

การกำจัดปรอทและการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมีนัลกัม  
ที่เหลือทิ้งจากการบูรณะฟัน

นางสาววิลาวรรณ จันทระพาทิน



สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม

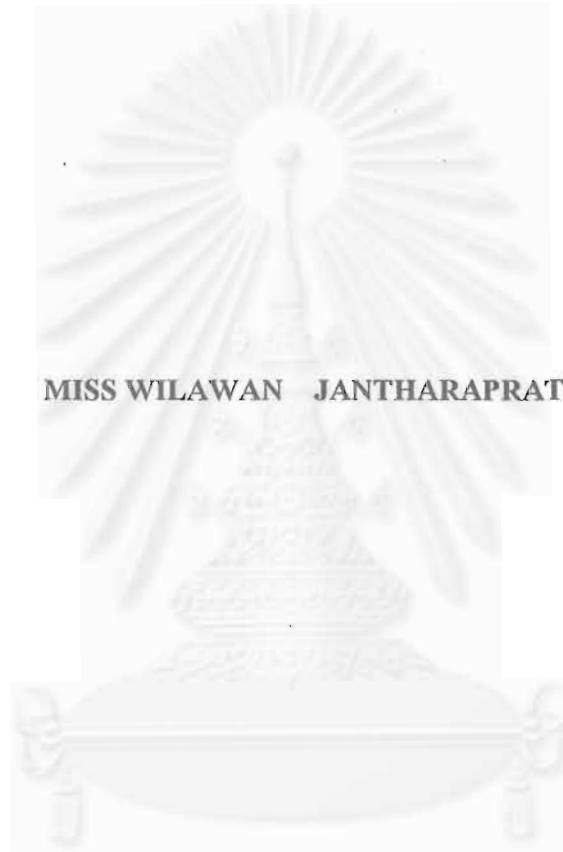
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-057-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**REMOVAL OF MERCURY AND RECOVERY OF SILVER FROM  
DENTAL AMALGAM WASTE**



**MISS WILAWAN JANTHARAPRATHIN**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Environmental Science**

**Inter – Department of Environmental Science**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

**Academic Year 1999**

**ISBN 974-333-057-7**



วิทยารรณั จันทรประทีน : การกำจัดปรอทและการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมที่  
เหลือทิ้งจากการบูรณะฟัน (REMOVAL OF MERCURY AND RECOVERY OF SILVER  
FROM DENTAL AMALGAM WASTE) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. อมร เพชรสม, อ. ที่ปรึกษาร่วม  
: รศ. ทพญ. ชัชวีร์ สุชาติถ้ำพงศ์ ; 104 หน้า. ISBN 974-333-057-7.

ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดปรอทและการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจือ  
อะมัลกัมที่เหลือทิ้งจากการบูรณะฟันอย่างปลอดภัย โดยขบวนการขั้นแรกคือการกำจัดปรอทออกก่อนด้วย  
วิธีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดันสูญญากาศ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าสามารถ  
กำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมได้ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดคือร้อยละ 88.01 โดยน้ำหนัก  
จากการตรวจวัดปริมาณไอปรอทในอากาศขณะปฏิบัติงาน พบว่าปริมาณไอปรอทในอากาศไม่เกินค่า  
มาตรฐานปรอทในอากาศที่ 0.05 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขั้นตอนที่สองทดลองแยกโลหะเงินด้วยวิธีการ  
ทางเคมีไฟฟ้าและวิธีการใช้สารเคมี พบว่าการใช้วิธีการทางเคมีไฟฟ้าไม่สามารถแยกโลหะเงินออกจากโลหะ  
เจือ อะมัลกัมได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะที่ทำการทดลอง ส่วนวิธีการใช้สารเคมีทำโดยการละลาย  
โลหะเจืออะมัลกัมในกรดไนตริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แล้วจึงนำไปตกตะกอน  
ให้อยู่ในรูปของซิลเวอร์คลอไรด์ จากนั้นรีดิวซ์ด้วยสังกะสีในกรดให้อยู่ในรูปของโลหะเงิน พบว่าสามารถ  
แยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมได้ถึงร้อยละ 97.44 โดยน้ำหนัก โดยโลหะเงินที่ได้มีความบริสุทธิ์  
ร้อยละ 99.99369 โดยน้ำหนัก และสูงกว่าโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัมซึ่งมีความบริสุทธิ์ร้อยละ  
99.99127 โดยน้ำหนัก จึงสามารถนำไปใช้งานทางด้านทันตกรรมได้อีกครั้ง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... สาขาวิชา .....  
สาขาวิชา ..... วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม .....  
ปีการศึกษา ..... 2542 .....

ลายมือชื่อนิติต ..... วิทยารรณั จันทรประทีน .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... อมร เพชรสม .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... ชัชวีร์ สุชาติถ้ำพงศ์ .....

## 3972769523 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD:

MERCURY/ REMOVAL/ SILVER/ RECOVERY/AMALGAM

WILAWAN JANTHARAPRATHIN : REMOVAL OF MERCURY AND RECOVERY SILVER FROM DENTAL AMALGAM WASTE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. AMORN PETSOM. Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. CHATCHAREE SUCHATLAMPONG. 104 pp. ISBN 974-333-057-7.

Removal of mercury and recovery of silver from dental amalgam waste was studied by first removal of mercury from dental amalgam by heating at 200 °C under vacuum for 4 hours. It was found that 88.01 % w/w of mercury can be removed from dental amalgam. The amount of mercury vapor in the working area was monitored, and found that the amount of mercury vapor was lower than standard value at 0.05  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  of air. The second step was to recover silver metal using electrochemistry and chemical methods. The result indicated that electrochemistry could not recover silver metal from dental amalgam with high efficiency under working condition. The chemical method was performed by dissolving mercury removed dental amalgam in 35 % w/v nitric acid, followed by precipitating silver chloride with hydrochloric acid and reducing silver chloride to silver metal by zinc dust. The result indicated that 97.44% of silver metal could be recovered from mercury removed dental amalgam with 99.99369% w/w purity, which is higher than silver metal for dental application (99.99127 % w/w). Thus, this silver metal is suitable for use directly in dental application.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....INTERDEPARTMENT..... ลายมือชื่อนิสิต..... จุลพรรณ จันทร์ประทีป.....  
สาขาวิชา.....ENVIRONMENTAL SCIENCE..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... อมร นิสอม.....  
ปีการศึกษา.....1999..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... อ.ศ. จุลลดา.....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจากผู้เกี่ยวข้องหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำตลอดจนให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างมากต่อผู้วิจัย และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิงชัชวีร์ สุชาติลาภพงศ์ ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ ตลอดจนตรวจและแก้ไขรายละเอียดต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ได้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิพัฒน์ พัฒนผลไพบุลย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ปิยะธีรธิดาวรกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา ที่กรุณาสละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำและการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและมูลนิธิชิน โสภณพานิช ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยส่วนหนึ่งในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล คุณอภิวัฒน์ จุฑาธำถัย และเจ้าหน้าที่หน่วยวิจัยทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์และความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการวิจัยสำหรับทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา คุณชูศรี บุญยะผลานันท์ และพี่สาวผู้เป็นเสมือนเพื่อน ตลอดจนเพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน ที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาครั้งนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำย่อ.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โลหะเจืออะมัลกัม.....	5
2.1.1 อะมัลกัมโดยทั่วไป.....	5
2.1.2 พื้นฐานโลหะวิทยาของอะมัลกัม.....	6
2.2 โลหะเงิน.....	10
2.3 โลหะปรอท.....	13
2.3.1 การใช้ประโยชน์ของปรอท.....	15
2.3.2 การเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์.....	16
2.3.3 ความเป็นพิษของโลหะปรอท.....	17
2.4 โลหะดีบุก.....	18
2.4.1 การใช้ประโยชน์ของโลหะดีบุก.....	18
2.4.2 ความเป็นพิษของโลหะดีบุก.....	19
2.5 โลหะทองแดง.....	19
2.5.1 การใช้ประโยชน์ของโลหะทองแดง.....	20
2.5.2 ความเป็นพิษของโลหะทองแดง.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6	การจัดการของเสียอันตราย.....	21
2.6.1	การนำสิ่งที่ยังเป็นประโยชน์กลับมาใช้ใหม่.....	22
2.6.2	การเผาพร้อมกับปูนซีเมนต์ในเตาเผาแบบนอนหมุน.....	22
2.6.3	การเผาด้วยอุณหภูมิสูง.....	23
2.6.4	การทำให้คงตัวหรือคงรูปไม่ละลายน้ำ.....	23
2.6.5	การบำบัดโดยวิธีทางชีวภาพ.....	23
2.6.6	การฝังกลบอย่างปลอดภัย.....	23
2.7	การแยกโลหะเงินเพื่อนำกลับมาใช้อีก.....	23
2.7.1	วิธีทางเคมีไฟฟ้า.....	24
2.7.2	การแยกโลหะเงิน โดยการประยุกต์ใช้วิธีการ แยกสลายด้วยไฟฟ้า.....	28
2.7.3	วิธีการใช้สารเคมี.....	28
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
3.	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	39
3.1	รูปแบบและขั้นตอนการศึกษา.....	39
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	40
3.2.1	เครื่องแก้ว.....	40
3.2.2	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	40
3.3	สารเคมีและวิธีการเตรียม.....	41
3.4	วิธีการทดลอง.....	47
3.4.1	การวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะที่เป็นองค์ประกอบโลหะเจือ อะมัลกัมตั้งต้น.....	47
3.4.2	การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดปรอท.....	51
3.4.3	การวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะที่เป็นองค์ประกอบโลหะเจือ อะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้ว.....	51
3.4.4	การศึกษาปริมาณปรอทในอากาศภายในห้องปฏิบัติการ.....	51
3.4.5	การศึกษาระยะลายอิเล็กโตรไลต์ในการแยกโลหะเงินด้วย วิธีการแยกสลายด้วยไฟฟ้า.....	53



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.6	การศึกษาความเข้มข้นกรดไนตริกที่เหมาะสม ในการแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมี.....	53
3.4.7	การหาความบริสุทธิ์ของโลหะเงิน.....	55
3.5	การวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	56
4.	ผลการวิจัยและวิจารณ์.....	58
4.1	การหาปริมาณ โลหะที่เป็นองค์ประกอบ โลหะเจืออะมัลกัมตั้งต้น.....	58
4.2	การหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดปรอท.....	61
4.3	การหาปริมาณ โลหะที่เป็นองค์ประกอบ โลหะเจืออะมัลกัม หลังการกำจัดปรอท.....	62
4.4	การหาปริมาณปรอทในอากาศภายในห้องปฏิบัติการ.....	64
4.5	การศึกษาการแยกโลหะเงินด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า.....	65
4.6	การศึกษาการแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมี.....	68
4.6.1	การศึกษาประสิทธิภาพการแยกโลหะเงิน.....	68
4.6.2	การหาความบริสุทธิ์ของโลหะเงิน.....	71
4.7	การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการทดลอง.....	76
5.	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	78
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	78
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	80
	รายการอ้างอิง.....	82
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	86
	ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลอง.....	92
	ภาคผนวก ค ปริมาณโลหะมลทินและความบริสุทธิ์ของโลหะเงิน.....	96
	ภาคผนวก ง การคำนวณปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการตกตะกอน.....	99
	ภาคผนวก จ การคำนวณค่าใช้จ่ายในการทดลอง.....	100
	ประวัติผู้เขียน.....	104

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบของอะมัลกัมตามมาตรฐาน ISO 1559-1986 (E).....	6
ตารางที่ 2.2	วิธีการทางเคมีไฟฟ้า.....	24
ตารางที่ 2.3	ประสิทธิภาพการนำเงินกลับมาใช้ใหม่.....	36
ตารางที่ 4.1	ปริมาณโลหะต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในโลหะเจืออะมัลกัม.....	59
ตารางที่ 4.2	ผลการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมโดยการให้ความร้อน.....	61
ตารางที่ 4.3	ปริมาณโลหะต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในโลหะเจืออะมัลกัม ก่อนและหลังการกำจัดปรอท.....	63
ตารางที่ 4.4	ปริมาณปรอทในอากาศภายในห้องปฏิบัติการที่ตรวจพบ.....	64
ตารางที่ 4.5	ปริมาณธาตุที่ตรวจพบจากสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทด เมื่อใช้สารละลาย อิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ ด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ EDS .....	66
ตารางที่ 4.6	ปริมาณโลหะเงินในสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	68
ตารางที่ 4.7	น้ำหนักโลหะเงินที่ได้จากการแยกโลหะเงินที่ความเข้มข้นกรดไนตริก ต่าง ๆ และประสิทธิภาพในการแยกโลหะเงิน.....	70
ตารางที่ 4.8	ปริมาณโลหะมลทินในโลหะเงินที่ได้จากการแยกโลหะเงินที่ ความเข้มข้นของกรดไนตริกต่าง ๆ.....	74
ตารางที่ 4.9	ความบริสุทธิ์ของโลหะเงินจากการแยกโลหะเงินที่ความเข้มข้นของ กรดไนตริกต่าง ๆ และโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม ซึ่งตรวจวัดสารมลทินด้วย AAS.....	74

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผงโลหะเงินเจือชนิดมีทองแดงน้อยกับ ปรอท.....	9
รูปที่ 2.2	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผงโลหะเงินเจือชนิดทองแดงมาก กับปรอท.....	9
รูปที่ 4.1	ปริมาณโลหะต่างๆ ในโลหะเจืออะมัลกัมที่ตรวจพบและที่คำนวณ จากอัตราส่วนผสม.....	60
รูปที่ 4.2	ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอท.....	60
รูปที่ 4.3	ปริมาณโลหะที่เป็นองค์ประกอบของโลหะเจืออะมัลกัม ก่อนและภายหลังการกำจัดปรอท.....	63
รูปที่ 4.4	ประสิทธิภาพในการแยกโลหะเงินที่ความเข้มข้นกรดไนตริกต่างๆ.....	70
รูปที่ 4.5	ปริมาณโลหะมลทินในโลหะเงินที่ได้จากการแยกที่ความเข้มข้น กรดไนตริกต่างๆและโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม.....	75
รูปที่ 4.5	ความบริสุทธิ์ของโลหะเงินจากการแยกโลหะเงินจากการแยกที่ความ เข้มข้นกรดไนตริกต่างๆและโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม.....	75

## คำย่อ

AAS	= อะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
AAS – Cold Vapor	= อะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดไริ่เปลวไฟ (Atomic Absorption Spectrophotometer - Cold Vapor Technique)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ



### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แร่เงินเป็น โลหะที่มนุษย์รู้จักและสามารถนำมาใช้ประโยชน์กันมาเป็นเวลานานนับหลายพันปี หลักฐานอย่างหนึ่งซึ่งสามารถยืนยันได้คือ เครื่องประดับเงินของชาวอียิปต์โบราณ 4,000 ปีก่อนคริสต์ศักราช ประโยชน์สำคัญของโลหะเงินในสมัยโรมันคือใช้เงินเป็นหลักในระบบเงินตรา ในอดีตสามารถแยกโลหะเงินออกจากแร่เงินได้โดยตรงแต่ในปัจจุบันแร่ที่มีโลหะเงินอยู่โดยตรงแทบจะไม่มีเหลืออยู่เลย จึงต้องหันมาใช้แร่ที่มีคุณภาพต่ำลงและใช้วิธีแยกเงินที่เป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่โลหะชนิดอื่นๆ เช่น ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และทองคำ ประเทศผู้ผลิตแร่เงินที่สำคัญของโลกส่วนใหญ่อยู่ในทวีปอเมริกาเหนือและใต้ ได้แก่ เม็กซิโก สหรัฐอเมริกา แคนาดา และเปรู มีการประมาณการกันว่าโลกขาดแคลนแร่เงินถึงปีละ 100 – 500 ล้านออนซ์ ในช่วงระยะ 30 – 40 ปีมานี้ผลผลิตของโลหะเงินค่อนข้างน้อยไม่พอเพียงสำหรับการใช้งาน จึงต้องมีการนำเหรียญเงินที่เลิกใช้แล้วมาหลอมใหม่

โลหะเงินเกือบร้อยละ 90 ของผลผลิตโลกถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมายหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมผลิตฟิล์มภาพยนตร์ งานถ่ายภาพและอัดภาพ อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ภาชนะเครื่องใช้ เหมืองภูเขาปัมป์และเหรียญตรา เครื่องประดับ ตลอดจนวงการแพทย์และทันตกรรม การใช้ประโยชน์ของโลหะเงินในงานทางด้านทันตกรรมนั้นอยู่ในรูปของโลหะเจือระหว่างโลหะเงิน ดีบุกและทองแดง เมื่อต้องนำไปใช้งานจะผสมกับปรอทเพื่อใช้เป็นวัสดุในการอุดฟันหรือที่รู้จักกันในชื่อของโลหะอะมัลกัม หรือใช้ร่วมกับโลหะชนิดอื่นเพื่อทำครอบฟัน

ปัจจุบันนี้คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดลสามารถผลิตผงโลหะดังกล่าวได้เองแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ โดยสูตรที่ใช้คืออัตราส่วนระหว่าง เงิน ดีบุก และทองแดง เป็น 60:27:13 โดยน้ำหนัก นำมาผลิตด้วยวิธีก๊าซอะตอมไมเซชัน จะได้ผงโลหะที่มีอนุภาคกลมเมื่อนำมาใช้งานต้องผสมผงโลหะกับปรอทในอัตราส่วน 1:0.95 โดยน้ำหนัก (คณะทันตแพทย

ศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2537) ในการใช้งานทางด้านทันตกรรมนั้น โลหะเจืออะมัลกัมที่ได้จากการผสมผงโลหะกับปรอทจะมีลักษณะคล้ายแป้งเปียกคืออยู่ในสถานะที่ปั้นแต่งได้ (paste) แล้วนำไปใช้ในการอุดฟัน ในการปฏิบัติงานมักพบว่าโลหะอะมัลกัมเหลือเก็บอยู่เป็นจำนวนมากและบางส่วนปล่อยทิ้งออกสู่สภาพแวดล้อมโดยปะปนกับขยะในการรักษาทางทันตกรรมทั่วไปหรือออกมาพร้อมกับน้ำทิ้ง ดังนั้นจึงควรมีแนวทางในการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งนี้โดยวิธีที่ปลอดภัย ไม่ก่อให้เกิดอันตรายอันเนื่องมาจากมลพิษของปรอทที่อาจปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม อีกทั้งโลหะเงินเป็นโลหะที่มีราคาสูงจึงควรมีการศึกษาหาแนวทางในการแยกโลหะเงินเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง เคยปรากฏว่ามีผู้รับซื้อโลหะอะมัลกัมที่เหลือทิ้งนี้เพื่อต้องการนำโลหะเงินกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง โดยทำการเผาเพื่อกำจัดปรอทซึ่งเป็นการเผาในสภาวะที่ไม่มีการควบคุมและปล่อยให้ไอปรอทออกสู่บรรยากาศ

จากคุณสมบัติของปรอทที่มีจุดเดือด +356.9 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดเดือดที่ต่ำกว่าโลหะชนิดอื่นที่เป็นส่วนประกอบของโลหะอะมัลกัม และเนื่องจากปรอทเป็นสารมลพิษ การปล่อยออกสู่สภาพแวดล้อมจึงอาจก่อให้เกิดอันตราย การกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมจึงควรทำด้วยวิธีการที่มีความปลอดภัย จึงใช้แนวทางในการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมโดยการทำให้เป็นไอในอุปกรณ์กำจัดปรอทซึ่งติดตั้งอยู่ในตู้ดูดควันที่ต่อกับเครื่องกำจัดไอสารพิษจากนั้นจึงนำโลหะเจืออะมัลกัมส่วนที่เหลือไปทำการศึกษาเพื่อแยกโลหะเงินด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า และวิธีการใช้สารเคมี เพื่อให้ได้วิธีที่เหมาะสมในการแยกโลหะเงินและโลหะเงินที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง

วิธีการทางเคมีไฟฟ้า เป็นวิธีการแยกสารตัวอย่างออกจากสารตั้งต้นโดยการใช้ไฟฟ้าทำให้เกิดการสลายตัวของสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้าหนึ่ง (electrolysis) และเกิดการพอกพูนของสารที่ต้องการที่อีกขั้วไฟฟ้าหนึ่ง (electrodeposition) ซึ่งคาดว่าวิธีการนี้จะทำให้ได้โลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์สูงอันเนื่องจากเป็นวิธีการที่มีความจำเพาะเจาะจงสูง มีการรบกวนของสารที่ไม่ต้องการน้อยถ้าสามารถปรับสภาวะให้เหมาะสม

วิธีการใช้สารเคมี เป็นวิธีการที่มีขั้นตอนค่อนข้างมาก คือต้องนำสารตัวอย่างมาละลายในกรดเข้มข้น จากนั้นจึงตกตะกอนให้อยู่ในรูปของซิลเวอร์คลอไรด์ ( $\text{AgCl}$ ) แล้วจึงนำมารีดิวซ์ให้อยู่ในรูปของโลหะเงิน (cement silver) และขั้นตอนสุดท้ายต้องนำมาหลอมเพื่อให้ได้เป็นโลหะเงินที่มีลักษณะเป็นเม็ดเงิน ซึ่งคาดว่าวิธีการนี้จะสามารถแยกโลหะเงินกลับมาใช้ใหม่ได้

และโลหะเงินที่ได้ก็คาดว่าจะมีความบริสุทธิ์สูงสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ทางทันตกรรมได้อีก

ด้วยแนวทางดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาวิธีการกำจัดปรอทและแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมที่เหลือทิ้ง เพื่อให้ได้วิธีการที่มีความปลอดภัยไม่ก่อมลพิษต่อสภาพแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น และการแยกโลหะเงินเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้งนั้นเป็นการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

## 1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

1. เพื่อกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมที่เหลือทิ้ง
2. เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมที่เหลือทิ้งด้วยวิธีการแยกสลายด้วยไฟฟ้าและวิธีการใช้สารเคมี
3. เพื่อศึกษาความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่แยกได้ โดยเปรียบเทียบกับโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตโลหะเจือเพื่อการบูรณะฟัน

## 1.3 สมมติฐานการศึกษา

1. ปรอทในโลหะเจืออะมัลกัมที่เหลือทิ้งสามารถแยกออกมาได้ด้วยความร้อน
2. การแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมสามารถทำได้ด้วยวิธีการแยกสลายด้วยไฟฟ้าและวิธีการใช้สารเคมี ในสถานะที่เหมาะสมจะทำให้ได้โลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99.9 โดยน้ำหนัก
3. โลหะเงินที่ได้โดยวิธีการนี้มีความบริสุทธิ์เพียงพอที่จะสามารถนำไปใช้งานทางด้านทันตกรรมได้อีก

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้จะใช้กระบวนการแยกปรอทออกก่อนโดยการให้ความร้อน และศึกษาวิธีการและสถานะที่เหมาะสมในการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้ว โดยวิธีการแยกสลายด้วยไฟฟ้าและวิธีการใช้สารเคมีภายในห้องปฏิบัติการและศึกษา

ความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ได้ ซึ่งคาดว่าจะสามารถทำให้ได้โลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99.9 โดยน้ำหนัก

โลหะเจืออะมัลกัมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้จากโครงการผลิตโลหะเจือเพื่อการบูรณะฟันของคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ซึ่งมีสูตรการผสมโลหะต่างๆเป็นสูตรเฉพาะและใช้ปฏิบัติงานจริงในปัจจุบัน

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สภาวะที่เหมาะสมของการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัม
2. ได้ปรอทที่สามารถนำเข้าสู่กระบวนการทำปรอทให้บริสุทธิ์ และโลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์สูงสามารถนำไปใช้งานทางด้านทันตกรรมได้ จึงเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด
3. ได้วิธีการป้องกันมลพิษจากปรอทซึ่งเป็นส่วนผสมของโลหะเจืออะมัลกัมไม่ให้ปนเปื้อนเมื่อทิ้งออกสู่สภาพแวดล้อม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โลหะเจืออะมัลกัม ( ชัชร สุชาติคำพงศ์ และคณะ, 2539)

##### 2.1.1 โลหะเจืออะมัลกัมโดยทั่วไป

ผงโลหะอะมัลกัม (amalgam) หรือโลหะเข้าปรอท หมายถึงโลหะเจือที่ได้จากการผสมระหว่างปรอทกับโลหะอื่นๆ ในทางทันตกรรม ผงโลหะที่ใช้ผสมกับปรอทเป็นผงโลหะเงินเจือ (dental silver alloy) เป็นผงโลหะที่เกิดจากการนำโลหะหลายชนิดมาหลอมรวมกัน โดยมีเงินเป็นโลหะหลัก มีดีบุกและทองแดงเป็นโลหะรอง นอกจากนี้ยังมีโลหะอื่นผสมอยู่บ้าง เช่น สังกะสีหรืออินเดียมเป็นต้น เมื่อนำผงโลหะเงินเจือผสมกับปรอทได้สารประกอบใหม่เรียกว่า อะมัลกัมเงิน (dental silver amalgam) หรือเรียกกันว่า อะมัลกัม มีลักษณะอ่อนนุ่มอยู่ในสภาพปั้นแต่งได้ อะมัลกัมมีระยะเวลาในการอ่อนตัวพอเหมาะที่จะใช้ในการอุดฟันและแต่งให้ได้รูปร่างฟันตามธรรมชาติที่ดี

อะมัลกัมเป็นวัสดุที่ใช้ในการอุดฟันมานานตั้งแต่สมัยต้นศตวรรษที่ 19 และได้ใช้มาเรื่อยๆ จนถึงปัจจุบัน โดยได้มีการพัฒนาวัสดุให้มีคุณภาพดีขึ้นจนอาจกล่าวได้ว่า อะมัลกัมเป็นวัสดุอุดฟันที่ใช้ได้มีคุณภาพดีที่สุด โดยปัจจุบันยังไม่สามารถพัฒนาวัสดุใดที่ใช้ได้ง่าย ทนทาน แข็งแรง ถึงแม้จะมีข้อดีหลายประการ ก็ยังมีข้อด้อยอยู่เช่นกัน เช่น การต้านแรงอัดระยะเริ่มแรกมีน้อย เปลี่ยนสีได้ สีไม่เหมือนฟันและอาจแตกได้ นอกจากนี้การที่มีปรอทเป็นส่วนประกอบจึงทำให้เป็นข้อได้แย้งว่าอาจทำให้เกิดอันตรายได้ ซึ่งจากประการหลังนี้ ได้มีการศึกษาเรื่องนี้ อีกมากแต่ยังคงไม่สามารถมีเอกสารอ้างอิงทางวิทยาศาสตร์ที่สรุปได้ว่ามีผู้ใดได้รับอันตรายจากการอุดฟันด้วยอะมัลกัมเลย อย่างไรก็ตามปัญหาที่เห็นได้ชัดเจนคือปัญหาสถานะแวดล้อม สิ่งนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาได้คือ การทิ้งปรอทลงในทางระบายน้ำสาธารณะ จึงจำเป็นต้องได้รับการพิจารณาแก้ไขให้ถูกต้อง เช่น การทำช่องพักน้ำในเครื่องทำฟัน บำบัดน้ำทิ้งให้สะอาดก่อนปล่อยออกสู่ท่อระบายน้ำใหญ่ หรือเร่งการพัฒนาวัสดุอุดฟันที่ไม่ต้องใช้ปรอทเข้ามาทดแทน

## 2.1.2 พื้นฐานโลหะวิทยาของอะมัลกัม

### 1. ส่วนประกอบของผงโลหะเงินเจือ

อะมัลกัมในสมัยต้นศตวรรษที่ 19 จนถึงปลายศตวรรษ (ก่อน 1962) มีสูตรพื้นฐานประกอบด้วย เงิน 3 ส่วน ดีบุก 1 ส่วน ทองแดงประมาณร้อยละ 5 และมีสังกะสีในปริมาณเล็กน้อย อะมัลกัมสูตรนี้จึงเรียกว่าสูตรอนุรักษ์นิยม (conventional alloy) หรือสูตรชนิดมีทองแดงน้อย (low copper alloy) อะมัลกัมสูตรนี้มักพบว่าเกิดโครงสร้างที่ตีบูกจับกับปรอทโดยตรง หรือเรียกว่าแกมมาทู ( $\gamma_2$ ) เฟส โครงสร้างเป็นลักษณะ HPC (hexagonal closed pack) ส่วนนี้อ่อนแอ มักเกิดการกัดกร่อน (corrosion) ได้ง่าย จากการศึกษาค้นคว้าต่อมาได้พบว่า ถ้าเติมทองแดงลงไปในส่วนประกอบให้มากขึ้น โครงสร้างตีบูก-ปรอท ลดลง และผลปรากฏทางคลินิกดีขึ้นด้วย อะมัลกัมชนิดนี้ได้ชื่อว่า new generation หรือ  $\gamma_2$ -free หรือ high copper alloy

มีข้อกำหนดส่วนประกอบของผงโลหะเงินเจือและการสำรวจปริมาณส่วนประกอบของโลหะพื้นฐานของผงโลหะเงินเจือคือ โลหะเงิน ดีบุก และทองแดง นอกจากนี้อาจมีโลหะอื่นเป็นส่วนประกอบเพิ่มเติมเล็กน้อยได้ ส่วนผสมที่ใช้ใช้นั้น มีโลหะเงินเป็นส่วนประกอบสูงสุด มีดีบุกและทองแดงในสัดส่วนน้อยกว่า บางผลิตภัณฑ์จากทางยุโรปพบว่า มีปรอทผสมอยู่บ้าง ได้แสดงตารางสัดส่วนตามเกณฑ์ข้อกำหนดของ ISO 1559-1986 (E) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของอะมัลกัมตามมาตรฐาน ISO 1559-1986 (E)

โลหะ	ร้อยละ โดยน้ำหนัก
เงิน	มากกว่า 40
ดีบุก	น้อยกว่า 32
ทองแดง	น้อยกว่า 30
สังกะสี	น้อยกว่า 12
ปรอท	น้อยกว่า 3

## 2. การแบ่งประเภทของผงโลหะเจือ

ปัจจุบันนิยมแบ่งผงโลหะเจือโดยใช้เกณฑ์ 2 ชนิดคือ ตามลักษณะรูปร่างของผง และตามปริมาณทองแดงดังนี้

- ตามลักษณะรูปร่างของผงแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ
  1. Lathe cut หรือ fine cut alloy กลุ่มรูปร่างไม่แน่นอน (irregular shape) กลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่จะต้องใช้ปรอทในการผสมมากที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ให้ผสมได้มาก
  2. Spherical alloy กลุ่มรูปร่างทรงกลม
  3. Admixed alloy เป็นการคละกันระหว่าง Lathe cut กับ Spherical alloy
- ตามปริมาณทองแดงแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ
  1. Low copper ทองแดงน้อย กลุ่มนี้มีทองแดงน้อยกว่าร้อยละ 6 โลหะเงินเจือชนิดสุตรอนูร์ักษ์พบว่ามีทองแดงประมาณร้อยละ 2-3 โดยน้ำหนัก
  2. High copper ทองแดงมาก กลุ่มนี้มีทองแดงประมาณร้อยละ 12-30 โดยน้ำหนัก

ในปัจจุบันผงโลหะเงินเจือที่ใช้เป็นกลุ่มโลหะเจือชนิดมีทองแดงมากคือ

1. ประเภทผงเป็นทรงกลมและผงแต่ละเม็ดมีส่วนประกอบเดียวกันหมด (single composition หรือ uni composition)
2. ประเภทคละ (admixed alloy) ชนิดนี้ผงมักประกอบด้วยส่วนประกอบที่ต่างกันสองกลุ่ม อาจมีรูปร่างผงต่างกันหรือเป็นทรงกลมคล้ายกัน

## 3. ปฏิกริยาการเกิดอะมัลกัมและโครงสร้างจุลภาค

### - อะมัลกัมชนิดมีทองแดงน้อย

อะมัลกัมชนิดนี้ประกอบด้วยเงิน ทองแดง ดีบุกและสังกะสี ตัวอย่างปริมาณส่วนประกอบโดยน้ำหนักเป็นดังนี้คือ เงินร้อยละ 67 ดีบุกร้อยละ 27 ทองแดงร้อยละ 5 และสังกะสีร้อยละ 1 โลหะเหล่านี้รวมตัวกันอยู่ในเฟสต่างๆ อาทิ  $Ag_3Sn$  ( $\gamma$ ),  $Ag_4Sn$  ( $\beta$ ),  $Cu_3Sn$  ( $\epsilon$ ) หรือ  $Cu_6Sn_5$  ( $\eta'$ ) สังกะสีอาจอยู่ปนกับเฟส  $\gamma$  และ  $\beta$  ทองแดงอาจพบปนอยู่ในเฟส  $\gamma$  และ  $\beta$  ได้เช่นกัน เมื่อผสมอะมัลกัมชนิดนี้กับปรอท ดีบุกเป็นตัวประสานให้ปรอทเข้าทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นจนเป็นเนื้อเดียวกันแต่ยังคงมีอิสระตามคุณสมบัติของตนเอง

(intermetallic compound) เกิดโครงสร้างใหม่ โดยผสมโลหะรวมตัวกับปรอทเกิดเป็น  $\text{Ag}_2\text{Hg}_3$  ( $\gamma_1$ ) และ  $\text{Sn}_8\text{Hg}_9$  ( $\gamma_2$ ) และอาจมี  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ( $\eta'$ ) เกิดขึ้นบ้าง

อะมัลกัมที่แข็งตัวแล้วยังคงมีผงโลหะเงินเจือดั้งเดิม  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  เหลืออยู่ประมาณร้อยละ 27 เงินรวมกับปรอทเป็น  $\text{Ag}_2\text{Hg}_3$  ( $\gamma_1$ ) ร้อยละ 60 ดีบุกรวมกับปรอท  $\text{Sn}_8\text{Hg}_9$  ร้อยละ 10 และทองแดงจับกับดีบุก  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ( $\eta'$ ) ร้อยละ 3 โดยปริมาตร ทั้งนี้เงินที่รวมกับปรอท ( $\text{Ag}_2\text{Hg}_3$ ) ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ยึดผงโลหะเงินเจือที่ไม่ได้รวมตัวกับปรอทเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดโครงสร้างชนิดคอมโพสิต (composite) ขึ้น ปฏิกริยาระหว่างผงโลหะเงินเจือชนิดมีทองแดงน้อยกับปรอทเป็นดังสมการนี้



เมื่อ  $a, b, c, d$  และ  $e$  คือจำนวนโมลที่เกิดปฏิกิริยา

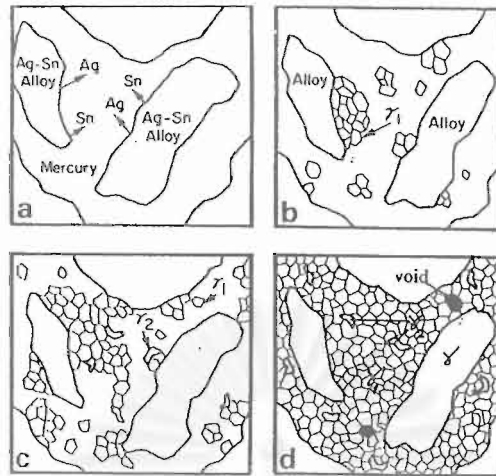
เมื่อตรวจโครงสร้างพบว่าอะมัลกัมที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาถูกล้อมด้วย  $\gamma_1$  และ  $\gamma_2$  และพบช่องว่างกระจายทั่วไปในพื้นที่ระหว่าง  $\gamma_1$  และ  $\gamma_2$  แสดงดังรูปที่ 2.1

#### - อะมัลกัมชนิดมีทองแดงมาก

จากการพยายามพัฒนาคุณสมบัติของโลหะอะมัลกัมโดยทั่วไปให้ดีขึ้น ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีโลหะวิทยาผง และเพิ่มทองแดงเข้าไปในส่วนประกอบเป็นร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก และพ่นน้ำโลหะหลอมเหลวผ่านก๊าซเฉื่อย ได้ผงโลหะเล็ก ๆ ทรงกลม ผงเล็ก ๆ ที่ได้ประกอบด้วย  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  และ  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  เมื่อผงทำปฏิกิริยากับปรอทจะเกิดเป็น  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ( $\eta'$ ) แทน  $\text{Sn}_8\text{Hg}_9$  ( $\gamma_2$ ) เนื่องจากโลหะเจืออะมัลกัมที่ใช้ในการศึกษาเป็นประเภทผงเป็นทรงกลมแต่ละเม็ดมีส่วนประกอบเดียวกันหมด จึงกล่าวถึงปฏิกิริยาของผงประเภทนี้เพียงอย่างเดียว

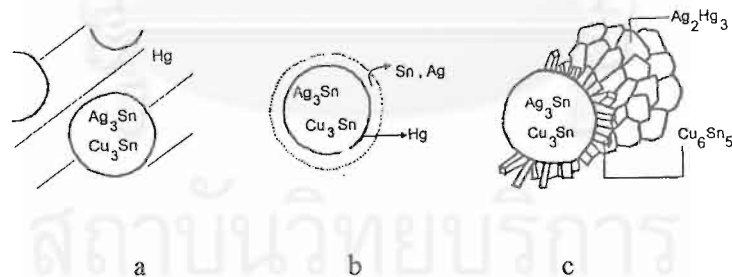
ปฏิกิริยาของประเภทผงเป็นทรงกลมแต่ละเม็ดมีส่วนประกอบเดียวกันหมด ชั้นแรก  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  ละลายตัวในปรอทแต่  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  ยังคงเดิม เงินที่ละลายออกมาจะรวมกับ Hg ทำให้เกิดเป็น  $\text{Ag}_2\text{Hg}_3$  หรือเรียกว่า  $\gamma_1$  ส่วนนี้จะเป็นเนื้อพื้น (matrix) ของอะมัลกัม ดีบุกที่แยกตัวออกมาจะเข้าไปรวมกับ  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  ในสภาพที่มี  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  เพียงพอ ได้ง่ายกว่ารวมกับปรอทโดยตรง ทำให้ปฏิกิริยาแตกต่างจากชนิดที่มีทองแดงน้อย โดยเกิดเป็น  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ( $\eta'$ ) แทน  $\text{Sn}_8\text{Hg}_9$  แสดงดังรูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาขั้นสุดท้ายระหว่างผงโลหะเงินเจือชนิดทองแดงมากกับปรอทเป็นดังสมการนี้





รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผงโลหะเงินเจือชนิดมีทองแดงน้อยกับปรอท  
(ซัซรีสุชาติถ้ำพงศ์ และคณะ, 2539)

- ผสมปรอทกับผงโลหะเงินเจือ
- โลหะเงินและดีบุกทำปฏิกิริยากับปรอท โดยทำปฏิกิริยาบางส่วน
- โลหะเงินและดีบุกก่อตัวรอบ ๆ ผงเป็นโลหะพื้น (matrix) และแผ่ขยายกว้างไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะคงตัว
- ขณะเดียวกันดีบุกส่วนเกินจะจับปรอทเกิดเป็น  $\gamma_2$  ปนอยู่ด้วย



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผงโลหะเงินเจือชนิดทองแดงมากกับปรอท  
(ซัซรีสุชาติถ้ำพงศ์ และคณะ, 2539)

- ผสมผงกับปรอท
- เงินจะละลายออกมารวมกับปรอทและออกมาห่างจากผงได้มากกว่าดีบุก
- $\text{Ag}_2\text{Hg}_3$  เป็นเนื้อพื้น (matrix) ยึดระหว่างผงและดีบุกรวมตัวกับ  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  เกิดเป็น  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  จับอยู่รอบผง

## 2.2 โลหะเงิน (silver)

โลหะเงินเป็นโลหะซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะมีสกุล (noble metal) ที่อุณหภูมิปกติมีสถานะเป็นของแข็งสีขาววาว มวลโมเลกุล 107.868 ความถ่วงจำเพาะ 10.53 จุดหลอมเหลว 961 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,212 องศาเซลเซียส มีความแข็งตามมาตรฐานของมอห์เท่ากับ 2.5-3 มีสมบัติอ่อนและเหนียว สามารถตีแผ่เป็นแผ่นบาง ๆ ได้บางถึงเศษหนึ่งส่วนแสนนิ้ว และดึงเป็นเส้นลวดได้เล็กมาก สมบัติที่ดีของเงินคือเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดในบรรดาโลหะทั้งหมด โลหะเงินไม่ละลายในน้ำแต่ละลายในกรดไนตริกและสารละลายประเภทอัลคาไลไซยาไนด์ และกรดซัลฟูริกที่อุณหภูมิสูง สะท้อนแสงได้ดี ไม่เกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง ทนการกัดกร่อนของกรดอินทรีย์หลายชนิดรวมทั้งด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่เมื่อสัมผัสกับควีนซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำให้ผิวของโลหะเงินคล้ำและดำได้

สินแร่เงินที่พบในปัจจุบันนี้มีมากกว่า 50 ชนิด แต่ที่มีความสำคัญทางโลหะวิทยานั้นมีอยู่ไม่กี่ชนิด เงินธรรมชาติซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงเกิดเป็นเกล็ดเล็ก ๆ หรือเป็นเส้นปนอยู่ในดิน หินและทราย ที่พบอยู่ในรูปของแร่สำคัญ ๆ มีดังนี้ คาลอะเวอไรต์ ((AuAg)Te<sub>2</sub>) เงินคลอไรด์ หรือฮอร์นซิลเวอร์ (AgCl หรือ hornsilver) เงินซัลไฟด์หรืออาร์เจนไทต์ (Ag<sub>2</sub>S หรือ Argentite) แร่พลวงเงินหรือพลวงซัลไฟด์ (Ag<sub>3</sub>SbS<sub>3</sub>) หรือที่เรียกกันว่าแร่ไพไรจิไรต์ (pyrrargyrite) ในอดีตเราแยกโลหะเงินออกจากแร่เงินได้โดยตรง แต่ปัจจุบันนี้แร่ที่มีโลหะเงินโดยตรงแทบจะไม่มีเหลืออยู่เลย เราจึงหันมาใช้แร่ที่มีคุณภาพต่ำลง และใช้วิธีแยกเงินเป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่โลหะชนิดอื่นๆ เช่น ตะกั่ว ทองแดง สังกะสีและทองคำเป็นต้น ในประเทศไทยสามารถพบเงินปนอยู่ในแร่ตะกั่ว แหล่งที่พบมากได้แก่จังหวัดกาญจนบุรี (เดชนา ชุตินรา, 2527)

### การใช้ประโยชน์ของโลหะเงิน

โลหะเงินเกือบร้อยละ 90 ของผลผลิตโลกถูกนำไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ มากมายหลายประเภทเช่น

#### 1. อุตสาหกรรมการผลิตฟิล์มภาพยนตร์และงานถ่ายภาพอัดภาพ

อุตสาหกรรมการประเภนี้ใช้โลหะเงินประมาณร้อยละ 40 ของผลผลิตโลก เงินที่ใช้นี้ใช้ในรูปของเกลือเงินเฮไลด์ที่มีความไวต่อแสง ใช้เคลือบบนฟิล์มถ่ายภาพ กระดาษอัดภาพและ

กระดาษถ่ายเอกสาร ให้ภาพชัดเจนกว่าการเคลือบด้วยสารอื่น ๆ แม้ว่าในปัจจุบันนี้ฟิล์มขาวดำที่ผลิตจากประเทศเยอรมันไม่ได้ใช้เกลือเงินเฮไลด์ก็ตาม แต่เทคนิคด้านนี้ยังไม่ได้ดัดแปลงใช้กับฟิล์มสี กระดาษถ่ายเอกสารที่มีเงินเฮไลด์ปริมาณมากจะให้ความชัดเจนสูงกว่ากระดาษถ่ายเอกสารที่มีเงินเฮไลด์น้อย

ฟิล์มขาวดำที่ผ่านการบันทึกภาพและล้างรูปแล้ว รวมทั้งกระดาษอัดภาพขาว-ดำ จะมีปริมาณเงินเหลืออยู่บนฟิล์มและกระดาษตรงส่วนที่เป็นสีดำ เช่นเดียวกับฟิล์มเอ็กซ์เรย์ โดยมีเงินละลายในน้ำยาล้างรูปบางส่วน ส่วนฟิล์มสีและกระดาษอัดภาพสีเมื่อผ่านการล้างรูปแล้วเงินจะละลายลงในน้ำยาล้างรูปจนหมด

## 2. อุตสาหกรรมไฟฟ้าและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

โลหะเงินที่ประกอบด้วยแคดเมียมออกไซด์ ใช้ทำเป็นสะพานไฟในส่วนที่มีกระแสไฟฟ้าสูงและปานกลางผ่านชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในเครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ ใช้เป็นตัวเชื่อมต่อโดยทำเป็นโลหะผสมกับทองแดง สังกะสี และโลหะอื่น ๆ เพื่อใช้ในการต่อเชื่อมท่อ เชื่อมข้อต่อของสายไฟฟ้าในเครื่องวิทยุ โทรทัศน์ เป็นต้น

## 3. ผลิตภัณฑ์ภาชนะเครื่องใช้

การใช้เงินทำภาชนะเครื่องใช้ต่าง ๆ เช่น ขันน้ำพานรอง หีบบุหรี ชูคน้ำชา กาน้ำ กรอบรูป เป็นต้น ถึงแม้ว่าปัจจุบันนี้โลหะเงินมีราคาสูงกว่าเดิมมาก จึงมีผลให้การผลิตภาชนะชิ้นใหญ่ ๆ ประเภทนี้ลดลงก็ตาม แต่ก็ยังเป็นที่นิยมของตลาดอยู่มากพอควร ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโลหะเงินจะมีปัญหาอยู่บ้างก็คือการหมองคล้ำ ซึ่งต้องหมั่นทำความสะอาด เครื่องเงินราคาถูกส่วนใหญ่เป็นพวกนิกเกิลหรือโลหะผสมนิกเกิลเคลือบด้วยเงิน

## 4. เหรียญกษาปณ์

ในสมัยก่อนเหรียญกษาปณ์ผลิตจากโลหะเงินบริสุทธิ์กันมาก ในประเทศอังกฤษแรกเริ่มใช้เงินสเตอร์ลิงทำเหรียญกษาปณ์ เงินสเตอร์ลิงนี้มีเนื้อเงินบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 92.4 ผสมกับทองแดงไม่เกินร้อยละ 7.5 แต่ต่อมาต้องเลิกใช้ เนื่องจากราคาของโลหะเงินสูงเกินกว่าราคาที่แสดงไว้บนเหรียญ เงินสเตอร์ลิงนี้มีความแข็งแรงทนทาน และรักษาคุณสมบัติของเงินไว้เกือบทุกประการ

ประเทศไทยเคยใช้โลหะเงินผลิตเหรียญกษาปณ์เป็นเงินหมุนเวียนในตลาดเช่นกัน แต่ด้วยเหตุผลเดียวกันคือราคาโลหะเงินสูงมากกว่าค่าของเงิน ปัจจุบันเราจึงใช้โลหะผสมผลิตเหรียญกษาปณ์แทน เช่น นิกเกิล อลูมิเนียม ทองแดง เป็นต้น อย่างไรก็ตามเรายังใช้โลหะเงินผลิตเหรียญกษาปณ์ที่ระลึก ตลอดจนเครื่องราชอิสริยาภรณ์ เหรียญเกียรติยศ และเหรียญตราต่าง ๆ แต่นับว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการใช้โลหะเงินทั้งหมด

## 5. เครื่องประดับ

โลหะเงินที่ใช้ทำเครื่องประดับ ประเภทสร้อย เข็มกลัด แหวน กำไลและอื่น ๆ ถ้ามีคำว่า “สเตอร์ลิง” ประทับอยู่บนเครื่องประดับ แสดงว่าเครื่องประดับเหล่านั้นมีความบริสุทธิ์ของเนื้อเงินไม่ต่ำกว่าร้อยละ 92.5 นอกจากนี้โลหะเงินยังใช้เกี่ยวกับโลหะอื่น ๆ ในการทำโลหะบัดกรี เช่น โลหะบัดกรีทองมีเนื้อเงินร้อยละ 12 - 28 เป็นต้น

## 6. งานทางด้านทางการแพทย์และทันตกรรม

สำหรับวงการแพทย์นั้น ใช้มากในทางศัลยกรรม เนื่องจากเงินมีคุณสมบัติเป็นตัวกันไม่ให้แผลเน่าเปื่อย จึงใช้คลุมบาดแผลหลังจากการผ่าตัดเพื่อตัดแต่งผิวหนัง ใช้ตามกระดูกและใช้ทำเครื่องมือในการผ่าตัดบางอย่าง โลหะเงินมีประโยชน์ไม่น้อยในด้านทันตกรรม โดยเฉพาะอะมัลกัมสำหรับอุดฟัน จะใช้โลหะผสมอะมัลกัมประกอบด้วย เงิน คิงก ทองแดง เมื่อต้องการใช้งานจะนำโลหะผสมนี้มาผสมกับปรอท แล้วจึงนำไปใช้ในการรักษาทางทันตกรรมต่อไป

## 7. อุตสาหกรรมรถยนต์

ในอุตสาหกรรมรถยนต์ใช้วัสดุเคลือบด้วยเงินบริสุทธิ์มากที่สุด โดยเฉพาะสำหรับทำดวงไฟหน้ารถ เนื่องจากคุณสมบัติของโลหะเงินที่สามารถสะท้อนแสงได้ดีที่สุด

## 8. อุตสาหกรรมเครื่องทำความเย็นและอื่น ๆ

ในอุตสาหกรรมการผลิตตู้เย็นและเครื่องปรับอากาศใช้โลหะเงินในรูปของโลหะประสาน ซึ่งสามารถทำให้โลหะหลักจับเกาะกับโลหะอื่น ๆ หรือโลหะชนิดเดียวกันได้ที่



อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะนั้น ๆ โลหะประสานนี้ไม่ทำให้เหล็กกล้าละลายหรือทำให้เหล็กกล้าเสียหายในสภาวะการใช้งานปกติ

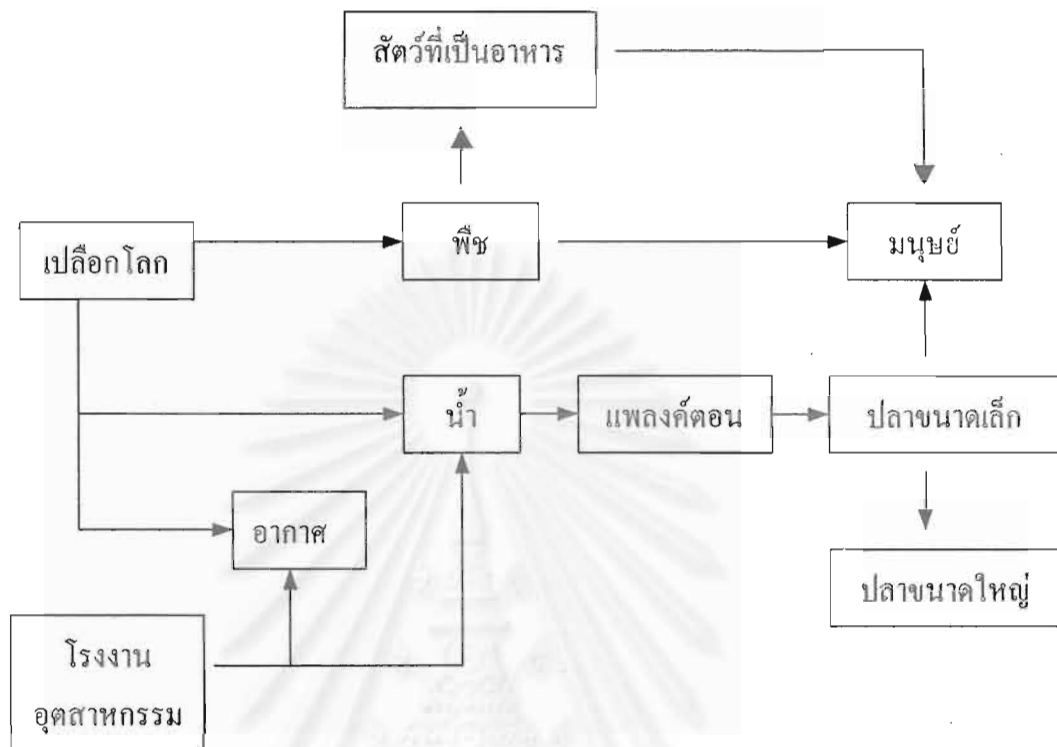
แบตเตอรี่ที่มีโลหะเงินเป็นส่วนประกอบจะมีอายุการใช้งานยาวนาน ทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงและอุณหภูมิคงที่ แต่เนื่องจากแบตเตอรี่ที่มีโลหะเงินประกอบมีราคาแพง จึงใช้งานในวงจำกัด เช่น ทางทหารและอวกาศ

สำหรับประเทศไทย แร่เงินที่พบมักเกิดร่วมกับโลหะพื้นฐานอื่น ๆ โดยเฉพาะทองคำ ตะกั่ว สังกะสี จึงมีการพบเงินประปรายในแร่ดังกล่าว แต่ประเทศไทยมีการผลิตและส่งออกแร่ตะกั่วเป็นปริมาณมาก ประเทศไทยนำเข้าโลหะเงินปีละหลายสิบล้านบาท หรือประมาณ 200 เมตริกตัน ทั้งนี้ไม่รวมสารประกอบเงินที่อยู่ในรูปของฟิล์มและกระดาษอัดภาพ กระดาษถ่ายภาพเอกสารและโลหะประสานต่าง ๆ โลหะเงินที่นำเข้ามาส่วนใหญ่ใช้ในการทำเครื่องประดับเพชรพลอย ภาชนะเงินและเหรียญต่าง ๆ มีการนำโลหะเงินที่ใช้แล้วไปหลอมและแยกกลับมาใช้ใหม่อีก

### 2.3 โลหะปรอท

ปรอทเป็นโลหะชนิดเดียวที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ มีสีขาวคล้ายเงิน มวลโมเลกุล 200.59 ความถ่วงจำเพาะ 13.59 จุดหลอมเหลว  $-38.9$  องศาเซลเซียส จุดเดือด 356.9 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ มีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงได้ดี และเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี

ปรอทสามารถพบได้ในสิ่งแวดล้อมเกือบทุกแห่ง ในธรรมชาติส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นในรูปของสารประกอบซัลไฟด์เช่น อยู่ในแร่ซินนาบาร์ (HgS, mercury sulfide) มีลักษณะเป็นหินสีแดง มนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์นำมาใช้วาดผนังถ้ำ ต่อมาอียิปต์โบราณนำปรอทรูปนี้มาใช้แล้วก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพและชีวิต แหล่งปลดปล่อยปรอทเข้าสู่สิ่งแวดล้อมมีอยู่ 2 แหล่งใหญ่ คือ จากแหล่งธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วัฏจักรของปรอทในสิ่งแวดล้อม (สุนทรีย์ สิงหนุตตรา, 2541)

จากแหล่งธรรมชาติ อันเกิดจากกระบวนการกัดเซาะ (erosion) และการชะล้าง (leaching) โดยน้ำฝน ซึ่งจะนำปรอทที่เกิดขึ้นเองโดยกระบวนการทางธรณีวิทยาไหลลงสู่ลำธาร ทะเลสาบ และซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ส่วนแหล่งปลดปล่อยที่สองคือ จากการกระทำของมนุษย์ นั้น ได้แก่ การใช้ยาปราบศัตรูพืช โรงงานผลิตสารเคมี การเผาเชื้อเพลิง การถลุงแร่ การผลิตสี และการใช้สี การชำรุดเสียหายของวัสดุอุปกรณ์ที่มีสารปรอทเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย

### 2.3.1 การใช้ประโยชน์ของปรอท (สุนทรีย์ สิงหนุตตรา, 2541)

การใช้ประโยชน์ของปรอทสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

#### - ปรอทอนินทรีย์ (inorganic mercury)

1. ปรอทใช้ในการทำเครื่องมือแพทย์ เครื่องวัดความดัน เทอร์โมมิเตอร์
2. สารประกอบของปรอทใช้เป็นยาฆ่าเชื้อ ยาขับปัสสาวะ ยาถ่าย (ได้แก่ Calomel คือ  $HgCl_2$ )
3. ปรอทใช้ทำเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ ได้แก่ บาโรมิเตอร์, U.V.lamp
4. ปรอททำเครื่องไฟฟ้า ไอปรอทใช้ทำหลอดไฟฟ้าชนิด fluorescent
5. ปรอทผสมในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางเช่น ครีมลอกหน้าต่าง ๆ
6. ปรอทใช้ในงานทางด้านทันตกรรม โดยผสมปรอทกับผงโลหะเจืออะมีलगัม ใช้ในการอุดฟัน
7. ใช้ในอุตสาหกรรมทำ latex-base ที่ใช้ทาพื้นผนังเพื่อป้องกันไม่ให้ผนังตึกมีราขึ้น
8. เมอร์คิวรียะคลอไรด์ ( $HgCl_2$ ) และ เมอร์คิวริกไตรคลอไรด์ ใช้ทำกันมอดให้เครื่องเรือนหวาย
9. สารประกอบปรอทใช้ผสมขี้ผึ้งทาพื้นหรือเป็นยาฆ่าเชื้อเฟอร์นิเจอร์ให้เป็นเงาใช้เป็นยาทาทำให้หนังนุ่มและยังใช้เป็นยาฆ่าเชื้อราในหนังได้ด้วย
10. ปรอทใช้ทำโลหะเจือผสมในดินบุกเพื่อให้เป็นมันเงา ใช้ทำกระป๋องใส่อาหาร
11. ปรอทใช้ในการทำรอยสัก (tattooing material) ลวดลายต่าง ๆ ตามตัว

#### - ปรอทอินทรีย์ (organic mercury)

1. ปรอทอัลคิล (alkyl mercury) ใช้เป็นตัวยาฆ่าเชื้อรา ทำเป็นยาพ่นไปบนเมล็ดข้าวเพื่อป้องกันเชื้อราที่ใช้น้ำมากได้แก่ปรอทเมทิล (methyl mercury)
2. ฟีนิลเมอร์คิวรีอะซิเตต (phenyl mercury acetate) ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทำกระดาษ โดยผสมไปกับการบดไม้กระดาษ เพื่อป้องกันการเกิดเป็นโคลน (slime) นอกจากนี้ปรอทอัลคิลยังใช้เป็นยาพ่นฆ่าเชื้อราในเปลือกไม้ที่นำมาทำเป็นกระดาษด้วย
3. ปรอทอัลคิล ใช้ในอุตสาหกรรมทำพลาสติก

จากการที่ปรอทสามารถใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง ทำให้ปีหนึ่ง ๆ ประเทศไทยมีการนำเข้าปรอททั้งที่อยู่ในรูปของปรอทอนินทรีย์และปรอทอินทรีย์เป็นจำนวนมาก การใช้ปรอทเป็นจำนวนมากไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดการสะสมของปรอทในสิ่งแวดล้อมเท่านั้น แต่ในที่สุดก็จะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยขบวนการต่าง ๆ ที่ซับซ้อนและมีความสัมพันธ์กับอากาศ น้ำ ดิน การบริโภคผลผลิตและอาหารของมนุษย์

### 2.3.2 การเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ของปรอท

การดูดซึมของปรอทเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง ได้แก่

#### 1. ทางการหายใจ (pulmonary absorption)

ได้รับโดยการหายใจเข้าไปเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอาการพิษอย่างเฉียบพลันขึ้น ไอของปรอท หรือฝุ่นละอองที่มีสารปรอทอยู่ ปรอทอนินทรีย์จะไปสะสมที่ปอด บางส่วนสะสมตกค้างที่ปอด ไต และบางส่วนก็ถูกดูดซึมเข้ากระแสโลหิต เมธิลเมอร์คิวรีและฟีนิลเมอร์คิวรีจะถูกดูดซึมได้ดีและได้อย่างสมบูรณ์ผ่านทางปอด ถ้าไตไม่ทำงานเนื่องจากไม่สามารถขับปัสสาวะออกมาได้ อาจทำให้ถึงตายได้ ส่วนปรอทที่สะสมอยู่ที่สมองเป็นอันตรายต่อระบบประสาทส่วนกลาง อาจทำให้เป็นอัมพาตได้

#### 2. ทางผิวหนัง (skin absorption)

ปรอทอินทรีย์เช่น เมธิลเมอร์คิวรี หรือฟีนิลเมอร์คิวรี สามารถดูดซึมผ่านทางผิวหนังได้ดี ส่วนพวกปรอทอนินทรีย์เช่น เมอร์คิวรีคลอไรด์ ( $HgCl$ ) ซึมผ่านทางผิวหนังได้น้อยกว่ามาก สามารถซึมผ่านได้เพียงร้อยละ 3-4 เท่านั้น ส่วนตัวโลหะปรอทเองมีโอกาสซึมผ่านผิวหนังได้น้อยมาก แต่ถ้าบางคนผิวหนังไวต่อปรอท เมื่อถูกหรือสัมผัสกับปรอทอาจเกิดการแพ้และเป็นโรคผิวหนังได้

#### 3. ทางระบบทางเดินอาหาร (gastrointestinal absorption)

ได้รับโดยการรับประทานสารปรอทเข้าไป ทั้งปรอทอนินทรีย์และปรอทอินทรีย์สามารถดูดซึมได้ดี ผ่านระบบทางเดินอาหารได้เกือบหมด เพราะฉะนั้นจึงทำให้เกิดอาการพิษ

อย่างเฉียบพลันได้เมื่อรับมาก ๆ สำหรับเมอร์คิวริกคลอไรด์ (mercuric chloride) ถูกดูดซึมผ่านลำไส้ได้เพียงร้อยละ 15 เท่านั้น เพราะฉะนั้นจึงทำให้เกิดพิษต่ำกว่าตัวอื่น

### 2.3.3 ความเป็นพิษของโลหะปรอท

ความเป็นพิษของสารปรอทขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบปรอท พิษของปรอททำให้เกิดอันตรายต่อระบบต่าง ๆ ในร่างกายทั้งเป็นพิษเฉียบพลัน (acute poisoning) และพิษเรื้อรัง (chronic poisoning) สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท

#### - สารปรอทอนินทรีย์ (inorganic mercury)

##### 1. พิษเฉียบพลัน (acute poisoning)

สารระเหยปรอท (mercury vapor) ทำให้เจ็บหน้าอก หายใจขัด หอบ คลื่นไส้ อาเจียน และคลื่นรบกวนประสาท ทำลายไตรุนแรง เหงือกอักเสบ ทางเดินอาหารและลำไส้อักเสบ กล้ามเนื้อสั่นและมีอาการทางประสาท

เกลือปรอทอนินทรีย์ (inorganic mercury salt) ทำให้เกิดการตกตะกอนโปรตีนของเยื่อเมือก (mucous membrane) ในปากและทางเดินอาหาร ทำให้ปวดและอาเจียนและอาจทำให้เกิดอาการช็อกจากการขาดเลือดได้ ทำให้เกิดเนื้อตายที่ท่อไต ซึ่งเป็นอาการสำคัญที่ทำให้เป็นพิษที่รุนแรง การได้รับปรอทโลหะและเหงือกอักเสบเป็นเหตุจากการเป็นพิษของปรอทที่ได้รับทางร่างกาย

##### 2. พิษเรื้อรัง (chronic poisoning)

สารระเหยปรอท อาการหลักคืออาการทางประสาทที่เรียกว่า Asthenic Vegetative Syndrome เป็นโรคประสาทที่มีอาการอ่อนเพลียเรื้อรัง และมีความผิดปกติคล้ายโรคคอปอก หัวใจเต้นผิดจังหวะ เหงือกอักเสบ ซิฟร่อนและมีสารปรอทในปัสสาวะ ส่งผลให้มีอาการสั่น ชิมเศร้า ระคายเคือง สับสน และความผิดปกติของประสาทควบคุมกล้ามเนื้อ หลอดเลือด (vasomotor) น้ำลายฟูมปากและเหงือกอักเสบ

เกลือปรอทอินทรีย์ อาการหลักคือทำลายไต ผิวหนังร้อนแดงที่ปลายมือปลายเท้า (acrodynia) เกิดภาวะขาดออกซิเจน หัวใจเต้นผิดปกติและการผิดปกติของทางเดินอาหาร

#### - สารปรอทอินทรีย์ (organic mercury)

สารปรอทอินทรีย์นี้พบในเปลือกหุ้มเมล็ดและขาม้าเชื้อรา สามารถดูดซึมในทางเดินอาหารและกระจายไปสู่ระบบประสาทส่วนกลางซึ่งเป็นส่วนที่เกิดพิษของสาร อาการที่เกิดขึ้นคือ อาการตื้นของกล้ามเนื้อ มือสั่น ตัวสั่น เดินโซเซทรงตัวไม่ค่อยได้ พูดไม่ชัดและพูดตะกุกตะกัก อาการพิษต่อประสาทตา คือ เกิดความผิดปกติต่อการมองเห็น ตามองเห็นได้แคบเข้า ถ้าเป็นนาน ๆ อาจตาบอดได้ และไตอักเสบ อาจมีเลือดออกจากไต

## 2.4 โลหะดีบุก (Tin)

ดีบุกเป็นโลหะลักษณะสีขาวคล้ายเงิน เป็นมัน มีมวลโมเลกุล 118.69 จุดหลอมเหลว 232 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,270 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อน เป็นโลหะที่อ่อนและเหนียว มีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ แร่ดีบุกที่สำคัญในการผลิตดีบุกคือ แร่แคซิเทอไรต์ (cassiterite) มีดีบุกประมาณร้อยละ 80 ในรูปของดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) แร่นี้มีหลายสี แต่ที่พบบ่อยมาก ได้แก่ สีน้ำตาลหรือดำ

### 2.4.1 การใช้ประโยชน์ของโลหะดีบุก

1. เนื่องจากดีบุกมีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้ดี จึงใช้ดีบุกเคลือบแผ่นเหล็ก หรือที่เรียกกันว่าแผ่นเหล็กก๊วลาต (tin plate) ใช้ทำภาชนะใส่อาหารเพื่อป้องกันสนิม
2. ใช้ทำโลหะบัดกรี (solder)
3. ใช้ทำโลหะเจือเช่นบรอนซ์ และพวกลูกปืนโลหะ (bearing metal)
4. ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น ทำแผ่น ทำท่อ ทำตัวพิมพ์และแบบ (model) ต่าง ๆ

## 2.4.2 ความเป็นพิษของโลหะดีบุก

อาการพิษของดีบุกสามารถแบ่งได้เป็น พิษเฉียบพลันและพิษเรื้อรังดังนี้

### 1. พิษเฉียบพลัน

อาการพิษเฉียบพลันที่เกิดจากดีบุกปรากฏน้อยมาก เท่าที่ปรากฏมีรายงานจากการรับประทานอาหารกระป๋อง ปลาแฮร์ริง และแอสฟาลท์แล้วปรากฏอาการพิษขึ้น โดยอาการเริ่มปรากฏหลังจากรับประทานไปแล้ว 5-6 ชั่วโมง มีอาการอาเจียน ปวดท้อง ท้องอืด แน่นหน้าอก และท้องเดิน ต่อมาจะมีอาการท้องผูก

### 2. พิษเรื้อรัง

ถ้าได้รับสารประกอบดีบุกเข้าไปในร่างกายทีละน้อย ๆ ติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน จะทำให้มีอาการปวดท้องคลื่นไส้ ท้องผูกและน้ำหนักลด บางคนก็มีอาการเจ็บคอ มีไข้เล็กน้อย หนาวสั่น ปวดตามกล้ามเนื้อและข้อ และบางคนเป็นโรคเลือดจางอ่อน ๆ ถ้าสูดดมทินออกไซด์เข้าไปทีละน้อยๆ ติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน จะทำให้เกิดโรคปอดแข็ง (pneumoconiosis) ซึ่งทำให้ผู้ป่วยหายใจสั้น ๆ และแรง ไอเล็กน้อยและทำให้ความสามารถในการหายใจลดลง

## 2.5 โลหะทองแดง (copper)

โลหะทองแดงเป็นโลหะที่มีมวลโมเลกุล 63.546 จุดหลอมเหลว 1,083 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,595 องศาเซลเซียส ทองแดงเป็นโลหะที่เป็นตัวนำความร้อนที่ดี และมีความทนทานต่อการกัดกร่อน (corrosion) มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีรองจากโลหะเงิน ไม่เป็นสารแม่เหล็ก กลิ้งไสขึ้นรูปง่ายเมื่อผสมกับธาตุโลหะบางตัว โลหะทองแดงมีความเหนียวสูงมาก

แร่ทองแดงบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นก้อนสีดำ ดูคล้ายหินมากกว่าโลหะ ปัจจุบันยังคงพบในที่ต่าง ๆ อยู่บ้าง ที่ปะปนอยู่กับแร่อื่น ๆ เช่น แร่เงินหรือแร่ทอง แต่มีปริมาณไม่มาก แร่ทองแดงส่วนใหญ่เป็นประเภทซัลไฟด์ มีอยู่หลายชนิดคือ แร่ชาล์โคไซต์ (chalcocite,  $\text{Cu}_2\text{S}$ )

แร่ชาติโคไพไรต์ (chalcoprite,  $\text{CuFeS}_2$ ) แร่โคเวลไลต์ (covellite,  $\text{CuS}$ ) และแร่มาร์ธาไลต์ (malachite,  $\text{CuCO}_3\text{Cu(OH)}_2$ ) ซึ่งมีสีสวยงามมาก สามารถเจียรระไนทำเป็นเครื่องประดับ

### 2.5.1 การใช้ประโยชน์ของโลหะทองแดง

1. ใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น สายไฟฟ้า ขดลวดในมอเตอร์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากทองแดงมีคุณสมบัติเปลี่ยนรูปร่างด้วยการ ดึง รััด และมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ
2. ใช้ในการทำโลหะเจือ เช่น ทองเหลือง บรอนซ์ และ monel metal
3. ใช้ในการทำเป็นโลหะรูปพรรณและโลหะเจือทางทันตกรรม
4. ใช้ในการผลิตอาหารและยา เช่น ยาที่ทำให้อาเจียน ยารักษาแผลจากไฟไหม้ ยาถ่ายพยาธิ ยาฆ่าเชื้อรา หรือใช้เติมลงในอาหารเช่นถั่วกระป๋อง ผลไม้แช่อิ่มบางชนิด

ทองแดงสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทางการหายใจ ทางผิวหนัง และทางปาก เช่นเดียวกับโลหะปรอท

### 2.5.2 ความเป็นพิษของโลหะทองแดง (อรรถพร หอมจันทร์, 2535)

สำหรับการได้รับทางการหายใจ จะทำให้คัดจมูก เป็นแผลที่เพดานปาก ถ้าได้รับในปริมาณสูงจะคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง เลือดออกในกระเพาะอาหาร ระบายน้ำ อาเจียนมีสีเขียว ปัสสาวะเป็นไขขาวมีสีเขียว (อาจเสียชีวิตภายใน 4 ชั่วโมง) มีอาการทางประสาท ชัก เป็นอัมพาตทรงตัวไม่ได้ มีอาการดีซ่าน

ถ้าได้รับโดยการดูดซึมผ่านทางผิวหนัง จะทำให้เกิดอาการคัน ผิวหนังเป็นตุ่ม ถ้าเข้าตา เยื่อตาจะอักเสบ หนังตาบวม เป็นแผลที่ตาดำ บางรายมีการสะสมในเนื้อเยื่อทำให้มีสีเขียวที่โคนผม และเหงือก สำหรับอาการพิษเรื้อรังไม่ค่อยปรากฏให้เห็น



## 2.6 การจัดการของเสียอันตราย (ทิพวรรณ แฝ้วสกุล, 2540)

ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ได้กล่าวถึงคำจำกัดความของ “วัตถุอันตราย” ไว้ว่า “วัตถุอันตราย” หมายความว่า วัตถุระเบิดได้ วัตถุไวไฟ วัตถุออกซิไดซ์และวัตถุเปอร์ออกไซด์ วัตถุมีพิษ วัตถุที่ทำให้เกิดโรค วัตถุกัมมันตรังสี วัตถุที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม วัตถุกัดกร่อน วัตถุที่ก่อให้เกิดการระคายเคือง วัตถุอย่างอื่นไม่ว่าจะเป็นเคมีภัณฑ์ หรือสิ่งอื่นใดที่อาจทำให้เกิดอันตรายต่อบุคคล สัตว์ พืช ทรัพย์สิน หรือสิ่งแวดล้อม

ของเสียอันตราย (hazardous wastes) เป็นสิ่งที่ถูกระบุว่าเป็นของเสียหรือสิ่งที่มีส่วนผสมของของเสีย ซึ่งมีศักยภาพที่จะเป็นอันตรายในด้านความปลอดภัยของสุขภาพต่อมนุษย์ หรือสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ เนื่องจากว่า

1. ของเสียดังกล่าว ไม่สามารถย่อยสลายและทนอยู่ได้ในธรรมชาติ
2. ของเสียเหล่านี้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพของสิ่งมีชีวิต
3. ของเสียเหล่านี้ ทำให้ตายได้
4. อาจทำให้เกิดผลกระทบจากการสะสม

ในการปฏิบัติงานทางด้านทันตกรรม จำเป็นต้องใช้โลหะเจืออะมัลกัมในการรักษาคนไข้ และเมื่อมีการผสมผงโลหะเพื่อใช้ในแต่ครั้งจึงมักจะเหลือโลหะอะมัลกัมส่วนที่เกินพอเนื่องจากโลหะอะมัลกัมมีโลหะเงิน ดีบุก ทองแดงและปรอทเป็นส่วนประกอบ ซึ่งเมื่อพิจารณาตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 จึงสามารถจัดว่าโลหะอะมัลกัมที่เหลือทิ้งเป็นของเสียอันตราย

ของเสียอันตรายแม้เพียงปริมาณเล็กน้อย ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของแข็ง กึ่งของแข็ง ของเหลวตลอดจนสารประกอบที่เป็นก๊าซ ถ้ามีปะปนอยู่ในขยะมูลฝอยของเทศบาล จะมีอิทธิพลต่อผลผลิตที่จะนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ (recovery) เช่นปุ๋ยอินทรีย์ที่ผลิตจากการหมักขยะมูลฝอย (composting) คือจะทำให้ปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้ ปนเปื้อนด้วยสารพิษนั่นเอง จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นการแยกขยะเสียตั้งแต่แหล่งกำเนิด (source separation) จึงเป็นการป้องกันและแก้ไขปัญหานี้ได้อย่างดีที่สุด

การบำบัดและทำลาย (treatment and disposal) ของเสียอันตรายสามารถทำได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

### 2.6.1 การนำสิ่งที่ยังเป็นประโยชน์กลับมาใช้ใหม่ (recycle หรือ recovery) ได้แก่

- การนำสารละลายกลับมาใช้ใหม่ (solvent recovery)
- การนำน้ำมันกลับมาใช้ใหม่ (oil recovery) เช่น น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว
- การนำกรดกลับมาใช้ใหม่ (acid regeneration) เช่น กรดกำมะถันจากอุตสาหกรรม เหล็ก
- การนำโลหะกลับมาใช้อีก (metal recovery)

### 2.6.2 การเผาพร้อมกับปูนซีเมนต์ในเตาเผาแบบนอนหมุน (co-incineration in industrial kilns/furnace)

ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์จะใช้เป็นเตาเผาแบบนอนหมุน (rotary kiln) การทำลายของเสียอันตรายโดยเผาพร้อมกับเชื้อเพลิง (primary fuels) และวัตถุดิบในเตาเผาดังกล่าว ได้ทำกันมานานแล้ว เตาชนิดนี้จะทำงานที่อุณหภูมิสูง (2,600-3,000 องศาฟาเรนไฮต์) และสามารถทำลายสารอินทรีย์อันตราย (organic hazardous) ได้อย่างสูง ของเสียอันตรายจะทำหน้าที่เป็นเชื้อเพลิงสนับสนุน (supplementary fuel)

### 2.6.3 การเผาด้วยอุณหภูมิสูง (thermal destruction)

การทำลายโดยใช้อุณหภูมิสูงเพื่อทำลายของเสียอันตราย เช่น ใช้เตาเผา (incinerator) ซึ่งมีการควบคุมการเผาไหม้และมีอุปกรณ์ควบคุมก๊าซพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดก๊าซพิษได้ถึงร้อยละ 99.99

การเผาของเสียอันตรายหรือกากสารพิษต้องเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,000 หรือ 1,200 องศาเซลเซียส เตาเผาต้องมีเวลาในการเผาไอก๊าซได้นาน 2 วินาที ซึ่งต้องใช้เตาเผาที่มีส่วนเผาไอก๊าซ (after burner) และมีการปรับเชื้อเพลิงและอากาศให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ มีการติดตั้งเครื่องฟอกไอก๊าซที่มีประสิทธิภาพ เช่น เครื่องดักฝุ่น เครื่องชะไอกรด ไนด่าง อาจมีเครื่องดูดซับ dioxin รวมทั้งเครื่องเผาเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำก่อนระบายออกทางปล่อง

#### 2.6.4 การทำให้คงตัวหรือคงรูปไม่ละลายน้ำ (stabilization) หรือเรียกว่าการปรับเสถียร

การผสมวัสดุบางอย่างกับของเสียอันตราย เพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของของเสียนั้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ของเสียหมดสภาพที่เป็นอันตราย ปลอดภัยและสะดวกในการเคลื่อนย้าย และลดการปนเปื้อนของของเสียในสถานที่ฝังกลบ

#### 2.6.5 การบำบัดโดยวิธีทางชีวภาพ (biological treatment)

ระบบบำบัดของเสียที่ใช้จุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ โดยขั้นแรกจะผสมของเสียกับจุลินทรีย์ (microbes) ของเสียอาจเป็นของเหลว กิ่งของเหลว หรือของแข็ง และมีการเติมออกซิเจน (aeration) เช่นวิธีการหมัก (composting)

#### 2.6.6 การฝังกลบอย่างปลอดภัย (secure landfill)

การฝังกลบของเสียอันตรายอย่างปลอดภัยเป็นพิเศษกว่าการฝังกลบขยะมูลฝอยธรรมดา เพื่อไม่ให้ของเสียอันตรายปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ใช้วัสดุกันซึมที่มีความแข็งแรงชนิด high density polyethylene (HDPE) และต้องจัดสร้างบ่อสังเกตการณ์ (monitoring well) เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะของน้ำใต้ดินในบริเวณใกล้เคียงกับสถานที่ฝังกลบ

#### 2.7 การแยกโลหะเงินเพื่อนำกลับมาใช้อีก (recovery of silver)

การแยกโลหะเงินเพื่อนำกลับมาใช้อีกนั้น ไม่ว่าจะวัสดุที่จะนำมาทำการแยกจะเป็นวัสดุประเภทใด ซึ่งอาจจะเป็นชิ้นส่วนเครื่องประดับ เหมืองแร่ที่เลิกใช้แล้ว ชิ้นส่วนโลหะที่มีโลหะเงินเป็นส่วนประกอบหลัก หรือชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปสามารถทำการแยกโลหะเงินได้โดย 2 วิธีการหลักๆ คือโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้าและวิธีการใช้สารเคมี โดยมีหลักการดังต่อไปนี้

### 2.7.1 วิธีทางเคมีไฟฟ้า (electrochemistry)

เคมีไฟฟ้าเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของวิชาเคมีซึ่งว่าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หลักการของเคมีไฟฟ้าได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาต่าง ๆ ทางเคมีมากมาย ตัวอย่างเช่น การศึกษาปรากฏการณ์การกัดกร่อน การศึกษากลไกและจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์สารอินทรีย์และอนินทรีย์ด้วยไฟฟ้า และการใช้หลักการเคมีไฟฟ้าในทางเคมีวิเคราะห์ เป็นต้น

วิธีของการศึกษาโดยหลักการทางเคมีไฟฟ้า เป็นการให้สัญญาณไฟฟ้าหนึ่ง ๆ แก่สารตัวอย่าง แล้วศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้น การให้สัญญาณไฟฟ้าและการวัดค่าที่แตกต่างกันออกไปทำให้เกิดเป็นวิธีการที่มีชื่อเรียกต่าง ๆ กันไป แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 วิธีการทางเคมีไฟฟ้า (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539)

เทคนิควิธี	สัญญาณไฟฟ้าที่ให้	ค่าที่วัด
โพเทนชิออมิตรี	กระแส = 0	ศักย์ไฟฟ้า
แอมแปโรเมตรี	ศักย์คงที่	กระแสไฟฟ้า
โวลแทมเมตรี	ศักย์ไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า
คูลอมเมตรี	กระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้า	ปริมาณไฟฟ้า
อิเล็กโทรกราวิเมตรี	กระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้า	น้ำหนักของสาร*

\* วิธีอิเล็กโทรกราวิเมตรี เป็นวิธีการเดียวที่ไม่วัดค่าทางไฟฟ้า แต่ศึกษาน้ำหนักหรือมวลสารสุดท้ายที่เกิดขึ้นจากการให้สัญญาณไฟฟ้าเพื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่าง

ส่วนประกอบของการทำการศึกษาโดยใช้หลักการเคมีไฟฟ้ามีทั้งหมด 3 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ส่วนขงขั้วไฟฟ้า (electrode) และส่วนของอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า ส่วนที่หนึ่งและสองมักถูกเรียกรวมกันเป็นเซลล์เคมีไฟฟ้า

ในเซลล์เคมีไฟฟ้า 1 เซลล์ ต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้า 1 ขั้วในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นเพียงครึ่งเซลล์ (half-cell) ของเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ แต่ละครึ่งเซลล์ต้องเกิดปฏิกิริยาการรับหรือการคายอิเล็กตรอน หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox-reaction) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยมีขั้วไฟฟ้าเป็นตัวนำในการรับหรือส่งต่ออิเล็กตรอนนั้น เพื่อให้รู้ถึงหน้าที่ของแต่ละขั้วไฟฟ้า ครึ่งเซลล์ที่มีปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) หรือให้อิเล็กตรอน เรียกเป็น ขั้วแอโนด (anode) และขั้วไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่มีปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) หรือรับอิเล็กตรอน เรียกเป็นขั้ว คาโทด (cathode)

ปฏิกิริยาที่แอโนด

ตัวรีดิวซ์  $\longrightarrow$  ผลิตภัณฑ์ + อิเล็กตรอน

ปฏิกิริยาที่คาโทด

ตัวออกซิไดซ์ + อิเล็กตรอน  $\longrightarrow$  ผลิตภัณฑ์

เมื่อรวมปฏิกิริยาทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยอาศัยการทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่ให้และรับเท่ากันจะได้ปฏิกิริยารีดอกซ์

ตัวออกซิไดซ์ + ตัวรีดิวซ์  $\longrightarrow$  ผลิตภัณฑ์

ขั้วไฟฟ้าแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือขั้วไฟฟ้าโลหะ (metal electrodes) และขั้วไฟฟ้าแบบเยื่อ (membrane electrodes) ขั้วไฟฟ้าทั้งสองประเภทนี้มีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ทั้งในด้านรูปแบบของขั้วไฟฟ้าและการตอบสนองต่อไอออนของสารตัวอ่่าง หลักการในการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าประเภทโลหะ เป็นการนำส่งอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลาย คุณสมบัติสำคัญของโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าได้คือ ต้องเป็นโลหะที่มีความคงตัวไม่ถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย แต่ขั้วไฟฟ้าแบบเยื่อ เป็นการตอบสนองต่อไอออนที่บริเวณแผ่นเยื่อนั้น เกิดจาก ไอออนถูกนำส่งจากด้านหนึ่งของแผ่นเยื่อไปยังอีกด้านหนึ่ง

เซลล์เคมีไฟฟ้าสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด ตามหน้าที่ของเซลล์คือ เซลล์แกลวานิก (galvanic cell) หรือเซลล์โวลตาอิก (voltaic cell) และเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (electrolytic cell) โดยมีความแตกต่างดังนี้

เซลล์แกลวานิกหรือเซลล์โวลตาอิก เป็นเซลล์ซึ่งทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้าอันเป็นผลของการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วคาโทด โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก ส่วนเซลล์อิเล็กโทรไลต์เป็นเซลล์ที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอก ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ การดำเนินไปของปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอ ขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าในรูปของศักย์ที่ได้รับ การใช้ประโยชน์จากเซลล์อิเล็กโทรไลต์เป็นการแยกหรือสังเคราะห์โลหะที่ต้องการ เช่น การเกาะของโลหะเงินหรือทองบนขั้วไฟฟ้า โดยวิธีอิเล็กโทรกราวิเมตรี ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดต่อไป

#### - อิเล็กโทรกราวิเมตรี

วิธีการศึกษาแบบอิเล็กโทรกราวิเมตรี เป็นการจัดเซลล์แบบอิเล็กโทรไลต์ คือต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกในการทำให้สารตัวอย่างถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ ให้ผลปฏิกิริยาเป็นของแข็งหรือพอกพูนอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าใช้งาน ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณสารตัวอย่างได้จากน้ำหนักของของแข็งที่เพิ่มขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า อิเล็กโทรกราวิเมตรีประกอบด้วยกลไกทางไฟฟ้าต่อเนื่องกัน 2 ชนิด กลไกการแยกสารตัวที่ต้องการออกจากสารตัวอย่าง อาจเรียกเป็นการแยกสลายด้วยไฟฟ้า (electrolysis) ตามด้วยกลไกการพอกพูนสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้า อาจเรียกเป็นการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) ด้วยกลไกทางไฟฟ้าที่ปรับให้เหมาะเฉพาะกับสารที่ต้องการทำการศึกษา ทำให้วิธีอิเล็กโทรกราวิเมตรีมีความจำเพาะเจาะจงสูง ซึ่งมีหลักสำคัญ 3 ประการ

ประการแรกคือ พลังงานในรูปศักย์จากภายนอกที่ให้กับเซลล์ต้องมีค่ามากกว่าศักย์แตกตัวเพื่อให้เกิดการแยกสลายด้วยไฟฟ้า ประการที่สองคือ ระหว่างการดำเนินปฏิกิริยาของการวิเคราะห์ควรต้องมีการกวนสารละลายตลอดเวลา เพื่อช่วยเร่งการนำพาไอออนจากสารตัวอย่างไปใกล้กับผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า และประการสุดท้าย สารตัวอย่างต้องเกิดเป็นผลพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า

จากหลักการที่กล่าวมาทั้งสามประการ มีความสำคัญและสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันในการทำให้สารตัวอย่างเกิดการแยกสลายด้วยไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ กลไกการแยกสารตัวที่ต้องการออกจากสารตัวอย่างจำเป็นต้องมี 2 ชนิดต่อเนื่องกัน ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดไปตามลำดับดังนี้

### 1. การแยกสลายด้วยไฟฟ้า (electrolysis)

เมื่อพลังงานในรูปศักย์ที่ให้กับเซลล์มีค่ามากกว่าศักย์แตกตัว เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันของไอออนสารตัวอย่าง กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า เกิดจากการแยกสลายของสารด้วยไฟฟ้า ระหว่างการดำเนินไปของปฏิกิริยาการแยกสลายนี้ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับสารตัวอย่างคือ ปริมาณของตัวปฏิกิริยาลดลงตามสัดส่วนของผลปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ขั้วไฟฟ้า ดังนั้นระหว่างการดำเนินไปของกระบวนการแยกสลายด้วยไฟฟ้า ค่าศักย์ของเซลล์ไม่ได้เท่ากับค่าศักย์แตกตัวตลอดเวลา ถ้าสารตัวอย่างมีเพียงสารชนิดเดียวที่เกิดปฏิกิริยาพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงศักย์เพียงแต่ทำให้เวลาของการแยกสลายนานขึ้น แต่ถ้าสารตัวอย่างประกอบด้วยสารมากกว่าหนึ่งชนิดที่ต้องการให้แยกจากกัน และเกิดการจับกับขั้วไฟฟ้า นอกจากเวลาในการแยกสลายจะมากขึ้นแล้ว ยังอาจเกิดปฏิกิริยาของสารมากกว่า 1 ชนิดพอกพูนบนขั้วไฟฟ้าด้วย ทำให้การแยกไม่ประสบผลสำเร็จ ถ้าควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้าให้มีค่าตามต้องการได้ การแยกสลายของสารย่อมดำเนินไปตามคาดหมายอย่างสมบูรณ์ ทั้งไม่มีการรบกวนของสารอื่นระหว่างการศึกษาสารตัวที่ต้องการด้วย

### 2. การพอกพูนด้วยไฟฟ้า (electrodeposition)

การศึกษาด้วยวิธีการการพอกพูนด้วยไฟฟ้า สารตัวอย่างส่วนมากมักเป็นโลหะ และควรต้องจับบนขั้วไฟฟ้าได้แน่นเรียบสม่ำเสมอ เมื่อการพอกพูนของสารตัวอย่างบนขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ กระแสที่ไหลในวงจรจะลดลงจนเป็นศูนย์หรือจนมีค่าคงที่ที่น้อยมาก ซึ่งควรต้องนำขั้วไฟฟ้าที่มีการพอกพูนของสารออกจากวงจรของเซลล์ ก่อนนำแหล่งพลังงานไฟฟ้าออก เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการผ่นกลับของปฏิกิริยาซึ่งทำให้สารที่จับกับขั้วไฟฟ้าจะสลายกลับไปในสารละลาย

สาเหตุหนึ่งของการทำให้การพอกพูนไม่เรียบ หลุดง่าย เป็นเพราะการเกิดก๊าซขึ้นระหว่างการวิเคราะห์ การเกิดรีดักชันของน้ำให้ก๊าซไฮโดรเจน หรือการเกิดออกซิเดชันของน้ำให้ก๊าซออกซิเจน ในระหว่างการพอกพูนของสาร ถึงแม้ฟองก๊าซทำให้เกิดการเคลื่อนพาไอออนดีขึ้น แต่ในขณะที่เดียวกันก็สกัดกั้นการพอกพูนของสารบนขั้วไฟฟ้า ทำให้การเกาะตัวของสารไม่ราบเรียบและหลุดออกได้ง่าย

### 2.7.2 การแยกโลหะเงินโดยการประยุกต์ใช้วิธีการแยกสลายด้วยไฟฟ้า (Ammen, 1984)

การแยกโลหะเงินออกจากโลหะตั้งต้น ซึ่งอาจได้มาจากการหลอมรวมกันของชิ้นส่วนเครื่องประดับ เหริชยูเงิน หรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ สามารถทำได้โดยใช้วิธีการแยกสลายด้วยไฟฟ้า ด้วยการนำแท่งโลหะที่ต้องแยกโลหะเงินนั้นมาใช้เป็นขั้วแอโนด (crude silver anode) ห่อหุ้มด้วยถุงผ้าชนิดทนกรด เพื่อป้องกันไม่ให้โลหะอื่น ๆ หลุดร่วงออกมาปนอยู่ในสารละลายเมื่อเกิดการแยกสลาย ส่วนโลหะที่เลือกนำมาใช้เป็นขั้วคาโทดนั้น อาจเป็นแผ่นเงินบริสุทธิ์ (99.99% pure silver starting sheet) หรือใช้แผ่นสแตนเลสชนิดทนกรด ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยา โลหะเงินจะเกิดที่ขั้วคาโทด

สารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่นิยมใช้คือ สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) ซึ่งควรจะมีปริมาณซิลเวอร์ไนเตรต 200 กรัมต่อลิตร และกรดไนตริก 30 กรัมต่อลิตร ผลของวิธีการนี้จะทำให้โลหะเงินที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดจะมีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99.9 โดยน้ำหนัก

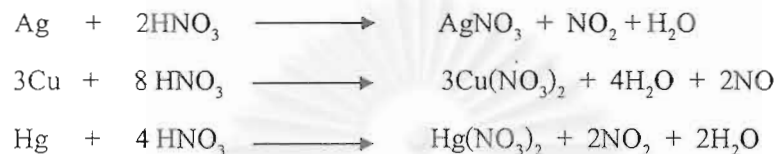
### 2.7.3 วิธีการใช้สารเคมี

ในการแยกโลหะเงินที่อยู่ในโลหะผสมด้วยการใช้สารเคมีนั้นเป็นวิธีการที่ใช้กันมานาน อาศัยคุณสมบัติการละลายและการตกตะกอนของโลหะหมู่ต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน การแยกโลหะเงินด้วยวิธีการนี้ สามารถทำได้กับโลหะผสมที่ปราศจากสารอินทรีย์ ดังนั้นโลหะเจืออะมัลกัมจึงสามารถนำมาใช้กับวิธีการนี้ได้ โดยอาศัยหลักการดังนี้



### 2.7.3.1 การละลายของโลหะเจืออะมัลกัมในกรดไนตริกเข้มข้น

โลหะเจืออะมัลกัมประกอบด้วย โลหะเงิน ทองแดง ดีบุก และปรอท ซึ่งโลหะ 3 ชนิด คือ เงิน ทองแดง และปรอทสามารถละลายได้ดีในกรดไนตริกเข้มข้น ดังสมการ



โดยโลหะเงินจะละลายได้ดีในกรดไนตริกเกิดเป็นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) ทองแดงจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับกรดไนตริก เกิดเป็นคิวปริกไนเตรต ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ) และปรอทจะละลายในกรดไนตริกเข้มข้น เกิดเป็นเมอร์คิวริกไนเตรต ( $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ ) ส่วนดีบุกนั้นจะทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับกรดไนตริกเข้มข้น ได้ของแข็งสีขาว ซึ่งโดยปกติจะมีสูตรเป็นไฮเดรตสแตนนิกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) และบางครั้งอาจเรียกว่า กรดเมทาสแตนนิก ดังสมการ



โดยอาศัยหลักการที่กล่าวมาข้างต้น จะสามารถแยกดีบุกออกจากโลหะเจืออะมัลกัมได้ โดยการกรองเอาตะกอนของสแตนนิกออกไซด์ แยกเก็บเอาไว้แล้วจึงนำสารละลายที่เหลือไปทำการศึกษาคต่อไป ในขณะที่ทำการละลายโลหะเจืออะมัลกัมด้วยกรดไนตริกเข้มข้นนั้น จำเป็นต้องมีการให้ความร้อน และทำในตู้ดูดควัน เนื่องจากเกิดก๊าซประเภทออกไซด์ของไนโตรเจน (oxides of nitrogen) ซึ่งจะเกิดขึ้นตลอดเวลา ก๊าซเหล่านี้มีความเป็นพิษ มีสมบัติในการกัดกร่อน และส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจ

### 2.7.3.2 การตกตะกอนเงินในรูปของซิลเวอร์คลอไรด์

สารละลายที่ผ่านการแยกเอาสแตนนิกออกไซด์ออกไปแล้ว จะมีไอออนของโลหะเงิน ทองแดง และปรอทอยู่ในสารละลาย ดังนั้นจำเป็นต้องตกตะกอนเพื่อแยกเอาโลหะเงินออกมาจากสารละลาย โดยทำให้ตกตะกอนในรูปของซิลเวอร์คลอไรด์ อาจจะใช้ตัวช่วยตกตะกอนเป็น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้กรดไฮโดรคลอริก เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของธาตุอื่น (โซเดียม) วิธีนี้เป็นการตกตะกอนแบบจำเพาะ (selective precipitation) เพราะคลอไรด์ไอออนจะเลือกทำปฏิกิริยากับไอออนของเงิน และปรอทที่มีอยู่ในสารละลายเกิดเป็นซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) และ เมอร์คิวรัสคลอไรด์ (Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) ดังสมการ



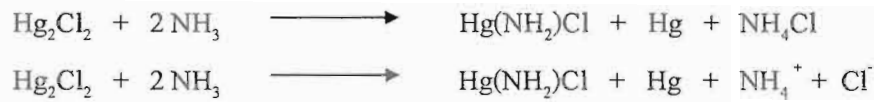
ตะกอนทั้งสองชนิดมีสีขาวเหมือนกัน จึงจำเป็นต้องกรองแยกออกจากสารละลายที่มีทองแดงละลายอยู่ในรูปของคิวปริกในเตรต

### 2.7.3.4 แยกปรอทออกจากตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์

ตะกอนสีขาวที่ได้มานั้น ไม่ได้มีเพียงตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์เท่านั้น แต่ยังมีตะกอนของเมอร์คิวรัสคลอไรด์ปนอยู่ด้วย ดังนั้นจึงอาศัยสมบัติในการละลายที่แตกต่างกันของตะกอนสองชนิดนี้ โดยตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์สามารถละลายได้ในสารละลายแอมโมเนีย เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อน [Ag(NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sup>+</sup> ดังสมการ



ส่วนเมอร์คิวรีคลอไรด์นั้นไม่ละลายในสารละลายแอมโมเนีย แต่จะก่อนจะเปลี่ยนเป็นสีดำเนื่องจากเกิดเป็นอะมิโน-เมอร์คิวริกคลอไรด์และผงละเอียดของปรอท ดังสมการ



ด้วยสมบัติดังกล่าวจึงสามารถแยกเอาสารประกอบของปรอทออกจากตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ โดยการกรองเอาของผสมสีดำนี้แยกเก็บเอาไว้เนื่องจากอาจก่อให้เกิดอันตรายจากพิษของปรอท นำสารละลายที่ผ่านการกรองไปปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยการเติมกรดไนตริก (ทดสอบโดยการใช้กระดาษลิตมัส) จะได้ตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์กลับคืนอีกครั้ง ดังสมการ



#### 2.7.3.4 การรีดิวซ์ซิลเวอร์คลอไรด์

ตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ที่ได้นั้นต้องทำการรีดิวซ์ เพื่อทำให้อยู่ในรูปโลหะเงินในการรีดิวซ์ซิลเวอร์คลอไรด์ให้อยู่ในรูปโลหะเงิน (metallic silver) สามารถทำได้ 3 วิธีการดังนี้

##### 1. รีดิวซ์โดยตรง (direct reduction)

วิธีการรีดิวซ์โดยตรงเป็นวิธีการที่ทำเพียงขั้นตอนเดียวคือนำซิลเวอร์คลอไรด์ไปหลอมด้วยฟลักซ์ ซึ่งประกอบด้วยบอแรกซ์ (borax) ผงแก้ว (flint glass (lead-free)) และโซดาแอช (soda ash) โดยนำของผสมระหว่างซิลเวอร์คลอไรด์กับฟลักซ์ใส่ในถ้วยครุฑเบ็ดซึ่งอาจจะทำจากกราไฟต์หรือซิลิกาหลอม วางไว้ในเตาหลอมให้ความร้อนจนกระทั่งไม่เห็นฟองอากาศเกิดขึ้น จึงเทเงินที่หลอมเหลวนั้นลงในเบ้า โลหะเงินที่ได้จากวิธีการนี้จะไม่ค่อยมีความบริสุทธิ์มากนัก

## 2. รีดิวซ์ด้วยผงสังกะสี (reduction with zinc)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากเพราะไม่ยุ่งยากและไม่ทำให้เกิดการสูญเสียโลหะเงินมากนัก สามารถทำได้โดยนำตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์ที่ผ่านการล้างแล้ว ใส่ในบีกเกอร์ จากนั้นเทกรดซัลฟูริกให้ท่วมตะกอน ให้ความร้อนเล็กน้อย จากนั้นจึงโรยผงสังกะสีลงไป สังกะสีจะละลายในกรดและในขณะที่สังกะสีละลาย ตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์จะถูกรีดิวซ์กลายเป็นโลหะเงิน ซึ่งจะเปลี่ยนจากตะกอนสีขาวเป็นสีเทา มองดูคล้ายผงซีเมนต์ จึงเรียกว่าซีเมนต์ซิลเวอร์ (cement silver) ดังสมการ



นำซีเมนต์ซิลเวอร์ที่ได้นี้ไปทำการหลอมด้วยเปลวไฟ โดยใช้บอริกเอซิดเป็นฟลักซ์จะทำให้ผงโลหะเงินรวมตัวกันเป็นเม็ดโลหะเงินที่มีลักษณะวาว

## 3. รีดิวซ์ด้วยผงเหล็ก (reduction with iron)

วิธีการนี้ทำเช่นเดียวกับการใช้ผงสังกะสี แต่ผงเหล็กต้องใช้เวลาในการรีดิวซ์มากกว่า จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมนัก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาครั้งนี้ได้แก่งานวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับโลหะเจืออะมัลกัม การแยกโลหะเงินเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปรอท

Kestel และ Pfarre (1996) วิเคราะห์น้ำทิ้งที่ปล่อยออกจากคลินิกทันตกรรมแห่งหนึ่งในประเทศเยอรมันซึ่งเปิดให้บริการทุกวัน พบว่ามีเศษอนุภาคของอะมัลกัมที่ใช้ในการอุดฟันปนออกมา ตลอดจนมีความเข้มข้นของปรอทในน้ำทิ้งสูง และได้สรุปว่าเป็นผลจากการใช้น้ำยาฆ่าเชื้อโรคบางชนิดในคลินิกทันตกรรม จึงทำให้มีการศึกษาถึงผลของการใช้น้ำยาฆ่าเชื้อโรค 7 ชนิด ที่มีผลต่อการละลายของโลหะต่าง ๆ ซึ่งเป็นองค์ประกอบในโลหะอะมัลกัม พบว่าสารประกอบประเภท perborates และ chlorinated ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม oxidizing active substance สามารถทำให้ปรอท ดีบุก และทองแดง ละลายออกจากโลหะอะมัลกัม ส่วนโลหะเงินแทบจะไม่ละลายออกมาเลย ส่วนน้ำยาฆ่าเชื้อโรคประเภทที่เป็นสารประกอบแอมโมเนียหรือ monoxidizing ให้ผลไม่แตกต่างกับน้ำทิ้งปกติ ซึ่งปราศจากการใช้น้ำยาฆ่าเชื้อโรคใด ๆ จึงได้สรุปผลว่า ประมาณร้อยละ 20 ของการปนเปื้อนปรอทในน้ำทิ้งจากคลินิกทันตกรรมนั้นเกิดจากการใช้น้ำยาฆ่าเชื้อโรคประเภท oxidizing disinfectants

นันทนิตย์ วานิชชีวะ (2540) ได้ศึกษาวิธีการทำปรอทจากอุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติ ให้บริสุทธิ์และผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ โดยทดลองหาวิธีการทำปรอทบริสุทธิ์เปรียบเทียบกัน 2 วิธีการ คือ ล้างด้วยกรดไนตริกเจือจาง และการกลั่นปรอทในสุญญากาศ ได้รายงานวาทัง 2 วิธีทำให้ปรอทบริสุทธิ์ได้มากกว่าปรอทมาตรฐานทางทันตกรรมจากต่างประเทศ จึงสามารถนำปรอทนี้ไปใช้งานทางทันตกรรมได้ โดยได้ทำการกลั่นปรอทในชุดเครื่องกลั่นที่ประดิษฐ์ขึ้นเองและต่อกับเครื่องกำจัดไอสารพิษ ที่อุณหภูมิ 192 องศาเซลเซียส ความดัน 10 มิลลิบาร์ ได้ตรวจวัดความบริสุทธิ์ของปรอทโดยการวิเคราะห์ด้วย AAS โดยกำหนดสิ่งเจือปนในปรอทและตรวจหาโดยคำนวณปริมาณที่ตรวจพบ หักออกจาก 100 % ไม่ได้ใช้วิธีเผาปรอทออกแล้วตรวจตะกอน เมื่อ ชัยรี สุชาติถ้ำหงส์ และคณะ (2541) ได้ตรวจสอบความบริสุทธิ์ของปรอทด้วยวิธีตามเกณฑ์มาตรฐานของปรอทที่ใช้ทางทันตกรรม ตามข้อกำหนด ISO 1560-1985 (E) Dental Mercury พบว่าปรอทที่ล้างด้วยกรดไม่สามารถผ่าน

เกณฑ์ได้ จึงไม่สมควรใช้ทางทันตกรรม คงใช้ได้เฉพาะปรอทที่ได้จากกระบวนการถลุง 3 ครั้งเท่านั้น และจากการติดตามปริมาณปรอทในอากาศในสถานที่ปฏิบัติงานและปริมาณปรอทสะสมในบุคคลที่อยู่ในบริเวณสถานที่ปฏิบัติงาน พบว่าสามารถควบคุมผลกระทบของปรอทต่อสภาพแวดล้อมในห้องปฏิบัติการและบุคคลที่ปฏิบัติงานได้โดยไม่เกินค่ามาตรฐานกำหนด

งานวิจัยในส่วนของ การแยกโลหะเงินออกจากสารละลายที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมถ่ายภาพ ได้มีผู้สนใจทำการศึกษามาเป็นเวลานานแล้ว จึงมีวิธีการต่าง ๆ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การตกตะกอน หรือการแยกสลายด้วยไฟฟ้า

ณรงค์ เตมีรักษ์ (2522) ได้ศึกษาวิธีการสกัดเงินจากน้ำยาล้างรูปที่ใช้แล้ว โดยเฉพาะน้ำยาฟิกเซอร์ (fixer) ซึ่งมีเกลือเงินละลายอยู่จำนวนมาก คือมีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 3.2-11.2 กรัมต่อลิตร ขึ้นกับชนิดของฟิล์ม ปริมาณแสงที่ถูกฟิล์ม ขบวนการล้างและปริมาณการใช้งานของน้ำยานั้น การสกัดเอาเงินออกจากน้ำยาก่อนที่จะทิ้งไป เป็นการช่วยป้องกันสภาพแวดล้อมเป็นพิษ อีกหนึ่งยังให้ผลตอบแทนสูง โดยใช้วิธีแยกสลายด้วยไฟฟ้า (electrolysis) โดยใช้แผ่นสแตนเลสทำเป็นทรงกระบอกกลวงหมุนด้วยมอเตอร์เป็นคาโรดให้โลหะเงินเกาะ ส่วนอาโนดใช้แผ่นกราไฟต์ จากการศึกษาพบว่า ได้โลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.25 สถานะที่ให้ประสิทธิภาพของกระแสสูงสุดคือที่ความต่างศักย์ 1.2-1.5 โวลต์ กระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ 0.5 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อัตราหมุนของคาโรด 800 รอบต่อนาที ควบคุมพีเอชของน้ำยาที่ 6.5 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยมีความเข้มข้นของซัลไฟต์ไม่น้อยกว่า 15 กรัมต่อลิตร และสามารถสกัดเงินให้คงมีความบริสุทธิ์สูง กับน้ำยาที่มีความเข้มข้นของเงินน้อยที่สุด 0.45 กรัมต่อลิตร โดยใช้กระแสไฟฟ้า 0.1 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร หากน้ำยาที่มีความเข้มข้นของเงินน้อยกว่านี้ แล้วจะได้เงินมีความบริสุทธิ์ต่ำลง แต่ไม่น้อยไปกว่าร้อยละ 87.0 อีกทั้งสามารถสกัดเงินจากน้ำยาฟิกเซอร์ที่ได้จากกระบวนการล้างที่ต่างกัน โดยความแตกต่างของเคมีภัณฑ์ในองค์ประกอบของน้ำยาจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพของกระแส แต่ประการใด นอกเสียจากรูปปริมาณของซัลไฟต์ ซึ่งถ้าไม่น้อยกว่า 15 กรัมต่อลิตร จะมีผลให้ประสิทธิภาพของกระแสตกลงเมื่อเวลาผ่านไป

Mendoza และ Kamata (1996) ได้ศึกษาการแยกเงินออกจากน้ำยา fixing ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมถ่ายภาพ โดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายประเภท thiuram disulfides 8 ชนิด โดยเปรียบเทียบความสามารถในการสกัดเงินของสารละลายทั้ง 8 ชนิด พบว่าการใช้ 0.02 โมลาร์ Tetramethylthiuram disulfide (TMTDS) ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าสารชนิดอื่น โดยจะทำปฏิกิริยากับเงิน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน silver (I)- TMTDS ในกระบวนการสกัดใช้เวลา 1 ชั่วโมง สามารถให้ผลการแยกเงินออกจากสารละลายที่มีเงินอยู่ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ได้ถึงร้อยละ 96 โดยน้ำหนัก

Aslam และ Walker, 1982 อ้างถึงใน ขนิษฐา ทวีถาวรสวัสดิ์, 2539 ได้กล่าวถึงการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากการทดลองหาค่าซีไอดี โดยมีวิธีการดังนี้

1. นำน้ำเสียมา 2 ลิตร เติมโซเดียมคลอไรด์จำนวน 20 กรัม กวนประมาณ 2-3 นาที
2. แยกตะกอนสีขาวของซัลเฟอร์คอลลอยด์ออกจากน้ำที่มีตะกอนโลหะหนักอยู่ เพื่อนำตะกอนของซัลเฟอร์คอลลอยด์ไปทำการทดลองนำกลับมาใช้ใหม่
3. นำน้ำที่ผ่านการแยกตะกอนซัลเฟอร์คอลลอยด์มาเติมเฟอร์รัสซัลไฟด์ โดยต้องทำการทดลองนี้ในวัน เนื่องจากเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทั้งไว้ประมาณ 2-3 ชั่วโมง
4. นำตะกอนในรูปแอมอร์ฟัสซัลไฟด์มาแยกออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดออก

ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทออกจากน้ำเสียประมาณร้อยละ 98 การทดลองนี้ นอกจากจะทำการกำจัดปรอทออกจากน้ำเสียแล้ว ได้ทำการนำเงินกลับมาใช้ใหม่ โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. นำตะกอนของซัลเฟอร์คอลลอยด์มาประมาณ 100 กรัม เติมโลหะสังกะสี 50 กรัม
2. เติมกรดซัลฟูริก 4 นอร์มัล ปริมาตร 500 มิลลิลิตร
3. ทำให้ได้ผงเงิน ทำการเติมสังกะสีและกรดซัลฟูริกอีกครั้ง ในปริมาณเดิม จากนั้นกรองและล้างด้วยน้ำกลั่น จะได้เงินที่ยังคงมีสังกะสีเป็นสารมลทิน
4. นำผงเงินมาเติมกรดไนตริก 5-8 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น จากนั้นนำไปต้มจนเกิดสารละลายสีใส เติมกรดซัลฟูริก 800 มิลลิลิตรต่อสารละลาย 1 ลิตร จะได้ซัลเฟอร์ซัลเฟตในสารละลายกรดซัลฟูริก สามารถนำไปใช้ในวงจรทดลองได้

จากการทดลองนี้ พบว่าประสิทธิภาพในการนำเงินกลับมาใช้ใหม่เป็นร้อยละ 99 ดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยมีสังกะสีเป็นสารมลทิน

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพการนำเงินกลับมาใช้ใหม่ (Aslam และ Walker ,1982)

การทดสอบ ครั้งที่	ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก				
	เงิน	สังกะสี	ปรอท	แคดเมียม	ปรอทหลัง ให้ความร้อน
1	99.86	0.030	0.071	0.0014	ND
2	99.89	0.025	0.078	0.0010	ND
3	99.86	0.023	0.085	0.0012	ND
4	99.90	0.030	0.065	0.0010	ND
5	99.93	0.021	0.076	0.0013	ND
6	99.92	0.032	0.067	0.0015	ND
7	99.90	0.034	0.063	0.0011	ND
ค่าเฉลี่ย	99.89	0.0278	0.072	0.0012	ND

ND คือ not determined

จากงานวิจัยที่กล่าวมาแล้ว เป็นการแยกโลหะเงินออกจากสารละลาย จะเห็นได้ว่าวิธีการแยกเงินด้วยวิธีการแยกสลายด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีที่ทำให้ได้โลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์สูง ส่วนการตกตะกอนในรูปของซิลเวอร์คลอไรด์มีประสิทธิภาพในการนำเงินกลับมาสูงสุด

Sandberg และ Huiatt (1986) ทำการแยกโลหะเงิน ทอง และตะกั่ว ออกจากแร่ที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของซัลไฟด์ (complex sulfide ore) โดยใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) สกัดสังกะสีออกจากแร่ และทำปฏิกิริยากับเงินเป็นซิลเวอร์คลอไรด์ ( $\text{AgCl}$ ) และตะกั่วเป็นแลดคลอไรด์ ( $\text{PbCl}_2$ )



ในกรณีของซิลเวอร์คลอไรด์ ให้ทำปฏิกิริยากับสารละลายไซโอยูเรีย ( $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ ) เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อน  $[\text{Ag}(\text{CS}(\text{NH}_2)_2)_3]^+$  สามารถทำการแยกเอาเฉพาะไอออนเงินได้โดยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin) ตกตะกอนด้วยอะลูมิเนียม หรือการแยกสลายด้วยไฟฟ้า ส่วนคลอไรด์นั้นให้ทำปฏิกิริยากับสารละลายไซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิสูง แล้วนำไปรวมกับสารละลาย  $\text{FeCl}_3$  ที่ใช้แล้วในขั้นตอนแรก เพื่อนำไปทำการแยกสลายด้วยไฟฟ้าเกิดเป็นตะกั่ว (Pb) ที่ขั้วคาโทด และสารละลายเฟอร์ริคคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_2$ ) และเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) สามารถนำกลับไปใช้ได้ใหม่

Pahlman, Rhoades และ Chamberlain (1987) ศึกษาวิธีการแยกโลหะเงินและแมงกานีสออกจาก domestic manganiferous silver deposits โดยบรรจุในคอลัมน์แล้วผ่านสารละลายซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (aqueous- $\text{SO}_2$ ) นำสารละลายที่ผ่านคอลัมน์ออกมาไปวิเคราะห์หาปริมาณแมงกานีส เงิน เหล็ก และแคลเซียม ด้วย AAS ทำการผ่านสารละลายซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซ้ำหลาย ๆ ครั้งจนกระทั่งปริมาณแมงกานีสที่ออกมากับสารละลายเหลืออยู่เพียง 1 กรัมต่อลิตร จึงล้างคอลัมน์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เพื่อทำให้เป็นกลาง (neutralization) และป้องกันการเกิดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ ( $\text{HCN}$ ) ซึ่งจะเกิดขึ้นในขั้นตอนต่อไป เมื่อใช้สารละลายไซยาไนด์ ( $\text{NaCN}$  และ  $\text{NaOH}$ ) เพื่อสกัดเงิน โดยทำการเปรียบเทียบผลของการสกัดเงินด้วยสารละลาย 2 ชนิดควบคู่กันไปกับวิธีการสกัดเงินด้วยสารละลายไซยาไนด์ทันทีโดยไม่ผ่านสารละลายซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ผลการศึกษาปรากฏว่า การใช้สารละลาย 2 ชนิดควบคู่กันทำให้ได้ปริมาณโลหะเงินมากกว่าการสกัดด้วยสารละลายไซยาไนด์เพียงขั้นตอนเดียว 8-110 เท่า ทำให้สรุปผลได้ว่า ในสารตัวอย่างที่มีเงินปนอยู่กับแมงกานีส ควรมีขั้นตอนการนำเอาแมงกานีสออกก่อน เพราะแมงกานีสอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสกัดเงินไม่ดีเท่าที่ควร โดยจะไปยับยั้งการทำงานของสารละลายไซยาไนด์

Chambers และ Dunning (1979) ทำการแยกโลหะเงินออกจากเศษชิ้นส่วนซากเครื่องบิน โดยวิธีการแยกสลายด้วยไฟฟ้า ชิ้นส่วนโลหะผสมที่มีเงินเป็นส่วนประกอบหลักนั้นจะถูกทำให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ใส่ไว้ในตะกร้าที่ทำจากสแตนเลส สารละลายอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ( $\text{AgNO}_3$ ) และคิวปริกไนเตรด ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ) โดยกำหนดให้มีปริมาณเงินในสารละลาย 30 กรัมต่อลิตร และทองแดง 20 กรัมต่อลิตร เมื่อปล่อยไฟฟ้ากระแสตรงใช้ความต่างศักย์ในช่วง 0.4-1.5 โวลต์ ใช้เวลา 1.5-6.0 ชั่วโมง จะเกิดเป็นผลึกเงินเกาะที่ขั้วคาโทด

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สามารถนำโลหะเงินออกจากชิ้นส่วนโลหะผสมได้ถึงร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก และโลหะเงินที่ได้ มีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.3

Tan และ Dinardo (1992) ศึกษาวิธีการทำโลหะเงินให้บริสุทธิ์ (silver refining) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยนำโลหะเงินที่ต้องการนำมาทำให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นมาหลอมรวมกันเป็นแท่งใช้เป็นขั้วแอโนด หุ้มด้วยถุงผ้า เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นส่วนโลหะผสมหลุดร่วงปนอยู่ในสารละลายเมื่อทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าแล้ว ใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยไฟฟ้า จะทำการรักษาระดับของซิลเวอร์ไอออน ( $\text{Ag}^+$ ) โดยการเติมสารละลายซิลเวอร์ซัลเฟต ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ) ซึ่งได้มาจากการใช้กรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ถังขั้วแอโนดก่อนที่จะมาแยกสลายด้วยไฟฟ้า เพื่อกำจัดโลหะมลทินบางชนิด เช่น อาร์เซนิก แอนติโมนี ซีลีเนียม และเทลลูเรียม วิธีการนี้ทำให้ได้โลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์สูง อีกทั้งสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 รูปแบบและขั้นตอนการศึกษา

การศึกษารังนี้แบ่งเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่หนึ่ง ศึกษาปริมาณโลหะต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบในโลหะเจืออะมัลกัมก่อนที่จะผ่านกระบวนการกำจัดปรอทและแยกโลหะเงิน ด้วย AAS

ขั้นที่สอง ศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยแปรเปลี่ยนเวลาเป็น 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ในระหว่างขั้นตอนนี้ได้ทำการติดตามผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมทางด้านไอปรอทในอากาศภายในห้องปฏิบัติการ โดยทำการเก็บและวิเคราะห์ปรอทในห้องปฏิบัติการ

ขั้นที่สาม ศึกษาปริมาณโลหะต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบในโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านกระบวนการกำจัดปรอทแล้วด้วย AAS

ขั้นที่สี่ ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกโลหะเงินออกจากโลหะอะมัลกัมที่ได้ผ่านการให้ความร้อนเพื่อกำจัดปรอทแล้ว ด้วยวิธีการแยกสลายด้วยไฟฟ้าโดยแปรเปลี่ยนชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ขั้นที่ห้า ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดไนตริกที่ใช้ในการแยกโลหะเงินที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้วโดยกระบวนการตกตะกอนโลหะเงินในรูปของตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดไนตริกเป็นร้อยละ 25, 30, 35, 40 และ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ขั้นที่หก ศึกษาความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ได้ โดยเปรียบเทียบกับโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม ซึ่งทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะเงินที่ด้วย AAS

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่องแก้ว ได้แก่ ปิเปต บิวเรต ขวดวัดปริมาตร ขวดรูปกรวย บีกเกอร์ กระบอกตวง แท่งแก้วคน หลอดหยด กรวยแก้วกรอง เครื่องแก้วกลั่นปรอท

#### 3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ ได้แก่

1. เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ( Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS ของ Varian รุ่น SpectraAA 200, Australia) โดยอาศัยกระบวนการทำให้สารแตกตัวเป็นอะตอมด้วยเปลวไฟ (flame atomization technique) ที่เกิดจากอากาศและก๊าซอะเซทีลีน ( $\text{Air} - \text{C}_2\text{H}_2$ ) และก๊าซไนตรัสออกไซด์และก๊าซอะเซทีลีน ( $\text{N}_2\text{O} - \text{C}_2\text{H}_2$ ) ในกรณีวิเคราะห์โลหะดีบุก และใช้แหล่งกำเนิดแสง (light source) แบบ Hollow Cathode Lamps (HCLs)

วิเคราะห์ปรอท ใช้ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร ความกว้างของ Slit 0.5 นาโนเมตร

วิเคราะห์เงิน ใช้ความยาวคลื่น 328.1นาโนเมตร ความกว้างของ Slit 0.5 นาโนเมตร

วิเคราะห์ดีบุก ใช้ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร ความกว้างของ Slit 0.5 นาโนเมตร

วิเคราะห์ทองแดง ใช้ความยาวคลื่น 324.8 นาโนเมตร ความกว้างของ Slit 0.5 นาโนเมตร

วิเคราะห์สังกะสี ใช้ความยาวคลื่น 213.9 นาโนเมตร ความกว้างของ Slit 1.0 นาโนเมตร

2. เครื่องกำเนิดสารประกอบไฮไดรด์ (Hydride Generator ของ Varian รุ่น VGS 77, Australia)

3. ชุดเครื่องกำจัดปรอทโดยการให้ความร้อน (แสดงภาพในภาคผนวก ก)

4. เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า Rectifier รุ่น SC - 25H ผลิตโดย Thai Patana สามารถให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 15 โวลท์ และกระแสไฟฟ้า 25 แอมแปร์

5. อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ EDS (energy dispersive spectrometer) ประกอบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยกระบวนการทำให้เกิดการคายพลังงานเมื่อมีลำแสงอิเล็กตรอนวิ่งกระทบผิววัตถุ

6. ปุ่มสำหรับทำสูญญากาศ

7. เครื่องชั่งชนิดละเอียด ของ Mettler Toledo AB204
8. เครื่องกำจัดไอสารพิษ ( Scruber )
9. เครื่องทำน้ำกำจัดไอออน ของ Barnstead
10. เครื่องย่อยสารด้วยรังสีไมโครเวฟ ของ Mile Stone รุ่น mls 1200 mega, mega 240, EM 45, Italy
11. เครื่องเก็บตัวอย่างอากาศ ของ Gilled AIR-5 พร้อม Charcoal Tube
12. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
13. หน้ากากป้องกันไอสารพิษ ของ AO Safety รุ่น R5651A

### 3.3 สารเคมีและวิธีการเตรียม

#### 3.3.1 สารละลายมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโลหะเจืออะมัลกัม

##### สารละลายเงินมาตรฐาน

เตรียมความเข้มข้นของสารละลายเงินในช่วง 1 - 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเปิดสารละลายปริมาตร 10 มิลลิตรจากสารละลายเงินมาตรฐานความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนถึงขีดวัดปริมาตรเขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายเงินที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายนี้มาเตรียมสารละลายเงินที่ใช้ทำการพลาสมาต่อไป โดยเปิดสารละลายนี้ 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิตรใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนถึงขีดวัดปริมาตรเขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายเงินที่มีความเข้มข้น 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายดังกล่าวมาทำเป็นกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายเงิน(มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยใช้สารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นแบลนด์ (blank)

##### สารละลายดีบุกมาตรฐาน

เตรียมความเข้มข้นของดีบุกในช่วง 20 - 60 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเปิดสารละลายปริมาตร 10 มิลลิตรจากสารละลายดีบุกมาตรฐานความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนถึง

ขีดวัดปริมาตรเขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายดีบุกที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายนี้มาเตรียมสารละลายดีบุกที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานต่อไป โดยการปิเปตสารละลายนี้ 10, 20 และ 30 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนถึงขีดวัดปริมาตรเขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายดีบุกที่มีความเข้มข้น 20, 40 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายดังกล่าวมาทำเป็นกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายดีบุก (มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยใช้สารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นแบลนด์

#### สารละลายทองแดงมาตรฐาน

เตรียมความเข้มข้นของทองแดงในช่วง 1 – 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เช่นเดียวกับสารละลายเงินมาตรฐาน โดยใช้สารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นแบลนด์

#### สารละลายกรดไนตริกเจือจาง 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

โดยปิเปตกรดไนตริกเข้มข้น (70.5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ; BDH, AR Grade) 7.10 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกำจัดไอออนอยู่แล้วประมาณครึ่งขวด จากนั้นปรับปริมาตรจนถึงขีดวัดปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้วเขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

### 3.3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณปรอทด้วย AAS-Cold Vapor

#### สารละลายปรอทมาตรฐาน

เตรียมความเข้มข้นของปรอทในช่วง 10 - 40 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายปริมาตร 0.10 มิลลิลิตรจากสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนถึงขีดวัดปริมาตร เขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายปรอทที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายนี้มาเตรียมสารละลายปรอทที่ใช้ทำเป็นกราฟมาตรฐาน โดยปิเปตสารละลายที่ได้นี้ 0.10, 0.20, 0.30 และ 0.40 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายปรอทที่มีความเข้มข้น 10 , 20, 30 และ 40 ไมโครกรัมต่อลิตร นำสารละลายดังกล่าวมาทำเป็นกราฟมาตรฐาน ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของปรอท (ไมโครกรัมต่อลิตร) โดยใช้สารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นแบลนด์

สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 18.5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

เตรียมโดยเปิดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (37 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ;J.T. Baker, AR Grade) 250 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกำจัดไอออนอยู่แล้วประมาณครึ่งขวด จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้วเขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 18.5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

สารละลายโซเดียมบอโรไฮไดรด์ 0.3 % โดยน้ำหนักและโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 % โดยน้ำหนัก

เตรียมโดยชั่งโซเดียมบอโรไฮไดรด์ 1.5 กรัม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 กรัม ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำผ่านการกำจัดไอออนแล้วเขย่าให้ละลาย และปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้ว

### 3.3.3 สารละลายสำหรับวิเคราะห์ปรอทในอากาศ

สารละลายปรอทมาตรฐาน

เตรียมความเข้มข้นของปรอทในช่วง 10 - 30 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยเปิดสารละลายปริมาตร 0.10 มิลลิลิตรจากสารละลายปรอทมาตรฐานความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนถึงขีดวัดปริมาตรเขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายปรอทที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายนี้มาเตรียมสารละลายปรอทที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานต่อไป โดยการดูดสารละลายนี้ 0.10, 0.20 และ 0.30 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้น ( 71% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ) 5 มิลลิลิตร และตามด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ( 37% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ) 5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้วจนถึงขีดวัดปริมาตร เขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายปรอทที่มีความเข้มข้น 10, 20 และ 30 ไมโครกรัมต่อลิตร นำสารละลายดังกล่าวมาทำเป็นกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของปรอท (ไมโครกรัมต่อลิตร) โดยใช้สารละลายผสมของกรดไนตริกเข้มข้น ( 71 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ) 5 มิลลิลิตร และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ( 37% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ) 5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้วเป็นแบบลงค์

สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 18.5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร  
เตรียมเช่นเดียวกับขั้นตอนการหาปริมาณโลหะชนิดต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของ  
โลหะเจืออะมัลกัม

สารละลายโซเดียมบอโรไฮไดรด์ 0.3 % โดยน้ำหนักและโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 %  
โดยน้ำหนัก

เตรียมเช่นเดียวกับขั้นตอนการหาปริมาณโลหะชนิดต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของ  
โลหะเจืออะมัลกัม

### 3.3.4 สารละลายที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนเงินในรูปซิลเวอร์คลอไรด์

กรดไนตริกที่ความเข้มข้นต่างๆ

สารละลายกรดไนตริก 25, 30, 35, 40 และ 45 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรโดยปิเปตกรด  
ไนตริกเข้มข้น (70.5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ; BDH, AR Grade) 177, 213, 248, 284 และ  
319 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกำจัดไอออนอยู่แล้วประมาณ  
ครึ่งขวด จากนั้นปรับปริมาตรจนถึงขีดวัดปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้วเข้าไป  
เข้ากัน จะได้สารละลายกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 25, 30, 35, 40 และ 45 % โดยน้ำหนักต่อ  
ปริมาตร ตามลำดับ

สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.50 โมลาร์

โดยปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ( 36.5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ;J.T. Baker, AR  
Grade) 12.5 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกำจัดไอออนอยู่แล้ว  
ประมาณครึ่งขวด จากนั้นปรับปริมาตรจนถึงขีดวัดปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้ว  
เข้าไปเข้ากัน จะได้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์

สารละลายกรดซัลฟูริก 2 โมลาร์

โดยปิเปตกรดซัลฟูริกเข้มข้น ( Specific Gravity 1.84; BDH ) 26.6 มิลลิลิตรใส่ลงใน  
ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกำจัดไอออนอยู่แล้วประมาณครึ่งขวด จากนั้นปรับ  
ปริมาตรจนถึงขีดวัดปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้วเข้าไปเข้ากัน จะได้สารละลาย  
กรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์



สารละลายแอมโมเนีย ( 25 % ; Merck, GR Grade )

ผงสังกะสี (zinc dust)

### 3.3.5 สารละลายเงินมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะเงินในสารละลายที่ได้จากการละลายโลหะเจืออะมัลกัมด้วยกรดไนตริก

เตรียมความเข้มข้นของสารละลายเงินในช่วง 20-60 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปีเปิดสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตรจากสารละลายเงินมาตรฐานความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนถึงขีดวัดปริมาตรเขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายเงินที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายนี้มาเตรียมสารละลายเงินที่ใช้ทำการพลาสมาต่อไป โดยปีเปิดสารละลายนี้ 10, 20 และ 30 มิลลิลิตรใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนถึงขีดวัดปริมาตรเขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายเงินที่มีความเข้มข้น 20, 30 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายดังกล่าวมาทำเป็นกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายเงิน(มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยใช้สารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นแบลนด์

### 3.3.6 สารละลายมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่เป็นโลหะมลทินของโลหะเงิน ได้แก่ ดีบุก ทองแดง สังกะสี และปรอท

#### สารละลายดีบุกมาตรฐาน

เตรียมความเข้มข้นของดีบุกในช่วง 2.0 – 8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปีเปิดสารละลายปริมาตร 5 มิลลิลิตรจากสารละลายดีบุกมาตรฐานความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนถึงขีดวัดปริมาตรเขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายดีบุกที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายนี้มาเตรียมสารละลายดีบุกที่ใช้ทำการพลาสมาต่อไป โดยการปีเปิดสารละลายนี้ 1, 2, 3 และ 4 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนถึงขีดวัดปริมาตรเขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายดีบุกที่มีความเข้มข้น 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายดังกล่าวมาทำเป็นกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายดีบุก (มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยใช้สารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นแบลนด์

#### สารละลายทองแดงมาตรฐาน

เตรียมความเข้มข้นของดีบุกในช่วง 0.2–0.8 กรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตรจากสารละลายทองแดงมาตรฐานความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนถึงขีดวัดปริมาตรเขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายทองแดงที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายนี้มาเตรียมสารละลายทองแดงที่ใช้ทำกราฟมาตรฐานต่อไป โดยการปิเปตสารละลายนี้ 1, 2, 3 และ 4 มิลลิลิตรใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนถึงขีดวัดปริมาตรเขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายทองแดงที่มีความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายดังกล่าวมาทำเป็นกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยใช้สารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นแบลนด์

#### สารละลายสังกะสีมาตรฐาน

เตรียมความเข้มข้นของสังกะสีในช่วง 0.2 – 0.8 กรัมต่อลิตร เช่นเดียวกับการเตรียมสารละลายทองแดงมาตรฐาน โดยใช้สารละลายกรดไนตริก 1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นแบลนด์

#### สารละลายปรอทมาตรฐาน

เตรียมความเข้มข้นของปรอทในช่วง 10 - 30 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายปริมาตร 0.10 มิลลิลิตรจากสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนถึงขีดวัดปริมาตร เขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายปรอทที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายนี้มาเตรียมสารละลายปรอทที่ใช้ทำเป็นกราฟมาตรฐาน โดยปิเปตสารละลายที่ได้นี้ 0.10 , 0.20 และ 0.30 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายปรอทที่มีความเข้มข้น 10 , 20 และ 30 ไมโครกรัมต่อลิตร นำสารละลายดังกล่าวมาทำเป็นกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของปรอท (ไมโครกรัมต่อลิตร) โดยใช้สารละลายกรดไนตริก 1 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นแบลนด์ (blank)

#### สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 18.5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

เตรียมเช่นเดียวกับขั้นตอนการหาปริมาณ โลหะต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของโลหะเจืออะมัลกัม

สารละลายโซเดียมบอโรไฮไดรด์ 0.3 % โดยน้ำหนักและโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 %  
 โดยน้ำหนัก  
 เตรียมเช่นเดียวกับขั้นตอนการหาปริมาณโลหะต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของโลหะเจือ  
 อะมัลกัม

### 3.4 วิธีการทดลอง

โลหะเจืออะมัลกัมที่ใช้ในการศึกษาเป็นชิ้นส่วนที่เหลือทิ้งของโลหะเจืออะมัลกัมที่ได้  
 มาจากโครงการผลิตโลหะเจือเพื่อการบูรณะฟัน ของหน่วยวิจัย คณะทันตแพทยศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยมหิดล

#### 3.4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะที่เป็นองค์ประกอบของโลหะเจืออะมัลกัมตั้งต้น

##### 1. นำผงโลหะโลหะเจืออะมัลกัมไปย่อยด้วยเครื่องย่อยสารด้วยรังสีไมโครเวฟ

โดยชั่งน้ำหนักให้ได้ประมาณ 0.1 กรัมใส่ในภาชนะสำหรับย่อยสาร บันทึกน้ำหนักไว้  
 เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4.0 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วนำไปย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้โปรแกรม  
 การทำงานดังนี้

ขั้นที่	1	250	วัตต์	เป็นเวลา 5 นาที
ขั้นที่	2	400	วัตต์	เป็นเวลา 5 นาที
ขั้นที่	3	650	วัตต์	เป็นเวลา 5 นาที
ขั้นที่	4	350	วัตต์	เป็นเวลา 5 นาที
ขั้นที่	5	0	วัตต์	เป็นเวลา 5 นาที

เมื่อครบกำหนดเวลาที่ตั้งไว้ นำมาหล่อเย็นด้วยน้ำเป็นเวลา 15 นาที เช็ดภาชนะให้แห้ง  
 จากนั้นจึงเปิดฝาทิ้งแล้วเติมกรดไนตริกเข้มข้น 5.0 มิลลิลิตร ปิดฝาและนำไปย่อยอีกครั้งโดย  
 ใช้โปรแกรมการทำงานเดิม เมื่อครบตามเวลาที่ตั้งไว้ นำออกมาหล่อเย็นด้วยน้ำเป็นเวลา 15  
 นาที จึงเปิดฝาทิ้งให้แห้งสำหรับย่อย ค่อยๆรินสารละลายที่ได้ใส่ในขวดวัดปริมาตร 50

มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้วจนถึงขีดวัดปริมาตร นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะต่อไป

2. นำสารละลายที่ได้จากการย่อยโลหะเจืออะมัลกัม มาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะเงิน ดีบุก ทองแดง และปรอท

โดยการนำสารละลายตัวอย่างที่ได้จากการย่อยมาวิเคราะห์ด้วย AAS

### 1. การหาปริมาณโลหะเงิน

ทำกราฟมาตรฐานแบบ calibration curve โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างและสารละลายเงินมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 328.1 นาโนเมตร เปิดสารละลายที่ได้จากการย่อยโลหะเจืออะมัลกัม 5.0 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้ว เขย่าให้เข้ากัน เปิดสารละลายนี้ 5.0 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้ว เขย่าให้เข้ากัน แล้วจึงนำสารละลายนี้มาหาปริมาณโลหะเงิน

วิธีการคำนวณเป็นไปตามสมการนี้

$$\text{ปริมาณโลหะเงินในสารตัวอย่าง} = \frac{(A - B) \times 200 \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \times 0.05 \text{ (ลิตร)} \times 100}{\text{ร้อยละโดยน้ำหนัก} \quad \text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (มิลลิกรัม)}}$$

เมื่อ

A = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะเงินในสารละลายตัวอย่างที่เครื่อง AAS อ่านได้ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

B = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะเงินในแบลนด์ที่เครื่อง AAS อ่านได้ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

## 2. การหาปริมาณโลหะดีบุก

ทำกราฟมาตรฐานแบบ calibration curve โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างและสารละลายดีบุกมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร ปิดเตาสารละลายที่ได้จากการย่อยโลหะเจืออะมัลกัม 5.0 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้ว เขย่าให้เข้ากัน แล้วจึงนำสารละลายนี้มาหาปริมาณโลหะดีบุก

วิธีการคำนวณเป็นไปตามสมการนี้

$$\text{ปริมาณโลหะดีบุกในสารตัวอย่าง} = \frac{(A - B) \times 100 \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \times 0.05 \text{ (ลิตร)} \times 100}{\text{ร้อยละโดยน้ำหนัก} \quad \text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (มิลลิกรัม)}}$$

เมื่อ

A = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะดีบุกในสารละลายตัวอย่างที่เครื่อง AAS อ่านได้ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

B = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะดีบุกในเบลงค์ที่เครื่อง AAS อ่านได้ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

## 3. การหาปริมาณโลหะทองแดง

ทำกราฟมาตรฐานแบบ calibration curve โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างและสารละลายทองแดงมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 324.8 นาโนเมตร ปิดเตาสารละลายที่ได้จากการย่อยโลหะเจืออะมัลกัม 1.0 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้ว เขย่าให้เข้ากัน แล้วจึงนำสารละลายนี้มาหาปริมาณโลหะทองแดง

วิธีการคำนวณเป็นไปตามสมการนี้

$$\text{ปริมาณโลหะทองแดงในสารตัวอย่าง} = \frac{(A - B) \times 100 \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \times 0.05 \text{ (ลิตร)} \times 100}{\text{ร้อยละโดยน้ำหนัก} \quad \text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (มิลลิกรัม)}}$$

เมื่อ

A = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะทองแดงในสารละลายตัวอย่างที่เครื่อง AAS อ่านได้ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

B = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะทองแดงในแบลนด์ที่เครื่อง AAS อ่านได้ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 4. การหาปริมาณโลหะปรอท

ทำการหามาตรฐานแบบ calibration curve โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างและสารละลายปรอทมาตรฐานที่มีความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร เปิดสารละลายที่ได้จากการย่อยโลหะเจืออะมัลกัม 1.0 มิลลิกรัม ใส่ขวดวัดปริมาตร 25 มิลลิกรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้ว เขย่าให้เข้ากัน เปิดสารละลายนี้ 0.1 มิลลิกรัม ใส่ขวดวัดปริมาตร 25 มิลลิกรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้วเขย่าให้เข้ากัน แล้วจึงนำสารละลายนี้มาหาปริมาณโลหะปรอท ด้วยเครื่อง AAS -cold vapor

วิธีการคำนวณเป็นไปตามสมการนี้

$$\text{ปริมาณโลหะปรอทในสารตัวอย่าง} = \frac{(A - B) \times 62500 \times 10^{-3} \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \times 0.05 \text{ (ลิตร)} \times 100}{\text{ร้อยละโดยน้ำหนัก} \quad \text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (มิลลิกรัม)}}$$

เมื่อ

A = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะปรอทในสารละลายตัวอย่างที่เครื่อง AAS-cold vapor อ่านได้ มีหน่วยเป็น ไมโครกรัมต่อลิตร

B = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะปรอทในแบลนด์ที่เครื่อง AAS-cold vapor อ่านได้ มีหน่วยเป็น ไมโครกรัมต่อลิตร

3.4.2 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัม โดยการให้ความร้อน

นำโลหะเจืออะมัลกัมที่ชั่งน้ำหนักละเอียดแล้วใส่ลงในภาชนะอลูมิเนียมเพื่อเก็บสำหรับกำจัดปรอทโดยการให้ความร้อน ปิดฝาซึ่งมีปลายต่อกับอุปกรณ์ความแน่นและภาชนะรองรับ กิ่ง

หมคนีติดตั้งอยู่ภายในตู้ควันที่ต่อกับเครื่องกำจัดไอสารพิษ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสที่ความดันสูญญากาศ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการให้ความร้อนแล้วไปชั่งน้ำหนักละเอียดเพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณปรอทที่ถูกกำจัดออกไป ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนระยะเวลาที่ให้ความร้อนเป็น 3 4 และ 5 ชั่วโมง ในทุกการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง

วิธีการคำนวณปริมาณปรอทที่ถูกกำจัดออกไปเป็นไปตามสมการนี้

$$\text{ปริมาณปรอทที่ถูกกำจัด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = \frac{(A-B) \times 100}{C \times \text{น้ำหนักโลหะเจืออะมัลกัมที่ใช้ในการกำจัดปรอท (กรัม)}}$$

เมื่อ

A = น้ำหนักโลหะเจืออะมัลกัมก่อนที่จะกำจัดปรอท มีหน่วยเป็นกรัม

B = น้ำหนักโลหะเจืออะมัลกัมหลังจากกำจัดปรอท มีหน่วยเป็นกรัม

C = ปริมาณปรอทในโลหะเจืออะมัลกัมตั้งต้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ที่ได้จากการทดลอง 3.4.1

**3.4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะที่เป็นองค์ประกอบของโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้ว**

เมื่อได้เวลาที่เหมาะสมในการกำจัดปรอทซึ่งสามารถกำจัดปรอทออกไปได้มากที่สุดแล้ว นำโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้ววิเคราะห์หาปริมาณโลหะเงิน ดีบุก ทองแดง และปรอทด้วยวิธีการเดียวกันกับ 3.4.1

**3.4.4 การตรวจวัดปริมาณปรอทในอากาศในห้องปฏิบัติการ**

#### 1. การเก็บตัวอย่างอากาศ

เก็บตัวอย่างอากาศในขณะที่ทำการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัม โดยใช้เครื่องเก็บอากาศ Gillian ที่ต่ออยู่กับตัวดูดซับที่เป็นของแข็งบรรจุอยู่ในหลอด (solid sorbent tube) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ใช้ผงถ่าน เพื่อดูดซับปรอทในรูปของไอปรอท ปรับอัตราการดูดของเครื่องดูดเป็น 0.2 ลิตรต่อนาที ตั้งเครื่องเก็บอากาศไว้ในห้องปฏิบัติการที่ทำการกำจัดปรอท

การวางเครื่องเก็บอากาศ ควรจะวางในบริเวณที่มีอากาศหมุนเวียนอยู่ตลอดเวลา โดยไม่มีสิ่งกีดขวางหรือกีดขวางการไหลเวียนของอากาศ ที่ระดับความสูงจากพื้นประมาณ 1 เมตร เก็บอากาศเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำหลอดบรรจุตัวดูดซับที่เป็นของแข็งปิดจุกทั้ง 2 ด้าน เพื่อนำไปทำในขั้นตอนต่อไป ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

## 2. การเตรียมสารตัวอย่าง

ตัดหลอดแก้วที่บรรจุผงถ่าน เกลงในบีกเกอร์ เดิมกรดไนตริกเข้มข้น (70.5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) 2.5 มิลลิลิตร ตามด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (37% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) 2.5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ในตู้ควันทัน 1 ชั่วโมง กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 แล้วปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้ว เขย่าให้เข้ากัน นำไปวิเคราะห์ต่อไป

## 3. การวิเคราะห์หาปริมาณปรอทในอากาศ

ทำการหามาตรฐานแบบ Calibration Curve โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง และสารละลายปรอทมาตรฐานที่มีความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร นำสารละลายที่ได้นี้มาหาปริมาณโลหะปรอท ด้วยเครื่อง AAS -cold vapor

วิธีการคำนวณเป็นไปตามสมการนี้

$$\text{ปริมาณโลหะปรอทในสารตัวอย่าง} = \frac{(A - B) \times 50 \text{ (มิลลิลิตร)}}{1000 \text{ (มิลลิลิตร)} \times 36}$$

(ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

เมื่อ

A = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะปรอทในสารละลายตัวอย่างที่เครื่อง AAS-cold vapor อ่านได้ มีหน่วยเป็น ไมโครกรัมต่อลิตร

B = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะปรอทในแบลนด์ที่เครื่อง AAS-cold vapor อ่านได้ มีหน่วยเป็น ไมโครกรัมต่อลิตร



### 3.4.5 การศึกษาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมด้วยวิธีการแยกสลายด้วยไฟฟ้า

นำโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้วชั่งน้ำหนักละเอียด แล้วนำไปใส่ภาชนะที่มีลักษณะคล้ายตะกร้าทรงสูงทำจากแผ่นไททานเนียมเคลือบแพลทินัม นำมาเจาะรูโดยรอบเว้นตรงส่วนก้นภาชนะ มีขนาดความกว้างประมาณ 2 นิ้ว สูง 3 นิ้วครึ่ง และหนา 0.5 นิ้ว โดยให้ภาชนะนี้เป็นขั้วแอโนด ส่วนขั้วคาโทดใช้โลหะชนิดเดียวกันคือแผ่นไททานเนียมเคลือบแพลทินัม ใช้เทพื้นเพื่อให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา 1 ตารางนิ้ว ต่อขั้วทั้งสองเข้ากับเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า แล้วนำขั้วทั้งสองจุ่มลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จัดให้มีระยะห่าง ปรับค่าความต่างศักย์ที่ 1.5 โวลต์ ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 6 ชั่วโมง สังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น (แสดงภาพในภาคผนวก ก)

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ กรดไนตริก 5% กรดซัลฟูริก 5% และสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 2.4 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

### 3.4.6 การศึกษาความเข้มข้นของกรดไนตริกที่เหมาะสมในกระบวนการแยกเงินโดยใช้สารเคมี

1. นำโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้ว 10 กรัม (บันทึกน้ำหนักละเอียดไว้) ละลายในกรดไนตริก 25 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในตู้ดูดควัน ใช้เวลาในการละลายประมาณ 3 ชั่วโมง วางทิ้งไว้จนสารละลายเย็นตัวลง แล้วจึงนำไปกรองตะกอนของสแตนนิกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เก็บไว้ในภาชนะที่มีฝาปิด ส่วนสารละลายใส่นำไปปรับปริมาตรให้เป็น 500 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร

2. นำสารละลายที่ผ่านการกรองแล้วมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะเงิน โดยทำกราฟมาตรฐานแบบ calibration curve วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างและสารละลายเงินมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 328.1 นาโนเมตร ปิเปตสารละลายที่ได้ 5.0 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้ว เขย่าให้เข้ากัน ปิเปตสารละลายนี้ 1.0 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้ว เขย่าให้เข้ากัน แล้วจึงนำสารละลายนี้มาหาปริมาณโลหะเงิน

วิธีการคำนวณเป็นไปตามสมการนี้

$$\text{ปริมาณโลหะเงินในสารตัวอย่าง} = \frac{(A-B)(\text{มิลลิกรัมต่อลิตร}) \times 50 (\text{มิลลิลิตร}) \times 50 (\text{มิลลิลิตร})}{(\text{มิลลิกรัมต่อลิตร}) \quad 5 (\text{มิลลิลิตร}) \times 1 (\text{มิลลิลิตร})}$$

เมื่อ

A = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะเงินในสารละลายตัวอย่างที่เครื่อง AAS อ่านได้ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

B = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะเงินในเบลงค์ที่เครื่อง AAS อ่านได้ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

3. ปิเปตสารละลายที่ได้จากข้อ 1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปกรวย นำไปตกตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมลาร์ ที่อยู่ในบิวเรต เริ่มต้นโดยการปล่อยกรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมลาร์ ประมาณ 20 มิลลิลิตร (ดูรายละเอียดวิธีการคำนวณในภาคผนวก ง) ระหว่างการทำการทดลองใช้เครื่องกวนแม่เหล็กกวนสารละลาย แล้วจึงวางทิ้งไว้ให้ตะกอนจมตัว ทดลองปล่อยกรดไฮโดรคลอริกลงไปอีกเล็กน้อยถ้าไอออนของเงินตกตะกอนเป็นซิลเวอร์คลอไรด์หมดแล้วจะไม่เกิดตะกอนสีขาวอีก แต่ถ้ายังคงมีไอออนของเงินเหลืออยู่ สารละลายส่วนบนที่ใส จะเกิดเป็นตะกอนสีขาวซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ เมื่อทำการตกตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์จนหมดแล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตะกอนจมตัว จากนั้นจึงกรองตะกอนด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เก็บสารละลายที่เหลือไว้เนื่องจากเป็นกรดไนตริกเข้มข้นที่มีโลหะทองแดงละลายอยู่ไม่สามารถปล่อยทิ้งได้ทันที แล้วนำส่วนที่เป็นตะกอนสีขาวมาล้างน้ำกลั่นซ้ำหลาย ๆ ครั้ง

4. นำตะกอนสีขาวของซิลเวอร์คลอไรด์ซึ่งมีเมอร์คิวรัสคลอไรด์ปนอยู่ไปละลายในสารละลายแอมโมเนีย โดยเติมสารละลายแอมโมเนียที่ละลายจนตะกอนขาวละลายหมด กรองสารละลายนี้ด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ผงสีดำของเมอร์คิวรัสคลอไรด์จะติดอยู่บนกระดาษกรอง นำกระดาษกรองที่มีเมอร์คิวรัสคลอไรด์เก็บไว้ ส่วนสารละลายใสที่ได้ก็นำไปปรับสภาพให้เป็นกรด (ทดสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส) ด้วยการเติมกรดไนตริกเข้มข้นที่ละลายได้ ตะกอนสีขาวของซิลเวอร์คลอไรด์ก็กลับคืนมา จากนั้นจึงนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 สารละลายที่ผ่านกระดาษกรองต้องเก็บไว้ในภาชนะต่างหากที่มีฝาปิดเรียบร้อย

5. นำตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เทกรดซัลฟูริก 2 โมลาร์ให้ท่วมตะกอน โยงผงสังกะสีให้ทั่ว ใช้ช้อนพลาสติกหรือแท่งแก้วคน คนเป็นระยะ สังเกตฟองก๊าซที่เกิดขึ้น ตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์จะเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีเทา เดิมผงสังกะสีที่ ละน้อยจนไม่มีตะกอนสีขาวเหลืออยู่ จากนั้นเติมกรดซัลฟูริก อีกเล็กน้อยเพื่อละลายผงสังกะสี ที่อาจเหลือตกค้างอยู่ จนไม่เห็นฟองก๊าซซึ่งเกิดจากการละลายของผงสังกะสีในกรดซัลฟูริก อาจมีการให้ความร้อนได้ในช่วงแรก แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาก็หยุดให้ความร้อน กรองตะกอนสีเทา ของโลหะเงิน (cement silver) ที่ได้ด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

6. นำตะกอนสีเทาของโลหะเงินไปหลอมในเบ้าหลอมทองซึ่งมีลักษณะเป็นแท่ง ผิว หน้าที่ดัดบดด้วยกรรไกร ไฟด์ โยฟลักซ์ (ในการศึกษาครั้งนี้ใช้บอริกเอซิด) ให้ทั่วตะกอนสีเทา จาก นั้นจึงทำการหลอมโดยใช้เปลวไฟที่มีอุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ที่เกิดจากอากาศ - ก๊าซหุงต้ม (air - LPG) เมื่อโลหะเงินหลอมตัวกลายเป็นของเหลว วาว เพลงในภาชนะขนาด ใหญ่ที่มีน้ำอยู่ โลหะเงินจะจับตัวกันเป็นเม็ดโลหะเงิน นำขึ้นจากน้ำ ทำให้แห้ง แล้วจึงนำไปชั่ง น้ำหนักโลหะเงินที่ได้

ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนความเข้มข้นของกรดไนตริกเป็น 30, 35, 40 และ 45% โดย น้ำหนักต่อปริมาตรตามลำดับ และในทุกการทดลอง ทำซ้ำ 3 ครั้ง

### 3.4.7 การหาความบริสุทธิ์ของโลหะเงิน

นำโลหะเงินที่ได้จากการหลอมประมาณ 1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร เติม กรดไนตริกเข้มข้น 70.5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 25 มิลลิลิตร วางบนเตาให้ความร้อนจน โลหะเงินละลายหมด เทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออน แล้ว 25 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารมลทินด้วย AAS สำหรับ โลหะดีบุก ทองแดง และสังกะสี วิธีการคำนวณเป็นไปตามสมการนี้

$$\text{ปริมาณโลหะมลทินในโลหะเงิน} = \frac{(A - B) \times 50 \text{ (กรัม)} \times 100}{10^3 \times 10^3 \times \text{น้ำหนักโลหะเงินที่ชั่ง (กรัม)}} \\ \text{(ร้อยละโดยน้ำหนัก)}$$

เมื่อ

A = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะมททินในสารตัวอย่างที่เครื่อง AAS อ่านได้ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

B = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะมททินในแบดถึงค์ที่เครื่อง AAS อ่านได้ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

ส่วนปริมาณโลหะปรอทมีวิธีการคำนวณเป็นไปดังสมการนี้

$$\text{ปริมาณโลหะปรอทในโลหะเงิน} = \frac{(A - B) (\text{กรัม}) \times 100}{20 \times 10^6 \times \text{น้ำหนักโลหะเงินที่ชั่ง (กรัม)}} \quad (\text{ร้อยละโดยน้ำหนัก})$$

เมื่อ

A = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะมททินในสารตัวอย่างที่เครื่อง AAS-cold vapor อ่านได้ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

B = ปริมาณความเข้มข้นของโลหะมททินในแบดถึงค์ที่เครื่อง AAS-cold vapor อ่านได้ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

### 3.5 การวิเคราะห์ผลการวิจัย

นำผลการทดลองที่ได้จากการกำจัดปรอทด้วยการให้ความร้อนมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Window โดยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (Analysis of Variance – One Way Classification) ให้ตัวแปรอิสระคือเวลาในการทดลอง ส่วนตัวแปรตามคือ ปริมาณปรอทที่กำจัดได้จากโลหะเจืออะมัลกัม ถ้าพบว่าตัวแปรอิสระอย่างน้อยหนึ่งคู่ มีความแตกต่างกัน (Reject Null Hypothesis) จะทำการทดสอบต่อโดยใช้ Multiple Comparison Test โดยวิธีของ Duncan ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากผลการทดลองการแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมีนั้น ทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว ในลักษณะเดียวกัน ให้ตัวแปรอิสระคือ ความเข้มข้นของกรดไนตริก ตัวแปรตามคือปริมาณเงินที่แยกกลับคืนมาได้

สำหรับผลการทดลองการหาความบริสุทธิ์ของโลหะเงิน นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว ให้ตัวแปรอิสระคือความเข้มข้นของกรดไนตริก ส่วนตัวแปรตามคือความบริสุทธิ์ของปรอท ถ้าพบว่าตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 คู่ มีความแตกต่างกัน จะทำการทดลองต่อโดยใช้ Multiple Comparision Test โดยวิธีของ Duncan ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และนำปริมาณร้อยละของความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ได้เปรียบเทียบกับโลหะเงินที่ใช้งานทางทันตกรรม (สั่งซื้อจากบริษัท บางกอกแอสเสย์ออฟฟิส จำกัด มีความบริสุทธิ์ 99.99 % ) โดยวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ ทางเดียว ให้ตัวแปรอิสระคือชนิดของโลหะเงินที่ได้มา ส่วนตัวแปรตามคือความบริสุทธิ์ของปรอท ถ้าพบว่าตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 คู่ มีความแตกต่างกัน จะทำการทดลองต่อโดยใช้ Multiple Comparision Test โดยวิธีของ Duncan ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิจารณ์

จากการวิจัยการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมโดยวิธีการให้ความร้อน และศึกษาการแยกโลหะเงินด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าและวิธีการใช้สารเคมี เพื่อให้ได้วิธีการที่เหมาะสม และทำให้ได้โลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยทำการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมก่อน สภาวะที่ศึกษาคือเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน เพื่อให้ได้เวลาที่กำจัดปรอทออกไปได้มากที่สุดและไม่สิ้นเปลืองพลังงาน หลังจากนั้นศึกษาการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้ว โดยแบ่งเป็นสองวิธีการ คือ วิธีการทางเคมีไฟฟ้า และวิธีการใช้สารเคมี ซึ่งวิธีการทางเคมีไฟฟ้านั้น ได้ศึกษาผลของการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน ส่วนวิธีการใช้สารเคมีนั้น ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกที่ใช้ในกระบวนการ จากนั้นจึงนำโลหะเงินที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ไปวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ โดยเปรียบเทียบกับโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงโลหะอะมัลกัม

#### 4.1 การหาปริมาณโลหะต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในโลหะเจืออะมัลกัม

การหาปริมาณโลหะที่เป็นองค์ประกอบในโลหะเจืออะมัลกัมก่อนที่จะนำไปกำจัดปรอท ซึ่งได้แก่ ปรอท เงิน ดีบุก และทองแดง ศึกษาด้วย AAS แต่เนื่องจากผงโลหะเจืออะมัลกัมไม่สามารถละลายในกรดแล้วกลายเป็นสารละลายใส ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ด้วย AAS จึงจำเป็นต้องมีการย่อยโลหะเจืออะมัลกัมด้วยเครื่องย่อยสารด้วยรังสีไมโครเวฟก่อน เพื่อให้ได้สารละลายใสของโลหะเจืออะมัลกัมแล้วจึงสามารถนำสารตัวอย่างนั้นมาวิเคราะห์ด้วย AAS ในขั้นตอนต่อไปได้

ในขั้นตอนของการย่อยโลหะเจืออะมัลกัมด้วยเครื่องย่อยสารด้วยรังสีไมโครเวฟนั้น มีการให้พลังงานความร้อน 5 ขั้นตอนในแต่ละโปรแกรมการทำงาน และใช้กรด 2 ชนิดคือ ซัลฟูริกเข้มข้น และไนตริกเข้มข้น โดยใช้กรดซัลฟูริกในโปรแกรมการทำงานแรก เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการย่อยในโปรแกรมแรกแล้ว จำเป็นต้องเปิดภาชนะออกเพื่อเติมกรดไนตริกในโปรแกรมการทำงานที่ 2 และเนื่องจากในกระบวนการย่อยจะเกิดความร้อนสูงมาก ปรอทเป็น

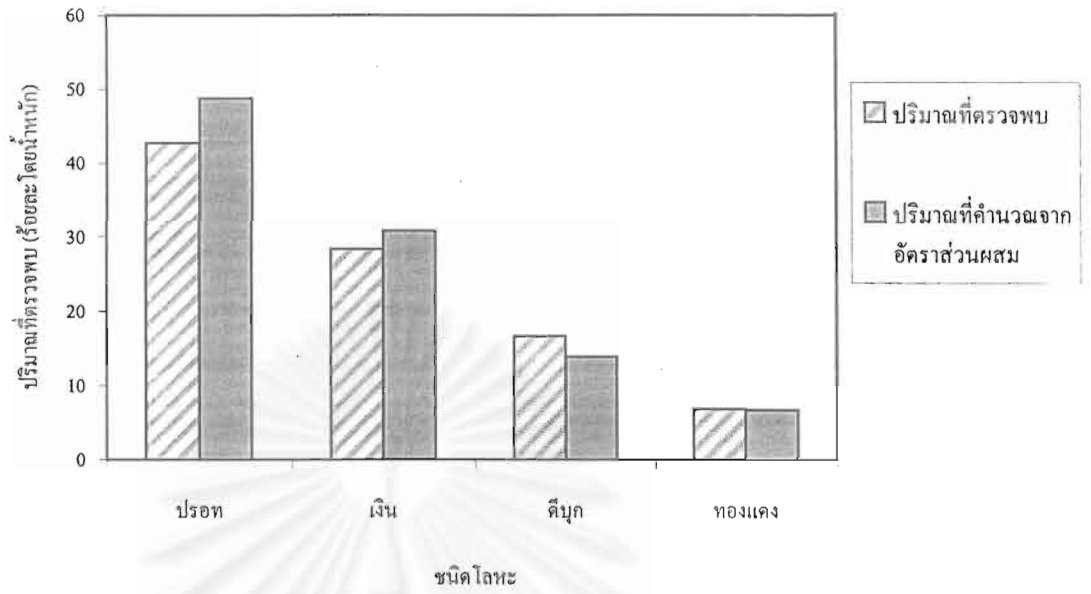
โลหะที่มีจุดเดือดต่ำกว่าโลหะตัวอื่น ๆ คือมีจุดเดือดที่ +356.9 องศาเซลเซียส ในขณะที่โลหะชนิดอื่น ได้แก่ เงิน ทองแดง และดีบุก มีจุดเดือดที่สูงกว่า 2,000 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงเป็นไปได้อย่างมากที่ปรอทบางส่วนจะเปลี่ยนสถานะจากโลหะที่ละลายอยู่ในกรด เป็นไอของปรอท อยู่ในสถานะสำหรับย่อยสารซึ่งเป็นภาชนะปิด แต่ในขณะที่ทำการเปิดฝาของภาชนะสำหรับย่อยออก เพื่อเติมกรดตัวที่ 2 หรือเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการย่อย ปรอทที่กลายเป็นไออยู่ในสถานะจึงสามารถรั่วไหลออกสู่ภายนอกได้ ส่งผลให้ปริมาณของปรอทที่ตรวจพบน้อยกว่าค่าตามทฤษฎี ผลการวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณโลหะต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในโลหะเจืออะมัลกัม

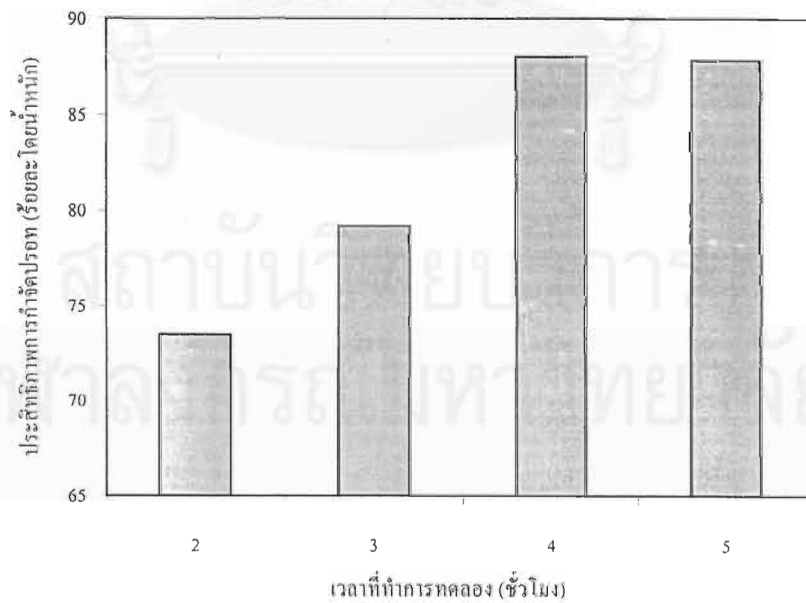
ชนิดของโลหะ	ปริมาณที่ตรวจพบ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ปริมาณที่คำนวณจากอัตราส่วนผสม (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)
ปรอท	$42.77 \pm 6.06$	48.72
เงิน	$28.30 \pm 1.03$	30.77
ดีบุก	$16.61 \pm 0.23$	13.85
ทองแดง	$6.79 \pm 0.17$	6.67

และในขั้นตอนการรีนสารละลายที่ผ่านการย่อยแล้วออกจากภาชนะต้องทำด้วยความระมัดระวัง จำเป็นต้องล้างสารละลายออกจากภาชนะสำหรับย่อยหลาย ๆ ครั้ง โดยการใช้น้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนแล้ว เเทรวมในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตรแล้วจึงจะปรับปริมาตรเนื่องจากโลหะที่ทำการย่อยมีปริมาณน้อยมาก สารละลายที่สูญเสียไปเพียงเล็กน้อยจะส่งผลต่อปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ได้

อีกประการหนึ่งที่คาดว่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ปริมาณโลหะที่ตรวจพบแตกต่างกันไป จากค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี คือข้อจำกัดของการใช้เครื่องย่อยสารด้วยรังสีไมโครเวฟ ที่ใช้สารตัวอย่างได้ปริมาณน้อย คือใช้สารตัวอย่างประมาณ 0.1 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมาก เนื่องโลหะเจืออะมัลกัมนั้น ไม่ได้เป็นโลหะผสมที่มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) แต่รวมตัวกันเป็นเฟสต่าง ๆ เมื่อต้องทำการบดให้ละเอียดก่อนที่จะนำไปย่อย โลหะเจืออะมัลกัมที่ถูกชั่งไปนั้นอาจจะไม่ได้มีส่วนประกอบของโลหะทุกตัวตามอัตราส่วนที่ผสม



รูปที่ 4.1 ปริมาณโลหะต่างๆ ในโลหะเจืออะมัลกัมที่ตรวจพบ และที่คำนวณจากอัตราส่วนผสม



รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอท



#### 4.2 การหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมโดยการให้ความร้อน

เนื่องจากได้มีผู้ทำการศึกษากระบวนการทำปรอทให้บริสุทธิ์ โดยวิธีการกลั่นที่สุญญากาศ (นันทนิตย์ วานิชชีวะ, 2540) จึงได้นำวิธีการนี้มาประยุกต์ใช้ในการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัม อีกทั้งวิธีการนี้มีความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน อุปกรณ์ในการกำจัดปรอท คัดแปลงจากชุดกลั่นปรอทซึ่งติดตั้งอยู่ในตู้ดูดควันที่ติดกับเครื่องกำจัดไอสารพิษ (scrubber) ภาชนะที่ใช้ใส่โลหะเจืออะมัลกัมทำจากโลหะปลอดสนิมที่มีฝาปิดสนิท มีท่อเล็กๆ อยู่ด้านบนของฝาซึ่งต่อกับอุปกรณ์ควบแน่น และมีขวดกักลมซึ่งใช้สำหรับรองรับปรอทที่เกิดขึ้น เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส ภายในระบบสุญญากาศ ปรอทจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอผ่านอุปกรณ์ควบแน่น ไอปรอทจะควบแน่นเป็นโลหะปรอทในสถานะของเหลว อุปกรณ์ทั้งหมดติดตั้งอยู่ในตู้ดูดควันที่ติดกับเครื่องกำจัดไอสารพิษ ส่วนโลหะชนิดอื่นๆ ยังคงอยู่ในโลหะเจืออะมัลกัมเนื่องจากโลหะอื่นๆ อันได้แก่ เงิน ทองแดง และดีบุก มีจุดเดือดที่สูงมากคือสูงกว่า 2,000 องศาเซลเซียส เมื่อครบกำหนดเวลาที่ศึกษาในการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมโดยการให้ความร้อนแล้ว จึงหยุดให้ความร้อน รอให้อุปกรณ์เย็นตัวลงแล้วจึงนำโลหะเจืออะมัลกัมที่เหลือไปชั่งน้ำหนักหลังการกำจัดปรอทเพื่อลบออกจากร้านกตั้งต้น แล้วจึงนำน้ำหนักปรอทที่หายไป คำนวณกลับเป็นปริมาณปรอทที่กำจัดได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) แปรเปลี่ยนเวลาที่ทำการทดลองเพื่อหาเวลาที่เหมาะสม ผลการศึกษาเวลาที่ทำการกำจัดปรอทแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมโดยการให้ความร้อน

เวลาในการทดลอง (ชั่วโมง)	ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอท (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
2	73.49 ± 0.37
3	79.20 ± 0.78
4	88.01 ± 1.00
5	87.83 ± 0.84

ผลของการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมโดยการให้ความร้อน ที่เวลาต่าง ๆ กัน คือที่เวลา 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง จะให้ผลแตกต่างกัน เห็นได้ว่าการให้ความร้อนกับผงโลหะ

เพื่ออะมัลกัมทำให้น้ำหนักของโลหะเจืออะมัลกัมลดลง ซึ่งเป็นผลจากการที่ปรอทได้ถูกกำจัดออกจากโลหะเจืออะมัลกัม เมื่อเพิ่มเวลาในการทำการทดลอง ปรอทจะถูกกำจัดออกไปได้มากขึ้น จนมีประสิทธิภาพสูงสุดและเริ่มคงที่เมื่อทำการทดลองที่เวลา 4 และ 5 ชั่วโมง

จากผลการทดลองนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว เพื่อทดสอบความแปรปรวนของปริมาณปรอทที่ถูกกำจัดออกไปได้เป็นเวลาในการทดลองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ปริมาณปรอทที่ถูกกำจัดที่เวลาต่าง ๆ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จึงวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Multiple comparision ของ Duncan เพื่อหาว่า ปริมาณปรอทที่ถูกกำจัดที่เวลาใดที่มีความแตกต่าง พบว่าแตกต่างกันทุกค่า ยกเว้นที่เวลา 4 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง ซึ่งไม่แตกต่างกัน แสดงว่าการทดลองที่เวลา 4 และ 5 ชั่วโมงนี้ สามารถกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมให้อยู่ในระดับเดียวกันได้ จึงสามารถตัดสินใจเลือกเวลาในการทดลองที่ 4 ชั่วโมง เนื่องจากสามารถกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมได้ถึงร้อยละ 88.01 ซึ่งเป็นค่าสูงสุด อีกทั้งไม่เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่ายทางด้านไฟฟ้า จากนั้นจึงนำโลหะเจืออะมัลกัมนี้ไปทำการแยกโลหะเงินในขั้นต่อไป

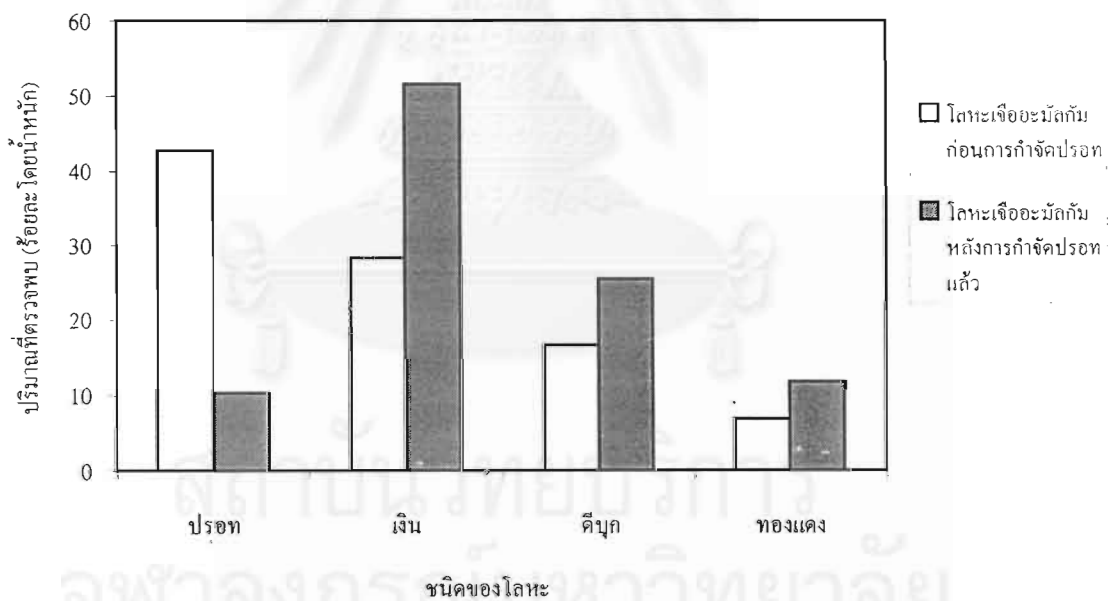
#### 4.3 การหาปริมาณโลหะต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้ว

การหาปริมาณโลหะต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้วที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส ภายในระบบสุญญากาศ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ศึกษาด้วยวิธีการเช่นเดียวกันกับข้อ 4.1 คือต้องนำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยสารด้วยรังสีไมโครเวฟ แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ด้วย AAS ผลดังตาราง 4.3

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อหาปริมาณโลหะที่เป็นองค์ประกอบภายในของโลหะเจืออะมัลกัมผ่านกระบวนการกำจัดปรอทแล้ว ปริมาณของโลหะชนิดต่างๆ เปลี่ยนแปลงไปจากปริมาณที่ตรวจพบในตาราง 4.1 ซึ่งแสดงปริมาณโลหะชนิดต่างๆ ของโลหะเจืออะมัลกัมดั้งเดิม โดยปริมาณของปรอทจะลดลงเนื่องจากถูกกำจัดออกไปด้วยการให้ความร้อน ส่วนโลหะชนิดอื่น ๆ ปริมาณที่ตรวจพบจะสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบโลหะเจืออะมัลกัมก่อนและหลังการผ่านกระบวนการกำจัดปรอท ที่น้ำหนักเท่ากัน แสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโลหะต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบในโลหะเจืออะมัลกัมก่อนและหลังการกำจัดปรอท

ชนิดของโลหะ	ปริมาณโลหะที่ตรวจพบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	ก่อนการกำจัดปรอท	หลังการกำจัดปรอท
ปรอท	$42.77 \pm 6.06$	$10.29 \pm 0.79$
เงิน	$28.30 \pm 1.03$	$51.57 \pm 0.75$
ดีบุก	$16.61 \pm 0.23$	$25.42 \pm 0.33$
ทองแดง	$6.79 \pm 0.17$	$11.75 \pm 0.15$



รูปที่ 4.3 ปริมาณโลหะที่เป็นองค์ประกอบของโลหะเจืออะมัลกัมก่อนและหลังการกำจัดปรอท

#### 4.4 การหาปริมาณปรอทในอากาศ

จากการเก็บตัวอย่างอากาศในห้องปฏิบัติการขณะทำการกำจัดปรอท มาทำการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทด้วย AAS – cold vapor พบว่ามีปริมาณปรอทในอากาศไม่เกินมาตรฐานกำหนด คือมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 0.0109 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่มาตรฐานมลพิษประเภทปรอทจากแหล่งกำเนิดมิได้สูงสุดในอากาศ 0.05 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (National Institute for Occupation Safty & Health) แสดงผลการตรวจวัดดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ปริมาณปรอทในอากาศภายในห้องปฏิบัติการ

ครั้งที่	ปริมาณที่ตรวจพบ (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
1	0.0102
2	0.0005
3	0.0219
ค่าเฉลี่ย	$0.0109 \pm 0.0107$

ซึ่งผลการตรวจวัดเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้คือมีปริมาณปรอทในอากาศขณะทำการทดลอง เนื่องจากวิธีการกำจัดปรอทนี้ได้ตัดแปลงมาจากกรรมวิธีการทำปรอทให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการกลั่นในสถานะสูญญากาศ (นันทนิตย์ วานิชชีวะ, 2540) ซึ่งผู้ทำการวิจัยได้ติดตามตรวจวัดปริมาณปรอทในอากาศเป็นเวลา 10 เดือนติดต่อกัน ภายในห้องปฏิบัติการที่มีการติดตั้งเครื่องดูดควันและเครื่องกำจัดไอสารพิษที่ได้ตามมาตรฐาน ทำให้การปฏิบัติงานภายในห้องปฏิบัติการนี้มีความปลอดภัย ถึงอย่างไรก็ตามก็ยังจำเป็นต้องป้องกันตนเองในการปฏิบัติงานทุกครั้ง โดยการสวมหน้ากากป้องกันไอสารพิษและสวมถุงมือยางชนิดป้องกันสารเคมีอยู่ตลอดเวลาที่ปฏิบัติงาน

#### 4.5 การศึกษาการแยกโลหะเงินด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า

การศึกษาการแยกโลหะเงินด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า ได้ทำการทดลองแปรเปลี่ยนชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อหาสารละลายที่มีความเหมาะสมที่สุดในการทดลองโดยการศึกษาสารละลาย 3 ชนิด ได้แก่ กรดไนตริกร้อยละ 5, กรดซัลฟูริกร้อยละ 5 และสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตร้อยละ 2.4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แต่ใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดเดียวกัน คือใช้โลหะไททานเนียมเคลือบแพลทินัมทั้งขั้วแอโนดและคาโทด ปล่อยกระแสไฟฟ้าโดยให้ศักย์เริ่มต้นที่ 1.5 โวลท์ กำหนดเวลาในการทำการทดลอง 6 ชั่วโมง ผลการศึกษาเป็นดังนี้

##### 4.5.1 กรดไนตริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ในการทดลองใช้กรดไนตริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ผลการทดลองปรากฏว่ามีสารสีเทาเกาะบาง ๆ ที่ขั้วคาโทด และสารละลายขุ่น เนื่องจากโลหะเจืออะมัลกัมสามารถละลายได้เล็กน้อยในกรดไนตริก จากนั้นจึงนำสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดไปวิเคราะห์ธาตุด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ EDS ( Energy Dispersive Spectrometer) ประกอบกับเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) เพื่อวิเคราะห์ว่าสารประกอบนั้นประกอบด้วยธาตุใดบ้าง

ผลการวิเคราะห์พบว่าสารสีเทาที่เกิดขึ้นนั้นประกอบด้วย โปรทร้อยละ 7.14 เงินร้อยละ 60.60 ดีบุกร้อยละ 30.00 และทองแดงร้อยละ 2.26 แสดงดังตารางที่ 4.5 ซึ่งไม่สามารถทำให้ได้โลหะเงินเพียงอย่างเดียวหรือในปริมาณที่สูงมากพอที่ขั้วคาโทด น้ำหนักของโลหะเจืออะมัลกัมลดลงจาก 5.31 กรัม เป็น 5.16 กรัม ซึ่งเป็นผลจากการละลายของโลหะเจืออะมัลกัมในกรดไนตริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

##### 4.5.2 กรดซัลฟูริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ในการทดลองใช้ กรดซัลฟูริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ผลการทดลองปรากฏคล้ายกับการใช้กรดไนตริก คือมีสีเทาเกาะบาง ๆ ที่ขั้วคาโทด แต่เกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยกว่า เมื่อนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ พบว่าสารสีเทาที่เกิดขึ้นนั้นประกอบด้วย โปรทร้อยละ 33.84 เงินร้อยละ 6.48 ดีบุกร้อยละ 48.11 และทองแดงร้อยละ 11.57 แสดงดังตารางที่ 4.5 แต่มีความแตกต่างของโลหะเจืออะมัลกัมที่อยู่ในตะกั่วอาโนดภายหลังการทำการทดลองคือมีเกลือดีฟีมาเกาะอยู่ลักษณะคล้ายสารประกอบคอปเปอร์

ซัลเฟต ( $\text{CuSO}_4$ ) ทำให้น้ำหนักของโลหะเจืออะมัลกัมเพิ่มมากขึ้น จาก 4.94 กรัม เป็น 4.97 กรัม เมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง

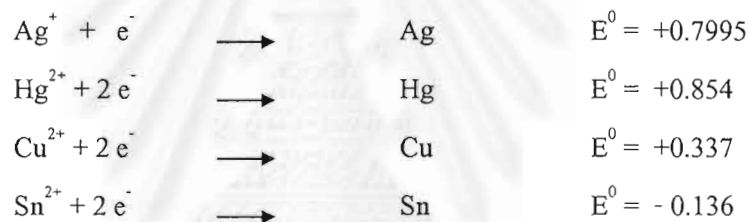
#### 4.5.3 สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตร้อยละ 2.4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ในการทดลองใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตร้อยละ 2.4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ผลการทดลองคือเกิดโลหะเงินเป็นเส้นเล็กเกาะที่ขั้วคาโทดทันทีที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า เมื่อตั้งทิ้งไว้วันขึ้น ปริมาณโลหะเงินก็เพิ่มมากขึ้น จึงต้องมีการดึงขั้วคาโทดขึ้นและแยกเอาโลหะเงินออกก่อน แล้วจึงจุ่มลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์อีกครั้ง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะไม่เกิดอะไรขึ้นที่ขั้วคาโทดอีก เมื่อนำโลหะเงินที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดไปทำให้แห้งและนำไปชั่งน้ำหนักพบว่าได้โลหะเงิน 2.38 กรัม และเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ พบว่าในโลหะเงินประกอบด้วย โปรทร้อยละ 0.05 เงินร้อยละ 98.85 ทองแดงร้อยละ 1.37 ส่วนดีบุกนั้นไม่พบ แสดงดังตารางที่ 4.5 และเมื่อนำโลหะเจืออะมัลกัมที่อยู่ในตะกร้าอานาคอนหลังสิ้นสุดการทดลองไปชั่งน้ำหนัก พบว่าน้ำหนักลดลงเล็กน้อย 0.20 กรัม จากเริ่มต้นใช้โลหะเจืออะมัลกัม 5.58 กรัม ลดลงเหลือ 5.38 กรัม ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั้นได้นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะด้วยเครื่อง AAS พบว่ามีปริมาณโลหะเงินเหลือเพียง 0.07 กรัม จากเริ่มต้นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตร้อยละ 24 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งมีโลหะเงิน 3.05 กรัม

ตารางที่ 4.5 ปริมาณธาตุที่ตรวจพบจากสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทด เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ EDS

ชนิดของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์	ปริมาณธาตุที่ตรวจพบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	โปรท	เงิน	ดีบุก	ทองแดง
กรดไนตริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร	7.14	60.60	30.00	2.26
กรดซัลฟูริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร	33.84	6.48	48.11	11.57
สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตร้อยละ 2.4 โดย น้ำหนักต่อปริมาตร	0.05	98.85	-	1.37

จากผลการทดลองทำให้คาดได้ว่าโลหะเงินที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดนั้น ส่วนใหญ่จะมาจากไอออนเงินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ส่วนโลหะเงินอะมัลกัมนั้นเกิดปฏิกิริยาน้อยมาก ถึงแม้ว่าโลหะเงินที่ได้จะมีปริมาณสูงแต่ก็มีโลหะชนิดอื่นเจือปนอยู่ด้วย อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการประยุกต์ใช้วิธีการทางเคมีไฟฟ้าเพื่อทำการแยกโลหะออกจากโลหะผสมในสารตัวอย่าง ควรมีการควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ณ ศักย์ที่เหมาะสม ในระหว่างการแยกสลายของสาร เพื่อพอกพูนบนขั้วไฟฟ้านั้น จะช่วยให้การวิเคราะห์มีความถูกต้องและไม่เกิดการพอกพูนของสารอื่นร่วมเข้ามา โดยอาจจะเพิ่มอุปกรณ์ควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า (โพเทนชิโอสแตท) เข้าไปในวงจรเซลล์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (อาโนด) ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (คาโทด) และขั้วไฟฟ้าช่วย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าระหว่างที่ดำเนินการวิเคราะห์ จะมีการปรับเลื่อนความต้านทานของวงจรอัตโนมัติ เพื่อปรับให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ตลอดการวิเคราะห์ การควบคุมศักย์ไฟฟ้าของโพเทนชิโอสแตทนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ที่ต้องการเกิดการพอกพูนของโลหะชนิดเดียวโดยแยกจากโลหะผสมตั้งต้น และเมื่อพิจารณาค่าศักย์มาตรฐานของโลหะแต่ละตัว ดังนี้



จะเห็นได้ว่าเงินและปรอทมีศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานใกล้เคียงกัน จึงทำให้มีปรอทปนอยู่ในสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดทุกครั้งที่ทำกรทดลอง จากการทดลองแปรเปลี่ยนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 3 ชนิด ทำให้ไม่สามารถเลือกสารละลายที่เหมาะสมสำหรับการแยกโลหะเงินด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า สาเหตุสำคัญที่ไม่สามารถแยกโลหะเงินด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าอาจเป็นไปได้ว่ามีปัจจัยอื่น ๆ ที่จำเป็นต้องทำการควบคุมให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมสำหรับโลหะเงินอะมัลกัม ซึ่งเป็นโลหะผสมที่มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนอันเป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญโลหะเงินอะมัลกัมที่นำมาใช้ในการรักษาทางทันตกรรม จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาหาแนวทางอื่นในการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเงินอะมัลกัมต่อไป

#### 4.6 การศึกษาการแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมี

##### 4.6.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมด้วยวิธีการใช้สารเคมี

การแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมีเป็นวิธีที่มีอยู่หลายขั้นตอน โดยมุ่งเน้นถึงผลการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดไนตริกซึ่งเป็นตัวทำละลาย ทำให้โลหะเจืออะมัลกัมแตกตัวอยู่ในรูปของไอออนของโลหะในสารละลาย ในการศึกษานี้ใช้โลหะเจืออะมัลกัมประมาณ 10 กรัมขึ้นไป ละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 500 มิลลิลิตร ระหว่างที่ทำการละลายต้องมีการให้ความร้อน และต้องทำในตู้ดูดควันเนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาจะเกิดควันที่น้ำตาลอมส้มอยู่ตลอดเวลา ซึ่งก็คือก๊าซประเภทออกไซด์ของไนโตรเจนมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนสูงและเป็นอันตราย จำเป็นต้องทำด้วยความระมัดระวังเป็นอย่างยิ่ง

จากปฏิกิริยาของโลหะดีบุกและกรดไนตริก ซึ่งดีบุกเป็นโลหะชนิดเดียวที่ไม่สามารถละลายได้ในกรดไนตริก และทำปฏิกิริยาเกิดเป็นของแข็งสีขาว โดยปกติจะมีสูตรเป็นไฮดรอกไซด์ของดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) หรือบางครั้งอาจเรียกว่ากรดเมทาซแดนนิก จึงสามารถกรองออกจากสารละลายที่ได้จากการละลายโลหะเจืออะมัลกัมในกรดไนตริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

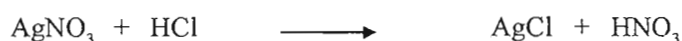
ก่อนที่จะนำสารละลายที่ได้มานั้นไปทำการแยกโลหะเงินโดยการตกตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์นั้นจำเป็นต้องศึกษาหาปริมาณโลหะเงินที่มีอยู่ในสารละลายก่อนเพื่อนำไปคำนวณประสิทธิภาพในการแยกโลหะเงิน ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ปริมาณโลหะเงินในสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

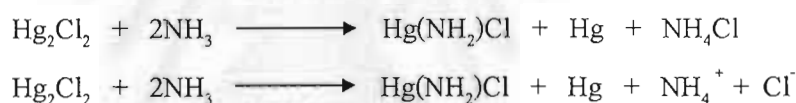
ความเข้มข้นกรดไนตริก (ร้อยละ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)	ปริมาณโลหะเงินในสารละลาย (กรัม /100 มิลลิลิตร)
25	1.0441 ± 0.0317
30	1.1702 ± 0.0855
35	1.0375 ± 0.0190
40	1.3325 ± 0.1271
45	1.1834 ± 0.0903



หลังจากนั้นจึงนำสารละลายในปริมาตร 100 มิลลิลิตร ไปทำการตกตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมลาร์ โดยสามารถคำนวณปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาได้ (ดูรายละเอียดวิธีการคำนวณในภาคผนวก ง)



สามารถคำนวณปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่ใช้ในตอนเริ่มต้นได้ คือประมาณ 20 มิลลิลิตร และต้องปล่อยกรดไฮโดรคลอริกอีกจนกว่าตะกอนไม่เกิดเพิ่มขึ้นอีก ตะกอนที่ได้มีสีขาว เมื่อล้างตะกอนหลาย ๆ ครั้งด้วยน้ำกลั่นแล้ว ต้องนำไปละลายในสารละลายแอมโมเนีย เพื่อแยกเอาตะกอนขาวของเมอร์คิวรัสคลอไรด์ออกจากตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ซึ่งมีสีขาวเหมือนกัน โดยซิลเวอร์คลอไรด์สามารถละลายได้ในสารละลายแอมโมเนียเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อน ส่วนเมอร์คิวรัสคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับสารละลายแอมโมเนียเปลี่ยนเป็นสีดำ เนื่องจากเกิดเป็นอะมิโน-เมอร์คิวรัสคลอไรด์ และผลเฉลยของปรอท ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ



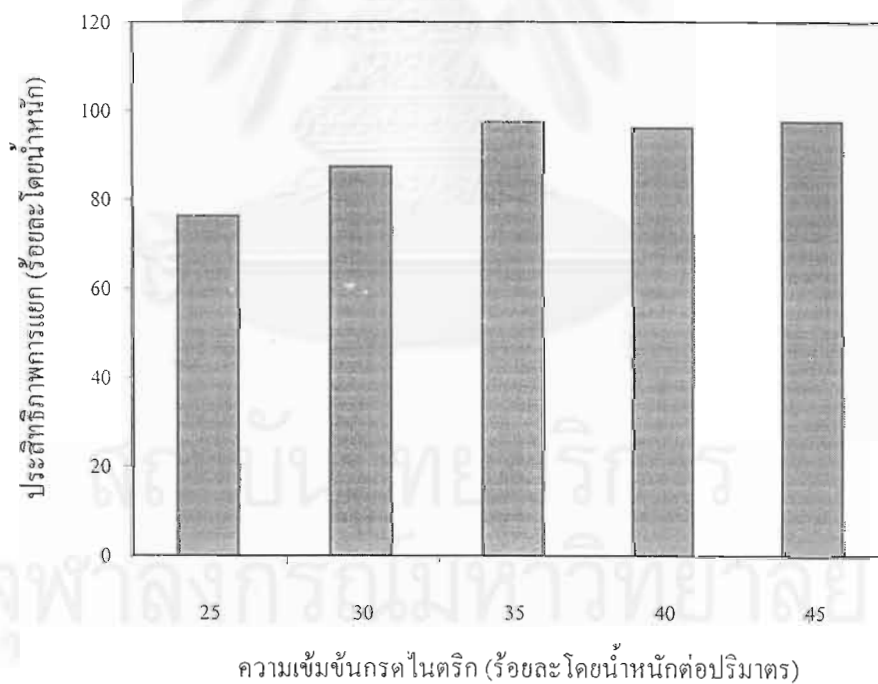
สารละลายที่เหลืออยู่เมื่อถูกปรับสภาพให้เป็นกรดอีกครั้งด้วยกรดไนตริกพบว่า จะได้ตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์กลับคืนมา นำตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ไปรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปโลหะเงินด้วยผงสังกะสี ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



จากปฏิกิริยาเมื่อเติมผงสังกะสีแล้ว ตะกอนสีขาวของซิลเวอร์คลอไรด์จะเปลี่ยนเป็นสีเทาของโลหะเงินทันที เมื่อนำผงโลหะเงินที่ได้ไปหลอมและนำไปชั่งน้ำหนักโลหะเงินที่ได้สามารถคำนวณกลับเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของประสิทธิภาพการแยกโลหะเงินออกจากสารละลาย 100 มิลลิลิตร แสดงผลดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.7 น้ำหนักโลหะเงินที่ได้จากการแยกโลหะเงินที่ความเข้มข้นกรดไนตริกต่าง ๆ และประสิทธิภาพในการแยก

ความเข้มข้นกรดไนตริก (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร)	น้ำหนักโลหะเงินที่หลอมได้ (กรัม)	ประสิทธิภาพในการแยกโลหะเงิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
25	$0.7964 \pm 0.0287$	76.28
30	$1.0222 \pm 0.0259$	87.35
35	$1.0109 \pm 0.0053$	97.44
40	$1.2800 \pm 0.0652$	96.06
45	$1.1566 \pm 0.0086$	97.73



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการแยกโลหะเงินที่ความเข้มข้นกรดไนตริกต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริก จะทำให้ประสิทธิภาพของการแยกโลหะเงินเพิ่มมากขึ้น โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 97.73 โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกร้อยละ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในขณะที่ผลของประสิทธิภาพต่ำสุดคือร้อยละ 76.28 โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นกรดไนตริกร้อยละ 25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สังเกตเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการแยกโลหะเงินจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริก จนเริ่มคงที่ที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกร้อยละ 35 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

จากผลการทดลอง นำไปวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวเพื่อทดสอบความแปรปรวนของประสิทธิภาพในการแยกโลหะเงินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกโลหะเงินในการทดลองต่าง ๆ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยเพื่อหาว่าประสิทธิภาพในการทดลองคู่ใดที่แตกต่างกัน พบว่าแตกต่างกันทุกค่า ยกเว้นที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกร้อยละ 35, 40, และ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ไม่แตกต่างกัน แสดงว่าการทดลองที่ความเข้มข้นของกรดไนตริก ร้อยละ 35, 40 และ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ประสิทธิภาพในการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมที่ระดับเดียวกัน สามารถเลือกความเข้มข้นของกรดไนตริกที่สามารถให้ประสิทธิภาพสูงและไม่เป็นการสิ้นเปลือง โดยแยกโลหะเงินโดยใช้ความเข้มข้นของกรดไนตริกที่ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแยกโลหะเงินสูงถึงร้อยละ 97.44 โดยน้ำหนัก

#### 4.6.2 การหาความบริสุทธิ์ของโลหะเงิน

จากการแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมี โดยทำการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดไนตริก ทำให้ได้โลหะเงินในรูปของผงโลหะเงิน (cement silver) จำเป็นต้องนำโลหะเงินนี้ไปหลอมให้เป็นเม็ดโลหะเงิน แล้วจึงนำไปหาความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ได้ด้วยเครื่อง AAS เพื่อหาปริมาณสารมลทินที่อยู่ในโลหะเงิน ซึ่งได้แก่ ดีบุก ทองแดง ปรอท และสังกะสี โดยเปรียบเทียบกับโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม พบว่าจะมีปริมาณดีบุกสูงกว่าโลหะชนิดอื่น ๆ ดังผลที่แสดงในตารางที่ 4.8 เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว มีปริมาณที่เหมือนกันและแตกต่างกับโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม

### 1. ผลการตรวจความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ได้ โดยคำนวณจากปริมาณดีบุกในโลหะเงิน

การแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมี ทำให้มีดีบุกเจือปนอยู่ในโลหะเงินที่ได้ร้อยละ  $1.515 \times 10^{-3}$  ถึง  $7.503 \times 10^{-3}$  โดยน้ำหนัก โดยตรวจพบว่าที่ความเข้มข้นของกรดต่างกัน จะมีปริมาณดีบุกเจือปนอยู่ในโลหะเงินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และแตกต่างจากโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม ซึ่งมีดีบุกเจือปนอยู่  $5.264 \times 10^{-3}$  ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยที่ความเข้มข้นของกรดไนตริก 25 และ 35 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัมมีปริมาณดีบุกไม่แตกต่าง และที่ความเข้มข้นของกรดไนตริก 30, 40 และ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัมมีปริมาณดีบุกไม่แตกต่างกัน

### 2. ผลการตรวจความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ได้ โดยคำนวณจากปริมาณทองแดงในโลหะเงิน

การแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมี ทำให้มีทองแดงเจือปนอยู่ในโลหะเงินที่ได้ร้อยละ  $0.140 \times 10^{-3}$  ถึง  $3.151 \times 10^{-3}$  โดยน้ำหนัก โดยตรวจพบว่าที่ความเข้มข้นของกรดต่างกัน จะมีปริมาณทองแดงเจือปนอยู่ในโลหะเงินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และแตกต่างจากโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม ซึ่งมีทองแดงเจือปนอยู่ร้อยละ  $3.298 \times 10^{-3}$  โดยน้ำหนัก โดยที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกร้อยละ 25, 30, 40 และ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีปริมาณทองแดงไม่แตกต่างกัน และที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกร้อยละ 35 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัมมีปริมาณทองแดงไม่แตกต่างกัน

### 3. ผลการตรวจความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ได้ โดยคำนวณจากปริมาณสังกะสีในโลหะเงิน

การแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมี ทำให้มีสังกะสีเจือปนอยู่ในโลหะเงินที่ได้ร้อยละ  $0.3959 \times 10^{-3}$  ถึง  $2.461 \times 10^{-3}$  โดยน้ำหนัก โดยตรวจพบว่าที่ความเข้มข้นของกรดต่างกัน จะมีปริมาณสังกะสีเจือปนอยู่ในโลหะเงินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และแตกต่างจากโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัมซึ่งไม่มีสังกะสีเจือปนอยู่เลย โดยที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกร้อยละ 25, 35 และ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีปริมาณสังกะสีไม่แตกต่างกัน และที่ความเข้มข้นของกรดไนตริก 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีปริมาณสังกะสีไม่แตกต่างกัน

#### 4. ผลการตรวจความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ได้ โดยคำนวณจากปริมาณปรอทในโลหะเงิน

การแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมี ทำให้มีปรอทเจือปนอยู่ในโลหะเงินที่ได้อ้อยละ  $0.2021 \times 10^{-3}$  ถึง  $0.2747 \times 10^{-3}$  โดยน้ำหนัก โดยตรวจพบว่าที่ความเข้มข้นของกรดต่างกัน จะมีปริมาณปรอทเจือปนอยู่ในโลหะเงินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และแตกต่างจากโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม ซึ่งมีปรอทเจือปนอยู่ร้อยละ  $0.1735 \times 10^{-3}$  โดยน้ำหนัก โดยที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกร้อยละ 40 และ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัมมีปริมาณปรอทไม่แตกต่างกัน และที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกร้อยละ 25, 30, 40 และ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรมีปริมาณปรอทไม่แตกต่างกัน และที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกร้อยละ 25, 30, 35 และ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรมีปริมาณปรอทไม่แตกต่างกัน

จากปริมาณสารมลทินของปรอทที่วิเคราะห์ด้วย AAS คือ ดีบุก ทองแดง สังกะสีและปรอทที่ได้จากการแยกโลหะเงินที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกต่าง ๆ นำมาคำนวณปริมาณสารมลทินทั้งหมดได้ผลดังตารางที่ 4.8 และแสดงดังรูปที่ 4.4 และคำนวณความบริสุทธิ์ของโลหะเงินได้ผลดังตารางที่ 4.9 แสดงดังรูปที่ 4.5

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่าโลหะเงินที่ได้จากการแยกด้วยวิธีการใช้สารเคมีที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกต่างๆ มีความบริสุทธิ์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและต่างจากโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม

ตารางที่ 4.8 ปริมาณโลหะมลทินในโลหะเงินที่ได้จากการแยกโลหะเงินที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกต่าง ๆ ซึ่งตรวจสอบสารมลทินด้วย AAS

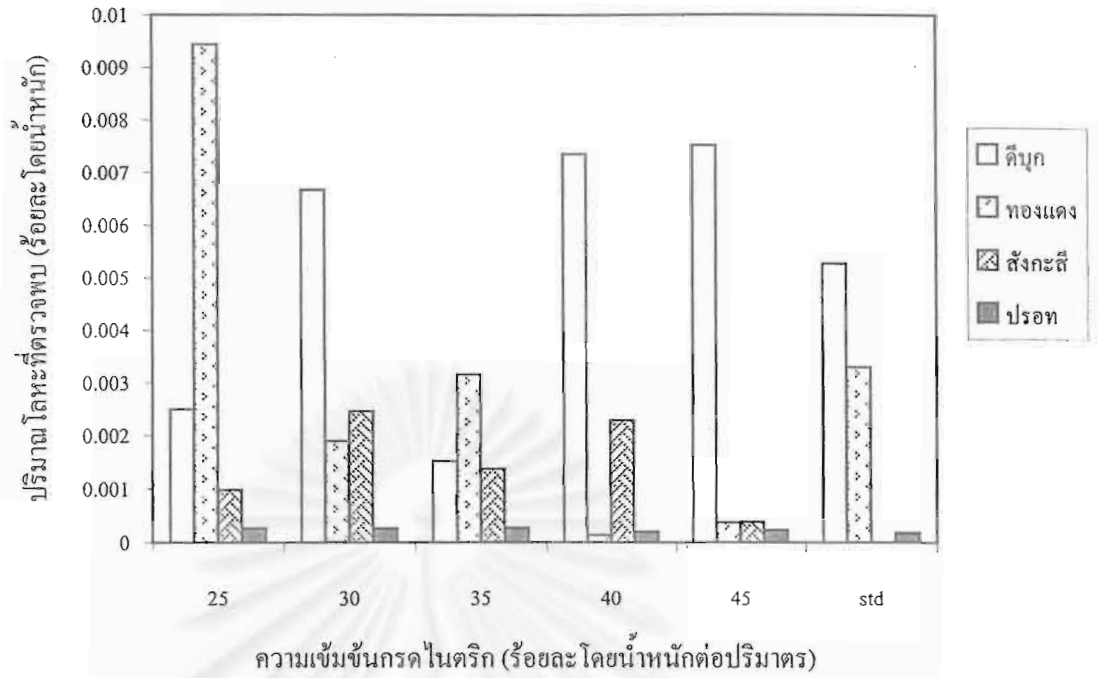
ความเข้มข้นกรดไนตริก (% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)	ปริมาณโลหะที่ตรวจพบ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)			
	ดีบุก	ทองแดง	สังกะสี	ปรอท
25	<sup>a</sup> 2.497 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>a</sup> 0.372 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>ab</sup> 0.980 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>bc</sup> 0.2660 x 10 <sup>-3</sup>
30	<sup>b</sup> 6.662 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>a</sup> 0.189 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>c</sup> 2.461 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>bc</sup> 0.2619 x 10 <sup>-3</sup>
35	<sup>a</sup> 1.515 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>b</sup> 3.151 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>bc</sup> 1.371 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>c</sup> 0.2747 x 10 <sup>-3</sup>
40	<sup>b</sup> 7.326 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>a</sup> 0.140 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>c</sup> 2.285 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>ab</sup> 0.2021 x 10 <sup>-3</sup>
45	<sup>b</sup> 7.503 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>a</sup> 0.375 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>ab</sup> 0.396 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>abc</sup> 0.2306 x 10 <sup>-3</sup>
โลหะเงินที่ใช้ในการผลิต ผงอะมัลกัม	<sup>ab</sup> 5.264 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>b</sup> 3.298 x 10 <sup>-3</sup>	<sup>a</sup> 0	<sup>a</sup> 0.1727 x 10 <sup>-3</sup>

หมายเหตุ : ด้วยภาษาอังกฤษ (superscript) ที่แตกต่างกัน แสดงค่าเฉลี่ยในคอลัมน์นี้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P < 0.05)

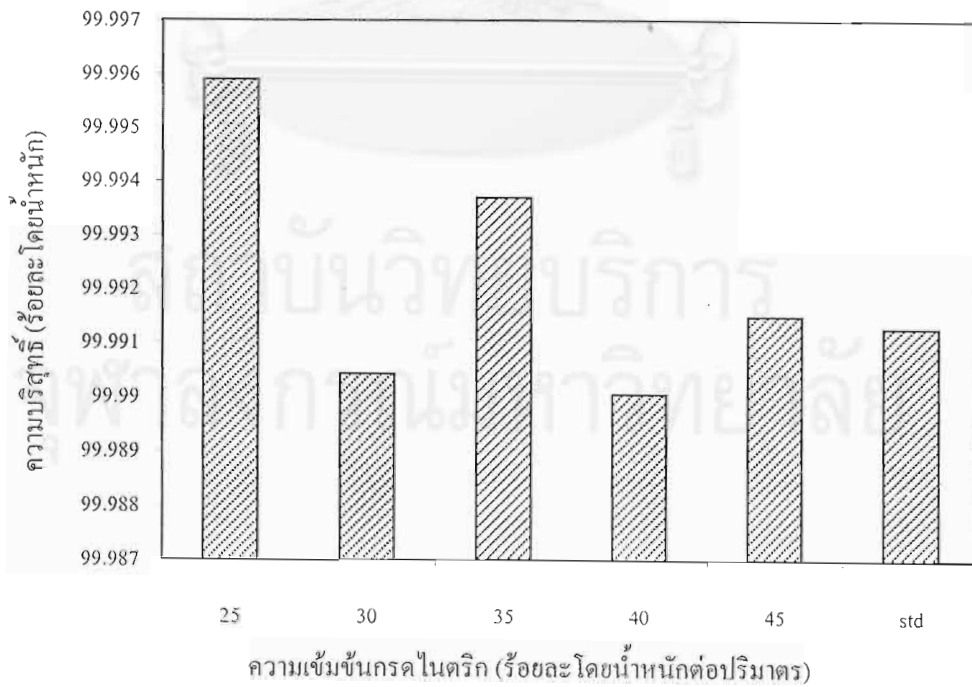
ตารางที่ 4.9 ความบริสุทธิ์ของโลหะเงินจากการแยกโลหะเงินที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกต่าง ๆ ซึ่งตรวจสอบสารมลทินด้วย AAS

ความเข้มข้นกรดไนตริก (% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)	ความบริสุทธิ์ของโลหะเงิน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)
25	<sup>b</sup> 99.99589 ± 0.00284
30	<sup>a</sup> 99.99042 ± 0.00100
35	<sup>ab</sup> 99.99369 ± 0.00143
40	<sup>a</sup> 99.99005 ± 0.00396
45	<sup>ab</sup> 99.99149 ± 0.00265
โลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม	<sup>ab</sup> 99.99127 ± 0.00121

หมายเหตุ : ด้วยภาษาอังกฤษ (superscript) ที่แตกต่างกัน แสดงค่าเฉลี่ยในคอลัมน์นี้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P < 0.05)



รูปที่ 4.5 ปริมาณโลหะมอลทินในโลหะเงินที่ได้จากการแยกที่ความเข้มข้นกรดไนตริกต่างๆและโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม



รูปที่ 4.6 ความบริสุทธิ์ของโลหะเงินจากการแยกที่ความเข้มข้นกรดไนตริกต่างๆและโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม

ผลการทดสอบทางสถิติโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวเพื่อทดสอบความแปรปรวนของความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ได้จากการแยกโลหะเงินที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกความเข้มข้นต่าง ๆ และโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัมที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าความบริสุทธิ์ของโลหะเงินทุกค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยเพื่อหาว่าความบริสุทธิ์ในโลหะเงินคู่ใดที่แตกต่างกัน พบว่าสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มของค่าเฉลี่ยที่ไม่แตกต่างกัน กลุ่มแรกคือที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกร้อยละ 30, 35, 40, และ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัมมีความบริสุทธิ์ของโลหะเงินในระดับเดียวกัน และกลุ่มที่ 2 คือที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกร้อยละ 25, 35 และ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม มีความบริสุทธิ์ของโลหะเงินในระดับเดียวกัน แต่ทั้งนี้มีความแตกต่างระหว่างความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ได้จากการแยกที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกต่างๆ

จากผลการวิเคราะห์ไม่ว่าจะพิจารณาข้อมูลในกลุ่มใด โลหะเงินที่ได้จากการแยกด้วยวิธีการใช้สารเคมีที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกต่างๆ จะมีความบริสุทธิ์อยู่ในระดับเดียวกันกับความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม เมื่อพิจารณาร่วมกับประสิทธิภาพในการแยกโลหะเงินที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกต่างๆ พบว่าที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกร้อยละ 35 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแยกโลหะเงินร้อยละ 97.44 โดยน้ำหนัก และอยู่ในระดับเดียวกับประสิทธิภาพของกรดไนตริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 และ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการทำการทดลอง โลหะเงินที่ได้จากการแยกที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกร้อยละ 35 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จึงเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายทางด้านสารเคมีต่ำกว่าการทดลองที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกร้อยละ 40 และ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

#### 4.7 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการทดลอง

จากผลการทดลองเมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดปรอทและการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัม จึงนำมาศึกษาค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า ด้านสารเคมี โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้ คำนวณค่าไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมด้วยการให้ความร้อนและคำนวณค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าและด้านสารเคมีที่ต้องใช้ในกระบวนการแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมี (รายละเอียดการคำนวณอยู่ในภาคผนวก จ)



#### 4.7.1 ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าในการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมด้วยการให้ความร้อน

ในการกำจัดปรอทด้วยการให้ความร้อน อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้คือ ตู้ดูดควันและเครื่องกำจัดไอสารพิษ ป้อนสำหรับทำสุญญากาศ เครื่องให้ความร้อนแก่โลหะเจืออะมัลกัม เครื่องทำน้ำหล่อเย็นสำหรับอุปกรณ์ควบแน่น เครื่องควบคุมอุณหภูมิในห้อง ดังนั้นการกำจัดปรอทด้วยการให้ความร้อนมีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าทั้งหมดเป็นเงิน 99.70 บาท ต่อโลหะเจืออะมัลกัม 1 กรัม

#### 4.7.2 ค่าใช้จ่ายในการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้ว

ในการแยกโลหะเงิน อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องใช้คือ เครื่องให้ความร้อนและเครื่องกวน ตู้ดูดควันและเครื่องกำจัดไอสารพิษ เครื่องควบคุมอุณหภูมิในห้อง ดังนั้นมีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าทั้งหมดเป็นเงิน 93.20 บาท

ค่าสารเคมีได้แก่ กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก สารละลายแอมโมเนีย และบอริก เอซิด ดังนั้นค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีทั้งหมดเป็นเงิน 15.57 บาท

รวมค่าใช้จ่ายในการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมทั้งหมดเป็นเงิน 108.77 บาท ต่อโลหะเงินที่ได้มาจากการแยก 1 กรัม ทั้งนี้ยังไม่ได้รวมค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะจากการทดลอง ครุภัณฑ์พื้นฐาน ภาชนะใส่ปรอท และกำลังคน เมื่อเปรียบเทียบกับราคาโลหะเงินปัจจุบันซึ่งมีราคา 7 บาท ต่อโลหะเงิน 1 กรัม จึงไม่คุ้มทุนในการผลิต แต่เมื่อพิจารณาในด้านการรักษาสภาพแวดล้อม วิธีการนี้จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการกำจัดของเสียอันตรายและสามารถแยกโลหะเงินเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษา สามารถกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมได้โดยวิธีการให้ความร้อนและสามารถแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้วด้วยวิธีการใช้สารเคมี โดยโลหะเงินที่ได้มีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99.99 โดยน้ำหนัก ซึ่งสรุปเป็นข้อ ๆ ดังนี้

1. สภาพที่เหมาะสมในการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมด้วยการให้ความร้อนคือที่ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดันสูญญากาศ เป็นเวลา 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ให้ผลการกำจัดปรอทแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่เวลา 4 ชั่วโมง สามารถกำจัดปรอทได้ปริมาณสูงสุดคือ มีประสิทธิภาพในการกำจัดถึงร้อยละ 88.01 โดยน้ำหนัก

ปริมาณปรอทในอากาศภายในห้องปฏิบัติการที่ตรวจวัดได้ ไม่เกินมาตรฐานปรอทในอากาศ สามารถสรุปได้ว่ามีความปลอดภัยในการปฏิบัติงานภายในห้องปฏิบัติการ

2. การแยกโลหะเงินด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า ทำการศึกษาผลของการใช้สารละลายอิเล็กโตรไลต์ 3 ชนิดเพื่อหาสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่เหมาะสม พบว่าไม่ประสบผลสำเร็จสำหรับวิธีการนี้ โดยมีผลดังนี้

2.1 ใช้กรดไนตริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารละลายอิเล็กโตรไลต์

เมื่อใช้กรดไนตริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ส่งผลให้โลหะอะมัลกัมสามารถละลายได้บางส่วนแต่น้อยมาก สารประกอบที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดเป็นสารประกอบที่มีโลหะทั้ง 4 ชนิด คือ เงิน ดีบุก ทองแดง และปรอท ซึ่งไม่สามารถแยกโลหะเงินให้ได้ปริมาณสูงพอ

## 2.2 ใช้กรดซัลฟูริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เมื่อใช้กรดซัลฟูริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เกิดสารประกอบคอปเปอร์ซัลเฟตที่ผิวของโลหะเงินเล็กน้อย สารประกอบที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดเป็นสารประกอบชนิดเดียวกันกับที่เกิดขึ้นเมื่อใช้กรดไนตริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แต่ตรวจพบในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ซึ่งมีในปริมาณที่สูงกว่า จึงไม่สามารถให้ผลการแยกโลหะเงินให้ได้ปริมาณสูงพอ

## 2.3 ใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรดร้อยละ 2.4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เมื่อใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรดร้อยละ 2.4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่าเกิดโลหะเงินขึ้นที่ขั้วคาโทดเป็นปริมาณมาก และมีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 98.85 โดยน้ำหนัก แต่โลหะเงินที่เกิดขึ้นนั้นมาจากไอออนเงินในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด เนื่องจากโลหะเงินเกิดจากการสีกกร่อนน้อยมาก และปริมาณโลหะเงินในสารละลายก็ลดลงเป็นจำนวนมาก

จากผลการทดลองใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 3 ชนิด สรุปว่าไม่สามารถทำการแยกโลหะเงินด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 3 ชนิด เนื่องจากโลหะเงินที่ได้มีโลหะชนิดอื่นปนอยู่ด้วยเสมอ

3. การแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมี โดยประสิทธิภาพในการแยกจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรด และมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้กรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ร้อยละ 97.73 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพต่ำสุดเมื่อใช้กรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร คือร้อยละ 76.28 โดยน้ำหนัก และเมื่อใช้ความเข้มข้นกรดไนตริกร้อยละ 35, 40 และ 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีประสิทธิภาพในการแยกโลหะเงินออกจากสารละลายในระดับที่ไม่แตกต่างกัน

4. การหาความบริสุทธิ์ของโลหะเงิน การแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมี โดยทำการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดไนตริก ซึ่งใช้เป็นตัวทำละลาย เริ่มต้นที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 - 45 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำให้ได้โลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าร้อยละ 99.99 โดยน้ำหนัก ความบริสุทธิ์สูงสุดที่ได้คือร้อยละ 99.99589 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้กรดไนตริก

เข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความบริสุทธิ์ต่ำสุดที่ได้คือร้อยละ 99.99005 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้กรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อทำการเปรียบเทียบความบริสุทธิ์กับโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัม ซึ่งมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99127 โดยน้ำหนัก สามารถสรุปได้ว่าการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมด้วยวิธีการใช้สารเคมีให้ความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่สูงในระดับเดียวกัน

การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัม โดยวิธีการให้ความร้อนซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดถึงร้อยละ 88.01 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำมาแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมี ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแยกถึงร้อยละ 97.44 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้กรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 35 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และโลหะเงินที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงกว่าร้อยละ 99.99 โดยน้ำหนัก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัม ไม่สามารถกำจัดปรอทออกได้ทั้งหมด เนื่องจากการรวมตัวกันของโลหะผสมชนิดนี้แบ่งกันเป็นเฟส ส่วนที่อยู่ภายนอกจะได้รับความร้อนแล้วเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอปรอทได้ดีภายใต้สภาวะที่ทำการทดลอง ส่วนเฟสที่อยู่ภายในจึงไม่สามารถถูกกำจัด ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับขนาดของโลหะเจือที่จะนำมาทำการกำจัดปรอท

การใช้ปั๊มสุญญากาศเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีการสูญเสียโลหะเจืออะมัลกัมบางส่วน เนื่องจากถ้าใช้ชิ้นส่วนโลหะเจืออะมัลกัมที่มีขนาดเล็กมากจนถึงเป็นผง ซึ่งจะมีน้ำหนักเบามาก เมื่อทำการเปิดปั๊ม โลหะเจืออะมัลกัมบางส่วนที่มีน้ำหนักเบาอาจถูกดูดออกจากภาชนะไปปะปนอยู่กับปรอทที่ได้จากการควบแน่นอยู่ในภาชนะรองรับ และควรมีการเพิ่มปริมาณโลหะเจืออะมัลกัมที่ต้องการกำจัดปรอทเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณการกำจัดปรอทในแต่ละครั้ง เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า

2. ปรอทที่ได้จากการกำจัดออกจากโลหะเจืออะมัลกัม สามารถนำไปใช้งานได้อีกครั้ง ซึ่งต้องนำไปผ่านกระบวนการทำปรอทให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นในสภาวะสุญญากาศ 3 ครั้งต่อเนื่องกัน ตามกรรมวิธีของนันทนิตย์ วานิชชีวะ (2540) ซึ่งจะเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และป้องกันการปนเปื้อนของปรอทออกสู่สภาพแวดล้อม

3. การแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้วด้วยวิธีการใช้สารเคมี มีขั้นตอนหลายขั้นตอน ดังนั้นควรมีการเพิ่มปริมาณโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้วในแต่ละครั้งที่ทำการแยกโลหะเงิน เพื่อศึกษาแนวทางในการลดค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการ อีกทั้งยังทำให้ได้โลหะเงินเพิ่มมากขึ้น

4. ในขบวนการแยกโลหะเงินด้วยวิธีการใช้สารเคมีนั้น ทำให้ได้ตะกอนของดีบุกออกไซด์ สามารถนำไปศึกษาเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง เพื่อเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการทดลองด้วยเช่นกัน

5. ตะกอนของเมอร์คิวรีซัลไฟด์เป็นสารประกอบของปรอท ดังนั้นจึงอาจก่อให้เกิดอันตรายอันเนื่องมาจากมลพิษของปรอท จำเป็นต้องมีการบำบัดโดยการนำกากตะกอนมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นเมอร์คิวรีซัลไฟด์ แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (solidification) ด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2531)

6. สารละลายที่เหลือจากการตกตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์เป็นสารละลายกรด ที่มีทองแดงละลายอยู่ สามารถนำไปแยกทองแดงเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้งด้วยวิธีการแยกสลายด้วยไฟฟ้า (Dunning, 1978)

7. ในขั้นตอนการรีดิวซ์ซิลเวอร์คลอไรด์ให้เป็นโลหะเงินนั้น สามารถใช้ผงเหล็กแทนผงสังกะสีได้ จึงควรมีการศึกษาผลการใช้ผงเหล็กเนื่องจากการใช้ผงเหล็กนั้นถึงแม้จะใช้นานกว่าการใช้ผงสังกะสี แต่จะทำให้เกิดความเป็นพิษอันเนื่องมาจากของเสียที่เกิดขึ้นน้อยกว่าการใช้ผงสังกะสี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กองสารเสนาเทศน์. 2530. สารความรู้เกี่ยวกับเงิน. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 113: 15-20.
- ขนิษฐา ทวีถาวรสวัสดิ์. 2539. การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยวิธีการตกตะกอนผลึกทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชัชรี สุชาติล้ำพงศ์ และคณะ. 2539. รายงานการวิจัยและพัฒนากการผลิตผงโลหะเจือเพื่อการบูรณะฟัน “อะมัลกัม”. คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. (อัคราณา)
- ชัชรี สุชาติล้ำพงศ์ และคณะ. 2541. โครงการทำปรอทให้บริสุทธิ์. คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. (อัคราณา)
- ชัยวัฒน์ เจนวาณิชชัย. 2530. หลักเคมี 2 (ฉบับปรับปรุง). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
- ณรงค์ เตมีย์รัชต์. 2533. การสกัดเงินจากน้ำยาล้างรูปที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เดชนา ชูตินรา. 2527. ประโยชน์ของเงิน. ข่าวสารการธรณี ปีที่ 29 ฉบับที่ 2 (กุมภาพันธ์) : 47-49.
- นันทนิตย์ วานิชชีวะ. 2540. การทำปรอทจากอุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติให้บริสุทธิ์และผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมภายในห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทิพวรรณ แผ้วสกุล. 2540. หนังสือเสริมสร้างความรู้ด้านสิ่งแวดล้อม. สำนักการศึกษาความสะอาด กรุงเทพมหานคร.
- เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. 2539. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์.
- มาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม, กอง. ปรอท. กรุงเทพมหานคร : กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (อัคราณา)

- โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2531. ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดวิธีการเก็บ  
ทำลายฤทธิ์ กำจัด ฟัง ทิ้ง เคลื่อนย้ายและการขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว(ฉบับ  
ที่ 1) พ.ศ. 2531.
- สุนทรี่ สิงหนุตรา. 2541. พิษรอบตัว. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : เอ ที แอนด์ เอ็น อินเตอร์เนชั่น  
เนลจำกัด
- สุรางค์ อนุกุล. 2538. ปฏิบัติการเคมีคุณภาพวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 3. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์.
- ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์. 2537. ปฏิบัติการเคมีปริมาณวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Aslam, S. and Walker O.L. 1982. Recycling of Mercury and Silver from COD Tests. **Water  
Pollution Control Federal**. 54 : 1148-1151. อ้างถึงในขนิษฐา ทวีถาวรสวัสดิ์. การ  
กำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยวิธีการตกตะกอนผลึกทางเคมี.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม  
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

#### ภาษาอังกฤษ

- Ammen, C.W. 1984. **Recovery and Refining of Precious Metal**. New York: Van  
Nostrand Reinhold Company Inc. 99-112.
- Chambers, D.H. and Dunning, B.W. Jr. 1980. Silver Recovery from Aircraft Scrap.  
**U.S.Bureau of Mines RI 8777**.
- Dunning, B. W. Jr. and Harry, C. 1978. Process of Recovering Silver Copper and Stainless  
steel from Silver Brazed Stainless steel Sections. **U.S. Patent No. 4,090,935**. May.  
23.
- Kestel, U. and Pfarrer, K. 1996. Dissolution of Heavy Metal from Amalgam Separators in  
Dental Units by the Influence of Different Disinfectant. [On-line]. **Vomwasser**, 87,  
291-303. Abstract from : DIALOG File 144 : pascal
- Mendoza, S. and Kamata, S. 1996. Silver Extraction for Pollution Control of Photographic  
Fixing Solution with Tetramethylthiuram Disulfide. **Bulletin of the Chemical  
Society of Japan** 69 : 3499-3504.

Pahlman, J.E., Rhoades, C.A. and Chamberlain, P.G. 1987, Dual Leaching Method for Recovering Silver and Manganese from Domestic Manganiferous Silver Deposits. U.S.Bureau of mines RI 9126.

Sandberg, R.G. and Huatt, J.L. 1986. Recovery of Silver Gold and Lead from Complex Sulfide Ore Using Ferric Chloride Thiourea and Brine Leach Solution. U.S.Bureau of mines RI 9022.

Tan, K.G. and Dinardo, O. 1992 Electrolytic Hydrometallurgical Silver Refining. U.S. Patent No. 5,135,624. Aug. 4.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

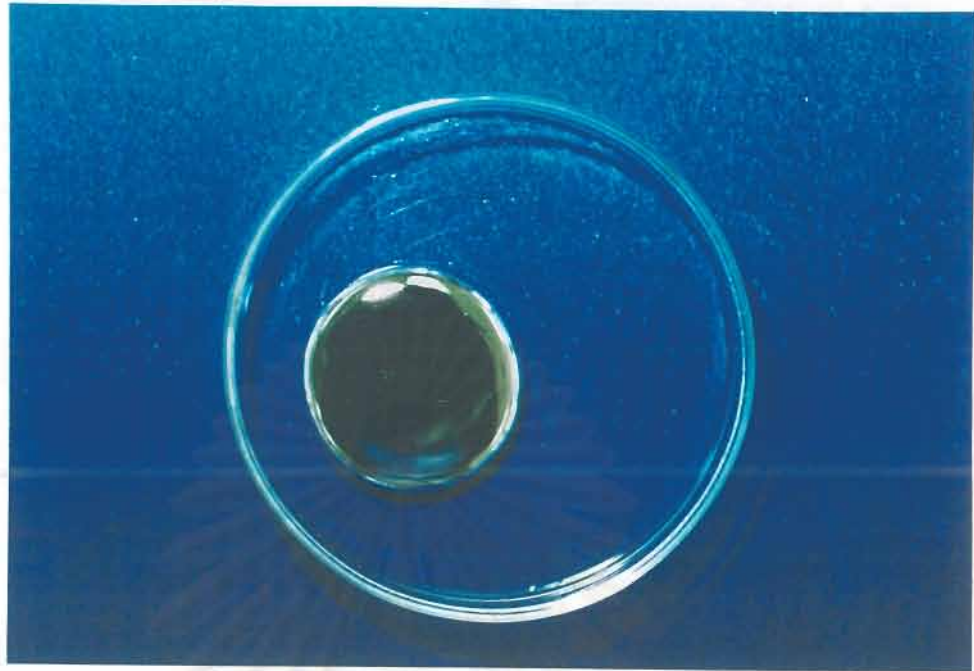
ภาคผนวก ก เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ 1 อุปกรณ์ชุดกำจัดปรอทด้วยการให้ความร้อน



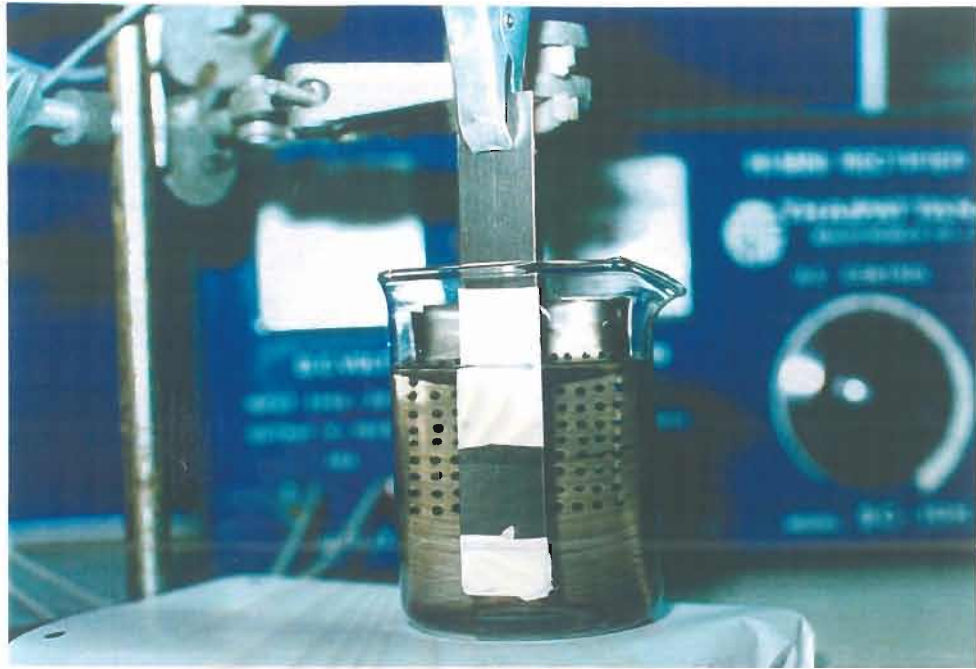
รูปที่ 2 โลหะเจืออะมัลกัมก่อนและหลังการกำจัดปรอท



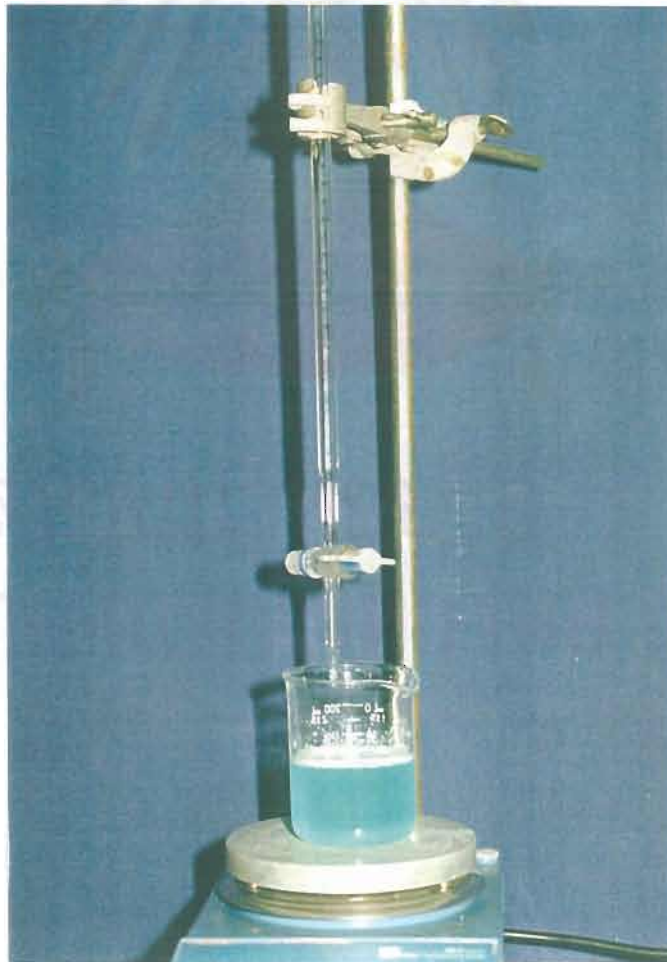
รูปที่ 3 โปรทที่ได้จากการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัม



รูปที่ 4 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาตัดแปลงจากแผ่นไททานเนียมเคลือบแพลทินัม



รูปที่ 5 อุปกรณ์ในการแยกโลหะเงินด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า



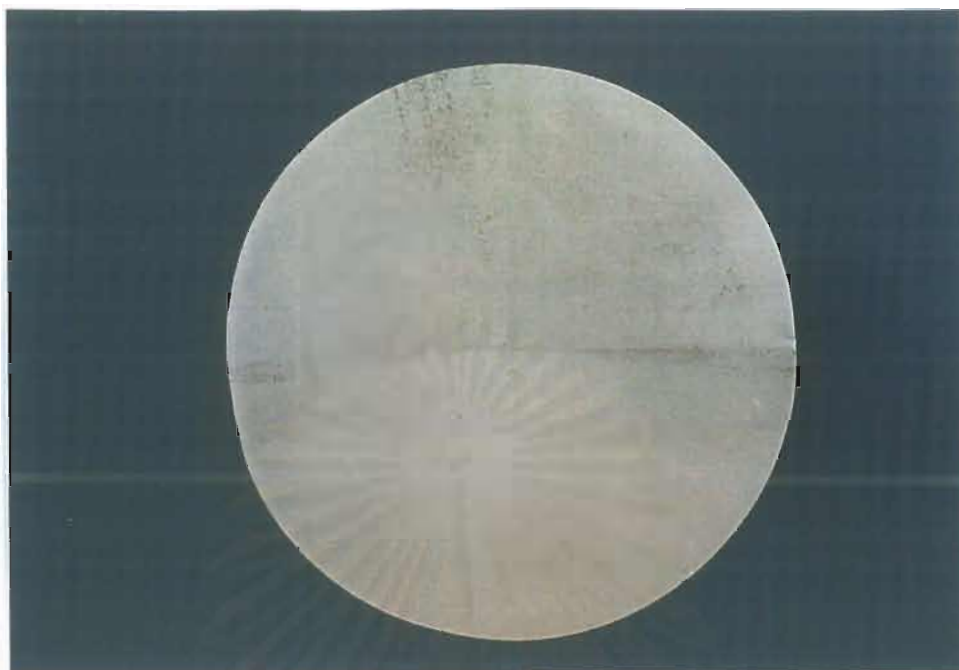
รูปที่ 6 อุปกรณ์ในการตกตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์



รูปที่ 7 ออกไซด์ของดีบุก



รูปที่ 8 สารละลายที่เหลือจากการตกตะกอนซิลเวอร์คอลลอยด์



รูปที่ 9 เมอร์คิวรัสคลอไรด์



รูปที่ 10 พงโลหะเงิน (cement silver)



รูปที่ 11 เม็ดโลหะเงิน ( silver metal )



รูปที่ 12 เบ้าที่ใช้ในการหลอมโลหะเงิน

## ภาคผนวก ข. ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ปริมาณโลหะในโลหะเจืออะมัลกัมเริ่มต้น

ชนิดของโลหะ	ปริมาณที่ตรวจพบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ปรอท	37.11	49.16	42.05	42.77	6.06
เงิน	29.31	27.25	28.35	28.30	1.03
ดีบุก	16.88	16.44	16.52	16.61	0.23
ทองแดง	6.78	6.63	6.97	6.79	0.17

ตารางที่ 2 ปริมาณโลหะในโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ชนิดของโลหะ	ปริมาณที่ตรวจพบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ปรอท	10.89	9.406	10.58	10.29	0.79
เงิน	51.52	52.35	50.85	51.57	0.75
ดีบุก	25.22	25.80	25.24	25.42	0.33
ทองแดง	11.65	11.68	11.93	11.75	0.15



ตารางที่ 3 ผลการกำจัดปรอทที่เวลาต่าง ๆ

เวลาที่ทำการ ทดลอง( ชั่วโมง )	ครั้งที่	น้ำหนักโลหะเจือมัลกัม		น้ำหนักปรอท ที่ถูกกำจัด ( กรัม )	ปรอทในอะมัลกัม* ( กรัม )	ประสิทธิภาพในการกำจัด ( ร้อยละโดยน้ำหนัก )	
		ก่อนกำจัดปรอท	หลังกำจัดปรอท				
2	1	11.8113	8.1088	3.7025	5.0517	73.29	
	2	11.5832	7.9538	3.6294	4.9541	73.26	
	3	11.6135	7.9421	3.6714	4.9671	73.91	
						ค่าเฉลี่ย	73.49
						ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.37
3	1	11.4270	7.5125	3.9145	4.8873	80.09	
	2	11.5178	7.6342	3.8836	4.9262	78.84	
	3	11.8325	7.8515	3.9810	5.0608	78.66	
						ค่าเฉลี่ย	79.20
						ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.78

ตารางที่ 3 ผลการกำจัดปรอทที่เวลาต่าง ๆ (ต่อ)

เวลาที่ทำการ ทดลอง( ชั่วโมง )	ครั้งที่	น้ำหนักโลหะเจือมัลกัม		น้ำหนักปรอท ที่ถูกกำจัด (กรัม )	ปรอทในอะมัลกัม* ( กรัม )	ประสิทธิภาพในการกำจัด ( ร้อยละโดยน้ำหนัก )	
		ก่อนกำจัดปรอท	หลังกำจัดปรอท				
4	1	11.9472	7.4920	4.4552	5.1098	87.79	
	2	11.6391	7.2721	4.3670	4.9780	87.73	
	3	11.5860	7.1693	4.4167	4.9553	89.13	
						ค่าเฉลี่ย	88.01
						ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.00
5	1	11.5678	7.1857	4.3815	4.9475	88.57	
	2	11.6935	7.3465	4.3470	5.0013	86.92	
	3	11.7459	7.3245	4.4214	5.0237	88.01	
						ค่าเฉลี่ย	87.83
						ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.84

\* ได้จากการคำนวณปริมาณปรอทในโลหะเจือมัลกัมตั้งต้น

ตารางที่ 4 ผลการหาปริมาณโลหะเงินในสารละลายของโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัด  
ปรอทแล้วในกรดไนตริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ความเข้มข้นกรดไนตริก (%โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	ปริมาณโลหะเงินที่ตรวจพบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
25	1.0650	1.0598	1.0076	1.0441	0.0317
30	1.0775	1.2458	1.1874	1.1702	0.0855
35	1.0215	1.0325	1.0585	1.0375	0.0190
40	1.3345	1.4585	1.2044	1.3325	0.1271
45	1.2850	1.1527	1.1125	1.1834	0.0903

ตารางที่ 5 น้ำหนักของโลหะเงินที่ได้จากการแยกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของกรดไนตริก แล้วนำไป  
ไปหลอมเป็นเม็ดโลหะเงิน

ความเข้มข้นกรดไนตริก (%โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	น้ำหนักโลหะเงินที่หลอมได้(กรัม)			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
25	0.7828	0.8294	0.7770	0.7964	0.0287
30	1.0033	1.0517	1.0115	1.0222	0.0259
35	1.0132	1.0049	1.0147	1.0109	0.0053
40	1.2065	1.3029	1.3307	1.2800	0.0652
45	1.1572	1.1477	1.1648	1.1566	0.0086

ภาคผนวก ค. ปริมาณโลหะมลทินและความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ได้จากการแยกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของกรดไนตริก

ความเข้มข้นของ กรดไนตริก (ร้อยละ โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	น้ำหนัก โลหะเงิน (กรัม)	ปริมาณ โลหะมลทินที่ตรวจพบ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)				ปริมาณ โลหะ มลทินทั้งหมด (ร้อยละ โดยน้ำ หนัก)	ปริมาณความบริสุทธิ์ ของโลหะเงิน(ร้อยละ โดยน้ำหนัก)
		ดีบุก	ทองแดง	สังกะสี	ปรอท		
25	0.7828	0.00293817	0.00029387	0.00012519	0.00021487	0.00357205	99.99643
	0.8294	0.00403906	0.00032554	0.00252833	0.00029160	0.00718453	99.99282
	0.7770	0.00051480	0.00049550	0.00028636	0.00029151	0.00158816	99.99841
	ค่าเฉลี่ย	0.00249735	0.00037162	0.00097996	0.00026599	0.00411491	99.99589
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00180301	0.00010845	0.00134335	0.00004427	0.00283741	0.00284
30	1.0033	0.00607994	0.00013456	0.00229991	0.00021409	0.000872850	99.99127
	1.0517	0.00580013	0.00012836	0.00312542	0.00026942	0.00932333	99.99068
	1.0115	0.00810677	0.00030648	0.00195897	0.00030222	0.01067444	99.98933
	ค่าเฉลี่ย	0.00666228	0.00018980	0.00246143	0.00026191	0.00957542	99.99042
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00125877	0.00010109	0.00059976	0.00004454	0.00099717	0.00100

ภาคผนวก ค. ปริมาณโลหะมลทินและความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ได้จากการแยกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของกรดไนตริก (ต่อ)

ความเข้มข้นของ กรดไนตริก (ร้อยละ โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	น้ำหนัก โลหะเงิน (กรัม)	ปริมาณ โลหะมลทินที่ตรวจพบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				ปริมาณ โลหะ มลทินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำ หนัก)	ปริมาณความบริสุทธิ์ ของโลหะเงิน(ร้อยละ โดยน้ำหนัก)
		ดีบุก	ทองแดง	สังกะสี	ปรอท		
35	1.0132	0.00296092	0.00320372	0.00143308	0.00025390	0.00099717	99.99215
	1.0049	0.00089561	0.00321425	0.00160414	0.00033872	0.00785062	99.99395
	1.0147	0.00068986	0.00303538	0.00107618	0.00023148	0.00605272	99.99497
	ค่าเฉลี่ย	0.00151546	0.00315078	0.00137113	0.00027470	0.00631208	99.99369
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00125602	0.00010011	0.00026938	0.00005657	0.00142665	0.00143
40	1.2065	0.00464153	0.00020307	0.00202031	0.00019814	0.00706303	99.99294
	1.3029	0.01143603	0.00005756	0.00276153	0.00021003	0.01446515	99.98553
	1.3307	0.00589915	0.00015781	0.00207297	0.00019809	0.00832802	99.99167
	ค่าเฉลี่ย	0.00732557	0.00013948	0.00228494	0.00020209	0.00995207	99.99005
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00361487	0.00007446	0.00041358	0.00000688	0.00395929	0.00396

ภาคผนวก ค. ปริมาณโลหะมลทินและความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ได้จากการแยกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของกรดไนตริก (ต่อ)

ความเข้มข้นของ กรดไนตริก (ร้อยละ โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร)	น้ำหนัก โลหะเงิน (กรัม)	ปริมาณโลหะมลทินที่ตรวจพบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				ปริมาณโลหะ มลทินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำ หนัก)	ปริมาณความบริสุทธิ์ ของโลหะเงิน(ร้อยละ โดยน้ำหนัก)
		ดีบุก	ทองแดง	สังกะสี	ปรอท		
45	1.1572	0.00833909	0.00076910	0.00050639	0.00024607	0.00986066	99.99014
	1.1477	0.00914873	0.00029189	0.00053150	0.00022833	0.01020044	99.98980
	1.1648	0.00502232	0.00006439	0.00014981	0.00021746	0.00545398	99.99455
	ค่าเฉลี่ย	0.00750338	0.00037512	0.00039590	0.00023062	0.00850503	99.99149
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00218646	0.00035965	0.00021349	0.00001444	0.00264774	0.00265
โลหะเงินที่ใช้ผลิตผง อะมัลกัม	1.5600	0.00615385	0.00320513	0	0.00017349	0.00953247	99.99047
	1.5672	0.00583844	0.00331164	0	0.00017206	0.00932214	99.99068
	1.5665	0.00379828	0.00337695	0	0.00017261	0.00734785	99.99265
	ค่าเฉลี่ย	0.00526352	0.00329791	0	0.00017272	0.00873415	99.99127
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00127870	0.00008673	0	0.00000072	0.00120517	0.00121

ภาคผนวก ง. การคำนวณปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการตกตะกอน

สมมติให้ปริมาณโลหะเงินในสารละลายเท่ากับ 1 กรัม/100มิลลิลิตร

1. ค่าความต้องการทางทฤษฎี



$\text{AgNO}_3$	1	โมล	ทำปฏิกิริยาพอดีกับ	$\text{HCl}$	1	โมล
$\text{Ag}$	1	โมล	ทำปฏิกิริยาพอดีกับ	$\text{HCl}$	1	โมล
$\text{Ag}$	1/107.8	โมล	ทำปฏิกิริยาพอดีกับ	$\text{HCl}$	1/107.8	โมล

2. ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมลาร์

$$\begin{aligned} \text{มี HCl } 0.5 \text{ โมล ในสารละลาย } & 1000 \text{ มิลลิลิตร} \\ \text{HCl } 1/107.8 \text{ โมล ในสารละลาย } & \frac{1000 \times 1}{0.5 \times 107.8} = 18.55 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

สามารถคำนวณปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่จำเป็นต้องใช้ในการตกตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ได้ตามวิธีการนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ. การคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดปรอทและการแยกโลหะเงินออกจากโลหะ  
เจืออะมัลกัม

1. การกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัม

การกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมโดยการให้ความร้อน มีค่าใช้จ่าย ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า แต่เนื่องจากไม่สามารถคำนวณค่าเครื่องมือได้ทั้งหมด จึงพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ

คำนวณจากราคาค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้ ได้แก่ เครื่องให้ความร้อนแก่โลหะเจืออะมัลกัม ตู้ดูดควันและเครื่องกำจัดไอสารพิษ ป้อนสำหรับทำสุญญากาศ เครื่องทำน้ำหล่อเย็น อุปกรณ์ควบแน่น และเครื่องควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง โดยใช้สูตรคำนวณดังนี้

$$\text{ค่าไฟฟ้า (บาท)} = \text{กำลังไฟฟ้า (KW)} \times \text{เวลาการทำงานของเครื่อง (ชั่วโมง)} \\ \times \text{ค่าไฟฟ้าต่อยูนิต(บาท)}$$

- เครื่องให้ความร้อนแก่โลหะเจืออะมัลกัม

เครื่องให้ความร้อนแก่โลหะเจืออะมัลกัมใช้กำลังไฟฟ้า 0.62 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ค่าไฟฟ้าต่อยูนิตประมาณ 2.50 บาท ดังนั้นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 6.2 บาท

- ตู้ดูดควันและเครื่องกำจัดไอสารพิษ

ตู้ดูดควันและเครื่องกำจัดไอสารพิษใช้กำลังไฟฟ้า 2.25 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ค่าไฟฟ้าต่อยูนิตประมาณ 2.50 บาท ดังนั้นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 67.50 บาท

- ป้อนสำหรับทำสุญญากาศ

ป้อนสำหรับทำสุญญากาศใช้กำลังไฟฟ้า 0.30 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ค่าไฟฟ้าต่อยูนิตประมาณ 2.50 บาท ดังนั้นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.00 บาท

- เครื่องทำน้ำหล่อเย็นอุปกรณ์ควบแน่น

เครื่องทำน้ำหล่อเย็นอุปกรณ์ควบแน่น ใช้กำลังไฟฟ้า 0.35 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ค่าไฟฟ้าต่อยูนิตประมาณ 2.50 บาท ดังนั้นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.50 บาท



-เครื่องควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง

เครื่องควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง ใช้กำลังไฟฟ้า 0.65 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยประมาณ 2.50 บาท ดังนั้นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 19.50 บาท

ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้ารวมทั้งสิ้นเท่ากับ 99.70 บาท

ในการทดลองแต่ละครั้งใช้โลหะเจืออะมัลกัมประมาณ 11.5 กรัม ดังนั้นค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าในการกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมเท่ากับ 8.67 บาทต่อโลหะเจืออะมัลกัม 1 กรัม

## 2. การแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้ว

การแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้ว มีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าและสารเคมี

### 2.1 ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า

ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าได้แก่ เครื่องกวนแม่เหล็กและให้ความร้อน ตู้ดูดควันและเครื่องกำจัดไอสารพิษและเครื่องควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง

- เครื่องกวนแม่เหล็กและให้ความร้อน

เครื่องกวนแม่เหล็กและให้ความร้อน ใช้กำลังไฟฟ้า 0.62 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยประมาณ 2.50 บาท ดังนั้นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 6.20 บาท

- ตู้ดูดควันและเครื่องกำจัดไอสารพิษ

ตู้ดูดควันและเครื่องกำจัดไอสารพิษ ใช้กำลังไฟฟ้า 2.25 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยประมาณ 2.50 บาท ดังนั้นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 67.50 บาท

- เครื่องควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง

เครื่องควบคุมอุณหภูมิภายในห้องใช้กำลังไฟฟ้า 0.65 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ค่าไฟฟ้าต่อยูนิตประมาณ 2.50 บาท ดังนั้นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 19.50 บาท

ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้ารวมทั้งสิ้นเท่ากับ 93.20 บาท

## 2.2 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี ได้แก่ กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก สารละลายแอมโมเนีย และฟลักซ์

ในการทดลองต้องใช้กรดไนตริก 35 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 100 มิลลิลิตร ซึ่งใช้กรดไนตริกเข้มข้น 49.6 มิลลิลิตร ราคาของกรดไนตริกคือ 590 บาทต่อ 2.5 ลิตร ดังนั้นค่ากรดไนตริกเท่ากับ 11.70 บาท

ในการทดลองต้องใช้กรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมลาร์ ประมาณ 20 มิลลิลิตร ซึ่งใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร ราคาของกรดไฮโดรคลอริก คือ 450 บาทต่อ 2.5 ลิตร ดังนั้นค่ากรดไฮโดรคลอริก เท่ากับ 0.18 บาท

ในการทดลองต้องใช้กรดซัลฟูริก 2 โมลาร์ ประมาณ 10 มิลลิลิตร ซึ่งใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.11 มิลลิลิตร ราคาของกรดซัลฟูริก คือ 450 บาทต่อ 2.5 ลิตร ดังนั้นค่ากรดซัลฟูริก เท่ากับ 0.02 บาท

ในการทดลองใช้สารละลายแอมโมเนีย 25 % ประมาณ 10 มิลลิลิตร ราคาของสารละลายแอมโมเนีย คือ 520 บาทต่อ 2.5 ลิตร ดังนั้นค่าสารละลายแอมโมเนียเท่ากับ 2.08 บาท

ในการทดลองใช้ผงฟลักซ์ (บอริกแอซิด) ประมาณ 3 กรัม ราคาของฟลักซ์คือ 530 บาทต่อกิโลกรัม ดังนั้นค่าฟลักซ์เท่ากับ 1.59 บาท

ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีรวมทั้งสิ้น 15.57 บาท

ดังนั้นรวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้นเท่ากับ 108.77 บาท

ในแต่ละครั้งที่ทำการทดลองใช้ผงโลหะเจืออะมัลกัมที่ผ่านการกำจัดปรอทแล้วมาแยกโลหะเงิน ทำให้ได้โลหะเงินประมาณ 1 กรัม ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมเท่ากับ 108.77 บาท ต่อโลหะเงินที่ได้ 1 กรัม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียน

นางสาววิลาวรรณ จันทร์ประทีน เกิดวันที่ 11 พฤศจิกายน พ.ศ. 2515 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาชีวเคมีและชีวเคมีเทคโนโลยี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2535 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตรสภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2539



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย