การนำโลหะจากเศษซากอิเล็กทรอนิกส์กลับมาใช้ใหม่

เศษซากอิเล็กทรอนิกส์เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆที่หมดอายุการใช้งาน โดยในปัจจุบันนี้เป็นที่ทราบกันดีว่าอุปกรณ์เหล่านี้ที่มีอายุการใช้งานที่สั้นลงเรื่อยๆ ทำให้ปัญหาของปริมาณเศษซากอิเล็กทรอนิกส์ทวีความรุนแรงมากขึ้น ตัวอย่างที่สำคัญก็คือ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและโทรศัพท์มือถือที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีปริมาณการใช้งานอยู่เป็นจำนวนมาก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เหล่านี้ล้วนมีโลหะพื้นฐานและโลหะมีค่าเป็นองค์ประกอบที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่ โครงการนี้มีความมุ่งหวังที่จะส่งเสริมการนำทองคำและทองแดงกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เนื่องจากโลหะทั้งสองประเภทดังกล่าวในเศษซากอิเล็กทรอนิกส์มีมูลค่ารวมค่อนข้างสูง ซึ่งเทคโนโลยีที่รองรับก็มีอยู่หลากหลายประเภทและมีลักษณะเฉพาะของกระบวนการที่แตกต่างกันออกไป

ขั้นตอนในการนำเสนอแนวทางการสกัดโลหะจากเศษซากอิเล็กทรอนิกส์ในที่นี้จะประกอบด้วยหัวข้อขององค์ประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การเตรียมวัตถุดิบ เทคโนโลยีการนำโลหะจากเศษซากอิเล็กทรอนิกส์กลับมาใช้ใหม่ และประเด็นสิ่งแวดล้อม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. องค์ประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ตัวอย่างองค์ประกอบของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและโทรศัพท์มือถือแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิดนี้มีส่วนประกอบที่เป็นโลหะ ได้แก่ ทองแดง อลูมิเนียม และโลหะมีค่าอื่นๆ และองค์ประกอบที่เป็นอโลหะ ได้แก่ พลาสติก นอกจากนี้ ยังพบว่าสัดส่วนของโลหะมีค่า เช่น ทองคำ เงิน จะมีอยู่มากในโทรศัพท์มือถือเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล อย่างไรก็ดี จากสัดส่วนดังกล่าวของทั้งคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและโทรศัพท์มือถือ อาจกล่าวได้ว่าเศษซากอิเล็กทรอนิกส์มีความเป็นไปได้ที่จะถูกสกัดเพื่อนำโลหะต่างๆ กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่

ตารางที่ 1 ตัวอย่างสัดส่วนขององค์ประกอบต่างๆ ในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และโทรศัพท์มือถือโดยน้ำหนัก

องค์ประกอบ	คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล	โทรศัพท์มือถือ
อโลหะ[1]		
พลาสติก	10.90 – 22.99%	40%
แก้ว	24.88%	15%
โลหะ[2]		
เหล็ก (Fe)	20%	5%
ทองแดง (Cu)	7%	13%
อะลูมิเนียม (Al)	14%	1%
ตะกั่ว (Pb)	6%	0.3%
นิกเกิล (Ni)	0.85%	0.1%
เงิน (Ag)	189 ppm.	1,380 ppm.
ทองคำ (Au)	16 ppm.	350 ppm.
พาลาเดียม (Pd)	3 ppm.	210 ppm.

ที่มา: [1]กรมควบคุมมลพิษ, 2551.

[2]Jirang Cui and Lifeng Zhang. “Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review”. Journal of Hazardous material, 2008.

ในที่นี้ จะพิจารณาตัวอย่างองค์ประกอบโลหะของแผงวงจรพิมพ์ เนื่องจากแผงวงจรพิมพ์เป็นส่วนประกอบหลักในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แทบทุกชนิดและยังเป็นส่วนที่มีโลหะมีค่าอีกด้วย เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของโลหะชนิดต่างๆ ในแผงวงจรพิมพ์ดังแสดงในตารางที่ 2 จะพบอีกเช่นกันว่าแผงวงจรพิมพ์ของโทรศัพท์มือถือจะมีสัดส่วนของทองคำและทองแดงที่สูงกว่าคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

ตารางที่ 2 สัดส่วนของโลหะต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของแผงวงจรพิมพ์ในคอมพิวเตอร์ส่วนและโทรศัพท์มือถือ

องค์ประกอบ	คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล	โทรศัพท์มือถือ
เหล็ก (Fe)	1.3%	1.8%
ทองแดง (Cu)	20%	33%
อะลูมิเนียม (Al)	1.8%	1.5%
ตะกั่ว (Pb)	2.3%	1.3%
นิกเกิล (Ni)	0.43%	2.63%
เงิน (Ag)	570 ppm.	3,800 ppm.
ทองคำ (Au)	240 ppm.	1,500 ppm.
พาลาเดียม (Pd)	150 ppm.	300 ppm.

ที่มา: Luciana Harue Yamane, Viviane Tavares de Moraes, Denise Crocce Romano Espinosa and Jorge Alberto Soares Tenorio. “Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers”. Waste Management, 2011.

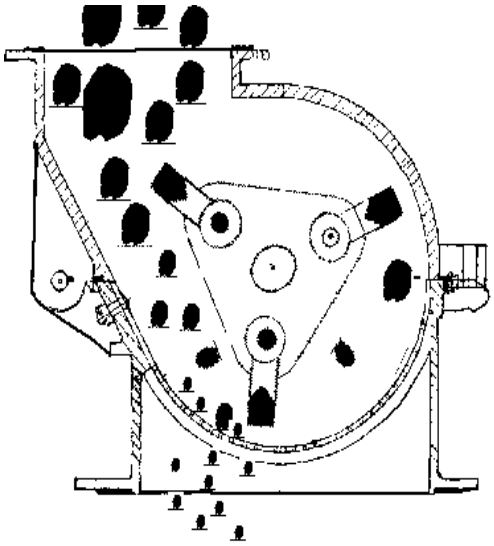
2. การเตรียมวัตถุดิบ

สำหรับขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบเพื่อนำโลหะจากเศษซากอิเล็กทรอนิกส์กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ

2.1 การลดขนาดของวัตถุดิบ

เป็นกระบวนการทางกายภาพที่อาศัยหลักการของแรงเฉือนหรือแรงบด มีวัตถุประสงค์ให้ซากอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดที่เล็กลง จนสามารถคัดแยกชิ้นโลหะออกจากวัตถุดิบได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ ขนาดที่เล็กลงยังจะทำให้สารสกัดเกิดการสัมผัสกับวัตถุดิบได้มากขึ้น ขนาดของวัตถุดิบที่ลดได้ควรมีขนาดในหน่วยมิลลิเมตร เช่น น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร (Fu-Rong Xiu and Fu-Shen Zhang. “Materials recovery from waste printed circuit boards by supercritical methanol”. Journal of Hazardous Materials, 2010.) หรือมีขนาดในหน่วยของเซนติเมตร (แต่ไม่ควรให้มีขนาดหลายเซนติเมตรมากนัก) เช่น 1-2 เซนติเมตร (I. Masavetas, A. Moutsatsou, E. Nikolaou, S. Spanou, A. Zoikis-karathanasis, E.A. Pavlatou and N. Spyrellis. “Production of copper powder from printed circuit boards by

electrodeposition". Global NEST Journal, 2009.) อุปกรณ์ที่ใช้กันโดยทั่วไปเพื่อการลดขนาด ได้แก่ เครื่องบด/ย่อยแบบค้อน (Hammer crusher) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยวัตถุดิบจะถูกป้อนเข้าไปในเครื่อง และพุ่งเข้าปะทะกับค้อนที่เหวี่ยงอยู่ ทำให้เกิดการลดขนาด อุปกรณ์ในการลดขนาดเหล่านี้มีอยู่หลายประเภท ดังนั้น ผู้ใช้จึงต้องเลือกเครื่องมือให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การเลือกประเภทใบมีดหรือค้อนบด ในบางประเภทวัตถุดิบไม่จำเป็นต้องใช้ขั้นตอนการลดขนาด เช่น เมื่อวัตถุดิบมีขนาดเล็กเพียงพออยู่แล้ว หรือโลหะที่ต้องการแยกไม่ได้ฝังตัวเป็นชิ้นอยู่ภายในวัตถุดิบ เช่น เป็นโลหะมีค่าที่เคลือบอยู่ที่ผิวของเศษซากอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น (ที่มา: Kui Huang, Jie Guo and Zhenming Xu. "Recycling of waste printed circuit boards: A review of current technologies and treatment status in China". Journal of Hazardous Materials, 2009.)



รูปที่ 1 เครื่องมือที่ใช้ในการลดขนาด (ที่มา: http://www.shibang-china.com/info/Hammer_Crusher.html)

2.2 การแยกโลหะออกจากซากวัตถุดิบขั้นต้น

กระบวนการที่ใช้เพื่อแยกโลหะออกจากซากอิเล็กทรอนิกส์อาจจะเป็นกระบวนการทางกายภาพหรือกระบวนการทางความร้อน โดยแต่ละกระบวนการมีรายละเอียด ดังนี้

2.2.1 กระบวนการทางกายภาพ

หลักการทำงานจะอาศัยความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพ เช่น แยกวัตถุดิบที่มีน้ำหนักหรือความหนาแน่นหรือขนาดที่แตกต่างกันออกจากกัน เช่น การใช้เครื่องคัดแยกด้วยอากาศ (Air classifier)

หรือด้วยการสั่นสะเทือน (Vibration) หรือด้วยตะแกรง (Screening) แบบต่างๆ ในชั้นนี้โลหะที่ถูกคัดแยกออกมาจะมีการปะปนกันมากมายหลายชนิด เนื่องจากมีความเป็นไปได้สูงมากว่า โลหะหลายประเภทอาจจะมีความหนาแน่นหรือมีน้ำหนักหรือมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน และกระบวนการทางกายภาพเหล่านี้มีความละเอียดอ่อนที่ไม่เพียงพอที่จะแบ่งแยกโลหะประเภทต่างๆ (ที่มา: Nusruth Mohabuth, Philip Hall and Nicholas Miles. “Investigating the use of vertical vibration to recover metal from electrical and electronic waste”. Minerals Engineering, 2007.)

2.2.2 กระบวนการทางความร้อน

หลักการทำงานก็คือ วัสดุต่างชนิดกันย่อมมีสมบัติทางความร้อน เช่น จุดเดือดที่ต่างกัน โดยโลหะจะมีจุดเดือดอยู่ค่อนข้างสูง เช่น ทองคำมีจุดเดือดประมาณ 2,856 องศาเซลเซียส ส่วนทองแดงมีจุดเดือดประมาณ 2,562 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส พลาสติกก็เกิดการสลายตัวแล้ว ดังนั้น เมื่อนำแผงวงจรพิมพ์มาเผาจะทำให้พลาสติกเกิดการสลายตัวออกไปก่อน คงเหลือไว้แต่โลหะประเภทต่างๆ ที่จะเข้าสู่กระบวนการ เพื่อทำให้โลหะที่ต้องการมีความบริสุทธิ์สูงขึ้นในขั้นตอนต่อไป กระบวนการทางความร้อนในขั้นต้นนี้มักจะเป็นกระบวนการง่ายๆ เช่น การเผาโดยตรง

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าในลำดับขั้นนี้เป็นเพียงการแยกโลหะในเบื้องต้นเท่านั้น เนื่องจากโลหะที่ได้จากการแยกยังคงเป็นกลุ่มของโลหะหลายชนิดปะปนกันอยู่ ดังนั้น หากต้องการโลหะเพียงชนิดเดียวจึงจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการต่อเนื่องอื่นๆ อีกเช่น กระบวนการทางสารละลายเคมี กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีที่โลหะมีค่าสามารถถูกดึงออกมาโดยง่าย กระบวนการแยกโลหะออกจากวัตถุดิบในขั้นต้นนี้ก็อาจจะไม่มีความจำเป็น ดังเช่นการใช้น้ำยาลอกทองคำออกจากบริเวณผิวของเศษซากอิเล็กทรอนิกส์ (ที่มา: Kui Huang, Jie Guo and Zhenming Xu. “Recycling of waste printed circuit boards: A review of current technologies and treatment status in China”. Journal of Hazardous Materials, 2009.)

3. การทำให้โลหะมีความบริสุทธิ์มากขึ้น

เนื่องจากวัตถุดิบที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบมาแล้วจะมีองค์ประกอบเป็นกลุ่มของโลหะชนิดต่างๆ รวมถึงสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น เศษพลาสติก เศษยาง เศษแก้ว จึงมีความจำเป็นที่ต้องนำวัตถุดิบดังกล่าวมาเข้าสู่กระบวนการทำให้โลหะแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น โดยกระบวนการต่างๆ ได้แก่ กระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางสารละลายเคมี หรือกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี รายละเอียดดังนี้

3.1 กระบวนการทางความร้อน

สำหรับกระบวนการนี้จะเริ่มต้นด้วยการป้อนวัตถุดิบที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมการมาแล้วเข้าสู่เตาหลอม อุณหภูมิที่ใช้กับเตาหลอมเศษซากอิเล็กทรอนิกส์จะมีค่าสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ตัวอย่างเช่น มีงานวิจัยหนึ่งใช้อุณหภูมิที่ 1200 องศาเซลเซียส (ที่มา: Gongming Zhou, Zhihua Luo and Xulu Zhai. “Experimental Study on Metal Recycling from Waste PCB”. Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management. Chennai, India, 5 - 7 September 2007.) ทำให้พลาสติกเกิดการเผาไหม้แล้วสลายตัวไปเป็นก๊าซ ส่วนโลหะบางชนิด เช่น ตะกั่ว สังกะสี เหล็ก และสิ่งเจือปนต่างๆ เช่นออกไซด์ของอลูมิน่าและซิลิกา จะเกิดการแยกตัวออกมากลายเป็นชั้นของตะกรัน (Slag) ลอยอยู่บนผิวหน้าของโลหะหลอมเหลว ส่วนด้านล่างของเตาหลอมจะเป็นบริเวณของโลหะหลอมเหลวซึ่งจะมีองค์ประกอบหลักเป็นทองแดง และมีองค์ประกอบรองเป็นโลหะมีค่าอื่นๆ เช่น ทองคำ เงิน ละลายอยู่

โลหะหลอมเหลวที่มีองค์ประกอบหลักเป็นทองแดง จะถูกนำเข้าสู่เตาหลอมลำดับที่ 2 เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของโลหะที่ต้องการให้สูงขึ้นไปอีก โดยการทำให้เกิดชั้นของตะกรันเพื่อดึงโลหะเจือปนกลุ่มของตะกั่วออกไป หลังจากนั้นน้ำโลหะที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นนี้จะถูกนำไปหลอมเพื่อเทเป็นแท่งในลำดับต่อไป หากแท่งโลหะนี้ยังมีความบริสุทธิ์ไม่เพียงพออาจจะนำไปเข้าสู่กระบวนการไฟฟ้าเคมี เช่น Electrorefining เพื่อเพิ่มความเข้มข้นได้อีก (ที่มา: Jirang Cui and Lifeng Zhang. “Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review”. Journal of Hazardous material, 2008.)

3.2 กระบวนการทางสารละลายเคมี

หลักการสำคัญของกระบวนการนี้ก็คือ การใช้กรดหรือสารที่มีความสามารถในการละลายโลหะที่ต้องการ เพื่อละลายโลหะนั้นๆ ออกมาจากวัตถุดิบที่เป็นของแข็ง จากนั้นสารละลายที่ได้จะถูกนำไปเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการต่อเนื่องต่างๆ เช่น การตกตะกอน การสกัด การดูดซับ เป็นต้น

สารชะละลายที่นิยมนำมาใช้เพื่อสกัดแยกโลหะกลุ่มโลหะมีค่า (Precious metals) เช่น ทองคำ ได้แก่ ไซยาไนด์และเฮไลด์ โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

ไซยาไนด์ (Cyanide): ไซยาไนด์ได้รับความนิยมในการใช้สกัดทองคำในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สารประกอบไซยาไนด์ที่นิยมใช้มีหลายรูปแบบ เช่น โซเดียมไซยาไนด์ โพแทสเซียมไซยาไนด์ เป็นต้น โดยปกติแล้วเมื่อสารประกอบไซยาไนด์อยู่ในน้ำจะเกิดการละลายและแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุบวกและลบ ดังสมการที่ (1) ซึ่งไอออนลบของไซยาไนด์หรือไซยาไนด์อิสระ (Free

cyanide: CN^-) สามารถสร้างพันธะเคมีกับโลหะมีค่า ซึ่งในที่นี้ก็คือ ทองคำ ได้ดังสมการที่ (2) - (3) สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้ไซยาไนด์ในการชะละลายโลหะ คือ ค่าพีเอชช่วง 10 – 10.5 นอกจากไซยาไนด์จะมีความสามารถในการสกัดทองคำแล้วยังสามารถสกัดโลหะอื่นได้ด้วย เช่น เงิน พาลาเดียม แต่ลำดับการชะละลายจะเกิดการชะทองคำออกมาก่อน อย่างไรก็ดี สารไซยาไนด์นี้มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมที่สูง ดังนั้น สารละลายที่เกิดจากการสกัดนี้จึงต้องได้รับการบำบัดอย่างถูกต้องตามหลักวิชาก่อนปล่อยออกสู่ทางน้ำสาธารณะ

(1) $NaCN \longrightarrow Na^+ + CN^-$

(2) $2\,Au + 4\,CN^- + O_2 + 2\,H_2O \longrightarrow 2\,Au(CN)^-_2 + H_2O_2 + 2\,OH^-$

(3) $2\,Au + 4\,CN^- + H_2O_2 \longrightarrow 2\,Au(CN)^-_2 + 2\,OH^-$

เฮไลด์ (Halide): สารกลุ่มเฮไลด์หรือธาตุในหมู่ที่ 7 ตามตารางธาตุ ได้แก่ ฟลูออรีน (Fluorine) คลอรีน (Chlorine) โบรมีน (Bromine) และ ไอโอดีน (Iodine) แต่สารที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรมเพื่อการสกัดโลหะมีค่าก็คือ คลอรีน/คลอไรด์ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารนี้คือค่าพีเอชต่ำ อุณหภูมิสูง และพื้นที่ผิวสัมผัสของวัตถุดิบที่มาก โดยปกติสารกลุ่มคลอรีนที่ใช้ในการสกัดทองคำก็คือ กรดกัดทอง (Aqua regia) ซึ่งเกิดจากส่วนผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 ส่วน กับกรดไนตริกเข้มข้น 1 ส่วน ซึ่งกรดไนตริกเป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรงและสามารถชะละลายทองคำที่อยู่ในสภาพของแข็งให้ละลายอยู่ในรูปของไอออนได้ดังสมการที่ (4) ในขณะเดียวกันกรดไฮโดรคลอริกจะแตกตัวให้คลอไรด์ไอออน (Chloride Ion: Cl^-) ซึ่งคลอไรด์ไอออนจะสร้างพันธะกับไอออนของทองคำเกิดเป็น $AuCl_4^-$ ได้ดังสมการที่ (5) โดยปกติแล้วการใช้สารนี้เพื่อสกัดทองคำจะมีความยุ่งยากในการควบคุมเรื่องความปลอดภัยมากกว่าการใช้ไซยาไนด์ เนื่องจากมีสภาพการกัดกร่อนที่สูง วัสดุที่ใช้ต้องเป็นเหล็กเกรดที่ทนการกัดกร่อนได้ดีหรือต้องมีการหุ้มด้วยยาง นอกจากนี้ ในปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องจะเกิดก๊าซคลอรีนที่มีความเป็นพิษมากอีกด้วย

(4) $Au\,(s) + 3\,NO_3^- + 6\,H^+ \longrightarrow Au^{3+}\,(aq) + 3\,NO_2 + 3\,H_2O$

(5) $Au^{3+}\,(aq) + 4\,Cl^- \longrightarrow AuCl_4^-$

ขั้นตอนหลังจากการชะละลายทองคำให้ออกมาอยู่ในรูปของสารละลาย คือ ขั้นตอนการแยกทองคำออกจากสารละลายและทำให้ทองคำมีความเข้มข้นที่สูงขึ้น ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายกรรมวิธีทั้งที่เป็นแบบไฟฟ้าเคมี (Electrowinning) และแบบเคมี เช่น การแทนที่ด้วยโลหะ (Cementation) การดูดติดผิว

(ด้วย Activated carbon) และ การรีดิวซ์ทางเคมี (Chemical reduction) ในขั้นตอนนี้มีกระบวนการทางเคมี ดังต่อไปนี้

Cementation: เช่น Zinc Cementation ที่ถูกนำมาใช้ในการนำโลหะทองคำกลับคืนมาจากสารละลายไซยาไนด์ที่มีเงินละลายอยู่สูง โดยสภาวะที่เหมาะสม อยู่ในช่วงพีเอชช่วง 8 – 11 วิธีการนี้อาจเกิดสารละลายสังกะสีไซยาไนด์ที่ต้องมีการจัดการต่อไป

Adsorption (โดย Activated carbon): Activated carbon ที่ถูกนำมาใช้ในการดูดซับทองคำกลับคืนมาจากสารละลายไซยาไนด์ คือ Carbon in pulp (CIP) และ Carbon in leach (CIL) โดยข้อแตกต่างของคาร์บอนสองชนิดนี้คือ CIP ต้องรอให้กระบวนการชะละลายโลหะสิ้นสุดลงก่อน กระบวนการดูดซับจึงจะสามารถเริ่มต้นได้ ส่วน CIL จะสามารถเกิดกระบวนการชะละลายและดูดซับโลหะไปพร้อมๆ กันได้ วิธีนี้ต้องหาทางกำจัดคาร์บอนออกไปก่อนที่จะได้ธาตุทองคำ

Chemical reduction: การนำทองคำกลับคืนมาจากสารละลายทองคลอไรด์ด้วยการเติมสาร Reducing agent เช่น โซเดียมซัลไฟต์ โพแทสเซียมซัลไฟต์ หรืออาจเป็นสารตัวอื่น เช่น เฟอรัสซัลเฟต โดยจะส่งผลให้ทองคำเกิดการแยกตัวออกมาจากสารละลาย วิธีนี้จะได้ธาตุทองคำออกมาโดยตรง

สำหรับสารชะละลายที่นิยมนำมาใช้เพื่อสกัดแยกทองแดง ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดกัดทอง โดยกรดเหล่านี้จะทำหน้าที่ในการทำละลายทองแดง ซึ่งส่งผลให้ทองแดงในรูปของแข็งถูกชะละลายออกมากลายเป็นทองแดงในรูปของสารละลาย ตัวอย่างเช่น การใช้กรดไนตริกในการชะละลายทองแดงตามปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ (6) - (7) ส่วนขั้นตอนการแยกทองแดงออกจากสารละลายและทำให้ทองแดงมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น อาจใช้วิธี Cementation ด้วยสังกะสีหรือเหล็ก หรือใช้วิธีเติม Reducing agent เช่น โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ทำให้เกิดตะกอนของทองแดง (ที่มา: สุภาวดี หอจันทึก สุภาพร พรมศรี และนันทณัฐ ศรีประเสริฐ. “การกำจัดทองแดงออกจากน้ำยากัดทองแดงโดยใช้กระบวนการโบโรไฮไดรด์รีดักชัน”.)

(6) $3\,Cu + 2\,HNO_3 \longrightarrow 3\,CuO + 2\,NO + H_2O$

(7) $3\,CuO + 6\,HNO_3 \longrightarrow 3\,Cu(NO_3)_2 + 3\,H_2O$

สำหรับผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เกิดขึ้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการทางสารละลายเคมีอาจอยู่ในรูปของตะกอนของแข็งหรือสารละลายก็ได้ ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์สุดท้ายของโลหะที่ต้องการ โดยหากผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นตะกอนของแข็งที่มีความบริสุทธิ์สูงเพียงพอแล้วก็สามารถใช้วิธีกรองแยก หลังจากนั้นอาจใช้วิธี

หลอมเป็นแท่งโลหะดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.1 (กระบวนการทางความร้อน) แต่ถ้าหากตะกอนโลหะยังมีความบริสุทธิ์ไม่เพียงพออาจต้องใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีด้วยวิธี Electrorefining (ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป) หรืออาจใช้การสกัดโดยกระบวนการสารละลายเคมีอีกครั้ง เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของโลหะที่ต้องการจากตะกอนดังกล่าว (ที่มา: Jirang Cui and Lifeng Zhang. “Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review”. Journal of Hazardous material, 2008.)

สำหรับข้อมูลความแตกต่างระหว่างกระบวนการทางความร้อนและกระบวนการทางสารละลายเคมีเพื่อใช้พิจารณาในการตัดสินใจเลือกกระบวนการ คือ กระบวนการทางความร้อนมีความเหมาะสมกับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้ คือ การเกิดปัญหาของมลพิษทางอากาศ เช่น ไดออกซินจากการเผาหรือหลอมพลาสติก จึงต้องมีระบบการจัดการมลพิษต่อเนื่องซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อมูลค่าการลงทุนต่อไป ในขณะที่กระบวนการทางสารละลายเคมีมีความเหมาะสมกับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก และเมื่อเทียบกับกระบวนการทางความร้อนจะพบว่ากระบวนการทางสารละลายเคมีสามารถสกัดแยกโลหะที่ต้องการได้อย่างเจาะจงมากกว่าโดยอาศัยการเลือกสารเคมีที่มีความเจาะจงกับโลหะชนิดนั้นๆ แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้ คือ การเกิดขึ้นของของเสียหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ ไม่ว่าจะเป็นน้ำเสียหรือกากตะกอน ซึ่งจะต้องได้รับการจัดการอย่างถูกวิธี เนื่องจากสารเคมีบางชนิดที่ใช้ในกระบวนการเป็นสารอันตราย เช่น กรด ไซยาไนด์ เป็นต้น ดังนั้น การเลือกรูปแบบของกระบวนการจึงควรเลือกให้มีความเหมาะสมกับขนาดและแหล่งทรัพยากรที่มีของตนเอง

3.3 กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

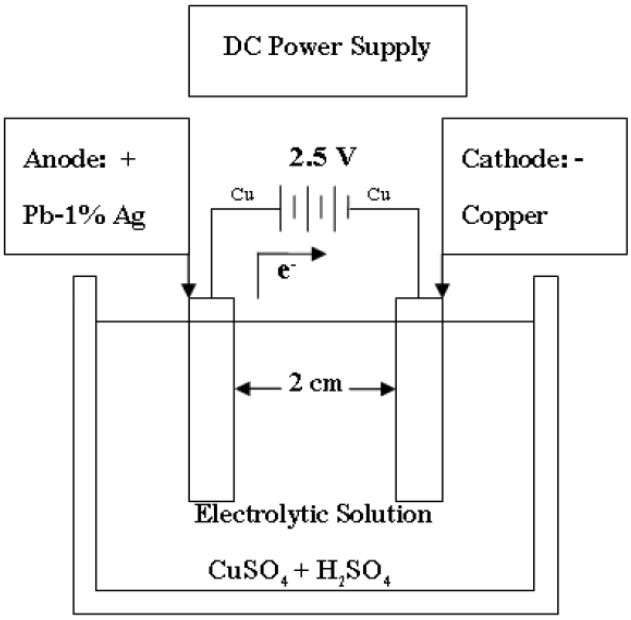
กระบวนการนี้มักใช้ในขั้นตอนของการทำโลหะให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น ดังนั้น จึงมักเป็นขั้นตอนหลังจากขั้นตอนของการแยกโลหะชนิดที่ต้องการออกมาจากเศษซากอิเล็กทรอนิกส์ได้แล้ว ข้อดีของกระบวนการนี้ คือ ไม่มีปัญหาเรื่องฝุ่น เสียง และมลพิษทางอากาศอื่นๆ ในระหว่างการทำงาน แต่จะมีปัญหาของเสียที่จะเกิดขึ้นภายหลังจากกระบวนการสิ้นสุดลง ของเสียดังกล่าวมักมีสถานะเป็นของเหลวและกากตะกอนที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักและสารเคมีอันตราย ซึ่งต้องได้รับการกำจัดต่อไปอย่างถูกวิธี

กระบวนการนี้อาศัยหลักการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้า (Electrolyte) และแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออน (Ions) ไปยังขั้วไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้า (Electrolytic cell) ที่มีแผ่นขั้วบวก (Anode) และแผ่นขั้วลบ (Cathode) วางเรียงสลับกันไป มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Rectifier) เพื่อเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง แล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วบวกและขั้วลบที่จุ่มในสารละลาย (Electrolyte) กระบวนการทางไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่

3.3.1 Electrowinning

เป็นวิธีที่ใช้สำหรับแยกสกัดโลหะออกจากสารละลาย โดยจะใช้ขั้วบวกเป็นโลหะที่ไม่สามารถละลายในสารละลายได้ เช่น Stainless steel (แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม) Platinized titanium หรือโลหะผสมของ Pb-1% Ag Alloy ส่วนขั้วลบจะเป็นโลหะชนิดเดียวกับโลหะที่ต้องการจะให้แยกออกจากสารละลายแล้วมาเกาะติดที่ขั้วนี้หรืออาจเป็นโลหะคนละชนิดกันก็ได้ ซึ่งเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังระบบแล้วโลหะที่ต้องการสกัดออกจากสารละลายจะเคลื่อนที่มาเกาะที่ขั้วลบ ดังนั้น Electrowinning จะถูกนำมาใช้กับสารละลายที่มีโลหะที่ต้องการละลายอยู่

ในกรณีของการแยกทองคำออกจากสารละลายอาจเลือกใช้ขั้วบวกที่ทำจาก Stainless steel, Graphite หรือ Titanium ส่วนขั้วลบอาจเป็น Stainless steel หรือ Porous graphite ส่วนกรณีของการแยกทองแดงออกจากสารละลายที่เกิดจากการใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารชะละลายอาจใช้ขั้วบวกเป็น Pb-1% Ag Alloy ขั้วลบเป็นทองแดงบริสุทธิ์ ในกรณีที่ใช้กรดไนตริกเป็นสารชะละลายอาจใช้ขั้วบวกเป็น Platinized titanium ขั้วลบเป็น Stainless steel เป็นต้น ตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าเพื่อการแยกทองแดงออกจากสารละลาย (Electrowinning) แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าเพื่อการแยกทองแดงออกจากสารละลายโดยกระบวนการ Electrowinning

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ไฟฟ้าสามารถอธิบายได้จากตัวอย่างของการแยกทองแดงออกจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตและกรดซัลฟิวริก โดยขั้วบวกของเซลล์ไฟฟ้าทำจาก Pb-1% Ag Alloy และขั้วลบเป็นทองแดงบริสุทธิ์ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกและลบ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้วลบ: ทองแดงที่มีประจุบวกจะสลายตัวแยกออกจากสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต วิ่งไปรับอิเล็กตรอนที่แผ่นขั้วลบ (Cathode) ที่ใช้แผ่นโลหะทองแดงบริสุทธิ์เป็นขั้วไฟฟ้าโดยเกิดปฏิกิริยารีดักชั่น ทำให้ Cu^{2+} มารับอิเล็กตรอนแล้วกลายเป็นกลางและมาเกาะอยู่บนแผ่นขั้วลบ ดังสมการที่ (8)

(8) $Cu^{2+} + 2\,e^{-} \longrightarrow Cu\,(s)$

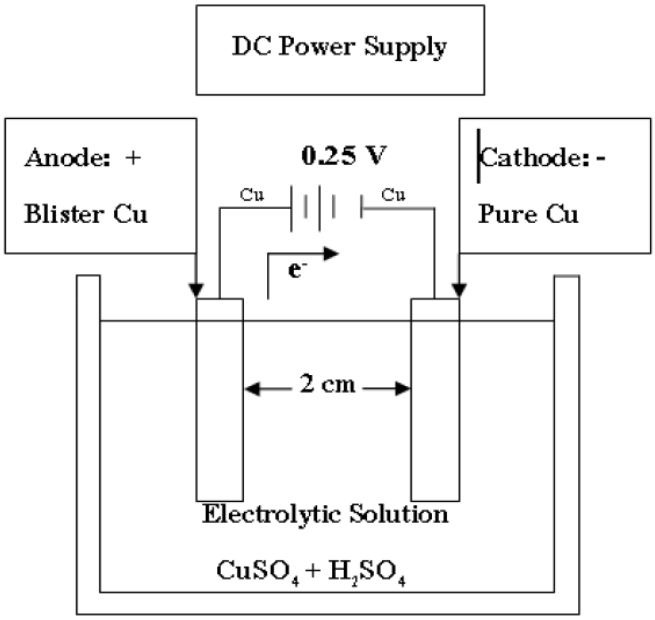
ขั้วบวก: แผ่นโลหะผสมของตะกั่วกับเงินจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยที่แผ่นขั้วบวกจะไม่สลายตัวหรือละลาย แต่ที่ขั้วบวกนี้จะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของน้ำเป็นไฮโดรเจนไอออน ออกซิเจนไอออน และให้อิเล็กตรอนออกมา โดยที่ออกซิเจนไอออนจะวิ่งไปที่ขั้วบวกแล้วตัวเองกลายเป็นกลาง ซึ่งก็คือก๊าซออกซิเจนที่ผุดขึ้นมาบริเวณจากขั้วบวก ส่วนไฮโดรเจนอิออนจะรวมตัวกันเข้ากับซัลเฟตกลายเป็นกรดกำมะถัน

(9) $H_2O \longrightarrow 2\,H^{+} + \frac{1}{2}\,O_2 + 2\,e^{-}$

3.3.2 Electrorefining

เป็นวิธีที่ขั้วบวกจะเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะในสารละลาย มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการแยกโลหะที่ต้องการออกมาจากแท่งขั้วบวก โดยเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าแล้วโลหะจากขั้วบวกจะละลายลงในสารละลาย จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชัน ทำให้โลหะนั้นเคลื่อนที่ไปเกาะที่ขั้วลบ ซึ่งขั้วลบจะเป็นโลหะชนิดเดียวกับโลหะที่ต้องการแยกหรืออาจเป็นโลหะคนละชนิดกันก็ได้ ดังนั้น Electrorefining จะถูกนำมาใช้เมื่อโลหะที่ได้จากการสกัดขั้นต้นยังเป็นของแข็งที่มีความบริสุทธิ์ไม่เพียงพอ หรืออาจถูกนำมาใช้ต่อจากกระบวนการทางความร้อนที่นำโลหะมาหลอมเทเป็นแท่ง จากนั้นจึงนำแท่งโลหะที่มีโลหะหลายชนิดปะปนกันนั้นมาเป็นขั้วบวกของเซลล์ไฟฟ้าในกระบวนการนี้

การเลือกใช้โลหะในการทำขั้วไฟฟ้า เช่น กรณีการแยกทองคำอาจใช้ขั้วบวกที่มีทองคำเป็นองค์ประกอบ ส่วนกรณีการแยกทองแดงอาจใช้ขั้วบวกเป็นทองแดงเป็นองค์ประกอบเช่นกัน ตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าเพื่อการแยกทองแดงออกจากขั้วบวก (Electrorefining) แสดงดังรูปที่ 3 (ที่มา: นภาพร อรุณเกียรติก้อง, และปราโมทย์ ภูพานทอง. “ต้นแบบการแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์”. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2551.)



รูปที่ 3 ตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าเพื่อการแยกทองแดงออกจากขั้วบวกโดยกระบวนการ Electrowinning

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ไฟฟ้าสามารถอธิบายได้จากตัวอย่างของการแยกทองแดงออกจากขั้วลบ โดยสารละลายอิเล็กโตรไลท์ที่ใช้เป็นสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ขั้วบวกของเซลล์ไฟฟ้าเป็นแท่งโลหะทองแดงที่ยังไม่บริสุทธิ์จากการหลอมเทแท่ง และขั้วลบเป็นทองแดงบริสุทธิ์ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกและลบ คือ ขั้วบวกเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงได้เป็นไอออนของโลหะทองแดงแยกตัวลงไปอยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลท์ แล้วไอออนของโลหะทองแดงดังกล่าวก็จะเคลื่อนที่ไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบเกิดปฏิกิริยารีดักชัน แล้วกลายเป็นโลหะทองแดงบริสุทธิ์เกาะที่ขั้วลบ ดังสมการที่ (10) – (11) ซึ่งแสดงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ณ ขั้วบวกและขั้วลบ ตามลำดับ

(10) $Cu\ (s) \longrightarrow Cu^{2+} + 2\ e^-$

(11) $Cu^{2+} + 2\ e^- \longrightarrow Cu\ (s)$

4.กรณีศึกษาในประเทศไทย

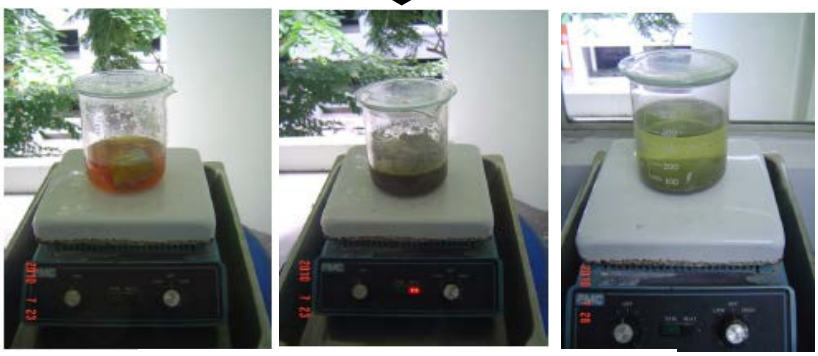
4.1 การสกัดทองคำจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

เป็นการทดลองดำเนินการโดยผู้เชี่ยวชาญของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ แผนผังของกระบวนการแสดงดังรูปที่ 4 (ที่มา: ปราโมทย์ ภูพานทอง. “เทคโนโลยีการสกัดโลหะพื้นฐานและโลหะมี

ค่าจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และจากการทำทองโป่ง". กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2550.)



ใช้น้ำยาลอกทองเพื่อลอกทองคำที่เคลือบผิว
ของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์



แยกทองจากน้ำยาลอกทองด้วยวิธีแทนที่ด้วย

รูปที่ 4 การสกัดโลหะทองคำจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระบวนการทางสารละลายเคมี

ขั้นตอนหลักๆ ของกระบวนการในรูปที่ 4 คือ ใช้น้ำยาลอกทองชะละลายทองคำที่เคลือบอยู่ที่ผิวของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการชะทองคำมาผ่านขั้นตอนการแทนที่ด้วยโลหะ (Cementation) ในขั้นตอนนี้จะเกิดตะกอนของแข็งปะปนอยู่ในสารละลาย หลังจากนั้นนำมาผ่านการกรองเพื่อแยกส่วนของของแข็งที่เป็นทองคำออกจากสารละลาย นำทองคำที่ได้ไปผ่านการล้างน้ำให้สะอาด แล้วทำให้แห้ง ซึ่งถ้าทองคำที่ได้มีความบริสุทธิ์เพียงพอแล้วก็อาจนำไปหลอมเป็นแท่งก็ได้ แต่ถ้าหากความบริสุทธิ์ยังไม่มาก ก็สามารถนำไปเข้าสู่กระบวนการเพิ่มความบริสุทธิ์ของทองคำให้มากกว่า 99.9% ตามขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 5 (ที่มา: ปราโมทย์ ภูพานทอง. "เทคโนโลยีการสกัดโลหะพื้นฐานและโลหะมีค่าจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และจากการทำทองโป่ง". กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2550.)

ขั้นตอนหลักๆ ของกระบวนการเพิ่มความบริสุทธิ์ในรูปที่ 5 เริ่มจากการนำผงทองคำที่ได้จากการแยกทองคำตามกระบวนการในรูปที่ 4 มาละลายด้วยกรดกัดทอง (Aqua regia) เนื่องจากผงทองคำยังมีสิ่งเจือปนอยู่ทำให้ความบริสุทธิ์ไม่มากตามที่ต้องการ จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาทำการตกตะกอนทองคำให้แยกออกมาในรูปของแข็งโดยใช้สารประกอบซัลไฟต์ เช่น โซเดียมซัลไฟต์ นำสารละลายดังกล่าวมากรองแยกตะกอนทองคำออก แล้วนำตะกอนทองคำที่กรองได้ไปหลอมในเบ้ากระดาษ (ที่มา: ปราโมทย์ ภูพานทอง. “เทคโนโลยีการสกัดโลหะพื้นฐานและโลหะมีค่าจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และจากการทำทองโป่ง”. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2550.)



ละลายผงทองด้วยกรดกัดทอง



ตกตะกอนทองด้วยสารละลายซัลไฟต์



กรองแยกผงทองจากสารละลาย



หลอมทองในเบ้ากระดาษ

รูปที่ 5 การทำทองคำให้บริสุทธิ์มากกว่า 99.9%

4.2 การสกัดทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

มีการดำเนินการทดลองโดยผู้เชี่ยวชาญของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ แผนผังของกระบวนการดังแสดงตามรูปที่ 6 (ที่มา: นภาพร อรุณเกียรติก้อง, และปราโมทย์ ภูพานทอง. “ต้นแบบการแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์”. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2551.)



รูปที่ 6 การสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระบวนการต่างๆ

ขั้นตอนหลักๆ ของกระบวนการนี้ก็คือ การนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการบดเพื่อลดขนาดและแยกส่วนที่เป็นพลาสติกออกไปแล้วมาหลอมเทแท่ง จากนั้นนำแท่งโลหะนี้มาเป็นขั้วบวกของเซลล์ไฟฟ้าเคมีตามหลักการของกระบวนการ Electrorefining เพื่อทำให้โลหะทองแดงในขั้วบวกให้ละลายลงมาอยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลท์จากนั้นก็มาเกาะอยู่ที่ขั้วลบด้วย ซึ่งสุดท้ายแผ่นโลหะทองแดงจะสามารถถูกแยกออกจากขั้วลบได้ต่อไป (ที่มา: นภาพร อรุณเกียรติก้อง, และปราโมทย์ ภูพานทอง. “ต้นแบบการแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์”. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2551.)

5.ประเด็นสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากกระบวนการนำโลหะพื้นฐานและโลหะมีค่าจากเศษซากอิเล็กทรอนิกส์กลับมาใช้ใหม่มักเกิดของเสียขึ้นทั้งในระหว่างกระบวนการและหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ ของเสียที่เกิดขึ้นหลักๆ สามารถแบ่งตามสถานะออกเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งควรได้รับการจัดการอย่างถูกวิธี โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 ของแข็ง

ของเสียประเภทของแข็งเกิดขึ้นได้ทั้งจากกระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางสารละลายเคมี และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ดังนี้

5.1.1 กระบวนการทางความร้อน

มักเป็นของเสียประเภทของแข็งที่เหลือหลังจากกระบวนการหลอมเหลว เช่น กากตะกรัน (Slag) ซึ่งจะมีองค์ประกอบของโลหะต่างๆ (เช่น ตะกั่ว สังกะสี) และสิ่งเจือปนอื่นๆ โดยกากตะกรันที่เกิดขึ้นนี้ควรนำมาผ่านขั้นตอนการสกัดโลหะออกมาก่อน จากนั้นส่วนประกอบที่เหลือหากไม่มีองค์ประกอบที่อันตรายแล้วอาจใช้วิธีฝังกลบก็ได้ หากยังเหลือองค์ประกอบที่เป็นอันตรายก็ต้องนำไปปรับเสถียรและฝังกลบในหลุมฝังกลบขยะอันตรายต่อไป (ที่มา:Jirang Cui and Lifeng Zhang. “Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review”. Journal of Hazardous material, 2008.)

5.1.2 กระบวนการทางสารละลายเคมี

ของเสียประเภทของแข็งที่เกิดขึ้นอาจเป็นตะกอนที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการตกตะกอนโลหะ ดังนั้นจึงอาจมีโลหะหลายชนิดเป็นองค์ประกอบ ซึ่งอาจทำการแยกโลหะออกมาก่อนแล้วจึงนำไปฝังกลบ นอกจากนั้น อาจเกิดของเสียประเภท Activated carbon ที่ใช้ในขั้นตอนการดูดซับซึ่งวิธีการจัดการควร

ต้องพิจารณาก่อนว่ามีส่วนประกอบที่อันตรายหรือไม่ ถ้าไม่มีอาจทำการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่หรือกำจัดโดยการเผาทิ้งหรือฝังกลบก็ได้ แต่ถ้าหากมีส่วนประกอบที่อันตรายอยู่ เช่น ไซยาไนด์ ก็อาจลดความเป็นพิษโดยใช้สาร Oxidant เช่น คลอรีน เพื่อเปลี่ยนไซยาไนด์เป็นไซยาเนตซึ่งเป็นพิษน้อยลง ส่วนองค์ประกอบที่เป็นอันตรายในสถานะของแข็งหรือกึ่งของแข็งต้องนำไปปรับเสถียรและฝังกลบในหลุมฝังกลบขยะอันตรายต่อไป (ที่มา:Jirang Cui and Lifeng Zhang. “Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review”. Journal of Hazardous material, 2008.)

5.1.3 กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

ของเสียประเภทของแข็งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ Electrorefining เพื่อแยกสกัดทองแดง เรียกว่า Anode slime จะมีองค์ประกอบของโลหะมีค่าและโลหะอื่นๆ ซึ่งสามารถนำ Anode slime นี้มาทำการแยกทองคำและโลหะมีค่าออกมาได้โดยอาศัยกระบวนการทางสารละลายเคมี โดยใช้กระบวนการชะละลายหรือกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้กระบวนการ Electrorefining แผนผังของกระบวนการแสดงในรูปที่ 7 (ที่มา: ปราโมทย์ ภูพานทอง, สมชัย ฦาชาฤทธิ์ และไพบูลย์ ชัยภัย. “เทคโนโลยีการแยกสกัดโลหะมีค่าและโลหะพื้นฐานจากขยะอิเล็กทรอนิกส์”. 2554.)



Anode slime (**โลหะมีค่า + โลหะอื่น ๆ**)



หลอมเทเป็นแท่งแล้วสกัดด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี



แยกโลหะเจือปนออกจากทองโดยกระบวนการทางสารละลายเคมี



การทำทองคำให้บริสุทธิ์มากกว่า 99.9%

รูปที่ 7 การแยกทองคำและโลหะมีค่าออกจาก Anode slime

5.2 ของเหลว

ของเสียประเภทของเหลวเกิดขึ้นได้จากกระบวนการทางสารละลายเคมี และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมักเป็นสารละลายเคมีที่มีความเป็นกรด-ด่าง มีองค์ประกอบที่อันตราย และมีโลหะเจือปนอยู่ ซึ่งวิธีในการจัดการกับสารละลายที่มีความเป็นกรด-ด่าง คือ การสะเทินให้เป็นกลาง สารละลายที่มีองค์ประกอบที่อันตราย เช่น ไซยาไนด์ ให้ใช้วิธี Alkaline chlorination โดยใช้โซเดียมไฮโดรคลอไรต์หรือก๊าซคลอรีนหรือปล่อยให้ระเหย เป็นต้น สำหรับสารละลายที่มีโลหะเจือปนอยู่ในสถานะของแข็งให้แยกโลหะออกมาก่อนโดยอาจใช้วิธีการตกตะกอน แล้วกรองแยกออกมา (ที่มา:Jirang Cui and Lifeng

Zhang. “Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review”. Journal of Hazardous material, 2008.)

5.3 ก๊าซ

ก๊าซพิษจะเกิดขึ้นจากกระบวนการทางความร้อนในขั้นตอนการเผาและหลอม ซึ่งก๊าซที่เกิดขึ้นอาจมีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น ปรอท ตะกั่ว ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเศษซากอิเล็กทรอนิกส์ ไดออกซินที่เกิดจากการเผาพลาสติกซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง นอกจากนั้น ก๊าซยังมีความเป็นกรด ดังนั้น จึงควรมีการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อบำบัดมลพิษทางอากาศ เช่น ก๊าซกรดอาจบำบัดด้วยวิธี Wet alkaline scrubber ไดออกซินอาจบำบัดด้วยการดูดซับ ก๊าซที่มีปรอทและตะกั่วเป็นองค์ประกอบก็อาจบำบัดด้วยการดูดซับเช่นกัน

สำหรับไอของสารเคมีที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาต่างๆ เช่น ไอกรดจากกระบวนการทางสารละลายเคมีซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ดำเนินการ ดังนั้น ควรมีหน้ากากป้องกันและการทำปฏิริยาต่างๆ ควรทำภายใต้ตู้ดูดควัน (ที่มา: Conor Pacific. “Spring 2000 Smelter Stack Acid Gases and Organics Emission Testing”. Prepared for Falconbridge Ltd. Sudbury Smelter Business Unit, 2000.)