



## การจัดการของเสียโดยนำธาตุเงินที่แยกได้จากขยะอิเล็กทรอนิกส์และของเสีย ในห้องปฏิบัติการมาเตรียมเป็นรีเอเจนต์ซิลเวอร์ไนเตรต

### Waste Management by Transformation of Recovered Silver from Electronic and Laboratory Wastes into Silver Nitrate

#### Reagent

มิกิ กัณณะ<sup>1\*</sup> และ สรวาภูมิ สมนาม<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

\*Corresponding Author, email: mikikanna@yahoo.com, miki\_kan@cmru.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางการจัดการของเสียประเภทขยะอิเล็กทรอนิกส์และของเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยการแยกธาตุเงินกลับคืนมาด้วยกระบวนการทางเคมีเพื่อเตรียมเป็นรีเอเจนต์ซิลเวอร์ไนเตรต ขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาศึกษาประกอบด้วยแผงวงจรพลาสติกในคีย์บอร์ด (KB) และ แผ่นซีดี (CD) ส่วนของเสียจากห้องปฏิบัติการ ได้แก่ สารละลายซิลเวอร์ไอออน ( $Ag^+$ ) ที่เหลือทิ้ง และ ตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ ( $AgCl$ )

จากการศึกษาพบว่าสถานะที่เหมาะสมในการแยกธาตุเงินจาก KB และ CD คือ การสกัดด้วย 1M  $HNO_3$  ที่อุณหภูมิ  $60^\circ C$  เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง สำหรับ KB และ 4 ชั่วโมง สำหรับ CD ด้วยอัตราส่วนระหว่าง KB และ CD ต่อ  $HNO_3$  เท่ากับ 1:20 และ 1:5 ตามลำดับ โดยพบว่ามีปริมาณธาตุเงินใน KB และ CD เท่ากับ 0.19% และ 0.018% ตามลำดับ นอกจากนี้ได้แยกซิลเวอร์ไอออน ( $Ag^+$ ) จากตะกอน  $AgCl$  ด้วย  $conc.NH_3$  จากนั้นรีดิวซ์  $Ag^+$  ที่แยกได้จากตะกอน  $AgCl$  และจากสารละลายเหลือทิ้งของ  $Ag^+$  ด้วยลวดทองแดงได้ธาตุเงินบริสุทธิ์มากกว่า 91.0% เมื่อนำธาตุเงินที่แยกได้มาเตรียมเป็น รีเอเจนต์  $AgNO_3$  สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างเกลือและน้ำ รวมทั้งเมื่อนำ  $AgNO_3$  ที่สังเคราะห์ได้มาเตรียมเป็นรีเอเจนต์ทอลเลนสำหรับวิเคราะห์เชิงคุณภาพของสารอินทรีย์บางชนิด พบว่าคุณภาพของรีเอเจนต์  $AgNO_3$  ที่เตรียมได้มีคุณภาพเทียบเท่ากับที่มีจำหน่ายทางการค้า จากการคำนวณค่าใช้จ่ายพบว่า  $AgNO_3$  ที่เตรียมได้มีราคาถูกกว่า  $AgNO_3$  ที่จำหน่ายทางการค้ามากถึง 90% ซึ่งแนวทางที่นำเสนอนี้ช่วยลดปริมาณของเสียและลดค่าใช้จ่ายในห้องปฏิบัติการได้ และงานวิจัยนี้ยังสามารถเป็นแนวทางการจัดการของเสียประเภทอื่นที่มีธาตุเงินเป็นองค์ประกอบ

## ABSTRACT

This research has proposed waste management of electronic and laboratory wastes by recovering the silver mold using chemical process and turning it into silver nitrate reagent for use in laboratory. The studied electronic waste which was plastic circuit board inside a keyboard (KB) and compact disc (CD), while the laboratory wastes were the waste solution of silver ion ( $\text{Ag}^+$ ) and silver chloride ( $\text{AgCl}$ ) precipitate.

From this study, the suitable conditions to recover silver element from KB and CD were the extraction with 1M  $\text{HNO}_3$  at  $60^\circ\text{C}$  for 6 hrs. (for KB) and 4 hrs. (for CD) the ratio between KB and CD to  $\text{HNO}_3$  at 1:20 and 1:5, respectively. The silver contents in KB and CD equal to 0.19% and 0.018%, respectively. Silver ion ( $\text{Ag}^+$ ) was recovered from  $\text{AgCl}$  precipitate by dissolving with conc.  $\text{NH}_3$ . The  $\text{Ag}^+$  which was extracted from  $\text{AgCl}$  and the left over solution of  $\text{Ag}^+$  was reduced by the copper wire cemented to the metallic silver with the purity level over 91.0%. The recovered silver was need to prepare  $\text{AgNO}_3$  reagent for determination of chloride in the salt and water samples, and used as the Tollen's reagent for qualitative analysis of organic substances. It was found that the prepared  $\text{AgNO}_3$  had the same quality as the commercial products in the market. Moreover, cost of this reagent obtained from the proposed process is 90% lower than using the commercial products. Hence, this research could be the guidelines of waste management for other Ag containing wastes in order to reduce the amount of chemical waste and expense in laboratory.

**คำสำคัญ:** ขยะอิเล็กทรอนิกส์ ของเสียจากห้องปฏิบัติการ ซิลเวอร์ไนเตรต

**Keywords:** Electronic wastes, Laboratory wastes, Silver nitrate

## บทนำ

ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate;  $\text{AgNO}_3$ ) เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่ใช้มากสำหรับเตรียมเป็นรีเอเจนต์ในงานวิเคราะห์ทางเคมี เช่น การไทเทรตแบบตกตะกอนด้วยวิธี Argentometric titration เพื่อวิเคราะห์ธาตุแฮไลด์ (สราวูฒิ, 2554; Clesceri et al., 1989) ใช้เตรียมเป็นรีเอเจนต์ทอลเลน (Tollen's reagent) สำหรับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของสารประกอบออลดีไฮด์และแอลฟาไฮดรอกซิคีโตน (Zienkiewicz-Strzalka et al., 2013) ใช้สำหรับการ

ตรวจสอบรอยนิ้วมือแฝงในงานทางนิติวิทยาศาสตร์ (Davis and Fisher, 2015) อย่างไรก็ตาม สารเคมีชนิดนี้มีราคาสูง (ประมาณ 5,500 บาทต่อ 100 กรัม) และต้องสั่งซื้อนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นการเตรียม  $\text{AgNO}_3$  ขึ้นเองโดยให้มีคุณภาพเทียบเท่ากับสารเคมีที่มีจำหน่ายทั่วไป แต่มีต้นทุนที่ประหยัดกว่ามาก จึงเป็นแนวคิดที่น่าสนใจ

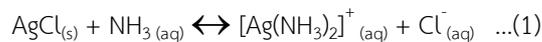
แม้ว่า  $\text{AgNO}_3$  จะสามารถเตรียมได้จากการนำธาตุเงินบริสุทธิ์ซึ่งหาได้จากร้านเครื่องประดับหรือร้านหัตถกรรมประเภทเครื่องเงินทั่วไป นำมาทำ

ปฏิกริยากับกรดไนตริก (Murphy et al., 1991) แต่เนื่องจากธาตุเงินเป็นโลหะมีค่าที่มีราคาสูงและผันผวนตามราคาตลาดโลก ดังนั้น การได้มาซึ่งธาตุเงินที่แยกได้จากของเสียต่างๆ อาจเป็นทางเลือกที่น่าสนใจว่าเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูง และยังช่วยลดการปนเปื้อนของโลหะหนักจากของเสียที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตได้อีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปยังของเสียที่มีธาตุเงินเป็นองค์ประกอบจาก 2 แหล่ง คือ ขยะอิเล็กทรอนิกส์และของเสียจากห้องปฏิบัติการทางเคมี

ในกรณีของขยะอิเล็กทรอนิกส์ ได้ตรวจสอบปริมาณธาตุเงินในขยะประเภทต่างๆ ได้แก่ แผงวงจรโทรทัศน์มือถือ เมนบอร์ดคอมพิวเตอร์ แผงวงจรพลาสติกในคีย์บอร์ดคอมพิวเตอร์ แผงวงจรเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป และแผ่นซีดี ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry

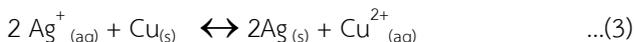
(EDXRF) และการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ พบว่าแผงวงจรพลาสติกในคีย์บอร์ดคอมพิวเตอร์และแผ่นซีดีมีธาตุเงินในสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการนำมาสกัดแยกธาตุเงิน โดยในงานวิจัยนี้ได้แยกธาตุเงินออกจากขยะดังกล่าวโดยใช้กรดไนตริกภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

สำหรับของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีซึ่งประกอบด้วยตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ (Silver chloride, AgCl) และสารละลายเหลือทิ้งที่มีซิลเวอร์ไอออน ( $Ag^+$ ) เป็นองค์ประกอบ (โดยเป็นสารละลายผสมซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารละลาย  $AgNO_3$  ประมาณร้อยละ 80) ซึ่งรวบรวมได้จากการทดลองจากการเรียนการสอนรวมถึงงานวิจัยในห้องปฏิบัติการทางเคมี โดยตะกอน AgCl จะถูกนำมาทำปฏิกริยากับสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น ( $conc.NH_3$ ) เพื่อแยกธาตุเงินออกจากตะกอนดังปฏิกริยา (1) (Davis and Fisher 2015; Cotton et al., 1999)



ไดแอมมีนซิลเวอร์ (I) ไอออน ( $[Ag(NH_3)_2]^+$ ) ที่แยกได้ดังกล่าวและซิลเวอร์ไอออน ( $Ag^+$ ) ที่อยู่ในสารละลายเหลือทิ้ง รวมถึง  $Ag^+$  ที่สกัดได้จากขยะอิเล็กทรอนิกส์ จะถูกรีดิวซ์ด้วยโลหะทองแดงโดยเทคนิคซีเมนเตชัน (Cementation) ได้โลหะเงิน ดังปฏิกริยา (2) และ (3) แม้ว่าจะมีงานวิจัยหลายฉบับใช้

เทคนิคซีเมนเตชันในการตกตะกอน  $Ag^+$  ให้เป็นโลหะเงินโดยใช้ผงสังกะสี (Zn powder) (Davis and Fisher, 2015; Joda and Rashchi, 2012) แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โลหะทองแดงซึ่งได้จากสายไฟเก่าเนื่องจากให้ผลในการรีดิวซ์ที่ดีเช่นกัน อีกทั้งหาง่ายและประหยัดค่าใช้จ่ายอีกด้วย



แม้ว่าจะมีรายงานวิจัยบางฉบับที่อ้างถึงการแยกธาตุเงินจากของเสียในห้องปฏิบัติการ หรือของเสียประเภทอื่นๆ เช่น วีระ สวนไธสง (2552) ศึกษาการแยกธาตุเงินออกจากของเสียจากห้องปฏิบัติการด้วยเทคนิคไฟฟ้า หรือ Syed et al., (2002) ศึกษาการละลายโลหะเงินจากฟิล์มโดยพบว่ากรดออกซาลิก

มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากต้นทุนต่ำและมีพิษน้อย หรือ Cui and Zhang (2008) ได้กล่าวถึงการแยกธาตุเงินออกจากขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยการเผาด้วยเทคนิค pyrometallurgy รวมถึง Aktas et al., (2010) ได้ทำการสกัดธาตุเงินออกจากเซลล์เม็ดกระดาษโดยใช้กรดไนตริก แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กระบวนการทางเคมี

ดังกักไว้ข้างต้น เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ใช่ อุปกรณ์หรือเทคนิคที่ยุ่งยาก รวมถึงใช้สารเคมีที่มีราคาไม่สูงมากนัก และเหมาะสมกับขยะประเภท KB นี้มากกว่า จึงเหมาะต่อการเป็นแนวทางที่สะดวกสำหรับนำไปใช้ได้ในห้องปฏิบัติการทั่วไปได้

โลหะเงินทั้งหมดที่แยกได้จะถูกตรวจสอบ ปริมาณและความบริสุทธิ์ด้วยการไทเทรตแบบ โวลฮาร์ด (Volhard method) ก่อนนำมาทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกเพื่อเตรียมเป็น  $\text{AgNO}_3$  ต่อไปตั้งปฏิกิริยา (4) โดยรีเอเจนต์  $\text{AgNO}_3$  ที่ได้จะถูกทดสอบความบริสุทธิ์และนำมาใช้งานจริงเปรียบเทียบกับรีเอเจนต์  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมได้จะถูกตรวจสอบความบริสุทธิ์และนำไปใช้ในงานวิเคราะห์เปรียบเทียบกับรีเอเจนต์  $\text{AgNO}_3$  ที่มีจำหน่ายทางการค้า

ดังนั้นการเตรียมรีเอเจนต์จากของเสียนับว่าเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับห้องปฏิบัติการที่มีการใช้รีเอเจนต์ประเภทนี้ เนื่องจากสามารถลดค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อ รวมทั้งยังเป็นการลดปริมาณของเสียที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย

## อุปกรณ์และวิธีทดลอง

### สารเคมี

กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ , AR, RCI Labscan, Australia) กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ , Commercial grade, Huchem fine Chemical Corp, Korea) โซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ , AR, RCI Labscan, Australia) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ , AR, J.T.baker, USA) ซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ , AR, RCI Labscan, Australia) โพแทสเซียมไทโอไซยาเนต ( $\text{KSCN}$ , AR, RCI Labscan, Australia) แอมโมเนียมเพอร์ริซัลเฟต โดเดคะไฮเดรต ( $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , AR, UNIVAR Reagent, New Zealand) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ , AR, Merck, Germany) แอมโมเนียม

เพอร์ริซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต ( $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , AR, Merck, Germany) เพอร์ริซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , AR, Rankem, India) เพอร์ริคอลลิมินดีเคเตอร์ เตรียมจากการทำให้สารละลาย  $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  อิ่มตัว น้ำปราศจากไอออน (Milipore, Mili-Q & Elix 10) ใช้ในการเตรียมสารละลายทั้งหมดตลอดการทดลอง

### วัสดุและเครื่องมือ

ลวดทองแดง (Copper wire) ได้จากสายไฟ เก่าขนาดหน้าตัด 1.13 มิลลิเมตร กระดาษกรองวอทแมนเบอร์ 1 (Filter paper whatman No.1, England) เครื่องวัดจุดเดือดจุดหลอมเหลว (B-540, BUCHI, Switzerland) เครื่องกวนและให้ความร้อนสารละลาย (Hotplate & stirrer, JENWAY 1203, UK) เครื่องชั่งสำหรับงานวิเคราะห์ (Analytical balance, PW 254, ADAM, Germany) ตู้อบสาร (Oven 252D, UK) และ เครื่อง Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF, JEOL, JSX3400R, Japan)

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 1. การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุในขยะอิเล็กทรอนิกส์

ขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่สนใจนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้แก่ แผงวงจรพลาสติกภายใน คีย์บอร์ดคอมพิวเตอร์ แผงวงจรโทรศัพท์มือถือ เมนบอร์ดคอมพิวเตอร์ แรมคอมพิวเตอร์ แผงวงจรเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป และแผ่นซีดี ด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF) ซึ่งส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (ศวท.มช.) เพื่อเป็นการตรวจสอบเบื้องต้นของโลหะต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบในขยะอิเล็กทรอนิกส์แต่ละ

ชนิด ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงความเหมาะสมในการนำมา แยกธาตุเงินต่อไป

## 2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดธาตุเงิน จากขยะอิเล็กทรอนิกส์

### 2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการสกัดธาตุเงินคือ แผงวงจรพลาสติกภายในเคีย์บอร์ดคอมพิวเตอร์ (KB) และแผ่นซีดี (CD) ไม่จำกัดประเภท และยี่ห้อ จากนั้น ล้าง KB และ CD ด้วยน้ำสะอาด ผึ่งให้แห้ง ตัด KB และ CD ให้ได้ขนาด 1x1 เซนติเมตร ดังรูปที่ 1

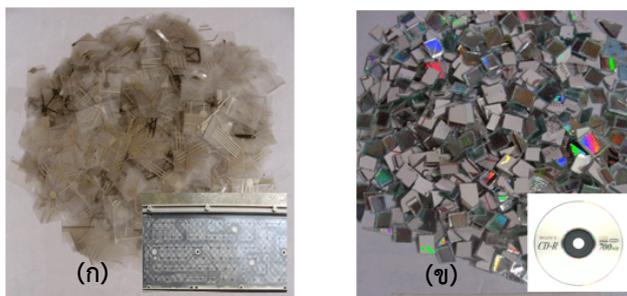
### 2.2 การสกัดธาตุเงินจาก KB และ CD

1. การศึกษาผลของอุณหภูมิ ซึ่ง KB จำนวน 5.0 g (ในกรณีของ CD ใช้ 20.0 g) ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 mL เติมกรดไนตริกเข้มข้น 1 M ปริมาตร 100 mL นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 30°C คน สารละลายด้วยความเร็ว 400 rpm จากนั้นเปิดตู้ส่วน ที่ของเหลว ปริมาตร 10 mL สำหรับตัวอย่าง KB ทำ การเปิดตู้ทุกๆ 30 นาที จนครบ 3 ชั่วโมง ส่วน ตัวอย่าง CD ทำการเปิดตู้ทุกๆ 60 นาที จนครบ 6 ชั่วโมง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ  $Ag^+$  ที่แยกได้ที่ เวลาต่างๆ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นทำการ

ทดลองด้วยวิธีการเดียวกันแต่เปลี่ยนอุณหภูมิให้เป็น 45°C 60°C และ 75°C ตามลำดับ

2. การศึกษาผลของเวลา และความเข้มข้น ของกรดไนตริก ซึ่ง KB จำนวน 5.0 g (ในกรณีของ CD ใช้ 20.0 g) ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 mL เติมกรดไนตริกเข้มข้น 1 M ปริมาตร 100 mL นำไปให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 60°C คนสารละลายด้วยความเร็ว 400 rpm จากนั้นเปิดตู้ส่วนที่ของเหลว ปริมาตร 10 mL ทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6 ชั่วโมง เพื่อนำไปวิเคราะห์หา ปริมาณซิลเวอร์ไอออน ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นทำการทดลองด้วยวิธีการเดียวกันแต่เปลี่ยน ความเข้มข้นของกรดไนตริกเป็น 2 M 3 M และ 4 M ตามลำดับ

3. การวิเคราะห์หาปริมาณซิลเวอร์ไอออน ทั้งหมดในสารละลายที่สกัดได้ นำสารละลายที่สกัดได้ จำนวน 10.0 mL มาเติมเพอริคโกลัมอินดิเคเตอร์ 0.8 mL นำไปไทเทรตแบบตกตะกอนกับสารละลาย มาตรฐาน KSCN ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยกรณี วิเคราะห์สารละลายที่สกัดจาก KB ใช้ KSCN ความ เข้มข้น 10.0 mM ส่วน สารละลายที่สกัดจาก CD ใช้ KSCN ความเข้มข้น 1.0 mM



รูปที่ 1 ตัวอย่างที่ถูกตัดแล้วของ (ก) แผงวงจรพลาสติกภายในเคีย์บอร์ดคอมพิวเตอร์ และ (ข) แผ่นซีดี

### 2.3 การสกัดธาตุเงินจากของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี

1. การสกัดธาตุเงินจากสารละลายเหลือทิ้งที่มีซิลเวอร์ไอออนเป็นองค์ประกอบ นำสารละลายเหลือทิ้ง 200 mL จุ่มลวดทองแดง พร้อมคนสารละลาย จะมีตะกอนธาตุเงินเกิดขึ้น กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 (ทราบน้ำหนักที่แน่นอน) ที่ตั้งตะกอนไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของธาตุเงินที่สกัดได้ ทั้งนี้กรรมวิธีสารละลายที่สกัดได้จาก KB และ CD ซึ่งมีซิลเวอร์ไอออนเป็นองค์ประกอบดังหัวข้อ 2.2 จะนำมาแยกธาตุเงินด้วยวิธีนี้เช่นกัน

2. การสกัดธาตุเงินจากตะกอนซิลเวอร์-คลอไรด์ (AgCl) กรองแยกตะกอน AgCl ออกจากสารเหลือทิ้งจากห้องปฏิบัติการวางให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตะกอนที่ได้ ละลายตะกอน AgCl โดยใช้สารละลาย conc.  $\text{NH}_3$  และน้ำปราศจากไอออน ด้วยอัตราส่วน 10.0 g : 100 mL : 100 mL ตามลำดับ คนสารละลายจนตะกอนละลายหมด จากนั้นนำมากรอง จุ่มลวดทองแดงลงในสารละลายที่ได้ พร้อมคนสารละลาย เพื่อให้เกิดตะกอนธาตุเงิน โดยทำในทำนองเดียวกับ ข้อ (1)

### 3. การหาความบริสุทธิ์ของธาตุเงินที่สกัดได้

ในการหาความบริสุทธิ์ของธาตุเงินที่สกัดได้ ได้เลือกใช้การไทเทรตด้วยวิธีโวลฮาร์ด เนื่องจากเป็นวิธีมาตรฐานที่เหมาะสมกับตัวอย่างที่มีธาตุเงินปริมาณสูง โดยให้ผลวิเคราะห์ที่แม่นยำ นอกจากนี้ตัวอย่างที่นำมาสกัดแยกธาตุเงินยังไม่มีธาตุที่น่าจะป็นตัวรบกวน (Inter-fereces) การไทเทรตหาปริมาณธาตุเงินด้วยวิธีดังกล่าว เช่น Pb, Hg และการไทเทรตด้วยวิธีนี้ยังเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และประหยัดกว่าการใช้เครื่องมือชั้นสูง

อบธาตุเงินที่สกัดได้ที่อุณหภูมิ  $110^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นละลายธาตุเงิน 0.500 g ด้วยกรดไนตริก 1 M ปริมาตร 30 mL ให้ความร้อน  $60^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เติสารละลายใส่ขวดวัดปริมาตร ปริมาตรเป็น 50 mL ด้วยกรดไนตริก 1 M ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นปิเปตต์สารละลายมา 10 mL เติมเฟอร์ริคอสลินดิเคเตอร์ 1 mL ไทเทรตแบบตกตะกอนด้วยสารละลายมาตรฐาน KSCN 0.1 M จนได้สารละลายที่จุดยุติเป็นสีส้มแดง คำนวณความบริสุทธิ์ของธาตุเงินที่สกัดแยกได้ (ทำการทดลอง ซ้ำ 3 ครั้ง)

### 2.4 การเตรียมรีเอเจนต์

นำธาตุเงินที่สกัดได้มาเตรียมเป็นรีเอเจนต์ 2 ชนิด คือ ซิลเวอร์ไนเตรต และรีเอเจนต์ทอลล์เลน (Tollen's reagent)

#### 2.4.1 การเตรียมรีเอเจนต์ซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ )

1. ขั้นตอนการเตรียมซิลเวอร์ไนเตรต ทำโดยชั่งธาตุเงินที่สกัดแยกได้ 2.00 g ทำปฏิกิริยากับ conc.  $\text{HNO}_3$  20 mL ต้มที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  จนธาตุเงินเกิดปฏิกิริยาหมด ตั้งสารละลายทิ้งไว้จนกระทั่งเย็นตัวลง จะเกิดผลึกสีขาวของ  $\text{AgNO}_3$  กรองแยกผลึกเก็บไว้

2. การศึกษาคุณภาพของรีเอเจนต์  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมได้

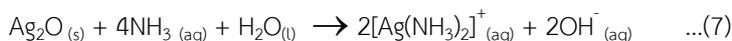
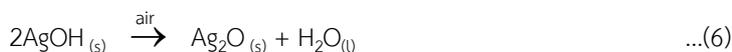
ก. การหาจุดหลอมเหลว หาจุดหลอมเหลวของ  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมได้ ด้วยเครื่องวัดจุดเดือดและจุดหลอมเหลว เปรียบเทียบกับ  $\text{AgNO}_3$  ทางการค้า

ข. การหาความบริสุทธิ์ของ  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมได้ นำ  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิ  $110^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ละลาย  $\text{AgNO}_3$  0.425 g ด้วยกรดไนตริก 1 M ปริมาตรเป็น 50 mL ปิดจุก

เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นปิเปตต์สารละลายมา 10 mL เติมเฟอริคอกัลัม อินดิเคเตอร์ 1 mL ไทเทรตแบบ ตกตะกอนด้วยสารละลายมาตรฐาน KSCN 0.050 M จนได้สารละลายที่จุดยุติเป็นสีส้มแดง คำนวณความบริสุทธิ์ของธาตุเงินที่สกัดแยกได้ (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)

#### 2.4.2 การเตรียมรีเอเจนต์ทอลเลน (Tollen's reagent)

รีเอเจนต์ทอลเลนถูกเตรียมเพื่อใช้ทดสอบเชิงคุณภาพสารประเภทแอลดีไฮด์ และแอลฟาไฮดรอกซี-



#### 2.5 การประยุกต์ใช้รีเอเจนต์ AgNO<sub>3</sub> ที่เตรียมได้

ในงานวิจัยได้นำรีเอเจนต์ AgNO<sub>3</sub> ที่เตรียมได้มาใช้สำหรับวิเคราะห์หาคลอไรด์ 3 ชนิด คือ เกลือแกง น้ำประปา และน้ำดื่มที่มีจำหน่ายทั่วไป และนำรีเอเจนต์ทอลเลนมาใช้สำหรับการทดสอบเชิงคุณภาพ โดยมีวิธีการดังนี้คือ

**2.5.1. การวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในเกลือแกงตัวอย่าง** เลือกเกลือ 3 ยี่ห้อ มาชั่งน้ำหนักแต่ละยี่ห้อในช่วง 0.59 – 0.60 g และบันทึกน้ำหนักที่แน่นอนละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนจนครบ 100.00 mL ในขวดปรับปริมาตร

การหาปริมาณคลอไรด์ในเกลือแกงตัวอย่าง ทำโดยการไทเทรตแบบตกตะกอนด้วยวิธีของมอห์ร์ (Mohr's method) (สรารุณ, 2554) โดยใช้รีเอเจนต์ที่เตรียมได้เทียบกับรีเอเจนต์ที่จำหน่ายทั่วไป โดยปิเปตต์สารละลายเกลือแกงตัวอย่าง 10.00 mL เติม K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>

คีโตน เตรียมโดยนำสารละลาย AgNO<sub>3</sub> ที่เตรียมจาก AgNO<sub>3</sub> ที่เตรียมได้ 1.00 mL ผสมกับสารละลาย 0.5 M NaOH 2.00 mL ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ (5) จากนั้น AgOH ที่ได้จะเปลี่ยนเป็นตะกอนสีน้ำตาลของซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag<sub>2</sub>O) ดังสมการ (6) จากนั้นปิเปตต์สารละลาย 2% NH<sub>4</sub>OH 4.00 mL ใส่ลงในตะกอนดังกล่าว เขย่าแรงๆ จนตะกอนละลายหมด ซึ่งเกิดปฏิกิริยาดังสมการ (7) จะได้รีเอเจนต์ทอลเลน (เมตต์จ, 2543)

1.0 mL ไทเทรตด้วยสารละลาย 0.1 M AgNO<sub>3</sub> จนได้สารละลายสีเหลืองอมส้ม (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง)

**2.5.2 การวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในน้ำประปาและน้ำดื่มตัวอย่าง** เปิดน้ำประปาทิ้งไว้ประมาณ 10 – 15 นาที ตวงน้ำตัวอย่าง 200 mL เติม H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30% ปริมาตร 2 mL พร้อมกับคนสารละลายทิ้งไว้ 1 นาที เลือกน้ำดื่มที่มีจำหน่ายทั่วไปมา 2 ยี่ห้อ ตวงน้ำตัวอย่าง 200 mL เติม H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30% ปริมาตร 2 mL พร้อมกับคนสารละลายทิ้งไว้ 1 นาที ปิเปตต์น้ำประปาและน้ำดื่มตัวอย่าง 50 mL เติม K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> 1 mL ไทเทรตด้วยสารละลาย 0.01 M AgNO<sub>3</sub> จนได้สารละลายสีเหลืองอมส้ม (ทำการทดลอง ซ้ำ 3 ครั้ง)

**2.5.3 การใช้รีเอเจนต์ทอลเลนทดสอบเชิงคุณภาพสารประเภทแอลดีไฮด์และแอลฟาไฮดรอกซีคีโตน** เติมสารตัวอย่าง ได้แก่ Sucrose (Fisher chemical), D-Glucose, D-Fructose, น้ำตาลทราย (มิตรผล), Formaldehyde, Acetaldehyde, Benzaldehyde, Acetone, Acetic acid, Methanol

และ Hexane ปิเปตต์สารละลายตัวอย่างทดสอบดังกล่าวเติมในหลอดทดลองซึ่งมี รีเอเจนต์ทอลเลนที่เตรียมได้ บรรจุอยู่ หลอดละ 3.00 mL ในแต่ละหลอดทดลองแล้วเขย่า หลังจากนั้นนำหลอดทดลองแต่ละหลอดทดลองวางในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นระยะเวลา 10 นาที แล้วสังเกตผลการทดลอง

## ผลและวิจารณ์การทดลอง

### 1. การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

ผลการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชนิดต่างๆ คือ แผงวงจรพลาสติกภายในคีย์บอร์ดคอมพิวเตอร์ แผงวงจรโทรศัพท์มือถือ เมนบอร์ดคอมพิวเตอร์ แรมคอมพิวเตอร์ และเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป ด้วยเครื่อง EDXRF แสดงในรูปที่ 2(ก)-(จ) ซึ่งจากรูปสเปกตรัมพบว่า มีเพียงแผงวงจรพลาสติกภายในคีย์บอร์ดคอมพิวเตอร์ (KB) เท่านั้นที่มีธาตุเงินเป็นองค์ประกอบสำหรับชิ้นส่วนแผงวงจรโทรศัพท์มือถือ เมนบอร์ดคอมพิวเตอร์ แรมคอมพิวเตอร์ และเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไปไม่พบธาตุเงินเป็นองค์ประกอบจึงไม่นำมาใช้ในงานวิจัย ส่วนแผ่นซีดีซึ่งไม่สามารถทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDXRF ได้ ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อวิเคราะห์หาธาตุเงินโดยนำแผ่นซีดีแช่ลงในกรดไนตริก จากนั้นเติมโซเดียมคลอไรด์ พบว่าเกิดตะกอนสีขาวขุ่นซึ่งคาดว่าเป็นตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) จึงนำตะกอนดังกล่าวไปละลายด้วยสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น (conc.NH<sub>3</sub>) พบว่าตะกอนดังกล่าวละลายได้หมด นอกจากนี้ยังรายงานวิจัยบางฉบับที่กล่าวว่ามีการใช้ธาตุเงินเป็นองค์ประกอบในแผ่นซีดี

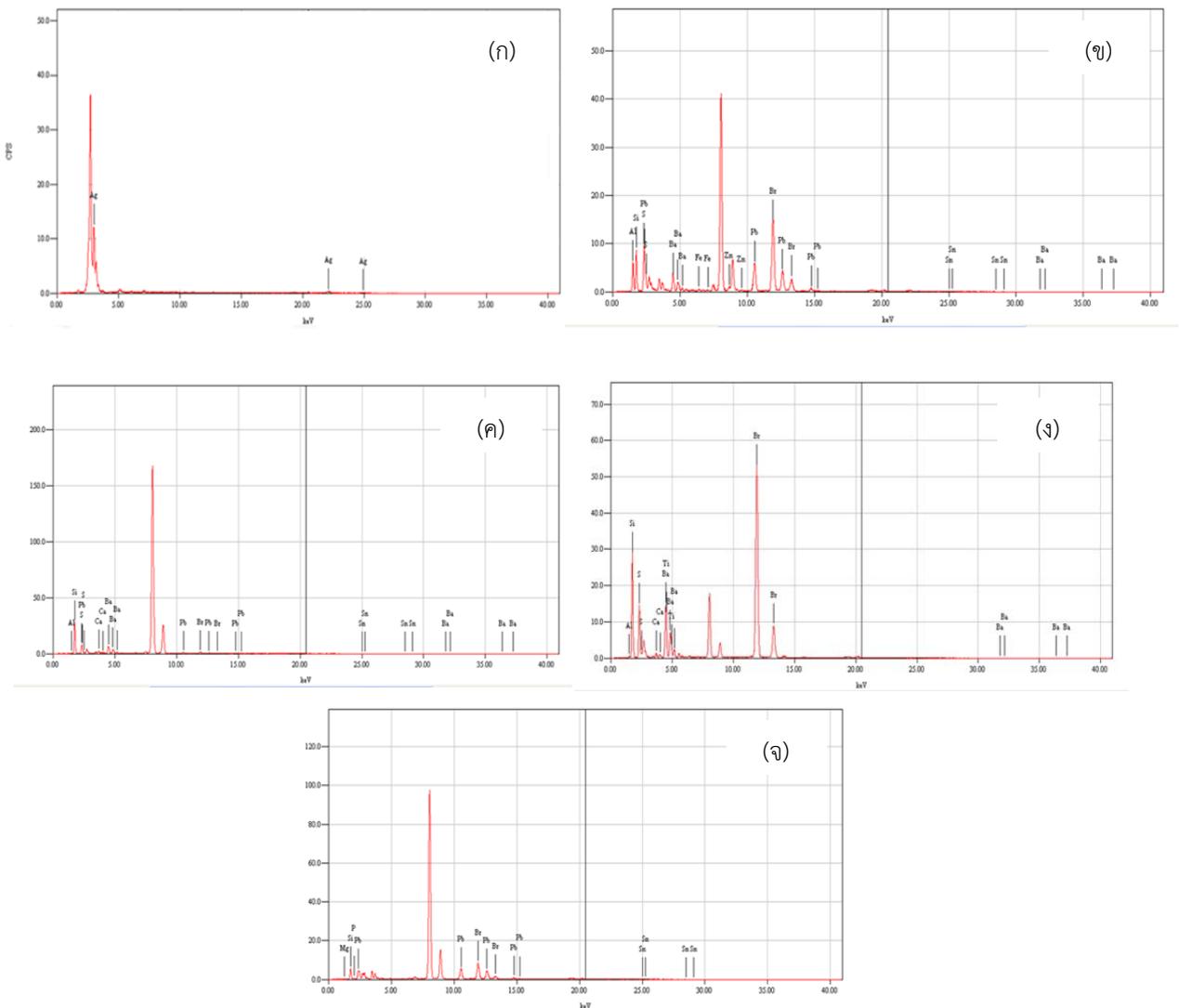
ด้วย (Abbaspour et al., 2014; Leone et al., 2013) จึงมีความเป็นไปได้สูงว่ามีธาตุเงินเป็นองค์ประกอบในแผ่นซีดี ดังนั้นจึงเลือกแผ่นซีดีมาใช้ในการแยกธาตุเงินต่อไป

### 2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดธาตุเงินจากขยะอิเล็กทรอนิกส์

#### 2.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิ

การเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วขึ้น แต่ในขณะเดียวกันกลับทำให้ค่าใช้จ่ายจากไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้นไปด้วย จึงจำเป็นต้องหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้พลังงานความร้อนไม่มากนักและได้ประสิทธิภาพในการแยกธาตุเงินสูงที่สุด โดยในการทดลองจะกำหนดอัตราส่วนน้ำหนัก KB และ CD ต่อปริมาตร conc.HNO<sub>3</sub> เท่ากับ 1:20 และ 1:5 ตามลำดับ และทำการสกัดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง สำหรับ KB และ 6 ชั่วโมงสำหรับ CD อุณหภูมิที่เลือกคือ 30°C, 45°C, 60°C และ 75°C แต่จากการทดลองพบว่าที่ 75°C สารละลายกรดไนตริกระเหยเป็นไอได้ง่าย จึงไม่เหมาะสมต่อการทดลองจากนั้นแบ่งสารละลายมาวิเคราะห์หาปริมาณซิลเวอร์ไอออนโดยการไทเทรตแบบตกตะกอน ทุกๆ 30 นาที จนครบ 3 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3(ก)

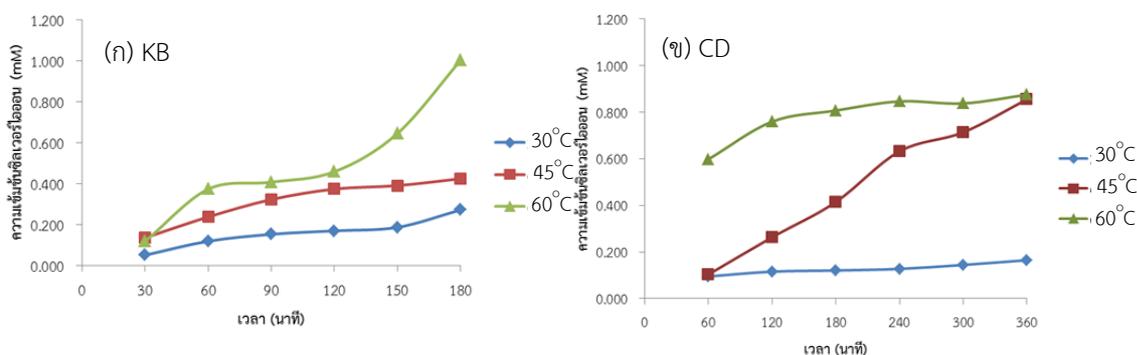
จากรูปที่ 3(ก) แสดงว่า อุณหภูมิมีผลทำให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาของธาตุเงินเกิดเร็วขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 60°C ปริมาณของธาตุเงินที่แยกได้จะสูงกว่าอุณหภูมิอื่นๆ และจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที ดังนั้นจึงเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสกัดธาตุเงินจากตัวอย่าง KB คือ 60°C



**รูปที่ 2** แสดงสเปกตรัมของการตรวจวิเคราะห์ (ก) แผงวงจรพลาสติกภายในเคี๊ยบอร์ดคอมพิวเตอร์ (ข) แผงวงจรโทรศัพท์มือถือ (ค) เมนบอร์ดคอมพิวเตอร์ (ง) แรมคอมพิวเตอร์ และ (จ) เครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป ด้วยเทคนิค EDXRF

สำหรับกรณีตัวอย่าง CD ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3(ข) ซึ่งพบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุเงินที่อุณหภูมิต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่อุณหภูมิ 30°C ปริมาณของธาตุเงินมีค่าน้อยมาก และไม่สามารถกำจัดสिलิโคนบน CD ที่ละลายออกมาได้ ที่อุณหภูมิ 45°C ธาตุเงินจะเพิ่มขึ้น

อย่างต่อเนื่องจนมีปริมาณใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 60°C ซึ่งต้องใช้เวลานานถึง 6 ชั่วโมง แต่ที่อุณหภูมิ 60°C ปริมาณจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในชั่วโมงแรก จากนั้นจึงค่อยๆ คงที่ ดังนั้นจึงพิจารณาให้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการสกัดธาตุเงินสำหรับตัวอย่าง CD คือ 60°C



รูปที่ 3 แสดงผลของอุณหภูมิในการสกัดธาตุเงินในตัวอย่าง (ก) KB และ (ข) CD

## 2.2 การศึกษาผลของเวลาและความเข้มข้นของกรดไนตริก

ผลของเวลาและความเข้มข้นของกรดไนตริกที่ใช้ในการสกัดธาตุเงินในตัวอย่าง KB โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักของตัวอย่างต่อปริมาตรสารละลายกรดไนตริก 1 : 20 อุณหภูมิ 60°C ศึกษาที่ความเข้มข้นของกรดไนตริก 1 M 2 M 3 M และ 4 M ตามลำดับ จากนั้นแบ่งสารละลายมา 10 mL ทุกๆ 60 นาที จนครบ 360 นาที มาวิเคราะห์หาปริมาณซิลเวอร์ไอออนในสารละลาย ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4(ก) และ 4(ข)

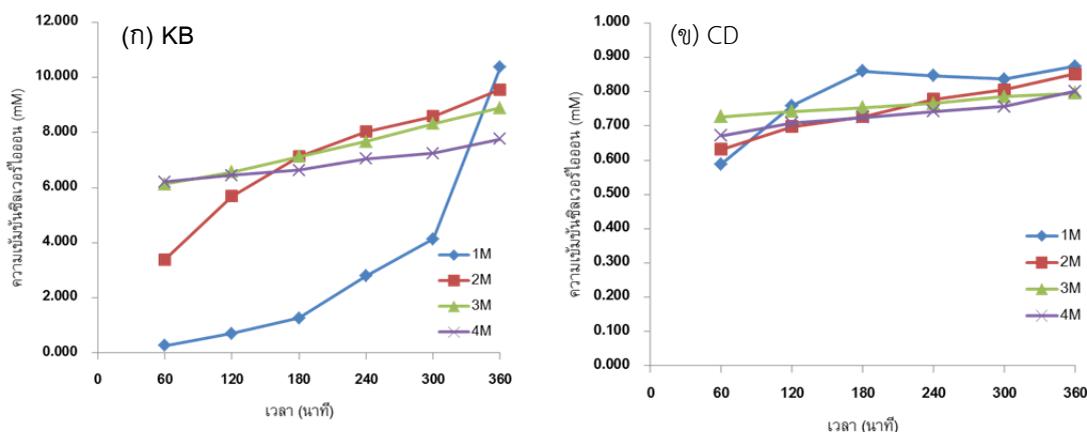
จากรูป 4(ก) พบว่า ภายใน 180 นาทีที่ความเข้มข้นของกรดไนตริก 1M ปริมาณธาตุเงินจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีปริมาณธาตุเงินใกล้เคียงกับที่ความเข้มข้นอื่น ในขณะที่ความเข้มข้น 2 M 3 M และ 4 M การเกิดปฏิกิริยาของธาตุเงินจะใกล้เคียงกัน และไม่แตกต่างจากความเข้มข้น 1 M ดังนั้นจึงพิจารณาให้ความเข้มข้นของกรดไนตริก และเวลาที่เหมาะสมในการสกัดธาตุเงินสำหรับตัวอย่าง KB คือ 1 M และ 360 นาที ตามลำดับ

ในขณะที่ผลของเวลาและความเข้มข้นของกรดไนตริกที่ใช้ในการสกัดธาตุเงินในตัวอย่าง CD โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักของตัวอย่างต่อปริมาตรของสารละลายกรดไนตริก 1 : 5 อุณหภูมิ 60°C ศึกษาที่

ความเข้มข้นของกรดไนตริก 1 M 2 M 3 M และ 4 M ตามลำดับ จากนั้นแบ่งสารละลายมา 10 mL ทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6 ชั่วโมง มาวิเคราะห์หาปริมาณซิลเวอร์ไอออนในสารละลาย ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4(ข)

จากรูปที่ 3(ข) พบว่า ที่ความเข้มข้นของกรดไนตริก 1 M มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาของธาตุเงินที่รวดเร็ว และใกล้เคียงกับที่ความเข้มข้นอื่นๆ ภายในเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจนเกือบคงที่ ภายในเวลา 3-4 ชั่วโมงนั้นแสดงว่าการเกิดปฏิกิริยาของธาตุเงินเข้าสู่สภาวะสมดุลอย่างเต็มที่ เนื่องจากในตัวอย่าง CD มีปริมาณธาตุเงินน้อย การละลายจึงเกิดได้อย่างรวดเร็ว โดยสังเกตได้จากหลังการสกัดจะไม่ปรากฏความแวววาวของโลหะที่เคลือบแม้แต่น้อย ดังนั้นจึงพิจารณาให้ความเข้มข้นของกรดไนตริก และเวลาที่เหมาะสมในการสกัดธาตุเงินสำหรับตัวอย่าง CD คือ 1 M และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ

จากการนำสภาวะที่ได้ศึกษามาใช้ในการสกัดธาตุเงิน พบว่า เมื่อใช้แผงวงจรถักสติภายในซีบอร์ดคอมพิวเตอร์ (KB) จำนวน 707.216 g สามารถสกัดธาตุเงินได้ 13.467 g และมีร้อยละความบริสุทธิ์ เท่ากับ 96.66



รูปที่ 4 ผลของเวลาและความเข้มข้นของกรดไนตริกในการสกัดธาตุเงินในตัวอย่าง (ก) KB และ (ข) CD

## 2.3 ค่าใช้จ่ายในการสกัดธาตุเงินจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ KB และ CD

### ก. กรณีสกัดเงินที่สกัดได้จาก KB

จากสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ศึกษา พบว่าหากทำการสกัด KB ด้วยสารละลายกรดไนตริก 1 M จำนวน 10 L (ราคา conc.HNO<sub>3</sub> เท่ากับ 650 บาท/2.5L) จะได้ปริมาณโลหะเงินจำนวน 9.4 g เมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายในการสกัดธาตุเงินจากราคาสารเคมีที่ใช้และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการสกัดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยกำลังไฟฟ้า 1,200 วัตต์ โดยมีค่าไฟฟ้าของหน่วยงานที่เป็นองค์กรแบบไม่แสวงหากำไรตกอยู่ที่หน่วยละประมาณ 3 บาท จึงมีค่าใช้จ่ายโดยประมาณไม่เกิน 40 บาทต่อการแยกธาตุเงินได้ 1 g

### ข. ธาตุเงินที่สกัดได้จาก CD

จากสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ศึกษา พบว่าหากทำการสกัด CD ด้วยสารละลายกรดจำนวน 10 L จะได้ปริมาณโลหะเงินจำนวน 0.56 g เมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายทำนองเดียวกับการสกัด KB จะมีค่าใช้จ่ายโดยประมาณในการสกัดธาตุเงินเท่ากับ 610 บาทต่อเงิน 1 g

จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการสกัดธาตุเงินจาก CD มีค่าใช้จ่ายค่าสูงมาก จึงไม่เหมาะต่อการนำมาใช้เตรียมรีเอเจนต์ AgNO<sub>3</sub> และรีเอเจนต์ทอลเลน ดังนั้นในขั้นตอนการเตรียมรีเอเจนต์จึงใช้เพียง KB ในการสกัดแยกธาตุเงิน

## 3. การสกัดแยกธาตุเงินจากของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี

### 3.1 การสกัดแยกธาตุเงินจากของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี

ผลการสกัดแยกธาตุเงินจากสารละลายเหลือทิ้ง Ag<sup>+</sup> และตะกอน AgCl สรุปลงในตารางที่ 1 โดยแสดงปริมาณวัตต์ถูกดึงจากแต่ละแหล่งที่รวบรวมได้ รวมทั้งธาตุเงินที่สกัดแยกได้ และร้อยละความบริสุทธิ์

การคำนวณหาความบริสุทธิ์ของธาตุเงินที่สกัดแยกได้ จากสารละลายเหลือทิ้งที่มี Ag<sup>+</sup> และตะกอน AgCl มีความบริสุทธิ์ 99.5% และ 91.0% ตามลำดับ จากผลดังกล่าวพบว่า ธาตุเงินที่สกัดได้จากสารละลายเหลือทิ้ง Ag<sup>+</sup> มีความบริสุทธิ์สูงที่สุด เนื่องจากเป็นธาตุเงินที่สกัดแยกได้สารละลาย AgNO<sub>3</sub> ที่เหลือจากการทดลองของห้องปฏิบัติการเคมี ซึ่งมีสิ่งเจือปนน้อยมาก

**ตารางที่ 1** การสกัดแยกธาตุเงินจากสารและวัสดุเหลือทิ้ง

แหล่งที่มาของธาตุเงิน	ปริมาณวัตถุดิบ	ธาตุเงินที่สกัดแยกได้ (g)	ร้อยละความบริสุทธิ์
สารละลายเหลือทิ้งที่มี $Ag^+$	2,370 mL	23.738	99.5
ตะกอน $AgCl$	37.86 g	16.630	91.0

### 3.2 ค่าใช้จ่ายในการสกัดแยกธาตุเงินจากของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี

ในการสกัดธาตุเงินจากของเสียจากห้องปฏิบัติการนั้นมีวัสดุที่ต้องใช้ คือ ลวดทองแดง (ซึ่งได้จากเครื่องใช้ไฟฟ้าเก่า จึงไม่มีค่าใช้จ่ายใดๆ) ในการตกตะกอนธาตุเงิน และใช้สารละลายแอมโมเนียเข้มข้น ( $conc.NH_3$ ) ในการแยกธาตุเงินออกจากตะกอน  $AgCl$  ซึ่งใช้อัตราส่วน  $AgCl : NH_3 = 10 \text{ g} : 100 \text{ mL}$  โดยข้อมูลจากตารางที่ 1 ธาตุเงิน 16.63 g ได้จาก  $AgCl$  37.86 g ดังนั้น  $AgCl$  10 g จะแยกธาตุเงินได้ประมาณ 4.3 g โดยใช้  $conc.NH_3$  100 mL (ราคา  $conc.NH_3$  550 บาท/2500 mL) ดังนั้น พบว่า มีค่าใช้จ่ายประมาณ 7 บาทต่อการสกัดได้ธาตุเงิน 1 g ในขณะที่ธาตุเงินที่แยกจากสารละลายเหลือทิ้งที่มี  $Ag^+$  แทบจะไม่มีค่าใช้จ่ายใดๆ นอกจากกระดาษกรองที่นำมาใช้กรองสารเหลือทิ้งเบื้องต้นเท่านั้น

### 4. สมบัติของรีเอเจนต์ $AgNO_3$ ที่เตรียมได้ จากธาตุเงินที่สกัดแยกได้

#### 4.1 การหาจุดหลอมเหลว

จุดเดือดหรือจุดหลอมเหลว มีประโยชน์ในการช่วยบ่งชี้ ชนิดและความบริสุทธิ์ของสาร ดังนั้นได้ทำการทดลองนำผลึก  $AgNO_3$  ที่เตรียมได้หาจุด

**ตารางที่ 2** ความบริสุทธิ์และร้อยละของผลผลิตที่ได้ของรีเอเจนต์  $AgNO_3$  เตรียมได้

แหล่งที่มาของธาตุเงิน	ธาตุเงินตั้งต้น (g)	$AgNO_3$ ที่เตรียมได้ (g)	% Yield	ร้อยละความบริสุทธิ์
แผงวงจรพลาสติก KB	10.29	7.77	47.92	99.4
สารละลายเหลือทิ้งที่มี $Ag^+$	11.57	8.64	47.42	100.2
ตะกอน $AgCl$	3.83	1.59	26.43	99.7

หลอมเหลวของสาร พบว่าจุดหลอมเหลวของ  $AgNO_3$  ทางการค้า และ  $AgNO_3$  ที่เตรียมได้ มีค่าเท่ากับ  $210.8^\circ C$  และ  $209.5^\circ C$  ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันเพียง 0.62% ในขณะที่จุดหลอมเหลวตามทฤษฎีคือ  $212^\circ C$  (Windhola et al., 1976) แสดงให้เห็นเบื้องต้นว่า  $AgNO_3$  ที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์มาก นอกจากนี้ลักษณะของ  $AgNO_3$  ที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นผลึกใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นซึ่งเหมือนกับ  $AgNO_3$  ที่มีจำหน่ายทางการค้า

#### 4.2 ความบริสุทธิ์ของรีเอเจนต์ $AgNO_3$ ที่เตรียมได้

ความบริสุทธิ์และร้อยละของผลที่ได้ของซิลเวอร์ไนเตรตที่เตรียมจากธาตุเงินที่สกัดได้จากของเสียประเภทต่างๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2

จากผลการตรวจสอบร้อยละของผลผลิตที่ได้ จะเห็นว่าไม่สูงมากนัก อาจเนื่องจากในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างธาตุเงินกับ  $conc. HNO_3$  แม้ว่าธาตุเงินจะละลายหมดแต่อาจเกิดสมมูลของสารละลายอิมตัวขึ้นในระบบจนเกิดผลึกของ  $AgNO_3$  ขึ้น และยังคงมี  $Ag^+$  บางส่วนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ถูกกรองแยกออกไป

### 4.3 ค่าใช้จ่ายในการเตรียม $\text{AgNO}_3$ จากธาตุเงินที่สกัดได้

จากปริมาณธาตุเงินที่สกัดแยกได้จากของเสียแต่ละชนิดรวมถึง  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมได้ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างธาตุเงินกับกรดไนตริกเข้มข้นด้วยอัตราส่วน  $\text{Ag} : \text{HNO}_3$  เท่ากับ 1 g : 10 mL เมื่อนำมาคำนวณค่าใช้จ่ายในการเตรียม  $\text{AgNO}_3$  100 g ที่ได้จากของเสีย KB สารละลายเหลือทิ้งที่มี  $\text{Ag}^+$  และตะกอน  $\text{AgCl}$  มีค่าใช้จ่ายประมาณ 5,200 500 และ 2,400 บาท ตามลำดับ (คำนวณจากราคารวมของ conc. $\text{HNO}_3$  650 บาท/2500 mL ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาธาตุเงิน และค่าใช้จ่ายในการแยกธาตุเงินจาก KB สารละลายเหลือทิ้งที่มี  $\text{Ag}^+$  และตะกอน  $\text{AgCl}$  ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.3 และ 3.2 ตามลำดับ) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมได้จากของเสียห้องปฏิบัติการมีต้นทุนถูกกว่า  $\text{AgNO}_3$  ที่จำหน่ายทางการค้ามากถึง 55-90% ในขณะที่  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมได้จากขยะอิเล็กทรอนิกส์ (KB) มีค่าใช้จ่ายไม่แตกต่างจาก  $\text{AgNO}_3$  ที่มีจำหน่ายทางการค้ามากนัก แต่อย่างไรก็ตาม นับว่าเป็นแนวทางหนึ่งในการจัดการของเสียจากขยะ

### ตารางที่ 3 ผลการหาปริมาณคลอไรด์และความบริสุทธิ์ของเกลือแกลต์ตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ปริมาณ $\text{Cl}^-$ ในเกลือแกลต์ (%w/w)		ความบริสุทธิ์ของเกลือแกลต์ (%)	
	$\text{AgNO}_3$ ทางการค้า	$\text{AgNO}_3$ ที่เตรียมได้	$\text{AgNO}_3$ ทางการค้า	$\text{AgNO}_3$ ที่เตรียมได้
1	60.2 ± 0.5	60.7 ± 0.0	99.3	100.1
2	60.4 ± 0.4	60.2 ± 0.8	99.6	99.3
3	60.0 ± 0.2	59.9 ± 0.2	99.0	99.9

### 5.2 การหาปริมาณคลอไรด์ของตัวอย่างน้ำประปา และน้ำดื่มตัวอย่าง

จากผลการหาปริมาณคลอไรด์ โดยการไทเทรตแบบตกตะกอนแบบมอห์ร์ เมื่อนำผลปริมาณคลอไรด์มาคำนวณเป็นความบริสุทธิ์ของน้ำประปาและน้ำดื่มตัวอย่าง ได้ผลแสดงในตารางที่ 4 และเมื่อ

อิเล็กทรอนิกส์ที่นับวันจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นได้เป็นอย่างดี

### 5. การประยุกต์ใช้รีเอเจนต์ $\text{AgNO}_3$ ที่เตรียมได้

ในงานวิจัยได้นำรีเอเจนต์  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมได้มาใช้สำหรับวิเคราะห์หาคลอไรด์ 3 ชนิด คือ เกลือแกลต์ น้ำประปา และน้ำดื่มที่มีจำหน่ายทั่วไป และนำรีเอเจนต์ทอลเลนมาใช้ในการทดสอบเชิงคุณภาพ โดยมีผลการทดลองดังนี้คือ

#### 5.1 การหาปริมาณคลอไรด์และความบริสุทธิ์ของเกลือแกลต์ตัวอย่าง

จากผลการหาปริมาณคลอไรด์ โดยการไทเทรตแบบตกตะกอนแบบมอห์ร์ เมื่อนำผลปริมาณคลอไรด์มาคำนวณเป็นความบริสุทธิ์ของเกลือแกลต์ตัวอย่าง จำนวน 3 ตัวอย่าง ได้ผลแสดงในตารางที่ 3 และเมื่อนำผลที่ได้มาคำนวณเปรียบเทียบกับ T-test พบว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ โดยใช้รีเอเจนต์  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมได้ เทียบกับ รีเอเจนต์  $\text{AgNO}_3$  ที่มีจำหน่ายทางการค้า ให้ผลการวิเคราะห์ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

นำผลที่ได้มาคำนวณเปรียบเทียบกับ T-test พบว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ โดยใช้รีเอเจนต์  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมได้ เทียบกับรีเอเจนต์  $\text{AgNO}_3$  ที่มีจำหน่ายทางการค้า ให้ผลการวิเคราะห์ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

### 5.3 การเตรียมและการวิเคราะห์คุณสมบัติของรีเอเจนต์ทอลเลนจากราตุเงินที่สกัดแยกได้

จากการใช้รีเอเจนต์ทอลเลนทดสอบสารแอลดีไฮด์ (Aldehyde) และแอลฟาไฮดรอกซีคีโตน ( $\alpha$ -hydroxy ketone) ในสารตัวอย่าง ได้ผลแสดงดัง

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบกับรีเอเจนต์ทอลเลนที่เตรียมจาก  $\text{AgNO}_3$  ที่จำหน่ายทางการค้า พบว่ามีธาตุเงินฉาบเคลือบบนหลอดทดลองซึ่งเป็นการเกิด Silver mirror ดังรูปที่ 5

ตารางที่ 4 ผลการหาปริมาณคลอไรด์และความบริสุทธิ์ของน้ำประปาและน้ำดื่มตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ปริมาตร $\text{AgNO}_3$ 0.01 M (mL)		ปริมาณความเข้มข้น $\text{Cl}^-$ (ppm)	
	$\text{AgNO}_3$ ทางการค้า	$\text{AgNO}_3$ ที่เตรียมได้	$\text{AgNO}_3$ ทางการค้า	$\text{AgNO}_3$ ที่เตรียมได้
น้ำดื่ม 1	4.21	4.30	530	526
น้ำดื่ม 2	15.98	16.40	2,280	2,320
น้ำประปา	1.20	1.28	78.0	77.2



รูปที่ 5 ภาพแสดงการเกิด Silver mirror โดยใช้แอลดีไฮด์ และแอลฟาไฮดรอกซีคีโตน

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ารีเอเจนต์ทอลเลนที่เตรียมได้จาก  $\text{AgNO}_3$  ทั้งสองชนิดได้ผลเหมือนกัน โดยในกรณี น้ำตาลทราย (มิตรผล) Sucrose Formaldehyde Acetaldehyde และ Benzaldehyde ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันของแอลดีไฮด์จึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ทอลเลน  $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+ + 2\text{OH}^-$  ได้โดยสารตัวอย่างที่มีหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์เป็นองค์ประกอบถูกออกซิไดซ์

เป็นหมู่คาร์บอกซิลิก ส่วนซิลเวอร์ไอออน ( $\text{Ag}^+$ ) ถูกรีดิวซ์เป็นโลหะเงิน (Silver mirror) ฉาบที่ข้างหลอด แต่ Acetone, Acetic acid, Methanol และ Hexane นั้นพบว่าไม่เกิด Silver mirror เนื่องจากการไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ถูกออกซิไดซ์ได้ ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับทางทฤษฎี

**ตารางที่ 5** การทดสอบ Silver mirror ในตัวอย่างของรีเอเจนต์ทอลเลนที่เตรียมได้จาก  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมได้ และ  $\text{AgNO}_3$  ทางการค้า

สารตัวอย่าง	ผลการทดสอบ Silver mirror จากรีเอเจนต์ทอลเลนที่เตรียมจาก	
	$\text{AgNO}_3$ ที่เตรียมได้	$\text{AgNO}_3$ ทางการค้า
Sucrose	+	+
D-Glucose	+	+
D-Fructose	+	+
น้ำตาลทราย (มีตรผล)	+	+
*Formaldehyde	+	+
*Acetaldehyde	+	+
Benzaldehyde	+	+
Acetone	-	-
Acetic acid	-	-
Methanol	-	-
Hexane	-	-

หมายเหตุ + คือ เกิด Silver mirror - คือ ไม่เกิด Silver mirror \* คือ เกิด Silver mirror ได้โดยไม่ต้องให้ความร้อน

### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการแยกธาตุเงินจาก KB CD และสารละลายเหลือทิ้งจากห้องปฏิบัติการ คือ สารละลายเหลือทิ้งที่มี  $\text{Ag}^+$  และตะกอน  $\text{AgCl}$  โดยการสกัดด้วยกรดไนตริก และตกตะกอนธาตุเงินด้วยเทคนิคซีเมนเตชันด้วยโลหะทองแดง จากนั้นนำธาตุเงินที่ได้มาเตรียมเป็นรีเอเจนต์  $\text{AgNO}_3$

ในเบื้องต้นพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดธาตุเงินในตัวอย่าง KB คือ อัตราส่วน (ตัวอย่าง : สารละลาย) ที่ใช้ 1 : 20 ความร้อน  $60^\circ\text{C}$  ความเข้มข้นของกรดไนตริก 1 M ใช้เวลาในการสกัด 360 นาที และในตัวอย่าง CD คือ อัตราส่วน(ตัวอย่าง : สารละลาย) ที่ใช้ 1 : 5 ความร้อน  $60^\circ\text{C}$  ความเข้มข้นของกรดไนตริก 1 M ใช้เวลาในการสกัด 240 นาที ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการทดลองในการสกัดโลหะเงินออกจากตัวอย่าง KB และ CD คือ 36 และ 610 บาท ต่อกรัม ตามลำดับ ดังนั้นการสกัดธาตุเงินจาก KB มี

ความคุ้มค่ามากกว่า CD เนื่องจากมีปริมาณธาตุเงินเป็นองค์ประกอบมากกว่าและมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่า

นอกจากนี้ เมื่อนำธาตุเงินที่ตกตะกอนแยกได้จากสารสกัด KB สารละลายเหลือทิ้งที่มี  $\text{Ag}^+$  และตะกอน  $\text{AgCl}$  ไปเตรียมเป็นรีเอเจนต์  $\text{AgNO}_3$  พบว่าได้  $\text{AgNO}_3$  บริสุทธิ์ถึง 99.4-100.2% โดยเมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายในการเตรียม  $\text{AgNO}_3$  เทียบกับราคา  $\text{AgNO}_3$  ที่จำหน่ายทางการค้า พบว่า  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมจากของเสียจากห้องปฏิบัติการมีราคาถูกกว่าถึง 55-90% และเมื่อนำ  $\text{AgNO}_3$  ที่เตรียมได้นี้ไปทดสอบในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณพบว่าให้ผลไม่แตกต่างกับ  $\text{AgNO}_3$  ที่ขายทางการค้า

ดังนั้นในการวิจัยนี้สามารถสกัดธาตุเงินจากขยะอิเล็กทรอนิกส์และของเสียจากห้องปฏิบัติการและสามารถเตรียม รีเอเจนต์  $\text{AgNO}_3$  ที่มีคุณภาพสูง เพื่อทดแทนการจัดซื้อสารเคมีมาใช้ในห้องปฏิบัติการ อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการลดการทิ้งของเสียอันตรายสู่สิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปี 2556

## เอกสารอ้างอิง

- สรารุณี สมนาม. 2554. เคมีวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วีระ สอนโรสง. 2552. การสกัดแยกเงินจากของเหลือทิ้งใน ห้องปฏิบัติการ. วารสารกรมวิทยาศาสตร์ 179: 37-39.
- เผด็จ สิทธิสุนทร. 2543. คู่มือปฏิบัติการเคมีอินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Clesceri, L.S., Greeberg, A.E. and Trussell, R.R. (1989). Standard Methods for the Determination of Water and Wastewater. 7<sup>th</sup> Ed. Washington. American Public Health Association.
- Zienkiewicz-Strzalka, M., Pasieczna-Patkowska, S., Kozak, M. and Pikus, S., (2013). Silver Nanoparticles Incorporated onto Ordered Mesoporous Silica From Tollen's Reagent. Appl. Surf. Sci. 266: 337-343.
- Davis, L. and Fisher, R. (2015). Fingermark Recovery From Riot Debris: Bricks and Stones, Science & Justice 55: 97-102.
- Murphy, J.A., Ackerman, A.H. and Heeren, J.K. (1991). Recovery of Silver From and Some Uses for Waste Silver Chloride. J. Chem. Educ. 68: 602-604.
- Cotton, F.A., Wilkinson, G., Murillo, C.A. and Bochmann, M. (1999). Advanced Inorganic Chemistry, 6<sup>th</sup> Ed. New York. John Wiley&Sons.
- Joda, M.N. and Rashchi, F. (2012). Recovery of Ultra Fine Grained Silver and Copper From PC Board Scraps. Sep. Purif. Technol. 92: 36-42
- Syed, S., Suresha, S., Sharma, L.M. and Syed, A.A. (2002). Clean Technology For the Recovery of Silver From Processed Radiographic Films. Hydrometallurgy 63: 277-280.
- Cui, J. and Zhang, L. (2008). Metallurgical Recovery of Metals From Electronic Waste: A Review. J. Hazard. Mater. 158: 228-256.
- Aktas, S. (2010). Silver Recovery From Spent Silver Oxide Button Cells. Hydrometallurgy 104: 106-111.
- Abbaspour, A., Tashknurian, J., Ahmadpour, S., Mirahmadi, E., Sharghi, H., Khalifeh, R., Shahriyari, M.R. (2014). Construction of a New Selective Coated Disk Electrode For Ag(I) Based on Modified Polypyrrole-Carbon Nanotubes Composite with New Lariat Ether. Mater. Sci. Eng. C. 34: 326-333.
- Leone, C., Fenna, A., and Caggiano, A. (2013). Compact Disc Laser Cleaning for Polycarbonate Recovering, Procedia CIRP. 9: 73-78.
- Windhola, M., Budavari, S., Stroumtsos, L. Y. and Fertig, M. N. (1976). The Merck index. 9<sup>th</sup> Ed. N.J. Merck & Co., Inc. P.8261.

