**รายงานวิชาการ**
**ฉบับที่ กล 4/2545**

# อุปกรณ์ต้นแบบการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิลม์ สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลาง

**ปราโมทย์ ภูพานทอง**

**สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน**
**กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่**

**อธิบดีกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่**

นายสมเกียรติ ภู่ธงชัยฤทธิ์

**ผู้อำนวยสำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน**
นายสุระ เพชรพิรุณ

**จัดพิมพ์โดย**

สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน
ถนนพระราม 6 เขตราชเทวี
กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ 0 202 3897
โทรสาร 0 202 3897

**พิมพ์ครั้งที่ 2** พฤษภาคม 2554

ข้อมูลการลงรายการบรรณานุกรม

ปราโมทย์ ภูพานทอง
อุปกรณ์ต้นแบบการแยกเงิน จากน้ำยาล้างฟิลม์สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลาง / โดย ปราโมทย์ ภูพานทอง. - - กรุงเทพ ฯ: สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554.
33 หน้า: ภาพประกอบ: ตาราง; 30 ซม
พิมพ์ครั้งที่ 2

# สารบัญ


บทคัดย่อ V

คำขอบคุณ VI

บทนำ 1

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 3

1. การตกตะกอนเงินด้วยสารเคมี 3

2. การแยกเงินโดยวิธีแทนที่ด้วยโลหะ 4

3. การแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้า 5

4. เปรียบเทียบกระบวนการแยกเงินทั้ง 3 วิธี 7

4.1 การแยกเงินโดยตกตะกอน 7

4.2 การแยกเงินโดยวิธีแทนที่ด้วยโลหะ 8

4.3 การแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้า 8

5. ประสิทธิภาพการแยกเงิน 9

วิธีการดำเนินการวิจัย 10

1. วัตถุดิบ 10

2. อุปกรณ์แยกเงินโดยวิธีแทนที่ด้วยโลหะ 10

2.1 สารเคมี 10

2.2 การติดตั้งอุปกรณ์และวิธีการทดลอง 10

3. อุปกรณ์แยกเงินโดยวิธีไฟฟ้า 11

3.1 สารเคมี 11

3.2 การติดตั้งอุปกรณ์และวิธีการทดลอง 11

การทดลอง 13

1. การทดลองแยกเงินโดยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก 13

1.1 ผลของกรดอาเซติด 13

1.2 ผลของการกวนน้ำยาล้างฟิลม์ 13

1.3 การทดสอบประสิทธิภาพฝอยเหล็ก 13

1.4 การทดลองหาความสัมพันธ์อัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิลม์ต่อปริมาณการใช้ฝอยเหล็ก 13

1.5 การหลอมเงินที่ได้จากแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก 14

2. การทดลองแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้า 18

2.1 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18

2.2 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อการแยกเงินด้วยไฟฟ้า 18

2.3 การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ไฟฟ้าขนาด 100 ลิตร ด้วยน้ำยาล้างฟิลม์ขาว-ดำ 19

2.4 การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ไฟฟ้าขนาด 100 ลิตร
ด้วยน้ำยาล้างฟิลม์สี 19
2.5 การหลอมเงินที่ได้จากวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า 19
3. เปรียบเทียบการแยกเงินด้วยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็กและวิธีไฟฟ้า 20
ผลการทดลองและวิจารณ์ 21
1. ผลการทดลองแยกเงินโดยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก 21
1.1 ผลของกรดอาเซติด 21
1.2 ผลของการกวนน้ำยาล้างฟิลม์ 21
1.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพฝอยเหล็ก 22
1.4 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์อัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิลม์
ต่อปริมาณการใช้ฝอยเหล็ก 23
1.5 ผลการหลอมเงินที่ได้จากการแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก 24
2. ผลการทดลองแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้า 25
2.1 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 25
2.2 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อการแยกเงินด้วยไฟฟ้า 26
2.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ไฟฟ้าขนาด 100 ลิตร
ด้วยน้ำยาล้างฟิลม์ขาว-ดำ 27
2.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ไฟฟ้าขนาด 100 ลิตร
ด้วยน้ำยาล้างฟิลม์สี 28
2.5 ผลการหลอมเงินที่ได้จากวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า 29
3. ผลการเปรียบเทียบการแยกเงินด้วยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็กและวิธีไฟฟ้า 29
สรุป 32
เอกสารอ้างอิง
ภาคผนวก เอกสารกำกับการใช้และข้อควรระวังของน้ำยาล้างฟิลม์ขาว-ดำและฟิลม์สี

# สารบัญรูป

1. อุปกรณ์แยกเงินจากน้ำยาล้างฟิลม์โดยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก 11
2. การติดตั้งเซลล์ไฟฟ้าสำหรับแยกเงิน 12
3. แผนภูมิการหลอมเงินจากการแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก 15
4. เงินที่ได้จากการแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก 16
5. การละลายฝอยเหล็กส่วนเกินด้วยกรดกำมะถัน 17
6. ผงเงินหลังจากฝอยเหล็กด้วยกรดกำมะถันและอบแห้ง 17
7. ผงเงินที่ลอกจากขั้วลบ 20
8. เม็ดโลหะเงินจากการเทน้ำโลหะเงินลงบนน้ำ 20

# สารบัญตาราง

1. ผลของกรดอาเซติดต่อการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิลม์โดยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก 21
2. ผลของการกวนน้ำยาล้างฟิลม์ 22
3. ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณเงินในน้ำยาล้างฟิลม์หลังผ่านฝอยเหล็กในท่อพีวีซี 23
4. ความสัมพันธ์อัตราการไหลน้ำยาล้างฟิลม์ต่อปริมาณการใช้ฝอยเหล็ก 24
5. ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการแยกเงินด้วยไฟฟ้า 26
6. ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อการแยกเงินด้วยวิธีไฟฟ้า 27
7. ผลการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิลม์ชนิด ขาว-ดำ ด้วยเซลล์ไฟฟ้า
ขนาดความจุ 100 ลิตร 28
8. ผลการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิลม์สี ด้วยเซลล์ไฟฟ้าขนาดความจุ 100 ลิตร 29
9. แสดงผลการเปรียบเทียบการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิลม์โดยวิธี
แทนที่ด้วยฝอยเหล็กและวิธีไฟฟ้า 31

# อุปกรณ์ต้นแบบการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลาง

โดย ปราโมทย์ ภูพานทอง

## บทคัดย่อ

การศึกษาผลของตัวแปร ต่ออุปกรณ์ต้นแบบการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม ทั้ง 2 วิธี คือ วิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็กและวิธีไฟฟ้า ที่สร้างขึ้นมาจากการประยุกต์วัสดุอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่ายจากร้านวัสดุก่อสร้างทั่วไปและร้านค้าของเก่า โดยปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ คือ การใช้กรดอาเซติก อัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิล์มผ่านฝอยเหล็ก สำหรับการแยกเงินด้วยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็กและวิธีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า การกวนน้ำยาภายในเซลล์ สำหรับการแยกเงินด้วยวิธีไฟฟ้า เพื่อหาสภาวะเหมาะสมของตัวแปรดังกล่าว ที่ส่งผลให้อุปกรณ์ต้นแบบทั้ง 2 วิธีมีประสิทธิภาพการแยกเงินสูงสุด

จากการทดลองแยกเงิน ด้วยอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้นทั้ง 2 วิธี ด้วยน้ำยาล้างฟิล์มทั้งชนิดขาว-ดำ และสี ในปริมาณมากกว่า 5,000 ลิตร ที่แสดงประสิทธิภาพ การแยกเงินคงที่ตลอดเวลา คือ สามารถแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มได้มากถึงร้อยละ 98-99 ความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการใช้งานทั่วๆ ไป คือ ประมาณร้อยละ 99 เป็นสิ่งยืนยันความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

ค่าอุปกรณ์รวมค่าติดตั้งของการแยกเงินด้วยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก ประมาณ 900 บาท สามารถแยกเงินได้สูงสุดครั้งละ 4 กิโลกรัม คิดเป็นค่าใช้จ่ายในระบบประมาณ 22 บาท ต่อการแยกเงิน 1 กิโลกรัม ส่วนค่าอุปกรณ์รวมการติดตั้งของวิธีไฟฟ้า ขนาดบรรจุครั้งละ 100 ลิตร คิดเป็นเงินประมาณ 10,000 – 30,000 บาท ขึ้นกับสภาพความเก่า – ใหม่ ของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ คิดเป็นค่าใช้จ่ายในระบบประมาณ 15 บาท ต่อการแยกเงิน 1 กิโลกรัม และสามารถแยกเงินได้ไม่จำกัดปริมาณ

# คำขอบคุณ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณ มณฑป วัลยะเพ็ชร ผู้อำนวยการกองโลหกรรม ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนในการวางแผนโครงการวิจัยเรื่องนี้ ขอขอบคุณ คุณนันทนา กันยานุวัฒน์ หัวหน้าฝ่ายวิเคราะห์โลหะ กองวิเคราะห์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในเรื่องการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำยาล้างฟิล์ม ตลอดระยะเวลาดำเนินการวิจัย รวมทั้งการให้คำแนะนำการจัดทำเอกสารฉบับนี้ ขอขอบคุณ คุณ เบญจพร พวงจำปี และเจ้าหน้าที่กองโลหกรรมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนโครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

# บทนำ

การแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ เพื่ออนุรักษ์แหล่งวัตถุดิบทางธรรมชาติที่นับวันจะลดน้อยลง จากการสำรวจพบว่าโลหะเงินมากกว่า 2 ใน 3 มาจากเหมืองแร่ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำเหมืองทองแดง สังกะสี และตะกั่ว ดังนั้นปริมาณการผลิตเงินจึงขึ้นอยู่กับความต้องการโลหะพื้นฐานกล่าวมาแล้ว ถ้าช่วงใดโลหะเหล่านี้ล้นตลาดจะมีผลต่อการผลิตเงินที่ลดลงด้วย แหล่งเงินที่สำคัญสามารถทดแทนการผลิตเงินที่ลดต่ำลงได้คือของทิ้งจากอุตสาหกรรมที่เกี่ยวเนื่องกับเงินโดยเฉพาะอุตสาหกรรมการถ่ายภาพ ประมาณ 1/4 หรือ 1/3 ของเงินที่ผลิตได้ทั้งหมดจะใช้ในอุตสาหกรรมด้านนี้ ดังนั้นการแยกสกัดเงินกลับมาใช้ใหม่จึงสามารถช่วยรักษาแหล่งวัตถุดิบธรรมชาติได้อย่างมาก และยังเป็นการเพิ่มรายได้จากของทิ้งของอุตสาหกรรมเหล่านี้ด้วย เหตุผลอีกประการหนึ่งคือเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเงินเมื่ออยู่ในรูปสารละลายถูกจัดเป็นโลหะหนักที่ก่อให้เกิดมลภาวะในน้ำจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมด หรือให้ความเข้มข้นของเงินในสารละลายลดต่ำจนได้ตามเกณฑ์มาตราฐานน้ำทิ้ง ดังกล่าวในรายงานของเปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต (2539, หน้า 274-275) ดังนั้นการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นประโยชน์ต่อปัจจัยโดยรวม

ในอุตสาหกรรมถ่ายภาพ จะมีสิ่งเหลือทิ้งที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการแยกสกัดเงินกลับมาใช้ใหม่ได้ ประกอบด้วย 1. น้ำยาล้างฟิล์มและอัดรูป 2. แผ่นฟิล์มและกระดาษอัดรูป เมื่อนำฟิล์มขาวดำหรือเอ็กซ์เรย์ผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม ประมาณร้อยละ 60-80 ของเงินที่อยู่บนเจลาตินเคลือบบนแผ่นฟิล์มจะละลายออกมา ส่วนที่เหลือจะติดบนแผ่นฟิล์ม ปริมาณเงินทั้ง 2 ส่วนจะไม่คงที่ แปรตามชนิดการใช้งาน การรับแสงมากน้อยต่างกัน ชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ทำฟิล์ม แต่ถ้าเป็นฟิล์มสีเงินจะละลายหมดในน้ำยาล้างฟิล์ม ในกระบวนการล้างฟิล์ม ฟิล์มที่ใช้งานแล้วจะถูกแช่ในน้ำยาล้างฟิล์มซึ่งก็คือ น้ำยาสร้างภาพ (fixing solution) น้ำยานี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนเงินฮาไลด์ส่วนที่ไม่ถูกเปลี่ยนเป็นภาพให้ละลายออกมา ส่วนที่เป็นภาพจะคงติดอยู่ในชั้นเจลาติน น้ำยาล้างฟิล์มขาวดำจะประกอบด้วยแอมโมเนียมไทโอซัลเฟต หรือไซเดียมไทโอซัลเฟต สารเคมีทั้ง 2 ชนิดจะให้ผลการล้างฟิล์มใกล้เคียงกัน จะต่างกันตรงที่แอมโมเนียมไทโอซัลเฟตจะอยู่ในรูปสารละลาย เมื่อใช้งานแล้วปริมาณเงินที่เพิ่มขึ้นในน้ำยาจะไม่มีผลต่ออายุการใช้งาน ดังนั้นการดึงเงินออกจากน้ำยาจึงไม่สามารถเพิ่มอายุการใช้งานได้นอกจากน้ำยาหมดสภาพการใช้งานเอง สังเกตได้จากระยะเวลาในการล้างฟิล์มจะนานกว่าปกติ และพบว่าปริมาณเงินที่เพิ่มขึ้นจนถึง 10 กรัมต่อลิตร ยังคงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งาน ส่วนโซเดียมไทโอซัลเฟตจะอยู่ในรูปผงเคมี ต้องละลายน้ำก่อนใช้ และจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเงินในน้ำยาที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการแยกเงินจากน้ำยาจะมีผลต่ออายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นได้ แต่ถ้าน้ำยาหมดอายุการใช้งานแล้วแม้จะดึงเงินออกมาจนหมดก็ไม่สามารถใช้น้ำยานั้นได้อีก เนื่องจากสารเคมีบางตัวเกิดการสลายตัว หรือเจือจางต่ำกว่ามาตราฐาน

ในขั้นตอนการอัดภาพจากฟิล์มขาวดำ แผ่นฟิล์มที่ล้างแล้วจะผ่านน้ำยาฟอก (bleach) น้ำยานี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนส่วนของภาพที่ติดบนฟิล์ม ซึ่งเป็นเงินให้เป็นสารประกอบเงินฮาไลด์ ดังนั้น จะมีส่วนของเงินละลายออกมาในน้ำยาฟอก แต่ปริมาณเงินในน้ำยาฟอกจะน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำยาล้างฟิล์มเพราะต้องเปลี่ยนบ่อยครั้ง เพื่อควบคุมสภาวะการใช้งานให้ได้ตามมาตราฐานที่กำหนดไว้ไม่เช่นนั้นจะเกิดผลึกเกลือของน้ำยาฟอกเอง แต่ถ้าเป็นฟิล์มสีจะไม่มีส่วนของเงินละลายออกมา เนื่องจากเงินจะละลายออกมาตั้งแต่ผ่านน้ำยาล้างฟิล์มชนิดที่เป็นน้ำยาล้างอย่างเดียว หรือน้ำยาล้าง-ฟอก (bleach-fix solution) ในการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มไม่มีกฎเกณฑ์ตายตัวในการกำหนดว่าควรจะทำเมื่อใด แต่การตัดสินใจต้องประกอบด้วยความคุ้มค่าในการลงทุนเชิงพาณิชย์ และปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งจะมีตัวแปรอื่นๆ อีก เช่น ราคาของโลหะในตลาดขณะนั้น ศักยภาพของวัตถุดิบว่ามีเงินมากน้อยเพียงใด เมื่อประเมินค่าใช้จ่ายของกระบวนการแยกเงินที่เลือกไว้ และการควบคุมผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้แล้วว่าคุ้มกับการลงทุนจึงลงมือทำได้ เมื่อพิจารณาจากอุตสาหกรรมถ่ายภาพ และการใช้ฟิล์มในประเทศ พบว่าตามสถานพยาบาลทั้งภาครัฐและเอกชน มีการใช้ฟิล์มเอ็กซ์เรย์สูงมาก ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อการใช้น้ำยาล้างฟิล์มที่เพิ่มมากขึ้นด้วย หรือการล้างฟิล์มตามร้านถ่ายรูปที่นำเอาเครื่องล้างและอัดรูปอัตโนมัติมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ก็นับเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญในการทำธุรกิจแยกเงินเพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องเงินต่อไป

กองโลหกรรมได้ทำการศึกษาข้อมูลความเป็นไปได้ของกรรมวิธีการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม และทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและขยายสู่ขั้นโรงประลอง (pilot plant) พร้อมทั้งสร้างอุปกรณ์ต้นแบบจากการประยุกต์วัสดุที่สามารถหาได้ตามร้านค้าวัสดุก่อสร้างทั่วไป เพื่อทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น และศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการแยกเงินในเชิงพาณิชย์ ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้จะเลือกวิธีการแยกเงินด้วยไฟฟ้า และการแทนที่ด้วยโลหะ โดยจะเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพ และต้นทุนของกระบวนการแยกเงินทั้ง 2 วิธี เพื่อให้ผู้สนใจจะประกอบธุรกิจด้านนี้ ใช้เป็นแนวทางตัดสินใจเลือกวิธีที่เหมาะสมตามสภาวะเศรษฐกิจปัจจุบัน

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีในการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม มีมานานแล้วไม่น้อยกว่า 20 ปี จากเอกสารเผยแพร่ของ Eastman Kodak Company ในรายงานเรื่อง “Recovering Silver from Photographic Materials, 1972” ประกอบด้วย

1. การตกตะกอนเงินด้วยสารเคมี (chemical precipitation)
2. การแทนที่ด้วยโลหะ (metallic replacement)
3. การแยกเงินด้วยวิธีไฟฟ้า (electrolytic recovery)

ในปัจจุบันจะใช้วิธีที่ 2 และ 3 อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ ส่วนวิธีแรกนั้นแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพในการแยกเงินจากน้ำยาค่อนข้างสูง แต่มีความยุ่งยากในขั้นตอนการกรองตะกอนเงินและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าวิธีอื่น

**1. การตกตะกอนเงินด้วยสารเคมี**

มีสารประกอบ 2-3 ชนิดที่สามารถตกตะกอนเงินในน้ำยาล้างฟิล์มได้ ลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะละเอียดคล้ายโคลนแขวนลอยดังนั้นในขั้นตอนการกรองจะเป็นกระบวนการที่ช้ามาก ต้องทิ้งให้ตกตะกอนนอนก้นแล้วปล่อยส่วนน้ำใสทิ้งให้มากที่สุดก่อนกรองตะกอนและทำให้แห้งนำไปขายหรือแยกสกัดเป็นโลหะเงินบริสุทธิ์ต่อไป และน้ำยาหลังแยกเงินแล้วจะนำกลับมาใช้อีกไม่ได้

**การตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์**

เงินในน้ำยาล้างฟิล์มจะอยู่ในรูปไอออนบวก เมื่อเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ลงไปจะเกิดการแตกตัวของซัลไฟด์ในรูปไอออนลบซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไอออนบวกตกตะกอนในรูปซิลเวอร์ซัลไฟด์ดังสมการ

$$Ag^{+} + S^{-} \longrightarrow AgS$$

การตกตะกอนด้วยสารเคมีจะใช้กับน้ำยาล้างฟิล์มที่มีสภาพเป็นด่าง หรือถูกทำให้เป็นด่างก่อน ถ้าน้ำยามีสภาพเป็นกรดอ่อนๆ เมื่อเติมโซเดียมซัลไฟด์จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ก๊าซไข่เน่า) มีอันตรายต่อสุขภาพ และฟิล์มที่ยังไม่ได้ใช้งาน ดังนั้นสถานที่ที่จะใช้งานต้องมีระบบระบายอากาศที่ดี ภาชนะที่ใช้ควรเป็น stainless 316 หรือพลาสติก ในการแยกเงินจากน้ำยาที่มีสภาพเป็นกรดจะต้องปรับสภาพให้เป็นด่างก่อนด้วย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 250 กรัมละลายน้ำ 1 ลิตร เมื่อน้ำยาเป็นกลางแล้วเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่ม 30 กรัมต่อน้ำยาประมาณ 20 ลิตร ในการเตรียมสารละลายซัลไฟด์ เตรียมจากโซเดียมซัลไฟด์ 240 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร เติมสารละลายซัลไฟด์ประมาณ 8 มิลลิลิตรต่อลิตรของน้ำยาล้างฟิล์ม กวนให้เข้ากันพอดี ทิ้งไว้ 30 นาที หรือนำส่วนที่เป็นน้ำใสทดสอบดูว่าเงินตกตะกอนหมดหรือไม่ โดยตักน้ำยาส่วนที่ใสมาหยดสารละลายซัลไฟด์ ถ้ายังมีตะกอนอีกให้เติมเพิ่ม 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำซ้ำจนกว่าเงินจะตกตะกอนหมดทิ้งน้ำยาค้างคืน แยกส่วนน้ำใสออกเติมน้ำยาใหม่ลงไปอีก ทำการตกตะกอนเงินอีกจนกว่าตะกอนเงินซัลไฟด์จะมากพอจึงกรองและทำให้แห้ง

**2. การแยกเงินโดยวิธีแทนที่ด้วยโลหะ**

สารละลายเงิน จะมีเงินอยู่ในรูปเงินไอออน เมื่อใส่โลหะที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมี(less noble metals) ลงไป จะเกิดการแทนที่กันขึ้น โลหะที่ใส่ลงไปจะละลายกลายเป็นโลหะไอออนปล่อยอิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนนี้จะไปรีดิวซ์เงินไอออนเป็นโลหะเงิน เกาะบนผิวของโลหะที่ใส่

$$M^{o} \longrightarrow M^{+} + e^{-}$$

$$Ag^{+} + e^{-} \longrightarrow Ag^{o}$$

$$M^{o} + Ag^{+} + e^{-} \longrightarrow Ag^{o} + M^{+} + e^{-}$$

Electrochemical Series

| | Volts |
|---|---|
| $Zn + 2e^{-} \longrightarrow Zn^{+2}$ | -0.76 |
| $Fe + 2e^{-} \longrightarrow Fe^{+2}$ | -0.44 |
| $Cu + 2e^{-} \longrightarrow Cu^{+2}$ | +0.34 |
| $Ag + e^{-} \longrightarrow Ag^{+}$ | +0.30 |

อัตราการแทนที่เงินไอออน : Zn > Fe > Cu

ไอออนเงินสามารถถูกเปลี่ยนเป็นโลหะเงิน ด้วยโลหะพื้นฐานหลายอย่างเช่น สังกะสีและเหล็ก สามารถใช้แยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มได้ ฝอยเหล็กจะถูกใช้มากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูกและสะดวกต่อการใช้งาน ยิ่งกว่านั้นการใช้สังกะสีอาจมีผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้ เนื่องจากน้ำทิ้งที่มีสังกะสีละลายอยู่จัดว่าเป็นพิษ ดังนั้นในทางปฏิบัติจะไม่เลือกใช้สังกะสี

ค่าความเป็นกรดของน้ำยาล้างฟิล์มเป็นตัวแปรที่สำคัญ เมื่อใช้ฝอยเหล็กในการแยกเงินเหล็กจะละลายได้ดีในสารละลายกรด และเมื่อเหล็กละลายแล้ว จะไม่มีปฏิกิริยากับไอออน

เงินต่อไปได้ดังนั้นถ้าสารละลายเป็นกรดมากไปจะทำให้สิ้นเปลืองเหล็ก อย่างไรก็ตามการละลายของเหล็กในน้ำยาล้างฟิล์มที่มีสภาพเป็นกรดก็เป็นประโยชน์ เนื่องจากการกัดของกรดจะเปิดผิวหน้าเหล็กใหม่ตลอดเวลาทำให้ปฏิกิริยาการแทนที่ของเงินเกิดขึ้นเร็วขึ้น ถ้าสารละลายมีสภาพเป็นด่างมากไปจะทำให้การแลกเปลี่ยนโลหะและไอออนเงินช้าลง แต่ยังโชคดีที่น้ำยาล้างฟิล์ม หรือฟอกล้างมีค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วงที่สามารถใช้ฝอยเหล็กแทนที่โลหะเงินได้ ค่า pH ต่ำกว่า 4 ฝอยเหล็กจะละลายเร็วเกินไป ถ้า pH สูงกว่า 6.5 ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนจะช้าลงและเกิดการสูญเสียเงิน เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีใช้เวลานานมากเกินไป น้ำยาหลังจากแยกเงินโดยวิธีแทนที่ด้วยโลหะ ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เนื่องจากมีเหล็กละลายอยู่

เครื่องแยกเงินโดยวิธีแทนที่ด้วยโลหะจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่อยู่กับที่ (chemical recovery cartridge) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกภายในบรรจุด้วยผงเหล็กหรือฝอยเหล็กและส่วนที่เป็นปั๊มให้เกิดการหมุนเวียนของสารละลาย (circulating unit)

**3. การแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้า**

เงินที่อยู่ในน้ำยาล้างฟิล์มจะอยู่ในรูปซิลเวอร์ไทโอซัลเฟตคอมเพลกซ์ (silver Thiosulphate complex) ดังนั้นเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วบวกและลบที่จุ่มในน้ำยาเงินไอออนจะถูกรีดิวซ์เป็นเงินเกาะอยู่ที่ขั้วลบ ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

**ปฏิกิริยาที่ขั้วลบ**

$$Ag^{+} + e \longrightarrow Ag^{o}$$

**ปฏิกิริยาที่ขั้วบวก**

$$2(S_2O_3)^{2-} \longrightarrow (S_4O_6)^{2-} + 2e$$

$$2Ag^{+} + 2(S_2O_3)^{2-} \longrightarrow 2Ag^{o} + (S_4O_6)^{2-}$$

วิธีการแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้านั้น เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสตรง ระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายเงิน โลหะเงินจะถูกดึงออกจากน้ำยามาเกาะที่ขั้วลบมีลักษณะเป็นแผ่นและมีความบริสุทธิ์เกือบร้อยละ 100 เมื่อมีปริมาณเงินสะสมที่ขั้วมากพอ จะลอกเงินออกจากขั้วเป็นช่วง ๆ ของระยะการทำงาน

ระบบการแยกเงินด้วยไฟฟ้าสามารถติดตั้งได้ 2 วิธี คือ จะติดตั้งเครื่องแยกไฟฟ้าต่อจากน้ำยาที่ออกจากเครื่องล้างและอัดรูปอัตโนมัติที่หมดสภาพการใช้งานแล้ว และสามารถควบคุมได้ทั้งที่เป็นระบบต่อเนื่องหรือแยกเป็นชุด ๆ อีกวิธีหนึ่งคือการติดตั้งเครื่องแยกเงินเข้าสู่น้ำยาล้างในรูปแบบการหมุนเวียนต่อเนื่อง โดยใช้อัตราการหมุนเวียนเท่ากับอัตราการป้อนน้ำยาล้างฟิล์มเข้าเครื่องและได้มีการพัฒนาระบบหมุนเวียน โดยนำน้ำยาล้างฟิล์มจากส่วนของน้ำล้างของเครื่องล้างฟิล์ม 2-3 เครื่องมาผ่านเครื่องแยกไฟฟ้า เพื่อดึงเงินและป้อนน้ำยาฟิล์มที่แยกเงินแล้วกลับเข้าเครื่องล้างฟิล์มเพื่อใช้ใหม่

ในระหว่างการแยกเงินด้วยวิธีไฟฟ้า จะมีการแข่งขันของปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นที่ขั้วลบถ้าใช้กระแสไฟต่อหน่วยพื้นที่สูงเกินไป ไทโอซัลเฟตในน้ำยาล้างฟิล์มจะสลายตัวทำปฏิกิริยากับเงินที่เกาะบนขั้วลบเป็นเงินซัลไฟด์ ปรากฏนี้จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการแยกเงินด้วยไฟฟ้าลดลงและสามารถส่งผลรุนแรงจนไม่สามารถแยกเงินจากสารละลายต่อไปได้ และเกิดสารประกอบซัลไฟด์จะส่งผลทำให้ไม่สามารถนำน้ำยาล้างฟิล์มกลับมาใช้ใหม่ๆ ได้อีก ปกติแล้วจะมีสัญญาณเตือนเมื่อใช้ไฟฟ้าสูงเกินไป กล่าวคือเงินที่เกาะบนขั้วลบจะเป็นสีน้ำตาลไหม้จนถึงดำ แทนที่จะเป็นสีครีมหรือน้ำตาลอ่อน ค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดด่างของน้ำยาความเข้มข้นของเงินในน้ำยา และความเข้มข้นของซัลไฟด์ในน้ำยา นอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเกาะของเงินและความบริสุทธิ์ของเงินที่ขั้วลบ ได้แก่

**1. การกวนสารละลาย**

การกวนสารละลายในระบบหมุนเวียน มีความจำเป็นเพื่อช่วยให้เงินมาเกาะที่ขั้วลบอย่างสำเสมอและช่วยให้เงินในสารละลายมีการกระจายตัวทั่วกัน ถ้าไม่มีการกวนสารละลายบริเวณใกล้ขั้วลบจะมีค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่สูงเกินไป ทำให้เงินซัลไฟด์ซึ่งจะมีผลเสียตามมาดังกล่าวข้างต้น ถ้าใช้ค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่สูงมาก ๆ จำเป็นต้องมีการกวนสารละลายอย่างแรงมากขึ้นด้วยเพื่อให้การแยกเงินดำเนินต่อไปได้ มีการออกแบบเครื่องแยกไฟฟ้าพิเศษโดยให้มีพื้นที่ขั้วลบมาก ๆ และใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ ๆ พร้อมทั้งกวนสารละลายช้า ๆ ซึ่งได้ผลดีเช่นกัน

**2. ปริมาณความเข้มข้นของเงินในสารละลาย**

สารละลายที่มีเงินสูงๆ ไอออนเงินจะมาอยู่บริเวณขั้วลบเป็นส่วนใหญ่ ในระบบการแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้าชนิดถังต่อถัง (batch-type) เมื่อเริ่มเปิดเครื่อง สามารถใช้กระแสสูงๆ ได้ แต่จะต้องลดกระแสไฟฟ้าลงให้มีค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ค่อนข้างต่ำ จึงจะสามารถแยกเงินจนเหลือเงินในสารละลาย 0.05 กรัมต่อลิตร หรือน้อยกว่าได้ก่อนที่จะทิ้งน้ำยาไป การแยกเงินในระบบหมุนเวียนน้ำยาล้างฟิล์มสำหรับเครื่องแยกเงินที่มีประสิทธิภาพ จะสามารถแยกเงินที่มีความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร หรือน้อยกว่าได้

**3. ชนิดของน้ำยาล้างฟิล์ม**

ในบางกรณี สารละลายแอมโมเนียไทโอซัลเฟต จะทนต่อค่ากระแสไฟฟ้าสูงได้ดีกว่าสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต เป็นผลทำให้การแยกเงินด้วยไฟฟ้าจะเกิดได้เร็วกว่า นอกจากนี้น้ำยาล้างฟิล์มที่เป็นด่างจะแยกเงินได้ดีกว่า แต่ต้องใช้กระแสไฟฟ้าค่อนข้างต่ำและต้องเติมกรดอาเซติก เพื่อควบคุมสภาวะความเป็นกรด-ด่างให้อยู่คงที่ ถ้าเป็นน้ำยาล้างฟิล์มสีต้องเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์

**4. ความเข้มข้นของซัลไฟต์**

สารประกอบซัลไฟต์ในน้ำยาล้างฟิล์ม จะช่วยป้องกันการสลายตัวของสารประกอบไทโอซัลเฟต ในระหว่างการแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้าสารประกอบซัลไฟต์จะถูกใช้หมดไป ทำให้

ปริมาณลดลงเรื่อย ๆ เพื่อควบคุมให้การแยกเงินดำเนินต่อไปได้ จำเป็นต้องเติมสารโซเดียมซัลไฟต์ลงในน้ำยาโดยควบคุมความเข้มข้นให้อยู่ประมาณ 8-10 กรัมต่อลิตร เมื่อปริมาณเงินในสารละลายมีค่าประมาณ 1-5 กรัมต่อลิตร

**5. ความสกปรกของน้ำยา**

น้ำยาล้างฟิล์มที่มีการสะสมตัวของตะกอนก่อให้เกิดปัญหาได้ บางครั้งจะติดอยู่บนขั้วลบเป็นเม็ด ๆ สภาพเช่นนี้จะเริ่มก่อให้เกิดสารประกอบซัลไฟด์ในน้ำยาได้ เมื่อมากขึ้นจะทำให้การแยกเงินด้วยไฟฟ้าไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ ในการป้องกันการเกิดปัญหานี้จะใช้วิธีกรองน้ำยาก่อนเข้าเครื่องแยกไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าต้องนำน้ำยาล้างฟิล์มกลับมาใช้ใหม่และต้องกรองน้ำยาหลังแยกเงินแล้ว ก่อนนำกลับมาใช้ใหม่ทุกครั้ง

**6. ความเข้มข้นของสารเคมีเคลือบผิวบนแผ่นฟิล์ม**

ปริมาณสารเคลือบที่แปรสภาพละลายลงมาในน้ำยาล้างฟิล์ม ถ้ามีปริมาณน้อยจะช่วยให้เงินเรียงตัวที่ขั้วลบดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าสารเคลือบที่เกาะติดขั้วลบจะช่วยให้การลอกเงินจากขั้วลบทำได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าปริมาณสารเคลือบมากเกินไปจะทำให้การแยกเงินด้วยไฟฟ้าแย่ลงแต่ในปัจจุบันจะไม่มีปัญหานี้เนื่องจากสารเคลือบในปัจจุบันเป็นอิมัลชั่นที่แข็ง และไม่ละลายง่ายนัก

**7. การควบคุมอุปกรณ์และแรงงาน**

แรงงานที่ต้องดูแลอุปกรณ์การแยกเงินด้วยไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามระบบการทำงาน ระบบการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มชนิดที่ไม่นำน้ำยากลับมาใช้งานอีกกล่าว คือ เมื่อแยกเงินออกจากน้ำยาแล้ว น้ำยาที่เหลือจากนั้นจะทิ้งไป จะใช้แรงงานน้อยเพื่อดูแลองค์ประกอบทางเคมีของน้ำยาและควบคุมประสิทธิภาพในการแยกเงินออกจากน้ำยาให้คงที่เท่านั้น แต่ถ้าเป็นระบบแยกเงินและนำน้ำยากลับมาใช้งานใหม่ จำเป็นต้องดูแลอย่างใกล้ชิดเพราะอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีในน้ำยาล้างฟิล์มได้ตลอดเวลาถ้าควบคุมไม่ดี ในการดูแลอย่างใกล้ชิดจะมีผลดีตรงที่สามารถแยกเงินจากน้ำยาได้มากกว่าแม้เงินในน้ำยาจะลดลงเหลือ 0.5 กรัมต่อลิตร น้ำยาส่วนนี้จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ปริมาณเงินในน้ำยาจะเพิ่มขึ้นเอง แต่ถ้าเป็นวิธีแรกน้ำยาที่มีเงินเหลือ 0.5 กรัมต่อลิตร จะทำการแยกเงินด้วยไฟฟ้ามากกว่า 1 ครั้ง เพื่อให้เหลือเงินในน้ำยาน้อยที่สุดก่อนที่จะทิ้งไป

**4. เปรียบเทียบกระบวนการแยกเงิน ทั้ง 3 วิธี**

**4.1 การแยกเงินโดยตกตะกอน**

**ข้อดี**

1. เงินในน้ำยาสามารถตกตะกอนได้ร้อยละ 100
2. ประหยัดที่สุด อุปกรณ์ราคาถูก
3. วิธีการง่าย ไม่มีระบบไฟฟ้ามาเกี่ยวข้อง

**ข้อเสีย**

1. กระบวนการมีอันตรายเนื่องจากอาจเกิดอุบัติเหตุจากสภาพน้ำยาที่เป็นกรดก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

2. ช่วงระยะเวลาการตกตะกอนนานมาก ต้องใช้ถังรองรับขนาดใหญ่ไม่เหมาะกับการติดตั้ง ระบบขนาดใหญ่

3. การแยกตะกอนจากสารละลายมีปัญหา ต้องใช้เวลามากและการกรองต้องใช้อุปกรณ์พิเศษราคาแพง

4. น้ำยานำกลับมาใช้ใหม่ไม่ได้

**4.2 การแยกเงินโดยวิธีแทนที่ด้วยโลหะ**

**ข้อดี**

1. ในสภาวะการควบคุมที่เหมาะสม สามารถแยกเงินได้ถึงร้อยละ 95-99

2. อุปกรณ์ที่ใช้ราคาไม่แพง

3. เป็นวิธีที่ง่าย ไม่ต้องติดตั้งระบบไฟฟ้า

4. ส่วนของฝอยเหล็ก สามารถเปลี่ยนง่ายเมื่อหมดอายุการใช้งาน

5. ระบบการทำงาน สามารถทำได้ทั้งควบคุมแรงงาน หรือใช้เครื่องมือกลช่วยใช้กับน้ำยากัด-ล้างฟิล์ม (bleach fix) ของการอัดรูปได้

**ข้อเสีย**

1. น้ำยาล้างฟิล์มหลังแยกเงินแล้วไม่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้

2. ไม่สามารถลดปริมาณเงินในน้ำยาที่กำลังใช้งานได้

3. ต้องใช้กระดาษทดสอบ ตรวจวัดปริมาณเงินในน้ำเป็นระยะๆ ตลอดการทำงาน

**4.3 การแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้า**

**ข้อดี**

1. ค่าใช้จ่ายเมื่อคิดต่อหน่วยน้ำหนักเงินที่แยกได้ จะประหยัดกว่าเมื่อขยายสู่ Pilot Plant

2. น้ำยาล้างฟิล์มสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ถ้าสารเคมีหลักเป็นโซเดียมไทโอซัลเฟต แต่ใช้ไม่ได้กับน้ำยาที่เตรียมจากแอมโมเนียมไทโอซัลเฟต

3. ถ้าระบบหมุนเวียนน้ำยาใหม่เป็นระบบต่อเนื่อง เงินจะถูกดึงออกมาจากน้ำยาตลอดเวลา ดังนั้นปริมาณเงินในน้ำยาจะลดลง มีผลทำให้การล้างฟิล์มด้วยน้ำยาจะไม่มีการสูญเสียเงิน หรือสูญเสียน้อยลง

4. เงินที่แยกได้จะมีความบริสุทธิ์สูงประมาณร้อยละ 92-98

**ข้อเสีย**

1. อุปกรณ์ในการแยกเงินด้วยไฟฟ้า มีราคาค่อนข้างแพง
2. ต้องควบคุมดูแลอย่างใกล้ชิด เพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. ประสิทธิภาพในการแยกเงินต่ำกว่าวิธีการแยกด้วยโลหะ แต่ถ้ามีระบบตรวจสอบหรือควบคุมที่ดีอาจเพิ่มประสิทธิภาพทัดเทียมได้
4. ต้องใช้เวลาเป็นช่วงๆ ในการลอกเงินจากขั้วลบ
5. ต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์ อาจไม่สะดวกในการทำงาน
6. ในส่วนของการอัดรูป น้ำยากัด-ล้างฟิล์ม ไม่เหมาะกับวิธีนี้

**5. ประสิทธิภาพการแยกเงิน**

ประสิทธิภาพในการแยกเงินสามารถคิดได้ 2 แบบ

1. ประสิทธิภาพของกระบวนการแยกเงินในแต่ละวิธี ว่าวิธีใดมีความสูญเสียน้อยที่สุด
2. ประสิทธิภาพของสารเคมี หรือเคมีไฟฟ้าที่ใช้แต่ละวิธี ว่ามีประสิทธิภาพมากน้อยอย่างไร เช่นถ้ากระแส 1 แอมแปร์ ใน 1 ชม. จะต้องแยกเงินได้ 4.025 กรัม “Hand book on Electroplating, 1966” หรือถ้าใช้ฝอยเหล็ก 1 กรัม ควรจะแยกเงินได้ 4 กรัมเช่นกัน ถ้าประสิทธิภาพสมบูรณ์ร้อยละ 100

วัตถุประสงค์หลักของการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม คือทำอย่างไรก็ได้ที่สามารถแยกเงินได้มากที่สุด ส่วนค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้านั้นน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเงินที่แยกได้ ดังนั้น ประสิทธิภาพของกระบวนการแยกเงินจึงเป็นสิ่งสำคัญที่สุด

# วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยประกอบด้วย การทดลอง 2 ชุด คือ การทดลองแยกเงินโดยวิธีการแทนที่ด้วยโลหะ และการทดลองแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้า ซึ่งจะใช้วัตถุดิบชุดเดียวกัน ยกเว้นส่วนอุปกรณ์ที่มีรายละเอียดแตกต่างกัน

**1. วัตถุดิบ**

น้ำยาล้างฟิล์มขาว-ดำ ชนิดแอมโมเนียมไทโอซัลเฟต (รายละเอียดส่วนผสมทางเคมีและข้อควรระวังในการใช้น้ำยาดังกล่าวดูในภาคผนวก) จากอุตสาหกรรมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีปริมาณเงินที่ละลายในน้ำยา 4.5 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 5.5

**2. อุปกรณ์แยกเงินโดยวิธีแทนที่ด้วยโลหะ**

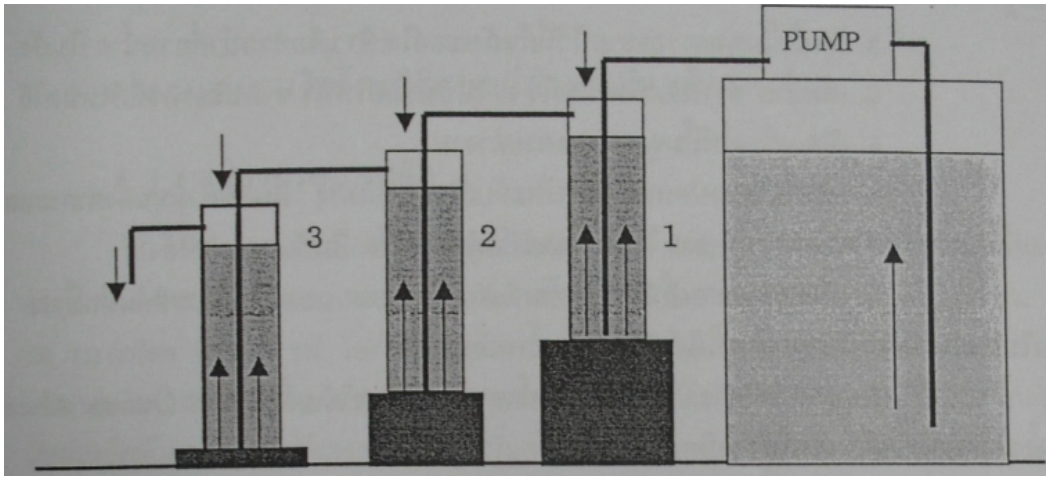
1. ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ยาว 60 ซม. จำนวน 3 ท่อ เชื่อมปลายปิดด้านหนึ่ง ขนาดบรรจุสารละลายได้ 5 ลิตร
2. ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม. ขนาดบรรจุ สารละลาย 100 มล.
3. ปั๊มดูดสารละลาย Masterflex Model No 7523-27, 230V, 50160 Hz, 12 A
4. ปั๊มดูดสารละลาย Submersible Pump SP-2500, 220 V 50Hz.18 W
5. ฝอยเหล็กเป็นโละที่เลือกใช้ในกระบวนการแยกเงินโดยวิธีแทนที่ด้วยโลหะ
6. บีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร

**2.1 สารเคมี**

1. กรดกำมะถันเข้มข้น เกรดการค้า
2. สารเชื้อ (flux) โซเดียมคาร์บอเนต บอแรก โปแตสไนเตรต (เกรดการค้า)
3. กรดอาเซติก (เกรดการค้า)

**2.2 การติดตั้งอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง**

1. บรรจุฝอยเหล็ก ตามน้ำหนักที่กำหนดไว้ ลงในท่อพีวีซี 1 2 และ 3
2. ต่อท่อพีวีซี บรรจุฝอยเหล็ก 3 ท่อด้วยกัน ให้มีระดับความสูงลดหลั่นเหมือนขั้นบันได ดังแสดงในรูปที่ 1
3. ปั๊มน้ำยาล้างฟิล์มลงในท่อพีวีซี 1 ตามอัตราการไหลที่กำหนดไว้ ส่วนของน้ำล้น (overflow) จากท่อพีวีซี 1 จะไหลสู่ท่อพีวีซี 2 และส่วนน้ำล้นของท่อพีวีซี 2 จะไหลลงสู่ท่อพีวีซี 3 ตามลำดับ น้ำล้นจากท่อพีวีซีสุดท้าย จะผ่านไปลงบ่อบำบัดน้ำเสีย
4. เก็บน้ำยาที่ผ่านฝอยเหล็ก วิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเงินด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer




**รูปที่ 1 อุปกรณ์แยกเงินจากน้ำยาล้างฟิลม์โดยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก**

**3. อุปกรณ์แยกเงินด้วยวิธีไฟฟ้า**

1. ถังเซลไฟฟ้าทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 58 ซม. สูง 62 ซม. ขนาดบรรจุ 100 ลิตรดัดแปลงจากถังพลาสติกบรรจุเคมีภัณฑ์ขนาด 200 ลิตร

2. บีกเกอร์ขนาด 200 ลิตร

3. แผ่น stainless ขนาด 10 x 10 ซม.

4. แผ่น stainless ขนาด 30 x 40 ซม.

5. แกนรองรับแผ่นขั้วบวกและลบ ทำ stainless ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 ซม. ยาว 65 ซม.

6. ปั๊มดูดสารละลาย submersible pump ความเร็วรอบ 900-1400 ลิตรต่อชั่วโมง

7. เครื่องกวนสารละลายชนิด magnetic stirrer

8. เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง “Rectifier” THAIPATANA MODEL SC-25INPUT 220 V 50-60 Hz / OUTPUT 0-10 V. DC 25 A

**3.1 สารเคมี**

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (เกรดการค้า)

2. สารเชื้อ (flux) : โซเดียมคาร์บอเนต บอแร็ก โปแตสเซียมไนเตรต (เกรดการค้า)

**3.2 การติดตั้งอุปกรณ์และวิธีทดลอง**

1. ติดตั้งแกนรองรับแผ่นขั้วบวก (anode busbar) และแกนรองรับแผ่นขั้วลบ (cathode busbar) ในถังเซลล์ไฟฟ้า โดยส่วนปลายแต่ละข้างจะเชื่อมด้วยสายไฟฟ้า สำหรับต่อกับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง ทำการต่อขั้วบวกเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบเข้ากับขั้วลบของอุปกรณ์ดังกล่าว

2. วางแผ่น stainless ที่จะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกและขั้วลบบนแกนรองรับ โดยเรียงสลับกันตามรูปที่ 2

3. ติดตั้งปั๊มดูดสาย ไว้ที่กันถังของเซลล์ไฟฟ้า เพื่อทำหน้าที่กวนน้ำยาในถัง

4. เติมน้ำยาล้างฟิล์มที่เตรียมไว้ ลงในถังเซลล์ไฟฟ้า ตามปริมาตรที่กำหนดไว้

5. เปิดเครื่องให้ปั๊มดูดสารละลายทำงาน

6. เปิดเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง ซึ่งจะมีตัวหมุนตั้งค่ากระแสไฟฟ้าตามที่ต้องการโดยมีแอมมิเตอร์ และโวลต์มิเตอร์ที่อยู่บนเครื่องเป็นตัวบอกค่าที่ตั้งไว้

7. เมื่อการทดลองสิ้นสุดลง ถอดแผ่นขั้วลบออก ลอกเงินที่เกาะติดแผ่นขั้วลบ และที่ร่วงในถังเซลล์ไฟฟ้า นำมาล้างอบให้แห้ง ชั่งหาน้ำหนัก

8. การหาปริมาณเงินที่เหลือในน้ำยาล้างฟิล์มจะใช้เครื่อง AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer) เป็นเครื่องมือตรวจวัด

**รูปที่ 2 การติดตั้งเซลล์ไฟฟ้าสำหรับแยกเงิน**

# การทดลอง

## 1. การทดลองแยกเงินโดยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก

### 1.1 ผลของกรดอาเซติก

การทดลองชุดนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกรดอาเซติกต่ออัตราการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม โดยทดลองแช่ฝอยเหล็กในน้ำยาล้างฟิล์ม ที่ผสมกรดอาเซติกในอัตราส่วน 5 15 และ 20 มล.ต่อลิตร ทิ้งไว้ 3 ชม. โดยไม่มีการกวนสารละลาย หลังจากนั้นกรองสารละลายเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเงินที่เหลืออยู่ แยกส่วนที่เป็นตะกอน และฝอยเหล็กที่เหลือ อบแห้ง ชั่งน้ำหนักก่อนละลาย ฝอยเหล็กด้วยกำมะถันจนหมด จากนั้นกรองตะกอน นำไปอบแห้ง ชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อหาปริมาณเหล็กที่ใช้จริง

### 1.2 ผลของการกวนน้ำยาล้างฟิล์ม

ทำการทดลองเปรียบเทียบ การแช่ฝอยเหล็กในน้ำยาล้างฟิล์มที่อยู่ในสภาพนิ่ง กับน้ำยาที่ถูกกวนให้เกิดการเคลื่อนไหวทุกๆ ชั่วโมง เป็นเวลา 5 นาที ต่อครั้งรวม 3 ชั่วโมง เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลง ปริมาณเงินในน้ำยาล้างฟิล์ม สำหรับการแช่ฝอยเหล็กในสภาพนิ่ง และกวนน้ำยาทุกชั่วโมงจะใช้น้ำยาล้างฟิล์ม 1 ลิตร กรดอาเซติก 25 มล. บรรจุในบีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร เริ่มจับเวลาเมื่อใส่ฝอยเหล็ก 5 กรัม ลงในน้ำยาดังกล่าว เมื่อการทดลองสิ้นสุดลง กรองน้ำยาแยกส่วนตะกอนและฝอยเหล็ก นำไปอบให้แห้ง ชั่งน้ำหนัก จากนั้นละลายฝอยเหล็กส่วนเกินกรองแยกตะกอน ก่อนอบให้แห้งและชั่งน้ำหนักอีกครั้ง

### 1.3 การทดสอบประสิทธิภาพฝอยเหล็ก

การทดลองชุดนี้ ใช้ท่อพีวีซี ขนาดบรรจุ 5 ลิตร จำนวน 2 ท่อ ต่อเชื่อมให้กันให้มีความสูงลดหลั่นแบบชั้นบันได แต่ละท่อพีวีซี บรรจุฝอยเหล็ก 500 กรัม โดยการพันฝอยเหล็กกับแกนกลางเป็นรูปทรงกลมจำนวน 5 ลูก เรียงซ้อนกันตามแนวตั้ง จากนั้นปั๊มดูดน้ำยาล้างฟิล์มจำนวน100 ลิตร ด้วยเครื่องดูดสารลายในอัตราการไหล 15 ลิตรต่อชั่วโมง ผ่านแกนกลางของท่อพีวีซีแรกจากส่วนล่างไหลย้อนผ่านฝอยเหล็กกลับมาด้านบนและไหลออกลงสู่แกนกลางของท่อพีวีซีที่สองลงสู่ส่วนล่าง ก่อนไหลย้อนฝอยเหล็กสู่ด้านบนและไหลลงบ่อบำบัดน้ำเสีย จากข้อจำกัดของขนาดความจุท่อพีวีซีที่ใช้ และลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างท่อพีวีซีทั้งสองส่งผลให้อัตราการไหลของสารละลายทำได้ไม่เกิน 40 ลิตรต่อชั่วโมง นอกจากนั้นอัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิล์ม เป็นตัวแปรเพียงอย่างเดียวที่มีผลต่อการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มด้วยวิธีนี้ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำยาล้างฟิล์มที่ไหลออกจากท่อพีวีซีหนึ่ง และท่อพีวีซีสอง เมื่อครบระยะเวลา 2 5 และ 7 ชั่วโมงตามลำดับเพื่อส่งวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงปริมาณเงินในน้ำยาล้างฟิล์ม

### 1.4 การทดลอง หาความสัมพันธ์อัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิล์มต่อปริมาณการใช้ฝอยเหล็ก

การทดลองชุดนี้ เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการนำอุปกรณ์ต้นแบบ ทดลองใช้กับน้ำยาล้างฟิล์มจากโรงงานที่รวบรวมไว้เดือนละครั้ง ปริมาณเงินในน้ำยาล้างฟิล์มจะไม่คงที่ในแต่ละ

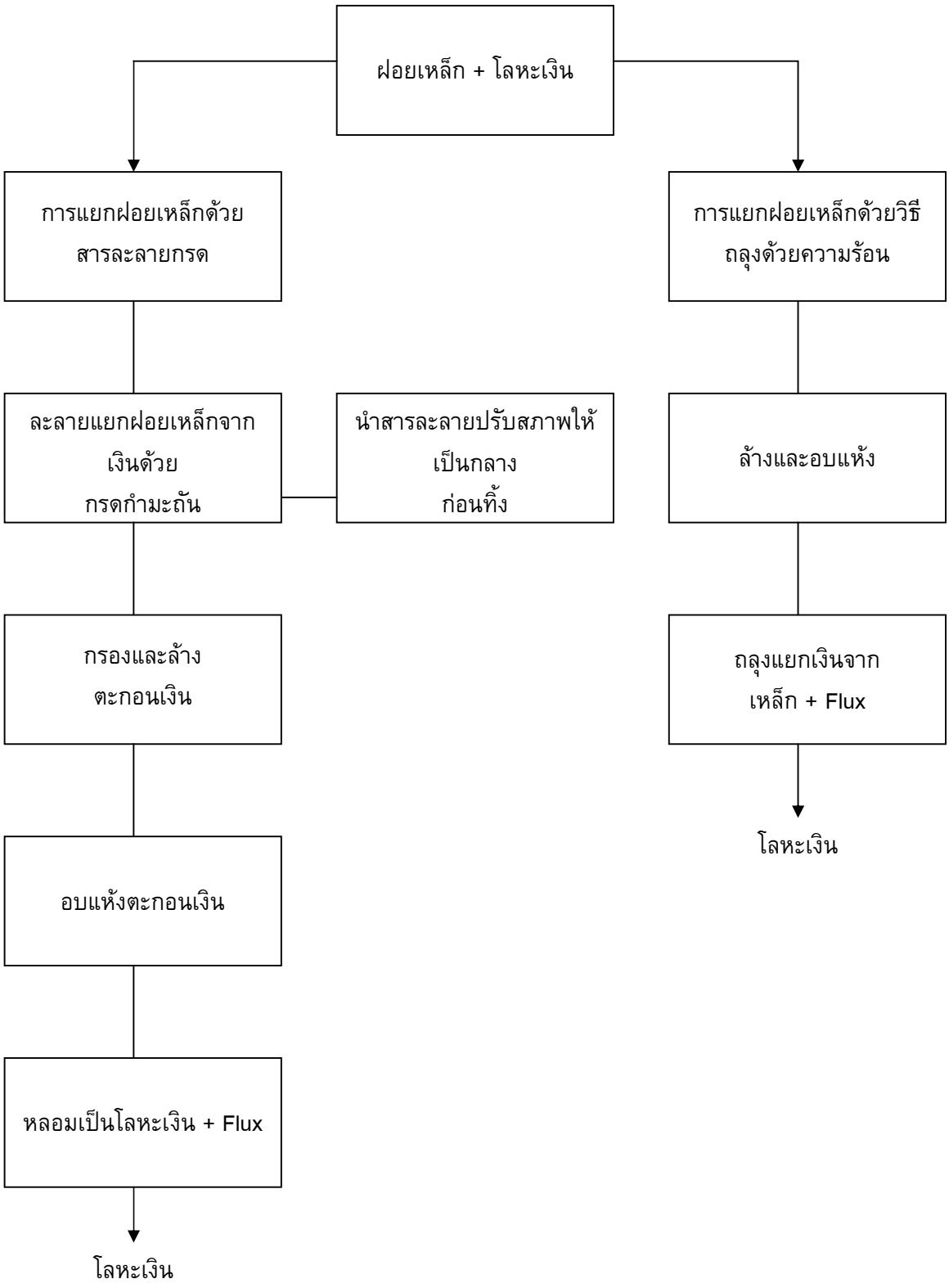
เดือนขึ้นอยู่กับปริมาณงานและจำนวนน้ำยาล้างฟิล์มที่ใช้ไป ดังนั้นในการทดลองได้กำหนดการติดตั้งท่อพีวีซีบรรจุฝอยเหล็กไว้ 3 ท่อ เพื่อรองรับปริมาณน้ำยาที่ค่อนข้างมาก น้ำยาที่ใช้ทดลองมี 3 ชุด ชุดแรก 850 ลิตร (Ag 6.8 กรัมต่อลิตร) อัตราการไหลผ่านฝอยเหล็ก 15 ลิตรต่อชั่วโมง ชุดที่สอง 680 ลิตร (Ag 5.4 กรัมต่อลิตร) อัตราการไหลผ่านฝอยเหล็ก 40 ลิตรต่อชั่วโมง ชุดที่สาม 460 ลิตร (Ag 5.7 กรัมต่อลิตร) อัตราการไหลผ่านฝอยเหล็ก 30 ลิตรต่อชั่วโมง

การตรวจสอบปริมาณเงินที่เหลือ หลังจากน้ำยาล้างฟิล์มผ่านฝอยเหล็กจะไม่ใช้วิธีวิเคราะห์ทางเคมี แต่จะใช้การตรวจสอบโดยการจุ่มแผ่นทองแดงขัดเงาในน้ำยาล้างฟิล์ม ถ้าแผ่นทองแดงไม่มีการเปลี่ยนแปลงแสดงว่า ปริมาณเงินในน้ำยาล้างฟิล์ม ต่ำกว่า 0.01 กรัมต่อลิตรส่วนการตรวจสอบฝอยเหล็กในท่อพีวีซี 1 ว่าหมดสภาพการใช้งานหรือยัง สามารถตรวจง่ายๆ ด้วยการใช้แท่ง stainless ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5-1 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร แทงผ่านฝอยเหล็กจากด้านบนจนถึงก้นท่อพีวีซี ถ้าแท่ง stainless สามารถผ่านได้โดยง่าย แสดงว่าฝอยเหล็กส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 95 ถูกใช้หมดแล้ว ต้องเปลี่ยนฝอยเหล็กชุดใหม่เข้าแทนที่ ท่อพีวีซีใหม่จะวางไว้ที่ตำแหน่งสุดท้ายทุกครั้ง โดยขยับเลื่อนท่อพีวีซี 2 และท่อพีวีซี 3 ขึ้นมาแทนที่ตำแหน่งที่ 1 และ 2

**1.5 การหลอมเงินที่ได้จากการแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก**

ในกระบวนการหลอมเงินที่ได้จากการแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก ซึ่งมี 2 กรรมวิธีนั้น ผู้เขียนจะกล่าวถึง ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไขปัญหาของแต่ละกรรมวิธีเท่านั้น จะไม่ลงลึกถึงรายละเอียดของแต่ละกรรมวิธี ซึ่งมีตัวแปรต่างๆ มาเกี่ยวข้องมากมาย เนื่องจากไม่ใช่เป็นส่วนหลักของการวิจัยครั้งนี้

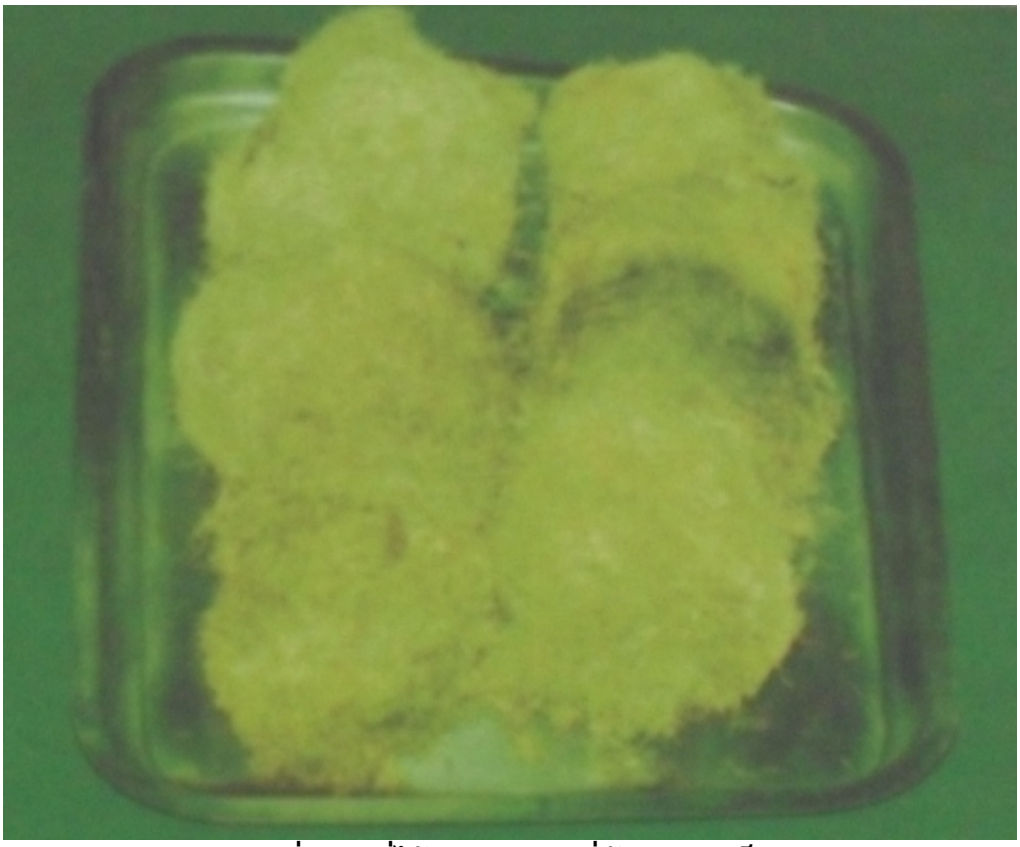
เงินที่ได้จากการแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก โดยทั่วไปจะมีฝอยเหล็กส่วนที่เกินปนอยู่ในอัตราส่วนที่ไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำยาล้างฟิล์มที่ใช้ และเงินที่ละลายอยู่ในน้ำยาล้างฟิล์มนั้นส่วนใหญ่ฝอยเหล็กส่วนเกิน จะมาจากท่อพีวีซีสุดท้าย มีปริมาณตั้งแต่ 200-400 กรัม เมื่อเทียบกับน้ำหนักที่แยกได้ โดยเฉลี่ยจะมีฝอยเหล็กประมาณร้อยละ 5-15 ดังนั้นก่อนที่จะหลอมเป็นเงินบริสุทธิ์ต้องผ่านขั้นตอนการแยกฝอยเหล็กก่อน ซึ่งมี 2 กรรมวิธี ตามแผนภูมิรูปที่ 3




**รูปที่ 3 แผนภูมิการหลอมเงินจากการแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก**

### 1.5.1 การแยกฝอยเหล็กด้วยสารละลายกรด

เงินปนฝอยเหล็กที่ดึงออกจากท่อพีวีซี ดังแสดงในรูปที่ 4 ต้องแยกส่วนน้ำยาล้างฟิล์มออกให้หมด และล้างด้วยน้ำหลายๆ ครั้ง จนแน่ใจว่าไม่มีส่วนยาล้างฟิล์มเหลืออีก จากนั้นนำไปแช่ในกรดกำมะถัน 10% (โดยน้ำหนัก) ดังแสดงในรูปที่ 5 และไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนกับสารละลายกรดกำมะถัน เพราะว่าปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น จะก่อให้เกิดความร้อนเองที่เรียกว่า “exothermic reaction” เมื่อฝอยเหล็กส่วนเกินละลายหมดแล้ว ให้กรองส่วนตะกอนเงินที่เหลือและล้างด้วยน้ำ จนหมดกรดกำมะถัน จากนั้นนำไปตากแห้ง หรืออบในตู้อบ ดังแสดงในรูปที่ 6 ก่อนนำไปหลอมที่เบ้า graphite ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส อาจเติม borax flux เล็กน้อย เพื่อแยกมลทินที่อาจหลงเหลืออยู่ให้เงินหลอมละลายและผิวหน้าน้ำโลหะใสจึงเทลงแบบพิมพ์



**รูปที่ 4 เงินที่ได้จากการแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก**

**รูปที่ 5 การละลายฝอยเหล็กส่วนเกินด้วยกรดมะถัน**

**รูปที่ 6 ผงเงินหลังจากแยกฝอยเหล็กด้วยกรดกำมะถันและอบแห้ง**

### 1.5.2 การแยกฝอยเหล็กโดยวิธีถลุงด้วยความร้อน

ทำการล้างและอบตะกอนเงินบนฝอยเหล็ก ให้แห้งเช่นเดียวกับวิธีการแยกฝอยเหล็กด้วยสารละลายกรด จากนั้นนำไปถลุงด้วยเบ้า graphite ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยเติม Oxidizing flux เพื่อแยกเหล็กออกจากเงิน ส่วนของเหล็กจะรวมตัวกับ flux เป็น slag ลอยขึ้นผิวหน้า จากนั้นเทส่วนน้ำยาโลหะเงินลงแบบฟิล์ม

## 2. การทดลองแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้า

### 2.1 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ในการทดลอง หาความสัมพันธ์ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อการแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้า โดยทดลองในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร ใช้น้ำยาล้างฟิล์มครั้งละ 500 มล. ใช้ขั้วบวกและขั้วลบอย่างละ 1 แผ่น ทำจาก stainless ขนาด 10 x 10 ซม. วางห่างกัน 5 ซม. โดยพื้นที่ส่วนที่จุ่มในน้ำยาล้างฟิล์ม เท่ากับ 9 x 10 ซม.$^2$ ทั้ง 2 แผ่น ก่อนการทดลองจะชั่งน้ำหนักแผ่นขั้วลบไว้ก่อน และเตรียมน้ำยาล้างฟิล์มผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 4 ชุด แต่ละชุดจะมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมอยู่ 10 20 30 และ 40 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ทำการทดลองชุดละ 7 ชั่วโมง โดยตั้งค่ากระแสไฟฟ้าไว้ที่ 0.1-0.12 แอมแปร์ และกวนน้ำยาตลอดเวลาด้วย magnetic stirrer เมื่อสิ้นสุดการทดลอง เก็บน้ำยาล้างฟิล์มวิเคราะห์หาปริมาณเงินที่เหลือ

### 2.2 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Cathode Current Density) ต่อการแยกเงินด้วยไฟฟ้า

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ขั้วลบกับการแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์ เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลง ของการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มเทียบกับอัตราการเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่กำหนดไว้ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับดัดแปลงใช้กับเซลล์ไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากการสร้างเซลล์ไฟฟ้าขนาดความจุน้ำยาล้างฟิล์มครั้งละ 100 ลิตร จะเน้นการดัดแปลงตัวเซลล์ไฟฟ้า จากวัสดุเหลือใช้ เช่น ถังสารเคมี 200 ลิตร ซึ่งจะมีราคาถูกและหาง่าย กว่าการสั่งทำขึ้นใหม่ ดังนั้นขนาดพื้นที่บวก-ลบ จะถูกกำหนดจากความเหมาะสมของรูปแบบเซลล์ ไฟฟ้าที่ดัดแปลงมา หรือที่สร้างขึ้นใหม่ ซึ่งต้องสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างขั้วบวกขั้วลบ และจำนวน แผ่นขั้วบวกกับขั้วลบ ที่เหมาะสมต่อความคล่องตัวของการหมุนเวียนน้ำยาล้างฟิล์มในเซลล์ขณะใช้งานด้วย

การทดลองชุดนี้ ใช้น้ำยาล้างฟิล์มผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มล. บรรจุในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร และใช้ magnetic stirrer ในการหมุนเวียนน้ำยา อัตราส่วนพื้นที่ขั้วบวกและขั้วลบเท่ากับ 1:1 กำหนดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ขั้วลบในการทดลองเป็น 5 ชุด คือ 1.4 2.8 3.4 4.4 และ 5.6 แอมแปร์ต่อซม.$^2$ เป็นเวลา 7 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดการทดลอง เก็บตัวอย่างน้ำยาล้างฟิล์ม วิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงปริมาณ Ag ในน้ำยา และทำการชั่งหาการทดลองเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โลหะเงินที่ขั้วลบเมื่อครบเวลา 2 5 และ 7 ชั่วโมงตามลำดับ

**2.3 การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ไฟฟ้า ขนาด 100 ลิตร ด้วยน้ำยาล้างฟิล์มขาว-ดำ**

เซลล์ไฟฟ้าที่ใช้การทดสอบ จะบรรจุน้ำยาล้างฟิล์มได้ครั้งละประมาณ 100 ลิตร และตัวอย่างน้ำยาล้างฟิล์มที่ได้จากโรงงานในแต่ละครั้ง จะมีปริมาณมากน้อยต่างกันเฉลี่ยโดยปริมาณ 400-900 ลิตร ดังนั้นในการทำงาน จะแบ่งตัวอย่างเป็นชุด ๆ ให้ลงตัวพอดีกับความจุของเซลล์ไฟฟ้า ซึ่งน้ำยาในแต่ละชุด อาจจะไม่ใช่ 100 ลิตร พอดี เช่น น้ำยา 860 ลิตร จะแบ่งเป็น 95 ลิตร 9 ชุด หรือ น้ำยา 360 ลิตร จะแบ่งเป็น 90 ลิตร 4 ชุดเป็นต้น แผ่น stainless ที่ใช้เป็นขั้วบวกและขั้วลบ มีขนาด 30 x 30 ซม. เท่ากัน โดยแบ่งเป็นขั้วบวก 5 แผ่น ขั้วลบ 4 แผ่น พื้นที่ของขั้วลบเท่ากับ 7,200 ซม.$^2$ และกวนน้ำยาภายในเซลล์ไฟฟ้าตลอดเวลาการทำงานด้วย “submersible pump” ในอัตราความเร็ว 900 ลิตรต่อชั่วโมง และ 1,400 ลิตรต่อชั่วโมง ไม่มีการใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 3.3-3.5 มิลลิแอมป์ต่อซม.$^2$ หรือประมาณ 25 แอมแปร์ ซึ่งเป็นตัวเลขที่ได้จากการ นำผลการทดลองของเซลล์ไฟฟ้าขนาด ½ ลิตร มาคำนวณขยายใช้กับเซลล์ขนาด 100 ลิตร

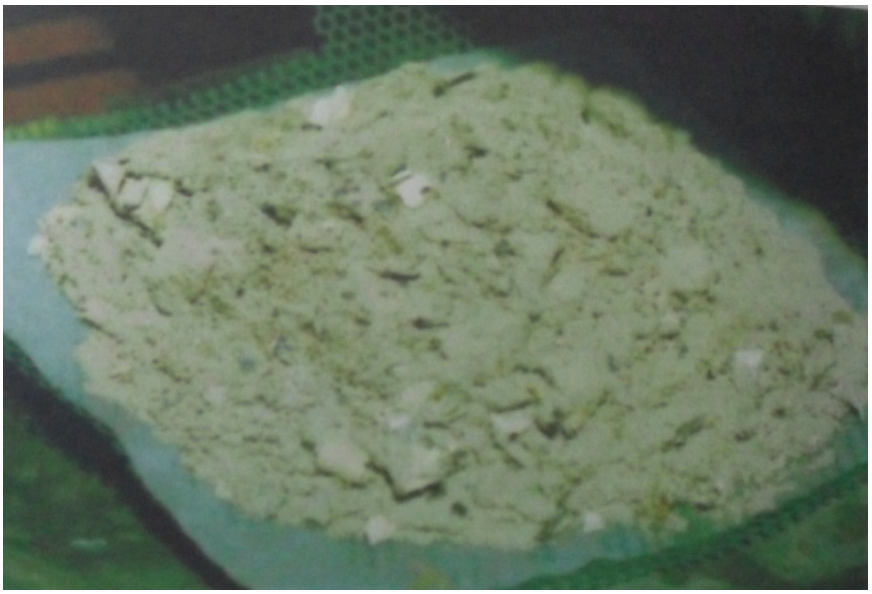
ในการตรวจสอบปริมาณเงินที่เหลือในน้ำยาล้างฟิล์ม ขณะเซลล์ไฟฟ้าทำงาน จะไม่ใช้วิธีวิเคราะห์ทางเคมี เนื่องจากต้องใช้เวลาหลายวัน แต่จะใช้วิธีทดสอบด้วยการจุ่มแผ่นทองแดง หรือลวดทองแดงขัดเงา ในน้ำยาล้างฟิล์มประมาณ 1 นาที ถ้าทองแดงที่จุ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเปิดเครื่องใช้ไฟฟ้าทำการเปลี่ยนน้ำยาล้างฟิล์มชุดใหม่เข้าแทนที่ และทำการแยกเงินด้วยไฟฟ้าต่อจนน้ำยาที่เตรียมไว้หมดลง จากนั้นจึงขูดลอกโลหะเงินจากขั้วลบ ล้างน้ำและอบให้แห้ง นำมาชั่งน้ำหนักก่อนหลอมเป็นแท่ง หรือทำเป็นเม็ดต่อไป

**2.4 การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ไฟฟ้าขนาด 100 ลิตร ด้วยน้ายาล้างฟิล์มสี**

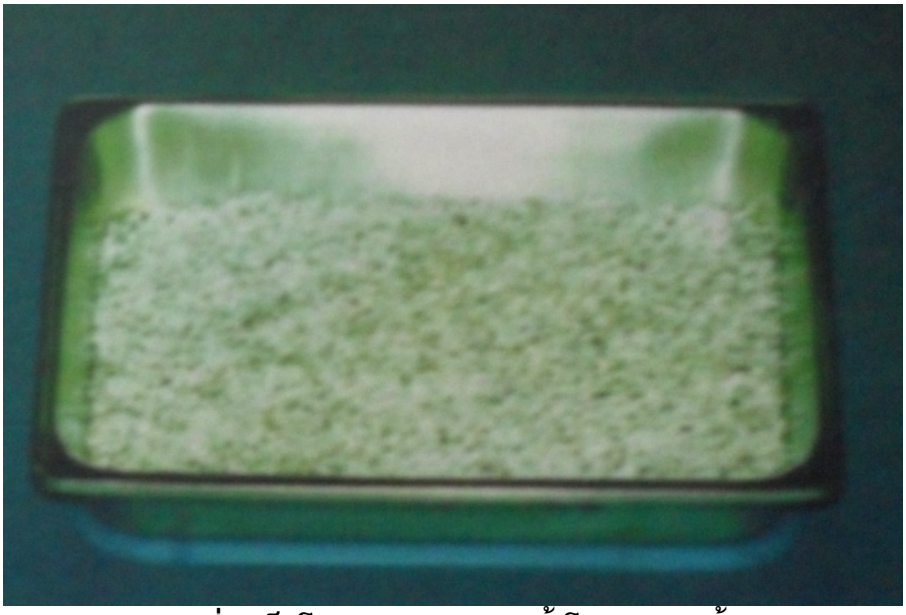
การทดลองชุดนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแตดต่างด้านประสิทธิภาพ การแยก เงินจากน้ำยาล้างฟิล์มขาว-ดำและน้ำยาล้างฟิล์มสี (รายละเอียดส่วนผสมทางเคมีและข้อควรระวังในการใช้น้ำยาล้างฟิล์มสี ดูในภาคผนวก) โดยจะเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้า 1 ยูนิต น้ำยาล้างฟิล์มชนิดใดจะสามารถแยกเงินได้มากกว่าหรือน้อยกว่ากัน รวมถึงลักษณะโลหะเงินที่เกาะบนขั้วลบและปริมาณเงินที่เหลือในน้ำยาล้างฟิล์ม

**2.5 การหลอมเงินที่ได้จากวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า**

โลหะเงินที่แยกด้วยวิธีไฟฟ้า จะมีทั้งลักษณะเป็นผงละเอียดจนถึงหยาบคล้ายแป้ง ดังแสดงในรูปที่ 7 ดังนั้นเงินที่แยกจากน้ำยาล้างฟิล์มแล้ว ต้องล้างให้สะอาด หมดคราบน้ำยาล้างฟิล์ม มิฉะนั้นในขั้นตอนอบแห้ง หรือ หลอมเป็นโลหะจะมีกลิ่นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดขึ้น จากนั้นทำการหลอมด้วยเบ้า graphite ที่ 1100 องศาเซลเซียส ใช้ borax flux เล็กน้อย เมื่อผงเงินหลอมละลาย เป็นน้ำโลหะ รอจนผิวหน้าน้ำโลหะใส จึงเทน้ำโลหะแบบพิมพ์ที่เตรียมไว้ หรือเทน้ำโลหะลงบนน้ำจะได้โลหะเงินเป็นเม็ดที่เรียกว่า “shot” ดังแสดงในรูปที่ 8



**รูปที่ 7 ผงเงินที่ออกจากขั้วลบ**



**รูปที่ 8 เม็ดโลหะเงินจากการเทน้ำโลหะเงินลงน้ำ**

**3. เปรียบเทียบการแยกเงินด้วยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็กและวิธีไฟฟ้า**

การแยกเงินด้วยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็กและวิธีไฟฟ้า ต่างมีข้อดีและข้อด้อยด้วยกันทั้ง 2 วิธี ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการตัดสินใจเลือกวิธีใดวิธีหนึ่ง หรือใช้ทั้ง 2 วิธีร่วมกัน ผู้เขียนจึงนำผลการทดลองทั้ง 2 วิธี มาสรุปเปรียบเทียบให้เห็นข้อดีและข้อด้อยของแต่ละวิธี เช่น ต้นทุนค่าอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ประสิทธิภาพการแยกเงิน ความบริสุทธิ์โลหะเงินที่แยกได้ รวมถึงผลกระทบสิ่งแวดล้อม

# ผลการทดลองและวิจารณ์

## 1. ผลการทดลองแยกเงินโดยวิธีแทนที่เวยฝอยเหล็ก

### 1.1 ผลกรดอาเซติก

จากการทดลองพบว่า กรดอาเซติกมีผลต่อการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มค่อนข้างน้อยมาก ซึ่งมีสาเหตุจากกรดอาเซติกเป็นกรดอ่อน ทำให้แตกตัวช้ากว่ากรดแก่ทั่ว ๆ ไป ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่างไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก แต่ก็ยังสามารถเห็นความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงอยู่บ้าง เช่น เมื่อปริมาณกรดอาเซติกเพิ่มขึ้นจาก 5 กรัมต่อลิตร เป็น 15 20 และ 25 กรัมต่อลิตร ปริมาณเงินในน้ำยาจะลดลงจาก 0.63 เหลือ 0.60 0.58 และ 0.50 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 นั่นแสดงให้เห็นว่า ฝอยเหล็กละลายได้เร็วขึ้น และปล่อยอิเล็กตรอนอิสระให้กับเงินไอออน เปลี่ยนแปลงโลหะเงินได้มากขึ้นด้วย แต่เมื่อพิจารณาการใช้ฝอยเหล็ก (ประมาณ 4 กรัม) แทบจะไม่เห็นความแตกต่าง หรือมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเงินในน้ำยาล้างฟิล์มเลย ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่า ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงชั่วโมงแรกๆ เกือบหมดแล้ว

**ตารางที่ 1 ผลของกรดอาเซติตต่อการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มโดยวิธรีแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก**

[ข้อมูลจากการทดลองใช้ Ag เริ่มต้น 4.5 กรัม/ลิตร แช่ฝอยเหล็ก 3 ชั่วโมง ไม่มีการกวนน้ำยา]

| กรดอาเซติก (มล./ลิตร) | Ag ที่เหลือในน้ำยา (กรัม/ ลิตร) | น้ำหนักฝอยเหล็กที่ใช้ (กรัม) |
|---|---|---|
| 5 | 0.63 | 4.0 |
| 15 | 0.60 | 4.8 |
| 20 | 0.58 | 4.1 |
| 25 | 0.50 | 4.2 |

### 1.2 ผลของการกวนน้ำยาล้างฟิล์ม

เมื่อมีการกวนน้ำยาล้างฟิล์ม ทั้งแบบกวนทุกชั่วโมง และกวนแบบหมุนเวียน พบว่าปริมาณเงินในน้ำยาล้างฟิล์ม จะเหลือน้อยกว่า การแช่ฝอยเหล็กในน้ำยาสภาพนิ่งอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในตารางที่ 2 และการกวนแบบหมุนเวียน ให้ผลการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มดีกว่าการกวนทุกชั่วโมงเล็กน้อย

กระบวนการแยกเงินด้วยฝอยเหล็กนั้น จะเกิดที่ผิวนอกของฝอยเหล็กก่อน โดยผิวของฝอยเหล็กจะละลายลงในน้ำยาล้างฟิล์ม ขณะที่เงินในน้ำยาล้างฟิล์ม จะเปลี่ยนเป็นโลหะเงินเกาะบนผิวฝอยเหล็ก ซึ่งการยึดเกาะจะไม่แน่น แต่จะคลุมผิวของฝอยเหล็กไว้ ทำให้พื้นที่ผิวของฝอยเหล็กที่จะแทนที่เงินในน้ำยาล้างฟิล์มลดน้อยลง ดังนั้นเมื่อมีการกวนสารละลาย เงินที่เกาะอยู่บนฝอยเหล็กจะหลุดออก ทำให้ฝอยเหล็กมีพื้นที่ผิวมากขึ้น สามารถเริ่มกระบวนการแทนที่ได้อีก ส่งผลให้การแยกเงินเกิดได้เร็วกว่า

**ตารางที่ 2 ผลของการกวนน้ำยาล้างฟิล์ม**

[ข้อมูลจากการทดลองใช้ Ag เริ่มต้น 4.5 กรัม/ลิตร]

| รายละเอียด | Ag ที่เหลือในน้ำยา (กรัม/ลิตร) | น้ำหนักฝอยเหล็กที่ใช้ (กรัม) |
|---|---|---|
| ไม่มีการกวนสารละลาย | 0.5 | 4.2 |
| กวนละลายทุกชั่วโมง | 0.13 | 4.0 |
| กวนสารละลายแบบหมุนเวียน 50 มล. / นาที | 0.09 | 4.0 |

### 1.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพฝอยเหล็ก

ในการเก็บตัวอย่างที่ท่อพีวีซี 1 และท่อพีวีซี 2 เมื่อครบ 2 ชั่วโมง นั่นหมายถึงว่าน้ำยาปริมาตรประมาณ 30 ลิตร ได้ผ่านฝอยเหล็กในท่อพีวีซี 1 และ 2 เรียบร้อยแล้ว ปริมาณเงินที่เหลือในน้ำยาล้างฟิล์ม ค่อนข้างน้อยมาก คือ 0.003 และ 0.004 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 ดังนั้นถ้ามีน้ำยาล้างฟิล์มที่มีเงินละลายอยู่ 4.5 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 ลิตร เราสามารถใช้ฝอยเหล็กบรรจุท่อพีวีซีเพียงอย่างเดียว แยกเงินออกมาได้มากกว่าร้อยละ 99 ในอัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิล์มผ่านฝอยเหล็ก 15 ลิตรต่อชั่วโมง และสามารถเพิ่มปริมาตรน้ำยาล้างฟิล์มจนถึง 75 ลิตร ฝอยเหล็กในท่อพีวีซี ท่อเดียวก็ยังแยกเงินได้มากกว่าร้อยละ 99 เช่นกัน แต่ปริมาณเงินในน้ำยาล้างฟิล์มจะเหลือมากกว่าเดิม คือ 0.014 กรัมต่อลิตร

เมื่อเพิ่มน้ำยาล้างฟิล์มเป็น 100 ลิตร ฝอยเหล็กในท่อพีวีซี 1 จะแยกเงินได้ลดลงเหลือเพียงร้อยละ 94.9 (0.23 กรัมต่อลิตร) ดังนั้นถ้ามีน้ำยาล้างฟิล์มที่มีปริมาณเงินประมาณ 4.5 กรัมต่อลิตร ในปริมาตรมากกว่า 200 ลิตรขึ้นไป ต้องใช้ฝอยเหล็กมากกว่า 2 ท่ออาจต่อเป็น 3 ท่อเรียงต่อกันหรือต่อเพียง 2 ท่อ และรอให้น้ำยาล้างฟิล์มไหลผ่านจนครบ 75 ลิตร จึงถอดท่อพีวีซี 1 ออกและเลื่อนท่อพีวีซี 2 ขึ้นมาแทนที่ พร้อมทั้งติดตั้งท่อพีวีซี 3 ซึ่งเป็นตัวใหม่เข้ามาแทนที่ท่อพีวีซี 2 จะทำการสับเปลี่ยนเช่นนี้เมื่อน้ำยาล้างฟิล์ม ไหลผ่าน ครบ 150 300

450 600 750 และ 900 ลิตร ตามลำดับ จึงจะสามารถควบคุมประสิทธิภาพการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม ได้มากกว่าร้อยละ 99

**ตารางที่ 3 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณเงินในน้ำยาล้างฟิล์มหลังผ่านฝอยเหล็กในท่อพีวีซี**

[ข้อมูลจากการทดลองใช้ Ag เริ่มต้น 4.5 กรัม/ลิตร อัตราการไหลของน้ำยาผ่านฝอยเหล็ก 15 ลิตร/ชั่วโมง]

| ฝอยเหล็ก | Ag ในน้ำยาล้างฟิล์มหลังผ่านฝอยเหล็ก ในท่อพีวีซี (กรัม / ลิตร) | | |
|---|---|---|---|
| | ชั่วโมงที่ 2<br>30 ลิตร | ชั่วโมงที่ 5<br>75 ลิตร | ชั่วโมงที่ 7<br>100 ลิตร |
| ท่อพีวีซี 1 | 0.008 | 0.014 | 0.230 |
| ท่อพีวีซี 2 | 0.004 | 0.012 | 0.014 |

**1.4 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์อัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิล์มต่อปริมาณการใช้ฝอยเหล็ก**

จากผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าอัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิล์มผ่านท่อพีวีซีฝอยเหล็กที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกเงิน กล่าวคือ สามารถแยกเงินได้มากกว่าร้อยละ 99 แต่เมื่อพิจารณาการใช้ฝอยเหล็กเทียบกับโลหะเงินที่แยกได้ จะพบความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด ในช่วงอัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิล์ม 15-30 ลิตรต่อชั่วโมง ฝอยเหล็ก 1 กรัม จะแยกเงินได้ 2.3-2.5 กรัม ขณะที่อัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิล์มเพิ่มขึ้นเป็น 40 ลิตรต่อชั่วโมง ฝอยเหล็ก 1 กรัมแยกเงินได้เพียง 1.8 กรัมเท่านั้น การที่ฝอยเหล็กแยกเงินได้น้อยลง หรืออีกนัยหนึ่งถูกใช้มากขึ้น เมื่ออัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิล์มเพิ่มขึ้นนั้น อาจมีสาเหตุจากเวลาที่น้ำยาล้างฟิล์มสัมผัสกับฝอยเหล็กลดน้อยลงด้วย

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างฝอยเหล็กและเงินในน้ำยาล้างฟิล์ม จะเกิดที่บริเวณผิวนอกของฝอยเหล็กก่อน สังเกตจากเมื่อถอดฝอยเหล็กในท่อพีวีซีออกมาดู จะพบว่า ส่วนฝอยเหล็กที่เปลี่ยนเป็นเงินจะอยู่บริเวณส่วนเปลือกนอกเท่านั้น เมื่อเคาะหรือเขย่าแรง ๆ จะหลุดออก มองเห็นส่วนฝอยเหล็กด้านในที่ยังมีสภาพเหมือนใหม่ และจะมีลักษณะเช่นนี้ตลอดตามความยาวของท่อพีวีซี เมื่อเปรียบเทียบกับฝอยเหล็กที่ใช้ในช่วงอัตราการไหล 15-30 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าฝอยเหล็กในส่วนล่างของท่อพีวีซีจะเปลี่ยนเป็นเงินทั้งหมด และอัตราการเปลี่ยนเป็นเงินจะลดลงตามแนวยาวของท่อพีวีซีจากส่วนล่างสู่ส่วนบนตามปรกติ ดังนั้นเมื่อมีอัตราการไหลเกินจุดสมดุล จะสิ้นเปลืองฝอยเหล็กมากขึ้น

ในการเพิ่มประสิทธิภาพ การใช้ฝอยเหล็กให้สมบูรณ์ตามทฤษฎี คือ ฝอยเหล็ก 1 กรัม ควรแยกเงินได้ 4 กรัม สามารถทำได้ด้วยการเพิ่มเวลาให้น้ำยาล้างฟิล์มสัมผัสฝอยเหล็กนานขึ้น

ซึ่งทำได้ โดยการลดอัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิล์มลงให้ต่ำกว่า 10 ลิตรต่อชั่วโมง ในกรณีต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานฝอยเหล็ก ให้สามารถแยกเงินได้ปริมาณมากขึ้น ที่อัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิล์ม 40 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถทำได้โดยการต่อท่อพีวีซีเพิ่มขึ้นเป็น 5 หรือ 6 ท่อ วิธีนี้เหมาะกับการแยกน้ำยาที่มีปริมาณมากกว่า 1000 ลิตรขึ้นไป ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิล์ม จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนท่อพีวีซีที่ใช้ ซึ่งการคำนวณทางทฤษฎีค่อนข้างยุ่งยาก โดยเฉพาะถ้าความเข้มข้นของเงินในน้ำยาล้างฟิล์มไม่คงที่ สำหรับบุคคลทั่วไป ขอแนะนำให้ใช้วิธีตรวจสอบด้วยตัวเองที่ผู้เขียนใช้อย่างได้ผลดี หรืออาจเรียกว่าเป็นเทคโนโลยีชาวบ้านก็ได้ คือ กำหนดอัตราการไหล ของน้ำยาล้างฟิล์มที่ต้องการก่อน ตามสภาพเอื้ออำนวยของอุปกรณ์ที่สามารถหาได้เช่นปั๊มน้ำทั่วไปที่ให้ความเร็วคงที่ (จำนวนลิตรต่อชั่วโมง) จากนั้น ติดตั้งท่อพีวีซีบรรจุฝอยเหล็ก 2-3 ท่อก่อน เมื่อเริ่มเดินเครื่องคอยตรวจน้ำยาล้างฟิล์มที่ออกจากท่อพีวีซีสุดท้ายด้วยแผ่นทองแดงทุกชั่วโมง และตรวจสอบสภาพฝอยเหล็กในท่อพีวีซีที่ 1 ว่าหมดสภาพหรือยัง ตามวิธีตรวจสอบดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น ณ จุดสมดุล ฝอยเหล็กในท่อพีวีซี 1 ต้องหมดสภาพการใช้งาน ขณะที่น้ำยาล้างฟิล์มเมื่อผ่านท่อพีวีซีสุดท้ายยังไม่มีปฏิกิริยากับแผ่นทองแดง ถ้าน้ำยาล้างฟิล์มที่ผ่านฝอยเหล็กในท่อพีวีซีสุดท้ายมีปฏิกิริยากับแผ่นทองแดงและฝอยเหล็กในท่อพีวีซีที่ 1 ยังไม่หมดสภาพการใช้งาน ต้องติดตั้งท่อพีวีซีเพิ่มจนกว่าจะพบจุดสมดุลนั้น

**ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์อัตราการไหลน้ำยาล้างฟิล์มต่อปริมาณการใช้ฝอยเหล็ก**

| อัตราการไหลน้ำยาล้างฟิล์ม (ลิตร/ชั่วโมง) | น้ำหนักฝอยเหล็ก (กรัม) x จำนวนท่อพีวีซี | ปริมาตรน้ำยา (ลิตร) | Ag ในน้ำยาล้างฟิล์มเริ่มต้น (กรัม/ลิตร) | น้ำหนักโลหะเงินที่แยกได้ (กรัม) | เฉลี่ยฝอยเหล็ก 1 กรัม แยกเงินได้ (กรัม) |
|---|---|---|---|---|---|
| 15 | (500)5 | 850 | 6.8 | 5844 | 2.3 |
| 30 | (500)3 | 680 | 5.4 | 3694 | 2.5 |
| 40 | (500)3 | 460 | 5.7 | 2626 | 1.8 |

### 1.5 ผลการหลอมเงินที่ได้จากการแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก

#### 1.5.1 ผลการแยกฝอยเหล็กด้วยสารละลายกรด

ในการละลายฝอยเหล็กด้วยกรดกำมะถัน โดยทั่วไปจะเกิดแก๊สไฮโดรเจนอย่างเดียวซึ่งมีกลิ่นฉุน แต่ฝอยเหล็กส่วนเกินจากการแทนที่เงินในน้ำยาล้างฟิล์ม จะมีบางส่วนโดยเฉพาะที่ผิวทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์เกิดเป็นเหล็กซัลไฟด์ เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดกำมะถันจะเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ยิ่งทำให้มีปัญหามากขึ้น วิธีแก้ที่ดีที่สุดคือพยายามให้ฝอยเหล็กเหลือน้อย

ที่สุดหรือละลายฝอยเหล็กในตู้ควัน ที่มีระบบฟอกไอกรดเป็นวิธีที่ดีที่สุดแต่ถ้าหาไม่ได้จริง ๆให้ทำในที่โล่งแจ้งมีอากาศถ่ายเทไม่รบกวนชาวบ้าน

**1.5.2 ผลการแยกฝอยเหล็กโดยวิธีถลุงด้วยความร้อน**

ปัญหาที่พบส่วนใหญ่มี 2 เรื่อง คือการแยกส่วนระหว่างโลหะเงินและเหล็กไม่สมบูรณ์ มีเงินบางส่วนปนอยู่ในชั้นเหล็ก สันนิษฐานว่าเกิดจาก flux ไม่พอหรือการถลุงที่อุณหภูมิสูงเกินไปทำให้เหล็กบางส่วนละลายปนกับเงินแก้ไขโดยต้องเติม flux เพิ่ม หรือใช้ถลุงที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเงิน คือ ประมาณ 900-950 องศาเซลเซียส รอจนฝอยเหล็กเปลี่ยนเป็นเหล็กออกไซด์ก่อน จึงเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1100 องศาเซลเซียส อีกปัญหาหนึ่ง คือมีส่วนของเงินละลายปนอยู่ในชั้น slag (สีขาวขุ่น) ซึ่งเกิดจากการใช้ flux ที่มีตัวเพิ่มออกซิเจน เช่น โปแตสเซียมไนเตรตมากเกินไป แก้ไขโดยเพิ่มตัวลดออกซิเจน เช่น โซเดียมคาร์บอเนต

**2. ผลการทดลองแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้า**

**2.1 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์**

การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำยาล้างฟิล์ม ทำให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแยกเงินให้เกิดได้เร็วขึ้น แต่ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณที่ใช้ด้วย เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนการใช้สารดังกล่าวจาก 0 เป็น 10 20 และ 30 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 กรัมต่อลิตร จะไม่เห็นความแตกต่างของอัตราการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มในระยะเวลา 7 ชั่วโมงแต่เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพิ่มขึ้นเป็น 20 และ 30 กรัมต่อลิตร อัตราการแยกเงินจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ดังแสดงในตารางที่ 5

ดังนั้นในทางปฏิบัติ เมื่อขยายเซลล์ไฟฟ้า สำหรับใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว มี 2 ทางเลือก คือ ไม่ต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เลย แต่ต้องเพิ่มระยะเวลาในการแยกด้วยไฟฟ้าออกไปจนกว่าเงินในน้ำยาล้างฟิล์มลดลงมาถึงค่าหนึ่งที่สามารถปล่อยทิ้งได้ หรืออีกทางหนึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20-30 กรัมต่อลิตร เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการแยกด้วยไฟฟ้าลง ในการพิจารณาว่าวิธีใดคุ้มค่ากว่ากันจะเปรียบเทียบระหว่างราคาสารเคมีที่ใช้รวมความยุ่งยากในการผสมสารเคมีกับค่าไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นด้วย

**ตารางที่ 5 ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการแยกเงินด้วยไฟฟ้า**

[ข้อมูลการทดลองใช้ น้ำยาล้างฟิล์ม 0.5 ลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ขั้วลบ 3.4 มิลลิแอมป์/ซม.$^2$ พ.ท.ขั้วลบ 9 x 10 ซม.$^2$]

| โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรัม/ลิตร | นน.โลหะเงินที่เกาะบนขั้วลบ ในช่วงเวลาที่กำหนด (กรัม) | | | ปริมาตรร Ag ที่เหลือในน้ำยา (กรัม/ลิตร) | อัตราการแยกเงิน (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| | 2 ซม. | 5 ซม. | 7 ซม. | | |
| 0 | 1.00 | 1.75 | 2.00 | 0.50 | 88.90 |
| 10 | 1.25 | 1.75 | 2.00 | 0.48 | 89.30 |
| 20 | 1.50 | 2.00 | 2.25 | 0.07 | 98.40 |
| 30 | 1.60 | 2.25 | 2.25 | 0.07 | 98.40 |

**2.2 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Cathode Current Density) ต่อการแยกเงินด้วยไฟฟ้า**

จากผลการทดลองในตารางที่ 6 พบว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจาก 1.4 เป็น 2.8 มิลลิแอมแปร์ต่อซม.$^2$ หรือเพิ่มเป็น 2 เท่า มีผลต่ออัตราการแยกเงินที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 12 จาก 76.7 เป็น 88.9 ซึ่งเป็นไปตามกฎ Faraday's Laws (H.Ewens, 1966) ที่กล่าวว่า น้ำหนักโลหะที่แยกจากสารละลายเกาะติดบนขั้วเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าและระยะเวลา นั่นหมายถึงถ้าใช้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น หรือเพิ่มระยะเวลาในการแยกด้วยไฟฟ้าเพิ่มขึ้น น.น.โลหะที่เกาะบนขั้วลบจะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขึ้นเป็นอีกเป็น 3.4 มิลลิแอมแปร์ต่อซม.$^2$ อัตราการแยกเงินจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 98.4 และเริ่มคงที่ แม้ว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะถูกเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 5.6 มิลลิแอมแปร์ต่อซม.$^2$ ทั้งนี้มีสาเหตุจากการใช้กระแสไฟฟ้ามากไป จนเลยจุดที่เปลี่ยนเงินไอออนเป็นโลหะเงิน กระแสไฟฟ้าส่วนที่เกินจะไปทำหน้าที่แยกน้ำด้วยไฟฟ้าแทน เกิดเป็นออกซิเจนที่ขั้วบวกและเกิดไฮโดรเจนที่ขั้วลบแทน ดังนั้นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มชนิดนี้ ไม่ควรเกิน 3.4 มิลลิแอมแปร์ต่อซม.$^2$ ค่าความหนาแน่นการะแสไฟฟ้าอาจเปลี่ยนแปลงได้อีกเล็กน้อย ถ้าส่วนผสมน้ำยาล้างฟิล์มและความเร็วในการกวนน้ำยาภายในเซลล์ไฟฟ้าต่างกัน ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อสภาพการนำไฟฟ้าที่มากขึ้นหรือลดลง

**ตารางที่ 6 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อการแยกเงินด้วยวิธีไฟฟ้า**
[น้ำยาล้างฟิล์ม 0.5 ลิตร NaOH 20 กรัม / ลิตร พ.ท.ขั้วลบ 9 x 10 ซม.$^2$]

| ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ (มิลลิแอมแปร์ / ซม.$^2$) | นน.โลหะเงินที่เกาะบนขั้วลบในช่วงเวลาที่กำหนด | | | ปริมาณ Ag ที่เหลือในน้ำยา (กรัม/ลิตร) | อัตราการแยกเงินจากน้ำยา ( % ) |
|---|---|---|---|---|---|
| | 2 ซม. | 5 ซม. | 7 ซม. | | |
| 1.4 | 0.75 | 1.50 | 1.75 | 1.05 | 76.70 |
| 2.8 | 0.75 | 1.75 | 2.00 | 0.50 | 88.90 |
| 3.4 | 1.50 | 2.00 | 2.25 | 0.07 | 98.40 |
| 4.4 | 1.50 | 2.00 | 2.25 | 0.07 | 98.40 |
| 5.6 | 1.50 | 2.00 | 2.25 | 0.07 | 98.40 |

**2.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ไฟฟ้า ขนาด 100 ลิตร ด้วยน้ำยาล้างฟิล์มขาว-ดำ**

การแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มชนิดขาว-ดำ ที่มีอัตราการกวนน้ำยาภายในเซลล์ไฟฟ้า 900 ลิตรต่อชั่วโมง จากน้ำยา 5,360 ลิตร สามารถแยกเงินได้ 29 กิโลกรัม ใช้พลังงานไฟฟ้า 73.2 ยูนิต หรือเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้า 1 ยูนิต แยกเงินได้ 396 กรัม ขณะที่การแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มที่มีอัตราการกวนน้ำยาภายในเซลล์ไฟฟ้า 1,400 ลิตรต่อชั่วโมง จากน้ำยา 1,200 ลิตร สามารถแยกเงินได้ 4 กิโลกรัม ใช้พลังงานไฟฟ้า 8.2 ยูนิต หรือเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้า 1 ยูนิต แยกเงินได้ 487 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 7 ในทางทฤษฎีอัตราการกวนน้ำยาภายในเซลล์ไฟฟ้ายิ่งสูง ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น มีผลให้ค่าความต้านทานลดลง ดังนั้นเมื่อตั้งกระแสไฟฟ้าคงที่ 25 แอมแปร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าจึงลดลงจาก 3.5 เป็น 2.5 โวลต์ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อพลังงานไฟฟ้าที่แยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มจะลดลงด้วย

**ตารางที่ 7 ผลการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มขาว-ดำ ด้วยเซลล์ไฟฟ้า ขนาดความจุ 100 ลิตร**

| Ag เริ่มต้น (กรัม/ลิตร) | ปริมาตร (ลิตร) | ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์/ซม.$^2$) | แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์) | จำนวนชั่วโมง (ชม.) | พลังงานไฟฟ้า (ยูนิต) | โลหะเงินที่แยกได้ (กก.) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5.1 | 860 | 3.30 | 3.5 | 110 | 11.1 | 4.42 |
| 5.2 | 800 | 3.50 | 3.5 | 105 | 11.4 | 4.20 |
| 5.4 | 480 | 3.33 | 3.5 | 56 | 6.8 | 2.60 |
| 5.2 | 400 | 3.20 | 3.5 | 57 | 5.8 | 2.10 |
| 5.0 | 500 | 3.20 | 3.0 | 56 | 5.8 | 2.50 |
| 7.0 | 360 | 3.30 | 3.5 | 50 | 5.2 | 2.50 |
| 6.6 | 500 | 3.50 | 3.5 | 82 | 8.5 | 3.30 |
| 5.2 | 420 | 3.50 | 3.5 | 61 | 6.4 | 2.20 |
| 5.3 | 660 | 3.50 | 3.5 | 88 | 8.6 | 3.50 |
| 4.5 | 380 | 3.50 | 3.5 | 35 | 3.6 | 1.70 |
| รวม | 5360 | | | 700 | 73.2 | 29.00 |

เฉลี่ย พลังงานไฟฟ้า 1 ยูนิต แยกโลหะเงินได้ = 396 กรัม

หมายเหตุ : อัตราการกวนน้ำยาภายในเซลล์ไฟฟ้า = 900 ลิตรต่อชั่วโมง

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 3.6 | 500 | 3.30 | 2.5 | 40 | 4.3 | 1.80 |
| 3.1 | 700 | 3.30 | 2.5 | 56 | 6.1 | 2.20 |
| รวม | 1,200 | | | 96 | 10.4 | 4.00 |

เฉลี่ยพลังงานไฟฟ้า 1 ยูนิต แยกโลหะเงินได้ = 487 กรัม

หมายเหตุ : อัตราการกวนน้ำยาภายในเซลล์ไฟฟ้า = 1,400 ลิตรต่อชั่วโมง

### 2.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ไฟฟ้าขนาด 100 ลิตร ด้วยน้ำยาล้างฟิล์มสี

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 8 พบว่าการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มสีด้วยเซลล์ไฟฟ้า ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มขาว-ดำ คือ พลังงานไฟฟ้า 1 ยูนิต สามารถแยกเงินได้มากถึง 700 กรัม ขณะที่ฟิล์มขาว-ดำ พลังงานไฟฟ้า 1 ยูนิตแยกได้ 487 กรัม ทั้งนี้อาจมาจากส่วนผสมทางเคมีของน้ำยาล้างฟิล์มสี มีสารเคมีหลายอย่างที่ส่งเสริมให้การนำไฟฟ้าสูงกว่า จึงแยกเงินได้เร็วกว่า แต่มีข้อเสียที่ไม่สามารถแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มสีให้เหลือต่ำกว่า 0.01 กรัมต่อลิตร เช่นเดียวกับน้ำยาล้างฟิล์มขาว-ดำได้ เนื่องจาก

ชั่วโมงที่ 26 (ปริมาณเงินในน้ำยาล้างฟิล์มสีเหลือ 0.2 กรัมต่อลิตร) เกิดการแตกตัวของสารประกอบซัลไฟด์กลายเป็นสารประกอบซัลไฟด์เคลือบโลหะเงินที่ขั้วลบจนเป็นสีดำ ส่งผลให้ไม่สามารถใช้วิธีไฟฟ้าแยกเงินจากน้ำยาต่อไปอีกได้ ถ้าต้องการให้เงินในน้ำยาล้างฟิล์มลดต่ำกว่า 0.01 กรัมต่อลิตร ต้องลดกระแสไฟฟ้าลงและต้องเพิ่มระยะเวลาอีกมาก ซึ่งจะไม่คุ้มค่าในเชิงพาณิชย์ วิธีที่ดีที่สุดต้องนำน้ำยาล้างฟิล์มนี้แยกเงินต่อด้วยวิธีการแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก

**ตารางที่ 8 ผลการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มสีด้วยเซลล์ไฟฟ้า ขนาดความจุ 100 ลิตร**
[ทำการทดลองใช้น้ำยาล้างฟิล์มสี 100 ลิตร แรงเคลื่อนไฟฟ้า 2.5 โวลต์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3.4 มิลลิแอมป์/ซม.$^2$ อัตราการกวนน้ำยาภายในเซลล์ไฟฟ้า 1,400 ลิตรต่อชั่วโมง]

| ระยะเวลา (ชั่วโมง) | Ag ในน้ำยาล้างฟิล์ม (กรัม/ลิตร) | อัตรการแยกเงิน (%) |
|---|---|---|
| 0 | 13.20 | 0.0 |
| 3 | 10.96 | 17.0 |
| 6 | 8.67 | 34.3 |
| 12 | 4.83 | 63.4 |
| 24 | 0.47 | 96.4 |
| 26 | 0.20 | 98.5 |
| พลังงานไฟฟ้า 1 ยูนิต แยกโลหะเงินได้ = 700 กรัม | | |

**2.5 ผลการหลอมเงินที่ได้จากวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า**

ปัญหาที่พบบ่อย คือ โลหะเงินที่หลอมได้มีสีเหลืองทองไม่ขาวบริสุทธิ์ เนื่องจากมีกำมะถันจากน้ำยาล้างฟิล์มปนอยู่ในผงเงินที่เกาะบนขั้วลบ และจะเกิดเฉพาะการหลอมเงินด้วยเตาไฟฟ้าที่มีฝาครอบป้องกันการศูนย์เสียความร้อนเท่านั้น เนื่องจากกำมะถันในเงินไม่สามารถทำปฏิกริยากับออกซิเจนในอากาศได้ วิธีแก้ไขสามารถทำได้ดังนี้ ใช้ไม้กวนน้ำโลหะเพื่อไล่กำมะถันให้ออกมาในรูปแก๊ซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ หรือในขั้นตอนการอบแห้ง ให้เผาผงเงินบนแผ่นเหล็กเพื่อไล่กำมะถันออกให้หมดก่อน สังเกตจากการเปลี่ยนสีของผงเงินจากสีเทาคล้ำเป็นสีขาว เมื่อกำมะถันสลายตัวเป็นแก๊ซซัลเฟอร์ไดออกไซด์หมดแล้ว

**3. ผลการเปรียบเทียบการแยกเงินด้วยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็กและวิธีไฟฟ้า**

ในด้านค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ คำนวณจากการแยกเงิน 1 กิโลกรัม ในน้ำยาล้างฟิล์ม ขาว-ดำ ที่มีเงินละลายอยู่ 4.5 กรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยไม่ต่างกันมากนักกับวิธีการแยกเงินทั้ง 2 วิธีดังแสดงตารางที่ 9 แต่เพื่อพิจารณาถึงต้นทุนค่าวัสดุอุปกรณ์ของทั้งสองวิธีแล้ว พบว่า

อุปกรณ์การแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้าจะมีราคาสูงกว่า โดยเฉพาะค่าเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรงซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง แต่ถ้าสามารถหาเครื่องมือสองหรือของเก่าได้จะมีราคาถูกลงมาก โดยเฉพาะแถวสะพานเหล็กหรือคลองถม ค่าอุปกรณ์ที่ค่อนข้างสูงของวิธีแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้าอาจเป็นข้อด้อยของวิธีนี้แต่ก็มีจุดเด่นที่ชดเชยกันได้ คือ ผงเงินที่แยกจากขั้วลบ สามารถหลอมเป็นแท่งโลหะเงินหรือเทเป็นเม็ดได้เลย ขณะที่วิธีการแยกเงินโดยแทนที่ด้วยฝอยเหล็กต้องผ่านการกำจัดฝอยเหล็กออกก่อน ซึ่งกรรมวิธีการกำจัดฝอยเหล็ก ทั้งการละลายตัวด้วยกรดกำมะถันหรือถลุงแยกโดยตรง จะมีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเรื่องแก๊ซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊ซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จำเป็นต้องมีระบบป้องกันเข้ามาเพิ่มเติม

ในด้านความบริสุทธิ์ของโลหะเงินที่แยกได้ทั้ง 2 วิธี ค่อนข้างสูงถึง 99% เหมือนกัน แต่ประสิทธิภาพในการแยกเงินของวิธีการแทนที่ด้วยฝอยเหล็กจะสูงกว่าวิธีไฟฟ้าเล็กน้อยและสามารถใช้ได้ดีกับน้ำยาล้างฟิล์ม ทั้งชนิดขาว-ดำ และฟิล์มสี สำหรับผู้ที่คิดจะลงทุนในธุรกิจนี้ ผู้เขียนแนะนำให้ใช้ทั้ง 2 วิธีร่วมกัน โดยติดตั้งอุปกรณ์แยกเงินด้วยไฟฟ้า จากอุปกรณ์มือสองและติดตั้งท่อพีวีซีบรรจุฝอยเหล็กเพียงท่อเดียว รวมแล้วค่าอุปกรณ์จะอยู่ประมาณ 8,000-9,000 บาท น้ำยาล้างฟิล์มที่ผ่านการแยกด้วยไฟฟ้าแล้ว ก่อนปล่อยทิ้งจะผ่านฝอยเหล็กอีกครั้ง เพื่อดักจับเงินส่วนที่เหลือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพระบบการแยกเงินให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ตารางที่ 9 แสดงผลการเปรียบเทียบการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม โดยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็กและวิธีไฟฟ้า

| การแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม ด้วยวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็ก | | การแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม ด้วยวิธีไฟฟ้า | | |
|---|---|---|---|---|
| • ค่าอุปกรณ์ | | | | |
| 1. ท่อพีวีซี ขนาด 4 นิ้ว ยาว 24 นิ้ว 3 ท่อ (รวมค่าเชื่อมฐานล่าง) | 400 บาท | 1. ถังบรรจุสารเคมีที่ทำด้วยพลาสติก ขนาด 200 ลิตร 1 ใบ | 500 | บาท |
| 2. ท่อพีวีซี ขนาด ¾ นิ้ว ใช้ทั้งระบบ | 60 บาท | 2. แผ่น stainless ขนาด 30x35x0.2 ซม. จำนวน 9 แผ่น | 2,000 | บาท |
| 3. ปั๊ม (submersible pump) ขนาด 18 w (900 L / hr.) | 400 บาท | 3. เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นกระแสตรง ขนาด 12 โวลต์ 30 แอมแอร์ | 30,000 | บาท |
| | | 4. ปั๊ม (submersible pump) ขนาด 18 w (900–1,400 L/ hr.) | 400 | บาท |
| รวม | 860 บาท | | 32,900 | บาท |
| • ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการแยกเงิน 1 กิโลกรัม จากน้ำยา 250 ลิตร [Ag = 4.5 กรัม/ลิตร (ไม่รวมค่าหลอม)] | | | | |
| 1. ฝอยเหล็ก 400 กรัม | 20 บาท | 1. ค่าใช้จ่ายจากเครื่องแปลงไฟฟ้า 3.5 V 25 Amp 16 ชั่วโมง 3 ชุด เท่ากับ 4.2 ยูนิต (ยูนิตละ 3 บาท) | 12.6 | บาท |
| 2. ค่าไฟฟ้าจากปั๊ม 17 ชั่วโมง เท่ากับ 0.3 ยูนิต คิดค่าไฟยูนิตละ 5 บาท | 1.5 บาท | 2. ค่าไฟฟ้าจากปั๊ม 16 ชั่วโมง 3 ชุด เท่ากับ 0.9 ยูนิต (ยูนิตละ 3 บาท) | 2.7 | บาท |
| รวม | 21.5 บาท | | 15.3 | บาท |
| • อื่น ๆ | | | | |
| 1. ในการหลอมเงินฝอยเหล็กจะต้องผ่านกรรมวิธีแยกฝอยเหล็กออกก่อน โดยการกัดด้วยกรดกำมะถัน ซึ่งจะมีปัญหาเรื่องแก๊สไข่เน่า (ไฮโดรเจนซัลไฟด์) หรือแม้แต่การถลุงแยกเหล็กจากเงินโดยตรง จะมีปัญหาเรื่องการเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และการสูญเสียเงินที่ปนอยู่กับเหล็กในรูป slag | | 1. ในการหลอมผงเงินจากขั้วลบ เมื่ออบแห้งแล้วสามารถหลอมได้ทันที | | |
| 2. สามารถแยกเงินได้มากถึงร้อยละ 99 จนปริมาณเงินในน้ำยาล้างฟิล์มเหลือต่ำกว่า 0.01 กรัมต่อลิตร ความบริสุทธิ์โลหะเงินที่ได้จะอยู่ประมาณร้อยละ 99 | | 2. ประสิทธิภาพการแยกเงินประมาณร้อยละ 98 ปริมาตรที่เหลือในน้ำยาล้างฟิล์มจะอยู่ที่ 0.07-0.2 กรัมต่อลิตร ขึ้นกับชนิดของน้ำยาล้างฟิล์มว่าเป็นชนิดฟิล์มขาว-ดำ หรือฟิล์มสี | | |
| | | 3. ความบริสุทธิ์โลหะเงินที่ได้ จะอยู่ประมาณร้อยละ 99 | | |

# สรุป

การศึกษาผลของตัวแปรต่ออัตราการแยกเงิน จากอุปกรณ์ต้นแบบการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มทั้งวิธีแทนที่ฝอยเหล็กและวิธีไฟฟ้า ที่ได้จากการดัดแปลงวัสดุเหลือใช้ซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่ายจากร้านรับซื้อ-ขายของเก่า และร้านวัสดุก่อสร้างทั่วไปมีข้อสรุปดังนี้

ตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการแยกเงินโดยวิธีที่ด้วยฝอยเหล็กมากที่สุด คือการกวนน้ำยาล้างฟิล์มหรือการทำให้น้ำยามีการเคลื่อนไหวตลอดเวลา แต่ถ้าเร็วเกินไปจะสิ้นเปลืองฝอยเหล็กมากกว่าการแทนที่เงินเช่น อัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิล์ม 16-30 ลิตรต่อชั่วโมงฝอยเหล็ก 1 กรัม แยกเงินได้ 2.3-2.5 กรัม ขณะที่อัตราการไหลของน้ำยาล้างฟิล์ม 40 ลิตรต่อชั่วโมงฝอยเหล็ก 1 กรัม แยกเงินได้ 1.8 กรัม ส่วนการใช้กรดอาเซติกเพื่อเร่งปฏิกริยาการแทนที่เงินด้วยฝอยเหล็กมีผลค่อนข้างน้อย ไม่จำเป็นต้องใช้

ตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการแยกเงินโดยวิธีไฟฟ้ามากที่สุดคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า การเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจาก 1.4 เป็น 3.4 มิลลิแอมแปร์ต่อ ชม.$^2$ มีผลต่ออัตราการแยกเงินที่เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 รองลงมาคือการใช้ตัวเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าเช่น การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 กรัมต่อลิตร สามารถเร่งปฏิกริยาการแยกเงินให้เกิดได้เร็วขึ้นร้อยละ 10 ส่วนการเพิ่มอัตราการกวนน้ำยาภายในเซลล์จาก 900 เป็น 1,400 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถทำให้อัตราการแยกเงินเพิ่มขึ้นจาก 396 กรัมเป็น 487 กรัม จากน้ำยาล้างฟิล์มขาว-ดำ เมื่อใช้พลังงานไฟฟ้า 1 ยูนิต และพลังงานไฟฟ้า 1 ยูนิต แยกเงินได้ 700 กรัม จากน้ำยาล้างฟิล์มสี

จากผลการทดลองได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วว่า น้ำยาล้างฟิล์มขาว-ดำที่ได้จากโรงงานทำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (แอมโมเนียมไทโอซัลเฟต) และน้ำยาล้างฟิล์มสี (โซเดียมไทโอซัลเฟต) จากร้านถ่ายรูปทั่วๆไป เมื่อนำมาแยกเงินด้วยอุปกรณ์แยกเงินทั้งวิธีแทนที่ด้วยฝอยเหล็กและวิธีไฟฟ้าสามารถแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มเหล่านั้น ได้มากถึงร้อยละ 98-99

สรุปโดยรวมแล้ว อุปกรณ์ต้นแบบการแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มทั้ง 2 วิธี สามารถใช้แยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่แพ้อุปกรณ์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาถูกกว่ามาก เหมาะสำหรับผู้สนใจที่จะเริ่มลงทุนในธุรกิจด้านนี้ สามารถทำเป็นธุรกิจขนาดเล็กและขนาดกลางได้

# เอกสารอ้างอิง

เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต, 2539, แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ: กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 318 หน้า.

Eastman Kodak Company, 1972, Rocovering Silver from Photographic Materials: Standard book Number 7985-041-8, 25p.

Frank.H.Ewene, 1986, Hand book on Electroplating: W.Canning &CO.LTD, Great Hampton Street Birmingham, 786p.

Ilford Imaging USA Inc, 2001, Material Safety Data Sheet Ilfofix Fixer Stock Solution: Ilford Imaging USA Inc, (Http: www.illford.Com / html), 12 November 2001, 5 p.

White Mountain Imaging, 1998, Material Safety Data Sheet 4010F-A: White Mountain Imaging (http: www. Wmi-t2.Com/msds /4010F_A.html), 12 November 2001, 3 p.

White Mountain Imaging, 1998, Material Safety Data Sheet 4010F-B: White Mountain Imaging (http: www. Wmi-t2.Com/msds /4010F_B.html), 12 November 2001, 3 p.