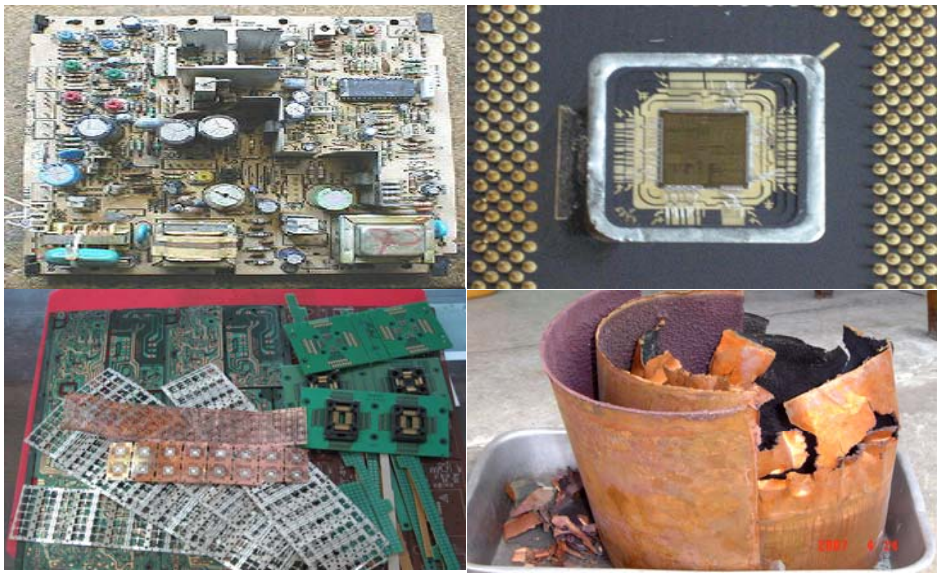
ต้นแบบการแยกสกัดโลหะทองแดง
จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์



โดย

นภาพร อรุณเกียรติก้อง

ปราโมทย์ ภูพานทอง

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

สารบัญ

สารบัญแผนภาพ III
สารบัญรูป III
สารบัญตาราง IV
บทที่ 1 บทนำ 1
บทที่ 2 เศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ 3
2.1 เศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์จากอุปกรณ์เครื่องใช้ 4
2.1.1 เครื่องโทรทัศน์และจอคอมพิวเตอร์ 5
2.1.2 เครื่องคอมพิวเตอร์ 6
2.1.3 อุปกรณ์เครื่องใช้ในสำนักงานและบ้านพักอาศัย 6
2.2 การจัดการวัสดุที่สามารถรีไซเคิลจากเครื่องใช้และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 7
2.3 การคัดแยกเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์และนำไปใช้ประโยชน์ 8
2.4 การแยกสกัดโลหะจากเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ 9
2.4.1 แนวทางที่ 1 10
2.4.2 แนวทางที่ 2 11
2.4.3 แนวทางที่ 3 12
2.5 การแยกสกัดโลหะด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยา 13
2.5.1 เทคโนโลยีโลหะวิทยาสารละลายหรือโลหะวิทยาเคมี 13
2.5.2 เทคโนโลยีโลหะวิทยาความร้อนหรือการถลุงด้วยความร้อนสูง 13
2.5.3 เทคโนโลยีโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมี 14
บทที่ 3 กรณีศึกษาการแยกสกัดโลหะทองแดง 17
3.1 ปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้อง 17
3.2 การแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรไฟฟ้า 18
3.2.1 การแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ 19
3.2.2 การแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน 24
3.3 ข้อดีเทคโนโลยีโลหะวิทยา 29
3.4 สรุปผลการทดลอง 29
บทที่ 4 บทสรุป 31
4.1 การจัดการเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ 31
4.2 วัตถุดิบ 31
4.3 ต้นแบบการแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 32
4.4 สรุปผล 33
บรรณานุกรม 34
ภาคผนวก 35

สารบัญแผนภาพ

2.1	วัฏจักรของเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์	4
2.2	สัดส่วนของอุปกรณ์เครื่องใช้ที่มีการเก็บรวบรวม คัดแยก และนำกลับมาใช้	5
2.3	สัดส่วนของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลจากเครื่องโทรทัศน์	6
2.4	สัดส่วนของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลจากจอคอมพิวเตอร์	6
2.5	สัดส่วนของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลจากเครื่องคอมพิวเตอร์	7
2.6	สัดส่วนของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลจากอุปกรณ์เครื่องใช้ในสำนักงาน	7
2.7	สัดส่วนของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลจากอุปกรณ์เครื่องใช้ในบ้านพักอาศัย	8
2.8	การคัดแยกและรีไซเคิลจากอุปกรณ์เครื่องใช้ในบ้านและสำนักงาน	9
2.9	แนวทางการแยกสกัดโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	11
2.10	การแยกสกัดโลหะกลุ่มพื้นฐานด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยา	16
2.11	การแยกสกัดโลหะมีค่าด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยา	17
3.1	การแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์	20
3.2	การแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน	25

สารบัญรูป

2.1	แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Board : PCB) ชนิดต่างๆ	10
2.2	การแยกสกัดโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แนวทางที่ 1	12
2.3	การแยกสกัดโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แนวทางที่ 2	13
2.4	การแยกสกัดโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แนวทางที่ 3	14
2.5	การแยกสกัดโลหะด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยาสารละลายหรือโลหะวิทยาเคมี	15
2.6	การแยกสกัดโลหะด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมี	15
3.1	แผงวงจรไฟฟ้าที่ใช้เป็นวัตถุดิบในกรณีศึกษาการแยกสกัดโลหะทองแดง	19
3.2	การแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์	23
3.3	การแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน วิธีที่ 1	27
3.4	การแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน วิธีที่ 2	28

สารบัญตาราง

3.1	ต้นทุนการแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์	24
3.2	ต้นทุนการแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน	29
3.3	ต้นทุนการแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน (โดยละลายทองแดงเม็ดด้วยสารละลาย H_2SO_4 และ H_2O_2 แล้วนำสารละลายเข้าสู่ขั้นตอนการแยกด้วยไฟฟ้า)	30

ภาคผนวก

1	สารพิษที่เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	40
2	เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในขอบเขตของ WEEE และเป้าหมายการนำกลับมาใช้ใหม่	41
3	คำสั่งที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดเศษทิ้ง สิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว	42
4	ปริมาณสารอันตรายที่ได้รับยกเว้นให้มีในเครื่องใช้ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์	43
5	กรอบเวลาการดำเนินงานระยะเวลา การดำเนินงาน ตามกฎระเบียบสหภาพยุโรป	43

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันกากอุตสาหกรรม นับวันจะมีปริมาณมากขึ้น เนื่องจากการผลิตและการบริโภคขยายตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลการขออนุญาตนำกากอุตสาหกรรมออกนอกโรงงานอุตสาหกรรม ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม พบว่า ปริมาณกากอุตสาหกรรมมากกว่า 3.5 แสนตันต่อปี จะนำไปบำบัดทั้งโดยการฝังกลบและกระบวนการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งกรมโรงงานอุตสาหกรรมจัดให้อยู่ในกลุ่มประเภทของเสียจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วย 3 ประเภท ได้แก่ (1) ชิ้นส่วนที่เป็นอันตรายที่ถอดแยกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ใช้งานแล้ว (2) อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ใช้งานแล้วที่มีชิ้นส่วนอันตราย เช่น จอภาพ สวิทซ์บรรจุปรอท และ (3) ชิ้นส่วนที่ไม่เป็นอันตรายที่ถอดแยกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ใช้งานแล้ว โดยในปี 2550 มีปริมาณรวมกัน 35,000 ตัน ซึ่งมีมูลค่าสูง ควรที่จะมีการรีไซเคิลในประเทศแทนที่จะส่งออก หรือนำไปฝังกลบทิ้งปนไปกับขยะ

ของเสียจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปประกอบด้วยวัสดุหลัก 3 ประเภท ได้แก่ (1) โลหะ เช่น ทองคำ แพลทินัม ทองแดง อะลูมิเนียม เหล็ก ตะกั่ว ดีบุก สังกะสี และนิกเกิล (2) พลาสติก เช่น โพลีเอทธิลีน โพลีสไตรีน โพลีไวนิลคลอไรด์ เรซิน และยาง และ (3) แก้วและกระจก ซึ่งการรีไซเคิลวัสดุเหล่านี้ การคัดแยกเบื้องต้นสามารถทำได้โดยเทคโนโลยีแต่งแร่พื้นฐาน แต่สำหรับกรณีรีไซเคิลโลหะแล้วจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีโลหะวิทยาในการแยกสกัด เช่น แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Board: PCB) ที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโลหะทองคำ เงิน และทองแดง แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้จะส่งออกต่างประเทศในรูปของแผงวงจรที่ยังไม่ผ่านการติดตั้งชิ้นส่วนไอซีหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ อาจเป็นส่วนที่มีข้อบกพร่อง หรือส่วนเกินจากการผลิต โดยประเภทนี้มีเพียงโลหะทองแดงเท่านั้นที่มีมูลค่าคุ้มค่าในการรีไซเคิล และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อีกประเภทที่ส่งออก คือ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่หมดสภาพใช้งานและผ่านการคัดแยกเบื้องต้นมาแล้ว ประเภทนี้นอกจากทองแดงแล้ว ยังมีโลหะพื้นฐานอื่นๆ เช่น โลหะมีค่าประเภททองคำ และแพลทินัมจากโลหะบัดกรีหรือลวดเชื่อมประเภทที่ไม่มีสารตะกั่ว (Lead free solder) แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 2 ประเภท มีการส่งออกเป็นหลัก เนื่องจากเทคโนโลยีการแยกโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพยังไม่มีเผยแพร่ในประเทศไทย จึงมีเพียงโรงงานที่เป็นของต่างชาติทำการคัดแยกเบื้องต้น แล้วส่งไปโรงงานรีไซเคิลเพื่อแยกสกัดโลหะในประเทศตนเอง หรืออาจมีโรงงานรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย แต่ใช้เทคโนโลยีขั้นต่ำ คือ การเผาให้เหลือแต่โลหะที่ต้องการ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายแต่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตจากควันพิษและสารเคมี ดังนั้น หากมีต้นแบบการแยกโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถนำไปตั้งโรงงานที่ไม่ต้องลงทุนมาก และได้ประสิทธิภาพสูง จะเป็นประโยชน์กับผู้ประกอบการรีไซเคิลขนาดเล็ก โดยเฉพาะรายใหม่ที่นำไปขยายผลในเชิงพาณิชย์

การทบทวนวรรณกรรม

เนื่องจากขั้นตอนการการรีไซเคิลโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะการแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่สามารถใช้เป็นต้นแบบในการลงทุนเชิงพาณิชย์ยังไม่มีการเผยแพร่ ไม่ว่าจะเป็นเอกสาร หรือสืบค้นทางอินเตอร์เนท มีเพียงการคัดแยกในเบื้องต้นด้วยเทคโนโลยีแต่งแร่ โดยเครื่องมือง่ายๆ

ผู้เขียนได้มีโอกาสศึกษาดูงานและสำรวจข้อมูลการจัดการเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ของ บริษัท วงษ์พาณิชย์ จำกัด จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งเป็นโรงงานคัดแยกขยะเพื่อรีไซเคิล ที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย และปัจจุบันมีสาขาทั่วประเทศไทย และการคัดแยกชิ้นส่วนและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ณ Kitakusu Ecotown Project ประเทศญี่ปุ่น พบว่า การจัดการและการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์มีความคล้ายคลึงกัน โดยจะมีการคัดแยกเบื้องต้นเพื่อแบ่งประเภทวัสดุต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบ เช่น พลาสติก เหล็ก และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นจึงส่งไปยังโรงงานรีไซเคิลตามชนิดของวัสดุ สำหรับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การรีไซเคิลเริ่มจากผ่าน Shredder เพื่อบดย่อยเป็นชิ้นเล็กๆ ผ่าน Belt magnet เพื่อแยกเหล็ก และผ่าน Non-ferrous separator เพื่อแยกโลหะและวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ แต่ก็ยังคงมีส่วนที่ปนกันระหว่างโลหะและวัสดุอื่น ซึ่งโลหะดังกล่าวนี้ ได้แก่ โลหะมีค่า (ทองและเงิน) ทองแดง นิกเกิล ดีบุก จะเข้าสู่กระบวนการแยกสกัดโดยเทคโนโลยีโลหะวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy) และโลหะวิทยาความร้อน (Pyrometallurgy) ซึ่งในส่วนของการแยกโลหะไม่สามารถเข้าดูงานได้ เพียงแต่มีการแลกเปลี่ยนความรู้ในทางทฤษฎีเท่านั้น เช่นเดียวกับการสืบค้นข้อมูลทางอินเตอร์เนท พบว่า จีน (ข้อมูลจาก www.tes-am.com) และกลุ่มประเทศในยุโรป (ข้อมูลจาก SSI E-scrap Processing System Flow Sheet) จะใช้กระบวนการแยกสกัดโลหะโดยเทคโนโลยีโลหะวิทยาเคมี และโลหะวิทยาความร้อน แต่ไม่มีการเผยแพร่รายละเอียดหรือเทคนิควิธีการแต่อย่างใด นอกจากนี้ข้อมูลเผยแพร่ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง จะเป็นการขายเทคโนโลยี การรับจ้างแยกสกัด รวมถึงการรับซื้อวัตถุดิบเพื่อนำเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล อาทิเช่น www.ecycle.info, www.ewaste.com, www.ehow.com เป็นต้น ดังนั้น การรีไซเคิลโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะการแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จึงไม่ใช่เรื่องง่ายที่จะสืบค้น หาแหล่งข้อมูล หรืออ้างอิงวรรณกรรมใดๆ มีเพียงการนำทฤษฎีและวิชาการมาทดลอง ประยุกต์ แล้วอาศัยความรู้เชิงวิชาการเฉพาะด้านเชิงลึกชนิดที่ไม่เคยมีการดำเนินงานมาก่อน เชี่ยวชาญ และประสบการณ์ในการวางแผนการดำเนินการวิจัย การจัดหาวัสดุอุปกรณ์ การวิเคราะห์ตีความ ตลอดจนการแก้ไขปัญหาทางเทคนิคต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง จนสามารถสร้างต้นแบบการแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ผู้ประกอบการรีไซเคิลโดยเฉพาะผู้ประกอบการขนาดเล็กทั้งรายเดิมและรายใหม่สามารถนำไปใช้ในโรงงานได้โดยมีการลงทุนไม่มาก ไม่จำเป็นต้องซื้อเทคโนโลยี

บทที่ 2

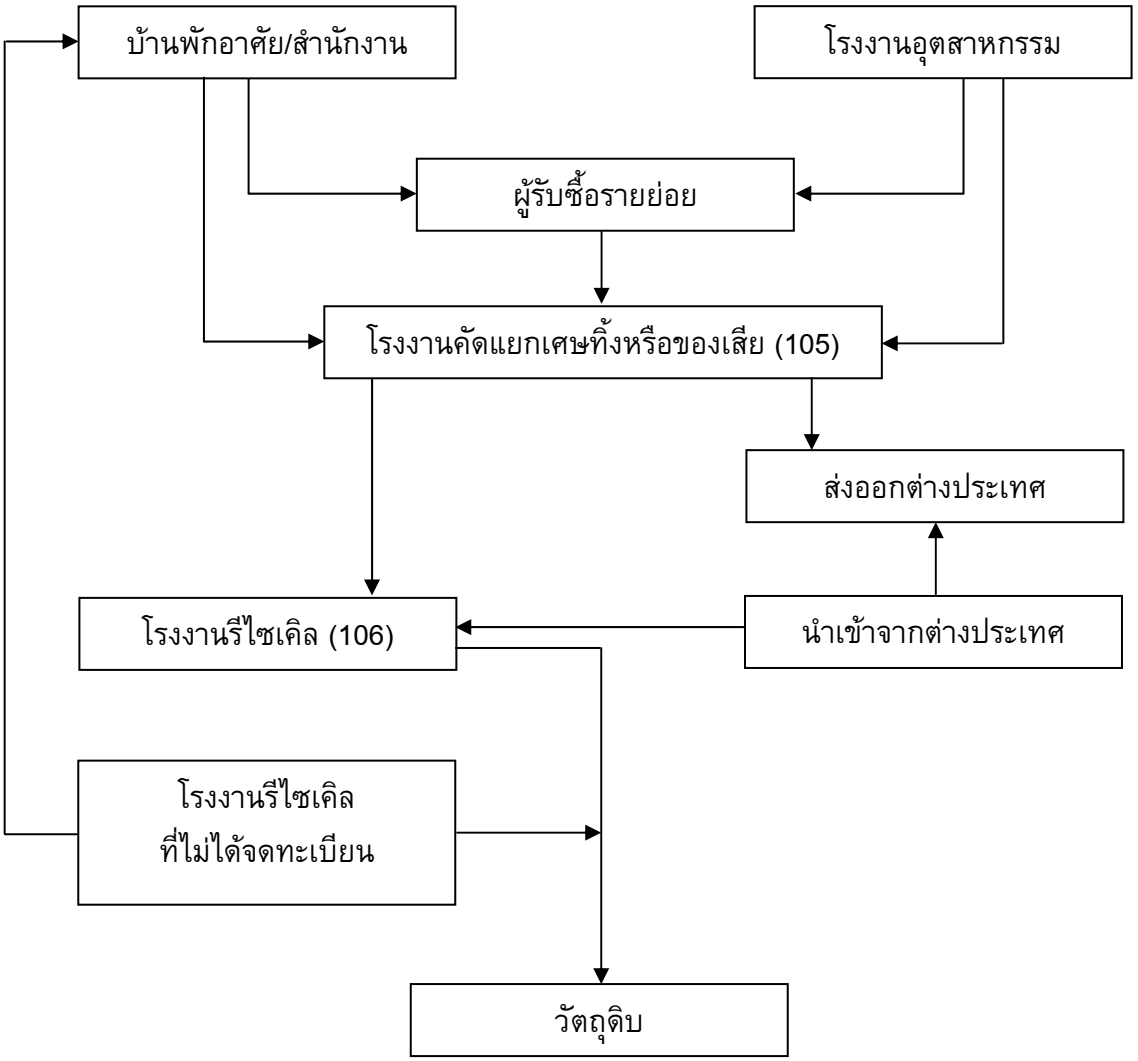
เศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics wastes)

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กลายเป็นภาคอุตสาหกรรมที่ใหญ่ที่สุดในโลก ที่แทรกซึมไปทุกอณูของชีวิตประจำวันและไปสู่หัวใจของอุปกรณ์เครื่องใช้ทั้งหมด เราเรียกว่าเป็นระบบการติดต่อเชื่อมโยงซึ่งกันและกันโดยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Board: PCB) ซึ่งแผงวงจรนี้จะทำให้ส่วนประกอบต่างๆ สื่อสารกันในการทำงาน อย่างที่ต้องการ จึงเป็นส่วนสำคัญในอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ ปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดกระแสการคิดค้น และผลิตเครื่องมือ เครื่องใช้ ตลอดจนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ตลอดเวลาและต่อเนื่อง ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและนวัตกรรมเป็นส่วนหนึ่งของสาเหตุการเพิ่มปริมาณเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์อย่างรวดเร็ว ซึ่งส่วนใหญ่เศษทิ้งหรือของเสียดังกล่าวนี้จะปะปนไปในรูปของขยะ ต่อไปในอนาคต นักโบราณคดีอาจพบว่า ช่วงปลายศตวรรษที่ยี่สิบมีเศษทิ้งหรือขยะอันตรายกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปเป็นขยะดิจิทัลที่รู้จักกันในชื่อขยะอิเล็กทรอนิกส์ (e-waste) หากสังเกตจากคอมพิวเตอร์ พลังในการประมวลผลจะเพิ่มขึ้น 2 เท่าทุก 2 ปีโดยเฉลี่ย ทำให้เครื่องกลที่ว่าล้ำที่สุดกลายเป็นของตกรุ่นในเวลาไม่นาน ข้อมูลขององค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อม หรือ EPA ระบุว่า ทุก 2-3 ปี คอมพิวเตอร์ราว 30-40 ล้านเครื่องจะกลายเป็นอุปกรณ์ที่หมดสภาพใช้งาน นอกจากคอมพิวเตอร์แล้ว การเปลี่ยนระบบแพร่ภาพโทรทัศน์ให้เป็นระบบดิจิทัลความคมชัดสูง (HDTV) ภายในปี พ.ศ. 2552 จะทำให้โทรทัศน์ที่รับสัญญาณเฉพาะระบบอนาล็อกซึ่งยังไม่เสีย ทำงานไม่ได้อีกจำนวนมาก เมื่อผู้บริโภคเริ่มเปลี่ยนอุปกรณ์ คาดว่าจะมีโทรทัศน์ที่เลิกใช้งานประมาณ 25 ล้านเครื่องต่อปี ซึ่งที่ผ่านมาเมื่อปี พ.ศ. 2548 สหรัฐอเมริกาทิ้งโทรศัพท์มือถือ 98 ล้านเครื่อง ข้อมูลจากโครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติกล่าวว่าขยะอิเล็กทรอนิกส์ทุกประเภททั่วโลกอาจสูงถึง 45 ล้านตันต่อปี การหาวิธีรีไซเคิลวัสดุภายในอุปกรณ์เพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่า จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจและจำเป็นอย่างยิ่ง รวมถึงการจัดการกับเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อป้องกันโลหะหนักมีพิษทั้งหลายที่อยู่ในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และเพิ่มปัญหาด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อม

ดังนั้น เมื่อเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลกเพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อยๆ การแก้ปัญหาไม่ให้เศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์กลายเป็นขยะที่ไร้ค่าและเกิดมลภาวะด้านสิ่งแวดล้อมหากมีการปนเปื้อน หรือแพร่กระจายสู่ระบบนิเวศน์ จะต้องมีกระบวนการคัดแยกและรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัย ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มทั้งทางสังคมและเศรษฐกิจ ขณะเดียวกันในส่วนของป้องกันและการจัดการเพื่อความยั่งยืน ผู้เกี่ยวข้องจะต้องคำนึงถึงข้อกำหนดที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากล ได้แก่ WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment : ระเบียบว่าด้วยการจัดการซากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์) และ RoHS (Restriction of Use of Certain

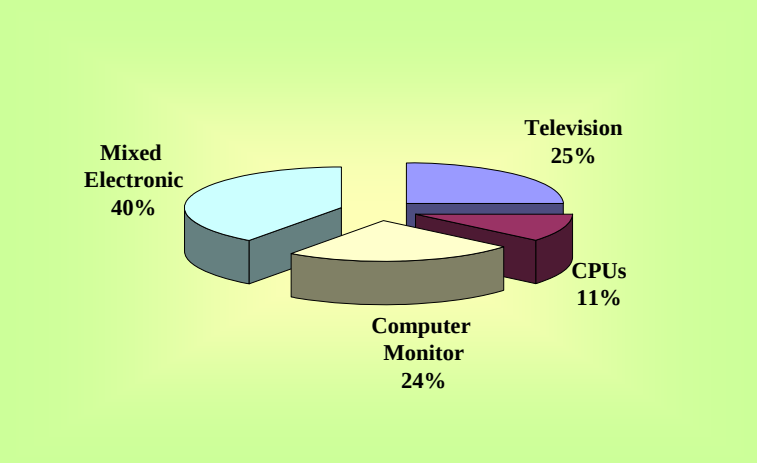
Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment : ระเบียบว่าด้วยการจำกัดการใช้สารต้องห้ามบางชนิดในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์)

โดยทั่วไปแล้ว เศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ จะมาจากเศษหรือวัสดุทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และเศษหรือวัสดุทิ้ง ประเภทอุปกรณ์เครื่องใช้ในบ้านพักอาศัยและสำนักงานที่ไม่ใช้งานแล้วหรือหมดสภาพใช้งาน อาทิ โทรทัศน์ เครื่องปรับอากาศ เครื่องซักผ้า คอมพิวเตอร์ เครื่องถ่ายเอกสาร หลอดไฟ โทรศัพท์ วิทยุ เป็นต้น โดยวัฏจักรของเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์แสดงในแผนภาพที่ 2.1 คือ เศษทิ้งจากบ้านพักอาศัยและสำนักงาน และเศษหรือกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจะเข้าสู่ระบบโดยผ่านผู้รับซื้อรายย่อยหรือซาเล้งรวบรวม หรือเข้าสู่โรงงานคัดแยกซึ่งเป็นโรงงานประกอบกิจการประเภท 105 ส่วนหนึ่งก็ต่อไปเข้าโรงงานรีไซเคิลซึ่งเป็นโรงงานประกอบกิจการประเภท 106 บางส่วนก็ส่งออกไปต่างประเทศ และขณะเดียวกันมีบางส่วนนำเข้าจากต่างประเทศและส่งเข้าโรงงานรีไซเคิล เพื่อแยกวัสดุที่สามารถนำไปหมุนเวียนใช้ใหม่ได้



แผนภาพที่ 2.1 วัฏจักรของเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์

จากข้อมูลการสำรวจของสำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ พบว่า อุปกรณ์หรือเครื่องใช้ดังกล่าวที่หมดสภาพใช้งาน จะมีการเก็บรวบรวม คัดแยก และนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นสัดส่วนดังแสดงในแผนภาพที่ 2.2โดยเป็นเครื่องโทรทัศน์และจอคอมพิวเตอร์ สัดส่วนเท่าๆ กัน คือประมาณร้อยละ 25



แผนภาพที่ 2.2 สัดส่วนของอุปกรณ์เครื่องใช้ที่มีการเก็บรวบรวม คัดแยก และนำกลับมาใช้

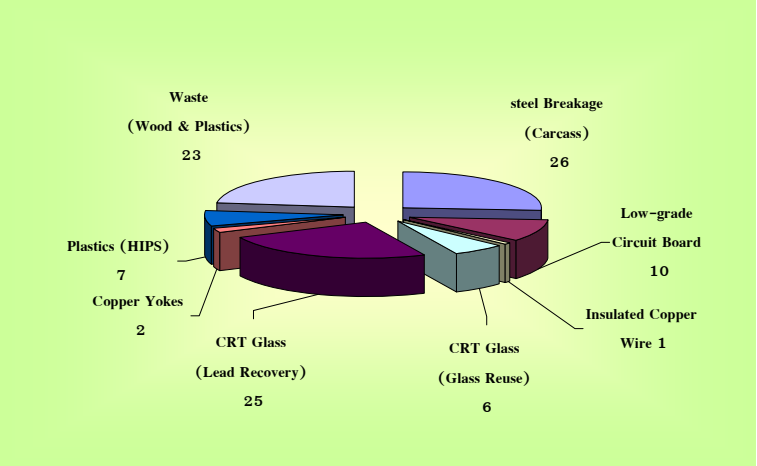
2.1 เศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์จากอุปกรณ์เครื่องใช้

การศึกษาของ Simon Wilkinson และคณะ พบว่า เมื่อแยกส่วนประกอบต่างๆ ในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ จะมีองค์ประกอบหลัก 5 ประเภท ได้แก่ เหล็ก โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (ทองแดง ดีบุก ตะกั่ว และโลหะมีค่า) แก้ว พลาสติก และอื่นๆ โดยอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในบ้านขนาดใหญ่จะมีเหล็กเป็นส่วนประกอบหลัก คิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 60 ในขณะที่อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กจะมีพลาสติกเป็นส่วนประกอบหลัก คิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 45

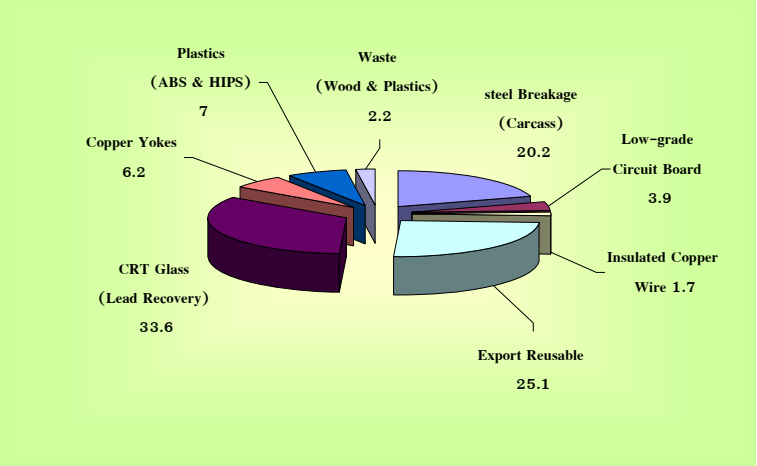
รายงานของ Veldhuizon and Sippel กล่าวว่า แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed circuit board : PCB) น้ำหนัก 1 ตัน จะมีโลหะมีค่าเป็นส่วนประกอบ คือ ทองคำประมาณ 80-1,500 กรัม และทองแดง 160-210 กรัม ซึ่งสามารถนำไปแยกสกัดโลหะดังกล่าวและทำให้บริสุทธิ์นำไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ ข้อมูลของ Minnesota Office of Environmental Assistance ระบุว่า ในแต่ละอุปกรณ์เครื่องใช้ มีสัดส่วนของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ของเสีย ไม้ พลาสติก แก้ว โลหะ เหล็ก ฉนวนไฟฟ้า แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น โดยมีรายละเอียดและสัดส่วนตามที่แสดงในแผนภาพที่ 2.3 ถึง แผนภาพที่ 2.7 ดังนี้

2.1.1 เครื่องโทรทัศน์และจอคอมพิวเตอร์ เมื่อหมดสภาพหรือหมดอายุใช้งานแล้วนำมาแยกส่วนประกอบต่างๆ พบว่า ส่วนใหญ่เป็นหน้าจอและหลอดภาพ โดยแผนภาพที่ 2.3 และ

แผนภาพที่ 2.4 แสดงสัดส่วนของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลได้จากเครื่องโทรทัศน์และจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นหลอดภาพถึงร้อยละ 31 และ 34 ตามลำดับ รองลงมา คือ เหล็ก ไม้ และพลาสติก ซึ่งหลอดภาพ (CRT glass) จะถูกนำไปโรงงานหลอมตะกั่วเพื่อแยกโลหะตะกั่ว ส่วนแก้วก็นำกลับเข้าสู่อุตสาหกรรมผลิตแก้วต่อไป สำหรับชิ้นส่วนอื่นๆ จะมีการรวบรวมเก็บไปใช้ซ้ำ หรือส่งออกให้กับผู้บริโภคที่นิยมใช้ของเก่าที่ยังคงสภาพใช้งานได้ดี (Export reusable)

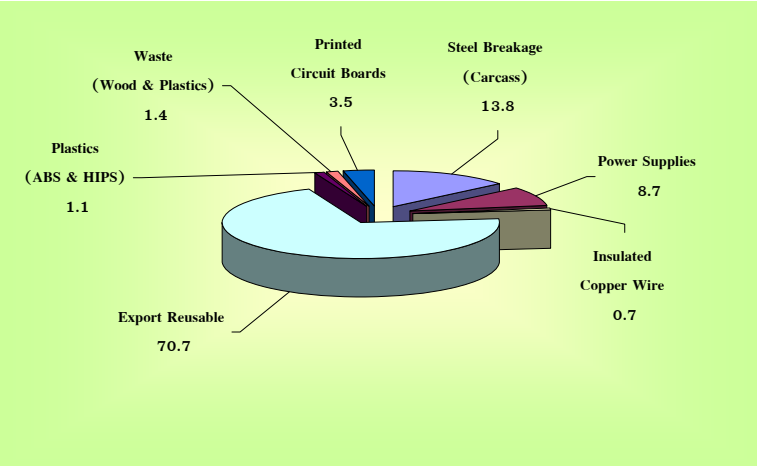


แผนภาพที่ 2.3 สัดส่วนของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลจากเครื่องโทรทัศน์



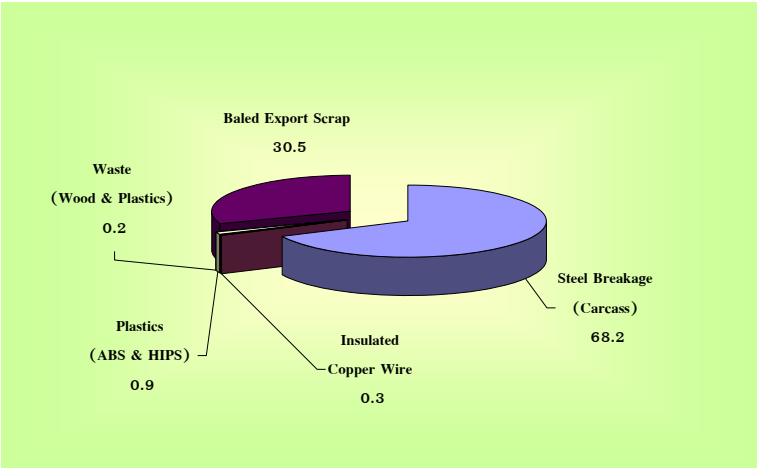
แผนภาพที่ 2.4 สัดส่วนของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลจากจอคอมพิวเตอร์

2.1.2 เครื่องคอมพิวเตอร์ พบว่า ประกอบด้วย ชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย ตามสัดส่วนที่แสดงในแผนภาพที่ 2.5 โดยส่วนใหญ่ยังคงสภาพใช้งานได้ ดังนั้น เมื่อเครื่องคอมพิวเตอร์ถูกนำมาทิ้ง จึงมีชิ้นส่วนที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้สูงถึงร้อยละ 70 ซึ่งจะส่งออกให้กับผู้บริโภคที่นิยมใช้ของเก่าที่ยังคงสภาพใช้งานได้ดี (Export reusable) นอกนั้น เป็นเหล็ก และอุปกรณ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ สายไฟ และเศษพลาสติก

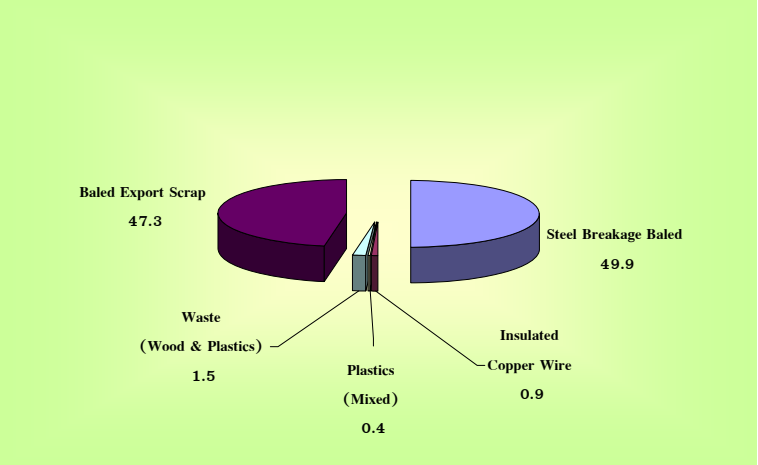


แผนภาพที่ 2.5 สัดส่วนของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลจากเครื่องคอมพิวเตอร์

2.1.3 อุปกรณ์เครื่องใช้ในสำนักงานและบ้านพักอาศัย อาทิ อุปกรณ์สื่อสาร โทรศัพท์ โทรสารเครื่องเสียง อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ แผนภาพที่ 2.6 และแผนภาพที่ 2.7 แสดงสัดส่วนของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลได้ ประกอบด้วย เหล็ก เป็นส่วนใหญ่ สูงถึงร้อยละ 68 และ 50 ตามลำดับ รองลงมาเป็นชิ้นส่วนที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ซึ่งจะถูกคัดแยก และส่งออกเป็นสินค้าประเภทเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ (Baled export scrap) ให้ผู้บริโภคต่อไป



แผนภาพที่ 2.6 สัดส่วนของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลจากอุปกรณ์เครื่องใช้ในสำนักงาน

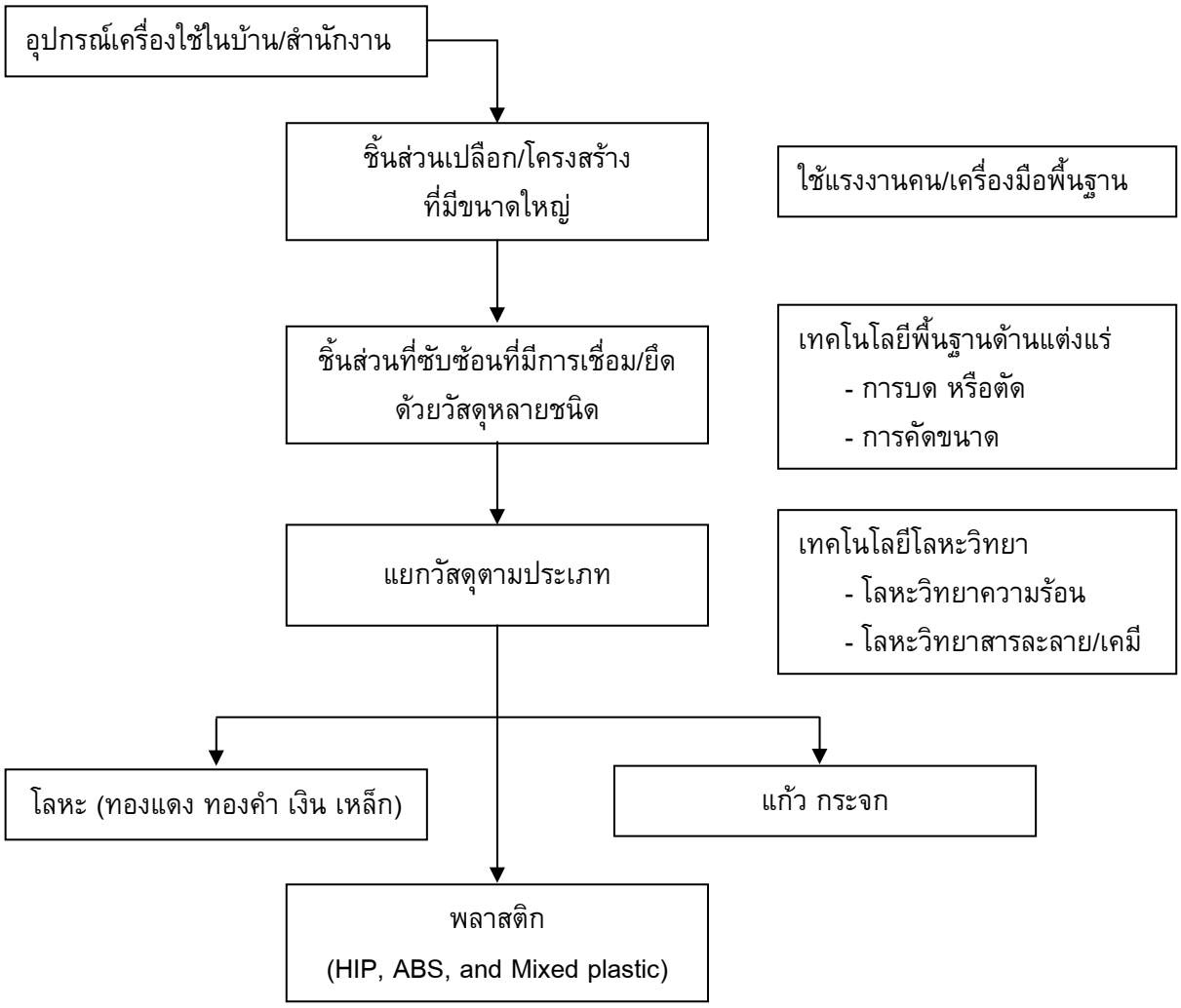


แผนภาพที่ 2.7 สัดส่วนของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลจากอุปกรณ์เครื่องใช้ในบ้านพักอาศัย

2.2 การจัดการวัสดุที่สามารถรีไซเคิลจากเครื่องใช้ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

หลังจากที่อุปกรณ์เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ หมดสภาพ หรือหมดอายุใช้งานกลายเป็นเศษ ซาก ขยะหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ จะถูกรวบรวม เพื่อคัดแยกประเภท และชนิดของวัสดุที่ใช้ผลิต พร้อมทั้งแยกโลหะหนักมีพิษ ตลอดจนวัสดุที่สามารถรีไซเคิล และใช้ซ้ำได้ เช่น โลหะมีค่า แก้ว พลาสติก ไม้ เป็นต้น ซึ่งถือว่าเป็นวัตถุดิบที่ได้จากกระบวนการคัดแยก แล้วผ่านเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล ได้เป็นวัตถุดิบใหม่ซึ่งมีความบริสุทธิ์ สำหรับเป็นวัตถุดิบให้อุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ ต่อไป โดยพบว่า โลหะที่แยกได้จากขยะหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนใหญ่เป็น เหล็ก รองลงมา คือ หลอดภาพ (CRTs) และหลอดภาพดังกล่าวส่วนใหญ่จะส่งเข้าไปในโรงงานถลุงตะกั่ว เนื่องจากมีส่วนผสมของตะกั่วเป็นจำนวนมาก ส่วนที่เหลือจะนำกลับไปหลอมใหม่ในอุตสาหกรรมการผลิตแก้ว (Glass to glass) นอกจากนี้ ชิ้นส่วนบางประเภทที่ยังคงสภาพดี หรือสามารถใช้งานได้ จะมีการนำกลับไปใช้ซ้ำ ส่วนที่หมดสภาพใช้งาน กระทั่งไม่สามารถใช้ซ้ำได้อีก หรือไม่สามารถรีไซเคิลได้แล้ว จะส่งไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบอย่างถูกหลักวิธีโดยบริษัทเอกชนที่ได้รับอนุญาตจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม เพื่อไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบสิ่งแวดล้อมต่อไป

การคัดแยกและรีไซเคิลจากอุปกรณ์เครื่องใช้ในบ้านพักอาศัยและสำนักงาน มีกระบวนการตามที่แสดงในแผนภาพที่ 2.8 โดยชิ้นส่วนเปลือกหรือโครงสร้างขนาดใหญ่จะคัดแยกโดยคนหรือเครื่องมือพื้นฐาน เช่น คีม ไขควง ค้อน เป็นต้น หรือการคัดแยกชิ้นส่วนที่ซับซ้อนหรือมีการเชื่อมยึดอาจต้องใช้การบด อัด หรือคัดขนาด สำหรับการแยกวัสดุต่างๆ เช่น พลาสติก แก้ว โดยเฉพาะโลหะต้องใช้เทคโนโลยีโลหะวิทยา เช่น การหลอม การถลุง การละลายด้วยสารเคมี หรือการแยกด้วยไฟฟ้า เป็นต้น



แผนภาพที่ 2.8 การคัดแยกและรีไซเคิลจากอุปกรณ์เครื่องใช้ในบ้านและสำนักงาน

2.3 การคัดแยกเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์และนำไปใช้ประโยชน์

การจัดการเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้นให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด จะคัดแยกประเภทและสภาพ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ดังนี้

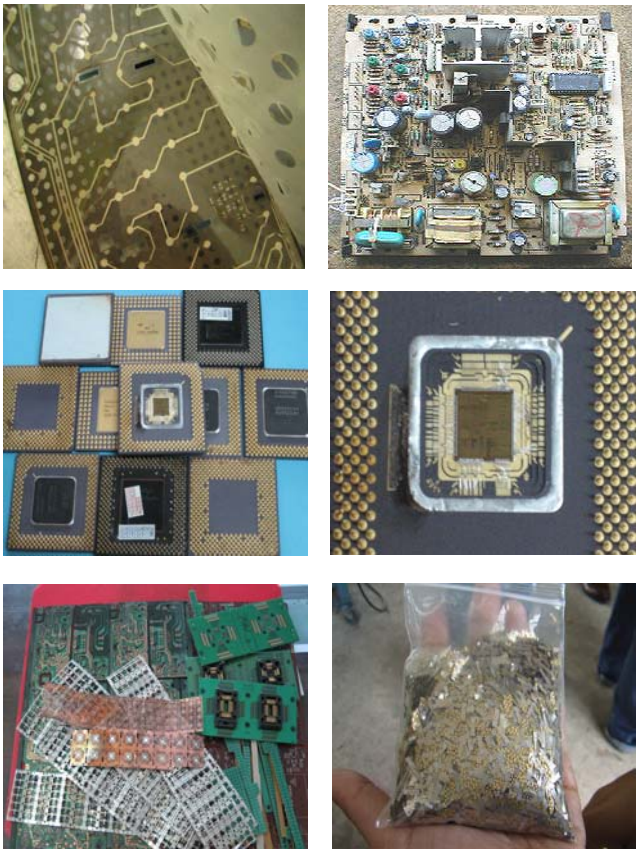
2.3.1 ชิ้นส่วนที่มีสภาพใช้งานได้ จะคัดแยกออกเป็นอุปกรณ์อะไหล่เพื่อนำกลับไปใช้ในการซ่อมบำรุงรักษาอุปกรณ์เครื่องเก่าให้ใช้งานต่อไปได้

2.3.2 วัสดุที่เป็นโลหะ แก้ว ไม้ และพลาสติก จะคัดแยกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท เช่น อุตสาหกรรมหลอมโลหะ อุตสาหกรรมผลิตแก้วและกระจก และอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก เป็นต้น

2.3.3 วัสดุแก้วที่เป็นส่วนประกอบในจอภาพ และหลอดภาพ ซึ่งมีโลหะหนักที่มีพิษเจือปน จะนำเข้าสู่โรงงานแก้วเพื่อผลิตจอภาพและหลอดภาพใหม่ หรืออาจนำเข้าสู่โรงงานหลอมตะกั่วเพื่อแยกตะกั่วและที่เหลือจะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตแก้ว

2.4 การแยกสกัดโลหะจากเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์

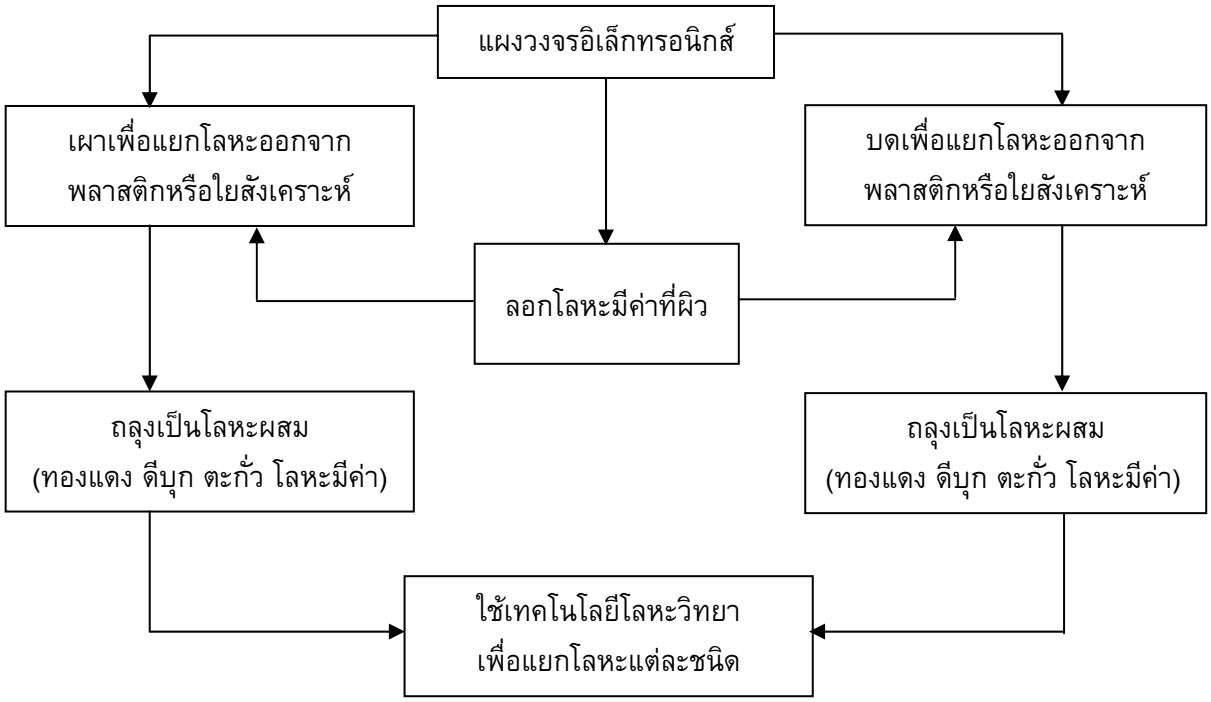
การแยกสกัดโลหะจากเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ ในที่นี้จะกล่าวถึงการแยกสกัดโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Board : PCB) ซึ่งมีลักษณะตามตัวอย่างในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Board : PCB) ชนิดต่าง ๆ

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือการเชื่อมโยงกันทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นส่วนที่ทำให้ส่วนประกอบต่างๆ สื่อสารกันในการทำงานอย่างที่ต้องการ ซึ่งการเชื่อมโยงกันทางอิเล็กทรอนิกส์นั้นรวมถึงการสร้างและการประกอบแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีทั้งลักษณะที่ยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่นเช่นเดียวกับการเชื่อมโยงแผงวงจรเข้ากับสิ่งอื่นๆ

การแยกสกัดโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีทางเลือก 3 แนวทาง แสดงในแผนภาพที่ 2.9 โดย ทั้ง 3 แนวทาง มีขั้นตอนรายละเอียด แสดงในรูปที่ 2.2 ถึง 2.4



แผนภาพที่ 2.9 แนวทางการแยกสกัดโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ขั้นตอนของการแยกสกัดโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีทางเลือก 3 แนวทาง ดังนี้

2.4.1 แนวทางที่ 1 ขั้นตอนต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.2 โดยมีรายละเอียดประกอบด้วย

(1) เผาแยกโลหะออกจากวัสดุติดไฟ เช่น พลาสติกและใยสังเคราะห์ ในโรงงานขนาดใหญ่จะใช้วิธีนี้ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่ำ ความร้อนจากกระบวนการเผาจะถูกนำไปเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในโรงงานเอง หรือขายให้กับชุมชนใกล้เคียง การเผาแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือ PCB จะเหลือโลหะกับขี้เถ้า ไม่จำเป็นต้องเผาจนไหม้หมด ความร้อนจะทำให้โลหะที่ติดอยู่ในแผงวงจรสปริงตัวแยกออกมาโดยอัตโนมัติ เนื่องจากคุณสมบัติการนำไฟฟ้าระหว่างโลหะและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แตกต่างกัน ข้อเสียของวิธีนี้ คือ การลงทุนในส่วนระบบป้องกันมลภาวะทางอากาศ เนื่องจากการเผาไหม้พลาสติกบางประเภท และสารเคลือบแผงวงจร ซึ่งเป็นสารอินทรีย์เคมีที่มีคลอโรฟลูออโรคาร์บอนเป็นสารประกอบ จะทำให้เกิดสารไดออกซิน

(2) ถลุงเป็นโลหะผสม หลังจากการเผาจะเหลือส่วนที่เป็นโลหะ และ ขี้เถ้า โดยโลหะกว่าร้อยละ 70 เป็นทองแดง ที่เหลือเป็น ดีบุก ตะกั่ว นิกเกิล และโลหะมีค่า (ในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 2 เช่น ทองคำ แพลทินัม แพลลาเดียม) แยกขี้เถ้าออก แล้วนำโลหะทั้งหมดไปถลุงด้วยสารเชื้อ (Flux) เป็นโลหะผสมใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป หรืออาจนำไปแยกโลหะในขั้นตอนที่ 3

(3) แยกสกัดโลหะโดยเทคโนโลยีโลหะวิทยา ซึ่งแบ่งเป็น โลหะวิทยาสารละลายหรือโลหะวิทยาเคมี (Hydrometallurgy) โลหะวิทยาความร้อนหรือการถลุงด้วยความร้อนสูง (Pyrometallurgy) และโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมี (Electrometallurgy) ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.5 ต่อไป

รูปที่ 2.2 การแยกสกัดโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แนวทางที่ 1

2.4.2 แนวทางที่ 2 ขั้นตอนต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.3 โดยมีรายละเอียดประกอบด้วย

(1) บดเพื่อแยกโลหะออกจากพลาสติกและใยสังเคราะห์ วิธีนี้ที่สำคัญ คือ เครื่องบด ซึ่งมีหลายชนิด ทั้งชนิดความเร็วรอบต่ำ และความเร็วรอบสูง การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่จะบด ถ้าเป็นแผงวงจรที่ติดชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์แล้วจะต้องใช้เครื่องบดความเร็วรอบต่ำประเภท Jaw crusher (ลักษณะเครื่องดังที่แสดงในขั้นตอนที่ 1 ของรูป 2.3) เพื่อลดขนาดแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ก่อนนำไปบดละเอียดด้วยเครื่องบดประเภท Hammer mill วัตถุประสงค์ที่บดละเอียดก็เพื่อเปิดผิวหน้าโลหะทองแดงให้มากที่สุด โดยเฉพาะแผงวงจรที่มีหลายๆ ชั้นซ้อนกัน (Multilayer)

(2) แยกโลหะออกจากพลาสติกและใยสังเคราะห์ หลังจากบดได้ขนาดละเอียดแล้วต้องผ่านกระบวนการโดยใช้เทคโนโลยีการแต่งแร่ เช่น การแยกแร่โดยอาศัยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ (โดยใช้น้ำหรือลมช่วย) โลหะซึ่งหนักกว่าพลาสติกและใยสังเคราะห์จะถูกแยกออก หรือการแยกแร่โดยอาศัยคุณสมบัติการเป็นสื่อไฟฟ้า (High tension separator หรือ Eddy current) โลหะที่เป็นสื่อนำไฟฟ้าก็จะถูกแยกออกจากพลาสติกและใยสังเคราะห์

(3) ถลุงเป็นโลหะผสม โดยนำส่วนที่เป็นโลหะทั้งหมดมาถลุงด้วยสารเชื้อ (Flux) เป็นโลหะผสม หรือนำไปแยกสกัดโลหะโดยเทคโนโลยีโลหะวิทยา ดังเช่นแนวทางที่ 1

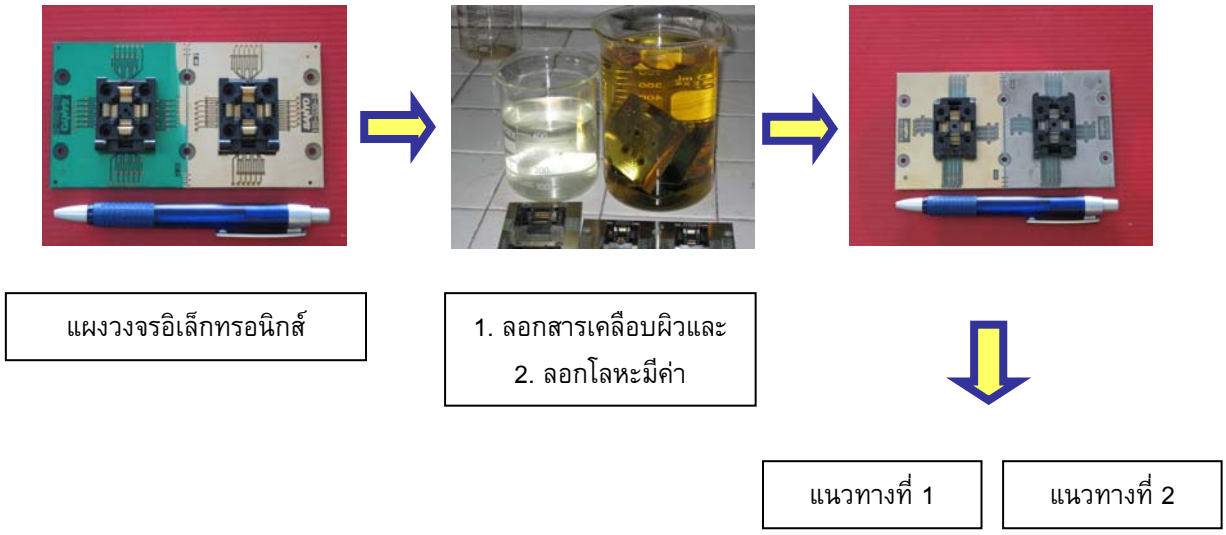
รูปที่ 2.3 การแยกสกัดโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แนวทางที่ 2

2.4.3 แนวทางที่ 3 ขั้นตอนต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งวิธีนี้เหมาะกับแผงวงจรที่มีชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการเคลือบสารอินทรีย์ที่ผิว (เพื่อเคลือบบางส่วนที่ไม่ต้องการให้นำไฟฟ้า) และเคลือบโลหะมีค่าเพื่อให้มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า เช่น ทองคำ เงิน แพลทินัม โดยมีรายละเอียดประกอบด้วย

(1) ลอกผิวที่เคลือบสารอินทรีย์ (ในรูป แผงวงจรสีเขียวด้านซ้ายจะเป็นแผงวงจรที่มีสารเคลือบผิว ส่วนแผงวงจรสีทองเป็นแผงวงจรหลังจากลอกสารเคลือบแล้ว) โดยแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ประมาณ 10 นาที จะเห็นชั้นของผิวทองคำชัดเจน

(2) ลอกชั้นของผิวทองคำ โดยแช่ในน้ำยาลอกทอง 1 นาที จะเห็นชั้นของผิวทองแดงและโลหะอื่นชัดเจน

(3) ตามขั้นตอนที่ 3 ดังเช่นแนวทางที่ 1 และแนวทางที่ 2 ส่วนน้ำยาที่มีทองคำละลายอยู่ สามารถนำไปแยกโลหะทองคำและทำให้บริสุทธิ์ต่อไป



รูปที่ 2.4 การแยกสกัดโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แนวทางที่ 3

2.5 การแยกสกัดโลหะด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยา

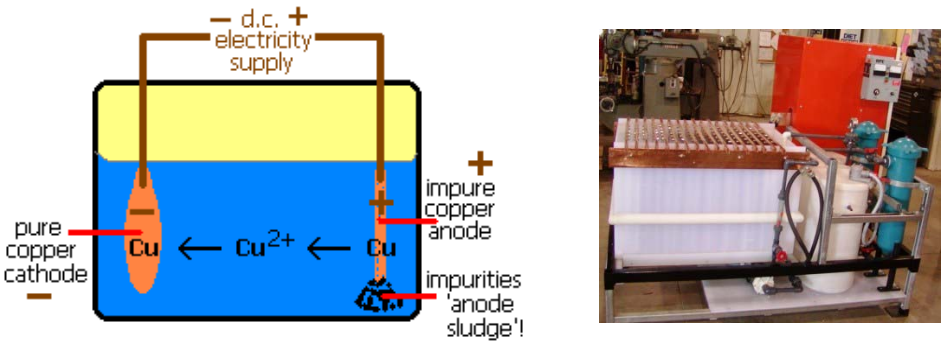
เทคโนโลยีโลหะวิทยา แบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ โลหะวิทยาสารละลายหรือโลหะวิทยาเคมี (Hydrometallurgy) โลหะวิทยาความร้อนหรือการถลุงด้วยความร้อนสูง (Pyrometallurgy) และโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมี (Electrometallurgy)

2.5.1 เทคโนโลยีโลหะวิทยาสารละลายหรือโลหะวิทยาเคมี เป็นการละลายโลหะต่างๆ ด้วยสารละลายที่เหมาะสม ตามชนิดของโลหะ แล้วแยกโลหะออกจากสารละลาย ซึ่งอาจใช้วิธีตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical precipitation) หรือใช้โลหะที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า (Less noble metal) เติมลงไปไล่โลหะในสารละลายออกมา (Metallic replacement) หรือใช้หลักการทางไฟฟ้าเคมี (Electrometallurgy) แยกโลหะออกจากสารละลายก็ได้ ตัวอย่างการแยกสกัดโลหะด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยาสารละลายหรือโลหะวิทยาเคมี แสดงในรูปที่ 2.5

2.5.2 เทคโนโลยีโลหะวิทยาความร้อนหรือการถลุงด้วยความร้อนสูง เป็นการถลุงโลหะ โดยใช้เตาไฟฟ้าชนิดแท่งความร้อน (Heater furnace) หรือการเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction furnace) และใช้น้ำมันเตา น้ำมันดีเซล ก๊าซธรรมชาติ หรือ ถ่านโค๊ก เป็นเชื้อเพลิง อุณหภูมิ 800-1200^{O}ซ ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ นอกจากนี้อาจเติมสารเชื้อ เช่น โซเดียมคาร์บอเนต ($NaCO_4$) บอแรกซ์ (Borax) และ โปแตสเซียมไนเตรท (KNO_3) เพื่อช่วยให้หลอมโลหะได้ง่าย เกิดการแยกตัวระหว่างโลหะกับสารปนเปื้อนได้ง่ายขึ้น

รูปที่ 2.5 การแยกสกัดโลหะด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยาสารละลายหรือโลหะวิทยาเคมี

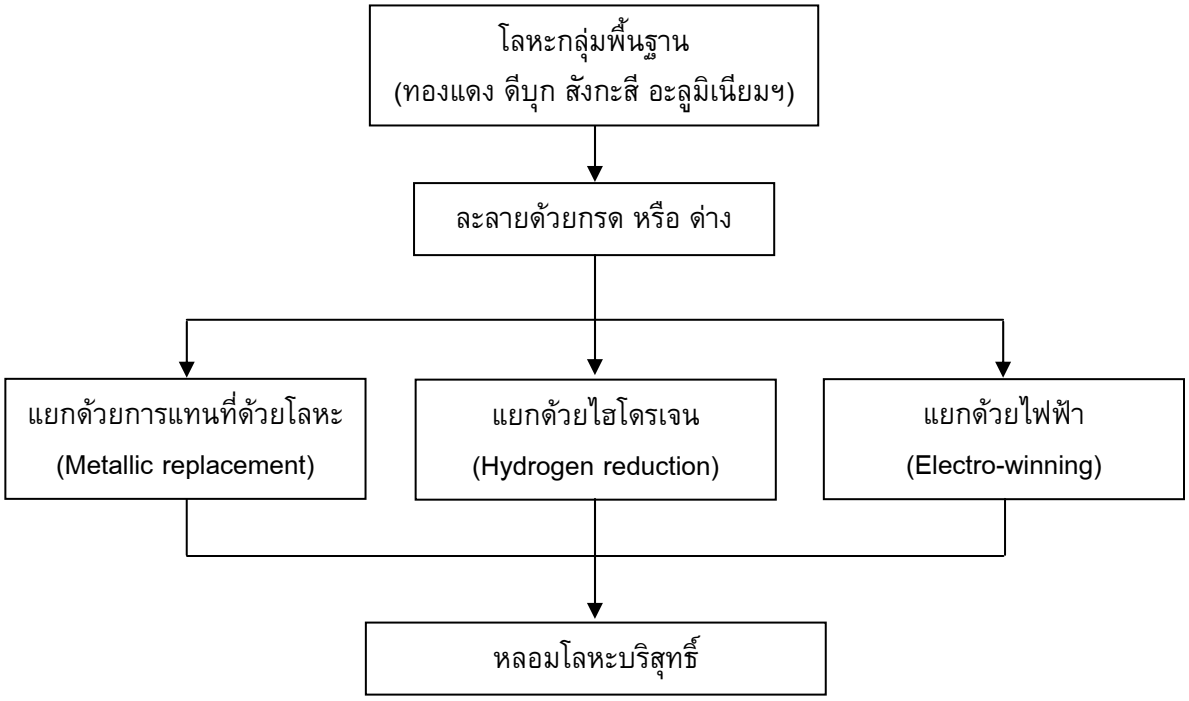
2.5.3 เทคโนโลยีโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมี กระบวนการนี้จะประกอบด้วย เซลไฟฟ้า (Electrolytic cell) ที่มีแผ่นขั้วบวก (Anode) และแผ่นขั้วลบ (Cathode) วางเรียงสลับกันไป มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Rectifier) เพื่อเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วบวกและขั้วลบที่จุ่มในสารละลาย (Electrolyte) ของโลหะที่ต้องการแยกสกัด จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของอิออนโลหะในสารละลายกลายเป็นโลหะเกาะที่ขั้วลบ ตัวอย่างของเซลไฟฟ้าสำหรับการแยกสกัดโลหะด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมี แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การแยกสกัดโลหะด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมี

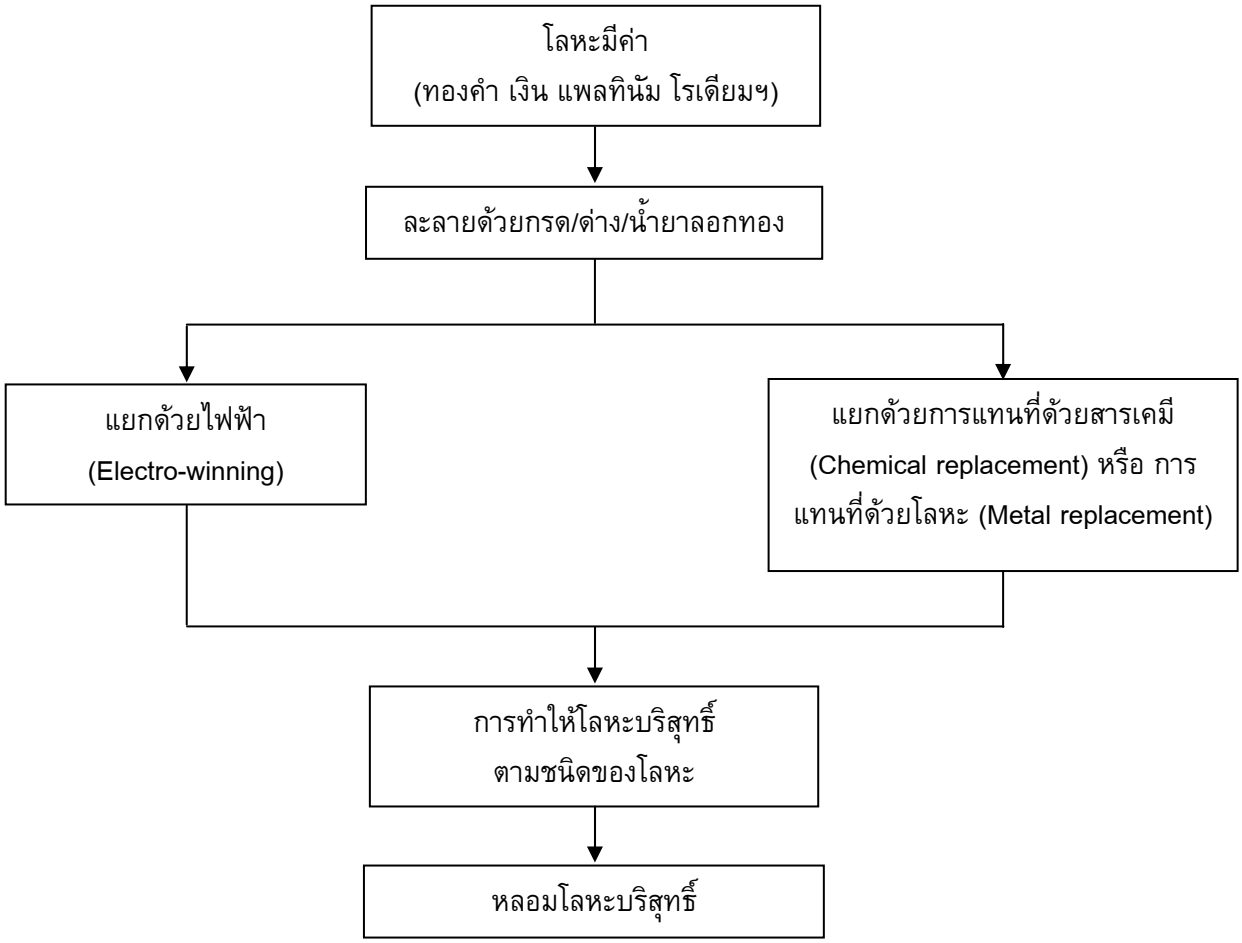
วิธีโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมีนี้จะมี 2 วิธี ได้แก่ Electro-winning เป็นวิธีที่ใช้สำหรับแยกสกัดโลหะออกจากสารละลาย โดยจะใช้ขั้วบวกเป็นโลหะที่ไม่ละลายในสารละลาย เช่น แผ่นเหล็กไร้สนิม (Stainless steel) ไทเทเนียม ส่วนวิธีโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมีอีกวิธีหนึ่ง คือ Electro-refining เป็นวิธีที่ใช้สำหรับทำให้โลหะบริสุทธิ์ โดยจะใช้ขั้วบวกเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะในสารละลายที่ต้องการแยกสกัด เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าแล้วขั้วบวกจะละลายลงในสารละลายแล้วนำไปแยกโลหะอีกครั้งโดยวิธีโลหะวิทยาสารละลายหรือโลหะวิทยาเคมี

ตามที่ได้กล่าวในตอนต้นแล้วว่าเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์จะมีองค์ประกอบหลัก 5 ประเภท ได้แก่ เหล็ก โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (ทองแดง ดีบุก ตะกั่ว อะลูมิเนียม และโลหะมีค่า) แก้ว พลาสติก และอื่นๆ ซึ่งแต่ละส่วนสามารถรีไซเคิลได้ โดยเฉพาะแก้ว พลาสติก และเหล็กสามารถนำกลับไปเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมได้โดยตรง แต่โลหะนอกกลุ่มเหล็กนั้น ต้องมีการแยกแต่ละโลหะเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ ในที่นี้จะกล่าวถึงการแยกสกัดโลหะกลุ่มพื้นฐานและการแยกสกัดโลหะมีค่า ดังแสดงในแผนภาพที่ 2.10 และแผนภาพที่ 2.11 โดยโลหะกลุ่มพื้นฐาน เช่น ทองแดง ดีบุก สังกะสี ตะกั่ว อะลูมิเนียม สามารถใช้เทคโนโลยีโลหะวิทยา เช่น วิธีแยกโลหะจากสารละลายด้วยการแทนที่ด้วยโลหะ (Metal replacement) หรือวิธีแยกโลหะจากสารละลายด้วยก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen reduction) หรือวิธีแยกโลหะจากสารละลายด้วยไฟฟ้า (Electro-winning)



แผนภาพที่ 2.10 การแยกสกัดโลหะกลุ่มพื้นฐานด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยา

สำหรับการแยกสกัดโลหะมีค่า เช่น ทองคำ เงิน แพลทินัม โรเดียม จะใช้วิธีละลายโลหะในสารละลายกรด หรือน้ำยาลอกทองในกรณีที่เป็นทองคำ จากนั้นใช้เทคโนโลยีโลหะวิทยา เช่น วิธีแยกโลหะจากสารละลายด้วยไฟฟ้า (Electro-winning) หรือวิธีแยกโลหะจากสารละลายด้วยการแทนที่ด้วยโลหะ (Metal replacement) หรือวิธีแยกโลหะจากสารละลายด้วยสารเคมี (Chemical precipitation) ดังแสดงในแผนภาพที่ 2.11



แผนภาพที่ 2.11 การแยกสกัดโลหะมีค่าด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยา

บทที่ 3

กรณีศึกษาการแยกสกัดโลหะทองแดง

กรณีศึกษานี้ จะเป็นต้นแบบการแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่เสนอวิธีการ ทางเลือกเทคโนโลยี และวิเคราะห์ต้นทุน บนพื้นฐานความเป็นไปได้ในการเกิดโรงงานรีไซเคิลโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Board : PCB) โดยเฉพาะผู้ที่สนใจประกอบการที่ไม่ต้องลงทุนสูงโดยการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ จะสามารถพิจารณาทางเลือกเทคโนโลยี และการลงทุนตั้งโรงงานรีไซเคิลได้ทันที โดยเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นวัตถุดิบ จะมีโลหะอยู่หลายชนิด เช่น ทองแดง ดีบุก ตะกั่ว โลหะมีค่า ซึ่งแต่ละชนิดสามารถแยกสกัดและทำให้เป็นโลหะบริสุทธิ์ได้ แต่ในกรณีศึกษานี้จะกล่าวถึงเฉพาะการแยกโลหะทองแดง เนื่องจากเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนโลหะอื่นๆ มีปริมาณไม่มาก แต่ก็สามารถแยกออกได้ไม่ยาก

วัตถุดิบในการทดลองกรณีศึกษา คือ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 2 ประเภท ได้แก่ แผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ และแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน

3.1 ปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้อง

การพิจารณาการตั้งโรงงานรีไซเคิลเพื่อแยกสกัดโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากเลือกเทคโนโลยีที่จะนำเสนอในกรณีศึกษานี้แล้ว ยังมีหลายปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องที่ผู้สนใจลงทุนต้องพิจารณาก่อนการตัดสินใจ ได้แก่

3.1.1 สถานที่และสภาพแวดล้อม เป็นปัจจัยที่สำคัญมากสำหรับผู้ประกอบการขนาดเล็กโดยเฉพาะที่มีความประสงค์จะเริ่มเป็นผู้ประกอบการรายใหม่ ต้องพิจารณา สภาพของชุมชน และระยะห่างจากแหล่งชุมชน แหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากกระบวนการแยกสกัดโลหะ บางวิธีอาจก่อให้เกิดมลภาวะเสียง อากาศ และน้ำ

3.1.2 ชนิดและปริมาณของวัตถุดิบต่อเดือน เนื่องจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่จะเป็นวัตถุดิบทั้งชนิดที่เป็นแผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ และ แผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน มีความหลากหลายมาก การจัดกลุ่มหรือแยกประเภทจะทำให้มีตัวเลขปริมาณที่แท้จริง และสามารถประเมินมูลค่าได้

3.1.3 ความพร้อมในการลงทุน ซึ่งหมายถึงความพร้อมทั้งในแง่ของแหล่งเงินทุนและเทคโนโลยี ถ้ามีเงินลงทุนสูงก็สามารถนำเข้าเทคโนโลยีต่างประเทศซึ่งเป็นแบบสำเร็จรูป พร้อมกับตลาดรองรับได้เลย ซึ่งคาดว่าจะใช้เงินลงทุนและหมุนเวียนไม่น้อยกว่า 100 ล้านบาท แต่ถ้าหากไม่ต้องการลงทุนมาก กรณีศึกษานี้จะน่าสนใจอย่างยิ่ง อาจช่วยให้ตัดสินใจตั้งโรงงานรีไซเคิลได้อย่างไม่ยากเลย

3.2 การแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

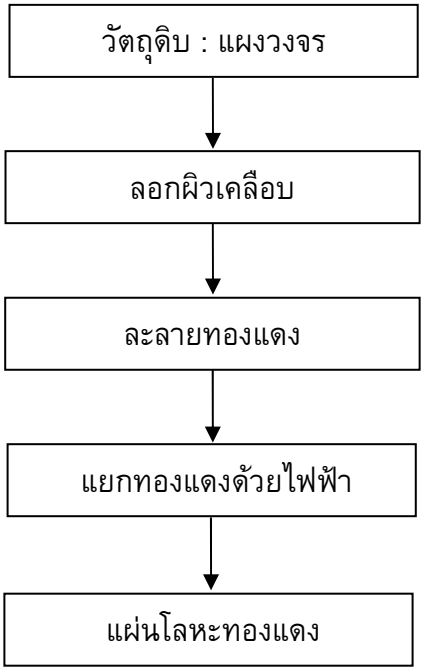
ในกรณีศึกษาการแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะใช้วัตถุดิบ 2 ประเภท ได้แก่ (1) แผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ และ (2) แผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน ซึ่งแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 2 ประเภท จะมีปริมาณโลหะแตกต่างกัน โดยประเภทที่ 1 เป็นเศษเหลือหรือเศษทิ้งจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการประกอบอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์และยังไม่ผ่านการติดตั้งชิ้นส่วนไอซีหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ มาก่อน จะมีส่วนประกอบของทองแดงประมาณ 10% ที่เหลือส่วนใหญ่เป็นพลาสติกและใยสังเคราะห์ จึงมีเพียงโลหะทองแดงชนิดเดียวที่มีมูลค่าที่คุ้มค่าในการรีไซเคิล ส่วนประเภทที่ 2 เป็นแผงวงจรของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่หมดสภาพใช้งานแล้ว จะมีโลหะทองแดงเป็นส่วนใหญ่ มากกว่า 90% ที่เหลือส่วนใหญ่เป็นพลาสติกและใยสังเคราะห์ นอกจากนี้ก็ยังมีโลหะมีค่า เช่น ทองคำ เงิน แพลทินัม เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า และโลหะพื้นฐานอื่นๆ เช่น ทองแดง ดีบุก ตะกั่ว และ สังกะสี เป็นต้น โดยตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองประเภท แสดงในรูปที่ 3.1

1. แผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์

2. แผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน

รูปที่ 3.1 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในกรณีศึกษาการแยกสกัดโลหะทองแดง

3.2.1 การแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ โดยขั้นตอนการทดลองเป็นไปตามแผนภาพที่ 3.1 ได้แก่ การลอกผิวเคลือบ การละลายทองแดง และการแยกทองแดงด้วยไฟฟ้า สำหรับวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและการทดลองทั้งหมด แสดงในรูปที่ 3.2



แผนภาพที่ 3.1 การแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์

(1) วัตถุดิบในการทดลอง คือ แผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นเศษเหลือและยังไม่ผ่านการติดตั้งชิ้นส่วนไอซีหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ มาก่อน หรืออาจเป็นส่วนที่มีข้อบกพร่อง (Defect) หรือส่วนเกินจากการผลิต โดยมีทองแดงเคลือบทั้งแบบด้านเดียวและสองด้าน วัตถุดิบชนิดนี้จะมีปริมาณทองแดงน้อย โดยผลวิเคราะห์ปริมาณทองแดงประมาณ 10% ที่เหลือส่วนใหญ่เป็นพลาสติกและใยสังเคราะห์

- การทดลอง ใช้วัตถุดิบซึ่งจะเป็นเศษชิ้นเล็กๆ น้ำหนัก 1,000 กิโลกรัม คิดเป็นโลหะทองแดงประมาณ 100 กิโลกรัม

(2) ลอกผิวเคลือบ เนื่องจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะเคลือบสารอินทรีย์ในส่วนที่ต้องการให้เป็นฉนวนไฟฟ้า จึงต้องลอกผิวเคลือบนี้ออกก่อน การทดลองครั้งแรกต้องคำนวณหาสัดส่วนความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ((H_2SO_4)) ที่เหมาะสม เริ่มตั้งแต่ความเข้มข้น 10-30% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ทั่วไปในระบบอุตสาหกรรม และ อุณหภูมิ 25-50^{O}ซ

- การทดลอง พบว่า ความเข้มข้น NaOH 20% เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด และที่อุณหภูมิสูงการลอกผิวเคลือบจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้น จึงขยายผลการทดลองจากภาชนะบรรจุขนาด 5 ลิตร เป็นขนาด 50 ลิตร โดยการแช่แผงวงจรดังกล่าวในสารละลาย 1 คืน ในสภาวะอุณหภูมิห้องปกติ โดยไม่ต้องใช้ความร้อนช่วย (เพื่อลดค่าใช้จ่าย) จากนั้นจึงขยายผลการทดลองโดยเปลี่ยนภาชนะบรรจุเป็นขนาด 200 ลิตร

- ข้อดีของการใช้สารละลาย NaOH เป็นตัวลอกผิวเคลือบ คือ NaOH ไม่มีปฏิกิริยากับสารเคลือบ ทำให้ไม่สิ้นเปลือง ทั้งนี้ จากการทดลอง พบว่าจะใช้ NaOH 30 กิโลกรัมต่อแผงวงจร 1,000 กิโลกรัม

- แผงวงจรที่ลอกผิวเคลือบออกแล้ว ล้างน้ำ และทิ้งให้แห้ง

(3) ละลายทองแดง

- สารละลายกรดและด่างที่ใช้ในการละลายทองแดงออกจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่จะรองรับในขั้นตอนต่อไป สำหรับกรณีศึกษาการทดลองครั้งนี้ เลือกใช้กรดกำมะถัน (H_2SO_4) เป็นตัวทำละลาย เนื่องจากโลหะทองแดงเมื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับ H_2SO_4 จะเปลี่ยนเป็นสารละลายทองแดงซัลเฟต ($CuSO_4$) ซึ่งเป็นสารละลาย (Electrolyte) ที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีการแยกสกัดโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้าในขั้นตอนต่อไป

- ส่วนผสมสารละลาย ประกอบด้วย H_2SO_4 ความเข้มข้นประมาณ 20% และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 5–10% โดยปริมาตร เพื่อละลายทองแดงออกจากแผงวงจร ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราการละลายของทองแดง ได้แก่ 1) อุณหภูมิของสารละลาย ทั้งนี้ การเพิ่มอุณหภูมิ 50-80°ซ จะทำให้อัตราการละลายทองแดงเพิ่มขึ้น แต่ก็ส่งผลให้เกิดต้นทุนด้านพลังงานเช่นกัน และ 2) การกวนสารละลายเพื่อให้แผงวงจรกระจายไม่เรียงตัวซ้อนกัน ก็สามารถเพิ่มอัตราการละลายทองแดงให้ดียิ่งขึ้น

- การทดลองในภาชนะบรรจุขนาด 50 ลิตร พบว่า ในขั้นตอนการเตรียม H_2SO_4 จะเกิดความร้อนมาก โดยในระยะเวลา 10 นาที ความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กระทั่งถึง 60-70°ซ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ดังนั้นตลอดการทดลองจึงไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนจากภายนอกมาช่วยเร่งปฏิกิริยา และเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาของแผงวงจรชุดแรก ให้นำแผงวงจรชุดใหม่เข้าไปทดลองต่อได้เลย โดยสังเกตจากปฏิกิริยาของก๊าซที่เกิดขึ้น ถ้าปริมาณก๊าซลดลง และไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีใดๆ ที่ผิวทองแดงให้เติม H_2O_2 ปริมาณ 5% ของปริมาตรสารละลายทั้งหมด เช่น สารละลาย 50 ลิตร ให้เติม H_2O_2 2.5 ลิตร เป็นต้น โดยค่อยๆ เติมครั้งละ 1,000 มิลลิลิตร เพื่อตรวจสอบว่าสารละลายยังมี H_2SO_4 เหลือเพียงพอหรือไม่ ถ้าเพียงพอ จะเกิดฟองก๊าซที่ทองแดงเพิ่มขึ้น แต่ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ แสดงว่าไม่เพียงพอ อาจต้องเติม H_2SO_4 เพิ่ม หรือ เปลี่ยนสารละลายใหม่ ทั้งนี้ ปริมาณ H_2SO_4 ที่เติมลงไปจะต้องไม่เกิน 10% ไม่เช่นนั้นสารละลายจะเกิดการอิ่มตัว และเกิดการตกผลึกของ $CuSO_4$ จากนั้นปล่อยสารละลายให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง นำสารละลายทองแดงที่ได้ไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

(4) แยกทองแดงด้วยไฟฟ้า

- เซลไฟฟ้า (Electrolytic cell) ใช้ถังพลาสติกขนาด 100 ลิตร โดยขั้วบวก คือ แผ่นตะกั่วขนาด 30 x 60 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร จำนวน 5 แผ่น และขั้วลบ คือ แผ่นสแตนเลสขนาด 30 x 60 เซนติเมตร หนา 1 มิลลิเมตร จำนวน 4 แผ่น วางขั้วบวกและขั้วลบทั้งหมดสลับกัน

- สารละลาย (Electrolyte) ใช้สารละลายจากขั้นตอนที่ (3) ปริมาณ 50 ลิตร

- เมื่อให้กระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง (Rectifier) ผ่านเซลไฟฟ้า สารละลายทองแดงจะทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นโลหะทองแดงเกาะที่ขั้วลบ และลอกแผ่นทองแดงออกจากขั้วลบ

- ข้อสังเกต การควบคุมแรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่พอดี (Optimum point) ในทางปฏิบัติจะใช้วิธีค่อยๆ เพิ่มกระแสไฟฟ้า และสังเกตการเปลี่ยนสีของโลหะทองแดงที่ขั้วลบจากสีชมพูทองแดง เป็น สีทองแดงน้ำตาลดำ ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดสูงสุดของการใช้กระแสไฟฟ้า ให้ปรับลดกระแสไฟฟ้าลงมาเล็กน้อย โลหะทองแดงจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูทองแดงอีกครั้ง จุดนี้ คือ Optimum point ซึ่งจะใช้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จุดนี้ตลอดการทดลอง

- เมื่อทองแดงในสารละลายลดลงจนหมดหรือเกือบหมด โดยสังเกตจากสีของสารละลายที่จะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเข้มเป็นสีฟ้าอ่อน จึงหยุดการทดลอง และเปลี่ยนสารละลายชุดใหม่เข้าไปแทนที่ โดยสารละลายชุดเก่าจะนำกลับไปใช้ในขั้นตอนที่ (3) เพื่อละลายทองแดงจากแผงวงจรชุดใหม่

รูปที่ 3.2 แสดงวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในกรณีศึกษา ซึ่งเป็นวัสดุอุปกรณ์ ที่หาได้ง่าย และมีราคาไม่สูง โดยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ เซลไฟฟ้า สามารถออกแบบและหาวัสดุในการสร้างเซลไฟฟ้าได้ไม่ยาก ต้นทุนต่ำ โดยประยุกต์ใช้ถังพลาสติกที่บรรจุสารเคมีที่มีหลายขนาด

ลอกผิวเคลือบจากแผงวงจร

ละลายทองแดง

แยกทองแดงด้วยไฟฟ้า

แผ่นโลหะทองแดง

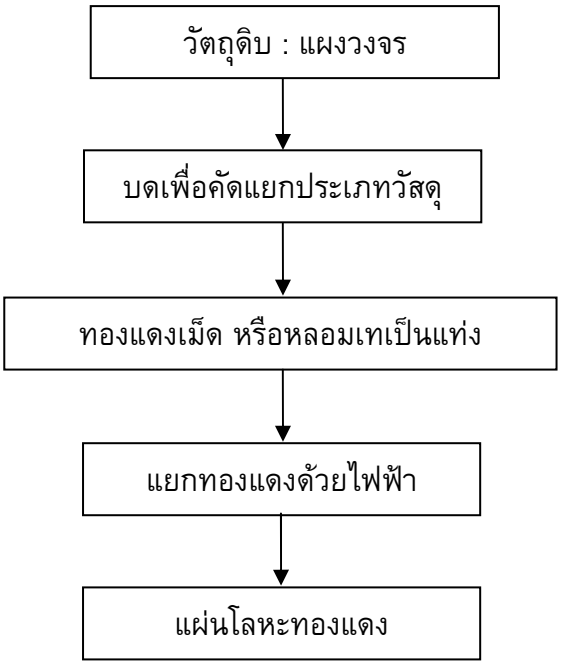
รูปที่ 3.2 การแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์ต้นทุนการแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ เมื่อคำนวณจากวัตถุดิบน้ำหนัก 1,000 กิโลกรัม แยกโลหะทองแดงได้ 100 กิโลกรัม ดังแสดงในตารางที่ 3.1 พบว่า ต้นทุนวัตถุดิบ สารเคมี และพลังงานไฟฟ้า โดยไม่รวมต้นทุนด้านแรงงานและการจัดการ จะอยู่ที่ 8,628 บาท ได้ผลผลิต คือ โลหะทองแดง 100 กิโลกรัม มูลค่า 25,000 บาท (ราคาโลหะ ณ มีนาคม 2550) คิดเป็นมูลค่าเพิ่มประมาณ 190%

ตารางที่ 3.1 ต้นทุนการแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์

รายการ	ปริมาณ		ราคา (บาท)
วัตถุดิบ	1,000	กิโลกรัม	8,000
สารเคมี			
- กรดซัลฟูริก	70	ลิตร	945
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	75	ลิตร	2,147
- โซเดียมไฮดรอกไซด์	30	กิโลกรัม	100
พลังงานไฟฟ้า :ค่าไฟฟ้า	67	ยูนิต	536 (ยูนิตละ 8 บาท)
ต้นทุนรวม			**8,628**
ผลผลิต : แผ่นโลหะทองแดง	100	กิโลกรัม	**25,000** (กิโลกรัมละ 250 บาท)

3.2.2 การแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน โดยขั้นตอนการทดลองเป็นไปตามแผนภาพที่ 3.2 ได้แก่ บดเพื่อคัดแยกประเภทวัสดุ การใช้ทองแดงเม็ดเป็นขั้วบวก หรือ การหลอมทองแดงเทเป็นแท่งเพื่อเป็นขั้วบวก และการแยกทองแดงด้วยไฟฟ้า สำหรับวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและการทดลองทั้งหมด แสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4



แผนภาพที่ 3.2 การแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน

(1) วัตถุดิบในการทดลอง คือ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่หมดสภาพใช้งานแล้ว วัตถุดิบกลุ่มตัวอย่างมีผลวิเคราะห์ปริมาณทองแดง อยู่ระหว่าง 90-95%

(2) บดเพื่อคัดแยกประเภทวัสดุ โดยใช้เครื่องมือบดตามที่ได้อธิบายในบทที่ 2 เรื่องแนวทางการแยกสกัดโลหะจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ บดจนได้เศษทองแดงเป็นเม็ดขนาดเล็กผ่านการคัดขนาด เลือกใช้เฉพาะกลุ่มที่มีขนาด 2-3 มิลลิเมตร ต้องการขนาดเล็กเพื่อเปิดผิวหน้าโลหะทองแดงให้มากที่สุด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการทดลองวิธีที่ 1 ที่จะกล่าวถึงในขั้นตอนต่อไป

(3) แยกทองแดงด้วยไฟฟ้า โดยแบ่งเป็น 2 วิธี ตามลักษณะของขั้วบวกที่ใช้ โดยทั้งสองวิธีแตกต่างกัน เฉพาะลักษณะของขั้วบวกเท่านั้น

- วิธีที่ 1 ใช้ขั้วบวกเป็นเม็ดทองแดงบรรจุในท่อ PVC เปิดผิวสัมผัสเป็นวงกลม และใช้ผ้าขาวบางหุ้มท่อ PVC อีกชั้นหนึ่งเพื่อกันเม็ดทองแดงร่วงลงในเซลไฟฟ้า (ในทางทฤษฎี จะใช้แผ่นทอจากใยสังเคราะห์) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

- วิธีที่ 2 จะนำเม็ดทองแดงมาหลอมเทเป็นแท่ง ใช้เป็นขั้วบวก ดังแสดงในรูปที่ 3.4 อาจใช้ผ้าหุ้มขั้วบวกเพื่อเก็บ Anode slime หรือไม่เช่นนั้นก็อาจใช้วิธีกรองสารละลายผ่านเครื่องกรองตลอดเวลาก็ได้

- เซลไฟฟ้า ใช้ถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร ขั้วลบทำจากแผ่นเหล็กสเตนเลสม้วนเป็นแผ่นกลม วางขั้วบวกไว้ตรงกลางเซลไฟฟ้า ใช้ใบพัดเป็นตัวกวนสารละลาย ควบคุมอัตราการแยกทองแดงจากสารละลาย

- Electrolyte คือ ส่วนผสมของ H_2SO_4 และ Cu_2SO_4 ในอัตราส่วนทองแดงใน Cu_2SO_4 40-45 กรัมต่อลิตร และ H_2SO_4 185-195 กรัม/ลิตร (อ้างอิงจาก Standard Copper Cell Electrolysis ตามบรรณานุกรม ข้อ 5)

- เมื่อให้กระแสไฟฟ้าคงที่ผ่านเซลไฟฟ้าแล้ว ทองแดงจากขั้วบวกจะละลายลงไปแทนที่ทองแดงในสารละลาย และทองแดงจากสารละลายในปริมาณเท่ากัน จะไปเกาะที่ขั้วลบ ดังนั้น ปริมาณทองแดงในสารละลายต้องคงที่ ในขณะที่ขั้วบวกจะมีขนาดและน้ำหนักลดลงเรื่อยๆ จนเหลือประมาณ 1 ใน 3 จะเติมทองแดงเม็ดเพิ่มลงไป แต่ในทางปฏิบัติ น้ำหนักทองแดงที่เกาะที่ขั้วลบเป็นไปตามทฤษฎีของฟาราเดย์ (Faraday's law) คือ ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เวลา 1 ชั่วโมง จะแยกทองแดงได้ 1.17 กรัม แต่ปริมาณทองแดงในสารละลายลดลง แสดงว่าทองแดงที่ขั้วลบจะเป็นทองแดงที่มาจากขั้วบวกและจากสารละลายซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจากตะกั่วซึ่งเป็นโลหะบัดกรีหรือลวดเชื่อมในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ปนอยู่กับทองแดงเม็ด และตะกั่วจะทำปฏิกิริยากับ H_2SO_4 กลายเป็นตะกั่วซัลเฟต ($PbSO_4$) สีขาวอยู่ที่ผิวทองแดงเม็ด ทำให้การละลายของทองแดงจากขั้วบวกลดลง และทองแดงในสารละลายก็ลดลงเพราะส่วนหนึ่งไปเกาะที่ขั้วลบ ดังนั้นต้องทำให้ทองแดงเม็ดที่ขั้วบวกมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาเพื่อให้ส่วนของ $PbSO_4$ หลุดออกไป โดยได้ทดลองติดตั้งปั๊มดูดสารละลาย หมุนเวียนสารละลายผ่านขั้วบวก พบว่า ทองแดงจากขั้วบวกละลายได้ดีขึ้น สามารถแก้ปัญหาได้ระดับหนึ่ง การทดลองวิธีที่ 1 ก็เพื่อลดต้นทุนการหลอมทองแดงเป็นแท่งเพื่อทำขั้วบวก แต่ใช้ทองแดงเม็ดเป็นขั้วบวก แต่เมื่อผลไม่เป็นที่น่าพอใจจึงหยุดการทดลองวิธีที่ 1 และดำเนินการทดลองวิธีที่ 2 ที่มีความสมบูรณ์มากกว่า

- ทดลองติดต่อกัน 100 ชั่วโมง แล้วลอกแผ่นโลหะทองแดงออกจากขั้วบวก

- การทดลองวิธีที่ 2 หลังจากสิ้นสุดการทดลอง 100 ชั่วโมง ลอกโลหะทองแดงจากขั้วลบ ได้น้ำหนักน้อยกว่าทฤษฎีเล็กน้อย เนื่องจากมีโลหะอื่น เช่น ตะกั่ว ดีบุก เงิน ปนอยู่ในแท่งทองแดง ซึ่งจะใช้กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งในการทำปฏิกิริยากับโลหะดังกล่าวด้วย

รูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในกรณีศึกษา ซึ่งหาได้ง่าย ต้นทุนไม่สูง อุปกรณ์ที่สำคัญ คือ เซลไฟฟ้าก็สามารถออกแบบโดยใช้ถังสารเคมี ขนาดตั้งแต่ 500-2,000 ลิตรได้ไม่ยาก

ทองแดงเม็ดหลังจากการบด

ทองแดงเม็ดเป็นขั้วบวก

แยกโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า

แผ่นโลหะทองแดง

รูปที่ 3.3 การแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน วิธีที่ 1

ทองแดงเม็ดหลังจากการบด

หลอมแล้วเทเป็นแท่ง

แท่งทองแดงเป็นขั้วบวก

แยกโลหะทองแดงด้วยไฟฟ้า

แผ่นโลหะทองแดง

รูปที่ 3.4 การแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน วิธีที่ 2

การวิเคราะห์ต้นทุนการแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน จะประเมินจากการใช้แท่งทองแดง น้ำหนัก 30 กิโลกรัม ที่ได้จากการหลอมทองแดงเม็ดที่มาจากการบดแผงวงจร แล้วใช้เป็นขั้วบวกในกระบวนการแยกด้วยไฟฟ้า ทำการทดลองต่อเนื่องเพื่อเก็บข้อมูลใช้วิเคราะห์ต้นทุน โดยคิดสัดส่วนเป็นวัตถุดิบ 1,000 กิโลกรัม ตามตารางที่ 3.2 พบว่า ต้นทุนวัตถุดิบ สารเคมี และพลังงานไฟฟ้า ไม่รวมต้นทุนด้านแรงงานและการจัดการ อยู่ที่ 182,093 บาท ได้ผลผลิต คือ โลหะทองแดง 930 กิโลกรัม มูลค่า 232,500 บาท (ราคาโลหะ ณ มีนาคม 2550) คิดเป็นมูลค่าเพิ่มประมาณ 30%

นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนการแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน โดยวิธีการเช่นเดียวกับวิธีที่ใช้ในการแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ คือ ละลายทองแดงเม็ดด้วยสารละลาย H_2SO_4 และ H_2O_2 แล้วนำสารละลายเข้าสู่ขั้นตอนการแยกด้วยไฟฟ้า พบว่า มีต้นทุนรวม 179,206 บาท ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งต้นทุนไม่แตกต่างจาก ตารางที่ 3.2 มากนัก อย่างไรก็ตาม วิธีการที่หลอมทองแดงเม็ดแล้วเทเป็นแท่งเพื่อนำไปเป็นขั้วบวกในขั้นตอนการแยกด้วยไฟฟ้า เป็นวิธีที่ใช้เวลาน้อยกว่าซึ่งก็จะลดต้นทุนทางอ้อม ถ้าโรงงานรีไซเคิลเลือกใช้วิธีนี้ก็ไม่จำเป็นต้องมีเตาหลอมแต่สามารถจ้างหลอมได้

ตารางที่ 3.2 ต้นทุนการแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน

รายการ	ปริมาณ	ราคา (บาท)
วัตถุดิบ	1,000 กิโลกรัม	150,000
การหลอมเทเป็นแท่ง		20,000 (20 บาท/กิโลกรัม)
สารเคมี (น้ำยา 16 ลิตร)		
- กรดซัลฟูริก	87 ลิตร	1,941
- ทองแดงซัลเฟต	58 กิโลกรัม	5,352
พลังงานไฟฟ้า : ค่าไฟฟ้า	600 ยูนิต	4,800 (ยูนิตละ 8 บาท)
ต้นทุนรวม		**182,093**
ผลผลิต : แผ่นโลหะทองแดง	930 กิโลกรัม	**232,500** (กิโลกรัมละ 250 บาท)

ตารางที่ 3.3 ต้นทุนการแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน (โดยละลายทองแดงเม็ดด้วยสารละลาย H_2SO_4 และ H_2O_2 แล้วนำสารละลายเข้าสู่ขั้นตอนการแยกด้วยไฟฟ้า)

รายการ	ปริมาณ	ราคา (บาท)
วัตถุดิบ	1,000 กิโลกรัม	150,000
สารเคมี		
- กรดซัลฟูริก	218 ลิตร	2,936
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	750 ลิตร	21,470
พลังงานไฟฟ้า :ค่าไฟฟ้า	600 ยูนิต	4,800 (ยูนิตละ 8 บาท)
ต้นทุนรวม		**179,206**
ผลผลิต : แผ่นโลหะทองแดง	930กิโลกรัม	**232,000** (กิโลกรัมละ 250 บาท)

3.3 ข้อดี

3.3.1 สารเคมีที่ใช้ไม่สิ้นเปลือง โดยเฉพาะ H_2SO_4 ที่ใช้ในกระบวนการละลายทองแดง และการแยกทองแดงด้วยไฟฟ้า สามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ได้ใหม่ มีเพียง H_2O_2 เท่านั้นที่ใช้แล้วหมดไป ส่วน NaOH ก็ใช้ในปริมาณน้อยมากเช่นกัน

3.3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ เซลไฟฟ้า สามารถหาวัสดุและออกแบบได้ไม่ยาก ต้นทุนต่ำ เช่น ประยุกต์ใช้ถังพลาสติกที่บรรจุสารเคมีซึ่งมีหลายขนาด และราคาไม่แพง

3.3.3 ปัญหาด้านมลภาวะทางน้ำ อยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างต่ำ สามารถควบคุมได้ง่าย ส่วนมลภาวะทางอากาศมีเพียงไอกรดจากก๊าซไฮโดรเจนของกระบวนการละลายทองแดง และการแยกทองแดงด้วยไฟฟ้า ซึ่งถ้าเป็นโรงงานรีไซเคิลขนาดกลางและขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีระบบควบคุม แต่ถ้าเป็นเพียงโรงงานรีไซเคิลขนาดเล็ก สามารถกำจัดมลภาวะดังกล่าวได้ โดยใช้วิธีดูดอากาศที่มีไอกรดผ่านน้ำสะอาด

3.4 สรุปผลการทดลอง

3.4.1 การทดลองต้นแบบจากกรณีศึกษาการแยกสกัดโลหะทองแดงจากวัตถุดิบทั้ง 2 ประเภท คือ แผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ และแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน มีประสิทธิภาพสูงมาก คิดเป็น %Recovery ได้เกือบ 100%

3.4.2 การวิเคราะห์ต้นทุนการแยกสกัดโลหะทองแดงจากวัตถุดิบทั้ง 2 ประเภทที่เป็นกรณีศึกษานี้ พบว่า แผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้สูงเกือบ

200% ซึ่งเป็นมูลค่าเพิ่มเฉพาะจากโลหะทองแดงเท่านั้น ทั้งยังมีกากอื่นๆ ที่นอกเหนือจากทองแดงที่สามารถนำไปสร้างมูลค่าเพิ่มได้อีก อาทิ พลาสติก และใยสังเคราะห์ สำหรับแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้เกือบ 30% ซึ่งดูเหมือนแตกต่างจากประเภทที่ 1 มาก แต่ในความจริงแล้วประเภทที่ 2 นอกจากทองแดงแล้ว ยังมีโลหะพื้นฐานอื่นๆ เช่น ทองแดง ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี และที่สำคัญ คือ มีโลหะมีค่า เช่นทองคำ เงิน แพลทินัม ที่สามารถแยกสกัดออกได้หลายวิธีและจะเพิ่มมูลค่าได้อีก ทั้งนี้ ไม่ได้กล่าวถึงวิธีการแยกสกัดในกรณีศึกษานี้ จากมูลค่าเพิ่มที่กล่าวมานี้เชื่อว่าสูงพอที่จะจูงใจให้ผู้ประกอบการสนใจนำการทดลองต้นแบบจากกรณีศึกษานี้ไปขยายผลในเชิงพาณิชย์ได้ทันที

ข้อสังเกต การวิเคราะห์ต้นทุนอยู่บนพื้นฐานที่ราคาวัตถุดิบไม่ผันผวน

3.4.3 การเลือกใช้เทคโนโลยีโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมีในการแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจร ทั้งประเภทแผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ และแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน ซึ่งในกรณีศึกษานี้ได้ทดลองกับวัตถุดิบที่มีในประเทศ มีความน่าสนใจและสามารถดำเนินการในเชิงพาณิชย์ได้ โดยเฉพาะสำหรับโรงงานรีไซเคิลขนาดเล็กที่ไม่ต้องการลงทุนมาก เนื่องจากเทคโนโลยีไม่ซับซ้อน และมีข้อดีหลายประการ ที่สำคัญ คือ วัสดุอุปกรณ์ หาได้ง่ายและมีราคาไม่สูง โดยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ เซลไฟฟ้า สามารถออกแบบและหาวัสดุในการสร้างเซลไฟฟ้า ได้ไม่ยาก ต้นทุนต่ำ โดยประยุกต์ใช้ถังพลาสติกที่บรรจุสารเคมี ที่มีหลายขนาด

3.4.4 นอกจากนี้เทคโนโลยีดังกล่าวยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกสกัดโลหะทองแดงออกจากวัตถุดิบอื่นๆ ที่มีทองแดงเป็นส่วนผสม เช่น เศษทองแดง ทองเหลืองจากการขึ้นรูป เศษทองแดงผสมนิกเกิล ตะกอนทองแดงจากการปรับสภาพน้ำ เป็นต้น

บทที่ 4

บทสรุป

รายงานฉบับนี้ จุดประสงค์หลัก เป็นการทดลองต้นแบบจากกรณีศึกษาการแยกสกัดโลหะทองแดงจากวัตถุดิบ คือ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 2 ประเภท ได้แก่ แผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ และแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน เพื่อประโยชน์ สำหรับผู้ที่สนใจตั้งโรงงาน รีไซเคิล ที่จะสามารถพิจารณาทางเลือกเทคโนโลยี และการลงทุนตั้งโรงงานรีไซเคิลได้ทันที โดยไม่ต้องนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ วัสดุอุปกรณ์สามารถหาได้ง่ายและต้นทุนไม่สูง

4.1 การจัดการเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดกระแสการคิดค้น และผลิตเครื่องมือ เครื่องใช้ ตลอดจนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ตลอดเวลา ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีและนวัตกรรมเป็นส่วนหนึ่งของสาเหตุการเพิ่มปริมาณเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์อย่างรวดเร็ว ข้อมูลขององค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อม หรือ EPA ระบุว่า ทุก 2-3 ปี คอมพิวเตอร์ประมาณ 30-40 ล้านเครื่องจะกลายเป็นอุปกรณ์ที่หมดสภาพใช้งาน นอกจากนี้การเปลี่ยนระบบแพร่ภาพโทรทัศน์ให้เป็น Digital ที่ความคมชัดสูง (HDTV) ภายในปี พ.ศ. 2552 ก็จะทำให้โทรทัศน์ที่รับสัญญาณเฉพาะAnalog ซึ่งยังไม่เสีย ทำงานไม่ได้อีกจำนวนมาก คาดว่าจะมีโทรทัศน์ที่เลิกใช้งานประมาณ 25 ล้านเครื่องต่อปี ข้อมูลจากโครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ กล่าวว่าขยะอิเล็กทรอนิกส์ทุกประเภททั่วโลกอาจสูงถึง 45 ล้านตันต่อปี

ดังนั้น เมื่อเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลกเพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อยๆ การแก้ปัญหาไม่ให้เศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์กลายเป็นขยะที่ไร้ค่าและเกิดมลภาวะด้านสิ่งแวดล้อมหากมีการปนเปื้อน หรือแพร่กระจายสู่ระบบนิเวศน์ จะต้องมีกระบวนการคัดแยกและรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัย ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มทั้งทางสังคมและเศรษฐกิจ ในขณะเดียวกันในส่วนของการป้องกันและการจัดการเพื่อความยั่งยืน ผู้ที่เกี่ยวข้องจะต้องคำนึงถึงข้อกำหนดที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากล ได้แก่ WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment : ระเบียบว่าด้วยการจัดการซากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์) และ RoHS (Restriction of Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment : ระเบียบว่าด้วยการจำกัดการใช้สารต้องห้ามบางชนิดในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์)

4.2 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่จะใช้ในการรีไซเคิลโลหะทองแดง คือ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Board : PCB) ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมโยงกันทางอิเล็กทรอนิกส์ และเป็นส่วนที่ทำให้ส่วนประกอบต่างๆ

สื่อสารกันในการทำงานอย่างที่ต้องการ เนื่องจากอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เมื่อหมดสภาพหรือหมดสภาพใช้งานแล้วจะกลายเป็นเศษ ซาก ขยะหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ แต่ซากเหล่านี้ยังมีมูลค่า เช่น โลหะมีค่า แก้ว พลาสติก ไม้ เป็นต้น ซึ่งเมื่อคัดแยก แล้วผ่านการรีไซเคิลจะได้วัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ ต่อไป โดยพบว่า โลหะที่แยกได้จากขยะหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนใหญ่เป็นเหล็ก รองลงมา คือ หลอดภาพ (CRTs) ที่สามารถนำไปแยกตะกั่วในโรงงานถลุงตะกั่วได้ ส่วนที่เหลือก็นำกลับไปหลอมใหม่ในอุตสาหกรรมการผลิตแก้ว นอกจากนี้ชิ้นส่วนบางประเภทที่ยังคงสภาพดีหรือสามารถใช้งานได้ จะมีการนำกลับไปใช้ซ้ำ ส่วนที่หมดสภาพใช้งาน กระทั่งไม่สามารถใช้ซ้ำได้อีก หรือไม่สามารถรีไซเคิลได้แล้ว จะนำไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบอย่างถูกหลักวิธีโดยบริษัทเอกชนที่ได้รับอนุญาตจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม เพื่อไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบสิ่งแวดล้อม

ลักษณะของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่จะนำมารีไซเคิล ดังนี้

- แผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ เป็นเศษเหลือจากการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และยังไม่ผ่านการติดตั้งชิ้นส่วนไอซีหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ มาก่อน หรืออาจเป็นส่วนที่มีข้อบกพร่อง หรือส่วนเกินจากการผลิต โดยมีทองแดงเคลือบทั้งแบบด้านเดียวและสองด้าน แผงวงจรชนิดนี้จะเป็นเศษขนาดเล็ก ส่วนประกอบหลักเป็นพลาสติกและใยสังเคราะห์ มีปริมาณทองแดงประมาณ 10% และเป็นโลหะชนิดเดียวที่มีมูลค่าที่คุ้มค่าในการรีไซเคิล

- แผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน โดยถอดออกจากอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่สามารถใช้งานได้แล้ว ในส่วนประกอบจะมีโลหะทองแดงมากกว่า 90% ที่เหลือเป็นพลาสติกและใยสังเคราะห์ นอกจากนี้ก็ยังมีโลหะมีค่า เช่น ทองคำ เงิน แพลทินัม ที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า และโลหะพื้นฐานอื่นๆ เช่น ดีบุก ตะกั่ว และ สังกะสี เป็นต้น

4.3 ต้นแบบการแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

4.3.1 การแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ มีขั้นตอน ดังนี้

- ลอกผิวเคลือบด้วยสารละลาย NaOH เนื่องจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะเคลือบสารอินทรีย์ในส่วนที่ต้องการให้เป็นฉนวนไฟฟ้า จึงต้องลอกผิวเคลือบนี้ออกก่อน

- ละลายทองแดงออกจากแผงวงจร ด้วยสารละลาย H_2SO_4 และ H_2O_2

- แยกสารละลายทองแดงด้วยไฟฟ้า โดยใช้แผ่นตะกั่วเป็นขั้วบวก จำนวน 5 แผ่น และแผ่นสเตนเลสเป็นขั้วลบ จำนวน 4 แผ่น วางขั้วบวกและขั้วลบสลับกัน

- ลอกแผ่นทองแดงออกจากผิวขั้วลบ

4.3.2 การแยกสกัดทองแดงจากแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน มีขั้นตอน ดังนี้

- บดแผงวงจรและคัดแยกทองแดงเม็ดที่มีขนาด 2-3 มิลลิเมตร

- หลอมทองแดงเม็ดแล้วเทเป็นแท่งเพื่อใช้เป็นขั้วบวกในขั้นตอนต่อไป

- แยกสารละลายทองแดงด้วยไฟฟ้า โดยใช้แท่งทองแดงเป็นขั้วบวก และแผ่นสเตนเลสเป็นขั้วลบ วางขั้วบวกไว้ตรงกลางเซลไฟฟ้า ทดลองติดต่อกัน 10 ชั่วโมง

- ลอกแผ่นทองแดงออกจากผิวขั้วลบ

4.4 สรุปผล

4.4.1 การเลือกใช้เทคโนโลยีโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมีในการแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจร ซึ่งในกรณีศึกษานี้ได้ทดลองกับวัตถุดิบที่มีในประเทศ มีความน่าสนใจและสามารถดำเนินการในเชิงพาณิชย์ได้ โดยเฉพาะสำหรับโรงงานรีไซเคิลขนาดเล็กที่ไม่ต้องการลงทุนมาก เนื่องจากเทคโนโลยีไม่ซับซ้อน และมีข้อดีหลายประการ ที่สำคัญ คือ วัสดุอุปกรณ์ หาได้ง่าย และมีราคาไม่สูง โดยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ เซลไฟฟ้า สามารถออกแบบและหาวัสดุในการสร้างเซลไฟฟ้าได้ไม่ยาก ต้นทุนต่ำ โดยประยุกต์ใช้ถังพลาสติกที่บรรจุสารเคมี ที่มีหลายขนาด

4.4.2 การวิเคราะห์ต้นทุนการแยกสกัดโลหะทองแดงจากวัตถุดิบทั้ง 2 ประเภทที่เป็นกรณีศึกษานี้ พบว่า แผงวงจรเศษทิ้งหลังการประกอบผลิตภัณฑ์ สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้สูงถึง 190% ซึ่งเป็นมูลค่าเพิ่มเฉพาะจากโลหะทองแดงเท่านั้น ทั้งยังมีกากอื่นๆ ที่นอกเหนือจากทองแดงที่สามารถนำไปสร้างมูลค่าเพิ่มได้อีก อาทิ พลาสติก และใยสังเคราะห์ สำหรับแผงวงจรของผลิตภัณฑ์ที่หมดสภาพใช้งาน สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้เกือบ 30% ซึ่งดูเหมือนแตกต่างจากประเภทที่ 1 มาก แต่ในความจริงแล้วประเภทที่ 2 นอกจากทองแดงแล้ว ยังมีโลหะพื้นฐานอื่นๆ เช่น ทองแดง ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี และที่สำคัญ คือ มีโลหะมีค่า เช่นทองคำ เงิน แพลทินัม ที่สามารถแยกสกัดออกได้และจะเพิ่มมูลค่าได้อีก ทั้งนี้ ไม่ได้กล่าวถึงวิธีการแยกสกัดในกรณีศึกษานี้ จากมูลค่าเพิ่มที่กล่าวมานี้เชื่อว่าสูงพอที่จะจูงใจให้ผู้ประกอบการสนใจนำการทดลองต้นแบบจากกรณีศึกษานี้ไปขยายผลในเชิงพาณิชย์ได้ทันที

4.4.3 เทคโนโลยีการทดลองต้นแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกสกัดโลหะทองแดงออกจากวัตถุดิบอื่นๆ ที่มีทองแดงเป็นส่วนผสม เช่น เศษทองแดง ทองเหลืองจากการขึ้นรูป เศษทองแดงผสมนิกเกิล ตะกอนทองแดงจากการปรับสภาพน้ำ เป็นต้น

ต้นแบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพ และมีความคุ้มค่าที่ผู้ประกอบการรีไซเคิลรายใหม่สามารถนำไปขยายผลในเชิงพาณิชย์ได้ทันที และ ผู้ประกอบการรีไซเคิลรายเดิมสามารถนำไปเทียบเคียงและพัฒนาวิธีการที่ใช้อยู่ โดยมีแรงจูงใจคือมูลค่าที่เพิ่มขึ้น และข้อดี คือ วัตถุดิบดังกล่าวส่วนใหญ่ยังไม่มีโรงงานรีไซเคิลรองรับ และการเลือกสถานที่ตั้งโรงงานควรคำนึงถึงแหล่งวัตถุดิบและแหล่งรับซื้อโลหะด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม สิ่งที่ผู้ประกอบการต้องตระหนักและให้ความร่วมมือ คือ การจัดการด้านสิ่งแวดล้อมอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้สามารถอยู่ร่วมกับชุมชนได้ ส่งผลต่อการพัฒนาธุรกิจอย่างยั่งยืน

บรรณานุกรม

1. เบญจพร พวงจำปี, การหมุนเวียนเศษทิ้งอิเล็กทรอนิกส์, กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, ตุลาคม 2550.

2. จิรพัฒน์ โพธิ์พ่วง, กฎหมายเกี่ยวกับเศษเหลือทิ้งของเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศและต่างประเทศ, มิถุนายน 2547.

3. Minnesota Office of Environmental Assistance. Recycling Uses Electronics Report on Minnesota's Demonstration Project. (online).
Available : http://www.moea.state.mn.us/plugin/ElectronicsReport.pdf, July 2001

4. Simon Wilknson and Team. EPA TOPIC REPORT. Waste from Electrical and Electronic Equipment in Ireland: a status report. (online).
Available: http://www.epa.ie/techinfo/WEEETopicReport.pdf, 2001

5. C.B. Gill, Standard Copper Cell Electrolysis Tamano smelters, Non Ferrous Extractive Metallurgy, Lafayette College 1951.

6. Charles W. Keenan, Jesse H. Wood and Donald C. Kleinfelter, General College Chemistry fifth edition, 1957.

7. Ammen C.W., Recover and refining of precious metals, Van Nostrand Reinhold, 1984.

8. http://www.kingston.com/thailand/company/rohs_weee.asp

9. http://www.recycle.mcmail.com/electron.htm, May 2004

10. http://www.adslthailand.com/forum/viewtopic.php?t=75490

11. http://www.bloggang.com/viewblog.php?id=diy&date=04-01-2008&group=9&gblog=15

ภาคผนวก

1. ประเภทโรงงานคัดแยก และรีไซเคิลของเสียต่าง ๆ

ข้อมูลของกระทรวงอุตสาหกรรม พบว่า ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละปีมีมากถึง 12 ล้านตัน แบ่งเป็นกากของเสียอันตราย 1,400,000 ตัน และประเภทไม่อันตรายอีกจำนวน 10,600,000 ตัน ดังนั้น เพื่อให้การบริหารจัดการของเสียและกากอุตสาหกรรมได้ประสิทธิภาพ และสามารถนำกลับเข้าสู่ระบบได้ กระทรวงอุตสาหกรรม จึงกำหนดให้ทุกโรงงานอุตสาหกรรม ต้องจัดการกับกากอุตสาหกรรมและของเสียโดยผ่านบริษัทเอกชนหรือโรงงานที่ดำเนินการจัดการกับของเสียและกากอุตสาหกรรมที่ได้รับอนุญาตจากกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งปัจจุบันมีประมาณ 70-80 ราย โดยมีผลบังคับใช้ ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม 2547 ซึ่งบริษัทเอกชนหรือโรงงานดังกล่าว แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ได้แก่

1. โรงงานประเภท 101 ได้แก่ โรงงานปรับคุณภาพของเสียรวม (Central Waste Treatment Plant)

2. โรงงานประเภท 105 ได้แก่ โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการคัดแยกหรือฝังกลบ สิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะและคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้ใน กฎกระทรวง ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535

3. โรงงานประเภท 106 ได้แก่ โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการนำผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมที่ไม่ใช้แล้วหรือของเสียจากโรงงานมาผลิตเป็นวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ใหม่โดยผ่านกรรมวิธีการผลิตทางอุตสาหกรรม ซึ่งขั้นตอนและกระบวนการขออนุญาตจัดตั้งโรงงานดังกล่าว ให้เป็นไปตามบัญชีท้ายกฎกระทรวง (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ทั้งนี้ สามารถสืบค้นข้อมูลเพิ่มเติมได้จาก

http://www.diw.go.th/editwebdesign/html/versionthai/laws/notific_of_min.asp

2. มาตรการ WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment)
ระเบียบว่าด้วยการจัดการซากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ข้อกำหนด WEEE เป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับเศษเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งบังคับใช้กับบริษัทที่ผลิตขาย และจัดจำหน่ายอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในสหภาพยุโรป โดยครอบคลุมเครื่องใช้ขนาดใหญ่และขนาดเล็กภายในบ้าน อุปกรณ์ไอที วิทยุและเครื่องเสียง เครื่องมือไฟฟ้า อุปกรณ์สื่อสาร ของเล่นระบบไฟฟ้า และอื่นๆ อีกเป็น จำนวนมาก โดยข้อกำหนดนี้มีเป้าหมายเพื่อลดเศษวัสดุที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และปรับปรุงสภาพแวดล้อมของทุกสิ่งที่เกี่ยวข้องกับวงจรชีวิตของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ข้อกำหนดดังกล่าวนี้ ได้แก่

1. ผู้ผลิตและผู้นำเข้าอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ จะต้องจดทะเบียนในประเทศของตน

2. ผู้ใช้ในครัวเรือนสามารถส่งเศษทิ้งของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (WEEE) ให้ศูนย์รวบรวมได้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย และผู้ผลิตมีหน้าที่รับผิดชอบในการสนับสนุนเงินให้แก่ศูนย์เหล่านี้

3. ผู้ผลิตจะต้องนำวัสดุไปรีไซเคิล และนำกลับมาใช้ใหม่ ตามเป้าหมายที่กำหนด

4. ผู้ผลิตจะต้องทำเครื่องหมาย “รูปถังขยะมีล้อมีกากบาททับ” ไว้บนผลิตภัณฑ์ สัญลักษณ์นี้แสดงว่า อุปกรณ์ที่มีเครื่องหมายนี้ไม่สามารถทิ้งร่วมกับขยะทั่วไปได้ แต่ควรแยกเก็บต่างหาก และนำไปดำเนินการตามระเบียบในท้องถิ่นให้ถูกต้องเหมาะสม

หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่ง ได้แก่

1. ผู้ผลิตเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายของการดำเนินการจัดการกับเศษซากเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์ที่ตนเป็นผู้ผลิต หรือนำเข้าสินค้า

2. ผู้ผลิตเป็นผู้รับผิดชอบดำเนินการเก็บรวบรวมเศษซากเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์ด้วยการรับคืน หรือแลกเปลี่ยนกับผู้ซื้อ (ผู้บริโภค) ในรูปแบบของการจัดตั้งจุดรวบรวม (Collecting points) และนำเศษซากดังกล่าวมาทำการคัดแยก (Separate collection) ประเภทตามชนิดของวัตถุดิบ

3. ผู้ผลิตจะต้องสร้างระบบการจัดการกับเศษซากเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์ด้วยแนวทาง และวิธีการที่เหมาะสม โดยการ Recovery หรือ Recycle หรือ Reuse

4. ผู้ผลิตเป็นผู้รับผิดชอบดำเนินการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต เทคโนโลยี ตลอดจนปรับปรุงวัตถุดิบผลิตภัณฑ์ โดยเลือกใช้วัสดุที่สามารถรีไซเคิลได้ รวมถึงการออกแบบให้ชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์สามารถถอดประกอบได้โดยง่าย เพื่อความสะดวกในการคัดแยก ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล นอกจากนี้ ผู้ผลิตควรได้แจ้งในฉลากกำกับผลิตภัณฑ์ให้ผู้บริโภคได้ตระหนักถึงบทบาท และหน้าที่ที่สำคัญของผู้บริโภคในการดำเนินการจัดการเศษซากเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว

3. มาตรการ RoHS (Restriction of Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment)
ระเบียบว่าด้วยการจำกัดการใช้สารต้องห้ามบางชนิดในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ข้อกำหนด ROHS เป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับการจำกัดการใช้สารอันตรายในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ โดยได้ผ่านมติของสหภาพยุโรป (E.U.) เพื่อกำหนดเป็นกฎหมาย ซึ่งมีผลกระทบต่อผู้ผลิต ผู้ขาย ผู้จัดจำหน่าย และผู้รีไซเคิลผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสารตะกั่ว แคดเมียม ปรอท โครเมี่ยมเฮกซาวาเลนท์ โพลีโบรมิเนทเต็ดไบฟีนิล (PBB) และโพลีโบรมิเนทเต็ดไดฟีนิลอีเทอร์ (PBDE) ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2549 เป็นต้นมา สารเหล่านี้ถูกจำกัดการใช้อย่างมาก ในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ที่จำหน่ายในยุโรป

กล่าวได้ว่า ROHS ห้ามใช้สารโลหะหนักที่เป็นอันตรายบางประเภทในเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อลดปริมาณสารอันตรายในของเสีย จึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่าหากมีการนำสารทดแทนที่ไม่เป็นอันตรายมาใช้ในการผลิต และเน้นการจำกัดการใช้สารอันตรายที่ต้นเหตุ
โดยให้ผู้ผลิตใช้สารอื่นทดแทนสารตะกั่ว ปรอท แคดเมียม โครเมียม (+6) โพลิโบรมิเนทไบฟินิล (PBB) และโพลิโบรมิเนทไดฟินิลอีเทอร์ (PBDE) ในเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ภายในวันที่ 1 กรกฎาคม 2549 โดยครอบคลุมผลิตภัณฑ์เดียวกับ WEEE ยกเว้น ผลิตภัณฑ์ประเภท เครื่องมือทางการแพทย์ และผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่สามารถหาสารทดแทนได้ในปัจจุบัน

ตารางที่ 1 สารพิษที่เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ชนิด	การนำไปใช้ประโยชน์ (เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ต่าง ๆ)	ความเป็นพิษ
ตะกั่ว	- แผ่นวงจรควบคุม และวงจรไฟฟ้า - หลอดภาพรังสีแคโทดในรูปของตะกั่วออกไซด์ มีปริมาณ 3-8 ปอนด์/จอภาพ - ลวดเชื่อมในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และส่วนประกอบอื่นๆ	ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อไต ทำลายระบบประสาทส่วนกลาง และสมอง ตลอดจนระบบเลือด และระบบสืบพันธุ์ในมนุษย์
แบเรียม	- สารป้องกันอันตรายจากรังสีในจอภาพ	การสัมผัสทำให้ระคายเคืองต่อผิวหนัง และดวงตา เกิดอาการคลื่นเหียน อาเจียน ปวดศีรษะ วิงเวียนหน้ามืด กล้ามเนื้ออ่อนแรง ทำลายระบบหัวใจ ตับ และม้าม
โครเมียม +6	- สารป้องกันการกัดกร่อน และเสริมความแข็งแรงให้กับอุปกรณ์	การสัมผัสทำให้ระคายเคืองต่อดวงตา และผิวหนัง ฝุ่นผง ทำให้ระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อ การหายใจทำให้เป็นอันตรายต่อระบบหายใจ และปอด นอกจากนี้ ยังส่งผลต่อระบบพันธุกรรม
ฟอสฟอรัส		เป็นพิษอย่างแรงต่อร่างกายในรูปของไอระเหย ทำให้ระคายเคืองต่อระบบหายใจ การสัมผัสทำให้ผิวหนัง และดวงตา เกิดอาการระคายเคืองและเป็นแผลไหม้
เบริลเลียม	- เป็นส่วนผสมสำหรับตัวนำไฟฟ้า และความร้อน	เป็นพิษมากเมื่อสูดเข้าสู่ร่างกายในรูปของไอ ควัน ฝุ่น
ปรอท	- สวิทซ์ - จอภาพ (Flat screen monitors) - ตัวควบคุมความร้อน - ระบบควบคุม/ตรวจจับสัญญาณ - แบตเตอรี่	เป็นอันตรายหากสูดดมไอพิษซึ่งระเหยเมื่อโดนความร้อน การหายใจไอระเหยเข้าไปทำให้ไอกระแอม แน่นหน้าอกและอาเจียน ผลกระทบเรื้อรัง จะทำลายตับ ไต ระบบประสาทส่วนกลาง และสมอง
แคดเมียม	- แบตเตอรี่คอมพิวเตอร์ - ตัวต้านทานกระแส (SMD chip) - ตัวนำกระแส - หลอดภาพรังสีแคโทด (รุ่นเก่า)	เป็นอันตรายต่อไต

ตารางที่ 1 สารพิษที่เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (ต่อ)

ชนิด	การนำไปใช้ประโยชน์ (เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ต่าง ๆ)	ความเป็นพิษ
พลาสติกประเภท PVC (Polyvinyl chloride)	ฉนวนกันไฟในสายส่งสัญญาณ	เป็นพิษจากสารไดออกซิน และฟูแรนส์ เมื่อเผาไหม้รวมกับทองแดงที่อยู่ในสายไฟ ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ผิวหนัง และดวงตา
PCBs (Polychlorinated biphenyls)	- ตัวเก็บประจุ (รุ่นเก่า) - ตัวแปลงกระแสไฟฟ้า (รุ่นเก่า)	ทำลายตับ และอาจก่อให้เกิดการระคายเคืองผิวหนัง นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดมะเร็งในตับและทางเดินอาหาร
PBDE (Polybrominated diphenyl ether)	- สารป้องกันการไหม้ไฟในอุปกรณ์คอมพิวเตอร์	พิษจะสะสมในร่างกาย ส่งผลทำลายระบบประสาท และระบบสืบพันธุ์
โบรมีน (Brominated flame retardants)	- แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ - พลาสติก (plastic casings) - สายส่งสัญญาณ	ไอระเหยอาจจะทำให้ผิวหนัง ดวงตา จมูก และคอ ระคายเคือง การสูดดมไอระเหยเข้าไปทำให้เกิดอาการคลื่นเหียน อาเจียน ปวดศีรษะ หรือสูญเสียการทรงตัว

ที่มา : - Karl Shoenberger San Jose Mercury News, 2002

- EMERGENCY RESPONSE PROCEDURE DATABASE, 2003

- Exporting Harm, 2002

ตารางที่ 2 เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และเป้าหมายการนำกลับมาใช้ใหม่ (WEEE)

ชนิด	% Recovery ขั้นต่ำ สำหรับสินค้า	% Reuse/Recycle ขั้นต่ำ สำหรับส่วนประกอบของสินค้า
เครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่	80	75
เครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก	70	50
เครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์สื่อสาร	75	65
เครื่องใช้ในครัวเรือน	75	65
อุปกรณ์ให้แสงสว่าง	70	50
เครื่องมือไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	70	50
เครื่องเล่นและอุปกรณ์กีฬา	70	50
เครื่องมือติดตามและควบคุม	70	50
เครื่องจำหน่ายอัตโนมัติ	80	75

ที่มา : กฎระเบียบสหภาพยุโรปเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 3 คำสั่งที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดเศษทิ้ง สิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

ชนิด	รายละเอียด
1. กฎกระทรวง ฉ.2 (พ.ศ.2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติรงงาน พ.ศ. 2535 หมวด 4 ข้อ 13	- การกำจัดเศษทิ้ง สิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว
2. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉ.6 (พ.ศ.2540)	- การกำจัดสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว - กำหนดหน้าที่ของผู้ประกอบการในการจัดการของเสียจากกระบวนการผลิต ที่เป็นสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และเป็นของเสียอันตราย
3. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉ.1 (พ.ศ.2541)	- การกำจัดสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว - กำหนดหน้าที่ของผู้ประกอบการในการจัดการของเสียจากกระบวนการผลิต ที่เป็นสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และเป็นของเสียอันตราย
4. ประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ที่ 29/2541	- การกำจัดสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว - กำหนดแนวทางการกำกับดูแล การกำจัดสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในนิคมฯ ซึ่งต้องได้รับอนุญาตจากผู้ว่าการ หรือผู้ซึ่งผู้ว่าการมอบหมาย
5. ประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ที่ 47/2541	- การกำจัดสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว - กำหนดจัดกลุ่มสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในนิคมฯ เพื่อการกำกับดูแล กำหนดการแยก การจัดเก็บ การตรวจพิสูจน์ชนิดหรือประเภทเศษทิ้ง การขออนุญาตกำจัดเศษทิ้ง หรือนำเศษทิ้งออกนอกบริเวณโรงงาน - กำหนดให้มีใบกำกับการขนส่งในการนำเศษทิ้งออกนอกบริเวณโรงงาน
6. ประกาศการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ที่ 41/2542	- การกำจัดสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (แก้ไขเพิ่มเติม) - กำหนดให้จัดทำบันทึกสาระสำคัญประเภทและปริมาณของเศษทิ้งตามแบบใบกำกับการขนส่ง - กำหนดหรือเห็นชอบให้เก็บรักษาใบกำกับการขนส่งไว้ ณ ที่ตั้งโรงงานให้พร้อมสำหรับการตรวจสอบของเจ้าหน้าที่ และให้จัดส่งรายงานผลการกำจัดสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วให้การนิคมฯ ภายในวันที่ 7 เดือนถัดไป
7. ประกาศกรมเจ้าท่า ที่ 353/2529	- การกำหนดชั้นของสิ่งของที่อาจทำให้เกิดอันตรายเพื่อควบคุมการขนส่งวัตถุอันตรายทางน้ำ
8. ระเบียบกรมเจ้าท่า	- การอนุญาตให้ขนถ่ายสิ่งของที่อาจทำให้เกิดอันตรายได้ พ.ศ. 2535

ที่มา : จิรพัฒน์ โพธิ์พ่วง; กฎหมายเกี่ยวกับเศษทิ้งของเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศ, 2547

ตารางที่ 4 ปริมาณสารอันตรายที่ได้รับยกเว้นให้มีในเครื่องใช้ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์

สาร	การนำไปใช้ประโยชน์	ปริมาณ
ปรอท	ใน compact fluorescent lamps	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัม/หลอด
ปรอท	หลอดฟลูออเรสเซนต์ - ใช้ Halophosphate - ใช้ Triphosphate (ช่วงชีวิตปกติ) - ใช้ Triphosphate (ช่วงชีวิตยาว)	 ไม่เกิน 10 มิลลิกรัม/หลอด ไม่เกิน 5 มิลลิกรัม/หลอด ไม่เกิน 8 มิลลิกรัม/หลอด
ตะกั่ว (ใช้เป็นส่วนผสม)	เคลือบหลอดภาพ ในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ในหลอดฟลูออเรสเซนต์	
ตะกั่ว (ใช้เป็นส่วนผสม)	ในโลหะอัลลอย อัลลอยของตะกั่ว-เหล็ก อัลลอยของตะกั่ว-อะลูมิเนียม อัลลอยของตะกั่ว-ทองแดง	 ไม่เกิน 0.35% โดยน้ำหนัก ไม่เกิน 0.4% โดยน้ำหนัก ไม่เกิน 4% โดยน้ำหนัก
ตะกั่ว	สารบัดกรีชนิดจุดหลอมเหลวสูง	
แคดเมียม	สารเคลือบผิวหน้าป้องกันการกัดกร่อน	
โครเมียม (+6)	สารป้องกันการกัดกร่อน	

ที่มา : กฎระเบียบสหภาพยุโรปเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์.
สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, 2547

ตารางที่ 5 กรอบเวลาการดำเนินงานระยะเวลา การดำเนินงาน ตามกฎระเบียบสหภาพยุโรป

ระยะเวลา	การดำเนินงาน
13 สิงหาคม 2547	ประเทศสมาชิกออกกฎหมายของตน
ก่อน 13 สิงหาคม 2548	คณะกรรมาธิการฯ ทบทวนมาตรการต่างๆ
13 สิงหาคม 2548	ประเทศสมาชิกดำเนินมาตรการแยกเศษเหลือทิ้ง
สินค้าที่วางตลาดตั้งแต่ 13 สิงหาคม 2548 เป็นต้นไป เป็นสินค้าใหม่	
สินค้าที่วางตลาด และจำหน่ายก่อน 13 สิงหาคม 2548 เป็น Historial waste	
1 กรกฎาคม 2549 เป็นต้นไป	ประเทศสมาชิกออกกฎหมายห้ามใช้สารอันตราย 6 ประเภท
ภายใน 31 ธันวาคม 2549	- รวบรวมเศษทิ้ง 4 กิโลกัรม/คน/ปี - ดำเนินการตามเป้าหมาย recovery
ภายใน 31 ธันวาคม 2551	- กำหนดเป้าหมาย recovery ใหม่ - กำหนดเป้าหมายการรวบรวมเศษเหลือทิ้งใหม่
ภายในปี 2553	มีตะกั่วในสารบัดกรี servers, storage, and storage array systems

ที่มา : กฎระเบียบสหภาพยุโรปเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์.
สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, 2547

การศึกษาและสำรวจข้อมูลการจัดการเศษทิ้งหรือของเสียอิเล็กทรอนิกส์ จังหวัดพิษณุโลก

โดยได้รับความร่วมมือจาก ดร.สมไทย วงษ์เจริญ ประธานกรรมการ บริษัท โรงงานคัดแยกขยะเพื่อรีไซเคิล วงษ์พาณิชย์ จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานรีไซเคิลขยะที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย และปัจจุบันมีสาขาทั่วประเทศไทย

การคัดแยกชิ้นส่วนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น โทรศัพท์ โทรทัศน์ ตู้เย็น และคอมพิวเตอร์

การคัดแยกชิ้นส่วนและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
ประเทศญี่ปุ่น