_1 เป็นวงจรรวมควบคุมศักดาไฟฟ้าให้คงที่ 5 โวลต์ จ่ายแก่ส่วนต่าง ๆ ที่ต้องการ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.1 วงจรของเครื่องนับรังสีขนาดเล็ก NT-1801

