

การวิเคราะห์ผังการไหลและการประเมินวัฏจักรชีวิตของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจร
อิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment of Gold from Spent Computer
Printed Circuit Boards Recycle Process



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ผังการไหลและการประเมินวัฏจักรชีวิตของ ทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ของคอมพิวเตอร์
โดย	น.ส.วริษฐา พงษ์หิรัญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.อรรถัย ขวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอมมา อาสนจินดา)

วริษฐา พงษ์หิรัญ : การวิเคราะห์ผังการไหลและการประเมินวัฏจักรชีวิตของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์. (Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment of Gold from Spent Computer Printed Circuit Boards Recycle Process) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.สุธา ขาวเจียร

ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2558-2561 สามารถจำแนกตามแหล่งกำเนิดได้แก่ ครั้วเรือน สำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ อุตสาหกรรมและการนำเข้าและส่งออก โดยพบว่าปริมาณมากกว่าร้อยละ 68 ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งยังไม่มีมาตรการควบคุมกระบวนการหรือผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอย่างชัดเจน งานวิจัยนี้จึงศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงได้แก่ หน่วยความจำ ซีพียูและส่วนประกอบของการ์ดแสดงผล ที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายทองคำโดยมีและไม่มีการจัดการของเสีย และเลือกกระบวนการที่ใช้สารประกอบโซเดียมไนต์เป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสียอย่างเหมาะสมเป็นกรณีอ้างอิง กระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายสามารถนำกลับคืนทองคำได้เฉลี่ยร้อยละ 95.25 ที่ความบริสุทธิ์ของทองคำแตกต่างกันตามองค์ประกอบของสารชะละลายแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิด โดยปริมาณสารเคมีที่ใช้และทองคำที่นำกลับคืนจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองและสารประกอบโซเดียมไนต์จะถูกวิเคราะห์ในผังการไหลและประเมินผลกระทบด้วยโปรแกรม SimaPro เวอร์ชัน 9.0.0.35 ตามลำดับ ซึ่งงานวิจัยพบว่า แนวทางในการลดผลกระทบของกระบวนการคือ การแยกโลหะชนิดอื่นๆออกจากรั่วไหลเพื่อเข้าสู่กระบวนการนำกลับคืนและบำบัดน้ำเสียส่วนที่เหลือ ส่วนตะกอนสามารถกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบหรือการเผาทำลายในเตาเผาเฉพาะของเสียอันตรายตามความเหมาะสม ทั้งนี้ กระบวนการที่ใช้กรดกัดทองจะสามารถให้ผลกระทบต่ำกว่ากระบวนการที่ใช้สารประกอบโซเดียมไนต์ที่มีการจัดการของเสียอย่างเหมาะสม เมื่อมีการลดการใช้สารเคมีด้วยการชะละลายซ้ำตั้งแต่ 3 ครั้งขึ้นไป

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร ที่กรุณาให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัย อีกทั้งยังให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการทำงานวิจัย ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล ศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอมมา อาสนจินดา ที่กรุณาสละเวลาเพื่อเป็นประธานกรรมการและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ โดยให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางที่ช่วยทำให้วิทยานิพนธ์สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ บุคคลากรภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรู้และคำปรึกษา และขอขอบพระคุณ คุณสุรชัย ลีวัฒนานุกุล คุณกรรณิการ์ ความสวัสดิ์ คุณปราโมทย์ ภูพานทอง บริษัท ไฮโดรแอนด์ไฟโรเมท จำกัด และบริษัท นีคอินเตอร์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือด้านคำแนะนำและข้อมูลอันเป็นประโยชน์ตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนงานวิจัยจาก โครงการการวิจัยเพื่อศึกษาวิเคราะห์ผังการไหลและจัดทำระบบฐานข้อมูลการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์และของเสียอันตรายชุมชนในประเทศไทย โดยสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และโปรแกรมวิจัย (Research Program) ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ผู้สนับสนุนทางการศึกษา ให้คำปรึกษาและกำลังใจจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยช่วยเหลือระหว่างการเรียนรู้และการจัดทำวิทยานิพนธ์

วริษฐา พงษ์หิรัญ

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ทงคำ.....	7
2.1.1 ข้อมูลทั่วไป.....	7
2.1.2 แหล่งแร่ทองคำ.....	7
2.2 แผนวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	8
2.2.1 ข้อมูลทั่วไป.....	8
2.2.2 กระบวนการผลิต.....	9

2.2.3 ประเภทของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และการนำไปใช้งาน.....	10
2.2.4 องค์ประกอบในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	10
2.2.5 สถานการณ์ของอุตสาหกรรมการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	13
2.3 คอมพิวเตอร์	14
2.3.1 ข้อมูลทั่วไป.....	14
2.3.2 สัดส่วนโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในคอมพิวเตอร์	15
2.4 สถานการณ์ขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย	15
2.5 การจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์	16
2.5.1 กระบวนการจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกต้อง.....	16
2.5.2 ผลกระทบที่เกิดจากการคัดแยกและรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	17
2.6 ข้อกำหนดของการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว	18
2.6.1 นิยามที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.6.2 การกำหนดรหัสและประเภทของเสีย	19
2.6.3 รหัสของเสียและประเภทของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เกี่ยวข้องกับซากคอมพิวเตอร์และซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	20
2.6.4 วิธีการในการจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว	21
2.6.5 ประเภทของผู้รับดำเนินการ.....	22
2.7 การวิเคราะห์ผังการไหลของวัสดุ (Material flow analysis; MFA).....	22
2.7.1 ความหมายของการวิเคราะห์ผังการไหล	22
2.7.2 ความหมายของสัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผังการไหล	23
2.7.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผังการไหล.....	26
2.7.4 การประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ผังการไหล	27
2.7.5 การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ผังการไหล	32
2.8 การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life cycle assessment; LCA).....	32

2.8.1 ความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิต	32
2.8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบมาตรฐาน ISO 14000 กับการประเมินวัฏจักรชีวิต	33
2.8.3 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต.....	34
2.8.4 การประยุกต์ใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต	38
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินซากอิเล็กทรอนิกส์ในครัวเรือน.....	40
2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนำกลับคืนโลหะพื้นฐานและโลหะมีค่าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และของเสียจากอุตสาหกรรม	43
2.9.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปรียบเทียบสารชะละลายทองคำ	53
2.9.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผังการไหล	58
2.9.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิต	65
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย	71
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	71
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	73
3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	73
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	74
3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	74
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	75
3.3.1 รวบรวมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลในระดับผลิตภัณฑ์และระดับองค์ประกอบ	75
3.3.2 ศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลาย 76	
3.3.3 ศึกษาและจัดทำผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำ	79

3.3.4	ศึกษาและประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ กรดกัดทองและไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำ	80
3.3.5	เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม.....	81
บทที่ 4	ผลการศึกษาและผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	82
4.1	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์	82
4.1.1	สัดส่วนโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อน้ำหนักของคอมพิวเตอร์	82
4.1.2	สัดส่วนโดยน้ำหนักของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะและพกพา	83
4.1.3	ปริมาณคาดการณ์ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของ คอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นจากครัวเรือนและสำนักงานและโรงแรม/อพาร์ท เมนต์.....	84
4.1.4	ปริมาณคาดการณ์ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของ คอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นจากภาคอุตสาหกรรม	86
4.1.5	ปริมาณคาดการณ์ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของ คอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นจากการนำเข้าและส่งออก.....	91
4.1.6	ปริมาณคาดการณ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและ การ์ด แสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในประเทศไทย	93
4.2	ผลการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์.....	94
4.2.1	ผลการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2558.....	94
4.2.2	ผลการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2559.....	96
4.2.3	ผลการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2560.....	98
4.2.4	ผลการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2561.....	100
4.2.5	ภาพรวมผลการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์.....	102
4.3	ผลการศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิล ซาก แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย.....	104
4.3.1	ผลการศึกษาผลของปริมาณกรดกัดทอง อุณหภูมิ และระยะเวลาต่อปริมาณทองคำที่ ชะละลายได้	105

4.3.2	ผลการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณทองคำในขั้นตอนการปรับสภาพและชะละลาย	111
4.3.3	ผลการศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากการตกตะกอนด้วยโซเดียมเมตาซัลไฟต์ในสารละลายกรดกัดทอง	115
4.3.4	ผลการศึกษาปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทอง.....	117
4.3.5	ผลการศึกษาปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงด้วยกรดกัดทอง.....	119
4.4	ผลการศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สารประกอบโซเดียมไนต์เป็นสารชะละลาย	120
4.4.1	ผลการศึกษาปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารประกอบโซเดียมไนต์	120
4.4.2	ผลการศึกษาปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงด้วยสารประกอบโซเดียมไนต์	122
4.5	ผลการวิเคราะห์ผังการไหลระดับองค์ประกอบ	123
4.5.1	ผลการวิเคราะห์ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักรากซาก	123
4.5.2	ผลการวิเคราะห์ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักรากซาก	124
4.5.3	ผลการวิเคราะห์ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารประกอบโซเดียมไนต์ที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักรากซาก	126
4.5.4	ผลการวิเคราะห์ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารประกอบโซเดียมไนต์ที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักรากซาก	127
4.6	บัญชีรายการมวลสารของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบโซเดียมไนต์เป็นสารชะละลายทองคำ	129
4.6.1	บัญชีรายการมวลสารของกระบวนการรีไซเคิลที่ไม่มีจัดการของเสีย	130
4.6.2	บัญชีรายการมวลสารของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการของเสีย	132

4.7 ผลการศึกษาและประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ กรดกัดทองและสารประกอบโซลยาไนต์เป็นสารชะละลายทองคำโดยไม่มีการจัดการของเสีย	134
4.7.1 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลโดยไม่มีการจัดการของเสีย.....	134
4.7.2 ผลวิเคราะห์การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลโดยไม่มีการจัดการของเสีย	136
4.8 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบโซลยาไนต์เป็นสารชะละลายทองคำ.....	138
4.8.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการของเสีย..	139
4.8.2 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการ ของเสีย และลดการใช้สารเคมี.....	142
4.8.3 ภาพรวมการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองและสารประกอบโซลยาไนต์	146
4.9 ผลการเปรียบเทียบต้นทุนของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ กรดกัด ทองและสารประกอบโซลยาไนต์เป็นสารชะละลายทองคำ.....	149
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	151
5.1 การศึกษาปริมาณของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นใน ประเทศไทย.....	151
5.2 การวิเคราะห์ผังการไหลในระดับผลิตภัณฑ์	151
5.3 การศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการ รีไซเคิลซาก แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย	152
5.4 การศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการ รีไซเคิลซาก แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ที่ใช้สารประกอบโซลยาไนต์เป็นสารชะละลาย	153
5.5 การวิเคราะห์ผังการไหลในระดับองค์ประกอบ.....	153
5.6 การศึกษาและประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ กรดกัดทองและสารประกอบโซลยาไนต์เป็นสารชะละลาย	154

5.7 การเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายเมื่อมีการจัดการที่เหมาะสม .	154
5.8 การเปรียบเทียบต้นทุนของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ กรดกัดทอง และสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลาย	155
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ	156
6.1 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม	156
6.2 ข้อเสนอแนะในการประยุกต์ใช้เชิงวิศวกรรม	157
ภาคผนวก.....	158
ภาคผนวก ก ภาพการทดลองศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำ ที่ใช้กรดกัด ทองเป็นสารชะละลาย	159
ภาคผนวก ข ผลของปริมาณกรดกัดทอง อุณหภูมิ และระยะเวลาในการชะละลาย ต่อปริมาณ ทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้	162
ภาคผนวก ค ค่าความไม่แน่นอนของแหล่งข้อมูลและข้อมูลเพิ่มเติม สำหรับการวิเคราะห์ผังการ ไหลในระดับผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบ	176
ภาคผนวก ง ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตและการเปรียบเทียบผลกระทบ ของกระบวนการรีไซเคิล ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์	179
บรรณานุกรม.....	190
ประวัติผู้เขียน.....	199

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 สัดส่วนของธาตุในแหล่งแร่และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	11
ตารางที่ 2-2 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	12
ตารางที่ 2-3 สัดส่วนโดยน้ำหนักของทองคำในส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	13
ตารางที่ 2-4 สัดส่วนโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในคอมพิวเตอร์และสัดส่วนทองคำในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	15
ตารางที่ 2-5 รหัสของเสียและประเภทของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เกี่ยวข้องกับซากคอมพิวเตอร์และซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	21
ตารางที่ 2-6 ความหมายของตัวชี้วัดคุณภาพข้อมูลและเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินเชิงคุณภาพ.....	28
ตารางที่ 2-7 ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Coefficients of variation; CV).....	30
ตารางที่ 2-8 ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันสำหรับข้อมูลที่ได้รับการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ.....	31
ตารางที่ 2-9 คำจำกัดความย่อของการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) ในระบบมาตรฐาน ISO 14000	33
ตารางที่ 2-10 รูปแบบของการประยุกต์ใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต.....	39
ตารางที่ 2-11 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการรีไซเคิลโลหะพื้นฐานและโลหะมีค่าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และของเสียจากอุตสาหกรรม.....	47
ตารางที่ 2-12 ลักษณะการใช้งาน ข้อดีและข้อจำกัดของสารชะละลายทองคำชนิดต่างๆ.....	57
ตารางที่ 2-13 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผงการไหล.....	62
ตารางที่ 2-14 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิต.....	68
ตารางที่ 4-1 สัดส่วนโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อน้ำหนักของคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ.....	82
ตารางที่ 4-2 สัดส่วนโดยน้ำหนักของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะและพกพา.....	83
ตารางที่ 4-3 ปริมาณคาดการณ์ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นจากครัวเรือน สำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์.....	84
ตารางที่ 4-4 ปริมาณซากคอมพิวเตอร์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรม.....	86

ตารางที่ 4-5 ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรม	88
ตารางที่ 4-6 ปริมาณคาดการณ์ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรม.....	90
ตารางที่ 4-7 ปริมาณซากคอมพิวเตอร์แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการนำเข้าและส่งออก.....	91
ตารางที่ 4-8 ปริมาณคาดการณ์ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นจากการนำเข้าและส่งออก	92
ตารางที่ 4-9 ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในประเทศไทย	93
ตารางที่ 4-10 ภาพรวมของผังการไหลของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ	103
ตารางที่ 4-11 ปริมาณของโลหะที่ชะละลายได้เมื่อชะละลายด้วยกรดกัดทองในปริมาณที่แตกต่างกัน	105
ตารางที่ 4-12 ปริมาณของโลหะที่ชะละลายได้เมื่อชะละลายที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	107
ตารางที่ 4-13 ปริมาณของโลหะที่ชะละลายได้เมื่อชะละลายในเวลาที่แตกต่างกัน	109
ตารางที่ 4-14 ปริมาณของโลหะที่ชะละลายในขั้นตอนการปรับสภาพด้วยกรดไนตริกและการชะละลายด้วยกรดกัดทอง	112
ตารางที่ 4-15 ปริมาณโลหะในสารละลายกรดกัดทองก่อนและหลังตกตะกอนด้วยโซเดียมเมตา-ไบซัลไฟต์	115
ตารางที่ 4-16 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เมื่อใช้ กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย	117
ตารางที่ 4-17 ปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงด้วยกรดกัดทอง	119
ตารางที่ 4-18 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เมื่อใช้สารประกอบโซเดียมไนด์เป็นสารชะละลาย	120
ตารางที่ 4-19 ปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงด้วยสารประกอบโซเดียมไนด์	122

ตารางที่ 4-20	บัญชีรายการมวลสารของกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายโดยไม่มี การจัดการของเสียต่อหน่วยการทำงาน 1 กิโลกรัมของทองคำที่นำกลับคืนได้	130
ตารางที่ 4-21	บัญชีรายการมวลสารของกระบวนการที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลาย โดยไม่มีการจัดการของเสียต่อหน่วยการทำงาน 1 กิโลกรัมของทองคำที่นำกลับคืนได้.....	131
ตารางที่ 4-22	บัญชีรายการมวลสารของกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายโดย มีการจัดการของเสียต่อหน่วยการทำงาน 1 กิโลกรัมของทองคำที่นำกลับคืนได้	132
ตารางที่ 4-23	บัญชีรายการมวลสารของกระบวนการที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลาย โดยมีการจัดการของเสียต่อหน่วยการทำงาน 1 กิโลกรัมของทองคำที่นำกลับคืนได้.....	133
ตารางที่ 4-24	กรณีศึกษาผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำโดยไม่มีการจัดการของเสีย	134
ตารางที่ 4-25	กรณีศึกษาผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำโดยมีการจัดการของเสีย	138
ตารางที่ 4-26	กรณีศึกษาผลกระทบของกระบวนการการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ กรดกัดทองและไซยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสียและลดการใช้สารเคมีที่เกิดขึ้น	142
ตารางที่ 4-27	ผลกระทบที่ลดลงของกระบวนการต่อ 1 กิโลกรัมของทองคำที่นำกลับคืนได้.....	146
ตารางที่ 4-28	ผลกระทบที่ลดลงของกระบวนการต่อ 1 กิโลกรัมของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	147
ตารางที่ 4-29	ผลกระทบที่ลดลงสูงสุดเมื่อกระบวนการมีการจัดการของเสียที่เหมาะสม	148
ตารางที่ 4-30	รายการต้นทุนการใช้สารเคมีและไฟฟ้าของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลาย.....	149
ตารางที่ 4-31	ต้นทุนการใช้สารเคมีและไฟฟ้าของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายต่อทองคำที่นำกลับคืนได้ 1 กิโลกรัม..	150
ตารางที่ ข.1.1	ผลของปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้ จากหน่วยความจำ (RAM)	163
ตารางที่ ข.1.2	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความ แตกต่างของปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จาก หน่วยความจำ (RAM)	164

ตารางที่ ข.1.3 ผลความแตกต่างระหว่างปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณโลหะที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM).....	164
ตารางที่ ข.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM).....	167
ตารางที่ ข.2.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM).....	168
ตารางที่ ข.2.3 ผลความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิต่อปริมาณโลหะที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM).....	168
ตารางที่ ข.3.1 ผลของเวลาต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM).....	171
ตารางที่ ข.3.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของเวลาต่อปริมาณปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM).....	173
ตารางที่ ข.3.3 ผลความแตกต่างระหว่างเวลาต่อปริมาณโลหะที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM).....	173
ตารางที่ ค.1 ความไม่แน่นอนของข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์.....	177
ตารางที่ ค.2 ความไม่แน่นอนของข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลระดับองค์ประกอบของกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย.....	177
ตารางที่ ค.3 ความไม่แน่นอนของข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลระดับองค์ประกอบของกระบวนการที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลาย.....	178
ตารางที่ ค.4 ข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์.....	178
ตารางที่ ง.1.1 ข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการของผลิตภัณฑ์.....	180
ตารางที่ ง.1.2 ข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการของสารขาเข้า.....	180
ตารางที่ ง.1.3 ข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการของน้ำเสีย.....	181
ตารางที่ ง.1.4 ข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการของพลังงานไฟฟ้าและความร้อน.....	181

ตารางที่ ง.1.5 ข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการของการจัดการของเสีย	182
ตารางที่ ง.1.6 ข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการของการจัดการของเสีย	182
ตารางที่ ง.2.1 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของกรณีศึกษาที่ 1 2 3 และ 4 ที่ใช้กรดกัดทองและ สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยไม่มีการจัดการของเสีย	183
ตารางที่ ง.2.2 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตโดยการเทียบหน่วยของกรณีศึกษาที่ 1 2 3 และ 4 ที่ใช้ กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยไม่มีการจัดการของเสีย.....	184
ตารางที่ ง.3.1 ผลการเปรียบเทียบของกรณีศึกษาที่ 1 1.1 1.2 3 3.1 และ 3.2 ที่ใช้กรดกัดทองและ ไซยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสีย	185
ตารางที่ ง.3.2 ผลการเปรียบเทียบโดยการเทียบหน่วยของกรณีศึกษาที่ 1 1.1 1.2 3 3.1 และ 3.2 ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสีย	187
ตารางที่ ง.4.1 ผลการเปรียบเทียบของกรณีศึกษาที่ 1.1 1.1ก 1.1ข 1.1ค และ 3.1 ที่ใช้กรดกัดทอง และสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสียและลดการใช้สารเคมี.....	188
ตารางที่ ง.4.2 ผลการเปรียบเทียบผลกระทบโดยการเทียบหน่วยของกรณีศึกษาที่ 1.1 1.1ก 1.1ข 1.1ค และ 3.1 ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสีย และลดการใช้สารเคมี.....	189

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-1 ส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล	14
ภาพที่ 2-2 สัญลักษณ์ของกระบวนการและกระบวนการย่อย	24
ภาพที่ 2-3 สัญลักษณ์และตัวอย่างของกระบวนการและปริมาณสารสะสม	24
ภาพที่ 2-4 สัญลักษณ์และตัวอย่างของอัตราการไหล (Flow) และฟลักซ์ (Flux)	25
ภาพที่ 2-5 สัญลักษณ์และตัวอย่างของขอบเขตของระบบ (System boundary)	26
ภาพที่ 2-6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผังการไหล	26
ภาพที่ 2-7 กรอบการดำเนินงาน LCA ตามอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040	34
ภาพที่ 2-8 ภาพรวมของผลกระทบที่ประเมินด้วยวิธี ReCiPe 2016	37
ภาพที่ 2-9 ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินความเหมาะสมของสารชะละลายทองคำ	56
ภาพที่ 2-10 ค่าคงที่ของปัจจัยที่ส่งผลถึงความเหมาะสมในการชะละลายทองคำ	56
ภาพที่ 2-11 คะแนนในแต่ละปัจจัยของสารชะละลายทองคำแต่ละชนิด	56
ภาพที่ 2-12 คะแนนสุทธิด้านความเหมาะสมในการชะละลายทองคำของสารชะละลาย	56
ภาพที่ 3-1 แผนการดำเนินงานวิจัย	71
ภาพที่ 3-2 ภาพรวมแผนการดำเนินงานวิจัย	72
ภาพที่ 3-3 การศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำ จากการชะละลายซาก แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทอง	78
ภาพที่ 4-1 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ	82
ภาพที่ 4-2 ผังการไหลของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผล ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นระหว่างปี พ.ศ. 2558	95
ภาพที่ 4-3 ผังการไหลของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผล ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นระหว่างปี พ.ศ. 2559	97

ภาพที่ 4-4	ผังการไหลของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นระหว่างปี พ.ศ. 2560	99
ภาพที่ 4-5	ผังการไหลของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นระหว่างปี พ.ศ. 2561	101
ภาพที่ 4-6	ชนิดของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดลอง	104
ภาพที่ 4-7	ตัวอย่างซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลังผ่านการบดลดขนาด	105
ภาพที่ 4-8	ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทอง ที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักซากหลังบด.....	124
ภาพที่ 4-9	ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทอง ที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักซากหลังบด.....	125
ภาพที่ 4-10	ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยสารประกอบไฮยาไนต์ที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักซากหลังบด.....	126
ภาพที่ 4-11	ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยสารประกอบไฮยาไนต์ที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักซากหลังบด.....	127
ภาพที่ 4-12	ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลโดยไม่มีการจัดการของเสีย	135
ภาพที่ 4-13	ผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการของเสีย	140
ภาพที่ 4-14	ผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการของเสียและลดการใช้สารเคมี	143
ภาพที่ 4-15	ผลกระทบโดยเทียบหน่วย (Normalization) ของกระบวนการรีไซเคิล ที่มีการจัดการของเสียและลดการใช้สารเคมี.....	145
ภาพที่ ก.1	ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหน่วยความจำ ซีพียูและส่วนประกอบของการ์ดแสดงผลที่ใช้ในการทดลอง.....	160
ภาพที่ ก.2	ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลังลดขนาด	160
ภาพที่ ก.3	เครื่องบดลดขนาด NARA YIJU.....	160
ภาพที่ ก.4	การปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไนตริก	160
ภาพที่ ก.5	การชะละลายซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทอง	161
ภาพที่ ก.6	การตกตะกอนด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์	161

ภาพที่ ก.7 ตะกอนของโลหะ 161

ภาพที่ ข.1 ผลของปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM) 166

ภาพที่ ข.2 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM) 170

ภาพที่ ข.3 ผลของเวลาต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM) 175



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ทองคำเป็นธาตุที่มีสมบัติคงทน ยากต่อการเกิดสนิม สามารถขึ้นรูปได้ง่ายตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน และเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นทองคำจะให้ความต้านทานที่ต่ำกว่า จึงทำให้เป็นโลหะที่นิยมเคลือบบนอุปกรณ์ขนาดเล็กที่เป็นส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed circuit board) เพื่อทำหน้าที่เชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Advance circuit, 2018)

จากการศึกษาพบว่า แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์แบบพกพาและแบบตั้งโต๊ะมีทองคำเป็นส่วนประกอบคิดเป็น 250 ppm โดยน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์คิดเป็นร้อยละ 13-15 ของน้ำหนักเครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะและแบบพกพาตามลำดับ ทำให้สามารถประเมินได้ว่าในเครื่องคอมพิวเตอร์จะมีสัดส่วนของทองคำอยู่ในช่วง 32.5-37.5 ppm โดยน้ำหนัก (Chancerel และคณะ, 2009) และเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งแร่ทองคำในธรรมชาติพบว่า แหล่งแร่แบบปฐมภูมิมีสัดส่วนของทองคำน้อยกว่าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ และจะมีศักยภาพเชิงพาณิชย์ก็ต่อเมื่อมีทองคำมากกว่า 3 กรัมในเนื้อดิน 1 ตัน หรือในสัดส่วน 3 ppm โดยน้ำหนักเท่านั้น (กรมทรัพยากรธรณี, 2544) ด้านรายงานสถานการณ์ของเสียอันตรายของประเทศไทยในปี 2559 ระบุว่า ของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นในประเทศไทยมีปริมาณทั้งหมด 606,319 ตัน คิดเป็นซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 393,070 ตัน โดยร้อยละ 15 หรือประมาณ 58,370 ตัน คือซากคอมพิวเตอร์ ซึ่งปริมาณของเครื่องคอมพิวเตอร์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 2.3 ต่อปี ตามความต้องการของการใช้งานที่สูงขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)

เมื่อวิเคราะห์สัดส่วนของทองคำที่เป็นองค์ประกอบภายในและปริมาณของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์จะเห็นได้ชัดว่า ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์นั้นมีความศักยภาพเพียงพอในการรีไซเคิลทองคำกลับคืนมาใช้ประโยชน์ได้อีกครั้งหรือที่เรียกว่า “การทำเหมืองแร่ในเมือง (urban mining)” เพื่อหมุนเวียนทรัพยากรและพัฒนาของเสียเป็นแหล่งทรัพยากรทดแทน (กพร., 2558) อย่างไรก็ตามประเทศไทยได้เผชิญปัญหาเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมรีไซเคิล

โลหะมีค่าอย่างต่อเนื่อง เห็นได้จากการตรวจพบการลักลอบนำเข้าซากอิเล็กทรอนิกส์เพื่อคัดแยกทองคำโดยไม่ได้รับอนุญาต (โพสต์ทูเดย์, 2561) และการชะละลายทองคำที่ไม่เหมาะสม โดยมีการปล่อยน้ำทิ้งจากการชะละลายด้วยกรด (ชมพูนุช พรหมภักดี, 2555) และการทิ้งตะกอนของเสียที่ปนเปื้อนสารไฮเดรียมไซยาไนด์ซึ่งมีความเป็นพิษสูงสู่แหล่งน้ำ (ไทยรัฐออนไลน์, 2557) โดยโลหะมีค่าในซากอิเล็กทรอนิกส์สามารถชะละลายได้ด้วยสารหลายชนิดรวมถึงสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและสารที่มีองค์ประกอบเป็นสารอันตราย ซึ่งหากกระบวนการรับคัดแยกและรีไซเคิลเหล่านั้นมีการจัดการที่ไม่เหมาะสม จะสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงได้ (Zhang และคณะ, 2012)

งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์ผังการไหลและประเมินวัฏจักรชีวิตเพื่อทราบผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ที่ใช้กรดกัดทอง ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้ในการสกัดทองคำให้บริสุทธิ์ (กพร., 2562) โดยเปรียบเทียบกับผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรีไซเคิลที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์ ซึ่งเป็นสารเคมีที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมการทำเหมืองแร่และรีไซเคิลทองคำ โดยมีขอบเขตของการศึกษาแบบ Gate to Gate ครอบคลุมตั้งแต่การรีไซเคิลซากจนถึงการจัดการของเสียที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลาย

1.2.2 เพื่อศึกษาผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำ

1.2.3 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ที่ใช้กรดกัดทองและไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำ

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

หากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำ ไม่มีการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์เป็นอย่างมาก โดยถ้ามีการปรับปรุงการจัดการของเสียด้วยการแยกโลหะอื่นๆ ที่ถูกชะละลายร่วมด้วยเข้าสู่กระบวนการนำกลับคืน พร้อมทั้งบำบัดและจัดการของเสียอย่างเหมาะสมจะสามารถทำให้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลงจากเดิมหรือส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 รวบรวมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลในระดับผลิตภัณฑ์และระดับองค์ประกอบ

1) ข้อมูลปริมาณซากคอมพิวเตอร์และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นในประเทศ

1.1) ข้อมูลที่มีการรายงานต่อสำนักงานสถิติแห่งชาติ ประกอบด้วยจำนวนครัวเรือนในประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2558 - 2561

1.2) ข้อมูลที่มีการรายงานต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรม ประกอบด้วยปริมาณซากคอมพิวเตอร์และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการรายงานตามเอกสารกำกับ การขนส่งของเสียอันตรายระหว่างปี พ.ศ. 2558 - 2561

1.3) ข้อมูลที่มีการรายงานต่อกรมศุลกากร ประกอบด้วยข้อมูลการนำเข้าและส่งออกของซากคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลประเภทตั้งโต๊ะและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่รายงานระหว่างปี พ.ศ. 2558 - 2561

1.4) ข้อมูลจากวารสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยข้อมูลจำนวนคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะและพกพาที่ถือครองครัวเรือน อายุการใช้งานเฉลี่ยของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะและพกพา สัดส่วนการเก็บซากคอมพิวเตอร์ในครัวเรือน สัดส่วนของปริมาณคอมพิวเตอร์ต่อซากอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด ข้อมูลการเกิดขึ้นของซากอิเล็กทรอนิกส์จากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ และข้อมูลการจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ของครัวเรือน สำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์

2) ข้อมูลสัดส่วนโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูง และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการชะละลายทองคำด้วยกรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์

2.1) ข้อมูลจากวารสารและงานวิจัย ประกอบด้วยวิธีการประเมินปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์จากครัวเรือน ชนิดของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีโลหะมีค่าสูง สัดส่วนโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูง กระบวนการนำทองคำกลับคืนจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์ วิธีการวิเคราะห์ฝังการไหลและการประเมินวัฏจักรชีวิต

2.2) ข้อมูลจากการศึกษา ประกอบด้วยน้ำหนักเฉลี่ยของคอมพิวเตอร์และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ และสัดส่วนโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ

2.3) ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ประกอบด้วยกระบวนการนำทองคำกลับคืนจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

2.4) ข้อมูลจากการสำรวจพื้นที่และโรงงานคัดแยกแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยน้ำหนักเฉลี่ยของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ และวิธีการคัดแยกและรีไซเคิล

1.4.2 ศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลาย

1) ทำการทดลองชะละลายทองคำจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีขั้นตอนดังนี้ คัดแยกส่วนประกอบของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีโลหะมีค่าสูงของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ ได้แก่ หน่วยความจำ (RAM) ซีพียู (CPU) และส่วนประกอบของการ์ดแสดงผล (PCI Card) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากคุณฐิติวุฒิ พงษ์พานิช โดยผ่านขั้นตอนการบดลดขนาด ปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายกรดไนตริก และชะละลายด้วยกรดกัดทองเพื่อให้ทราบถึงปริมาณทองคำที่ชะละลายได้ และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณทองคำ ได้แก่ ปริมาณของกรดกัดทองต่อน้ำหนักซาก อุณหภูมิและระยะเวลาในการชะละลาย หลังจากนั้นตกตะกอนทองคำด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์เพื่อให้ทราบร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำ พร้อมทั้งศึกษาปริมาณเงิน ทองแดงและตะกั่วที่ถูกชะละลายในกระบวนการร่วมด้วย โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุ Inductively coupled plasma -

optical emission spectrometry (ICP-OES) และ Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

สถานที่ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการทดลองชั้น 10 อาคารวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย)

2) ศึกษาอัตราการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการชะละลายด้วยสารประกอบไฮยาไนด์ โดยใช้ข้อมูลที่รวบรวมในหัวข้อที่ 1.4.1 เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการชะละลายซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทอง

1.4.3 ศึกษาและจัดทำผังการไหล (Material flow analysis; MFA)

ศึกษาและจัดทำผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไฮยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำด้วยโปรแกรม STAN เวอร์ชัน 2.6.801

1.4.4 ศึกษาและประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment; LCA)

ศึกษาและประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไฮยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำ ด้วยโปรแกรม SimaPro เวอร์ชัน 9.0.0.35 และใช้ฐานข้อมูลของ Ecoinvent 3

1) กำหนดขอบเขตของการศึกษาแบบ Gate to gate โดยครอบคลุมตั้งแต่การรีไซเคิลซากจนถึงการจัดการของเสียที่เกิดขึ้น

2) กำหนดหน่วยอ้างอิงหรือหน่วยทำงาน (Functional unit) คือทองคำที่นำกลับคืนได้ 1 กิโลกรัม

1.4.5 เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระหว่างกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไฮยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ผู้ประกอบการที่บริหารจัดการซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ผ่านกระบวนการที่ใช้กรดกัดทอง และสารประกอบไซยาไนด์ สามารถปรับเปลี่ยนวิธีการจัดการซากและปรับปรุงกระบวนการให้มีของเสียและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ลดลง

1.5.2 เป็นแนวทางสำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการวางมาตรการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนที่เกิดจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่เหมาะสม



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทองคำ

2.1.1 ข้อมูลทั่วไป

ทองคำเป็นธาตุอิสระที่พบในธรรมชาติได้หลายรูปทรงดังนี้ เม็ดกลม แบน เกล็ด รูปร่างคล้าย กิ่งไม้ รูปผลึกแบบลูกเต๋า ออกตะฮีดรอน (Octahedron) และโดเดคะฮีดรอน (Dodecahedron) ทองคำมีจุดหลอมเหลวที่ 1064 °C จุดเดือดที่ 2701 °C มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 19.3 มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 196.67 และยังเป็นโลหะมีค่าที่มีราคาสูงเนื่องจากหายากและมีต้นทุนทางการผลิตที่สูง ทองคำมีสมบัติที่โดดเด่นคือ มีความแวววาว ความคงทน ไม่ขึ้นสนิม ไม่ไหม้หรือผุกร่อนเนื่องจากไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา

ทองคำสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในหลากหลายด้าน เช่น อุตสาหกรรมเครื่องประดับ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การแพทย์และทันตกรรม การสื่อสารโทรคมนาคม การคมนาคม อีกทั้งยังเป็นแร่ที่บ่งบอกถึงความมั่นคงทางเศรษฐกิจระหว่างประเทศอีกด้วย (สมาคมการค้าทองคำ, 2561)

2.1.2 แหล่งแร่ทองคำ

แหล่งของทองคำมีต้นกำเนิดจากสายแร่ควอตซ์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) แหล่งแร่ปฐมภูมิ แบ่งตามลักษณะการเกิด ดังนี้

1.1) แหล่งแร่ปฐมภูมิแบบสายแร่อุณหภูมิต่ำ เกิดจากสายแร่ที่อุณหภูมิต่ำระหว่าง 50-200 °C แทรกขึ้นมาบริเวณเปลือกโลกในระดับร้อยเมตร ตามแนวรอยแตกและรอยเลื่อนของเปลือกโลกนั้นจึงเหมาะสำหรับการประกอบกิจการเหมืองแร่เนื่องจากมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจมากที่สุด พบได้ที่แหล่งแร่ชาติรีและแหล่งเขาพนมพา จังหวัดพิจิตร

1.2) แหล่งแร่ทองคำแบบสายแร่อุณหภูมิต่ำปานกลาง เกิดจากสายแร่ที่อุณหภูมิระหว่าง 200-300 °C มักพบแร่ทองคำปะปนกับซัลไฟด์ของตะกั่ว สังกะสีและเหล็ก พบได้ที่แหล่งโตะโม๊ะ จังหวัดนราธิวาส และแหล่งบ้านบ่อทอง อำเภอท่าตะโก จังหวัดนครสวรรค์

1.3) แหล่งแร่ทองคำแบบอุณหภูมิสูง พบอยู่ในระดับลึกภายใต้ผิวโลกมากกว่า 1,200 เมตร

1.4) แหล่งแร่ทองคำแบบแปรสัณฐาน เกิดจากการวางตัวหินสัมผัสกับแร่ควอตซ์มอโนไซต์ มักพบทองคำประอยู่ภายในแหล่งแร่แคลไซต์ ควอตซ์ และแร่ประเภทซัลไฟด์ พบได้ที่แหล่งทองคำภูทับฟ้า จังหวัดเลยและแหล่งทองคำบ้านบ่อทองหนองสังข์ จังหวัดปราจีนบุรี

1.5) แหล่งแร่ทองคำแบบฝังประ แหล่งแร่ประเภทนี้จะพบทองคำฝังเป็นเม็ดละเอียดประอยู่ในหินปูน โดยทองคำมักจะเกิดร่วมกับแร่ไพไรต์ สติบไนต์ รีอัลการ์ ซินนาบาร์ และแบไรต์ พบได้ที่แหล่ง แม่ตา-แม่ฟ้า จังหวัดลำปาง

2) แหล่งทุติยภูมิ

เกิดจากทองคำจากแหล่งแร่ปฐมภูมิที่ถูกพัดพาและตกตะกอนทั้งในบริเวณแหล่งแร่เดิมและบริเวณใกล้เคียง พบได้ที่แหล่งบ้านป่าร้อน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ แหล่งอำเภอแม่พริก จังหวัดลำปาง จังหวัดกาญจนบุรี ชายหาดแม่น้ำโขง อำเภอปากชม จังหวัดเลย (ศิริพร สูงปานเขา, 2559)

2.2 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

2.2.1 ข้อมูลทั่วไป

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed circuit board; PCB) เป็นแผ่นฐานที่มีลายทองแดงนำไฟฟ้าอยู่ใช้สำหรับต่อวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อประกอบเป็นวงจรไฟฟ้าแทนการใช้สายไฟ ซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยาก แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำให้สามารถจัดวางอุปกรณ์ได้อย่างเป็นระเบียบลดขนาดพื้นที่ของการจัดเรียงอุปกรณ์ลงได้ โดยทั่วไปแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ

1) แผ่นฐานหรือซับสเตรท (Substrate)

ทำจากฉนวนบาง ยึดรวมกันด้วยสารประเภทเทอร์โมเซตติง มีหน้าที่รองรับการเชื่อมต่อตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยตัวนำไฟฟ้า วัสดุแผ่นฐานที่นิยมใช้ ได้แก่ กระจกชุบฟิโนลิกอัด อีพอกซีไฟเบอร์กลาส เป็นต้น

การพัฒนาแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในช่วงเริ่มต้น ใช้แผ่นฐานที่ทำจากกระจกบางๆ ชุบฟิโนลิกแล้วอัดรวมกันให้แข็งแรง ซึ่งมีข้อเสียคือ แตกหักง่าย มีความต้านทานต่ำเมื่อโดนความร้อน และสูญเสียความเป็นฉนวนได้ง่าย จึงไม่เหมาะกับการใช้งานที่มีความถี่สูง แต่เหมาะกับการใช้งานที่ไม่ต้องการคุณภาพสูง ต่อมาได้มีการพัฒนานำใยแก้วมาทำเป็นแผ่นฐานแทน โดยนำใยแก้วมาทอเข้าด้วยกันทั้งแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้นซึ่งสามารถยึดต่อแต่ละชั้นด้วยเรซินอีพอกซี รวมกันเป็นแผ่นฐานชนิดอีพอกซีไฟเบอร์กลาสซึ่งผลิตออกมาได้หลายสี ส่วนใหญ่มักเป็นสีฟ้าหรือสีเขียว ในปัจจุบันแผ่นฐานชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้และไม่บิดงอง่าย เหมือนกับชนิดฟิโนลิก

2) สารตัวนำที่ใช้เชื่อมต่อเป็นลายของวงจร

ในกระบวนการผลิตยุคเริ่มต้น มีการพิมพ์หมึกตัวนำลงบนแผ่นฐานแต่ปัจจุบันนิยมใช้แผ่นทองแดงบางๆยึดเข้ากับผิวหน้าของแผ่นฐานด้วยกาว (Metal clad laminate) ส่วนวัสดุที่เป็นแผ่นฐานจะนิยมใช้กระจกชุบฟิโนลิกอัดและอีพอกซีไฟเบอร์กลาส

2.2.2 กระบวนการผลิต

ในการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นการประกอบชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น แผงวงจรรวม (IC) ไดโอด (Diode) ทรานซิสเตอร์ (Transistor) ความต้านทาน (Resistor) ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor) มาจัดวางเชื่อมลงบนแผ่นฐานเพื่อประกอบวงจรไฟฟ้าให้สมบูรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้

โดยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์นั้นอาจมีเพียงด้านเดียว สองด้าน หรือวางซ้อนกันหลายชั้น (Multi-layer) ตามความต้องการของผู้ออกแบบ

2.2.3 ประเภทของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และการนำไปใช้งาน

โดยทั่วไปแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะแบ่งตามจำนวนแผ่นฐานและชั้นของแผ่นตัวนำ ดังนี้

1) Single-sided boards เป็นชนิดที่มีลายทองแดงหน้าเดียวประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความหนาแน่นของจำนวนไม่มาก โดยวางลงบนแผ่นฐานและชั้นแผ่นตัวนำเพียงด้านเดียว

2) Double-sided boards เป็นชนิดที่มีลายตัวนำทองแดงสองด้านได้แก่ ด้านบนและด้านล่างโดยมีชั้นแผ่นฐานอยู่ตรงกลาง วัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำแผ่นฐานคืออีพอกซีไฟเบอร์กลาส แผ่นวงจรชนิดนี้เหมาะสำหรับงานที่มีความหนาแน่นของจำนวนอุปกรณ์ในวงจรมากหรือเป็นวงจรที่มีความถี่ปานกลางถึงความถี่สูง อีกทั้งยังสามารถเชื่อมต่อลายทองแดงด้านบนและด้านล่างแบบ Plat through hole (PTH) เพื่อให้เชื่อมต่อแผงวงจรได้ทั้งด้านบนและด้านล่างในระยะที่สั้นลงอีกด้วย

3) Multi-layer boards เป็นแผ่นวงจรชนิดหลายชั้นประกอบไปด้วยชั้นของแผ่นตัวนำและชั้นสเตรท ส่วนมากจะใช้อีพอกซีไฟเบอร์กลาสประมาณ 3-50 ชั้น โดยทำการอัดชั้นต่างๆเข้าหากันด้วยความร้อนหรือเครื่องอัดแรงดันสูง เหมาะสำหรับงานที่มีความหนาแน่นของจำนวนอุปกรณ์สูงถึงสูงมากเช่น คอมพิวเตอร์

4) Flexible circuit เป็นแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอ่อน ถูกสร้างขึ้นจาก Laminating copper foil และ Flexible substrate มีตั้งแต่ชนิดแผ่นเดียวและหลายชั้น มีขนาดบางและน้ำหนักเบา เหมาะสำหรับการใช้งานกับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในพื้นที่จำกัดหรือมีการเคลื่อนไหวตลอดเวลา ซึ่งทำให้ไม่สามารถติดตั้งได้ให้อยู่กับที่ได้ แผงวงจรชนิดนี้มักนิยมใช้ในกล้องถ่ายรูป เครื่องพิมพ์ ฮาร์ดดิสก์และเครื่องบันทึกวีดีโอที่มีการเคลื่อนไหวตลอดเวลา (เปรมฤดี กาญจนปิยะ, 2554)

2.2.4 องค์ประกอบในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งองค์ประกอบภายในออกเป็น 5 ประเภทตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ดังนี้

1) ธาตุที่ใช้สำหรับการบัดกรี ได้แก่ ดีบุก (Sn) ทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb)

2) ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของชิ้นส่วนบนแผงอิเล็กทรอนิกส์หรือโครงสร้างของแผงอิเล็กทรอนิกส์ได้แก่ เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) โครเมียม (Cr) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

3) ธาตุที่นิยมใช้การนำไฟฟ้าได้แก่ เงิน (Ag) ทองคำ (Au) แพลเลเดียม (Pd)

4) องค์ประกอบที่ไม่ใช่โลหะ ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุได้แก่ ไฟเบอร์กลาส (SiO_2 และ CaO) และเซรามิก

5) องค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ใช้เพื่อห่อหุ้มส่วนที่เป็นโลหะและองค์ประกอบที่มีสมบัติทนความร้อนได้แก่ อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) ลามิเนตชนิด FR-4 พลาสติกชนิด PVC (Szalatkiewicz, 2014)

ซึ่งหากเปรียบเทียบธาตุที่เป็นองค์ประกอบในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์กับสัดส่วนของธาตุในแหล่งแร่พบว่า ในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีสัดส่วนของโลหะมากกว่าแหล่งแร่ตามธรรมชาติ โดยเฉพาะทองคำที่มีมากกว่า 5.8-224 เท่า โดยประมาณ แสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 สัดส่วนของธาตุในแหล่งแร่และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

โลหะ	แหล่งแร่ (%)	แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (%)
	Veit และคณะ (2002)	Ayres (1997)
Cu	0.5-3.0	12.0-29.0
Zn	1.7-6.4	0.1-2.7
Sn	0.2-0.85	1.1-4.8
Pb	0.3-7.5	1.3-3.9
Fe	30-60	0.1-11.4
Ni	0.7-2.0	0.3-1.6
Au	0.0005	0.0029-0.112
Ag	0.0005	0.01-0.52

(ที่มา: Bizzo และคณะ, 2014)

ทั้งนี้ ในการศึกษาตัวอย่างซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปี 1993-1995 พบว่ามีสัดส่วนของทองคำประมาณ 1000 ppm และการศึกษาตัวอย่างซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลังจากปี 1995

พบว่า มีสัดส่วนของทองคำประมาณ 100 ppm หรือน้อยกว่า ซึ่งเห็นได้ชัดว่าปริมาณทองคำในซาก
แมงวงจรีเล็กทรอนิกส์มีแนวโน้มลดลง แสดงดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในแมงวงจรีเล็กทรอนิกส์

โลหะ	Ag (ppm)	Au (ppm)	Pd (ppm)	Cu (%)	Al (%)	Fe (%)	Pb (%)	Sn (%)	Ni (%)	Zn (%)
A	5,210	1,120	-	19	4.1	3.6	1.9	1.1	0.8	0.8
B	2,000	1,000	50	20	2	8	2	4	2	1
C	-	350	-	22	-	3.6	1.55	2.6	0.32	-
D	300	-	-	12.5	2.04	0.6	2.7	4	0.7	0.08
E	3,300	80	-	26.8	4.7	5.3	-	1	0.47	1.5
F	1,240	420	-	15.6	-	1.4	1.35	3.24	0.28	0.16
G	500	300	-	19.66	2.88	11.47	3.93	3.68	0.38	2.1
H	79	68	33	28.7	1.7	0.6	1.3	3.8	-	-
I	-	-	-	27.6	-	2.9	-	-	0.3	2.7
J	450	205	220	14.6	-	4.79	2.96	5.62	1.65	-
K	-	-	-	12.58	2.38	3.24	2.44	1.41	0.39	-
L	100	70	-	19.19	7.06	3.56	1.01	2.03	5.35	0.73
M	135	29	-	28	2.6	0.08	-	-	0.26	-
N	317	142	-	14.2	-	3.08	2.50	4.79	0.41	0.18

(ที่มา: ดัดแปลงจาก Bizzo และคณะ, 2014) อ้างถึง

- (A) Feldman (1993) (B) Menetti และคณะ (1995) (C) Iji และคณะ (1997)
 (D) Veit และคณะ (2002) (E) Zhao และคณะ (2004) (F) Kim และคณะ (2004)
 (G) Wang และคณะ (2005) (H) Creamer และคณะ (2006) (I) Marco และคณะ (2008)
 (J) Hino และคณะ (2009) (K) Das และคณะ (2009) (L) Yoo และคณะ (2009)
 (M) Oliveira และคณะ (2010) (N) Bizzo และคณะ (2014)

ทั้งนี้ อุปกรณ์เชื่อมต่อกับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ได้แก่ หน่วยความจำ (RAM) ซีพียู (CPU) การ์ดจอแสดงผล (PCI card) ฯลฯ จะมีทองคำเป็นส่วนประกอบในสัดส่วนที่ แตกต่างกันตามชนิดของอุปกรณ์และลักษณะการใช้งาน แสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 สัดส่วนโดยน้ำหนักของทองคำในส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ชื่อส่วนประกอบ	ทองคำ (กรัมต่อตัน)	แหล่งอ้างอิง
หน่วยความจำ (RAM)	932	(Charles และคณะ, 2017)
	600-900	(RERW, 2012)
ซีพียู (CPU)	0.25-0.05 กรัมต่อหน่วย (ชิ้น)	(Razi, 2016)
	517	
การ์ดแสดงผล (PCI card)	15	

(ที่มา: Charles และคณะ, 2017; REWR, 2012; Razi, 2016)

2.2.5 สถานการณ์ของอุตสาหกรรมการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

รายงานภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมเดือนมกราคม 2560 จากสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม พบว่ามีการผลิตเพื่อส่งออกอุปกรณ์ประกอบเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้นร้อยละ 30.1 คิดเป็นมูลค่าส่งออกเท่ากับ 1,857.62 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีมูลค่า การส่งออกเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.60 จากปี 2559 โดยคิดเป็นมูลค่าส่งออกเท่ากับ 601.34 ล้านดอลลาร์ สหรัฐฯ (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560) ในขณะที่สัดส่วนของโลหะมี ค่าในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทองคำและเงิน มีแนวโน้มที่จะลดลงในอนาคต (Bizzo และคณะ, 2014)

2.3 คอมพิวเตอร์

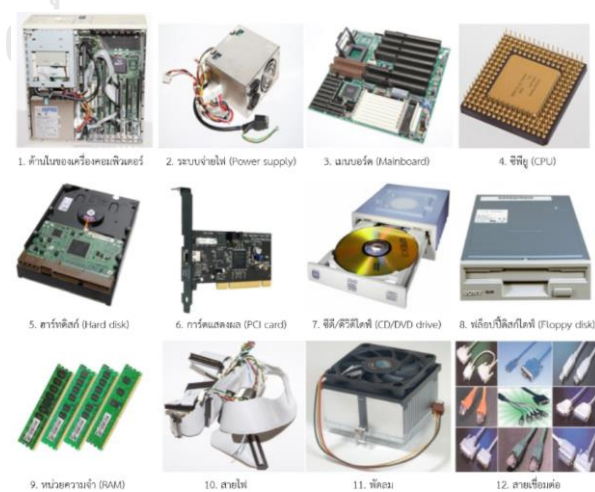
2.3.1 ข้อมูลทั่วไป

คอมพิวเตอร์สามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal computer) ได้แก่ ชนิดตั้งโต๊ะ (Desktop) และ ชนิดตั้งพื้น (Tower type) มีส่วนประกอบหลักโดยไม่รวมจอแสดงผล ดังนี้

- ระบบจ่ายไฟ (Power supply)
- แผงวงจรหลัก (Mainboard or mother board)
- ซีพียู (CPU)
- ฮาร์ดดิสก์ (Hard disk)
- การ์ดแสดงผล (PCI card)
- ซีดี/ดีวีดีไดฟ์ (CD/DVD drive)
- ฟลอปปีดิสก์ไดฟ์ (Floppy disk drive)
- หน่วยความจำ (RAM)
- สายไฟและสายเชื่อมต่อ
- พัดลม

โดยส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล แสดงดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 ส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

(ที่มา: ดัดแปลงจาก Razi, 2016)

2) คอมพิวเตอร์แบบพกพา ได้แก่ แล็ปท็อป (Laptop) หรือ โน้ตบุ๊ก (Notebook) มีส่วนประกอบหลักโดยไม่รวมจอแสดงผล ดังนี้

- ฮาร์ดดิสก์ (Hard disk)
- ซีดี/ดีวีดีไดฟ์ (CD/DVD drive)
- แบตเตอรี่ (Battery)
- โครงเครื่อง (Notebook panel)
- คีย์บอร์ด (keyboard) (กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

2.3.2 สัดส่วนโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในคอมพิวเตอร์

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 13 ของเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และคิดเป็นร้อยละ 15 ของเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา โดยมีทองคำในสัดส่วนต่อน้ำหนักเท่ากับ 250 กรัม ต่อแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 1 ตัน แสดงดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 สัดส่วนโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในคอมพิวเตอร์และสัดส่วนทองคำในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ชนิดอุปกรณ์	สัดส่วนโดยน้ำหนัก ของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (ร้อยละ)	สัดส่วนโดยน้ำหนักของโลหะใน แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (กรัมต่อตัน)		
		เงิน	ทองคำ	แพลเลเดียม
Personal computer	13	1,000	250	110
Laptop	15	1,000	250	110

(ที่มา: ดัดแปลงจาก Chancerel และคณะ, 2009)

2.4 สถานการณ์ขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย

รายงานสถานการณ์ของเสียอันตรายของประเทศไทยคาดการณ์ว่า ของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นในประเทศไทยมีปริมาณทั้งหมด 606,319 ตัน คิดเป็นซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 393,070 ตัน โดยร้อยละ 15 หรือประมาณ 58,370 ตัน คือซากคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้ ได้มีการประเมินว่า ปริมาณซากคอมพิวเตอร์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.3 จากปี 2558 (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)

ซึ่งแหล่งที่มาของซากอิเล็กทรอนิกส์มาจากครัวเรือนร้อยละ 82 สำนักงานร้อยละ 14 และโรงแรม และอะพาร์ตเมนต์ร้อยละ 3

ด้านการสำรวจข้อมูลพฤติกรรมของผู้บริโภคกลุ่มครัวเรือนในการจัดการกับซากผลิตภัณฑ์เมื่อไม่ใช้งานแล้วพบว่า ส่วนใหญ่จะขายซากผลิตภัณฑ์คิดเป็นร้อยละ 51.27 เก็บรวบรวมไว้ร้อยละ 25.32 ทิ้งปะปนกับขยะทั่วไปร้อยละ 15.6 และให้ผู้อื่นร้อยละ 7.84 (สายใจ วิทยานูมาส, 2560)

2.5 การจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์

2.5.1 กระบวนการจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกต้อง

แนวทางการจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกต้องคือ การป้องกันและมีการจัดการตั้งแต่ต้นทาง โดยสามารถทำได้ด้วยหลักการ 3R ได้แก่ การลด (Reduce) การใช้ซ้ำ (Reuse) และการรีไซเคิล (Recycle)

1) การลด (Reduce) หมายถึงลดการบริโภคและการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีสารอันตราย หรือมีในปริมาณต่ำ รวมไปถึงการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ที่สามารถรีไซเคิลได้ง่ายเมื่อผลิตภัณฑ์กลายเป็น ซาก เลือกซื้อผลิตภัณฑ์ที่ประหยัดพลังงาน และเลือกซื้อสินค้าที่มีฉลาก มอก. ฉลากเขียว หรือฉลาก สินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2) การใช้ซ้ำ (Reuse) เป็นการช่วยยืดอายุการใช้ผลิตภัณฑ์โดยอาจซ่อมแซม (Repair) หรือ ปรับปรุงให้สามารถใช้งานได้ โดยระมัดระวังไม่ให้สารอันตรายจากชิ้นส่วนเก่าปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม

3) การรีไซเคิล (Recycle) สำหรับซากอิเล็กทรอนิกส์ที่มีผู้รับซื้อคืน ควรพิจารณา ความสามารถในการจัดการหรือรีไซเคิลอย่างถูกต้อง ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม จึงควรพิจารณาขายให้ เฉพาะผู้ประกอบการที่ขึ้นทะเบียนและได้รับอนุญาตจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และหากเป็น ซากอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่มีการรับซื้อคืน ควรแยกทิ้งจากขยะทั่วไป เพื่อให้หน่วยงานท้องถิ่นนำไปกำจัด หรือรีไซเคิลอย่างถูกต้องต่อไป (ชมพูนุช พรหมภักดี, 2555)

2.5.2 ผลกระทบที่เกิดจากการตัดแยกและรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

1) ตะกั่ว (Lead) ที่เป็นธาตุที่ใช้ในการบัดกรีแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยการเผาแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะทำให้ตะกั่วสามารถฟุ้งกระจายสู่บรรยากาศ สะสมในดินและแหล่งน้ำ และสามารถเข้าสู่ร่างกายผ่านทางระบบทางเดินหายใจได้ (ณิชชา บูรณสิงห์, 2559)

- ผลกระทบขั้นเฉียบพลัน เมื่อระดับตะกั่วในเลือดสูงเกิน 120 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร ทำให้เกิดอาการของโรคเนื้อสมองเสื่อมเฉียบพลัน โดยมักพบในเด็กอายุต่ำกว่า 3 ปี เริ่มต้นจากการมีอาการชักและหมดสติ หรือมีอาการอื่นร่วม เช่น เบื่ออาหาร ชีต กระวนกระวาย ซึม กระสับกระส่าย อาเจียน มีอาการทักชะงัดโดยเฉพะการพูด และมีอาการของโรคสมองเสื่อมตามมาภายใน 2-5 วัน

- ผลกระทบขั้นเรื้อรัง ส่งผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง ระบบประสาทส่วนปลาย โดยเกิดอาการชักหมดสติหรือเป็นอัมพาต ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินอาหาร เช่น เบื่ออาหารและอาเจียน ส่งผลกระทบต่อระบบโลหิตซึ่งจะมีอาการซีดเนื่องจากเม็ดเลือดแดงมีความผิดปกติ ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินปัสสาวะ ไตวาย และเป็นหมัน (ณรงค์ศักดิ์ อังคะสุวพลา และคณะ, 2562)

2) สารทนไฟประเภทโบรมีนที่ผสมในวัสดุจำพวกพลาสติก เมื่อมีการจัดการที่ไม่เหมาะสมโดยการเผาพลาสติกร่วมกับทองแดงจะทำให้การเกิดไดออกซินและพีวแรนระหว่างการเผา (ณิชชา บูรณสิงห์, 2559)

- ผลกระทบขั้นเฉียบพลัน ทำให้เกิดโรค Chloracne โดยมีอาการของโรคคือ มีสิวหัวดำขึ้นบนผิวหนัง มีถุงสีน้ำตาลอมเหลืองของผิวหนังบริเวณหลังใบหู ขอบตา หลัง ไหล่ และบริเวณอวัยวะสืบพันธุ์ อาจมีขนขึ้นในบริเวณที่ปกติจะไม่มีขน ผิวหนังมีสีเข้มขึ้น สีของเล็บเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล และทำให้เยื่อตาอักเสบ

- ผลกระทบขั้นเรื้อรัง ส่งผลให้น้ำหนักตัวลดลง เกิดความผิดปกติที่ตับ เซลล์ตับตายและเกิดอาการโรคผิวหนังอักเสบ (กรมควบคุมมลพิษ, 2561)

3) น้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักและโลหะมีค่าจากกระบวนการสกัดโลหะมีค่าจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรด โดยไม่มีกระบวนการบำบัด (ณิชชา บูรณสิงห์, 2559)

2.6 ข้อกำหนดของการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว

2.6.1 นิยามที่เกี่ยวข้อง

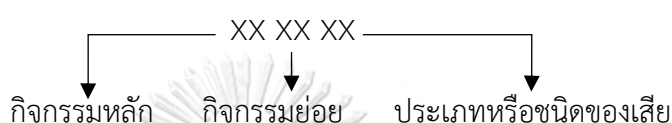
- 1) สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว หมายถึง สิ่งของที่ไม่ใช่แล้วหรือของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการประกอบกิจการโรงงาน รวมถึงของเสียจากวัตถุดิบ ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของเสียที่เป็นผลิตภัณฑ์เสื่อมคุณภาพ และน้ำทิ้งที่มีองค์ประกอบหรือมีคุณลักษณะที่เป็นอันตราย
- 2) ของเสียอันตราย หมายถึง สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีองค์ประกอบ หรือปนเปื้อนสารอันตราย หรือมีคุณสมบัติที่เป็นอันตราย
- 3) การจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว หมายถึง การบำบัด ทำลายฤทธิ์ ทั้ง กำจัด จำหน่ายจ่ายแจก แลกเปลี่ยน หรือนำกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่ในรูปแบบต่างๆ รวมถึงการกักเก็บไว้เพื่อทำการดังกล่าว
- 4) ผู้ก่อกำเนิดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (Waste generator; WG) หมายถึง ผู้ประกอบกิจการโรงงานที่ก่อให้เกิดและมีสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วไว้ในครอบครอง
- 5) ผู้รวบรวมและขนส่ง (Waste transporter; WT) หมายถึง ผู้มีสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วไว้ในครอบครองเพื่อการขนส่ง และผู้มีไว้ในครอบครองสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วในสถานที่เก็บรวบรวม หรือขนถ่ายสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องระบบเอกสารกำกับการขนส่งของเสียอันตราย พ.ศ. 2547
- 6) ผู้บำบัดและกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (Waste possessor; WP) หมายถึง ผู้ประกอบกิจการโรงงานที่มีสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วไว้ในครอบครอง ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง ระบบเอกสารกำกับการขนส่งของเสียอันตราย พ.ศ. 2547 และโรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการคัดแยกหรือฝังกลบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว ตามประเภทหรือชนิดของโรงงาน ลำดับที่ 105
- 7) เอกสารกำกับการขนส่ง หมายถึง แบบกำกับการขนส่ง 02 ตามแนบท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง ระบบเอกสารกำกับการขนส่งของเสียอันตราย พ.ศ.2547
- 8) แบบแจ้งขอขยายระยะเวลาในการกักเก็บสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (สก.1)

9) แบบคำขออนุญาตนำสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกนอกบริเวณโรงงาน (สก.2)

10) ใบแจ้งเกี่ยวกับรายละเอียดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (สก.3 สก.4 และ สก.5)

2.6.2 การกำหนดรหัสและประเภทของเสีย

1) รหัสของเสียจะแสดงด้วยเลข 6 หลัก เพื่อระบุประเภทของอุตสาหกรรมและกิจกรรมกระบวนการผลิตที่เป็นแหล่งกำเนิดของของเสียนั้น



1.1) ตัวเลขหลักที่ 1 และ 2 หมายถึง ประเภทของอุตสาหกรรมหรือกิจกรรมหลัก กำหนดโดยใช้ เลข 01 ถึง หมายถึงรหัสของเสียทั้ง 19 หมวด หมวด 1-12 คือของเสียเฉพาะจากกระบวนการผลิตหลัก (Specific waste) หมวดที่ 13-19 คือของเสียทั่วไปหรือของเสียที่ไม่ได้เกิดจากกระบวนการผลิตหลัก (Common waste) เช่น 07 XX XX หมายถึง ของเสียจากกระบวนการผลิตสารเคมีอินทรีย์ต่างๆ

1.2) ตัวเลขหลักที่ 3 และ 4 หมายถึง กิจกรรมย่อยซึ่งจะระบุรายละเอียดที่ชัดเจน เช่น 19 09 XX หมายถึง ของเสียจากการผลิตน้ำประปา และน้ำใช้อุตสาหกรรม

1.3) ตัวเลขหลักที่ 5 และ 6 หมายถึง ประเภทหรือชนิดของเสียที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมผลิตนั้นๆ เช่น 19 09 05 หมายถึง เรซินแลกเปลี่ยนประจุที่อิ่มตัว หรือใช้งานแล้ว

2) ประเภทของเสียสามารถจำแนกได้ดังนี้

2.1) ประเภทของเสียที่ไม่เป็นอันตราย (Non-hazardous waste) ได้แก่ รหัสที่เป็นเลข 6 และไม่มีอักษรภาษาอังกฤษกำกับ ยกเว้น XX XX 99 ซึ่งจะมีทั้งของเสียอันตรายและของเสียที่ไม่เป็นอันตราย

2.2) ประเภทของเสียอันตราย (Hazardous waste) ได้แก่ รหัสที่เป็นเลข 6 หลักและมีอักษรภาษาอังกฤษกำกับ “HA” (Hazardous waste - absolute entry) โดยของเสียในกลุ่มนี้เป็นของเสียที่มีความเป็นอันตรายและไม่ขึ้นกับองค์ประกอบหรือความเข้มข้นของสารอันตรายที่เป็น

องค์ประกอบของของเสียนั้น ๆ เช่น 13 01 01 HA หมายถึง น้ำมันไฮดรอลิกที่มีสารโพลีคลอรีเนทเต็ตไปฟินิล

2.3) ประเภทของเสียที่อาจจะเป็นของเสียอันตราย โดยเปิดโอกาสให้พิสูจน์ความเป็นอันตราย ได้แก่ รหัสที่เป็นเลข 6 หลักและกำกับด้วยอักษรภาษาอังกฤษ “HM” (Hazardous waste – Mirror entry) ซึ่งของเสียดังกล่าวอาจเป็นหรือไม่เป็นของเสียอันตรายก็ได้ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและความเข้มข้นของสารอันตรายหรือสารพิษในของเสียนั้นๆ ทั้งนี้ หากพิจารณาแล้วของเสียดังกล่าวไม่เป็นอันตราย ของเสียนั้นๆ จะจัดอยู่ในรหัสของเสียที่ไม่เป็นอันตรายซึ่งไม่มีอักษรภาษาอังกฤษกำกับ เช่น 10 13 09 HM หมายถึง ของเสียจากการผลิตซีเมนต์โยหิน ที่มีแร่โยหิน

10 13 10 หมายถึง ของเสียจากการผลิตซีเมนต์โยหิน ที่ไม่ใช่ 10 13 09

2.6.3 รหัสของเสียและประเภทของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เกี่ยวข้องกับซากคอมพิวเตอร์และซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

รหัสของเสียและประเภทของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่จัดเป็นของเสียจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเกี่ยวข้องกับของเสียจำพวกซากคอมพิวเตอร์และซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แสดงดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 รหัสของเสียและประเภทของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เกี่ยวข้องกับซากคอมพิวเตอร์และซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

รหัสของเสีย	ประเภทของเสีย	สิ่งปฏิภูลที่ไม่ใช้แล้ว
16 02		ของเสียจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
16 02 13	HM	อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ใช้งานแล้ว ที่มีชิ้นส่วนที่เป็นอันตราย ที่ไม่ใช่ 16 02 09 ถึง 16 02 12 เช่น จอภาพ ตัวสะสมประจุ สวิตช์บรรจุปรอท เป็นต้น
16 02 14		อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ใช้งานแล้ว ที่ไม่ใช่ 16 02 09 ถึง 16 02 13
16 02 15	HA	ชิ้นส่วนที่เป็นอันตราย ที่ถอดแยกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ใช้งานแล้ว
16 02 16		ชิ้นส่วนที่ถอดแยกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ใช้งานแล้ว ที่ไม่ใช่ 16 02 15

(ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

2.6.4 วิธีการในการจัดการสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

วิธีการจัดการสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจะใช้เลข 3 หลักสำหรับกำหนดรหัสการจัดการสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (Treatment and disposal codes) ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

011 คัดแยกประเภทเพื่อจำหน่ายต่อ

049 นำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีอื่นๆ นอกเหนือจากการทำเป็นเชื้อเพลิงทดแทน การทำเชื้อเพลิงผสม เเผาเพื่อเอาพลังงาน และทำเป็นวัสดุทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์

052 นำโลหะกลับมาใช้ใหม่

071 ฝังกลบตามสุขาภิบาล

073 ฝังกลบอย่างปลอดภัย

075 เเผาทำลายในเตาเผาเฉพาะสำหรับของเสียอันตราย

081 รวบรวมและส่งออกนอกประเทศ

2.6.5 ประเภทของผู้รับดำเนินการ

โรงงานลำดับที่ 101 ได้แก่ ผู้ได้รับอนุญาตประกอบกิจการเกี่ยวกับการเผาและการบำบัดน้ำเสีย

โรงงานลำดับที่ 105 ได้แก่ ผู้ได้รับอนุญาตประกอบกิจการเกี่ยวกับการคัดแยกและ/หรือฝักรวมวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

โรงงานลำดับที่ 106 ได้แก่ ผู้ได้รับอนุญาตประกอบกิจการเกี่ยวกับการนำเอาวัสดุที่ไม่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการทางอุตสาหกรรมเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่

โรงงานลำดับอื่นๆ ได้แก่ ผู้ที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการต่างๆ ที่สามารถนำเอาวัสดุที่ไม่ใช้แล้วไปเป็นวัตถุดิบได้ (ซึ่งประเภทของวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจะเป็นชนิดเดียวกับวัตถุดิบที่ใช้อยู่ เช่น เศษไม้ กระดาษ พลาสติก ฯลฯ) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

2.7 การวิเคราะห์ผังการไหลของวัสดุ (Material flow analysis; MFA)

2.7.1 ความหมายของการวิเคราะห์ผังการไหล

การวิเคราะห์ผังการไหล คือ การวิเคราะห์เส้นทางการไหล (Flow) และปริมาณสะสม (Stock) ของวัสดุภายใต้ขอบเขตเวลาหรือพื้นที่ที่สนใจ ซึ่งอ้างอิงจากสมดุลของปริมาณที่อยู่ภายในขอบเขตของระบบ ได้แก่ ปริมาณขาเข้า (Input) ปริมาณสะสม (Stock) และปริมาณขาออก (Output) ครอบคลุมตั้งแต่แหล่งกำเนิด เส้นทาง ไปจนถึงการกำจัดวัสดุนั้นๆ ซึ่งการวิเคราะห์ผังการไหลจะมีประโยชน์ต่อการจัดการทรัพยากร การจัดการของเสีย รวมถึงการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย การวิเคราะห์ผังการไหล สามารถแบ่งได้ 2 ระดับ คือ

1) **ระดับสารหรือองค์ประกอบ (Substance)** หมายถึง สิ่งที่สามารถบอกได้ในรูปของสารประกอบทางเคมี ซึ่งมีความหมายคล้ายคลึงกับคำว่าวัสดุ (Material) ที่หมายถึงสารประกอบที่สร้างขึ้นหรือเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ทั้งวัสดุและสารเมื่ออยู่ในระบบแล้วจะใช้หน่วยวัดเป็นหน่วยเดียวกันเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ และในขณะเดียวกัน หน่วยในการวัดจะสามารถบอกค่าสิ่งที่สนจึ้นนั้นเป็นวัสดุหรือสารประเภทใด กล่าวคือถ้ามีหน่วยเป็นอะตอม วัสดุหรือสารนั้นคือธาตุ เช่น คาร์บอน เหล็ก เป็นต้น ถ้ามีหน่วยเป็นโมเลกุล วัสดุหรือสารนั้นคือสารประกอบ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ เพอร์ริกคลอไรด์ เป็นต้น

2) **ระดับผลิตภัณฑ์ (Good)** หมายถึง สารหรือสารประกอบที่มีมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์และ ถูกกำหนดมูลค่าโดยกลไกของตลาด โดยผลิตภัณฑ์จะสามารถมีมูลค่าเป็นบวก เช่น รถยนต์ เชื้อเพลิง ไม้ หรืออาจมีมูลค่าเป็นลบก็ได้ เช่น ขยะมูลฝอย ตะกอนน้ำเสีย โดยความหมายผลิตภัณฑ์ไม่จำกัด เฉพาะวัสดุหรือสารเท่านั้น แต่ยังคงครอบคลุมไปถึงการบริการ พลังงานและข้อมูลอีกด้วย

สำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลของผลิตภัณฑ์โดยทั่วไป จะหมายถึงผลิตภัณฑ์ที่เป็นวัสดุหรือ สารเท่านั้น

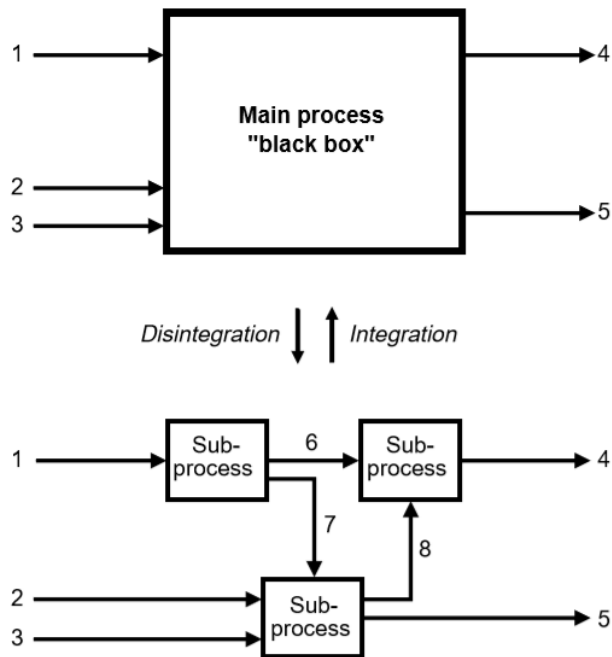
2.7.2 ความหมายของสัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผังการไหล

1) **กระบวนการ (Process)** หมายถึง การเคลื่อนที่ การเปลี่ยนรูป การสะสมของสารภายใน ระบบที่สนใจ ซึ่งกระบวนการนั้นสามารถเป็นกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น การละลายฟอสฟอรัส ลงในแหล่งน้ำ หรือกระบวนการที่มนุษย์สร้างขึ้นก็ได้ เช่น การส่งผ่านแก๊สตามเส้นท่อ การรวบรวม ของเสีย

ตัวอย่างของกระบวนการของการเปลี่ยนรูป ได้แก่ การออกซิเดชันของคาร์บอนไปเป็น คาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ของไฟฟ้าหรือการเผาไม้เชื้อเพลิงจากกิจกรรมของมนุษย์เอง

ตัวอย่างของกระบวนการกักเก็บ ได้แก่ การตกตะกอนโดยธรรมชาติหรือหลุมฝังกลบที่เกิดขึ้น โดยมนุษย์

สัญลักษณ์ของกระบวนการจะแสดงด้วยกล่องสี่เหลี่ยมและมีชื่อกระบวนการกำกับภายใน โดยทั่วไปการวิเคราะห์ผังการไหลจะคิดปริมาณขาเข้าและขาออกจากกระบวนการเท่านั้น ส่วน ปริมาณที่เปลี่ยนแปลงภายในกล่องกระบวนการจะไม่แสดงให้เห็น ซึ่งในบางการศึกษาที่มีการเจาะจง ถึงรายละเอียดของกระบวนการภายใน และเรียกหน่วยย่อยของการเปลี่ยนแปลงของปริมาณภายใน กระบวนการว่า กระบวนการย่อย (Sub process) แสดงดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 สัญลักษณ์ของกระบวนการและกระบวนการย่อย

(ที่มา: Brunner และ Rechberger, 2005)

2) ปริมาณสะสม (Stock) หมายถึง ปริมาณวัสดุหรือสารที่กักเก็บภายในกระบวนการต่อหนึ่งหน่วยเวลา ปริมาณสะสมสามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยแปรผันตามปริมาณของวัสดุหรือสารขาเข้าและขาออกภายในขอบเขตที่สนใจ และเมื่อปริมาณขาเข้าและปริมาณขาออกมีค่าเท่ากันหรือในสภาวะที่ระบบคงตัว ปริมาณสะสมในระบบนั้นจะคงที่

สัญลักษณ์ของปริมาณสะสมแสดงด้วยกล่องภายในกล่องของกระบวนการเพื่อบ่งบอกปริมาณที่กักเก็บไว้ภายใน แสดงดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 สัญลักษณ์และตัวอย่างของกระบวนการและปริมาณสารสะสม

(ที่มา: Brunner และ Rechberger, 2005)

3) เส้นทางการไหล (Flow) และฟลักซ์ (Flux)

เส้นทางการไหลหรืออัตราการไหล (Flow) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของวัสดุหรือสารในหนึ่งหน่วยระยะเวลา

ฟลักซ์ (Flux) หมายถึง เส้นทางการไหลของวัสดุหรือสารจำเพาะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ในบางครั้งสามารถหมายถึงอัตราการไหลต่อจำนวนคน หรือต่อระบบที่กำลังศึกษาก็ได้ โดยจะหมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของวัสดุหรือสารภายในขอบเขตของระบบที่สนใจ ซึ่งเมื่อใช้ฟลักซ์แทนอัตราการไหลจะทำให้การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงด้านปริมาณระหว่างกระบวนการและระบบเป็นไปได้ง่ายขึ้น

สัญลักษณ์ของเส้นทางการไหลเชิงมวลและฟลักซ์ จะแสดงถึงเส้นทางการไหลโดยแทนด้วยลูกศรแล้วเขียนกำกับด้วยกระบวนการของแหล่งกำเนิดหรือเส้นทางต่อไปของสารนั้นๆ

เส้นทางการไหลที่เข้าระบบจะเรียกว่า เส้นทางการนำเข้า (Import process) เส้นทางการไหลที่ออกจากระบบจะเรียกว่า เส้นทางการนำออก (Export process) ซึ่งเส้นทางก่อนการนำเข้าและเส้นทางหลังนำออกจากระบบจะอยู่นอกขอบเขตระบบที่สนใจเสมอ แสดงดังภาพที่ 2-4

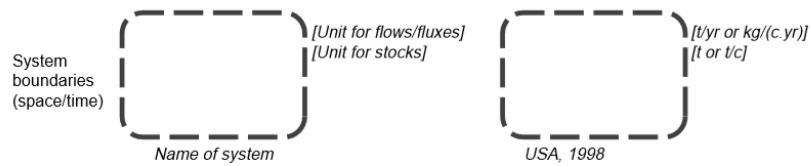
เส้นทางการไหลสามารถแบ่งเป็น 2 ระดับ คือ เส้นทางการไหลของวัสดุหรือสาร (m) และเส้นทางการไหลของผลิตภัณฑ์ (x)



ภาพที่ 2-4 สัญลักษณ์และตัวอย่างของอัตราการไหล (Flow) และฟลักซ์ (Flux)

(ที่มา: Brunner และ Rechberger, 2005)

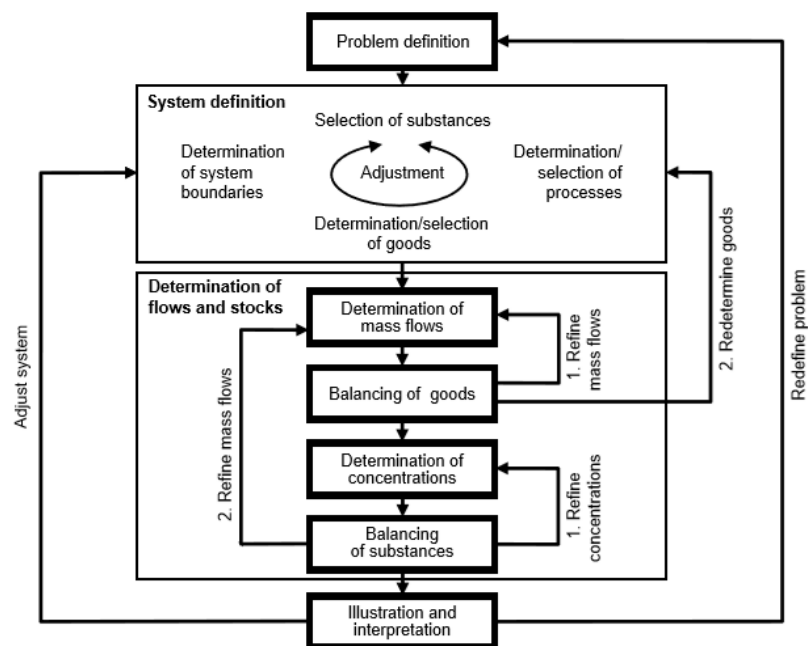
4) ขอบเขตของระบบ (System boundary) เป็นการกำหนดการศึกษาด้วยขอบเขตระยะเวลาหรือขอบเขตพื้นที่ ซึ่งขอบเขตพื้นที่นั้นสามารถกำหนดเป็นขอบเขตทั่วไปหรือขอบเขตจำเพาะตามที่คุณศึกษากำหนดก็ได้ ด้านการกำหนดขอบเขตเวลา ควรกำหนดควบคู่กับตัวแปรอื่นที่มีผลต่อผังการไหล เช่น จุดประสงค์ของการศึกษา ความครบถ้วนของข้อมูล ความเหมาะสมของขอบเขตระยะเวลาที่ศึกษา ระยะเวลาที่สารอยู่ในระบบ ฯลฯ แสดงดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 สัญลักษณ์และตัวอย่างของขอบเขตของระบบ (System boundary)

(ที่มา: Brunner และ Rechberger, 2005)

2.7.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผังการไหล



ภาพที่ 2-6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผังการไหล

(ที่มา: Brunner และ Rechberger, 2005)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ผังการไหล มีดังนี้

- 1) เลือกสารที่สนใจ ให้สอดคล้องกับขอบเขตของการทำงาน ความระดับแม่นยำ งบประมาณ และบุคลากร
- 2) ระบุขอบเขตการศึกษา เวลา และพื้นที่ที่จะศึกษา

3) หลังจากคัดเลือกวัสดุหรือสารที่สนใจภายใต้ขอบเขตที่กำหนดแล้ว ให้ดูสมมูลสารตามกฎของสมมูลมวล แสดงดังสมการที่ 1 เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลที่ขาดหายไปในระบบ เช่น เส้นทางการไหล ปริมาณสารสะสมและกระบวนการที่เกี่ยวข้อง

$$\sum \dot{m}_{input} = \sum \dot{m}_{output} + \dot{m}_{storage} \quad (1)$$

4) วิเคราะห์ผังการไหลจะเริ่มต้นจากการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยตรงจากแหล่งข้อมูล การคำนวณทางตรงและทางอ้อมซึ่งได้จากการเก็บรวบรวมเชิงสถิติ ข้อมูลจากอุตสาหกรรมและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ผู้เชี่ยวชาญ วารสารทางวิชาการ รวมไปถึงการประเมินและการจัดการข้อมูลของผู้ศึกษา

การได้มาซึ่งข้อมูลที่มีความแม่นยำจะขึ้นกับ การตั้งสมมติฐาน การตรวจความถูกต้อง และการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลกับระบบที่คล้ายคลึงกัน

5) ประเมินผังการไหลสุทธิและปริมาณสะสม

ทำการดูปริมาณวัสดุหรือสาร (X) โดยคิดจากผลคูณของผังการไหลของผลิตภัณฑ์ (m) และสัดส่วนของวัสดุหรือสารภายในผลิตภัณฑ์ (C) แสดงดังสมการที่ 2 และดูปริมาณอีกครั้งตามกฎสมมูลมวลเพื่อหาข้อผิดพลาด กระบวนการและเส้นทางการไหลที่ขาดหายไป ตามสมการสุทธิของการไหล แสดงดังสมการที่ 3

$$\dot{X}_{ij} = \dot{m}_i \cdot C_{ij} \quad (2)$$

$$m_{stock}(t) = \int_{t_0}^t \dot{m}_{input}(\tau) d\tau - \int_{t_0}^t \dot{m}_{output}(\tau) d\tau + m_{stock}(t_0) \quad (3)$$

6) ตีความและนำเสนอผังการไหลให้เข้าใจง่าย พร้อมทั้งนำเสนอที่มาของการศึกษา เนื้อหาที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์ ขั้นตอนในการศึกษาและสรุปผลการทดลอง

2.7.4 การประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ผังการไหล

1) ขั้นตอนในการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูล (Uncertainty)

1.1) ประเมินคุณภาพของข้อมูลโดยใช้เกณฑ์ที่ใช้ในอ้างอิงจากตัวชี้วัดทั้ง 5 ด้าน ได้แก่ ความน่าเชื่อถือ (Reliability) ความสมบูรณ์ของข้อมูล (Completeness) ความสัมพันธ์ด้านเวลา (Temporal correlation) ความความสัมพันธ์ด้านพื้นที่ (Geographical correlation) ความสัมพันธ์

ด้านอื่น (Other correlation) ซึ่งเป็นการประเมินโดยให้คะแนนตั้งแต่ 1 ถึง 4 คะแนน แสดงดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 ความหมายของตัวชี้วัดคุณภาพข้อมูลและเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินเชิงคุณภาพ

เกณฑ์ที่ใช้ ความหมาย		คะแนน			
		1	2	3	4
ความน่าเชื่อถือ (Reliability)	ความน่าเชื่อถือของแหล่งข้อมูลและการได้มาซึ่งข้อมูล ได้แก่ การประเมินการคัดเลือกตัวอย่าง การตรวจสอบและทบทวนการดำเนินงาน	- ข้อมูลต่อเนื่องและมีความน่าเชื่อถือ - ได้รับการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ	ไม่มีการประเมินความครบถ้วนของข้อมูลและขาดข้อมูลบางส่วน	มีหลักการที่สนับสนุนการได้มาซึ่งข้อมูลอย่างชัดเจนแต่ข้อมูลไม่ครอบคลุมขอบเขตทั้งการศึกษา	ไม่มีแหล่งที่มาของข้อมูลหรือไม่มีข้อมูลปรากฏ
ความสมบูรณ์ของข้อมูล (Completeness)	การรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมด	ข้อมูลที่ได้ครอบคลุมกระบวนการที่ศึกษาและเส้นทางการไหลที่สนใจ	ครอบคลุมข้อมูลเชิงปริมาณของกระบวนการศึกษาและเส้นทางการไหลหลักเท่านั้น	ครอบคลุมข้อมูลเชิงปริมาณของกระบวนการศึกษาและเส้นทางการไหลเพียงบางส่วน	มีข้อมูลบางส่วนเท่านั้น ไม่มีข้อมูลเชิงปริมาณของกระบวนการศึกษาและเส้นทางการไหลที่สำคัญ
ความสัมพันธ์ด้านเวลา (Temporal correlation)	ความสอดคล้องกันด้านเวลาของแหล่งข้อมูลและเวลาที่ใช้ในการศึกษา	ข้อมูลที่ได้ตรงกับปีที่ต้องการศึกษา	ข้อมูลที่ได้ต่างจากปีที่ต้องการศึกษา 1 ถึง 5 ปี	ข้อมูลที่ได้ต่างจากปีที่ต้องการศึกษา 5 ถึง 10 ปี	ข้อมูลที่ได้ต่างจากปีที่ต้องการศึกษามากกว่า 10 ปี

(ที่มา : Laner และคณะ, 2015)

ตารางที่ 2-6 (ต่อ) ความหมายของตัวชี้วัดคุณภาพข้อมูลและเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินเชิงคุณภาพ

เกณฑ์ที่ใช้ ความหมาย		คะแนน			
		1	2	3	4
ความสัมพันธ์ ด้านพื้นที่ (Geo - graphical correlation)	ความสอดคล้อง กันด้านพื้นที่ ของแหล่งข้อมูล ของและพื้นที่ที่ ใช้ในการศึกษา	ข้อมูลที่ได้ ศึกษาใน ขอบเขตพื้นที่ เดียวกัน	ข้อมูลที่ได้ ศึกษาใน ขอบเขตพื้นที่ ที่มีความ สัมพันธ์กัน ทางเศรษฐกิจ และสังคม (GDP และ รูปแบบการ บริโภค)	ข้อมูลที่ได้ ศึกษาใน ขอบเขตพื้นที่ ที่มีความ สัมพันธ์ด้าน เศรษฐกิจ และสังคม แตกต่างกัน เล็กน้อย	ข้อมูลที่ได้ ศึกษาใน ขอบเขตพื้นที่ ที่มีความ สัมพันธ์ด้าน เศรษฐกิจ และสังคม แตกต่างกัน โดยสิ้นเชิง
ความสัมพันธ์ ด้านอื่น (Other correlation)	ความสอดคล้อง ของผลิตภัณฑ์ และเทคโนโลยี	ผลิตภัณฑ์และ เทคโนโลยี ที่ใช้ในการ ศึกษาไม่มี ความแตกต่าง กัน	ผลิตภัณฑ์และ เทคโนโลยีที่ ใช้ในการ ศึกษามีความ เกี่ยวเนื่องกัน	ผลิตภัณฑ์และ เทคโนโลยี มีความเกี่ยว เนื่องกัน แต่ ยากที่จะนำ ข้อมูลมา อ้างอิง	ผลิตภัณฑ์และ เทคโนโลยี แทบจะไม่มี ความเกี่ยว เนื่องกัน ซึ่ง ทำให้ข้อมูลที่ นำมาอ้างอิง ไม่มีความ น่าเชื่อถือ

(ที่มา : Laner และคณะ, 2015)

1.2) แปลงคะแนนของตัวชี้วัดทั้ง 5 ให้อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Coefficients of variation; CV) ซึ่งแสดงถึงความแปรปรวนของข้อมูลที่รวบรวมได้ แสดงดังสมการที่ 4 และ 5

สมการที่ 4 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของความน่าเชื่อถือ

$$CV = a \cdot e^{b(\text{คะแนน})}; \text{คะแนนระหว่าง 1-4} \quad (4)$$

โดยกำหนดค่า $a = 0.375$ และค่า $b = 1.105$

สมการที่ 5 การปรับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของความสมบูรณ์ของข้อมูล ความสัมพันธ์ด้านเวลา ความความสัมพันธ์ด้านพื้นที่ และความสัมพันธ์ด้านอื่น

$$CV = a \cdot e^{b(\text{คะแนน}-1)}; \text{คะแนนระหว่าง } 1-4 \quad (5)$$

โดยกำหนดค่า a ไม่มีค่าแปรปรวน = 0.375

$$a \text{ มีความแปรปรวนระดับกลาง} = 2 \times a \text{ ไม่มีค่าแปรปรวน} = 0.75$$

$$a \text{ มีความแปรปรวนระดับสูง} = 4 \times a \text{ ไม่มีค่าแปรปรวน} = 1.5$$

และค่า b ไม่มีค่าแปรปรวน = b มีความแปรปรวนระดับกลาง = b มีความแปรปรวนระดับสูง = 1.105

ค่าความไม่แน่นอนเชิงคุณภาพที่ได้จากการคำนวณระดับความแปรปรวนและการแปลผลจากตัวชี้วัด แสดงดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Coefficients of variation; CV)

ตัวชี้วัด	ระดับการแปรปรวน	คะแนน			
		1	2	3	4
		ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Coefficients of variation; CV)			
ความน่าเชื่อถือ (Reliability)		2.3	6.8	20.6	62.3
- ความสมบูรณ์ของข้อมูล (Completeness)	สูง	0.0	4.5	13.7	41.3
- ความสัมพันธ์ด้านเวลา (Temporal correlation)	กลาง	0.0	2.3	6.8	20.6
- ความสัมพันธ์ด้านพื้นที่ (Geographical correlation)	ไม่มี	0.0	1.1	3.4	10.3
- ความสัมพันธ์ด้านอื่น (Other correlation)					

(ที่มา : Laner และคณะ, 2015)

สำหรับข้อมูลที่ได้รับการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ สามารถประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันตามเกณฑ์ที่กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 2-8

ตารางที่ 2-8 ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันสำหรับข้อมูลที่ได้รับการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ

ผลประเมิน ของ ผู้เชี่ยวชาญ	คะแนน			
	1	2	3	4
เกณฑ์ที่ใช้ ในการ ประเมิน	ข้อมูลได้รับการ ประเมินโดย ผู้เชี่ยวชาญที่มีความ ชำนาญ ซึ่ง พิจารณาจากการ พิจารณาจากการ ทดลองและ กระบวนการที่ ชัดเจน โดยมีการ รายงานอย่าง ครบถ้วน	ข้อมูลได้รับการ ประเมินโดย ผู้เชี่ยวชาญ ซึ่ง พิจารณาจากการ ทดลอง หรือ ข้อมูลที่อ้างอิงมา จากผู้เชี่ยวชาญ เพียงบางส่วน	ข้อมูลได้รับการ ประเมินโดย ผู้เชี่ยวชาญ แต่ยังมี ข้อจำกัดด้าน การทดลอง และ ข้อมูลสนับสนุน	ข้อมูลได้รับการ ประเมินโดยผู้รู้ที่ ซึ่งอ้างอิงจาก ทฤษฎีหรือ สมมติฐานเท่านั้น
CV (%)	4.5	13.7	41.3	124.6

(ที่มา : Laner และคณะ, 2015)

1.3) คำนวณผลรวมค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของเส้นทางการไหล แสดงดังสมการที่ 6
สมการผลรวมค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน

$$CV_{\text{Total}} = (CV_{\text{reliability}}^2 + CV_{\text{completeness}}^2 + CV_{\text{geogr.corr.}}^2 + CV_{\text{temp.corr.}}^2 + CV_{\text{other.corr.}}^2)^{0.5} \quad (6)$$

2) การประยุกต์ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันในการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูล

2.1) ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันเป็นเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการประเมินข้อมูลอย่างง่าย
และแสดงค่าเป็นร้อยละ

2.2) ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลโดยทั่วไปที่มีการ
แจกแจงข้อมูลแบบปกติ (Normal distribution) ซึ่งมีความไม่แน่นอนของข้อมูลในระดับต่ำไปจนถึง
ปานกลาง ทั้งนี้ไม่ควรมามีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันไม่ควรมามีค่ามากกว่าร้อยละ 30

2.3) สัมประสิทธิ์การแปรผันไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลที่มีความไม่แน่นอน
ของข้อมูลที่สูง (Laner และคณะ, 2015)

2.7.5 การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ผังการไหล

การวิเคราะห์ผังการไหลนั้นมีประโยชน์ในแง่ของทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณในระบบทราบถึงการสะสมและการลดลงในระบบได้อย่างชัดเจน ช่วยกำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาในแต่ละเส้นทางของการไหลของวัสดุ โดยการวิเคราะห์ผังการไหลเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการประเมินระบบของการผลิต การขนส่ง รวมไปถึงการพัฒนาระบบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการกิจกรรมมนุษย์ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น (Brunner และ Rechberger, 2005)

2.8 การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life cycle assessment; LCA)

2.8.1 ความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิต

องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการกำหนดมาตรฐาน (International Organization for Standardization; ISO) ได้ให้คำนิยามของการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment; LCA) ตามอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 : 2006 ว่า “เป็นการเก็บรวบรวมและการประเมินค่าของสารขาเข้า (input) และสารขาออก (output) รวมถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่มีโอกาสเกิดขึ้นในระบบตลอดวัฏจักร”

การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment; LCA) เป็นเครื่องมือในการประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต ตั้งแต่กระบวนการผลิต การแปรรูป การขนส่ง การใช้งาน การใช้ซ้ำ การนำกลับมาใช้ใหม่ การกำจัด ไปจนถึงทรัพยากรที่ใช้ในแต่ละกิจกรรม เพื่อที่จะประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขอนามัยจากแต่ละกิจกรรมที่มีการปลดปล่อยสู่แหล่งน้ำ ดิน บรรยากาศ

การประเมินวัฏจักรชีวิตสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม โดยช่วยในการตัดสินใจทางเลือกเพื่อปรับปรุงผลิตภัณฑ์ได้ง่ายขึ้น เป็นเกณฑ์ในการเลือกผลิตภัณฑ์ที่มีผลกระทบน้อยกว่า นอกจากนั้นยังสามารถวิเคราะห์ผลกระทบโดยรวมของระบบ วิเคราะห์กระบวนการย่อยภายในได้ ซึ่งจะตั้งอยู่บนข้อมูลเชิงปริมาณที่มีความน่าเชื่อถือสูงและสามารถเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาของระบบต่อไป (เศรษชรั สัมภัตตะกุล, 2555)

2.8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบมาตรฐาน ISO 14000 กับการประเมินวัฏจักรชีวิต

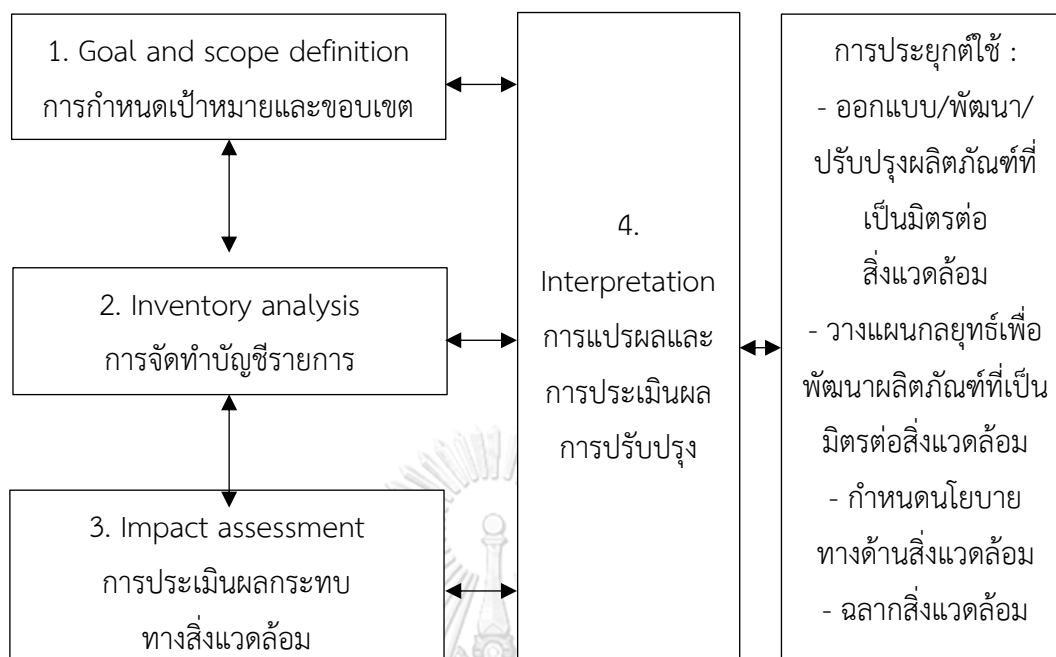
การประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นการทำงานส่วนหนึ่งซึ่งถูกบรรจุอยู่ในมาตรฐาน ISO 14000 ว่าด้วยเรื่องเกี่ยวกับมาตรฐานการจัดการสิ่งแวดล้อม (Environmental management standard) โดยให้คำจำกัดความย่อของการประเมินวัฏจักรชีวิตในระบบมาตรฐาน ISO 14000 แสดงดังตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-9 คำจำกัดความย่อของการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) ในระบบมาตรฐาน ISO 14000

มาตรฐานการประเมินวัฏจักรชีวิต	คำจำกัดความย่อ
ISO 14040 หลักการและขอบเขตการศึกษา	การแนะนำสู่โครงสร้าง หลักการ และข้อกำหนดสำหรับการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของสาร โดยเฉพาะการแนะนำในเรื่องการพิจารณาถึงความสำคัญในการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของสาร
ISO 14041 การกำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขตการศึกษา และการจัดทำ บัญชีรายการ	คำแนะนำในการให้คำจำกัดความของเป้าหมายกำหนดขอบเขตระบบผลิตภัณฑ์ การเก็บข้อมูลและการส่งผลของรายงาน
ISO 14042 การประเมินผลกระทบทาง สิ่งแวดล้อม	คำแนะนำเรื่องของการเก็บข้อมูลเพื่อความเข้าใจที่ดีเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่สัมพันธ์กับระบบผลิตภัณฑ์ที่กำลังศึกษาอยู่
ISO 14043 การแปลผลทางการศึกษา	คำแนะนำการแปลผลจากการเก็บข้อมูลและการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของสาร

(ที่มา: เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล, 2555)

2.8.3 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต



ภาพที่ 2-7 กรอบการดำเนินงาน LCA ตามอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040

(ที่มา: International organization for standardization, 1997)

จากภาพที่ 2-7 แสดงขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการใดๆ ตามอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040-14043 โดยสามารถแบ่งกระบวนการออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่

1) การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา ประกอบไปด้วยวิธีขั้นตอนย่อยดังนี้

1.1) การกำหนดสิ่งที่จะศึกษา (Goal)

การกำหนดสิ่งที่จะศึกษาต้องมีความชัดเจน ไม่ซับซ้อน และเกี่ยวเนื่องกับขอบเขตของการศึกษา หน้าที่ของผลิตภัณฑ์และหน่วยงานทำงาน เพื่อให้ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตนั้นมีความน่าเชื่อถือตามสมมติฐานที่วางไว้

1.2) หน้าที่ของผลิตภัณฑ์ (Product function)

การกำหนดหน้าที่หรือลักษณะของผลิตภัณฑ์เป็นการกำหนดขอบเขตของการศึกษาที่จำเป็นเนื่องจากผลิตภัณฑ์หนึ่งๆ สามารถมีหน้าที่ได้หลากหลายทำให้การประเมินผลกระทบต่อ

สิ่งแวดล้อมเป็นไปได้อย่างซับซ้อน ดังนั้นจึงควรระบุหน้าที่ของผลิตภัณฑ์ให้ชัดเจน สอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา

1.3) หน่วยการทำงาน (Functional unit)

การกำหนดหน่วยการทำงานที่ชัดเจนภายใต้พื้นฐานเดียวกัน จะทำให้การเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากผลิตภัณฑ์ในกระบวนการต่างๆ เป็นไปได้ง่ายขึ้น (ชณิภรณ์ เรืองฤทธิ์, 2559)

1.4) ขอบเขตของระบบ (System boundary)

ขอบเขตในการศึกษาจะขึ้นกับจุดประสงค์ของการศึกษาว่าครอบคลุมกระบวนการใดบ้าง โดยสามารถแบ่งขอบเขตของระบบได้ดังนี้

Gate to gate คือการประเมินวัฏจักรชีวิตจากกระบวนการหนึ่งไปจนถึงกระบวนการหนึ่งในวัฏจักรทั้งหมด

Cradle to gate คือการประเมินวัฏจักรชีวิตจากกระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบไปจนถึงกระบวนการได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ ไม่รวมผลกระทบในการใช้งานและการกำจัดซากผลิตภัณฑ์นั้น ซึ่งจะใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถประเมินวัฏจักรชีวิตของช่วงที่ใช้งานผลิตภัณฑ์ได้อย่างชัดเจน

Cradle to grave คือการประเมินวัฏจักรชีวิตจากกระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบไปจนถึงกระบวนการกำจัดซากผลิตภัณฑ์

Cradle to cradle คือการประเมินวัฏจักรชีวิตตั้งแต่การรีไซเคิลซากผลิตภัณฑ์มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เดิมอีกครั้ง

2) การจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม

เป็นขั้นตอนในการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อจัดทำฐานข้อมูล ภายใต้ขอบเขตระบบที่สนใจ ซึ่งประกอบไปด้วย ข้อมูลขาเข้า ได้แก่ ปริมาณวัตถุดิบ สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ พลังงาน และข้อมูลขาออก ประกอบไปด้วย ผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ร่วม การจัดการซากผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

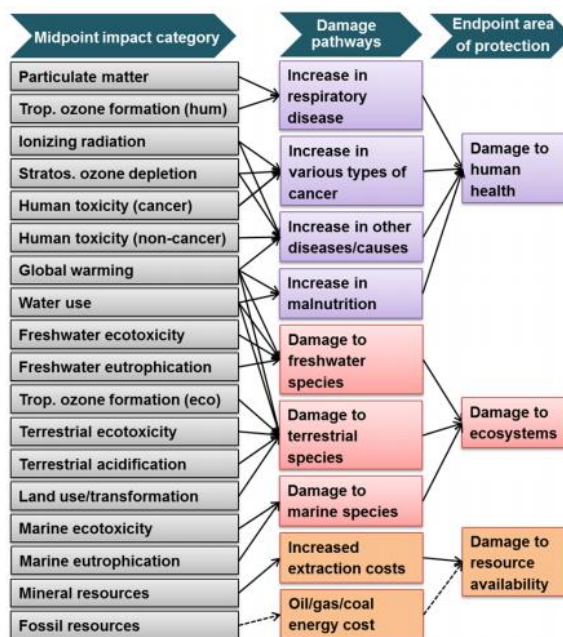
3) การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อย ดังนี้

3.1) การจำแนกประเภทข้อมูลเป็นกลุ่มผลกระทบ (Classification)

การจำแนกประเภทของข้อมูลเป็นกลุ่มของผลกระทบ (Classification) เป็นขั้นตอนในการจำแนกผลกระทบของข้อมูลขาเข้าและขาออก ซึ่งวัสดุหรือสาร 1 ชนิดนั้นสามารถส่งผลกระทบได้มากกว่า 1 ประเภท เช่น วิธี ReCiPe 2016 จะแบ่งกลุ่มผลกระทบออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มผลกระทบขั้นกลาง (Midpoint impact) 18 ด้าน ดังนี้ ภาวะโลกร้อน (Global warming) การลดลงของโอโซนในชั้นสตราโทสเฟียร์ (Stratospheric ozone depletion) การก่อให้เกิดรังสีไอออน (Ionizing radiation) การเพิ่มขึ้นของโอโซนที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (Ozone formation, human health) การเกิดฝุ่นขนาดเล็ก (Fine particulate matter formation) การเพิ่มขึ้นของโอโซนที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศบนบก (Ozone formation, terrestrial ecosystem) ความเป็นกรดในดิน (Terrestrial acidification) การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารในแหล่งน้ำจืด (Freshwater eutrophication) การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารในระบบในทะเล (Marine eutrophication) ความเป็นพิษในดิน (Terrestrial ecotoxicity) ความเป็นพิษในแหล่งน้ำจืด (Freshwater toxicity) ความเป็นพิษในทางทะเล (Marine ecotoxicity) ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ (Human toxicity; cancer) ความเป็นพิษที่ไม่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ (Human toxicity; non-cancer) การลดลงของพื้นที่ (Land use) การลดลงของแหล่งแร่ (Mineral resource scarcity) การลดลงของแหล่งฟอสซิล (Fossil resource scarcity) การใช้น้ำ (Water use)

กลุ่มผลกระทบขั้นปลาย (Endpoint impact) 3 ด้าน ได้แก่ ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ (Human health) ผลกระทบต่อระบบนิเวศ (Damage to ecosystems) ผลกระทบต่อทรัพยากร (Damage to resource availability) (Huibregts และคณะ, 2016) แสดงดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 ภาพรวมของผลกระทบที่ประเมินด้วยวิธี ReCiPe 2016

(ที่มา: Huijbregts และคณะ, 2016)

3.2) การกำหนดบทบาท (Characterization) เป็นการแสดงค่าผลกระทบให้อยู่ในรูปแบบของตัวบ่งชี้ (indicator) จากการปรับค่าด้วยค่าแฟกเตอร์ (Characterization factor) ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และการกำหนดบทบาทจะทำให้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของวัสดุหรือสารที่ต่างกันรวมกันได้

3.3) การหาขนาดของผลกระทบ (Normalization) เป็นการแสดงของผลกระทบของสารหรือผลิตภัณฑ์ที่ศึกษากับขนาดของผลกระทบในระดับประเทศ ภูมิภาค หรือเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอ้างอิง

3.4) การจัดกลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Grouping) เป็นการจัดกลุ่มประเภทของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมออกเป็นหมวดหมู่ เช่น ผลกระทบต่อพลังงานและทรัพยากรธรรมชาติ ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ ผลกระทบต่อสุขอนามัย ทั้งนี้สามารถแบ่งระดับของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ในหลายระดับเช่นกัน เช่น ผลกระทบระดับท้องถิ่น ผลกระทบระดับโลก เป็นต้น

3.5) การให้น้ำหนัก (Weighting) เป็นการให้ความสำคัญของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตามชนิดของผลกระทบที่แตกต่างกัน ซึ่งจะคิดจากค่าคุณแก่ของผลกระทบ (Weighting factor) อ้างอิงจากมุมมองของผู้ประเมินต่อผลกระทบนั้นๆ

3.6) การวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูล (Data quality analysis) เป็นวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ก่อนที่จะนำข้อมูลนั้นไปแปลผลหรือใช้งานต่อไป ซึ่งปัจจัยที่พิจารณาถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลมีดังนี้ ความเหมาะสมและความสอดคล้องของข้อมูลที่ใช้และข้อมูลที่ต้องการตามที่กำหนดไว้ในเป้าหมายของการศึกษา แหล่งที่มาของข้อมูล ช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล ความถูกต้องของข้อมูล และการวิเคราะห์ข้อมูล โดยข้อมูลควรเป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมด ซึ่งตัวอย่างเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูล มีดังนี้ การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของข้อมูล (Sensitivity analysis) การป้อนส่วน การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของข้อมูล (Uncertainty analysis)

4) การตีความและการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อม

การตีความและการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ จะทำให้ทราบได้ว่าแต่ละกระบวนการในขอบเขตที่สนใจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะ เป็นแนวทางในการปรับเปลี่ยนสาร สารเคมี และการปรับปรุงกระบวนการให้มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้การจัดทำบัญชีรายการ การตีความและการแปลผลและการทำรายงาน ควรทำให้เข้าใจง่ายโดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของขอบเขตการศึกษาและวัตถุประสงค์ของการศึกษา (สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2562)

2.8.4 การประยุกต์ใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิตนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกิจกรรมหรืองานวิจัยต่างๆ ได้หลากหลาย เช่น การบริหารงานความปลอดภัยและอาชีวอนามัยอาจนำการประเมินวัฏจักรชีวิตมาใช้วิเคราะห์ความเสี่ยงหรือความรุนแรงของผลกระทบต่อความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม เพื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงลึกและมีความครอบคลุมมากกว่าวิธีการเปรียบเทียบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน นำไปสู่การตัดสินใจหรือการกำหนดแนวทางการดำเนินงานด้านสิ่งแวดล้อมในอนาคต เช่น การพัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ การปรับปรุงนโยบายของภาครัฐที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบต่อผู้ผลิตและผู้บริโภคและการกระตุ้นให้เกิดจิตสำนึกด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น (เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล, 2555)

โดยกลุ่มผู้ที่นำการประเมินวัฏจักรชีวิตไปประยุกต์ใช้กับกิจกรรมต่างๆ สามารถจำแนกได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ ภาคอุตสาหกรรม/บริษัทเอกชน ภาครัฐ องค์กรเอกชนและผู้บริโภค โดยรูปแบบการนำไปใช้งานมีหลากหลาย แสดงดังตารางที่ 2-10

ตารางที่ 2-10 รูปแบบของการประยุกต์ใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต

กลุ่มผู้นำไปใช้งาน	รูปแบบการประยุกต์ใช้งาน
ภาคอุตสาหกรรม/ บริษัทเอกชน	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สื่อสารให้ทราบถึงด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ - ใช้ต่อรองกับผู้จัดหาวัตถุดิบ (Supplier) ให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น - พัฒนากลยุทธ์ด้านการตลาด กลยุทธ์ด้านธุรกิจ และแผนการลงทุน การจัดทำฉลากสิ่งแวดล้อม (ฉลากเขียว) ประเภทที่ 3 ของผลิตภัณฑ์ เพื่อเป็นข้อมูลให้กับผู้บริโภคใช้ตัดสินใจในการเลือกซื้อ - ออกแบบและปรับปรุงกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น - พัฒนานโยบายของผลิตภัณฑ์ว่าต้องการให้ไปในทิศทางใดโดยการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ
ภาครัฐ	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นเกณฑ์ในการจัดทำข้อกำหนดของฉลากสิ่งแวดล้อม - การพัฒนาและจัดทำฉลากสิ่งแวดล้อม - ใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อสนับสนุนเงินทุนหรือการจัดทำโครงสร้างภาษีอากร - พัฒนานโยบายทั่วไปของภาครัฐ องค์กรเอกชน
องค์กรเอกชน	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นข้อมูลเพื่อเผยแพร่ต่อผู้บริโภค - เป็นข้อมูลสนับสนุนสำหรับการประชุม/สัมมนาในเวทีสาธารณะ - ใช้เป็นข้อมูลเพื่อกดดันภาคเอกชนและรัฐบาลในการพัฒนาสิ่งแวดล้อม
ผู้บริโภค	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ข้อมูลประกอบการตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์

(ที่มา: สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2546)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินซากอิเล็กทรอนิกส์ในครัวเรือน

การประเมินปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์สามารถประเมินได้หลากหลายวิธี ดังนี้

1) Consumption and Use (C&U) method

เป็นวิธีที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดวิธีหนึ่ง โดยคำนวณจากผลคูณของจำนวนครัวเรือนในปีที่มีการศึกษา จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้าต่อครัวเรือนในปีที่มีการศึกษาและน้ำหนักเฉลี่ยของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ทำการศึกษาและหารด้วยอายุการใช้งาน แสดงดังสมการที่ 7

$$WEEE(t) = \frac{H(t)N_h(t)W}{L} \quad (7)$$

โดยกำหนดให้ WEEE (t) = ปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นในปีที่ทำการศึกษา

H (t) = จำนวนครัวเรือนในปีที่ทำการศึกษา

$N_h(t)$ = จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้าในแต่ละครัวเรือน

W = น้ำหนักเฉลี่ยของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการศึกษา

L = อายุการใช้งานเฉลี่ยของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการศึกษา

ซึ่งกระบวนการประเมินด้วยวิธีนี้จะเหมาะสมสำหรับการประเมินที่ข้อมูลไม่ครบถ้วนและยังไม่มีบัญชีรายการของซากอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีข้อจำกัดคือประเมินไม่สามารถใช้คาดการณ์ปริมาณที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้ และไม่ได้คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีและความต้องการตลาดที่เพิ่มมากขึ้น

โดยแบบสำรวจพฤติกรรมการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนจัดทำโดยศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตรายในปี พ.ศ. 2562 มีการประเมินว่า 1 ครัวเรือนจะมีคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะและพกพาจำนวน 0.476 และ 0.961 เครื่องตามลำดับ อายุการใช้งานเฉลี่ยของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะและพกพา คือ 7.79 และ 6.42 ปี ตามลำดับ โดยคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะและพกพามีการสะสมในครัวเรือนร้อยละ 35.5 และ 30.29 ต่อปี ตามลำดับ (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2562)

2) Time step method

วิธีการนี้เป็นการประเมินปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้คำนวณจากปริมาณสินค้าที่ขายได้ในปีที่ทำการศึกษาลบกับผลต่างของปริมาณสินค้าที่สะสมในปีที่ทำการศึกษาและปีก่อนหน้า โดยปริมาณสินค้าที่ขายได้ในปีที่ทำการศึกษาเกิดจากผลรวมของปริมาณการผลิตและปริมาณที่นำเข้าและลบกับปริมาณที่มีการส่งออก แสดงดังสมการที่ 8 และ 9

$$WEEE(t) = S(t) - \{St(t) - St(t-1)\} \quad (8)$$

$$S(t) = I(t) + P(t) - E(t) \quad (9)$$

โดยกำหนดให้ $WEEE(t)$ = ปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นในปีที่ทำการศึกษา

$S(t)$ = ปริมาณสินค้าที่ขายได้ในปีที่ทำการศึกษา

$St(t)$ = ปริมาณที่สะสมในปีที่ทำการศึกษา

$St(t-1)$ = ปริมาณที่สะสมในปีก่อนหน้า

$I(t)$ = ปริมาณการนำเข้าในปีที่ทำการศึกษา

$P(t)$ = ปริมาณการผลิตในปีที่ทำการศึกษา

$E(t)$ = ปริมาณการส่งออกในปีที่ทำการศึกษา

กระบวนการนี้มีการใช้คำนวณปริมาณซากมือถือ และคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Araujo และ คณะ, 2012) ซึ่งวิธีการนี้เหมาะสมที่จะใช้ประเมินเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีความผันผวนในตลาดสูง แต่มีข้อจำกัดคือข้อมูลที่ใช้จะต้องมีการรวบรวมในระดับประเทศ

3) Simple delay method

วิธีการนี้เป็นการประเมินซากอิเล็กทรอนิกส์จากปริมาณที่ขายในปีที่ศึกษาลบด้วยอายุการใช้งาน แสดงดังสมการที่ 10

$$WEEE(t) = S(t - L) \quad (10)$$

โดยกำหนดให้ $WEEE(t)$ = ปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นในปีที่ทำการศึกษา

$S(t-L)$ = ปริมาณที่ขายได้ในปีที่ศึกษาด้วยอายุการใช้งาน

วิธีนี้ใช้สำหรับการประเมินในผลิตภัณฑ์ที่มีความแน่นอนในตลาดสูง และจำนวนครัวเรือนและเทคโนโลยีมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (Jain และ Sareen, 2006)

4) Mass balance method

วิธีการประเมินแบบ Mass balance method จะคล้ายกับการประเมินโดยวิธี Simple delay method มีข้อมูลที่ต้องคำนึงถึง 3 ส่วน แสดงดังสมการที่ 11

$$WEEE(t) = S(t-L) + R(t-L_r) + Sr(t-L_s) \quad (11)$$

โดยกำหนดให้ $WEEE(t)$ = ปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นในปีที่ทำการศึกษา

$S(t-L)$ = ปริมาณที่ขายได้ในปีที่ศึกษาด้วยอายุการใช้งาน

$R(t-L_r)$ = ปริมาณที่มีการใช้ซ้ำ

$Sr(t-L_s)$ = ปริมาณที่มีการขายได้

L_r = อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้ซ้ำ

L_s = อายุของผลิตภัณฑ์ที่ถูกเก็บไว้ในครัวเรือน

โดยวิธีการประเมินนี้อาศัยข้อมูลที่มีรายละเอียดมากกว่าวิธีอื่นๆ (Ikhlayel, 2016; Bogar และคณะ, 2019)

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนำกลับคืนโลหะพื้นฐานและโลหะมีค่าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และของเสียจากอุตสาหกรรม

Brug และคณะ (1974) ศึกษาการนำกลับคืนทองคำจากสารละลายกรดกัดทองพบว่า ในสารละลายกรดกัดทอง มีกรดไนตริกที่เป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรงซึ่งทำให้ไม่สามารถตกตะกอนทองคำได้ จึงจำเป็นต้องค่อยๆปรับให้พีเอช เพื่อลดผลของกรดไนตริกในสารละลาย โดยทำให้ สารละลายมีพีเอช ให้อยู่ในช่วง 2-3 แล้วจึงสามารถตกตะกอนทองคำได้

McClelland และคณะ (1985) ศึกษาการนำทองคำและเงินกลับคืนจากขี้ลอปที่เป็นฝอยเหล็กซึ่งถูกใช้ในการแยกทองคำทางไฟฟ้าจากสารละลาย พบว่าทองคำสามารถแยกจากฝอยเหล็กด้วยการชะละลายฝอยเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 M ในสัดส่วน 10 ลิตรต่อหนึ่งกิโลกรัมของฝอยเหล็ก โดยให้ความร้อนที่ 90 °C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง และสามารถกรองตะกอนที่เป็นทองคำและเงินออกจากสารละลายกรดได้

Mecucci และ Scott (2002) ศึกษาการนำกลับคืนของทองแดง ตะกั่ว ดีบุกจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระบวนการชะละลายและกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่า กรดไนตริกที่มีความเข้มข้นระหว่าง 1 ถึง 6 โมลต่อลิตร มีศักยภาพเพียงพอในการแยกทองแดง ตะกั่ว ดีบุกจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ 1) การตกตะกอนดีบุกในรูปเกลือของกรดเมทาสแตนนิกที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกมากกว่า 4 โมลต่อลิตร และหลงเหลือทองแดงและตะกั่วในรูปของสารละลาย 2) การแยกทองแดงด้วยการตกตะกอนทางไฟฟ้าจากสารละลายตะกั่วโดยควบคุมความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร 3) การตกตะกอนตะกั่วด้วยวิธีทางไฟฟ้าโดยการปรับพีเอชให้แตกต่าง

ปราโมทย์ ภูพานทอง (2002) ศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อการแยกทองคำจากสารละลายไซยาไนด์ด้วยไฟฟ้า โดยใช้น้ำยาลอกทองที่มีทองคำปริมาณ 400 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นตัวอย่งในการศึกษา โดยพบว่าในถังทำปฏิกิริยาขนาด 20 ลิตร ควรให้ขั้วไฟฟ้าอยู่ห่างกันประมาณ 4 – 5 เซนติเมตร ฝอยเหล็กที่ใช้เป็นขั้วเพื่อให้ทองคำไปเกาะติดควรมีน้ำหนักประมาณ 100 - 120 กรัม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ 40 - 45 แอมแปร์ ระยะเวลาในการชะละลาย 120 นาที ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องการประมาณ 20 – 30 กรัมต่อลิตร

Sheng and Etsell (2007) ศึกษาการนำทองคำกลับคืนจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทอง ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนในการศึกษา ดังนี้ 1) การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการใช้ไนตริกเข้มข้นร้อยละ 33 ชะละลาย ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อชะละลายโลหะพื้นฐานออกมาในรูปของสารละลาย ส่วนทองคำนั้นจะยังคงอยู่ในรูปของแข็ง 2) การบดลดขนาดของตัวอย่างให้มีขนาดเท่ากับ 425 ไมครอนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการชะละลาย 3) การชะละลายโลหะพื้นฐานและสิ่งปนเปื้อนอีกครั้งด้วยสารละลายของกรดไนตริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 33 4) การชะละลายของแข็งที่หลงเหลือซึ่งคาดว่าเป็นทองคำด้วยกรดกัดทองที่อุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป 5) การตกตะกอนทองคำด้วยเฟอร์รัสซัลเฟต

จากการศึกษาพบว่า การชะละลายทองคำที่เหมาะสมจะใช้ปริมาณกรดกัดทองเข้มข้นที่ 2 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง 1 กรัม และให้ร้อยละในการนำกลับทองคำสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 90 °C ในระยะเวลาชะละลาย 30 นาที

ปราโมทย์ ภูพานทอง (2011) ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของทองคำ ได้แก่ ปริมาณของกรดกัดทองต่อปริมาณทองคำ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และความเข้มข้นของกรดกัดทอง และปริมาณสารที่ใช้ตกตะกอนทองคำในกระบวนการชะละลายตัวอย่างทองคำและทองคำในโลหะผสมด้วยกรดกัดทอง

จากการศึกษาพบว่าปริมาณของกรดกัดทองที่เหมาะสมในการชะละลายเท่ากับ 5-6.7 มิลลิลิตรต่อปริมาณทองคำบริสุทธิ์ 1 กรัม และใช้กรดกัดทองปริมาณ 2.7-3.6 มิลลิลิตรต่อทองคำในโลหะผสม 1 กรัม

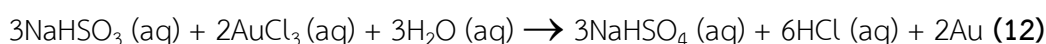
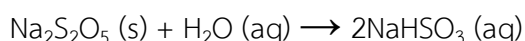
การทดลองเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในขั้นตอนการชะละลายพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การชะละลายเป็นไปได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น ทั้งนี้ไม่ควรเกิน 86 °C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่กรดไนตริกสามารถสลายตัวเป็นแก๊ส

การทดลองลดความเข้มข้นของกรดกัดทอง โดยความเข้มข้นประมาณร้อยละ 67 ทำให้ทองคำชะละลายได้เร็วขึ้นร้อยละ 3-6 เมื่อเทียบกับการชะละลายทองคำในกรดกัดทองเข้มข้น

การทดลองตกตะกอนทองคำด้วยสารประเภทซัลไฟด์ พบว่าโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์เป็นสารตกตะกอนประเภทสารประกอบซัลไฟด์ที่ใช้ปริมาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบสารประกอบซัลไฟด์ที่ใช้

ตกตะกอนชนิดอื่นๆ ได้แก่ โซเดียมไบซัลไฟต์ โซเดียมซัลไฟต์ โซเดียมโพลีซัลไฟต์ โดยใช้ในปริมาณ 3.1 กรัมต่อปริมาณทองคำที่ต้องการให้ตกตะกอน 4 กรัม

ปฏิกิริยาการตกตะกอนทองคำด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์หลังจากชะละลายด้วยกรดกัดทอง แสดงดังสมการที่ 12 (Sahan และ Drastinawati, 2016)



Zhang และคณะ (2012) ศึกษากระบวนการรีไซเคิลทองคำในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้ 1) การปรับสภาพขั้นต้นทางกายภาพและทางเคมี 2) การชะละลายทองคำด้วยสารเคมี 3) การตกตะกอนทองคำ 4) การทำให้ทองคำบริสุทธิ์ นอกจากนี้ศึกษาเปรียบเทียบสารเคมีที่ใช้ชะละลายทองคำโดยใช้เกณฑ์การพิจารณาแบบหลายเกณฑ์ (Multi-criteria decision analysis; MCDA) ซึ่งประกอบไปด้วย ปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์ ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านความปลอดภัยของการใช้งาน เพื่อเป็นเกณฑ์อ้างอิงในการเปรียบเทียบข้อได้เปรียบและข้อจำกัดระหว่างสารเคมีแต่ละชนิด

Petter และคณะ (2014) ศึกษาความสามารถในการชะละลายซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของโทรศัพท์ด้วยโซเดียมไทโอซัลเฟตและแอมโมเนียมไทโอซัลเฟต โดยเปรียบเทียบกับวิธีการชะละลายองค์ประกอบของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองซึ่งพบว่า สามารถชะละลายธาตุได้เฉลี่ยดังนี้ ทองคำ 880 ppm เงิน 272 ppm ทองแดงร้อยละ 37.6 ดีบุก 20.49 ppm นิกเกิล 23.44 ppm โดยน้ำหนัก และเปรียบเทียบกับวิธีการชะละลายซากแผงวงจรด้วยสารประกอบโซเดียมไนต์ที่ความเข้มข้นทางการค้าเท่ากับร้อยละ 6-8 พบว่าทองคำที่ชะละลายได้คิดเป็น 500 ppm โดยน้ำหนักหรือเท่ากับร้อยละ 60 ของปริมาณที่ชะละลายได้จากกรดกัดทอง

การศึกษาพบว่าทองคำสามารถนำกลับคืนจากการชะละลายซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของโทรศัพท์ได้เพียงแค่อ้อยละ 15 ในสารละลายที่มีโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 M มีแอมโมเนียมไทโอซัลเฟต 0.2 M และมีทองแดงในสารละลายอยู่ระหว่าง 0.015-0.03 M ส่วนเงินที่เป็นองค์ประกอบในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สามารถชะละลายได้ต่ำหรือน้อยกว่าร้อยละ 3 ของปริมาณเงินทั้งหมด

เมื่อเทียบกับการชะละลายซากแพลงจรรด้วยสารละลายกรดไนตริก ที่สามารถชะละลายเงินออกมาได้ทั้งหมดหรือคิดเป็น 3,494 ppm

Dehchenari และคณะ (2017) ศึกษาการสกัดทองคำจากซีพียู (CPU) ของคอมพิวเตอร์ ด้วยกระบวนการอย่างง่าย ประกอบด้วยขั้นตอนการศึกษา 6 ขั้นตอน ดังนี้ 1) บดให้มีขนาด 1 มิลลิเมตร 2) การชะละลายด้วยกรดไนตริก 3) การชะละลายด้วยกรดกัดทอง 4) การกำจัดกรดไนตริกส่วนเกิน 5) การตกตะกอนทองคำ และ 6) การล้างและทำทองคำให้บริสุทธิ์

ผลการวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ของทองคำด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES) พบว่า ในการชะละลายด้วยกรดไนตริกมีทองคำในสารละลาย 0.138 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการชะละลายครั้งที่สองด้วยกรดกัดทอง พบว่ามีทองคำในสารละลาย 31.16 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากชะล้างเอาสิ่งปนเปื้อนและตะกอนออกจากสารละลายพบว่า ทองคำในสารละลายมีความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร จากกระบวนการสกัดทองคำจากซีพียูของคอมพิวเตอร์สรุปได้ว่า สามารถนำทองคำกลับคืนได้ร้อยละ 82.3 ที่ความบริสุทธิ์ร้อยละ 83.9

ฉวีวรรณ และ ศรากร (2018) ศึกษาการรีไซเคิลทองคำจากซากชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารประกอบโซเดียมไนต์พบว่า ในสารละลายที่ใช้ชะละลายทองคำจะมีปริมาณโพแทสเซียมโซเดียมไนต์ 6 กรัมต่อลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร และใช้วิธีทางไฟฟ้าโดยใช้ขั้วลบเป็นฝอยเหล็กเพื่อให้ทองคำในสารละลายโซเดียมไนต์มาเกาะติด หลังจากนั้นนำฝอยเหล็กที่มีทองคำเกาะติดอยู่มาชะละลายด้วยกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 เพื่อให้เหล็กถูกชะละลายออกจากทองคำ ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำทองคำที่ได้มาถลุงที่อุณหภูมิ 1,200 °C และใส่ฟลักซ์ เช่น โซเดียมคาร์บอเนต บอแรกซ์ โซเดียมไนเตรตเพื่อให้โลหะปนเปื้อนถูกจับกับกลายเป็นแอสล็ก และยังทำให้ทองคำมีความบริสุทธิ์มากขึ้นอีกด้วย โดยรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2-11

ตารางที่ 2-11 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการรีไซเคิลโลหะพื้นฐานและโลหะมีค่าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และของเสียจากอุตสาหกรรม

งานวิจัย	ขอบเขตการศึกษา	รายละเอียดงานวิจัย	ผลการศึกษา
Brug และคณะ (1974)	ศึกษาการนำกลับคืนทองคำจากสารละลายกรดกัดทอง	วัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อทราบช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนทองคำในสารละลายกรดกัดทอง	ทองคำสามารถตกตะกอนจากสารละลายกรดกัดทองได้ดีในช่วงพีเอชประมาณ 2-4
McClelland และคณะ (1985)	ศึกษาการแยกทองคำจากขี้ฟอยเหล็ก	เพื่อทราบปริมาณกรดที่ใช้ในการแยกทองคำและเงินออกจากฟอยเหล็กที่ได้จากการแยกทางไฟฟ้า	ทองคำที่จับกับฟอยเหล็กสามารถละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 M ในสัดส่วน 10 ลิตรต่อ 1 กิโลกรัมของขี้ฟอยเหล็ก ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง
Mecucci และ Scott (2002)	ศึกษาการนำกลับคืนของตะกั่ว ดีบุก ทองแดง จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	นำทองแดง ตะกั่ว ดีบุกกลับคืนจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระบวนการละลายและกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้า	โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ 1) การตกตะกอนดีบุกในรูปแบบเกลือของกรดเมทาสแตนนิกที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกมากกว่า 4 โมลต่อลิตร แต่ยังคงหลงเหลือทองแดงและตะกั่วในรูปของสารละลาย 2) การแยกทองแดงด้วยการตกตะกอนทางไฟฟ้าจากสารละลายตะกั่วโดยควบคุมความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร ทำให้ทองแดงตกตะกอน ทั้งนี้ตะกั่วยังคงอยู่ในรูปของสารละลาย 3) การตกตะกอนตะกั่วด้วยวิธีทางไฟฟ้า โดยการปรับพีเอชให้แตกต่าง

ตารางที่ 2-11 (ต่อ) สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการรีไซเคิลโลหะพื้นฐานและโลหะมีค่าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และของเสียจากอุตสาหกรรม

งานวิจัย	ขอบเขตการศึกษา	รายละเอียดงานวิจัย	ผลการศึกษา
ปราโมทย์ ภูพานทอง (2002)	ศึกษาผลของ ตัวแปรต่อการ แยกทองคำ ทางไฟฟ้า	ตัวอย่างที่ศึกษาคือ น้ำยาลอกทองที่มี ทองคำปริมาณ 400 มิลลิลิตรต่อลิตร	จากการศึกษาพบว่าในถังทำ ปฏิกิริยาขนาด 20 ลิตรที่ใช้ในการ นำกลับคืนทองคำ ควรให้ระยะห่าง ของขั้วไฟฟ้าประมาณ 4-5 เซนติเมตร ใช้ฝอยเหล็กเป็นขั้วให้ ทองคำเกาะติดปริมาณ 100-120 กรัม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ 40-45 แอมแปร์ มีปริมาณโซเดียมไฮดรอก ไซด์เพื่อรักษาสภาพความเป็นต่าง ปริมาณ 20-30 กรัมต่อลิตร สามารถนำทองคำกลับคืนได้ร้อยละ 99.5 โดยใช้ระยะเวลา 120 นาที
Sheng และ Etsell (2007)	ศึกษาการ นำกลับ ทองคำจาก แผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยกรดกัด ทอง	มีขั้นตอนในการศึกษา ดังนี้ 1) ปรับสภาพด้วยกรด ไนตริก 2) บดลดขนาด 425 ไมครอน 3) ชะละลายด้วยกรดไน ตริกอีกครั้ง 4) ชะละลายของแข็งที่ หลงเหลือด้วยกรดกัด ทองที่อุณหภูมิและเวลา ที่แตกต่างกัน 5) ตกตะกอนทองคำ ด้วยเฟอร์รัสซัลเฟต	จากการศึกษาพบว่า 1) การชะละลายทองคำด้วยกรดกัด ทองที่เหมาะสม ใช้ปริมาณกรดกัดทองเข้มข้น 2 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง 1 กรัม 2) มีร้อยละในการนำกลับทองคำสูง ที่สุดที่อุณหภูมิ 90 °C ในระยะเวลา ชะละลาย 30 นาที

ตารางที่ 2-11 (ต่อ) สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการรีไซเคิลโลหะพื้นฐานและโลหะมีค่าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และของเสียจากอุตสาหกรรม

งานวิจัย	ขอบเขตการศึกษา	รายละเอียดงานวิจัย	ผลการศึกษา
ปราโมทย์ ภูพานทอง (2011)	ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของทองคำจากการชะละลายตัวอย่างทองคำและทองคำในโลหะผสม	ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ 1) ปริมาณของกรดกัดทองต่อปริมาณทองคำ 2) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 3) ความเข้มข้นของกรดกัดทอง 4) ปริมาณสารที่ใช้ตกตะกอนทองคำ	จากการศึกษาพบว่า 1) ปริมาณของกรดกัดทองที่เหมาะสมในการชะละลายทองคำบริสุทธิ์ เท่ากับ 5-6.7 มิลลิลิตรต่อปริมาณทองคำบริสุทธิ์ 1 กรัม และใช้กรดกัดทองปริมาณ 2.7-3.6 มิลลิลิตร ต่อทองคำในโลหะผสม 1 กรัม 2) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การชะละลายเป็นไปได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น ทั้งนี้ไม่ควรเกิน 86 °C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่กรดไนตริกสามารถสลายตัวเป็นแก๊ส 3) การลดความเข้มข้นของกรดกัดทอง โดยมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 67 ทำให้ทองคำละลายได้เร็วขึ้นร้อยละ 3-6 4) สารโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เป็นสารตกตะกอนที่ใช้ปริมาณน้อยที่สุดซึ่งอุณหภูมิจะไม่มีผลในการตกตะกอนถ้าความเข้มข้นของทองในสารละลายน้อยกว่าร้อยละ 2.66

ตารางที่ 2-11 (ต่อ) สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการรีไซเคิลโลหะพื้นฐานและโลหะมีค่าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และของเสียจากอุตสาหกรรม

งานวิจัย	ขอบเขตการศึกษา	รายละเอียดงานวิจัย	ผลการศึกษา
Zhang และคณะ (2012)	ศึกษากระบวนการรีไซเคิลทองคำในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	1) รวบรวมปริมาณทองคำในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 2) รวบรวมการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	ขั้นตอนการรีไซเคิลทองคำจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้ 1) การปรับสภาพขั้นต้นทางกายภาพและทางเคมี 2) การชะละลายทองคำด้วยสารเคมี 3) การตกตะกอนทองคำ 4) การทำให้ทองคำบริสุทธิ์
Petter และคณะ (2014)	ศึกษาความสามารถในการชะละลายซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของโทรศัพท์ด้วยโซเดียมไทโอซัลเฟตและแอมโมเนียมไทโอซัลเฟต	ศึกษาเปรียบเทียบกับการชะละลายทองคำจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองและสารประกอบโซเดียมไทโอซัลเฟตและเปรียบเทียบกับการชะละลายเงินด้วยกรดไนตริก	จากการศึกษาพบว่า ในสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตสามารถชะละลายทองคำได้ร้อยละ 60 ขณะที่ สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตและแอมโมเนียมไทโอซัลเฟตสามารถชะละลายทองคำได้เพียงร้อยละ 15 และชะละลายเงินได้น้อยกว่าร้อยละ 3 เมื่อเทียบกับปริมาณเงินที่ชะละลายได้ในกรดไนตริก

ตารางที่ 2-11 (ต่อ) สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการรีไซเคิลโลหะพื้นฐานและโลหะมีค่าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และของเสียจากอุตสาหกรรม

งานวิจัย	ขอบเขตการศึกษา	รายละเอียดงานวิจัย	ผลการศึกษา
Dehchenari และคณะ (2017)	ศึกษาการสกัดทองคำจากซีพียูของคอมพิวเตอร์ด้วยกระบวนการอย่างง่าย	มีขั้นตอนในการศึกษา ดังนี้ 1) บดลดขนาด 2) ชะละลายด้วยกรดไนตริก 3) ชะละลายด้วยกรดกัดทอง 4) กำจัดกรดไนตริกส่วนเกิน 5) ตกตะกอนทองคำ 6) ล้างและทำทองคำให้บริสุทธิ์และวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma (ICP-OES)	จากการศึกษาพบว่า 1) การชะละลายด้วยกรดไนตริกพบว่า มีทองคำในสารละลาย 0.138 มิลลิกรัมต่อลิตร 2) การชะละลายด้วยกรดกัดทองพบว่า มีทองคำในสารละลาย 31.16 มิลลิกรัมต่อลิตร 3) สามารถนำทองคำกลับคืนจากซีพียูได้ร้อยละ 82.3 ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 83.9

ตารางที่ 2-11 (ต่อ) สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการรีไซเคิลโลหะพื้นฐานและโลหะมีค่าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และของเสียจากอุตสาหกรรม

งานวิจัย	ขอบเขตการศึกษา	รายละเอียดงานวิจัย	ผลการศึกษา
ฉวีวรรณ และศรากร (2018)	ศึกษาการรีไซเคิลทองคำจากซากชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลาย	การศึกษาแสดงให้เห็นถึงปริมาณสารที่ใช้ในกระบวนการรีไซเคิลทองคำที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายและแยกทองคำทางไฟฟ้า	จากการศึกษาพบว่า 1) ในการเตรียมสารชะละลายเพื่อทองคำจะต้องใช้โพแทสเซียมไซยาไนด์ปริมาณ 6 กรัมต่อลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร 2) สามารถแยกทองคำจากสารชะละลายไซยาไนด์ได้โดยการแยกทางไฟฟ้าและตะกอนทองคำจะไปติดบนขั้วที่เป็นฟอยเหล็ก 3) สามารถแยกทองคำจากฟอยเหล็กด้วยการชะละลายด้วยกรดซัลฟูริก ความเข้มข้นร้อยละ 10 4) สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของทองคำได้ด้วยการนำไปถลุง

2.9.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปรียบเทียบสารชะละลายทองคำ

Zhang และคณะ (2012) ศึกษาเปรียบเทียบปัจจัยที่ส่งผลถึงความเหมาะสมของสารเคมีในการชะละลายทองคำ ดังนี้ เปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ได้แก่ ประสิทธิภาพในการชะละลาย ราคาของสารชะละลายและการกัดกร่อนของสารชะละลาย เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากความเป็นพิษของสารเคมี และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเคมี โดยอาศัยวิธีการตัดสินใจแบบการพิจารณาหลายเกณฑ์ (Multi-criteria decision analysis; MCDA) แสดงดังภาพที่ 2-9 และ 2-10 ในการเปรียบเทียบสารเคมีที่ใช้ชะละลายทองคำเพื่ออธิบายลักษณะการใช้งาน ข้อดีข้อจำกัดของสารชะละลายทองคำได้ดังนี้

1) โซยาไนต์ เป็นสารชะละลายทองคำที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เนื่องจากใช้ปริมาณที่ชะละลายทองคำน้อยกว่าสารชะละลายชนิดอื่น โซยาไนต์สามารถรวมตัวกับทองคำในรูปสารประกอบได้ดีที่พีเอชประมาณ 10 แสดงดังสมการที่ 13 (Chauhan และคณะ, 2018)



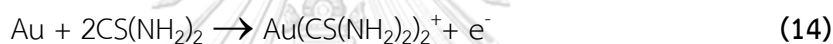
แม้ว่าโซยาไนต์เป็นสารชะละลายที่มีความเจาะจงในการชะละลายทองคำและเงิน แต่ประสิทธิภาพของการชะละลายจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของทองคำกับโซยาไนต์ด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ยังมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นก็จะสามารถชะละลายได้ดีขึ้น และถึงแม้ว่าโซยาไนต์จะเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมเหมืองแร่เนื่องจากความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ แต่ถ้าอุตสาหกรรมมีการจัดการที่ไม่เหมาะสม ก็อาจพบปัญหาด้านน้ำเสียที่ปนเปื้อนโซยาไนต์ได้เช่นกัน ซึ่งเมื่อน้ำเสียเหล่านั้นอยู่ในสถานะที่พีเอชต่ำกว่า 8.5 จะทำให้โซยาไนต์จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแก๊สไฮโดรเจนโซยาไนต์ซึ่งมีความเป็นพิษสูงและส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ

โดยโซยาไนต์จะทำให้เกิดผลกระทบชั้นเฉียบพลัน และเข้าสู่ร่างกายผ่านการสูดดม การสัมผัส การกินและซึมผ่านผิวหนัง ทำให้เกิดอาการหายใจติดขัด ปวดหัวใจ อาเจียน ปวดศีรษะ ต่อมไทรอยด์ขยายตัว เมื่อได้รับเข้าไปปริมาณมากจะมีฤทธิ์ยับยั้งการหายใจในระดับเซลล์และทำให้เสียชีวิตได้ (ปรีชา จารุวาระกุล, 2550)

2) ไทโอยูเรีย (Thiourea; $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$) หรือซัลฟูไรด์ ยูเรีย (sulfurized urea) ถูกสังเคราะห์ในปี 1868 เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีความสามารถในการจับตัวกับโลหะเป็นสารประกอบที่พีเอช

ต่ำ สำหรับการชะละลายทองคำ ไทโอยูเรียจะจับตัวกับทองคำในรูปสารละลายโดยมีไอออนของเหล็กเป็นตัวออกซิไดซ์ ในขณะเดียวกัน ไทโอยูเรียจะแตกตัวออกเป็นซัลไฟด์ (Sulfide) และไซยานาไมด์ (Cyanamide) ในสถานะที่เป็นเบส โดยไซยานาไมด์สามารถเปลี่ยนรูปเป็นยูเรียและถูกออกซิไดซ์พร้อมสลายตัวเป็นไดซัลไฟด์ฟอร์มามิดีน (disulfide formamidine) ธาตุซัลเฟอร์ และสารประกอบอื่น ๆ ในพีเอชที่ต่ำ

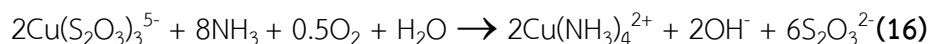
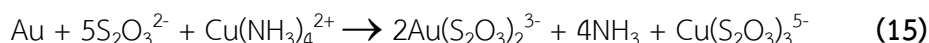
โดยไดซัลไฟด์ฟอร์มามิดีนเป็นผลผลิตตัวแรกของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ทำให้การชะละลายทองคำเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว แต่การเพิ่มขึ้นไดซัลไฟด์ฟอร์มามิดีนจะทำให้ปฏิกิริยาไม่สามารถย้อนกลับได้ เกิดธาตุซัลเฟอร์ไปเกาะบนผิวของทองคำซึ่งส่งผลต่อการชะละลายทองคำได้น้อยลง ขณะที่ไทโอยูเรียปริมาณมากก็ถูกออกซิไดซ์ไปด้วย ไทโอยูเรียจึงไม่เหมาะสมในการชะละลายทองคำที่พีเอชต่ำกว่า 10 แสดงดังสมการที่ 14 (Chauhan และคณะ., 2018)



ไทโอยูเรียเป็นสารชะละลายที่มีข้อดีคือ สามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าไซยาไนด์ มีความเป็นพิษต่ำ มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่มีข้อจำกัดทางด้านราคาที่สูงกว่าไซยาไนด์ เนื่องจากสามารถถูกออกซิไดซ์ในสารละลายได้ง่ายและใช้ปริมาณมาก อีกทั้งกระบวนการแยกทองคำออกจากไทโอยูเรียให้มีประสิทธิภาพยังอยู่ในช่วงต้นของการศึกษาวิจัย

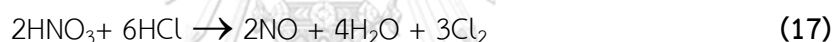
3) ไทโอซัลเฟต (Thiosulfate; $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) เป็นสารชะละลายทองคำที่สามารถจะจับตัวกับทองคำเป็นสารประกอบได้ดีโดยอาศัยออกซิเจน และสามารถคงตัวในสถานะที่เป็นเบสเนื่องจากสารที่เกิดจากการออกซิไดซ์ของไทโอซัลเฟต เตตระไทโอเนต (Tetrathionate) จะสามารถแปลงกลับมาเป็นไทโอซัลเฟตและชะละลายทองคำได้อีกครั้ง แต่ถ้าในสารละลายมีพีเอชสูงเกินไปจะทำให้ไอโอซัลเฟตสลายตัวได้เช่นกัน

การชะละลายทองคำด้วยไทโอซัลเฟตจะต้องอยู่ในสารละลายแอมโมเนียเนื่องจากแอมโมเนียจะทำปฏิกิริยากับทองคำกลายเป็นสารประกอบกับแอมโมเนีย ($\text{Au}(\text{NH}_3)^+$) หลังจากนั้นซัลเฟตไอออนจะไปแทนที่แอมโมเนียจับตัวเป็นสารประกอบกับซัลไฟด์ ($\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$) ที่มีเสถียรภาพมากขึ้น โดยอัตราการชะละลายทองคำของไทโอซัลเฟตจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นไอออนของทองแดง และแอมโมเนียในสารละลาย แสดงดังสมการที่ 15-16 (Chauhan และคณะ., 2018)



การใช้ไทโอซัลเฟตมีข้อดีคือ มีความจำเพาะเจาะจงต่อทองคำ ไม่มีความเป็นพิษและไม่กัดกร่อน แต่มีข้อจำกัดในด้านปริมาณชะละลาย โดยมีอัตราในการสูญเสียไทโอซัลเฟตสูงถึงร้อยละ 50 และอัตราการชะละลายของไทโอซัลเฟตขึ้นกับความเข้มข้นของแอมโมเนียและไอออนของทองแดงในสารละลาย จึงทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เมื่อต้องเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง

4) สารเคมีประเภทเฮไลด์ (Halide) ได้แก่ คลอไรด์ โบรไมด์ และไอโอดีน ซึ่งสารจำพวกคลอไรด์ที่นิยมใช้ในการทำทองคำให้บริสุทธิ์คือ กรดกัดทองซึ่งเกิดจากการผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก 3 ส่วน และกรดไนตริก 1 ส่วน โดยกรดกัดทองจะมีข้อจำกัดในการใช้งาน ดังนี้ แก๊สคลอรีนที่มีความเป็นพิษสูงที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างกรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริก แสดงดังสมการที่ 17-18 (Sheng และ Etsell, 2007)

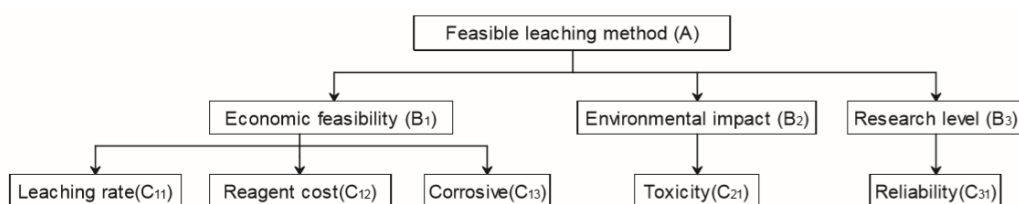


การใช้สารประเภทคลอไรด์จำเป็นต้องได้รับการควบคุมที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะเกิดขึ้นต่อความปลอดภัยและสุขอนามัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการชะละลายจำเป็นต้องทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหรืออุปกรณ์หุ้มยางที่สามารถต้านทานสภาวะการกัดกร่อนที่สูง

ทั้งนี้ การชะละลายทองคำด้วยไอโอดีนมีการพัฒนาให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น ใช้ปริมาณน้อยลง การเตรียมไอโอดีน (I₂) ไม่มีความซับซ้อนโดยเตรียมด้วยการรีดิวซ์ไอโอดีน (I₂) และเมื่อทองคำถูกชะละลายด้วยไอโอดีนแล้วจะสามารถแยกด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าต่อไปได้ การใช้ไอโอดีนมีข้อดีคือเป็นสารละลายไม่กัดกร่อน ไม่เป็นพิษ ไอโอดีนทำให้สารประกอบของทองคำค่อนข้างคงตัว แต่มีข้อจำกัดในด้านปริมาณที่ใช้ ราคาสูง จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพื่อพัฒนากระบวนการแยกทองคำออกจากสารละลายในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

จากการศึกษาความเหมาะสมต่อการชะละลายทองคำอ้างอิงจากการพิจารณาแบบหลายเกณฑ์ (Multi-criteria decision analysis; MCDA) แสดงดังภาพที่ 2-11 ได้ประเมินความเหมาะสม

เป็นคะแนนเต็มทั้งหมด 5 คะแนน โดยเรียงลำดับความเหมาะสมในการชะละลายทองคำจากมากไปน้อย ดังนี้ โซยาไนต์ ไทโอยูเรีย ไอโอไดต์ กรดกัดทอง คลอไรด์ ไทโอซัลเฟตและโบรมไต์ ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 2-12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าโซยาไนต์เป็นสารชะละลายที่มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และมีประสิทธิภาพที่ดี ผ่านการศึกษาและใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งนี้ ความเป็นพิษของโซยาไนต์เป็นข้อจำกัดในการใช้งาน



ภาพที่ 2-9 ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินความเหมาะสมของสารชะละลายทองคำ
(ที่มา: Zhang และคณะ 2012)

Evaluation index	Leaching rate (C ₁₁)	Reagent cost (C ₁₂)	Corrosive (C ₁₃)	Toxicity (C ₂₁)	Reliability (C ₃₁)
Weight	0.054	0.394	0.179	0.087	0.286

ภาพที่ 2-10 ค่าคงที่ของปัจจัยที่ส่งผลถึงความเหมาะสมในการชะละลายทองคำ
(ที่มา: Zhang และคณะ 2012)

Leaching method	Economic feasibility			Environmental impact	Research level
	Leaching rate	Reagent cost	Corrosive	Toxicity	Reliability
Cyanide	3	5	5	0	5
Aqua regia	4	4	0	3	5
Thiourea	4	4	4	4	4
Thiosulfate	2	2	5	4	2
Chloride	5	4	0	3	4
Bromide	5	2	2	3	2
Iodide	5	3	5	5	3

ภาพที่ 2-11 คะแนนในแต่ละปัจจัยของสารชะละลายทองคำแต่ละชนิด
(ที่มา: Zhang และคณะ 2012)

Leaching method	Cyanide	Aqua regia	Thiourea	Thiosulfate	Chloride	Bromide	Iodide
Scores	4.457	3.483	4.000	2.711	3.251	2.249	3.640

ภาพที่ 2-12 คะแนนสุทธิตามความเหมาะสมในการชะละลายทองคำของสารชะละลาย
(ที่มา: Zhang และคณะ 2012)

โดยรายละเอียดของลักษณะการใช้งาน ข้อดีและข้อจำกัดของสารละลายทองคำชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2-12

ตารางที่ 2-12 ลักษณะการใช้งาน ข้อดีและข้อจำกัดของสารชะละลายทองคำชนิดต่างๆ

สารชะละลาย	ลักษณะการใช้งาน/ข้อดี	ข้อจำกัด	คะแนน
ไซยาไนด์	1) ใช้สารปริมาณน้อย 2) ใช้งานได้ดีที่พีเอช 10 3) จำเพาะต่อสารชะละลายโลหะมีค่า	1) ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัส 2) เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม	4.457
ไทโอยูเรีย	1) มีความเป็นพิษต่ำ 2) ประสิทธิภาพสูง	1) ไม่คงตัวในสถานะที่เป็นเบส 2) เกิดธาตุซัลเฟอร์เกาะที่ผิวของทองคำซึ่งขัดขวางการชะละลาย 3) ใช้ปริมาณมาก 4) ราคาแพง	4.000
ไอโอไดด์	1) ไม่เป็นพิษและไม่กัดกร่อน 2) สารประกอบค่อนข้างคงตัว	1) ราคาสูง 2) ใช้สารปริมาณมาก	3.640
กรดกัดทอง	1) หาได้ง่าย เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย 2) เกิดจากการผสมของกรดไฮโดรคลอริกและกรดไนตริก	ใช้อุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมและอุปกรณ์หุ้มที่สามารถต้านทานสถานะการกัดกร่อนสูงได้	3.483
คลอไรด์	1) ถูกใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย	ใช้อุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมและอุปกรณ์หุ้มที่สามารถต้านทานสถานะการกัดกร่อนสูงได้	3.251
ไทโอซัลเฟต	1) จำเพาะต่อการชะละลายทองคำ 2) ไม่มีความเป็นพิษและไม่กัดกร่อน	1) ใช้สารปริมาณมาก 2) มีการสูญเสียไทโอซัลเฟตมากถึงร้อยละ 50 3) อัตราการชะละลายขึ้นกับความเข้มข้นของแอมโมเนียและไอออนของทองแดงในสารละลาย 4) ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่ำ	2.711
โบรไมด์	-	1) ไม่นิยมใช้ในกระบวนการชะละลาย	2.249

(ที่มา: Zhang และคณะ 2012)

2.9.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผังการไหล

Chancerel และคณะ (2009) ศึกษาและจัดทำผังการไหลของโลหะมีค่าได้แก่ ทองคำ เงิน แพลเลเดียมที่เป็นองค์ประกอบในซากอิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์ คีย์บอร์ด วิทยุ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้ 1) จัดเตรียมซากอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทำการทดลองหาโลหะมีค่าที่เป็นองค์ประกอบภายในของซากอิเล็กทรอนิกส์ 2) ทดลองโดยตัดแยกประเภทตัวอย่าง บดหยาบ บดละเอียดและแยกโลหะด้วยเครื่องอัตโนมัติ 3) วิเคราะห์โลหะมีค่าจากตัวอย่างที่มีการบดละเอียด ด้วยวิธีเครื่อง Inductively coupled plasma - atomic emission spectrometry (ICP-AES) โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างก่อนบดที่ได้จากการประเมินปริมาณของโลหะก่อนทำการทดลอง ทั้งนี้มีการอ้างอิงข้อมูลทางสถิติด้านปริมาณองค์ประกอบเพื่อประเมินโลหะมีค่าภายในซากอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นนอกเหนือจากซากอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการทดลอง 4) วิเคราะห์ผังการไหลของปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์และธาตุที่เป็นองค์ประกอบด้วยโปรแกรม STAN พร้อมแสดงผลด้วย Sankey diagrams

ผลการทดลองบดละเอียดเพื่อแยกและนำไปวิเคราะห์พบว่า โลหะมีค่าเช่น ทองคำและแพลเลเดียมสามารถนำกลับคืนได้เพียงร้อยละ 25 เงินสามารถนำกลับคืนได้เพียงร้อยละ 10 เนื่องจากโลหะมีค่าจะปะปนไปกับชิ้นส่วนพลาสติกและเหล็ก ส่วนโลหะพื้นฐาน เช่น เหล็ก อลูมิเนียม ทองแดงสามารถนำกลับคืนได้มากกว่า ผลการศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาเพิ่มเติมที่อธิบายถึงความละเอียดของการบดผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีโลหะมีค่าและส่วนประกอบที่มีโลหะพื้นฐานปะปนกัน สรุปได้ว่าเมื่อมีการบดให้ละเอียดมากขึ้นก็จะเพิ่มโอกาสที่โลหะมีค่าจะปะปนไปกับชิ้นส่วนที่เป็นพลาสติกและเหล็กมากขึ้น

Chancerel (2010) ศึกษาผังการไหลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กและผังการไหลของทองคำและแพลเลเดียมที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในประเทศสหรัฐอเมริกาและเยอรมัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการฝังกลบ เพิ่มสัดส่วนการรีไซเคิลของซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ลดการใช้ทรัพยากรในการผลิตวัสดุใหม่ ลดผลกระทบจากการนำขยะในหลุมฝังกลบ และมลพิษและตระกรันจากการเผากำจัด

การศึกษาแบ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ออกเป็นประเภท ดังนี้ คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ จอภาพ CRT อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดใหญ่และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มี

สัดส่วนของโลหะมีค่าต่ำ โดยดำเนินการวิเคราะห์ผังการไหลจากการรวบรวมและจำแนกข้อมูล ออกเป็นสัดส่วนการใช้ซ้ำ สัดส่วนการเก็บรวบรวมที่ไม่ได้รับการคัดแยก และสัดส่วนการรวบรวมซาก อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการคัดแยกซึ่งแบ่งย่อยอีก 2 ประเภท คือ การรีไซเคิลที่ได้รับการขึ้นทะเบียน และไม่ได้รับการขึ้นทะเบียนต่อภาครัฐ

จากการศึกษาพบว่า ผังการไหลสามารถแสดงให้เห็นถึงทองคำและแพลเลเดียมที่สูญเสียไป ระหว่างกระบวนการรีไซเคิล กล่าวคือ กระบวนการรีไซเคิลที่เกิดขึ้นในประเทศเยอรมนีสูญเสียทองคำ และแพลเลเดียมร้อยละ 72 กระบวนการรีไซเคิลที่เกิดขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกาสูญเสียทองคำและแพลเลเดียมร้อยละ 75 ซึ่งไม่ได้เป็นผลจากเทคโนโลยีในการนำกลับคืน แต่เป็นผลมาจากการรวบรวม และการคัดแยกเบื้องต้นที่ไม่มีประสิทธิภาพมากพอสำหรับการแยกประเภทของอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ โดยจะทำให้ประสิทธิภาพของการรีไซเคิลโลหะมีค่าลดลงไปด้วย และจากการศึกษา ปริมาณของซากอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นต่อแรงจูงใจของผู้บริโภคในการคัดแยกซากอิเล็กทรอนิกส์ พบว่า ปริมาณของซากอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มสูงขึ้นไม่สามารถสร้างแรงจูงใจในการรีไซเคิลได้ การแสดงให้เห็นถึงผังการไหลของโลหะมีค่าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้น จะเป็นการสร้างแรงจูงใจที่ดีต่อ ผู้บริโภคในการคัดแยกและเห็นความสำคัญของซากอิเล็กทรอนิกส์ได้ อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการ สร้างมาตรการเกี่ยวกับการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของผู้ผลิตให้ง่ายต่อการรีไซเคิลมากขึ้น เพิ่มอายุการใช้งานของอิเล็กทรอนิกส์ สร้างฐานข้อมูลให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสำหรับแก้ปัญหาซาก อิเล็กทรอนิกส์ และเป็นแบบแผนในการรวบรวมปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์ในระดับประเทศ ภูมิภาค ต่อไป

Gorauskiene และ Stasiskiene (2010) ศึกษาผังการไหลของการจัดการซาก อิเล็กทรอนิกส์ในประเทศลิทัวเนีย ครอบคลุมตั้งแต่การกลายเป็นซากอิเล็กทรอนิกส์จนถึงการจัดการ ซากอิเล็กทรอนิกส์ ประเมินอุปสรรคของแต่ละขั้นตอนในการจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อแก้ไข ปัญหาซากอิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นระบบ โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการวิเคราะห์ผังการไหลของการ จัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ อ้างอิงข้อมูลระหว่างปี 2006-2008 และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม STAN

จากการศึกษาพบว่าประเทศลิทัวเนียมีปัญหาด้านการจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ ดังนี้

- 1) ประเทศลิทัวเนียยังมีข้อจำกัดด้านการรวบรวมซากอิเล็กทรอนิกส์ของหน่วยงานที่มีหน้าที่ รับผิดชอบ ทำให้ซากอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นมีเพียง 1 ใน 3 ที่ถูกจัดการในโรงงานที่ได้รับการขึ้น

ทะเบียน 2) ประเทศลิทัวเนียไม่มีหน่วยงานในการรับซื้ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถนำไปใช้ซ้ำได้ ทำให้ซากอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกกำจัดในหลุมฝังกลบส่วนมากไม่ได้รับการคัดแยกเพื่อการใช้ประโยชน์สูงสุด

ทั้งนี้ การวิเคราะห์ผังการไหลเป็นการนำข้อมูลด้านปริมาณของซากอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศที่ได้จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องมาวิเคราะห์เพื่อให้เห็นแนวโน้มของปริมาณที่เกิดขึ้น ทราบถึงช่องว่างของการจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ และเห็นถึงปัญหาในแต่ละกระบวนการได้ชัดเจน

Steubing และคณะ (2010) ศึกษาและจัดทำผังการไหลของปริมาณซากคอมพิวเตอร์ที่เพิ่มขึ้นในประเทศชิลี มีจุดประสงค์เพื่อสร้างฐานข้อมูลด้านปริมาณของคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ คอมพิวเตอร์แบบพกพา จอภาพ CRT และจอภาพ LCD ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินการศึกษาดังนี้

1) รวบรวมข้อมูลด้านปริมาณการนำเข้า ชื่อขาย จาก Chilean custom database และ International data corporation และรวบรวมข้อมูลเชิงสถิติจากการทำแบบสอบถามกับผู้บริโภคเพื่อทราบสัดส่วนการใช้ซ้ำ เก็บรวบรวม และทิ้งเป็นซาก เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มด้านปริมาณของซากอิเล็กทรอนิกส์ที่จะเกิดขึ้นตั้งแต่ปี 2010-2020

2) วิเคราะห์ผังการไหลแบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษา คือ กรณีปริมาณที่รวบรวมได้ในปี 1994-2008 กรณีแนวโน้มของปริมาณลดลงในปี 2009-2020 กรณีแนวโน้มของปริมาณเพิ่มขึ้นในปี 2009-2020

ผลการศึกษาด้านปริมาณในปี 2020 พบว่า มีการคาดการณ์ว่าปริมาณซากคอมพิวเตอร์และจอภาพจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า จาก 10,000 ตัน เป็น 20,000 ซึ่งแนวโน้มด้านปริมาณจะลดลงหรือเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่ออายุการใช้งานของคอมพิวเตอร์เปลี่ยนแปลงไป ด้านน้ำหนักของอุปกรณ์มีแนวโน้มที่จะลดลง สวนทางกับจำนวนของอุปกรณ์ที่ผลิตจะเพิ่มขึ้นเป็น 5 เท่าในปี 2010-2020 เมื่อเทียบกับปี 2000-2009 ซึ่งเห็นได้ชัดจากการเปลี่ยนไปใช้จอภาพ LCD ที่มีน้ำหนักน้อยกว่าแทนการใช้จอภาพ CRT ที่มีน้ำหนักมากกว่า

ผลการวิเคราะห์ผังการไหลของปริมาณคอมพิวเตอร์และจอภาพพบว่า คอมพิวเตอร์ที่ผ่านการใช้งานครั้งแรกมาจาก 3 ส่วน ได้แก่ ภาครัฐ ผู้บริโภค และธุรกิจขนาดใหญ่ และถูกนำไปใช้ซ้ำโดย

ผู้ใช้งานลำดับที่ 2 ได้แก่ ผู้บริโภค คริวเรือนและธุรกิจขนาดเล็ก จึงทำให้สรุปได้ว่า หากมีการดำเนินการโครงการเรียกคืนซากอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการรีไซเคิล ควรออกแบบให้เกิดแรงจูงใจในการร่วมมือของภาคคริวเรือนและธุรกิจขนาดเล็กเป็นสำคัญ โดยการวิเคราะห์ผังการไหล จะแสดงให้เห็นถึงกระบวนการตัดสินใจของผู้บริโภคในการเก็บรวบรวม ใช้ซ้ำ หรือทิ้งซากและยังสามารถนำข้อมูลมาคาดการณ์ซากอิเล็กทรอนิกส์ที่จะเกิดขึ้นทั้งหมดในอนาคตได้

Lau และคณะ (2013) ศึกษาผังการไหลของเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 5 ชนิด ได้แก่ โทรทัศน์ เครื่องซักผ้า เครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น และคอมพิวเตอร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างฐานข้อมูลให้กับโครงการเรียกคืนเครื่องใช้ไฟฟ้าในประเทศฮ่องกง (Producer responsibility scheme; PRS) ดำเนินการศึกษาโดยจัดทำแบบสอบถาม 2 ชุด เพื่อทราบข้อมูลการเกิดซากอิเล็กทรอนิกส์และการรีไซเคิล ชุดคำถามที่ 1 เป็นการทำแบบสอบถามกับกลุ่มประชากรจำนวน 1230 ชุด เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการจัดการของเสีย ชุดคำถามที่ 2 เป็นการทำแบบสอบถามกับกลุ่มประชากรเกี่ยวกับซากอิเล็กทรอนิกส์ที่ส่งกำจัดกับผู้ประกอบกิจการด้านการขนส่งซากไปทำการรีไซเคิลภายในและนอกประเทศ และมีการลงพื้นที่สำรวจเพิ่มเติมเพื่อให้ทราบรูปแบบการขนส่งซากอิเล็กทรอนิกส์ไปกำจัดเนื่องจากผู้ประกอบกิจการด้านการขนส่งส่วนใหญ่ไม่ได้รับการขึ้นทะเบียนกับภาครัฐ

ผลการศึกษาการวิเคราะห์ผังการไหลภายในประเทศพบว่า เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ทั้ง 5 ชนิด ร้อยละ 80 หรือ 65,000 ตันต่อปี จะถูกขายให้กับผู้รวบรวมและส่งออกไปยังประเทศกำลังพัฒนาเพื่อการรีไซเคิลต่อไป ในขณะที่หน่วยงานที่รับผิดชอบด้านการจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์สามารถรวบรวมซากได้น้อยกว่าร้อยละ 40 ซึ่งหากมีการเริ่มดำเนินโครงการเรียกคืนซากอิเล็กทรอนิกส์หลังหมดอายุ จำเป็นต้องขยายโรงงานบริหารจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ภายในประเทศเป็น 30,000 ตันต่อปี จำนวน 2 โรงงานเป็นอย่างต่ำเพื่อให้สามารถรองรับซากอิเล็กทรอนิกส์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ทั้งนี้จำเป็นต้องสร้างแรงจูงใจต่อประชาชนอย่างสม่ำเสมอเมื่อเริ่มดำเนินโครงการ

โดยรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผังการไหล แสดงดังตารางที่ 2-13

ตารางที่ 2-13 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผังการไหล

งานวิจัย	ขอบเขตการศึกษา	รายละเอียดงานวิจัย	ผลการศึกษา
Chancerel และคณะ (2009)	ศึกษาและจัดทำผังการไหลของโลหะมีค่า ได้แก่ ทองคำ เงิน แพลเลเดียมที่เป็นองค์ประกอบในซากอิเล็กทรอนิกส์ที่สนใจ ได้แก่ วิทยุคอมพิวเตอร์ คีย์บอร์ด และเครื่องพิมพ์	มีขั้นตอนในการศึกษา ดังนี้ 1) ทดลองเพื่อหาโลหะมีค่าที่เป็นองค์ประกอบของซาก 2) ทำการตัดแยก บดหยาบ บดละเอียดและแยกโลหะด้วยเครื่องแยกอัตโนมัติ 3) วิเคราะห์โลหะมีค่าโดยใช้เครื่อง ICP-AES ซึ่งเปรียบเทียบกับตัวอย่างก่อนบดที่ได้จากประเมินปริมาณของโลหะก่อนทำการทดลอง 4) วิเคราะห์ผังการไหลของปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์และปริมาณโลหะมีค่าที่เป็นองค์ประกอบภายในด้วยโปรแกรม STAN พร้อมแสดงผลด้วย Sankey diagrams	1) การบดลดขนาดและคัดแยกด้วยเครื่องแยกอัตโนมัติพบว่า โลหะมีค่าจะปะปนไปกับชิ้นส่วนพลาสติกและเหล็ก ทำให้สามารถรีไซเคิลได้ในสัดส่วนที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับโลหะพื้นฐาน เช่น เหล็ก อลูมิเนียม ทองแดง ที่สามารถรีไซเคิลได้มากกว่า
Chancerel (2010)	ศึกษาผังการไหลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กและผังการไหลของการรีไซเคิล แพลเลเดียมและทองคำในประเทศสหรัฐอเมริกาและเยอรมัน	มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ทราบสัดส่วนการใช้ซ้ำ 2) ทราบสัดส่วนการเก็บรวบรวมซากอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ได้รับการตัดแยก 3) ทราบสัดส่วนการรวบรวมซากอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการตัดแยก โดยแบ่งออกเป็นกระบวนการรีไซเคิลที่ได้รับการขึ้นทะเบียนและไม่ได้รับการขึ้นทะเบียนต่อภาครัฐ	จากการศึกษาพบว่าการรวบรวมและการตัดแยกประเภทเครื่องใช้ไฟฟ้าเบื้องต้นที่ไม่มีประสิทธิภาพจะส่งผลถึงกระบวนการรีไซเคิลโลหะมีค่าซึ่งเป็นกระบวนการต่อเนื่องกัน ให้มีประสิทธิภาพลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 2-13 (ต่อ) สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผังการไหล

งานวิจัย	ขอบเขตการศึกษา	รายละเอียดงานวิจัย	ผลการศึกษา
Gurauskiene และ Stasiskiene (2010)	ศึกษาผังการไหลของการจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศลิทัวเนีย ครอบคลุมตั้งแต่การกลายเป็นซากจนถึงการจัดการซาก	ดำเนินการวิเคราะห์ผังการไหลของการจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศลิทัวเนีย อ้างอิงข้อมูลระหว่างปี 2006-2008 โดยใช้โปรแกรม STAN ในการวิเคราะห์	จากการศึกษาพบว่า 1) ซากอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นมีเพียง 1 ใน 3 ที่ถูกจัดการในโรงงานที่ได้รับการขึ้นทะเบียน และมีผลถึงการรวบรวมซากอิเล็กทรอนิกส์ 2) การวิเคราะห์ผังการไหลจะทำให้เห็นช่องว่างของการจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์
Steubing และคณะ (2010)	ศึกษาผังการไหลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในประเทศชิลี ได้แก่ คอมพิวเตอร์แบบพกพา คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ จอภาพ CRT จอภาพ LCD และวิเคราะห์แนวโน้มด้านปริมาณที่จะเกิดขึ้นในปี 2010-2020	มีขั้นตอนในการศึกษาดังนี้ 1) รวบรวมข้อมูลด้านปริมาณนำเข้า ซื้อมาจาก Chilean Custom Database และ International Data Corporation ระหว่างปี 1994-2008 2) จัดทำแบบสอบถามกับผู้บริโภคเพื่อทราบสัดส่วนการใช้ซ้ำ เก็บรวบรวม และทิ้งเป็นซาก	จากการศึกษาพบว่า 1) ปริมาณซากคอมพิวเตอร์และจอภาพจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า จาก 10,000 ตัน ไปเป็น 20,000 ในปี 2020 2) การผลิตจะเพิ่มขึ้นเป็น 5 เท่าในปี 2010-2020 เมื่อเทียบกับปี 2000-2009 3) คอมพิวเตอร์ที่ผ่านการใช้งานครั้งแรกจาก 3 ส่วน ได้แก่ ภาครัฐ ผู้บริโภค และธุรกิจขนาดใหญ่ 4) ผู้ใช้งานลำดับที่ 2 ได้แก่ ผู้บริโภค บ้านเรือนและธุรกิจขนาดเล็ก 5) โครงการเรียกคืนซากอิเล็กทรอนิกส์ควรสร้างแรงจูงใจกับผู้บริโภคลำดับที่ 2 เป็นสำคัญ

ตารางที่ 2-13 (ต่อ) สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผังการไหล

งานวิจัย	ขอบเขตการศึกษา	รายละเอียดงานวิจัย	ผลการศึกษา
Lau และคณะ (2013)	ศึกษาผังการไหลของ เครื่องใช้ไฟฟ้าและ อิเล็กทรอนิกส์ 5 ชนิด ได้แก่ โทรทัศน์ เครื่องปรับอากาศ คอมพิวเตอร์ ตู้เย็น และ เครื่องซักผ้า ซึ่ง จะเป็นประโยชน์ต่อ โครงการเรียกคืน เครื่องใช้ไฟฟ้าและ อิเล็กทรอนิกส์ใน ประเทศฮ่องกง (Producer Responsibility Scheme; PRS)	ดำเนินการศึกษาโดย จัดทำแบบสอบถาม 2 ชุด 1) ชุดคำถามที่ 1 สอบถามกับกลุ่ม ประชากร เพื่อให้ ทราบถึงแนวทางการ จัดการของเสีย 2) ชุดคำถามที่ 2 สอบถามกับกลุ่ม ประชากรเกี่ยวกับ ซากอิเล็กทรอนิกส์ ที่ส่งให้กับผู้ประกอบการ กิจการด้านการขนส่ง ซากไปทำการรีไซเคิล ภายในและภายนอก ประเทศ	ผลการวิเคราะห์ผังการไหล พบว่า 1) ร้อยละ 80 หรือ 65,000 ต้นต่อปี ของเครื่องใช้ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 5 ชนิด ถูกขายต่อให้กับผู้รวบรวม ซากอิเล็กทรอนิกส์ 2) หน่วยงานที่มีหน้าที่รวม รวมซากอิเล็กทรอนิกส์ สามารถรวบรวมได้น้อยกว่า ร้อยละ 40 3) ควรขยายความสามารถ ของการจัดการซาก อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อมีการ ดำเนินโครงการเรียกคืนซาก อิเล็กทรอนิกส์

2.9.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิต

Rubin และคณะ (2014) ศึกษาเปรียบเทียบการประเมินวัฏจักรชีวิตของการนำทองแดงกลับคืนระหว่างกระบวนการที่ใช้กรดซัลฟูริกและกรดกัดทองเป็นสารชะละลายจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีขั้นตอนในการศึกษา ดังนี้

- 1) รวบรวมข้อมูลกระบวนการรีไซเคิลทองแดงจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- 2) คัดเลือกกระบวนการ 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการที่ใช้กรดซัลฟูริกและกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองในการชะละลายทองแดง ซึ่งเป็นกระบวนการที่ให้อัตราการนำกลับคืนทองแดงสูงและเป็นกระบวนการที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงเช่นกัน
- 3) กำหนดขอบเขตของการศึกษา ตั้งแต่การปลดขนาด การแยกทางไฟฟ้า การแยกทางไฟฟ้าสถิต และการแยกทองแดงทางไฟฟ้าเคมีโดยกรดซัลฟูริกและกรดกัดทองเป็นสารชะละลาย
- 4) ประเมินวัฏจักรชีวิตด้วยวิธี Environmental design of industrial products (EDIP) ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนาภายใต้มาตรฐาน ISO 14040-14043 โดยกลุ่มบริษัทที่เกี่ยวข้องกับการแยกโลหะทางไฟฟ้า ในประเทศเดนมาร์ก และมีหน่วยในการทำงาน คือ ปริมาณทองแดงที่นำกลับคืน 102 กรัม

จากการศึกษาพบว่า กระบวนการที่ใช้กรดซัลฟูริกมีผลกระทบมากกว่ากระบวนการที่ใช้กรดกัดทอง ในแง่ของสถานะของกรดที่เกิดขึ้น และผลกระทบต่อทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป โดยเฉพาะแหล่งแร่เหล็กและตะกั่ว กล่าวคือกรดซัลฟูริกจะเกิดจากกระบวนการถลุงแร่จำพวก เหล็ก ตะกั่ว สังกะสี และนิกเกิล ซึ่งมักพบในรูปของสารประกอบของซัลไฟด์ ทั้งนี้ ผลกระทบของพลังงานและทรัพยากรที่ใช้แล้วไม่หมดไปจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่ทำการศึกษา เนื่องจากแต่ละพื้นที่มีการใช้แหล่งพลังงานและทรัพยากรที่แตกต่างกัน โดยการศึกษาในครั้งนี้จะแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระหว่างการนำทองแดงกลับคืน ซึ่งในการศึกษาของประเทศบราซิลควรมีการกำหนดนโยบายที่เป็นรูปธรรมเพื่อรวบรวมข้อมูลตั้งแต่การเกิดซากอิเล็กทรอนิกส์ไปจนถึงขั้นตอนการจัดการซากให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

Hong และคณะ (2015) ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการรีไซเคิลซากอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการฝังกลบและไม่มีการฝังกลบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทราบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพิ่มสัดส่วนของกระบวนการรีไซเคิลอย่างถูกต้อง ลดปริมาณของเสียและน้ำเสีย ลดสัดส่วนของการฝังกลบซากอิเล็กทรอนิกส์ก่อนนำกลับไปใช้ใหม่ และการกำจัดด้วยการเผา เพื่อให้ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทราบถึงแนวทางในการแก้ไขปัญหาพร้อมกัน ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้

1) จัดทำผังการไหลของวัสดุ โดยเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลด้านปริมาณ ตั้งแต่การกลายเป็นซากไปจนถึงกระบวนการจัดการซาก ข้อมูลปริมาณการนำกลับคืนในกระบวนการย่อย เช่น การบดแยก การแยกด้วยไฟฟ้า กระบวนการหลอม ข้อมูลปริมาณของมลพิษระหว่างกระบวนการจัดการซาก ข้อมูลการกำจัดขยะ การบำบัดน้ำชะขยะ การเผาทำลายซาก ข้อมูลของกระบวนการฝังกลบจากโรงงานที่รับจัดการ ทั้งนี้ไม่รวมผลกระทบที่เกิดจากการรวบรวมซาก

2) ประเมินวัฏจักรชีวิตด้วยวิธี ReCiPe ต่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระดับกลาง 18 ด้าน โดยประเมินภายใต้หน่วยการทำงาน 1 ตันของซากอิเล็กทรอนิกส์

ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนี้ กระบวนการรีไซเคิลที่ไม่มีการฝังกลบจะมีผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืดและน้ำเค็ม และการเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารในแหล่งน้ำเป็นหลัก โดยมีผลกระทบมากกว่ากระบวนการรีไซเคิลที่มีการฝังกลบ ซึ่งมีผลกระทบจากการฝังกลบและน้ำชะขยะในหลุมฝังกลบเท่านั้น ส่วนผลกระทบในการใช้ไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานถ่านหินไม่มีความแตกต่าง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการฝังกลบเป็นปัจจัยสำคัญในการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามการฝังกลบที่ไม่มีการรีไซเคิลและการเผาทำลายยังเป็นกระบวนการที่ไม่แนะนำในการจัดการซาก เนื่องจากเป็นการใช้ประโยชน์ทรัพยากรได้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ

Eygen และคณะ (2016) ศึกษาการลดการใช้ทรัพยากรเมื่อรีไซเคิลวัสดุที่ได้จากคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะและพกพาในประเทศเบลเยียม โดยจะแบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1) รวบรวมข้อมูลการคัดแยกเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์จาก Recupel ซึ่งเป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบรวบรวมซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศเบลเยียม เพื่อทราบถึงสัดส่วนที่สามารถซ่อม (Repair) สัดส่วนการนำกลับไปใช้งานใหม่ (Reuse) และสัดส่วนที่ไม่

สามารถใช้งานได้ (Disposal) โดยอ้างอิงระยะทาง 60 กิโลเมตร จากการศึกษาระยะทางขนส่งรวบรวมซากในประเทศสวีเดนแลนด์ เป็นระยะทางในการรวบรวมซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

2) รวบรวมข้อมูลการถอดแยกและปรับสภาพทางกลเบื้องต้นเพื่อง่ายต่อกระบวนการนำกลับของโลหะ จาก Galloo ซึ่งเป็นบริษัทรีไซเคิลซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

3) วิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์ของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลได้และจัดทำผังการไหลของวัสดุ

4) ประเมินผลกระทบต่อทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป ด้วยวิธี Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE) ของกระบวนการรีไซเคิลคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะและแบบพกพา พร้อมทั้งนำไปเปรียบเทียบกับผลกระทบต่อกระบวนการฝังกลบซากคอมพิวเตอร์ โดยมีขอบเขตของการศึกษาตั้งแต่การรวบรวมซากคอมพิวเตอร์ถึงกระบวนการนำกลับคืนของโลหะ อ้างอิงผลกระทบต่อหน่วยการทำงาน (Functional unit) คือ 1,000 กิโลกรัมของคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์เสริม และใช้ฐานข้อมูล Ecoinvent V.2.2 เป็นข้อมูลเพิ่มเติมในแต่ละกรณีของการศึกษา

จากผลการศึกษาผังการไหลของวัสดุ พบว่าคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะสามารถรีไซเคิลได้ร้อยละ 49 คิดเป็นโลหะที่รีไซเคิลได้จากโลหะทั้งหมดร้อยละ 87 คอมพิวเตอร์แบบพกพาสามารถรีไซเคิลได้ร้อยละ 39 คิดเป็นโลหะที่รีไซเคิลได้จากโลหะทั้งหมดร้อยละ 85 ด้านการประเมินผลกระทบต่อทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไปเมื่อเทียบกับการฝังกลบพบว่า การรีไซเคิลคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะโดยเฉพาะการนำวัสดุประเภท เหล็ก อลูมิเนียม ทองคำ พลาสติก (ABS) กลับมาใช้ใหม่ สามารถลดการใช้ทรัพยากรได้ถึงร้อยละ 80 เมื่อเทียบกับการฝังกลบ การรีไซเคิลเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา โดยเฉพาะการนำวัสดุประเภท ทองคำและอลูมิเนียม กลับมาใช้ใหม่ สามารถลดการใช้ทรัพยากรได้ร้อยละ 87 เมื่อเทียบกับการฝังกลบซึ่งไม่ได้มีการหมุนเวียนพลังงานและทรัพยากรมาใช้ใหม่

โดยรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิต แสดงดังตารางที่ 2-14

ตารางที่ 2-14 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิต

งานวิจัย	ขอบเขตการศึกษา	รายละเอียดงานวิจัย	ผลการศึกษา
Rubin และคณะ (2014)	ศึกษาเปรียบเทียบ การประเมินวัฏจักรชีวิตของ การนำทองแดงกลับคืนระหว่างกระบวนการที่ใช้กรดซัลฟูริก และกรดกัดทอง เป็นสารชะละลาย จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	มีขั้นตอนในการศึกษา ดังนี้ 1) รวบรวมข้อมูลกระบวนการรีไซเคิลทองแดงจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 2) เลือก 2 กระบวนการที่ให้ประสิทธิภาพสูงในการนำทองแดงกลับคืน ได้แก่ กระบวนการที่ใช้กรดซัลฟูริกและกรดกัดทองในการชะละลายทองแดง 3) กำหนดขอบเขตของการศึกษา 4) ประเมินวัฏจักรชีวิตด้วยวิธี Environmental design of industrial products (EDIP)	จากการศึกษาพบว่า 1) กระบวนการที่ใช้กรดซัลฟูริก มีผลกระทบมากกว่า กระบวนการที่ใช้กรดกัดทอง ทั้งในด้านสถานะของกรดที่เกิดขึ้นและการส่งผลกระทบต่อทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป 2) การศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระหว่างกระบวนการนำกลับคืนทองแดง 3) ประเทศบราซิลควรมีการกำหนดนโยบายในการรวบรวมข้อมูลที่ใช้ปรับปรุงการจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ตารางที่ 2-14 (ต่อ) สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิต

งานวิจัย	ขอบเขตการศึกษา	รายละเอียดงานวิจัย	ผลการศึกษา
Hong และคณะ (2015)	ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการรีไซเคิลซากอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการฝังกลบและไม่มีฝังกลบ	มีขั้นตอนในการศึกษา ดังนี้ 1) จัดทำผังการไหลของวัสดุ โดยเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลด้านปริมาณตั้งแต่การกลายเป็นซากไปจนถึงกระบวนการจัดการซาก 2) ประเมินวัฏจักรชีวิต ด้วยวิธี ReCiPe เพื่อทราบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระดับกลางทั้ง 18 ด้าน โดยประเมินภายใต้หน่วยการทำงาน คือ 1 ตันของซากอิเล็กทรอนิกส์	จากการศึกษาพบว่า 1) การรีไซเคิลซากอิเล็กทรอนิกส์ปริมาณ 1 ตันสามารถแยกส่วนประกอบของโลหะ พลาสติก แก้ว ได้ปริมาณ 0.75 ตัน สามารถบำบัดหลอดจอภาพ (CRT) ได้ปริมาณ 9.38×10^{-3} ตัน สามารถบดแยกได้ปริมาณ 3.79×10^{-2} ตัน หลอมโลหะมีค่าได้ปริมาณ 1.66×10^{-4} ตัน 2) การประเมินวัฏจักรชีวิตแสดงให้เห็นว่ากระบวนการรีไซเคิลที่ไม่มีฝังกลบจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่ากระบวนการรีไซเคิลที่มีการฝังกลบ

ตารางที่ 2-14 (ต่อ) สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิต

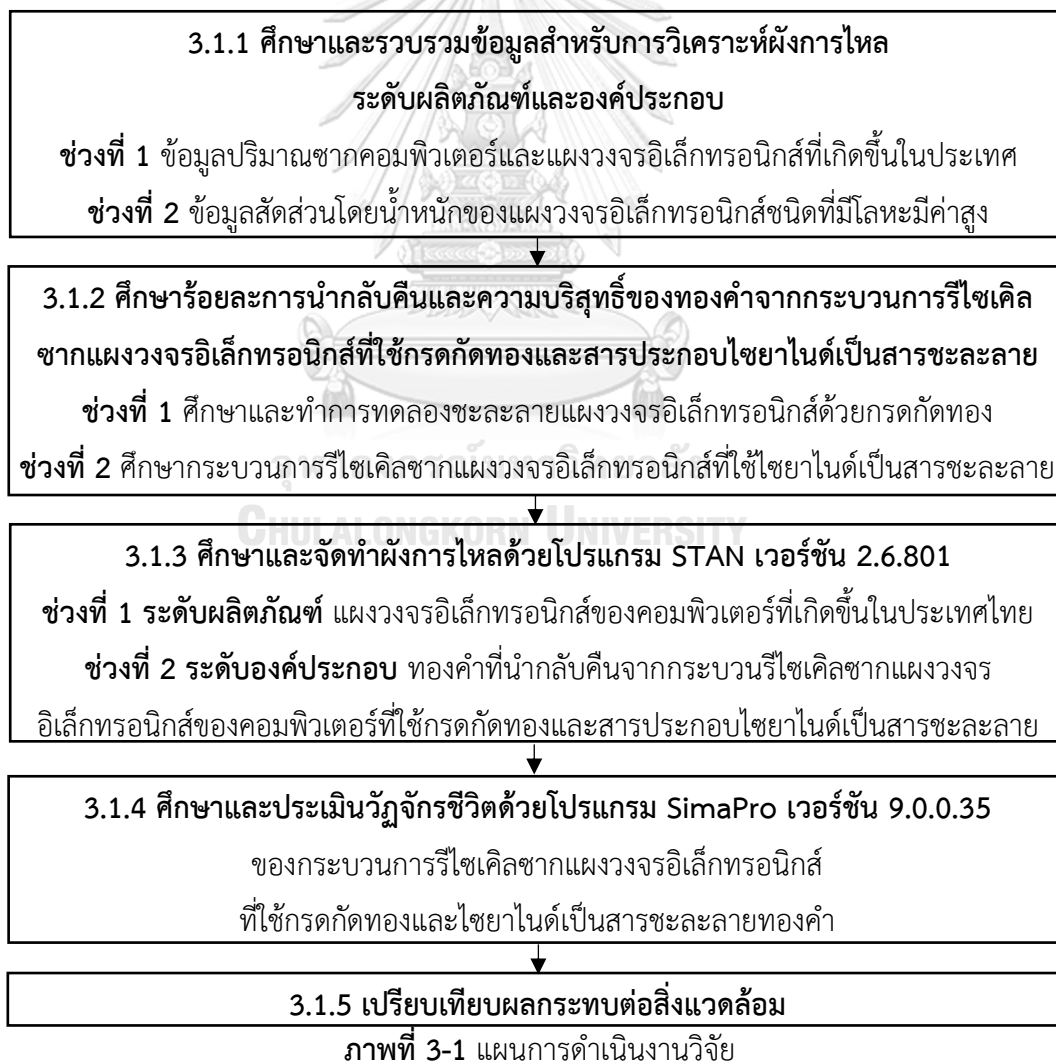
งานวิจัย	ขอบเขตการศึกษา	รายละเอียดงานวิจัย	ผลการศึกษา
<p>Eygen และคณะ (2016)</p>	<p>ศึกษาการลดการใช้ทรัพยากรเมื่อรีไซเคิลวัสดุที่ได้จากคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะและพกพาในประเทศเบลเยียม</p>	<p>มีขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) รวบรวมข้อมูลการคัดแยกเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 2) รวบรวมข้อมูลการถอดแยกและปรับสภาพทางกลเบื้องต้น 3) วิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์ของวัสดุที่สามารถรีไซเคิลได้และจัดทำผังการไหลของวัสดุ 4) ประเมินผลกระทบต่อทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไปด้วยวิธี Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE) โดยมีหน่วยการทำงานคือ 1000 กิโลกรัมของคอมพิวเตอร์และใช้ฐานข้อมูลเพิ่มเติมจาก Ecoinvent V.2.2 	<p>จากการศึกษาพบว่า</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะสามารถรีไซเคิลได้ทั้งหมดร้อยละ 49 คิดเป็นโลหะที่รีไซเคิลได้จากโลหะทั้งหมดร้อยละ 87 2) คอมพิวเตอร์แบบพกพาสามารถรีไซเคิลได้ทั้งหมดร้อยละ 39 คิดเป็นโลหะที่รีไซเคิลได้จากโลหะทั้งหมดร้อยละ 85 3) ผลกระทบต่อการใช้ทรัพยากรของการรีไซเคิลลดลงมากกว่าร้อยละ 80 เมื่อเทียบกับกระบวนการฝังกลบ

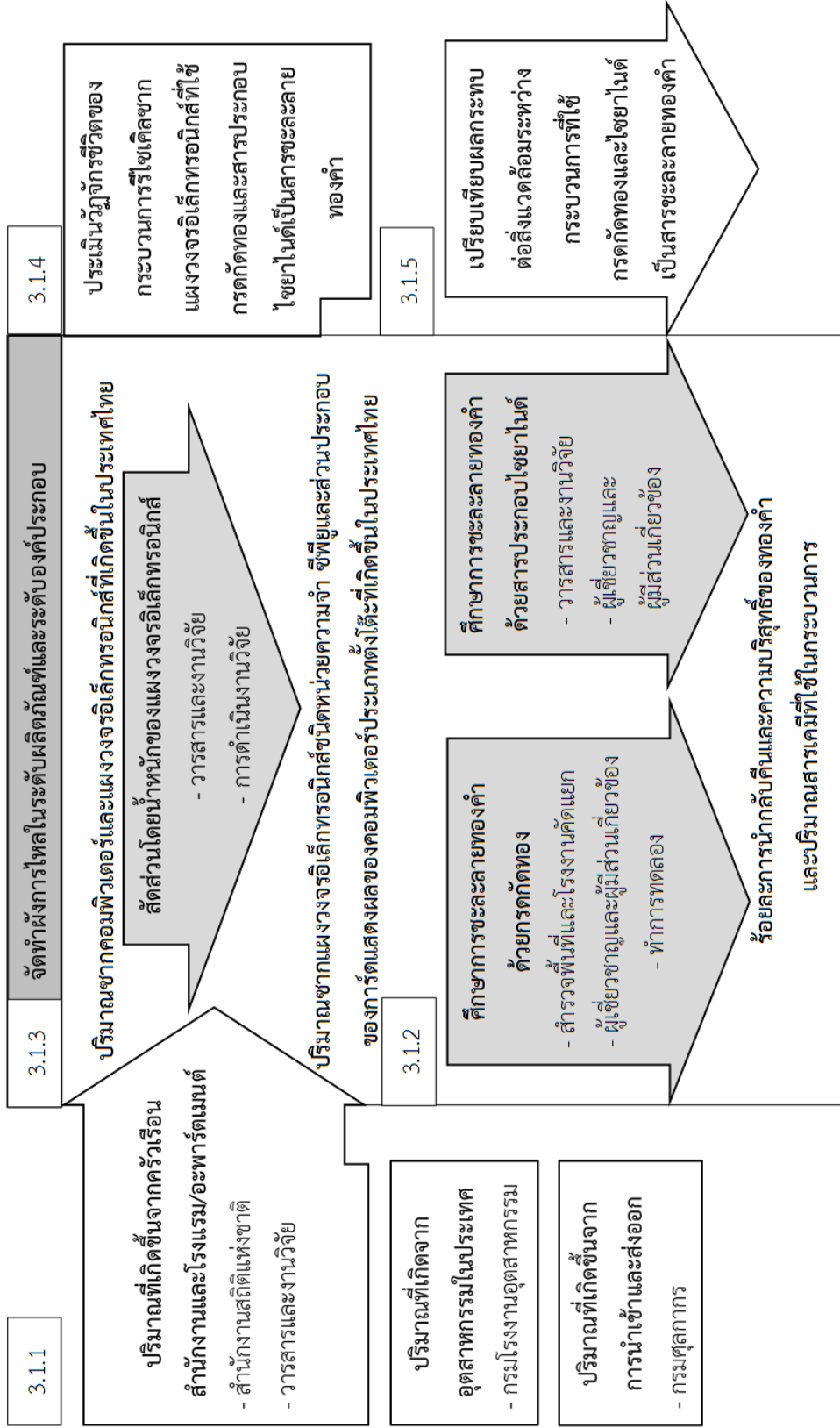
บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ ประกอบด้วย การทดลองและการรวบรวมข้อมูลด้านปริมาณเพื่อวิเคราะห์ ผังการไหลและเปรียบเทียบผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำ โดยดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งในการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ช่วงการศึกษา แสดงดังภาพที่ 3-1 และภาพที่ 3-2





ภาพที่ 3-2 ภาพรวมแผนการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- ซากคอมพิวเตอร์ ได้รับความอนุเคราะห์จากโครงการสุขภาพ รักษาโลก
- ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหน่วยความจำ ซีพียูและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ ได้รับความอนุเคราะห์จาก คุณฐิติวุฒิ พงษ์พานิช
- ปีกเกอร์ขนาด 250 500 และ 1,000 มิลลิลิตร (Beaker)
- ขวดปรับปริมาตรขนาด 500 และ 1,000 มิลลิลิตร (Volumetric Flask)
- กรวยกรองแก้ว (Funnel)
- กระบอกลม (Cylinder)
- หลอดทดลอง (Test tube)
- แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)
- กระจกนาฬิกา (Watch glass)
- ช้อนตักสาร (Spatula)
- ไมโครปิเปต และ ไมโครปิเปตทิป (Micropipette and Micropipette tip)
- หลอดหยดสารพร้อมลูกยาง (Rubber dropper)
- โถแก้วดูดความชื้น (Desiccator)
- เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP 3100S
- เครื่องชั่งไฟฟ้าตวงวัด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น TE214S
- ตู้อบความร้อน (Oven) ยี่ห้อ WTB Binder รุ่น Model 400(E2)
- เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water)
- ขวดเก็บตัวอย่าง (Plastic vial)
- กระดาษกรอง เบอร์ 41 (ขนาด 150 มิลลิเมตร, Whatman)

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- กรดไนตริก (HNO_3) เกรด Analytical reagent ผลิตโดยบริษัท เมอร์ค จำกัด
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรด Analytical reagent ผลิตโดยบริษัท เมอร์ค จำกัด
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรด Analytical reagent ผลิตโดยบริษัท เมอร์ค จำกัด
- โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) เกรด Analytical reagent ผลิตโดยบริษัท เมอร์ค จำกัด

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- เครื่องบดลดขนาด NARA JIYU สำหรับลดขนาดซากแมงวงจระเข้เล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- เครื่อง Inductively coupled plasma – optical emission spectrometry (ICP-OES) สำหรับการตรวจวิเคราะห์ปริมาณธาตุในสารละลาย ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ในการตรวจวิเคราะห์จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ
- เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) สำหรับการตรวจวิเคราะห์ปริมาณธาตุในสารละลาย ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ในการตรวจวิเคราะห์จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- โปรแกรม STAN เวอร์ชัน 2.6.801 สำหรับการวิเคราะห์การไหล (Material flow analysis; MFA)
- โปรแกรม SimaPro เวอร์ชัน 9.0.0.35 สำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment; LCA)
- โปรแกรม IBM SPSS statistic เวอร์ชัน 22 สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 รวบรวมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลในระดับผลิตภัณฑ์และระดับองค์ประกอบ

ช่วงการศึกษาที่ 1 ข้อมูลปริมาณซากคอมพิวเตอร์และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นในประเทศ

1) ข้อมูลที่มีการรายงานต่อสำนักงานสถิติแห่งชาติ ประกอบด้วยจำนวนครัวเรือนในประเทศไทย ระหว่างปี พ.ศ. 2558 - 2561

2) ข้อมูลที่มีการรายงานต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรม ประกอบด้วยปริมาณซากคอมพิวเตอร์และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการรายงานตามเอกสารกำกับการขนส่งของเสียอันตราย ระหว่างปี พ.ศ. 2558 - 2561

3) ข้อมูลที่มีการรายงานต่อกรมศุลกากร ประกอบด้วยข้อมูลการนำเข้าและส่งออกของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือแผงวงจรพิมพ์ประเภทต่างๆ ตามพิกัดศุลกากรที่ 8534.00.10 ถึง 8534.00.90 และซากคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ไม่ใช่ประเภทพกพาตามพิกัดศุลกากรที่ 8471.41.10 ที่กำกับต่อท้ายด้วยรหัสสถิติ 899 เจาะจงถึงปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกเคลื่อนย้ายและกำจัดข้ามแดนภายใต้อนุสัญญาบาเซล ซึ่งรายงานระหว่างปี พ.ศ. 2558 - 2561

4) ข้อมูลจากวารสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยข้อมูลจำนวนคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะและพกพาที่ถือครองครัวเรือน อายุการใช้งานเฉลี่ยของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะและพกพา สัดส่วนการเก็บซากคอมพิวเตอร์หลังจากที่ไม่สามารถใช้งานได้ในครัวเรือนซึ่งมีการรายงานจากแบบสำรวจพฤติกรรมการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน จัดทำโดยศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย

สัดส่วนของปริมาณคอมพิวเตอร์ต่อซากอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในประเทศไทยจากรายงานสถานการณ์ของเสียอันตรายชุมชนปี พ.ศ. 2559 และ 2560 กรมควบคุมมลพิษ

ข้อมูลการเกิดขึ้นของซากอิเล็กทรอนิกส์จากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์อ้างอิงจากรายงานการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย จัดทำโดย Thailand Development Research Institute (TDRI)

ข้อมูลการจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ของครัวเรือน สำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์อ้างอิงจากศูนย์วิจัยกสิกรไทย

ช่วงการศึกษาที่ 2 ข้อมูลสัดส่วนโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูง และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการชะละลายทองคำด้วยกรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์

1) ข้อมูลจากวารสารและงานวิจัย ประกอบด้วยวิธีการประเมินปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์จากครัวเรือน ชนิดของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีโลหะมีค่าสูง สัดส่วนโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูง กระบวนการนำทองคำกลับคืนจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์ วิธีการวิเคราะห์ผังการไหลและการประเมินวัฏจักรชีวิต

2) ข้อมูลจากการศึกษา ประกอบด้วยน้ำหนักเฉลี่ยของคอมพิวเตอร์และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ และสัดส่วนโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ

3) ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ประกอบด้วยกระบวนการนำทองคำกลับคืนจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

4) ข้อมูลจากการสำรวจพื้นที่และโรงงานคัดแยกแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยน้ำหนักเฉลี่ยของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ และวิธีการคัดแยกและรีไซเคิล

3.3.2 ศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลาย

การศึกษาช่วงที่ 1 ทดลองและศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1) คัดแยกส่วนประกอบของซากแมงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะได้แก่ หน่วยความจำ (RAM) ซีพียู (CPU) และส่วนประกอบของการ์ดแสดงผล (PCI Card)

2) ลดขนาดซากแมงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องบด NARA JIYU ให้มีขนาดเล็กกว่า 1 เซนติเมตร

3) ปรับสภาพทางเคมีโดยชะละลายด้วยสารละลายกรดไนตริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 22 ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ต่อซากแมงวงจรร 1 กรัม ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง

4) กรองตะกอนออกจากสารละลาย

5) ชะละลายตะกอนด้วยกรดกัดทองและศึกษาผลของตัวแปรอิสระ ดังนี้

- ตัวแปรอิสระที่ 1 ปริมาณของกรดต่อน้ำหนักซาก โดยกำหนดที่ 2 4 และ 6 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 °C ชะละลายเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- ตัวแปรอิสระที่ 2 อุณหภูมิในการชะละลาย โดยกำหนดที่ 25 50 และ 75 °C ที่ปริมาณกรดกัดทองเท่ากับ 6 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม ชะละลายเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- ตัวแปรอิสระที่ 3 ระยะเวลาในการชะละลายโดยกำหนดที่ 0.5 1 2 และ 4 ชั่วโมง ที่ปริมาณกรดกัดทองเท่ากับ 6 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม ที่อุณหภูมิ 75 °C

6) กรองตะกอนออกจากสารละลายและตกตะกอนทองคำจากสารละลายกรดกัดทองด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ที่ปริมาณ 1.55 กรัมต่อ 1 กรัมทองคำ

7) เก็บตัวอย่างสารละลายที่ได้จากขั้นตอนการชะละลายด้วยกรดไนตริก กรดกัดทองและขั้นตอนการตกตะกอนเพื่อนำไปวิเคราะห์หาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำ พร้อมทั้งวิเคราะห์ธาตุอื่นๆที่สนใจในสารละลาย ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแมงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ เงิน ทองแดง และตะกั่ว ด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma - optical emission spectrometry (ICP-OES) และเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) แสดงดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 การศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำ

จากการชะละลายซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทอง

การศึกษาช่วงที่ 2 ศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สารประกอบโซลยาไนต์เป็นสารชะละลาย ดังนี้

นำข้อมูลกระบวนการชะละลายทองคำจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโซลยาไนต์ที่รวบรวมจากหัวข้อ 3.3.1 ช่วงการศึกษาที่ 2 มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย เพื่อทราบร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการชะละลายด้วยสารประกอบโซลยาไนต์

3.3.3 ศึกษาและจัดทำผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและโซลยาไนต์เป็นสารชะละลายทองคำ

ช่วงการศึกษาที่ 1 จัดทำผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรรวมและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2558 – 2561 โดยใช้โปรแกรม STAN เวอร์ชัน 2.6.801 ในการวิเคราะห์ผังการไหล

ช่วงการศึกษาที่ 2 จัดทำผังการไหลระดับองค์ประกอบของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงได้แก่ หน่วยความจำ ซีพียูและส่วนประกอบของการ์ดแสดงผล ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบโซลยาไนต์เป็นสารชะละลายทองคำและใช้โปรแกรม STAN เวอร์ชัน 2.6.801 ในการวิเคราะห์ผังการไหล ซึ่งจำแนกออกเป็นกรณีศึกษาตามสัดส่วนของปริมาณของสารชะละลายต่อน้ำหนักซากที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุด เพื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำกลับคืนได้ เมื่อชะละลายที่ระยะเวลาเท่ากัน อ้างอิงจากผลการทดลองและการรวบรวมข้อมูลโดยกรณีศึกษาสามารถจำแนกได้ดังนี้

- 1) กระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซาก
- 2) กระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซาก
- 3) กระบวนการที่ใช้สารประกอบโซลยาไนต์เป็นสารชะละลายที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซาก

4) กระบวนการที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซาก

3.3.4 ศึกษาและประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำ

การศึกษาศึกษาและประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำเมื่อกระบวนการไม่มีการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นโดยใช้โปรแกรม SimaPro เวอร์ชัน 9.0.0.35 วิธี Recipe 2016 V1.1 และฐานข้อมูลของ Ecoinvent 3 ในการประเมิน ซึ่งเจาะจงถึงผลกระทบชั้นกลาง (Midpoint categories) 4 ด้าน ได้แก่ ผลกระทบที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) ผลกระทบที่ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนดิน (Terrestrial ecotoxicity) ผลกระทบที่ทำให้เกิดความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ (Human carcinogenic toxicity) ผลกระทบที่เพิ่มศักยภาพของการลดลงของแหล่งแร่ (Mineral resource scarcity)

ประเมินภายใต้ขอบเขตแบบ Gate to gate ครอบคลุมตั้งแต่การรีไซเคิลซากจนถึงการจัดการของเสีย และกำหนดให้หน่วยการทำงานคือ ทองคำที่นำกลับคืนได้ 1 กิโลกรัม กรณีศึกษาจะอ้างอิงจากการวิเคราะห์ผังการไหลโดยสามารถจำแนก ดังนี้

- 1) กระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซาก โดยไม่มีการจัดการของเสีย
- 2) กระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซาก โดยไม่มีการจัดการของเสีย
- 3) กระบวนการที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซากโดยไม่มีการจัดการของเสีย
- 4) กระบวนการที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซากโดยไม่มีการจัดการของเสีย

3.3.5 เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1) ศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบโซเดียมไนต์เป็นสารชะละลายทองคำเมื่อมีการจัดการของเสียที่เกิดขึ้น เพื่อนำเสนอแนวทางในการกำจัดของเสียอย่างเหมาะสม โดยอ้างอิงสัดส่วนของปริมาณสารเคมีที่ให้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าในการนำกลับคืนทองคำ 1 กิโลกรัมที่เท่ากันจากผลการประเมินวัฏจักรชีวิต เพื่อสร้างกรณีศึกษาย่อยโดยสามารถจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1.1) บำบัดน้ำเสียและแยกโลหะที่ชะละลายร่วมด้วย และกำจัดตะกอนด้วยการฝังกลบ

1.2) บำบัดน้ำเสียและแยกโลหะที่ชะละลายร่วมด้วย และกำจัดตะกอนด้วยการเผาทำลายในเตาเผาเฉพาะของเสียอันตราย

2) ศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเมื่อมีการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นและลดการใช้สารเคมีโดยชะละลายซ้ำ โดยกำหนดให้กระบวนการที่ใช้สารประกอบโซเดียมไนต์และมีการจัดการของเสียเป็นกรณีอ้างอิงเนื่องจากได้รับความนิยมในระดับอุตสาหกรรมการรีไซเคิลทองคำจากซากอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน ทั้งนี้จะศึกษาเพื่อทราบจำนวนครั้งในการชะละลายซ้ำของกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายที่ให้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่ากระบวนการที่ใช้โซเดียมไนต์เป็นสารชะละลาย

การประเมินผลกระทบจะใช้โปรแกรม SimaPro เวอร์ชัน 9.0.0.35 ภายใต้ขอบเขตแบบ Gate to gate ครอบคลุมตั้งแต่การรีไซเคิลซากจนถึงการจัดการของเสีย และมีกำหนดหน่วยการทำงานคือ ทองคำที่นำกลับคืนได้ 1 กิโลกรัม

บทที่ 4

ผลการศึกษาและผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์ผังการไหลในระดับผลิตภัณฑ์เลือกศึกษาจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ เนื่องจากส่วนประกอบของแผงวงจรทั้งสองชนิดนี้มีโลหะมีค่าสูง (Razi, 2016) และมักจะถูกคัดแยกจากแผงวงจรชนิดอื่นๆ เพื่อนำไปรีไซเคิลโลหะมีค่าต่อไป รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ

4.1.1 สัดส่วนโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อน้ำหนักของคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 4-1 สัดส่วนโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อน้ำหนักของคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ

แหล่งอ้างอิง	น้ำหนักเฉลี่ย (กิโลกรัม)			ร้อยละโดยน้ำหนักของแผงวงจรทั้งสองชนิดต่อน้ำหนักคอมพิวเตอร์
	คอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ	แผงวงจรหลัก	การ์ดแสดงผล	
งานวิจัยนี้	8.730	0.960	0.108	12.23
Wangthanachoti (2019)	7.000	0.650	0.104	10.78

ตารางที่ 4-1 แสดงน้ำหนักเฉลี่ยของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ น้ำหนักเฉลี่ยของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สองชนิดที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ แผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผล และร้อยละโดยน้ำหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อน้ำหนักคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่ได้จากการศึกษาและ

อ้างอิงจากผู้ประกอบการคัดแยกซากพบว่า น้ำหนักเฉลี่ยของคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะเท่ากับ 8.730 และ 7.000 กิโลกรัม ตามลำดับ น้ำหนักเฉลี่ยของแผงวงจรหลักเท่ากับ 0.960 และ 0.650 กิโลกรัม ตามลำดับ น้ำหนักเฉลี่ยของการ์ดแสดงผลเท่ากับ 0.108 และ 0.104 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองชนิดมีน้ำหนักเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 12.23 และ 10.78 ของน้ำหนักของคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ ตามลำดับ

ค่าที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกับสัดส่วนของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการศึกษาก่อนหน้า (Chancerel และคณะ, 2009) ซึ่งในขั้นตอนการประเมินปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นในประเทศไทยจะใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ร้อยละ 12.23 ในการคำนวณ

4.1.2 สัดส่วนโดยน้ำหนักของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะและพกพา

สัดส่วนโดยน้ำหนักของซากคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะและพกพาต่อปริมาณซากคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลสามารถประเมินโดยอ้างอิงข้อมูลการถือครองคอมพิวเตอร์ต่อ 1 ครั้วเรือน อายุการใช้งานเฉลี่ยของคอมพิวเตอร์จากแบบสำรวจพฤติกรรมการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้าในครั้วเรือน (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2562) และน้ำหนักเฉลี่ยของคอมพิวเตอร์ทั้งสองประเภท

ตารางที่ 4-2 สัดส่วนโดยน้ำหนักของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะและพกพา

ประเภทคอมพิวเตอร์	จำนวนคอมพิวเตอร์ที่ถือครองต่อครั้วเรือน* (เครื่องต่อครั้วเรือน)	อายุการใช้งานเฉลี่ย* (ปี)	น้ำหนักเฉลี่ย (กิโลกรัม)	สัดส่วนโดยน้ำหนักต่อน้ำหนักคอมพิวเตอร์รวม (ร้อยละ)
ตั้งโต๊ะ	0.476	7.79	8.730	61.19
พกพา	0.961	6.42	2.260	38.81

(ที่มา: *ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2562)

ตารางที่ 4-2 แสดงสัดส่วนโดยน้ำหนักของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะและพกพาพบว่า จากปริมาณซากคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่เกิดขึ้นต่อครั้วเรือนต่อปี คิดเป็นซากคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะร้อยละ 61.19 โดยน้ำหนัก และคิดเป็นซากคอมพิวเตอร์ประเภทพกพาร้อยละ 38.81 โดยน้ำหนัก

4.1.3 ปริมาณคาดการณ์ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นจากครัวเรือนและสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์

ปริมาณซากคอมพิวเตอร์และซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในครัวเรือน คาดการณ์จากจำนวนครัวเรือนในประเทศไทย (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2562) ปริมาณซากคอมพิวเตอร์ที่ถือครองและข้อมูลอายุการใช้งานเฉลี่ยจากแบบสำรวจพฤติกรรมการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2562) และน้ำหนักของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะและพกพา

ทั้งนี้ สัดส่วนของแหล่งกำเนิดซากอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยที่ไม่ได้เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรมและการนำเข้าส่งออก สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ ครัวเรือน สำนักงาน และโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ โดยมีอัตราการกำเนิดซากอิเล็กทรอนิกส์คิดเป็นร้อยละ 82 14 และ 3 ตามลำดับ (สายใจ วิทยานุมาส, 2560)

ตารางที่ 4-3 ปริมาณคาดการณ์ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นจากครัวเรือน สำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์

ปีที่ รายงาน (พ.ศ.)	จำนวน ครัวเรือน	ปริมาณซาก คอมพิวเตอร์ ประเภทตั้งโต๊ะ (ตัน)	ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ชนิดแผงวงจรรวมและการ์ดแสดงผล ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ (ตัน)	
			ครัวเรือน	สำนักงาน และโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์
2558	21,325,999	11,376.09	1,391.30	288.44
2559	21,480,635	11,458.58	1,401.38	290.53
2560	21,387,158	11,408.72	1,395.29	289.27
2561	21,568,565	11,505.49	1,407.12	291.72

(ที่มา: สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2562; ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2562; สายใจ วิทยานุมาส, 2560)

ตารางที่ 4-3 แสดงปริมาณคาดการณ์ของซากแมงวงจระอิลีกทรอนิกส์ชนิดแมงวงจระหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในประเทศไทยพบว่า ปริมาณคาดการณ์ของซากคอมพิวเตอร์ที่เกิดขึ้นจากครัวเรือนระหว่างปี พ.ศ. 2558 – 2561 ทั้งสิ้น 11,376.09 11,458.58 11,408.72 และ 11,505.49 ตัน ตามลำดับ โดยคิดเป็นซากแมงวงจระอิลีกทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะทั้งสองชนิดที่เกิดขึ้นในครัวเรือนทั้งสิ้น 1,391.30 1,401.38 1,395.29 และ 1,406.12 ตัน ตามลำดับ โดยในปีที่ศึกษามีปริมาณซากที่เกิดขึ้นจากครัวเรือนใกล้เคียงกัน ขึ้นอยู่กับจำนวนครัวเรือน ปริมาณการเกิดซากต่อครัวเรือน น้ำหนักของซากและอายุการใช้งาน

ปริมาณคาดการณ์ของซากแมงวงจระอิลีกทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะทั้งสองชนิดที่เกิดขึ้นจากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ระหว่างปี พ.ศ. 2558 – 2561 ทั้งสิ้น 288.44 290.53 289.27 และ 291.72 ตัน ตามลำดับ โดยการศึกษาปริมาณซากที่เกิดขึ้นจากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ในแต่ละปีจะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากประเมินโดยอ้างอิงปริมาณซากที่เกิดจากครัวเรือน



4.1.4 ปริมาณคาดการณ์ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผล
ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นจากภาคอุตสาหกรรม

1) ปริมาณซากคอมพิวเตอร์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4-4 ปริมาณซากคอมพิวเตอร์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรม

วิธีการกำจัด (%)	ปีที่รายงาน (พ.ศ.)			
	2558	2559	2560	2561
011 คัดแยกประเภทเพื่อจำหน่ายต่อ	-	4.43	-	3.15
049 นำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีอื่นๆ	75.72	56.45	58.54	59.35
052 นำโลหะกลับมาใช้ใหม่	-	-	9.51	-
073 ฝังกลบอย่างปลอดภัย	22.54	39.11	23.36	35.95
075 เผาทำลายในเตาเผาเฉพาะ สำหรับของเสียอันตราย	1.74	-	8.59	1.55
ปริมาณคอมพิวเตอร์ (ตัน)	18.41	7.35	14.20	17.37

(ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2562)

ตารางที่ 4-4 แสดงปริมาณซากคอมพิวเตอร์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมตามเอกสารกำกับการขนส่งของเสียอันตรายระหว่างปี พ.ศ. 2558 - 2561 พบว่าปริมาณคอมพิวเตอร์ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 18.41 7.35 14.20 17.37 ตัน ตามลำดับ วิธีการจัดการซากคอมพิวเตอร์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ วิธี 049 การนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีอื่นๆ นอกเหนือจากการทำเป็นเชื้อเพลิงทดแทน การทำเชื้อเพลิงผสมเผาเพื่อเอาพลังงาน และทำเป็นวัสดุทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์ โดยคิดเป็นร้อยละ 56.45 - 75.72 ของปริมาณซากคอมพิวเตอร์ทั้งหมด

วิธีการจัดการซากคอมพิวเตอร์ที่ได้รับความนิยมรองลงมาคือ วิธี 073 การฝังกลบอย่างปลอดภัย โดยคิดเป็นร้อยละ 22.54 - 39.11 ของปริมาณซากคอมพิวเตอร์ทั้งหมด

นอกจากนั้น ซากคอมพิวเตอรืจะถูกกำจัดด้วยวิธีอื่นๆ ได้แก่ วิธี 011 การคัดแยกเพื่อจำหน่ายต่อ วิธี 052 การนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ และวิธี 075 การเผาทำลายในเตาเผาเฉพาะสำหรับของเสียอันตรายในสัดส่วนที่แตกต่างกัน คิดเป็นน้อยกว่าร้อยละ 10 ของปริมาณซากคอมพิวเตอรืทั้งหมดที่เกิดขึ้นในปีที่ทำการศึกษ

จากการวิเคราะห์วิธีการจัดการปริมาณของซากคอมพิวเตอรืที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมพบว่า หากมีการปรับปรุงกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยคำนึงถึงผลต่อสิ่งแวดล้อมเป็นสำคัญ นอกจากจะสามารถเพิ่มสัดส่วนของซากคอมพิวเตอรืที่ถูกจัดการโดยการนำกลับมาใช้ใหม่และลดสัดส่วนของซากที่ถูกจัดการโดยการฝังกลบแล้ว ยังสามารถลดช่วยผลกระทบที่เกิดจากกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2) ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4-5 ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรม

วิธีการกำจัด (%)	ปีที่รายงาน			
	2558	2559	2560	2561
011 คัดแยกประเภทเพื่อจำหน่ายต่อ	8.45	6.64	18.21	4.94
049 นำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีอื่นๆ	81.65	88.20	80.38	94.40
052 นำโลหะกลับมาใช้ใหม่	4.98	1.11	0.65	0.03
071 ฝังกลบตามสุขาภิบาล	0.42	-	0.39	0.43
073 ฝังกลบอย่างปลอดภัย	4.18	4.02	0.28	0.17
075 เผาทำลายในเตาเผาเฉพาะ สำหรับของเสียอันตราย	0.30	0.02	0.09	0.03
081 รวบรวมและส่งออกนอกประเทศ	0.01	-	-	-
ปริมาณแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (ตัน)	1,173.02	1,447.37	1,433.58	1,726.66

(ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2562)

ตารางที่ 4-5 แสดงปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมตามเอกสารกำกับการณ์ขนส่งของเสียอันตรายระหว่างปี 2558 - 2561 พบว่าปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 1,173.02 1,447.37 1,433.58 1,726.66 ตัน ตามลำดับ โดยวิธีการจัดการซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่นิยมมากที่สุดคือ วิธี 049 การนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีอื่นๆ นอกเหนือจากการทำเป็นเชื้อเพลิงทดแทน การทำเชื้อเพลิงผสมเผาเพื่อให้ได้พลังงาน และทำเป็นวัสดุทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์ คิดเป็นมากกว่าร้อยละ 80 ของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด

วิธีจัดการซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับความนิยมรองลงมาคือ วิธี 011 การคัดแยกเพื่อจำหน่ายต่อ โดยคิดเป็นร้อยละ 4.94 – 8.45 ของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด นอกจากนี้ ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ถูกกำจัดด้วยวิธีอื่นๆ ได้แก่ 052 การนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ 071 ฝังกลบตามสุขาภิบาล 073 ฝังกลบอย่างปลอดภัย 075 เผาทำลายในเตาเผาเฉพาะสำหรับของเสียอันตราย 081 รวบรวมและส่งออกนอกประเทศในสัดส่วนที่แตกต่างกัน คิดเป็นน้อยกว่าร้อยละ 5 ของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในแต่ละปีที่ทำการศึกษา

จากการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมพบว่า แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากถูกนำกลับมาใช้ใหม่และคัดแยกชิ้นส่วนเพื่อจำหน่ายต่อ ซึ่งหากมีการเพิ่มปริมาณซากที่ถูกคัดแยกเพื่อใช้ซ้ำและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการนำซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์กลับมาใช้ใหม่โดยคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นสำคัญ จะสามารถช่วยลดสัดส่วนของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกกำจัดด้วยการฝังกลบ อีกทั้งยังเป็นปัจจัยที่ช่วยให้ผลกระทบต่ออันเกิดจากกระบวนการรีไซเคิลลดลงได้อีกด้วย

3) ปริมาณคาดการณ์ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผล
ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นจากภาคอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4-6 ปริมาณคาดการณ์ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของ
คอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นจากภาคอุตสาหกรรม

ปีที่ รายงาน (พ.ศ.)	ปริมาณซาก แผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ (ตัน)	ปริมาณ คอมพิวเตอร์ (ตัน)	ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิด แผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผล (ตัน)			ปริมาณซากแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ชนิด แผงวงจรหลักและ การ์ดแสดงผลของ คอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ (ตัน)
			คำนวณจากปริมาณของซาก		รวม	
			แผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์	คอมพิวเตอร์		
2558	1,173.02	18.41	174.19	2.25	176.44	107.96
2559	1,447.37	7.35	214.93	0.90	215.83	132.07
2560	1,433.58	14.20	200.27	1.74	202.01	123.61
2561	1,726.66	17.37	241.21	2.12	243.33	148.89

(ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2562; กรมควบคุมมลพิษ, 2559)

ตารางที่ 4-6 แสดงปริมาณคาดการณ์ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและ
การ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรม ซึ่งได้จากการคำนวณโดย
อ้างอิงจากปริมาณซากคอมพิวเตอร์และปริมาณแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ตามเอกสารกำกับการขนส่ง
ของเสียอันตราย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2562) อ้างอิงสัดส่วนของซากคอมพิวเตอร์ต่อซาก
อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2559) และอ้างอิงสัดส่วนคอมพิวเตอร์
ประเภทตั้งโต๊ะและพกพาจากการคำนวณ พบว่าปริมาณคาดการณ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์
ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นระหว่างปี 2558 -
2561 คิดเป็น 107.96 132.07 123.61 และ 148.89 ตัน ตามลำดับ โดยปริมาณที่เกิดขึ้นจาก
ภาคอุตสาหกรรมจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและแตกต่างกันในปีที่ทำการศึกษ

4.1.5 ปริมาณคาดการณ์ซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดแพลงจอร์หลักและการแสดงผลของคอมพิวเตอรืประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นจากการนำเข้าและส่งออก

1) ปริมาณซากคอมพิวเตอรืและแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากการนำเข้าและส่งออก

ปริมาณซากคอมพิวเตอรืและแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการนำเข้าและส่งออกโดยผ่านกรมศุลกากร อ้างอิงปริมาณซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์หรือแพลงจอร์พิมพ์ประเภทต่างๆ ตามพิกัดศุลกากรที่ 8534.00.10 ถึง 8534.00.90 ปริมาณซากคอมพิวเตอรืส่วนบุคคลที่ไม่ใช่ประเภทพกพา ตามพิกัดศุลกากรที่ 8471.41.10 และกำกับต่อท้ายด้วยรหัสสถิติ 899 เจาะจงถึงปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกเคลื่อนย้ายและกำจัดข้ามแดนภายใต้อนุสัญญาบาเซล (กรมศุลกากร, 2562)

ตารางที่ 4-7 ปริมาณซากคอมพิวเตอรืแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการนำเข้าและส่งออก

ปีที่ รายงาน	ปริมาณซากรายงานตามพิกัดศุลกากรและรหัสสถิติ 899 (ตัน)			
	แพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์		คอมพิวเตอรื	
	8534.00.10 - 8534.00.90		8471.41.10	
	นำเข้า	ส่งออก	นำเข้า	ส่งออก
2558	0.37	0.00	0.00	0.00
2559	623.95	0.00	0.00	0.00
2560	341.29	0.00	0.00	0.00
2561	0.25	0.00	0.00	0.00

(ที่มา: กรมศุลกากร, 2562)

ตารางที่ 4-7 แสดงปริมาณซากคอมพิวเตอรืและแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการนำเข้าและส่งออกอ้างอิงข้อมูลจากกรมศุลกากรพบว่า ระหว่างปี พ.ศ. 2558-2561 มีการนำเข้าซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ตามพิกัดศุลกากร 8534.00.10 ถึง 8534.00.90 ที่กำกับต่อท้ายด้วยรหัสสถิติ 899 ในปริมาณทั้งสิ้น 0.37 623.95 341.29 0.25 ตัน ตามลำดับ และไม่มีการส่งออกแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ โดยจะเห็นว่าปริมาณซากที่นำเข้าตามพิกัดศุลกากรและรหัสสถิติข้างต้นมีความแตกต่างกันในแต่ละปีที่ทำการศึกษา

ปริมาณซากคอมพิวเตอร์ที่มีการนำเข้าและส่งออกอ้างอิงจากกรมศุลกากรพบว่า ระหว่างปี พ.ศ. 2558-2561 ไม่มีการนำเข้าและส่งออกปริมาณซากคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ไม่ใช่คอมพิวเตอร์ประเภทพกพาตามพิกัดศุลกากร 8471.41.10 รหัสสถิติ 899 เพื่อกำจัดข้ามแดนภายใต้อนุสัญญาบาเซล

2) ปริมาณการค้าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นจากการนำเข้าและส่งออก

ตารางที่ 4-8 ปริมาณการค้าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นจากการนำเข้าและส่งออก

ปีที่ รายงาน	ปริมาณนำเข้า (ตัน)		ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิด แผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผล (ตัน)			ปริมาณซากแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ชนิด แผงวงจรหลักและการ์ด แสดงผลของคอมพิวเตอร์ ประเภทตั้งโต๊ะ (ตัน)
	แผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์	คอมพิวเตอร์	คำนวณจากปริมาณของซาก		รวม	
			แผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์	คอมพิวเตอร์		
2558	0.37	0.00	0.05	0.00	0.05	0.03
2559	623.95	0.00	92.66	0.00	92.66	56.70
2560	341.29	0.00	47.68	0.00	47.68	29.18
2561	0.25	0.00	0.03	0.00	0.03	0.02

(ที่มา: กรมศุลกากร, 2562)

ตารางที่ 4-8 แสดงปริมาณการค้าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ อ้างอิงจากการนำเข้าและส่งออกตามพิกัดศุลกากร 8534.00.10 ถึง 8534.00.90 กำกับต่อท้ายด้วยรหัสสถิติ 899 โดยพบว่าระหว่างปี 2558 – 2561 มีปริมาณการค้าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลคิดเป็น 0.05 92.66 47.68 0.03 ตัน ตามลำดับ และคิดเป็นปริมาณการค้าซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ 0.03 56.70 29.18 0.02 ตัน ตามลำดับ

4.1.6 ปริมาณคาดการณ์ของซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในประเทศไทย

ตารางที่ 4-9 ปริมาณซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในประเทศไทย

ปีที่ รายงาน	ปริมาณคาดการณ์ของซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลัก และการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะจำแนกตามแหล่งกำเนิด (ตัน)				
	ครัวเรือน	สำนักงานและโรงแรม/ อะพาร์ตเมนต์	อุตสาหกรรม	การนำเข้า	รวม
2558	1,391.30	288.44	107.96	0.03	1,787.73
2559	1,401.38	290.53	132.07	56.70	1,880.68
2560	1,395.29	289.27	123.61	29.18	1,837.35
2561	1,407.12	291.72	148.89	0.02	1,847.75

ตารางที่ 4-9 แสดงปริมาณคาดการณ์ของซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้น จำแนกตามแหล่งข้อมูลได้แก่ ครัวเรือน สำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ อุตสาหกรรม การนำเข้าและส่งออก การศึกษาพบว่าระหว่างปี 2558 - 2561 ปริมาณคาดการณ์ของซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ เท่ากับ 1,787.73 1,880.68 1,837.35 1,847.75 ตามลำดับ โดยมากกว่าร้อยละ 74.51 เกิดขึ้นจากครัวเรือน รองลงมาคือปริมาณที่เกิดขึ้นจากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ คิดเป็นร้อยละ 15.45 - 16.13 ซึ่งปริมาณที่เกิดขึ้นจากครัวเรือน สำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์นั้นมีแนวโน้มคงที่ในแต่ละปีที่ทำการศึกษา

ปริมาณที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมคิดเป็นร้อยละ 6.04 – 8.06 และเกิดจากการนำเข้าคิดเป็นร้อยละ 0.00-3.01 ซึ่งปริมาณซากที่ได้จากอุตสาหกรรมและการนำเข้าจะมีปริมาณที่ไม่คงที่และแตกต่างกันในแต่ละปีที่ทำการศึกษา

4.2 ผลการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2558

ปริมาณคาดการณ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558 ทั้งสิ้น 1,787.73 ตัน สามารถจำแนกตามแหล่งกำเนิดดังนี้

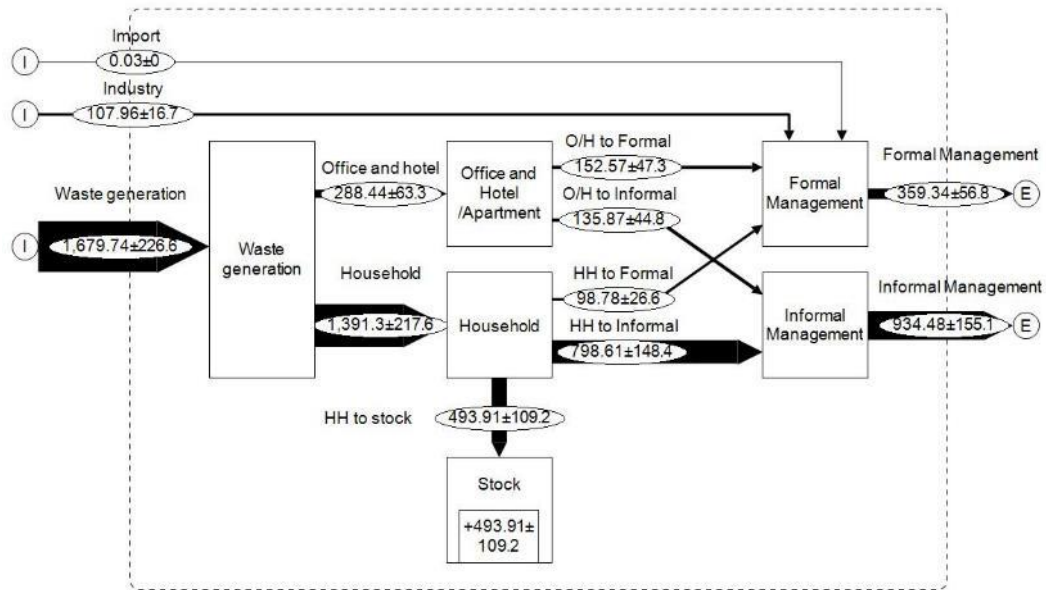
ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากการนำเข้ารายงานตามกรมศุลกากรทั้งสิ้น 0.03 ตัน และเกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมรายงานตามเอกสารกำกับ การขนส่งของเสียอันตรายทั้งสิ้น 107.96 ตัน โดยปริมาณที่เกิดขึ้นจากทั้งสองแหล่งกำเนิดข้างต้นจะถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรมและมีการจัดการซากตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากครัวเรือนทั้งสิ้น 1,391.30 ตัน คิดเป็นปริมาณที่มีการสะสมไว้ในระบบ 493.91 ตัน หรือร้อยละ 35.50 (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2562) คิดเป็นปริมาณที่จะถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม 98.78 ตัน หรือร้อยละ 7.10 (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2560) และคิดเป็นปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรม 798.61 ตัน หรือร้อยละ 57.40 ของปริมาณทั้งหมดที่เกิดขึ้นในครัวเรือน

ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ทั้งสิ้น 288.44 ตัน คิดเป็นปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม 152.57 ตัน หรือร้อยละ 52.89 ซึ่งได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับปริมาณจากครัวเรือนที่ได้รับการจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม และคิดเป็นซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรม 135.87 ตัน หรือร้อยละ 47.11 ของปริมาณทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์

ทั้งนี้ ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่ถูกจัดการทั้งสิ้น 1,293.82 ตัน คิดเป็นปริมาณที่ได้รับจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม 359.34 ตัน หรือร้อยละ 27.78 ซึ่งเกิดจากการนำเข้า

อุตสาหกรรม ครั้วเรือน สำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ ขณะที่ปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรมมีปริมาณมากกว่าคิดเป็น 934.48 ตัน หรือร้อยละ 72.22 ของปริมาณซากที่ได้รับการจัดการทั้งหมด ซึ่งเกิดจากครั้วเรือนและจากสำนักงาน โรงแรม/อะพาร์ตเมนต์เท่านั้น แสดงดังภาพที่ 4-2



ผังการไหลของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดจอของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ, 2558

ภาพที่ 4-2 ผังการไหลของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดจอแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นระหว่างปี พ.ศ. 2558

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2559

ปริมาณคาดการณ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในประเทศไทยในปี พ.ศ.2559 ทั้งสิ้น 1,880.68 ตัน สามารถจำแนกตามแหล่งกำเนิดดังนี้

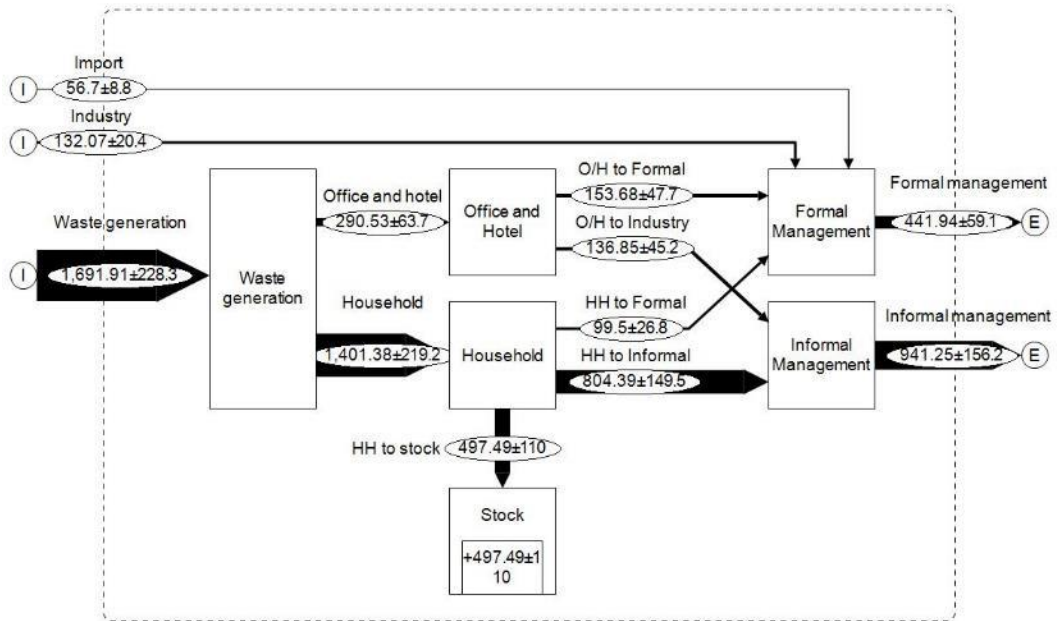
ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากการนำเข้ารายงานตามกรมศุลกากรทั้งสิ้น 56.70 ตัน และเกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมรายงานตามเอกสารกำกับ การขนส่งของเสียอันตรายทั้งสิ้น 132.07 ตัน โดยปริมาณทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากทั้งสองแหล่งกำเนิดข้างต้นจะถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรมและมีการจัดการซากตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากครัวเรือนทั้งสิ้น 1,401.38 ตัน คิดเป็นปริมาณที่มีการสะสมไว้ในระบบ 497.49 ตัน หรือร้อยละ 35.50 (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2562) คิดเป็นปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม 99.50 ตัน หรือร้อยละ 7.10 (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2560) และคิดเป็นปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรม 804.39 ตัน หรือร้อยละ 57.40 ของปริมาณทั้งหมดที่เกิดขึ้นในครัวเรือน

ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์คิดเป็น 290.53 ตัน คิดเป็นปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม 153.68 ตัน หรือร้อยละ 52.90 ซึ่งได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นจากครัวเรือนและได้รับการจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม ปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรม 136.85 ตัน หรือร้อยละ 47.10 ของปริมาณทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์

ทั้งนี้ ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่ได้รับการจัดการทั้งสิ้น 1,383.19 ตัน คิดเป็นปริมาณที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม 441.94 ตัน หรือร้อยละ 31.95 ซึ่งเกิดจากการนำเข้าอุตสาหกรรม ครัวเรือน สำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ ขณะที่ปริมาณซากที่ถูกจัดการโดย

ผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรมมีสัดส่วนมากกว่า โดยคิดเป็นปริมาณ 941.25 ตัน หรือร้อยละ 68.05 ของปริมาณซากที่ได้รับการจัดการทั้งหมด ซึ่งเกิดจากครัวเรือนและจากสำนักงาน โรงแรม/อะพาร์ตเมนต์เท่านั้น แสดงดังภาพที่ 4-3



ผังการไหลของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ, 2559

ภาพที่ 4-3 ผังการไหลของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นระหว่างปี พ.ศ. 2559

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2560

ปริมาณคาดการณ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2560 ทั้งสิ้น 1,837.35 ตัน สามารถจำแนกตามแหล่งกำเนิดดังนี้

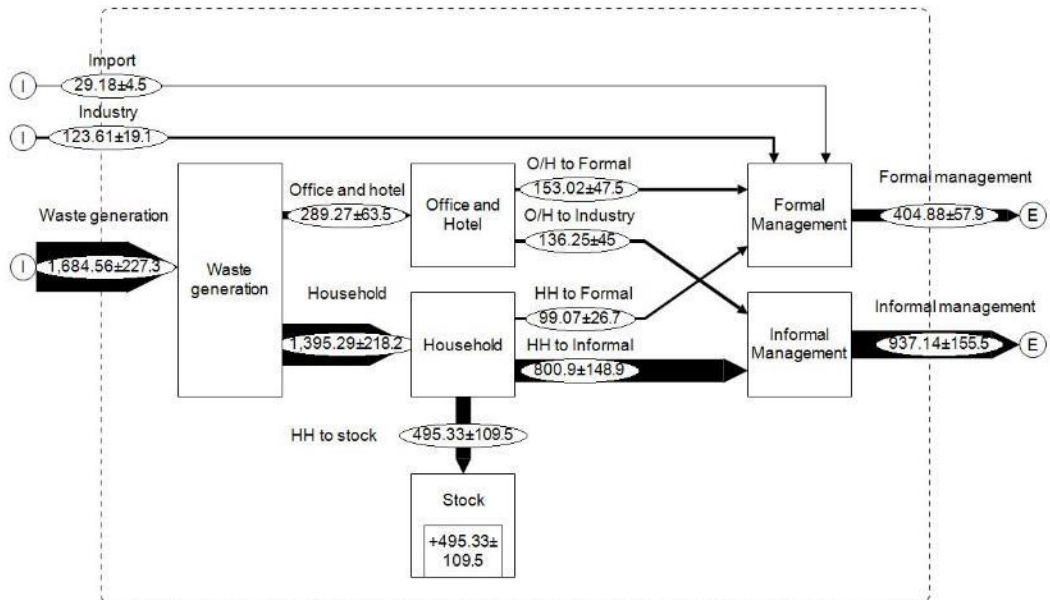
ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากการนำเข้ารายงานตามกรมศุลกากรทั้งสิ้น 29.18 ตัน และเกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมรายงานตามเอกสารกำกับ การขนส่งของเสียอันตรายทั้งสิ้น 123.61 ตัน โดยปริมาณทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากทั้งสองแหล่งกำเนิดข้างต้นถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรมและมีการจัดการซากตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากครัวเรือนทั้งสิ้น 1,395.29 ตัน คิดเป็นปริมาณที่มีการสะสมไว้ในระบบ 495.33 ตัน หรือร้อยละ 35.50 (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2562) คิดเป็นปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม 99.07 ตัน หรือร้อยละ 7.10 (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2560) และคิดเป็นปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรม 800.90 ตัน หรือร้อยละ 57.40 ของปริมาณทั้งหมดที่เกิดขึ้นในครัวเรือน

ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ทั้งสิ้น 289.27 ตัน คิดเป็นปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม 153.02 ตัน หรือร้อยละ 52.90 ซึ่งได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นจากครัวเรือนและถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม และคิดเป็นปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรมกำหนด 136.25 ตัน หรือร้อยละ 47.10 ของปริมาณทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์

ทั้งนี้ ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่ได้รับการจัดการทั้งสิ้น 1,342.02 ตัน ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม 404.88 ตัน หรือร้อยละ 30.17 ซึ่งเกิดจากการนำเข้า อุตสาหกรรม ครัวเรือน สำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ ขณะที่ปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงาน

อุตสาหกรรมมีสัดส่วนมากกว่า โดยคิดเป็นปริมาณ 937.14 ตัน หรือร้อยละ 69.83 ของปริมาณที่ได้รับการจัดการทั้งหมด ซึ่งเกิดจากครัวเรือนและจากสำนักงาน โรงแรม/อะพาร์ตเมนต์เท่านั้น แสดงดังภาพที่ 4-4



ผังการไหลของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรรวมและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ, 2560

ภาพที่ 4-4 ผังการไหลของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นระหว่างปี พ.ศ. 2560

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2561

ปริมาณคาดการณ์ของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2561 ทั้งสิ้น 1,847.75 ตัน สามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดดังนี้

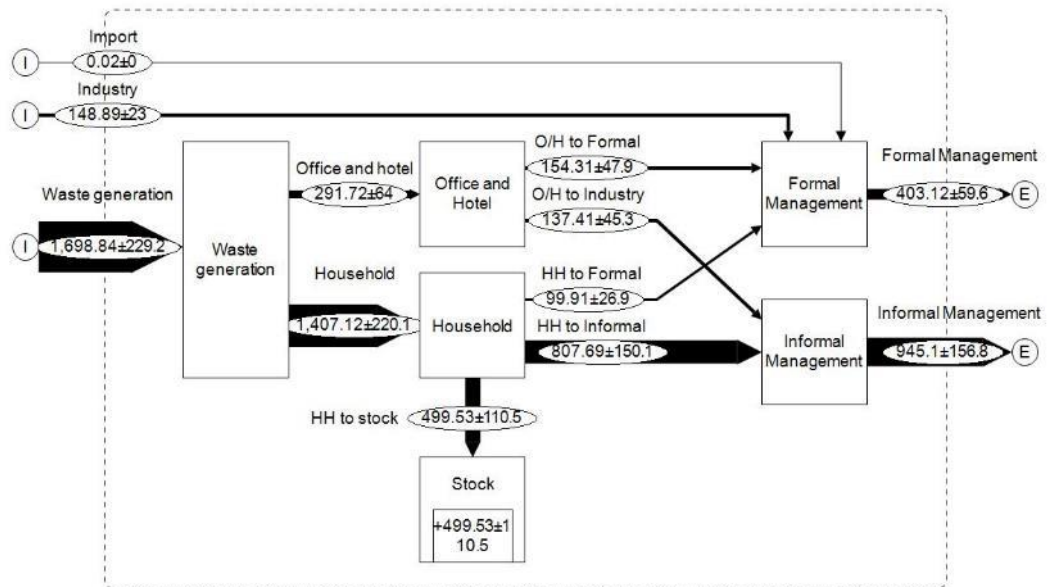
ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากการนำเข้ารายงานตามกรมศุลกากรทั้งสิ้น 0.02 ตัน และเกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมรายงานตามเอกสารกำกับ การขนส่งของเสียอันตรายทั้งสิ้น 148.89 ตัน โดยปริมาณทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากทั้งสองแหล่งกำเนิดข้างต้นจะถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรมและมีการจัดการซากตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากครัวเรือนทั้งสิ้น 1,407.12 ตัน คิดเป็นปริมาณที่มีการสะสมไว้ในระบบเท่ากับ 499.53 ตัน หรือร้อยละ 35.50 (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2562) ปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม 99.91 ตัน หรือร้อยละ 7.10 (ศูนย์วิจัยสิทธิกรไทย, 2560) และซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรม 807.69 ตัน หรือร้อยละ 57.40 ของปริมาณทั้งหมดที่เกิดขึ้นในครัวเรือน

ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ทั้งสิ้น 291.72 ตัน คิดเป็นปริมาณซากที่ได้ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม 154.31 ตัน หรือร้อยละ 52.90 ซึ่งได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับปริมาณซากที่เกิดขึ้นจากครัวเรือนและถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม และคิดเป็นปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรม 137.41 ตัน หรือร้อยละ 47.10 ของปริมาณทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์

ทั้งนี้ ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่ได้รับการจัดการทั้งสิ้น 1,348.22 ตัน โดยถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม 403.12 ตัน หรือร้อยละ 29.90 ซึ่งเกิดจากการนำเข้า อุตสาหกรรม ครัวเรือน สำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ ขณะที่ปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรมมีสัดส่วนมากกว่า คิดเป็นปริมาณ 945.10 ตัน หรือร้อยละ 70.09 ของ

ปริมาณซากที่ได้รับการจัดการทั้งหมด ซึ่งในส่วนนี้เกิดจากครัวเรือนและจากสำนักงาน โรงแรม/ อพาร์ทเมนต์เท่านั้น แสดงดังภาพที่ 4-5



เนื้องานไหลของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรรวมและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ, 2561

ภาพที่ 4-5 แผงการไหลของปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นระหว่างปี พ.ศ. 2561

4.2.5 ภาพรวมผลการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์

ปริมาณคาดการณ์ซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดแพลงจอร์หลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ ที่ประเมินจากปริมาณซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะตามรายงานการนำเข้าและส่งออกผ่านกรมศุลกากร อ้างอิงพิกัดศุลกากรที่ 8534.00.10 ถึง 8534.00.90 และพิกัดศุลกากรที่ 8471.41.10 และกำกับต่อท้ายด้วยรหัสสถิติ 899 รวมถึงปริมาณที่ประเมินจากซากของแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมตามเอกสารกำกับการขนส่งของเสียอันตราย จะมีปริมาณมากหรือน้อยแตกต่างกันในแต่ละปีที่ทำการศึกษา อย่างไรก็ตามปริมาณเหล่านี้จะถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม ภายใต้การควบคุมดูแลของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ว่าด้วยเรื่องการจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549) และไม่สามารถนำไปจัดการนอกเหนือจากหลักเกณฑ์ที่กรมโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดได้

ทั้งนี้ ปริมาณซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดแพลงจอร์หลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ ที่เกิดขึ้นจากครัวเรือนเพียงร้อยละ 7.1 และปริมาณที่เกิดขึ้นจากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์เพียงร้อยละ 52.89-52.90 จะถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้มีปริมาณที่ถูกจัดการทั้งสิ้น 359.34 441.94 404.88 403.12 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 27.78 31.95 30.17 29.91 ของซากที่ได้รับจัดการทั้งหมดในปี พ.ศ. 2558 - 2561 ตามลำดับ และถูกกำกับดูแลวิธีการจัดการซากโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม

ซากที่เกิดขึ้นจากครัวเรือนร้อยละ 57.40 และซากที่เกิดขึ้นจากสำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ร้อยละ 47.10 - 47.11 จะถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรมและคิดเป็นปริมาณทั้งสิ้น 934.48 941.25 937.14 945.10 ตันหรือร้อยละ 72.22 68.05 69.83 70.09 ของซากที่ได้รับการจัดการทั้งหมดในปี พ.ศ. 2558 - 2561 ตามลำดับ รายละเอียดแสดงดังตารางที่

ตารางที่ 4-10 ภาพรวมของผังการไหลของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ

ปีที่ รายงาน	ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผล ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะจำแนกตามผู้ประกอบการที่รับจัดการ (ตัน)					
	ปริมาณ ที่เกิดขึ้น	สะสมใน ระบบ	โรงงานอุตสาหกรรม		ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรม	
			ปริมาณ	ร้อยละ	ปริมาณ	ร้อยละ
2558	1,787.73	493.91	359.34	27.78	934.48	72.22
2559	1,880.68	497.49	441.94	31.95	941.25	68.05
2560	1,837.35	495.33	404.88	30.17	937.14	69.83
2561	1,847.75	499.53	403.12	29.91	945.10	70.09

ตารางที่ 4-10 แสดงภาพรวมของผังการไหลของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลักและการ์ดแสดงผลของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะในประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2558 – 2562 พบว่า ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์เฉลี่ยร้อยละ 70.05 จะถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรม ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดที่เป็นครัวเรือน สำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ ซึ่งการจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรม ไม่จำเป็นต้องรายงานวิธีการจัดการซากต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรม โดยอาจมีปริมาณซากบางส่วนที่ถูกจัดการอย่างไม่เหมาะสมและทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมาได้

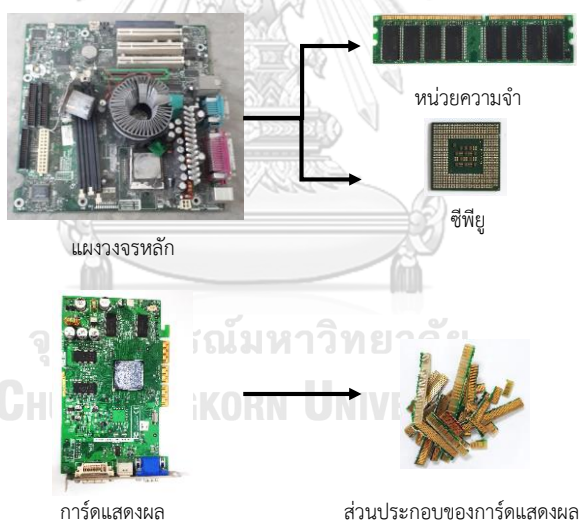
โดยปัญหาการตรวจติดตามกระบวนการจัดการซากนั้น อาจเกิดจากแหล่งจัดการซากอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมมีไม่เพียงพอและกระจุกอยู่ในบางภูมิภาคเท่านั้น (สายใจ วิทยานูมาส, 2560) โดยแนวทางในการเพิ่มสัดส่วนซากที่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสมภายใต้การควบคุมของอุตสาหกรรม สามารถทำได้โดยสนับสนุนให้มีความร่วมมือระหว่างภาครัฐกับเอกชนในการเก็บรวบรวมซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ หรือขยายความรับผิดชอบของผู้ผลิต (Extended Producer Responsibility) (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) การพัฒนาเทคโนโลยีรีไซเคิลและสนับสนุนให้เกิดการลงทุนด้านเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม (ชมพูนุช พรหมภักดี, 2555) เพื่อให้สามารถตรวจสอบกระบวนการและควบคุมผลกระทบที่จะเกิดขึ้นตั้งแต่การเกิดขึ้นของซากไปจนถึงการกำจัดซากได้ดียิ่งขึ้น กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ลดลง

4.3 ผลการศึกษาวิจัยการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย

การศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำโดยเลือกส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะ 3 ชนิดที่เป็นแผงวงจรมีโลหะมีค่าสูง (Razi, 2016) ได้แก่

1. หน่วยความจำ (RAM) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของแผงวงจรหลัก
2. ซีพียู (CPU) เป็นส่วนประกอบของแผงวงจรหลัก
3. ส่วนประกอบการ์ดแสดงผล (PCI card)

เป็นตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4-6 ชนิดของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างส่วนประกอบของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ทั้ง 3 ชนิดผ่านกระบวนการบดลดขนาดด้วยเครื่อง NARA JIYU เพื่อให้ขนาดเล็กกว่า 1 เซนติเมตร รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4-7 ซึ่งในกระบวนการลดขนาดทำให้สูญเสียแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เฉลี่ยร้อยละ 24.13 โดยน้ำหนัก

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่บดย่อยแล้วจะผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไนตริก และชะละลายด้วยกรดกัดทองเพื่อศึกษาผลของปริมาณกรดกัดทอง ผลของอุณหภูมิ และผลของเวลาต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายได้ และศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการตกตะกอนในขั้นต่อไป



ภาพที่ 4-7 ตัวอย่างซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลังผ่านการบดลดขนาด

4.3.1 ผลการศึกษาผลของปริมาณกรดกัดทอง อุณหภูมิ และระยะเวลาต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายได้

ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหน่วยความจำจะใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาผลของปริมาณกรดกัดทอง อุณหภูมิและระยะเวลาในการชะละลายต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายในครั้งนี้

1) ผลของปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณทองคำชะละลายได้จากหน่วยความจำ

ตารางที่ 4-11 ปริมาณของโลหะที่ชะละลายได้เมื่อชะละลายด้วยกรดกัดทองในปริมาณที่แตกต่างกัน

ปริมาณของกรดกัดทอง (มิลลิลิตร) ต่อน้ำหนักซาก (กรัม)	ปริมาณของโลหะที่ชะละลายได้ต่อน้ำหนักซาก			
	ทองคำ (ppm)	เงิน (ppm)	ทองแดง (%)	ตะกั่ว (ppm)
2 : 1	384.75	87.44	6.72	979.09
4 : 1	365.92	119.62	7.95	909.60
6 : 1	499.17	239.08	10.70	1494.78

ตารางที่ 4-11 แสดงผลของปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณของทองคำที่ชะละลายได้พบว่า ที่สัดส่วนกรดกัดทอง 2 4 และ 6 มิลลิลิตร ต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม สามารถชะละลายทองคำได้เฉลี่ย 384.75 365.92 และ 499.17 ppm ต่อน้ำหนักซาก ตามลำดับ โดยความแตกต่างกันของปริมาณ

กรดกัดทองที่ใช้ ไม่ทำให้ปริมาณทองคำที่ชะละลายได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ข.1

การศึกษาผลของปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณของเงินที่ชะละลายได้พบว่า ที่สัดส่วนกรดกัดทอง 2 4 และ 6 มิลลิลิตร ต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม สามารถชะละลายเงินได้เฉลี่ย 87.44 119.62 และ 239.08 ppm ต่อน้ำหนักซาก ตามลำดับ

การศึกษาผลของปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณทองแดงที่ชะละลายได้พบว่า ที่สัดส่วนกรดกัดทอง 2 4 และ 6 มิลลิลิตร ต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม สามารถชะละลายทองแดงได้เฉลี่ยร้อยละ 6.72 7.95 และ 10.70 ต่อน้ำหนักซาก ตามลำดับ

การศึกษาผลของปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณตะกั่วที่ชะละลายได้พบว่า ที่สัดส่วนกรดกัดทอง 2 4 และ 6 มิลลิลิตร ต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม สามารถชะละลายตะกั่วได้เฉลี่ย 979.09 909.60 และ 1,494.78 ppm ต่อน้ำหนักซาก ตามลำดับ

ปริมาณของเงิน ทองแดง และตะกั่วที่ชะละลายด้วยกรดกัดทองข้างต้น สามารถอธิบายด้วยผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังนี้ ที่สัดส่วนของกรดกัดทอง 6 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม ทำให้ปริมาณของเงิน ทองแดง และตะกั่วที่ชะละลายจากหน่วยความจำ มีความแตกต่างจากการชะละลายที่สัดส่วนของกรดกัดทอง 2 และ 4 มิลลิลิตรต่อซาก 1 กรัม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ข.1

2) การวิเคราะห์ผลของปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณทองคำที่ได้จากการชะละลายหน่วยความจำ

การวิเคราะห์ผลของปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณโลหะที่ได้จากการชะละลายหน่วยความจำ โดยกำหนดระยะเวลาในการชะละลาย 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเท่ากับ 25 °C พบว่า ที่สัดส่วนของกรดกัดทองเท่ากับ 6 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม จะทำให้ปริมาณของเงิน ทองแดง และตะกั่วที่ชะละลายได้เพิ่มขึ้นจากสัดส่วนกรดกัดทอง 2 และ 4 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม ตามลำดับ

ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดกัดทองต่อน้ำหนักซากเริ่มต้นทำให้ปริมาณทองคำที่ชะละลายได้มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นเช่นนี้ได้ก็ต่อเมื่อมีการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกรดไนตริกเพื่อลดปริมาณกรดกัดทองที่สูญเสียไปจากการทำปฏิกิริยากับโลหะชนิดอื่น เช่น ทองแดง และลดการเกิดสารประกอบที่ขัดขวางการชะละลายทองคำในกรดกัดทอง เช่น ซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) กรดเมตาสเตนนิค (H_2SnO_3) (Uhlig, 1948) โดยทั่วไปการชะละลายส่วนประกอบของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะใช้กรดกัดทองในปริมาณที่เพียงพอหรือประมาณ 2 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม เพื่อให้ซากแผงวงจรสามารถถูกชะละลายได้อย่างทั่วถึง (Sheng และ Etsell, 2007) หรือชะละลายที่ปริมาณเพิ่มขึ้นเท่ากับ 4 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก 1 กรัมตามความเหมาะสมของขนาดแผงวงจร (Dehchenari และคณะ, 2017) การเพิ่มปริมาณกรดกัดทองที่มากกว่าสัดส่วนที่กล่าวไปข้างต้น จะส่งไม่ส่งผลให้อัตราการชะละลายทองคำในส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น (Sheng และ Etsell, 2007)

การศึกษาในครั้งนี้จึงเลือกใช้สัดส่วนของกรดกัดทองเท่ากับ 6 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม สำหรับการศึกษาผลของอุณหภูมิและผลของระยะเวลาในการชะละลายซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยคำนึงถึงความเหมาะสมต่อน้ำหนักของซากเริ่มต้น ปริมาณของสารละลายที่ใช้ในการวิเคราะห์และการตกตะกอนเป็นสำคัญ

3) ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณทองคำที่ได้จากการชะละลายหน่วยความจำ

ตารางที่ 4-12 ปริมาณของโลหะที่ชะละลายได้เมื่อชะละลายที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณของโลหะที่ชะละลายได้ต่อน้ำหนักซาก			
	ทองคำ (ppm)	เงิน (ppm)	ทองแดง (%)	ตะกั่ว (ppm)
25	504.28	302.73	10.29	1,724.98
50	532.41	285.30	10.79	1,974.52
75	663.91	317.71	11.91	2,624.30

ตารางที่ 4-12 แสดงผลของอุณหภูมิต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายได้ โดยควบคุมสัดส่วนของปริมาณกรดที่ 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักซาก และชะละลายเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าที่

อุณหภูมิ 25 50 และ 75 °C สามารถชะละลายทองคำได้เฉลี่ย 504.28 532.41 และ 663.91 ppm ต่อน้ำหนักซาก ตามลำดับ ซึ่งที่อุณหภูมิ 75 °C ทำให้ปริมาณทองคำที่ชะละลายได้มีความแตกต่างจากการชะละลายที่อุณหภูมิ 25 และ 50 °C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ข.2

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณเงินที่ชะละลายได้พบว่า ที่อุณหภูมิ 25 50 และ 75 °C สามารถชะละลายเงินได้เฉลี่ย 302.73 285.30 และ 317.71 ppm ต่อน้ำหนักซาก ตามลำดับ

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณทองแดงที่ชะละลายได้พบว่า ที่อุณหภูมิ 25 50 และ 75 °C สามารถชะละลายทองแดงได้เฉลี่ยร้อยละ 10.29 10.79 และ 11.91 ต่อน้ำหนักซาก ตามลำดับ

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณตะกั่วที่ชะละลายได้พบว่า ที่อุณหภูมิ 25 50 และ 75 °C สามารถชะละลายตะกั่วได้เฉลี่ย 1,724.98 1,974.52 และ 2,624.30 ppm ต่อน้ำหนักซาก ตามลำดับ

ปริมาณของเงิน ทองแดง และตะกั่วที่ชะละลายด้วยกรดกัดทองข้างต้น สามารถอธิบายด้วยผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังนี้ ความแตกต่างของอุณหภูมิไม่ทำให้ปริมาณของเงินที่ชะละลายจากหน่วยความจำมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในขณะที่การชะละลายหน่วยความจำที่อุณหภูมิ 75 °C ทำให้ปริมาณทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้ มีความแตกต่างจากการชะละลายที่อุณหภูมิ 25 50 °C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ข.2 ตามลำดับ

4) การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณทองคำที่ได้จากการชะละลายหน่วยความจำ

การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณทองคำที่ได้จากการชะละลายหน่วยความจำ โดยควบคุมสัดส่วนของกรดกัดทองเท่ากับ 6 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 1 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการชะละลายเป็น 75 °C ไม่ทำให้ปริมาณเงินเปลี่ยนแปลงไป แต่ทำให้ปริมาณทองคำ ทองแดง และตะกั่วที่ชะละลายได้เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 25 และ 50 °C เนื่องจากการชะละลายด้วยกรดกัดทองเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจึงเป็นการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของการชะละลาย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการชะละลายทองคำบริสุทธิ์และของเสียจากอุตสาหกรรมเครื่องประดับ (ปราโมทย์ ภู

พานทอง, 2554) อีกทั้งการเพิ่มอุณหภูมิยังเป็นการเร่งให้เกิดก๊าซคลอรีนและไนตริกออกไซด์ที่เกิดจากการผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและกรดไนตริก โดยก๊าซสองชนิดนี้จะช่วยให้เกิดการกวนผสมในสารละลายและทำให้กรดสามารถชะละลายโลหะบนซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย (Sheng และ Etsell, 2007) ทั้งนี้ การเพิ่มอุณหภูมิของการชะละลายไม่ควรเกิน 86 °C เพราะจะทำให้กรดไนตริกซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์สลายตัวได้ง่าย และส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการชะละลายโลหะได้ (ปราโมทย์ ภูพานทอง, 2545)

การศึกษาในครั้งนี้จึงเลือกชะละลายซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สัดส่วนของกรดกัดทองเท่ากับ 6 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 75 °C เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาในการชะละลายซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

5) ผลของเวลาต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ

ตารางที่ 4-13 ปริมาณของโลหะที่ชะละลายได้เมื่อชะละลายในเวลาที่แตกต่างกัน

เวลาในการชะละลาย (ชั่วโมง)	ปริมาณของโลหะที่ชะละลายได้ต่อน้ำหนักซาก			
	ทองคำ (ppm)	เงิน (ppm)	ทองแดง (%)	ตะกั่ว (ppm)
0.5	610.05	257.81	12.33	2,284.87
1	663.91	317.71	11.91	2,624.30
2	645.99	302.76	12.41	1,873.08
4	746.76	316.50	12.99	2,422.21

ตารางที่ 4-13 แสดงผลของเวลาต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายได้ โดยควบคุมสัดส่วนของปริมาณกรดที่ 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักซาก ที่อุณหภูมิ 75 °C พบว่า เวลาในการชะละลาย 0.5 1 2 และ 4 ชั่วโมง สามารถชะละลายทองคำได้เฉลี่ย 610.05 663.91 645.99 และ 746.76 ppm ต่อน้ำหนักซาก ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างของเวลาไม่ทำให้ปริมาณของทองคำที่ชะละลายจากหน่วยความจำ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ข.3 ตามลำดับ

การศึกษาผลของเวลาต่อปริมาณเงินที่ชะละลายได้ พบว่าที่เวลา 0.5 1 2 และ 4 ชั่วโมง สามารถชะละลายเงินได้เฉลี่ย 257.81 317.71 302.76 และ 316.50 ppm ต่อน้ำหนักซาก ตามลำดับ

การศึกษาผลของเวลาต่อปริมาณทองแดงที่ชะละลายได้ พบว่าที่เวลาในการชะละลาย 0.5 1 2 และ 4 ชั่วโมง สามารถชะละลายทองแดงได้เฉลี่ยร้อยละ 12.33 11.91 12.41 และ 12.99 ต่อน้ำหนักซาก ตามลำดับ

การศึกษาผลของเวลาต่อปริมาณตะกั่วที่ชะละลายได้ พบว่าที่เวลาในการชะละลาย 0.5 1 2 และ 4 ชั่วโมง สามารถชะละลายตะกั่วได้เฉลี่ย 2,284.87 2,624.30 1,873.08 และ 2,422.21 ppm ต่อน้ำหนักซาก ตามลำดับ

ปริมาณของเงิน ทองแดง และตะกั่วที่ชะละลายด้วยกรดกัดทองข้างต้น สามารถอธิบายด้วยผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังนี้ ความแตกต่างของเวลาไม่ทำให้ปริมาณของเงินที่ชะละลายจากหน่วยความจำ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในขณะที่ความแตกต่างของเวลาทำให้ปริมาณทองแดงและตะกั่ว มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ข.3 ตามลำดับ

6) การวิเคราะห์ผลของเวลาต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ

การวิเคราะห์ผลของเวลาต่อปริมาณทองคำที่ได้จากการชะละลายหน่วยความจำ โดยกำหนดสัดส่วนของกรดกัดทองเท่ากับ 6 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม ที่อุณหภูมิในการชะละลาย 75 °C พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการชะละลายทำให้ปริมาณของทองคำ เงิน และตะกั่วเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าปริมาณของทองคำที่ระยะเวลาในการชะละลายที่ 2 ชั่วโมง จะลดลงจากปริมาณทองคำที่ชะละลายที่ 1 ชั่วโมง ซึ่งอาจเกิดจากการชะละลายสลับกับการตกตะกอนบนผิวของทองแดงกลับมาเป็นช่วงๆ ในสารละลายหรือที่เรียกว่า Cementation ได้ (ปราโมทย์ ภูพานทอง, 2554)

ในขณะที่การเพิ่มระยะเวลาในการชะละลายหน่วยความจำทำให้ปริมาณของทองแดงในสารละลายเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาในการชะละลาย 4 ชั่วโมง ทำให้ปริมาณทองแดงที่ชะละลายได้แตกต่างจากระยะเวลาในการชะละลาย 0.5 1 2 ชั่วโมง เนื่องจากทองแดงจะสามารถทำปฏิกิริยากับ

กรดกัดทองเช่นเดียวกับทองคำ และยังสามารถทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกเกิดเป็นสารละลายคอปเปอร์ไคลด์ (CuCl₂) (Xiao และคณะ, 2017) ทำให้เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการชะละลายจึงเป็นการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดกัดทองและทองแดง (ปราโมทย์ ภูพานทอง, 2554) ซึ่งเป็นโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย

4.3.2 ผลการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณทองคำในขั้นตอนการปรับสภาพและชะละลาย

การศึกษาผลของปริมาณกรดกัดทอง อุณหภูมิและระยะเวลาในการชะละลายต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายโดยใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหน่วยความจำเป็นตัวอย่างในการทดลอง ทำให้ทราบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิจะส่งผลต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายได้ แต่ความแตกต่างของปริมาณกรดกัดทองต่อน้ำหนักซากและระยะเวลาไม่ส่งผลต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายได้

ในการชะละลายทองคำจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ ได้แก่ ซีพียูและหน่วยความจำ จะกำหนดอุณหภูมิในการชะละลายที่ 75 °C ใช้สัดส่วนของกรดกัดทองเท่ากับ 6 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม และกำหนดระยะเวลาที่ 4 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบปริมาณทองคำที่ชะละลายได้ต่อไป

1) ผลของการชะละลายซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดไนตริกและกรดกัดทอง

ผลการปรับสภาพด้วยกรดไนตริกและผลการชะละลายด้วยกรดกัดทองเปรียบเทียบระหว่างซากหน่วยความจำ ซีพียู และส่วนประกอบของการ์ดแสดงผลที่สัดส่วนของกรดกัดทองเท่ากับ 6 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก 1 กรัม โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 75 °C และระยะเวลา 4 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 ปริมาณของโลหะที่ชะละลายในขั้นตอนการปรับสภาพด้วยกรดไนตริกและการชะละลายด้วยกรดกัดทอง

ชนิดซาก	ขนาด (ซม. x ซม.)	น้ำหนัก เฉลี่ย (ก.)	กรดที่ ชะละลาย	ปริมาณของโลหะที่ชะละลายได้ ต่อน้ำหนักซาก			
				ทองคำ (ppm)	เงิน (ppm)	ทองแดง (%)	ตะกั่ว (ppm)
หน่วยความจำ	13.5 x 3.2	17.26	กรดไนตริก	15.49	772.91	26.64	4,063.42
			กรดกัดทอง	746.76	316.50	12.99	2,422.21
			รวม	762.25	1089.41	39.63	6,485.63
ซีพียู	3.5 x 3.5	4.87	กรดไนตริก	5.75	0.00	40.01	7,187.36
			กรดกัดทอง	1,616.84	23.24	42.16	4,136.30
			รวม	1622.59	23.24	82.17	11.32 x 10 ³
ส่วนประกอบ ของการ์ด แสดงผล	-	1.81 107.90*	กรดไนตริก	19.18	40.96	25.74	1,790.14
			กรดกัดทอง	1,942.40	134.97	11.53	625.37
			รวม	1,961.58	175.93	37.27	2,415.51

หมายเหตุ: * น้ำหนักเฉลี่ยของการ์ดแสดงผล

ตารางที่ 4-14 แสดงสัดส่วนโดยน้ำหนักของโลหะที่ชะละลายได้จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ ได้แก่ หน่วยความจำ ซีพียู และส่วนประกอบของการ์ดแสดงผล พบว่าในสารละลายกรดไนตริกมีปริมาณทองคำคิดเป็นร้อยละ 2.03 0.35 และ 0.98 ตามลำดับ และในสารละลายกรดกัดทองมีปริมาณทองคำคิดเป็นร้อยละ 97.97 99.65 และ 99.02 ของปริมาณทองคำที่ชะละลายได้ทั้งหมด ตามลำดับ

การศึกษาปริมาณเงินที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ ซีพียู และส่วนประกอบของการ์ดแสดงผลพบว่า ในสารละลายกรดไนตริกมีปริมาณเงินร้อยละ 70.95 0 และ 23.28 ตามลำดับ และในสารละลายกรดกัดทองมีปริมาณเงินร้อยละ 29.05 100 และ 76.72 ของปริมาณเงินที่ชะละลายได้ทั้งหมด ตามลำดับ

การศึกษาปริมาณทองแดงที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ ซีพียู และส่วนประกอบของการ์ดแสดงผลพบว่า ในสารละลายกรดไนตริกมีปริมาณทองแดงร้อยละ 67.22 48.69 และ 69.06 ตามลำดับ และในสารละลายกรดกำด้อมมีปริมาณทองแดงร้อยละ 32.78 51.31 และ 30.94 ของปริมาณทองแดงที่ชะละลายได้ทั้งหมด ตามลำดับ

การศึกษาปริมาณตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ ซีพียู และส่วนประกอบของการ์ดแสดงผลพบว่า ในสารละลายกรดไนตริกมีปริมาณตะกั่วคิดเป็นร้อยละ 62.65 63.49 และ 74.11 ตามลำดับ และในสารละลายกรดกำด้อมมีปริมาณตะกั่วคิดเป็นร้อยละ 37.35 36.51 และ 24.89 ของปริมาณตะกั่วที่ชะละลายได้ทั้งหมด ตามลำดับ

2) การวิเคราะห์ผลของการชะละลายซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดไนตริกและกรดกำด้อม

เมื่อนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาปรับสภาพโดยการชะละลายด้วยกรดไนตริก พบว่า คลอรีนที่เป็นองค์ประกอบหรือปะปนมากับซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อาจถูกชะละลายในสารละลายกรดไนตริกและทำให้ตรวจพบทองคำในสารละลายกรดไนตริกคิดเป็นร้อยละ 0.35 – 2.0 ของทองคำที่ชะละลายได้ทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ชะละลายแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ชนิดซีพียูที่มีทองคำอยู่ปริมาณเล็กน้อยในสารละลายกรดไนตริก (Dehchenari และคณะ, 2017)

เงินเมื่อถูกชะละลายด้วยกรดกำด้อมจะอยู่ในรูปซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) และตะกั่วจะอยู่ในรูปของเลดคลอไรด์ (PbCl_2) ซึ่งสารประกอบคลอไรด์ของเงินและตะกั่วจะละลายน้ำได้น้อยมาก ทั้งนี้เมื่อตะกั่วเกิดขึ้นในสารละลายกรดกำด้อมซึ่งมีความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สูง จะสามารถทำให้ซิลเวอร์คลอไรด์ชะละลายโดยจะเปลี่ยนอยู่ในรูปของไดคลอโรซิลเวอร์ (AgCl_2^-) (Xiao และคณะ, 2017) ขณะที่ตะกั่วจะสามารถชะละลายในสารละลายกรดกำด้อมเช่นเดียวกัน (Chen และ Ma, 2001) ทำให้ในการวิเคราะห์ตรวจพบเงินและตะกั่วละลายอยู่ในสารละลายกรดกำด้อมในช่วง 23.24 – 316.5 ppm และ 625.4 – 4,136 ppm ตามลำดับ อย่างไรก็ตามปริมาณเงิน ทองแดงและตะกั่วส่วนมากจะถูกพบในกระบวนการปรับสภาพกรดไนตริกที่เป็นขั้นตอนก่อนหน้า ผลการศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าที่ชะละลายแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของโทรศัพท์ด้วยกรดกำด้อมโดย

พบเงินในช่วง 239.43 - 309.26 โดยสามารถชะละลายทองคำในช่วง 851.60 – 903.34 ppm ตามลำดับ (Petter และคณะ, 2014)

การวิเคราะห์ผลของการชะละลายซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหน่วยความจำด้วยกรดไนตริกและกรดกัดทองพบว่า เมื่อปรับสภาพซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดไนตริกก่อนชะละลายด้วยกรดกัดทองจะสามารถลดสัดส่วนระหว่างปริมาณเงินต่อทองคำลงได้ โดยสัดส่วนของปริมาณทองคำต่อเงินสามารถลดลงจาก 1.4 เหลือ 0.4 เท่า และยังสามารถช่วยลดการเกิดตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) ในกรดกัดทองซึ่งอาจขัดขวางการชะละลายทองคำได้เมื่อเกิดตะกอนบนผิวหน้าทองคำ (ปราโมทย์ ภูพานทอง, 2554) โดยเงินจะถูกชะละลายไปก่อนแล้วในกลายเป็นซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO₃) ในขั้นตอนการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายกรดไนตริก

สำหรับการปรับสภาพซากซีพียูและส่วนประกอบของการ์ดแสดงผลด้วยกรดไนตริกสามารถชะละลายเงินได้น้อยกว่าร้อยละ 25 ของปริมาณเงินทั้งหมดที่ชะละลายได้ กล่าวคือพบปริมาณเงินในสารละลายกรดกัดทองมากกว่าในกรดไนตริกซึ่งอาจผลถึงการชะละลายทองคำได้ ทั้งนี้ สารละลายกรดกัดทองมีสัดส่วนของปริมาณเงินต่อทองคำอยู่เพียง 0.014 และ 0.09 ของซากซีพียูและการ์ดแสดงผลตามลำดับ ซึ่งอาจไม่ส่งผลหรือส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อการชะละลายทองคำด้วยกรดกัดทองที่มีความเข้มข้นสูง

ปริมาณทองคำทั้งหมดที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าที่ศึกษาปริมาณทองคำในหน่วยความจำ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้พบทองคำในสัดส่วนต่อน้ำหนักที่น้อยกว่าค่าเฉลี่ยของการศึกษาก่อนหน้า (Charles และคณะ, 2017; REWR, 2012) ด้านปริมาณทองคำที่ชะละลายได้จากซีพียูและการ์ดแสดงผลพบว่ามีปริมาณมากกว่าการศึกษาก่อนหน้า (Razi, 2016) ทั้งนี้ การเปรียบเทียบปริมาณทองคำดังกล่าว ไม่สามารถให้ข้อสรุปได้ว่าทองคำในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร เนื่องจากไม่ได้มีการคัดเลือกตัวอย่างซากแผงวงจรตามปีที่มีการผลิต

4.3.3 ผลการศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากการตกตะกอนด้วยโซเดียมเมตาซัลไฟต์ในสารละลายกรดกัดทอง

1) ผลของการตกตะกอนทองคำจากสารละลายกรดกัดทองด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์

ตารางที่ 4-15 ปริมาณโลหะในสารละลายกรดกัดทองก่อนและหลังตกตะกอนด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์

ชนิดซาก	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)	สารละลายกรดกัดทอง	ปริมาณของโลหะที่ชะละลายได้ต่อน้ำหนักซาก			
			ทองคำ (ppm)	เงิน (ppm)	ทองแดง (%)	ตะกั่ว (ppm)
หน่วยความจำ	17.26	ก่อนตกตะกอน	746.76	316.50	12.99	2,422.21
		หลังตกตะกอน	46.52	316.46	11.63	1,530.13
		ร้อยละการนำกลับคืน	93.77	0.01	10.47	36.83
ซีพียู	4.87	ก่อนตกตะกอน	1,616.84	23.24	42.16	4,136.30
		หลังตกตะกอน	2.47	9.15	40.24	2,653.12
		ร้อยละการนำกลับคืน	99.85	60.63	4.55	35.86
ส่วนประกอบของการ์ดแสดงผล	1.81	ก่อนตกตะกอน	1,942.40	135.00	11.53	625.37
		หลังตกตะกอน	58.31	112.91	10.58	119.15
		ร้อยละการนำกลับคืน	97.00	16.36	8.24	80.95

ตารางที่ 4-15 แสดงสัดส่วนโดยน้ำหนักของทองคำ เงิน ทองแดง และตะกั่วในสารละลายกรดกัดทองทั้งก่อนและหลังการตกตะกอนด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์พบว่า ร้อยละการนำกลับคืนของทองคำจากส่วนประกอบของหน่วยความจำ ซีพียู และส่วนประกอบของการ์ดแสดงผล คิดเป็น 93.77 99.85 และ 97.00 ตามลำดับ

ร้อยละการนำกลับคืนของเงินจากหน่วยความจำ ซีพียู และส่วนประกอบของการ์ดแสดงผล คิดเป็น 0.01 60.63 และ 16.36 ตามลำดับ

ร้อยละการนำกลับคืนของทองแดงจากหน่วยความจำ ซีพียู และส่วนประกอบการ์ดแสดงผล คิดเป็น 10.47 4.55 และ 8.24 ตามลำดับ

ร้อยละการนำกลับคืนของตะกั่วจากหน่วยความจำ ซีพียู และส่วนประกอบของการ์ด แสดงผล คิดเป็น 36.83 35.86 และ 80.95 ตามลำดับ

2) การวิเคราะห์ผลของการตกตะกอนทองคำในสารละลายกรดกัดทองด้วยโซเดียม-เมตาไบซัลไฟต์

การวิเคราะห์ผลของการตกตะกอนทองคำจากสารละลายกรดกัดทองด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์พบว่า ซากหน่วยความจำ ซีพียู และส่วนประกอบของการ์ดแสดงผล สามารถนำกลับคืนทองคำเฉลี่ยเมื่อเทียบกับน้ำหนักซากของแผงวงจรทั้ง 3 ชนิด คิดเป็นร้อยละ 95.25 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าที่ใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ตกตะกอนทองคำจากกรดกัดทองที่มีทองคำน้อยกว่าร้อยละ 2.66 ซึ่งสามารถนำกลับคืนทองคำได้อยู่ในช่วงร้อยละ 93.50 – 99.88 (ปราโมทย์ ภูพานทอง, 2554)

การวิเคราะห์ผลของความบริสุทธิ์ของทองคำในตะกอนโดยใส่สารตกตะกอนมากกว่าที่ต้องการทำปฏิกิริยากับทองคำ 1 เท่า หรือคิดเป็น 1.55 กรัมของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ จากปริมาณที่ต้องการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 0.78 กรัมของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ต่อ 1 กรัมของทองคำ (ปราโมทย์ ภูพานทอง, 2549) เนื่องจากต้องการให้สารตกตะกอนเพียงพอในการทำปฏิกิริยากับทองคำในสารละลาย ส่งผลให้สารตกตะกอนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับทองคำ จะทำปฏิกิริยากับเงิน ทองแดงและตะกั่วที่อยู่ในสารละลายละลายร่วมด้วย และส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของทองคำที่ได้จากการตกตะกอนคิดเป็น 4.61 7.24 และ 15.82 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันตามองค์ประกอบของสารละลายกรดกัดทองเริ่มต้น

ทั้งนี้ ในอุตสาหกรรมการนำกลับคืนทองคำจะมีการล้างตะกอนทองคำอีกครั้งด้วยกรดเพื่อชะละลายเงิน ทองแดงและตะกั่ว (Dehchenari และคณะ, 2017) หรือใช้ความร้อนหลอมเพื่อทำให้ทองคำมีความบริสุทธิ์มากขึ้นถึงร้อยละ 99.99 (ปราโมทย์ ภูพานทอง, 2554) ซึ่งในการศึกษาในครั้งนี้ ไม่ได้มีการล้างตะกอนทองคำด้วยกรดหรือการหลอมเนื่องจากตะกอนทองคำที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อย ซึ่งในการวิเคราะห์อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำได้ จึงวิเคราะห์ทองคำที่หลงเหลือจากสารละลายหลังตกตะกอนเพียงเท่านั้น โดยข้อมูลการวิเคราะห์ฝังการไหลและประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการนำกลับคืนทองคำจากซากแผงวงจร

อิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ด้วยกรดกัดทองจะอ้างอิงร้อยละการนำกลับคืนของทองคำจากผลการศึกษาในครั้งนี้

4.3.4 ผลการศึกษาปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทอง

ตารางที่ 4-16 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เมื่อใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย

กระบวนการ/ตัวแปรควบคุม	สารเคมี	ความเข้มข้น	ปริมาณสารเคมี	ที่มา
1. การลดขนาด - ร้อยละการสูญเสีย 24.13	-	-	-	งานวิจัยนี้
2. การปรับสภาพเบื้องต้น ด้วยกรดไนตริก - อุณหภูมิ 70 °C - สูญเสียทองคำร้อยละ 1.34	HNO ₃	65	1 มล. / 1 ก. ซากหลังบัด	Sheng และ Etsell (2007)
	น้ำกลั่น	-	2 มล. / 1 ก. ซากหลังบัด	
3. การชะละลายด้วยกรดกัดทอง - อุณหภูมิ 75 °C - ระยะเวลา 4 ชั่วโมง	HNO ₃	65	2 4 และ 6 มล. / 1 ก. ซากหลังบัด	งานวิจัยนี้
	HCl	37		
4. การตกตะกอน - ช่วงพีเอช 2-4 - ร้อยละการนำกลับคืน 95.25 - ความบริสุทธิ์ของทองคำ ร้อยละ 99.99	NaOH	5 M	1.48 มล. / สารละลายกรด 1 มล.	งานวิจัยนี้
	น้ำกลั่น			
	Na ₂ S ₂ O ₅	-	0.78 ก. / ทองคำ 1 ก.	ปราโมทย์ ภูพานทอง (2011)

ตารางที่ 4-16 แสดงปริมาณและความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เมื่อใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายทองคำ ตั้งแต่ขั้นตอนการลด

ขนาด การปรับสภาพซากแมงวงจรโดยการชะละลายด้วยกรดไนตริก การชะละลายทองคำด้วยกรดกัดทอง และการตกตะกอนทองคำด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์

ปริมาณของกรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริกและน้ำกลั่นรายงานตามสัดส่วนเป็นปริมาณต่อน้ำหนักแมงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลังลดขนาด โดยในขั้นตอนการปรับสภาพ สารละลายกรดไนตริกที่ใช้ชะละลายมีความเข้มข้นร้อยละ 22 ใช้ในการปรับสภาพในสัดส่วน 3 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนัก

ในขั้นตอนการชะละลายด้วยกรดกัดทอง ปริมาณของสารละลายกรดกัดทองที่ใช้ในการศึกษาจะอยู่ในช่วง 2 4 และ 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมซากหลังบด ซึ่งกรดกัดทองเป็นสารละลายผสมระหว่างกรดไนตริก 1 ส่วนต่อกรดไฮโดรคลอริก 3 ส่วนโดยปริมาตร โดยขั้นตอนนี้กำหนดอุณหภูมิเป็น 75 °C และระยะเวลาในการชะละลาย 4 ชั่วโมงที่สามารถชะละลายโลหะที่สูงที่สุด อ้างอิงจากผลการทดลอง

ในขั้นตอนการตกตะกอนมีการใช้ปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับพีเอชของสารละลายกรดกัดทองให้อยู่ในช่วง 2 – 4 (Brug และคณะ, 1974) โดยรายงานตามสัดส่วนเป็นปริมาณต่อปริมาณสารละลายกรดกัดทองที่ใช้ในกระบวนการชะละลายซึ่งศึกษาที่สัดส่วน 1.48 มิลลิลิตรต่อสารละลายกรดกัดทอง 1 มิลลิลิตร

ปริมาณของโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์เพื่อตกตะกอนทองคำรายงานตามสัดส่วนโดยน้ำหนักของสารต่อน้ำหนักทองคำที่มีอยู่ในสารละลาย ซึ่งศึกษาที่สัดส่วน 0.78 กรัม ต่อทองคำ 1 กรัม โดยให้ความบริสุทธิ์ของทองคำร้อยละ 99.99 โดยประมาณ (ปราโมทย์ ภูพานทอง, 2554)

ในการศึกษาจะมีการรายงานช่วงความไม่แน่นอนของปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นในการวิเคราะห์หึ่งการไหลต่อไป โดยจะกำหนดความไม่แน่นอนของขั้นตอนการบดลดขนาด การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกรดไนตริก การชะละลายด้วยกรดกัดทอง และการตกตะกอนทองคำเท่ากับร้อยละ 15.29 6.8 6.8 และ 6.8 ของค่าที่รายงานตามลำดับ แสดงดังภาคผนวกที่ ค.2

4.3.5 ผลการศึกษาปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากซากแมงวงจรอเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงด้วยกรดกัดทอง

ตารางที่ 4-17 ปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากซากแมงวงจรอเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงด้วยกรดกัดทอง

กระบวนการ	ปริมาณของกรดกัดทอง ต่อน้ำหนักซากหลังบด (มล. / ก.)	ปริมาณของโลหะที่ชะละลายได้ต่อน้ำหนักซาก			
		ทองคำ (ppm)	เงิน (ppm)	ทองแดง (%)	ตะกั่ว (ppm)
ปรับสภาพ	-	13.79	560.33	29.29	4,526.65
ชะละลาย ด้วย กรดกัดทอง	2 : 1	781.49	88.90	11.81	1,725.01
	4 : 1	743.32	121.63	13.98	1,602.84
	6 : 1	1,013.98	243.12	18.81	2,634.84

ตารางที่ 4-17 แสดงปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ถูกชะละลายจากซากแมงวงจรอเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูง โดยใช้ด้วยกรดกัดทองที่ปริมาณแตกต่างกันตั้งแต่ 2 4 และ 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักซากหลังบด โดยควบคุมอุณหภูมิของการชะละลายเท่ากับ 75 °C เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

4.4 ผลการศึกษาวิจัยการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สารประกอบโซเดียมไนต์เป็นสารชะละลาย

4.4.1 ผลการศึกษาปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารประกอบโซเดียมไนต์

ตารางที่ 4-18 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เมื่อใช้สารประกอบโซเดียมไนต์เป็นสารชะละลาย

กระบวนการ/ตัวแปรควบคุม	สารเคมี	ปริมาณสารเคมี (ความเข้มข้น)	ที่มา
1. การลดขนาด - สูญเสียร้อยละ 24.13	-	-	-
2. การชะละลายด้วยสารประกอบโซเดียมไนต์ - อุณหภูมิ 25 °C - ระยะเวลา 4 ชั่วโมง - ช่วงพีเอช 12.5 - 12.6 - ชะละลายคิดเป็นร้อยละ 60 เมื่อเทียบกับกรดกัดทอง	สารละลายสารประกอบโซเดียมไนต์ 2.4 และ 6 มล. / 1 ก. ซากหลังบัด KCN	(60 ก./ล.)	งานวิจัยนี้ Petter และคณะ (2014)
	NaOH	(40 ก./ล.)	ฉวีวรรณ และศรากร (2018)
3. การนำกลับคืนทองคำจากสารละลายโซเดียมไนต์ทางไฟฟ้า - ระยะเวลา 2 ชั่วโมง - กระแสไฟฟ้าที่ใช้ 20 A / 6 V - ร้อยละการนำกลับคืน 99.5	ฝอยเหล็ก (Steel wool)	12.5 ก./ทองคำ 1 ก.	ปราโมทย์ ภูพานทอง (2002)
4. การแยกทองคำออกจากฝอยเหล็กด้วยการชะละลายกรดไฮโดรคลอริก - ความบริสุทธิ์ของทองคำร้อยละ 90-99	HCl 5 M	10 ล. / ฝอยเหล็ก 1 กก.	McClelland และคณะ (1985), กพร. (2013)

ตารางที่ 4-18 แสดงปริมาณและความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เมื่อใช้สารประกอบโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารชะละลายทองคำ ตั้งแต่ขั้นตอนการชะละลายทองคำด้วยสารประกอบโซเดียมไฮดรอกไซด์ การนำกลับคืนทองคำจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไฟฟ้า

ปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์รายงานเป็นสัดส่วนของปริมาณต่อน้ำหนักแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลังบดลดขนาดแล้ว โดยศึกษาอยู่ในช่วง 2 4 และ 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักซากหลังบด โดยชะละลายที่อุณหภูมิเป็น 25 °C และชะละลายในเวลา 4 ชั่วโมงที่เท่ากันกับกระบวนการที่ใช้กรดกัดทอง

ปริมาณของสารประกอบโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์รายงานตามสัดส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรของสารละลาย โดยศึกษาที่ 60 กรัมต่อลิตรและ 40 กรัมต่อลิตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับ ร้อยละการนำกลับคืนทองคำของกระบวนการแยกทองคำทางไฟฟ้าจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับร้อยละ 99.5

ปริมาณของฟลอยด์ที่ใช้เป็นขั้วเพื่อตกตะกอนทองคำทางไฟฟ้ารายงานตามสัดส่วนของน้ำหนักของฟลอยด์ต่อน้ำหนักทองคำ โดยศึกษาที่ 12.5 กรัม ต่อทองคำ 1 กรัม โดยให้ความบริสุทธิ์ของทองคำร้อยละ 90-99 โดยประมาณ

ปริมาณสารเคมีที่ใช้จะมีการรายงานช่วงความไม่แน่นอนของข้อมูลร่วมด้วย เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นในการวิเคราะห์ผังการไหลระดับองค์ประกอบ โดยขั้นตอนการบดลดขนาด กระบวนการชะละลายทองคำด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ การนำทองคำกลับคืนทางไฟฟ้า การแยกทองคำออกจากฟลอยด์ จะกำหนดความไม่แน่นอนของข้อมูลเท่ากับร้อยละ 15.29 12.82 7.88 และ 22.97 ของค่าที่รายงานตามลำดับ แสดงดังภาคผนวกที่ ค.3

4.4.2 ผลการศึกษาปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงด้วยสารประกอบไซยาไนด์

ตารางที่ 4-19 ปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงด้วยสารประกอบไซยาไนด์

ปริมาณของสารประกอบไซยาไนด์ต่อน้ำหนักซากหลังบด (มล. / ก.)	กระบวนการ	ปริมาณของโลหะที่ชะละลายได้ต่อน้ำหนักซาก			
		ทองคำ (ppm)	เงิน (ppm)	ทองแดง (%)	ตะกั่ว (ppm)
2 : 1	ชะละลาย	477.17	389.54	24.66	3,751.00
4 : 1		454.27	409.18	25.96	3,677.69
6 : 1		616.66	482.07	28.86	4,296.89

ตารางที่ 4-19 แสดงปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายด้วยไซยาไนด์โดยมีการควบคุมปริมาณสารชะละลายที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2.4 และ 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัม ของน้ำหนักซากหลังบด ซึ่งควบคุมอุณหภูมิของการชะละลายเท่ากับ 25 °C เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณโลหะที่ชะละลายได้ประเมินจากผลการทดลองชะละลายซากแผงวงจรด้วยกรดกัดทอง โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ร้อยละ 60 ของปริมาณโลหะที่ชะละลายจากกรดกัดทองในระยะเวลาที่เท่ากัน (Petter และคณะ, 2014)

4.5 ผลการวิเคราะห์ผังการไหลระดับองค์ประกอบ

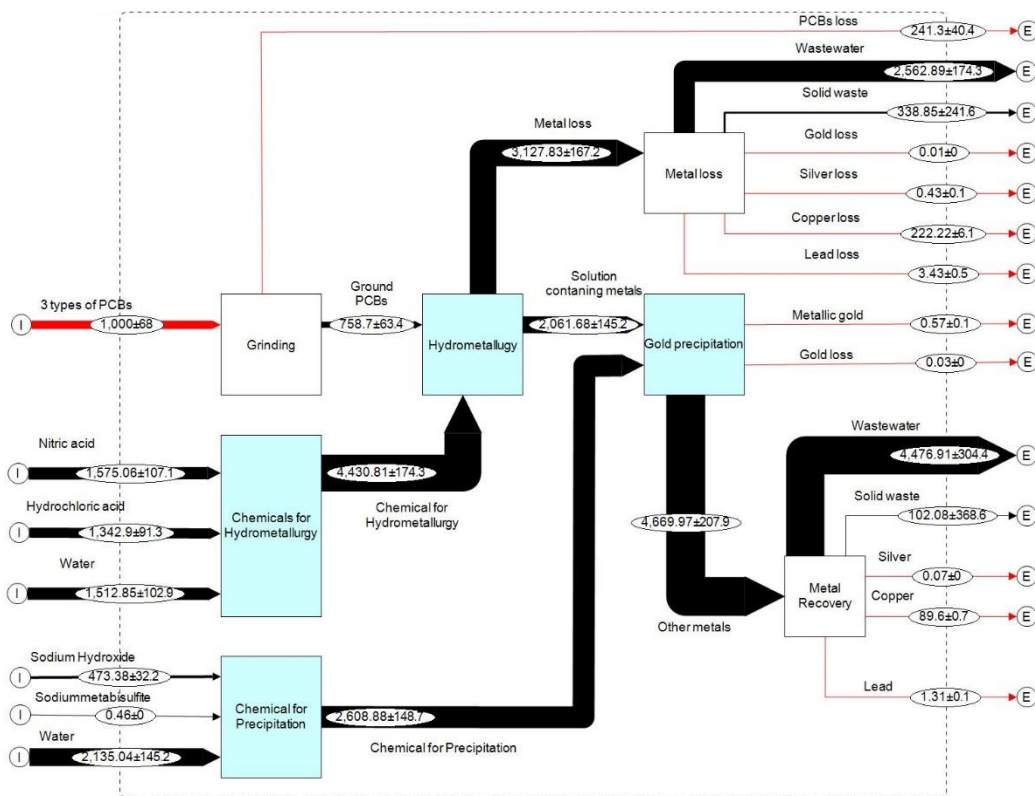
การวิเคราะห์ผังการไหลระดับองค์ประกอบจำแนกกรณีศึกษาตามสัดส่วนของปริมาณของสารละลายต่อน้ำหนักซากหลังบดลดขนาด ซึ่งอ้างอิงจากผลการทดลองที่ใช้สัดส่วนสารละลายที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซาก และสัดส่วนที่สูงที่สุดคือ 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซาก เพื่อสร้างกรณีศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างปริมาณสารเคมีที่ใช้และผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำกลับคืนได้ เมื่อชะละลายในระยะเวลา 4 ชั่วโมงที่เท่ากัน ทั้งนี้ ปริมาณของสารเคมีที่ใช้จะรายงานเป็นหน่วยโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) สำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลรวมถึงการประเมินวัฏจักรชีวิตต่อไป

4.5.1 ผลการวิเคราะห์ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักซาก

การวิเคราะห์ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักซากหลังบดพบว่า ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เริ่มต้นเท่ากับ 1,000 กิโลกรัม เมื่อผ่านกระบวนการบดลดขนาดทำให้มีการสูญเสียปริมาณแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ร้อยละ 24.13 และคิดเป็นน้ำหนักหลังบดลดขนาดเท่ากับ 758.70 กิโลกรัม

ส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ลดขนาดแล้วได้ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยกรดไนตริกและชะละลายด้วยกรดกัดทองตามลำดับ โดยพบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักจากกระบวนการเท่ากับ 2,562.89 กิโลกรัม ตะกอน 338.85 กิโลกรัม สูญเสียทองคำ เงิน ทองแดง และตะกั่วจากกระบวนการชะละลายเท่ากับ 0.010 0.425 222.223 และ 3.435 กิโลกรัม ตามลำดับ

เมื่อสารละลายกรดกัดทองผ่านกระบวนการนำทองคำกลับคืนโดยใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์เป็นสารตกตะกอนพบว่า มีน้ำเสียเกิดขึ้นจากกระบวนการเท่ากับ 4,476.91 กิโลกรัม ตะกอน 102.08 กิโลกรัม สามารถนำกลับคืนทองคำได้ 0.565 กิโลกรัม สูญเสียทองคำจากกระบวนการ 0.028 กิโลกรัม และสูญเสียน้ำเงิน ทองแดงและตะกั่วในสารละลายที่เหลือเท่ากับ 0.067 89.602 และ 1.309 กิโลกรัม ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4-8



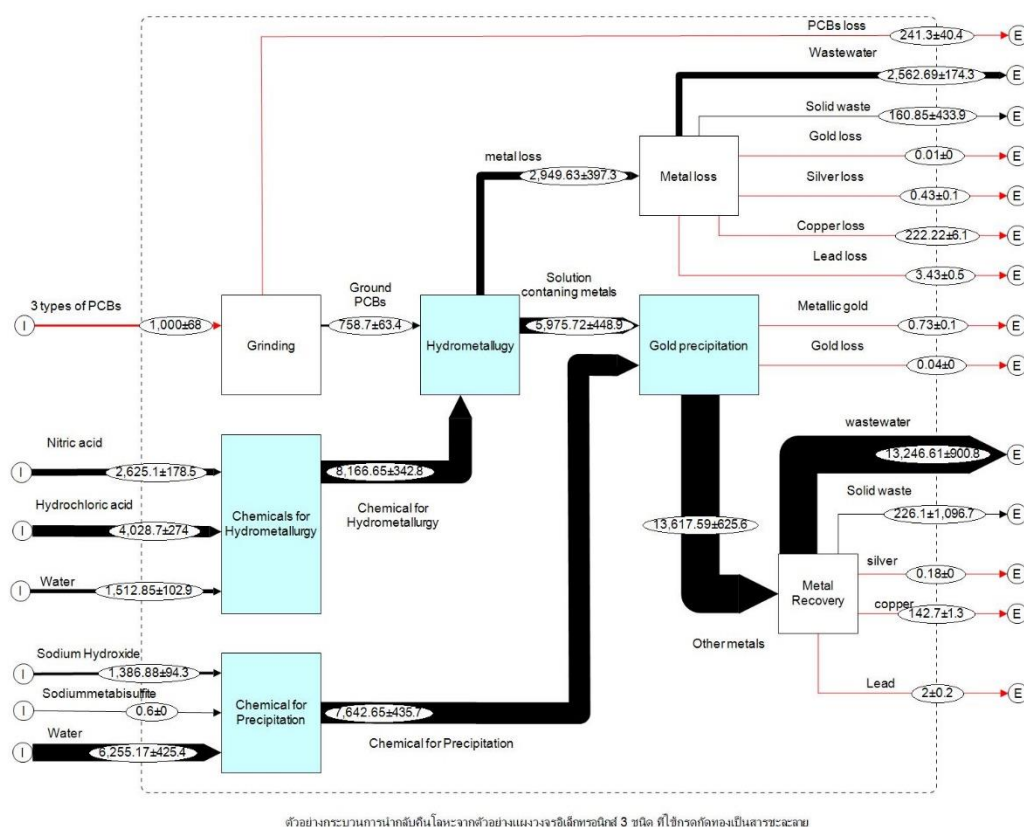
ภาพที่ 4-8 ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทอง ที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักซากหลังบัด

4.5.2 ผลการวิเคราะห์ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักซาก

การวิเคราะห์ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทอง ที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักซากหลังบัดพบว่า ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เริ่มต้นเท่ากับ 1,000 กิโลกรัม เมื่อผ่านกระบวนการบดลดขนาดทำให้มีการสูญเสียปริมาณของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ร้อยละ 24.13 และคิดเป็นน้ำหนัหลังบดลดขนาดเท่ากับ 758.7 กิโลกรัม

ส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ลดขนาดแล้วจะได้เข้าสู่กระบวนการปรับสภาพด้วยกรดไนตริกและชะละลายด้วยกรดกัดทอง ตามลำดับ โดยพบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักจากกระบวนการเท่ากับ 2,562.69 กิโลกรัม ตะกอน 160.87 กิโลกรัม สูญเสียทองคำ เงิน ทองแดง และตะกั่วจากกระบวนการชะละลายเท่ากับ 0.010 0.425 222.223 และ 3.435 กิโลกรัม ตามลำดับ

เมื่อสารละลายกรดกัดทองผ่านกระบวนการนำกลับคืนทองคำโดยใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ เป็นสารตกตะกอนพบว่า มีน้ำเสียเกิดขึ้นจากกระบวนการเท่ากับ 13,246.61 กิโลกรัม ตะกอน 226.10 กิโลกรัม สามารถนำกลับคืนทองคำได้ 0.733 กิโลกรัม สูญเสียทองคำจากกระบวนการ 0.037 กิโลกรัม และสูญเสียเงิน ทองแดงและตะกั่วในสารละลายที่เหลือเท่ากับ 0.184 142.711 และ 1.999 กิโลกรัม ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4-9

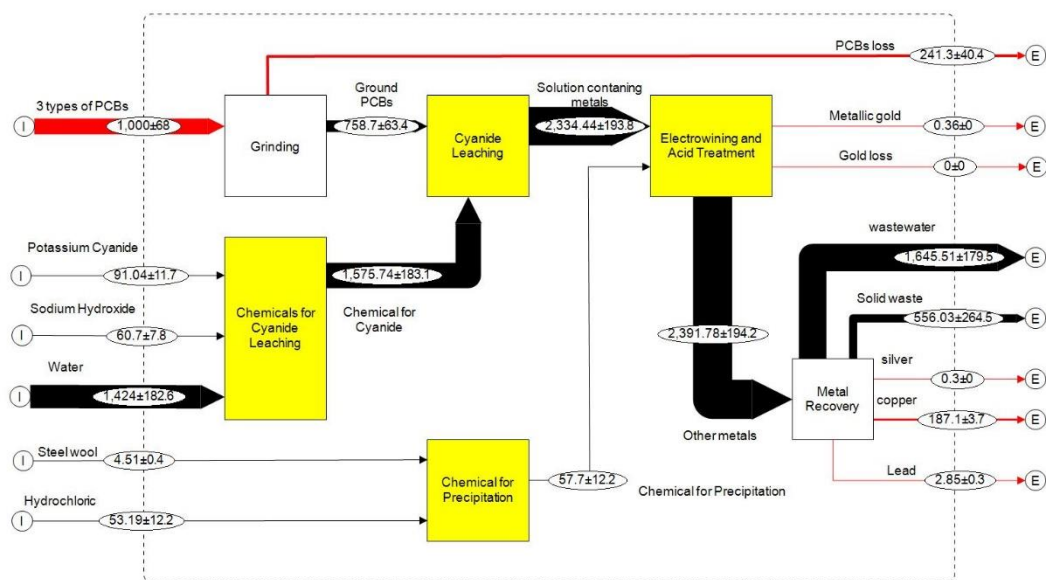


ภาพที่ 4-9 ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทอง ที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักรากซากหลังบัด

4.5.3 ผลการวิเคราะห์ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารประกอบไซยาไนด์ที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักราก

การวิเคราะห์ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารประกอบไซยาไนด์ ที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักรากหลังพบพบว่า ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เริ่มต้นเท่ากับ 1,000 กิโลกรัม เมื่อผ่านกระบวนการบดลดขนาดทำให้มีการสูญเสียปริมาณของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ร้อยละ 24.13 คิดเป็นน้ำหนักรากหลังบดลดขนาดเท่ากับ 758.7 กิโลกรัม

ส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ลดขนาดแล้วเมื่อผ่านกระบวนการชะละลายด้วยสารประกอบไซยาไนด์พบว่า มีน้ำเสียเกิดขึ้นจากกระบวนการเท่ากับ 1,645.51 กิโลกรัม ตะกอน 556.03 กิโลกรัม สามารถนำกลับคืนทองคำได้ 0.360 กิโลกรัม สูญเสียทองคำจากกระบวนการ 0.002 กิโลกรัม และสูญเสียเงิน ทองแดงและตะกั่วในสารละลายที่เหลือเท่ากับ 0.296 187.095 และ 2.846 กิโลกรัม ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4-10



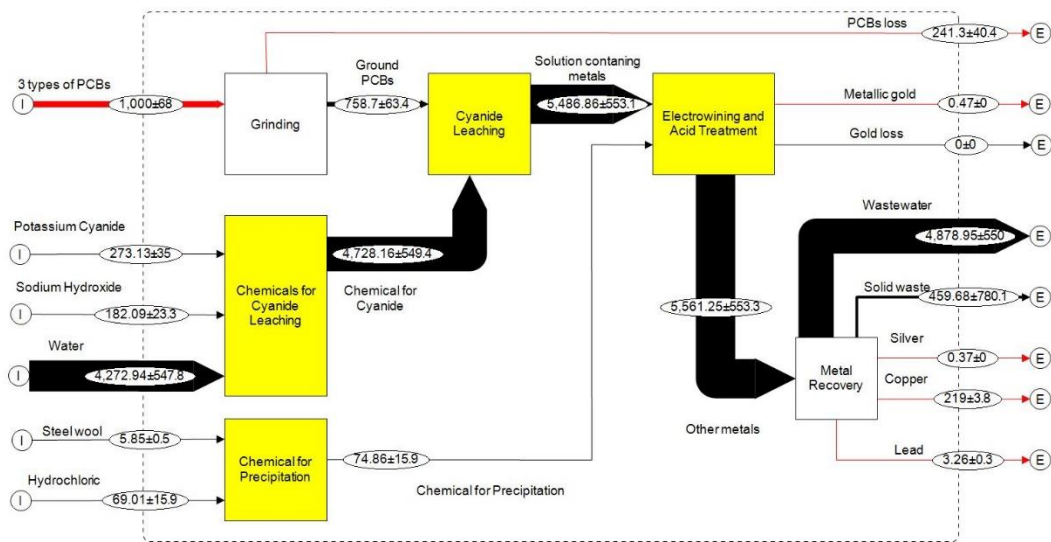
ตัวอย่างกระบวนการนำกลับคืนโลหะจากตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 3 ชนิด ที่ใช้ไซยาไนด์เป็นสารละลาย

ภาพที่ 4-10 ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารประกอบไซยาไนด์ที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักรากหลังบด

4.5.4 ผลการวิเคราะห์ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารประกอบโซเดียมไนไตรด์ที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักราก

การวิเคราะห์ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารประกอบโซเดียมไนไตรด์ ที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักรากหลังพบว่ามีปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เริ่มต้นเท่ากับ 1,000 กิโลกรัม เมื่อผ่านกระบวนการบดลดขนาดทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักของส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ร้อยละ 24.13 ทำให้เหลือน้ำหนักหลังบดลดขนาดเท่ากับ 758.7 กิโลกรัม

ส่วนประกอบของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ลดขนาดแล้วเมื่อผ่านกระบวนการชะละลายด้วยสารประกอบโซเดียมไนไตรด์พบว่า มีน้ำเสียเกิดขึ้นจากกระบวนการเท่ากับ 4,878.95 กิโลกรัม ตะกอน 459.68 กิโลกรัม สามารถนำกลับคืนทองคำได้ 0.466 กิโลกรัม สูญเสียทองคำจากกระบวนการ 0.002 กิโลกรัม และสูญเสียเงิน ทองแดงและตะกั่วในสารละลายที่เหลือเท่ากับ 0.366 218.961 และ 3.260 กิโลกรัม ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4-11



ตัวอย่างกระบวนการนำกลับคืนโลหะจากตัวอย่างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 3 ชนิด ที่ใช้โซเดียมไนไตรด์เป็นสารชะละลาย

ภาพที่ 4-11 ผังการไหลของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารประกอบโซเดียมไนไตรด์ที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของน้ำหนักรากหลังบด

4.5.5 ภาพรวมการวิเคราะห์ผังการไหลของสารระดับองค์ประกอบ

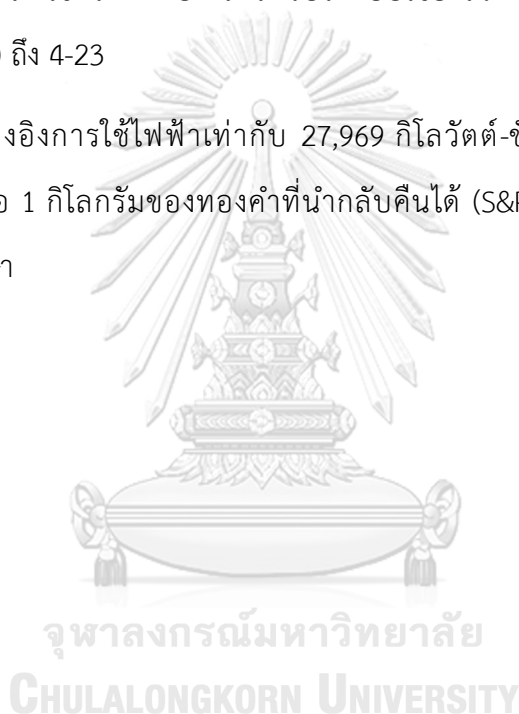
ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารเคมีและวัสดุที่ใช้ในกระบวนการชะละลายด้วยกรดกัดทองและสารประกอบไฮยาไนด์ที่พบว่า ปริมาณของสารเคมีกำหนดให้เท่ากันในสัดส่วนของปริมาตรต่อน้ำหนักซากที่ผ่านการลดขนาดแล้วได้แก่ สารเคมีในขั้นตอนการชะละลายด้วยกรดกัดทองและการชะละลายด้วยสารประกอบไฮยาไนด์เท่านั้น ส่วนปริมาณสารเคมีและวัสดุที่อยู่ในกระบวนการ นอกเหนือจากปริมาณกรดกัดทองและไฮยาไนด์ได้แก่ การปรับสภาพด้วยกรดไนตริก การตกตะกอนทองคำด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ การแยกทองคำด้วยไฟฟ้าและการแยกทองคำออกจากฝอยเหล็ก จะมีปริมาณที่แตกต่างกันตามความเหมาะสมเพื่อนำกลับคืนทองคำจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ทั้งสามชนิด

ทั้งนี้ การวิเคราะห์การไหลจะทำให้สามารถเปรียบเทียบปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล 1000 กิโลกรัมหรือซากที่ผ่านการบดลดขนาด 758.7 กิโลกรัม โดยพบว่าปริมาณของสารเคมีและวัสดุที่ใช้ในกระบวนการชะละลายด้วยกรดกัดทองจะมีปริมาณทั้งสิ้น 7,039.69 และ 15,809.30 กิโลกรัม ที่สัดส่วนสารชะละลายกรดกัดทองเท่ากับ 2 และ 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมซากหลังบด ตามลำดับ ส่วนในกระบวนการชะละลายด้วยสารประกอบไฮยาไนด์จะมีปริมาณของสารเคมีและวัสดุทั้งสิ้น 1,633.75 และ 4,803.02 กิโลกรัม ที่สัดส่วนสารประกอบไฮยาไนด์ที่เท่ากันคือ 2 และ 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมตัวซากบด ตามลำดับ

4.6 บัญชีรายการมวลสารของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทอง และสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำ

ปริมาณสารเคมีและวัสดุที่ได้จากผลการวิเคราะห์ฝังการไหลจะถูกเรียบเรียงในบัญชีรายการ โดยแสดงปริมาณมวลสารที่ใช้ในกระบวนการต่อหน่วยการทำงาน 1 กิโลกรัมของทองคำที่นำกลับคืนได้เท่ากันเพื่อนำไปการประเมินวัฏจักรชีวิตต่อไป โดยแยกตามกรณีศึกษาที่ไม่มีการจัดการของเสีย และมีการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นรวมถึงการนำกลับคืนโลหะที่สูญเสียน้อย ของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลาย รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4-20 ถึง 4-23

ทั้งนี้ มีการอ้างอิงการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 27,969 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และความร้อนเท่ากับ 12,385,915 บีทียู ต่อ 1 กิโลกรัมของทองคำที่นำกลับคืนได้ (S&P Dow Jones Indices, 2017) เท่ากันในทุกกรณีศึกษา



4.6.1 บัญชีรายการมวลสารของกระบวนการรีไซเคิลที่ไม่มีการจัดการของเสีย

ตารางที่ 4-20 บัญชีรายการมวลสารของกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายโดยไม่มีการจัดการของเสียต่อหน่วยการทำงาน 1 กิโลกรัมของทองคำที่นำกลับคืนได้

รายการ	ปริมาณมวลสาร (กิโลกรัม) ของกรณีศึกษา ที่มีสัดส่วนกรดกัดทองต่อน้ำหนักซากดังนี้	
	กรณีศึกษาที่ 1: 2 มล. / 1 ก.	กรณีศึกษาที่ 2 : 6 มล. / 1 ก.
มวลสารขาเข้า		
1. กรดไนตริก 65%	2,787.72	3,581.31
2. กรดไฮโดรคลอริก 37%	2,376.81	5,496.18
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์	837.84	1,892.06
4. โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์	0.81	0.82
5. น้ำกลั่น	6,456.44	10,597.57
6. ไฟฟ้า	27,969*	27,969*
7. ความร้อน	12,385,915**	12,385,915**
มวลสารขาออก		
1. ทองคำที่นำกลับคืนได้	1.000	1.000
2. ทองคำที่สูญเสีย	0.067	0.064
3. เงินที่สูญเสีย	0.871	0.831
4. ทองแดงที่สูญเสีย	551.903	497.864
5. ตะกั่วที่สูญเสีย	8.395	7.412
6. น้ำเสียรวม	10,339.67	16,665.72
7. ตะกอนของเสีย	886.57	527.93
8. มลพิษทางอากาศ	1,541.13	3,563.73

หมายเหตุ: * พลังงานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง; ** ค่าความร้อนมีหน่วยเป็นบีทียู

(S&P Dow Jones Indices, 2017)

ตารางที่ 4-21 บัญชีรายการมวลสารของกระบวนการที่ใช้สารประกอบโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารชะละลาย โดยไม่มีการจัดการของเสียต่อหน่วยการทำงาน 1 กิโลกรัมของทองคำที่นำกลับคืนได้

รายการ	ปริมาณมวลสาร (กิโลกรัม) ของกรณีศึกษา ที่มีสัดส่วนสารประกอบโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อน้ำหนักซากดังนี้	
	กรณีศึกษาที่ 1: 2 มล. / 1 ก.	กรณีศึกษาที่ 2 : 6 มล. / 1 ก.
มวลสารขาเข้า		
1. โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์	252.89	586.12
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์	168.61	390.75
3. น้ำกลั่น	3,956.42	9,169.40
4. ฝอยเหล็ก	12.53	12.55
5. กรดไฮโดรคลอริก 5M	147.75	148.09
6. ไฟฟ้า	27,969*	27,969*
7. ความร้อน	12,385,915**	12,385,915**
มวลสารขาออก		
1. ทองคำที่นำกลับคืนได้	1.000	1.000
2. ทองคำที่สูญเสีย	0.006	0.004
3. เงินที่สูญเสีย	0.822	0.785
4. ทองแดงที่สูญเสีย	519.708	469.873
5. ตะกั่วที่สูญเสีย	7.906	6.996
6. น้ำเสียรวม	4,570.86	10,469.85
7. ตะกอนของเสีย	1,544.53	967.12

หมายเหตุ: * พลังงานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง; ** ค่าความร้อนมีหน่วยเป็นบีทียู

(S&P Dow Jones Indices, 2017)

4.6.2 บัญชีรายการมวลสารของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการของเสีย

ตารางที่ 4-22 บัญชีรายการมวลสารของกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารละลายโดยมีการจัดการของเสียต่อหน่วยการทำงาน 1 กิโลกรัมของทองคำที่นำกลับคืนได้

รายการ	ปริมาณมวลสาร (กิโลกรัม) ของกรณีศึกษา ที่มีสัดส่วนกรดกัดทองต่อน้ำหนักขากดังนี้	
	กรณีศึกษาที่ 1: 2 มล. / 1 ก.	กรณีศึกษาที่ 2 : 2 มล. / 1 ก.
มวลสารขาเข้า		
1. กรดไนตริก 65%	2,612.04	3,365.51
2. กรดไฮโดรคลอริก 37%	2,227.03	5,165.00
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์	785.04	1,778.05
4. โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์	0.76	0.77
5. น้ำกลั่น	6,049.57	9,959.00
6. ไฟฟ้า	27,969*	27,969*
7. ความร้อน	12,385,915**	12,385,915**
มวลสารขาออก		
1. ทองคำที่นำกลับคืนได้	1.000	1.000
2. เงินที่แยกจากน้ำเสีย	0.816	0.781
3. ทองแดงที่แยกจากน้ำเสีย	517.123	467.864
4. ตะกั่วที่แยกจากน้ำเสีย	7.866	6.965
5. น้ำเสียรวม	9,688.08	15,661.50
6. ตะกอนของเสีย	830.70	496.12
7. มลพิษทางอากาศ	1,444.01	3,349.00

หมายเหตุ: * พลังงานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง; ** ค่าความร้อนมีหน่วยเป็นบีทียู (S&P Dow Jones Indices, 2017)

ตารางที่ 4-23 บัญชีรายการมวลสารของกระบวนการที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลาย โดยมีการจัดการของเสียต่อหน่วยการทำงาน 1 กิโลกรัมของทองคำที่นำกลับคืนได้

รายการ	ปริมาณมวลสาร (กิโลกรัม) ของกรณีศึกษา ที่มีสัดส่วนสารประกอบไซยาไนด์ต่อน้ำหนักขากตั้งนี้	
	กรณีศึกษาที่ 1: 2 มล. / 1 ก.	กรณีศึกษาที่ 2 : 6 มล. / 1 ก.
มวลสารขาเข้า		
1. โพลเทสซีมไซยาไนด์	251.49	583.61
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์	167.68	389.08
3. น้ำกลั่น	3,934.56	9,130.21
4. ฝอยเหล็ก	12.46	12.50
5. กรดไฮโดรคลอริก 5M	146.93	147.46
6. ไฟฟ้า	27,969*	27,969*
7. ความร้อน	12,385,915**	12,385,915**
มวลสารขาออก		
1. ทองคำที่นำกลับคืนได้	1.000	1.000
2. ทองคำที่สูญเสีย	0.006	0.004
3. เงินที่สูญเสีย	0.818	0.782
4. ทองแดงที่สูญเสีย	516.837	467.865
5. ตะกั่วที่สูญเสีย	7.862	6.966
6. น้ำเสียรวม	4,545.61	10,425.11
7. ตะกอนของเสีย	1,535.99	962.99

หมายเหตุ: * พลังงานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง ; ** ค่าความร้อนมีหน่วยเป็นบีทียู (S&P Dow Jones Indices, 2017)

4.7 ผลการศึกษาและประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำโดยไม่มีการจัดการของเสีย

ตารางที่ 4-24 กรณีสึกษาผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำโดยไม่มีการจัดการของเสีย

กรณีศึกษา	นิยาม
1	กระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซากหลังบัดโดยไม่มีการจัดการของเสีย
2	กระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซากหลังบัดโดยไม่มีการจัดการของเสีย
3	กระบวนการที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซากหลังบัดโดยไม่มีการจัดการของเสีย
4	กระบวนการที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซากหลังบัดโดยไม่มีการจัดการของเสีย

ตารางที่ 4-24 แสดงนิยามของกรณีศึกษาสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำ เมื่อใช้สารชะละลายในสัดส่วน 2 และ 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซากหลังบัดโดยไม่มีการจัดการของเสีย

4.7.1 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลโดยไม่มีการจัดการของเสีย

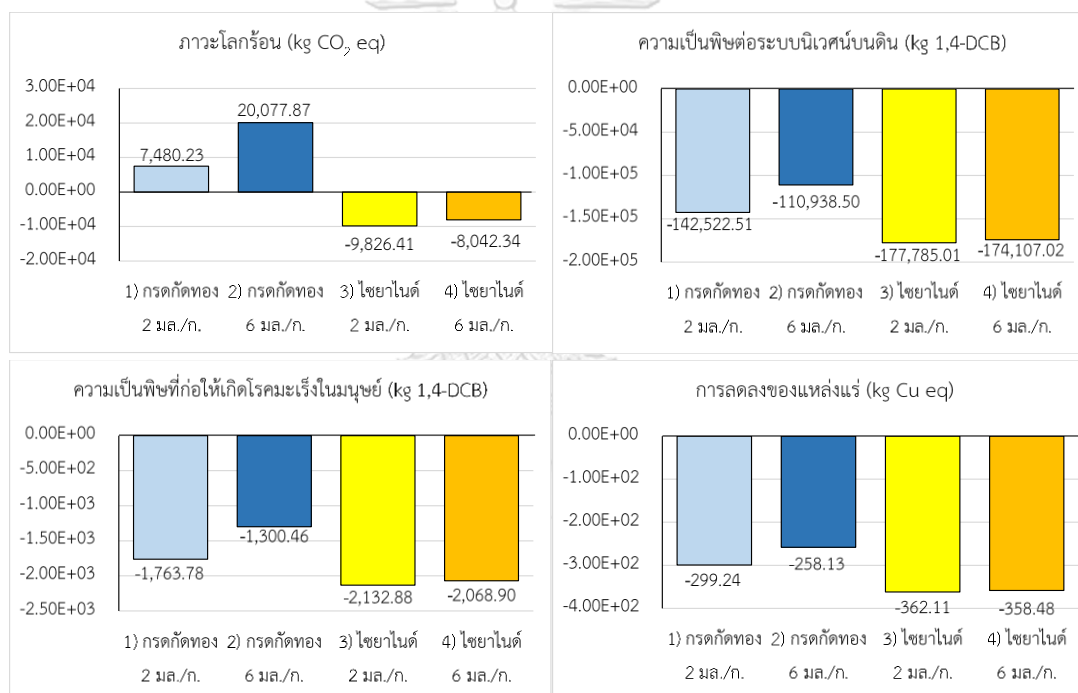
ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตภายใต้หน่วยงานทำงานของทองคำที่นำกลับคืนได้ 1 กิโลกรัม ของกรณีศึกษาที่ 1 2 3 และ 4 กระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายทองคำที่ปริมาณ 2 และ 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมน้ำหนักซากหลังบัด โดยไม่มีการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นพบว่า ผลกระทบรวมทั้ง 18 ด้านที่ประเมินด้วยการเทียบหน่วย (Normalization) โดยวิธี Recipe 2016 ของกรณีศึกษาที่ 1 2 3 และ 4 จะมีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่ากระบวนการก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม รายละเอียดแสดงดังภาคผนวกที่ ง.2 ซึ่งสามารถจำแนกรายละเอียดตามกลุ่มผลกระทบที่สนใจ ดังนี้

ผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนของกรณีศึกษาที่ 1 2 3 และ 4 คิดเป็น 7,480.23 20,077.87 -9,826.41 และ -8,042.34 Kg CO₂ eq ตามลำดับ

ผลกระทบต่อความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนดินของกรณีศึกษาที่ 1 2 3 และ 4 คิดเป็น -142,522.51 -110,938.50 -177,785.01 และ -174,107.02 kg 1,4-DCB ตามลำดับ

ผลกระทบต่อความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ของกรณีศึกษาที่ 1 2 3 และ 4 คิดเป็น -1,763.78 -1,300.46 -2,132.88 และ -2,068.90 kg 1,4-DCB ตามลำดับ

ผลกระทบต่อกรดของแหล่งแร่ของกรณีศึกษาที่ 1 2 3 และ 4 คิดเป็น -299.24 -258.13 -362.11 และ -358.48 kg Cu eq ตามลำดับ รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4-12



ภาพที่ 4-12 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลโดยไม่มีการจัดการของเสีย

4.7.2 ผลวิเคราะห์การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลโดยไม่มีจัดการของเสีย

กรดกัดทองเป็นสารชะละลายประเภทคลอรีนที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการสกัดโลหะมีค่า (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2562) ขณะที่ไซยาไนด์เป็นสารชะละลายที่นิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรมเหมืองแร่และอุตสาหกรรมรีไซเคิลทองคำเนื่องจากใช้ในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำ (Petter และคณะ, 2014) ซึ่งในประเทศไทยนั้นพบว่ามีการจัดการน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการชะละลายซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างไม่เหมาะสม เช่น การปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำและไม่มีจัดการตะกอนของเสียที่เกิดขึ้น (ไทยรัฐออนไลน์, 2557; ณิชชา บุรณสิงห์, 2559) การประเมินวัฏจักรชีวิตของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายที่ปริมาณ 2 และ 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัม น้ำหนักซากหลังบด แสดงให้เห็นว่าเมื่อกำหนดให้มีการนำกลับคืนทองคำเท่ากัน 1 กิโลกรัม ค่าผลกระทบทั้ง 4 ด้าน ได้แก่ ได้แก่ ภาวะโลกร้อน ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนดิน ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์และการลดลงของแหล่งแร่มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละกระบวนการ เป็นผลของการใช้สารเคมีในปริมาณที่แตกต่างกันต่อ 1 กิโลกรัมของทองคำที่นำกลับคืนได้ โดยสามารถเปรียบเทียบระหว่างกรณีศึกษาได้ดังนี้

การประเมินวัฏจักรชีวิตของกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 ที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายพบว่า สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการได้แก่ กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ สารประกอบโซเดียมซัลไฟด์ และการใช้น้ำในกระบวนการจะทำให้ค่าผลกระทบมีค่าเป็นบวกหมายถึงส่งผลเสียสิ่งแวดล้อม และแม้ว่ากรณีศึกษาที่ 2 ที่ใช้สารชะละลายที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมซากหลังบดจะสามารถชะละลายทองคำได้ในปริมาณที่มากกว่า แต่กรณีศึกษาที่ 2 จะให้ค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สูงกว่ากรณีศึกษาที่ 1 ที่ใช้สารชะละลายที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซาก เนื่องจากใช้สารเคมีมากกว่าในการนำกลับคืนทองคำได้ 1 กิโลกรัมที่เท่ากัน

การประเมินวัฏจักรชีวิตของกรณีศึกษาที่ 3 และ 4 ที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายพบว่า สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการนำกลับคืนทองคำได้แก่ สารประกอบไซยาไนด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก ฝอยเหล็กและน้ำ จะให้ค่าผลกระทบที่เป็นบวกหมายถึงส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม และแม้ว่ากรณีศึกษาที่ 4 ที่ใช้สารชะละลายที่สัดส่วน 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซากหลังบดจะสามารถนำทองคำกลับคืนได้มากกว่า แต่กรณีศึกษาที่ 4 จะให้ค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สูง

กว่ากรณีศึกษาที่ 3 ที่ใช้สารชะละลายที่สัดส่วน 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซาก เนื่องจากใช้สารเคมีมากกว่าในการนำกลับคืนทองคำได้ 1 กิโลกรัมที่เท่ากันเช่นเดียวกับกระบวนการที่ใช้กรดกัดทอง

เมื่อวิเคราะห์ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตระหว่างกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 กระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย กับกรณีศึกษาที่ 3 และ 4 ที่ใช้สารประกอบโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารชะละลาย จะเห็นได้ว่า กระบวนการที่ใช้สารชะละลายในสัดส่วนที่น้อยกว่าคือ 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของซาก หลังบดจะให้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยกว่ากระบวนการใช้สารชะละลายในสัดส่วนที่มากกว่าคือ 6 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัม ในการนำกลับคืนทองคำ 1 กิโลกรัมที่เท่ากัน ขณะที่กรณีศึกษาที่ 1 และ 2 ที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายจะใช้ปริมาณสารเคมีรวมมากกว่ากรณีศึกษาที่ 3 และ 4 ที่ใช้สารประกอบโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารชะละลาย เนื่องจากสารเคมีในขั้นตอนการปรับสภาพและขั้นตอนการแยกตะกอนทองคำมีปริมาณมากกว่าจึงทำให้ค่าผลกระทบที่เกิดขึ้นจึงสูงกว่า

แม้ว่าในกลุ่มผลกระทบที่สนใจทั้ง 4 ด้านจะให้ค่าส่วนมากเป็นค่าลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กระบวนการนั้นส่งผลดีในกลุ่มผลกระทบทั้ง 4 ด้าน แต่ผลดีที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลจากจากกิจกรรมการนำทองคำกลับคืนมาเพียงเท่านั้น และผลกระทบโดยรวมที่เกิดจากการเทียบหน่วย (Normalization) ในกลุ่มผลกระทบทั้ง 18 ด้านที่ประเมินโดยวิธี Recipe จะยังคงมีค่าเป็นบวกหมายถึงกระบวนการยังส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม รายละเอียดแสดงดังภาคผนวกที่ ง.2 จึงควรมีการหาแนวทางในการลดผลกระทบโดยให้กระบวนการมีจัดการของเสียที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสมต่อไป

4.8 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบโซลยอนเป็นสารชะละลายทองคำ

การหาแนวทางในการลดผลกระทบจะอ้างอิงใช้กรณีศึกษาที่ 1 ที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายและอ้างอิงกรณีศึกษาที่ 3 ที่ใช้สารประกอบโซลยอนเป็นสารชะละลาย ซึ่งมีสัดส่วนของสารชะละลายเท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซากหลังบัด 1 กรัม เป็นกรณีฐานในการเปรียบเทียบผลกระทบ เนื่องจากให้ผลกระทบที่น้อยกว่าสัดส่วนสารชะละลายที่ 6 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซากหลังบัด 1 กรัม รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4-25

ตารางที่ 4-25 กรณีศึกษาผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบโซลยอนเป็นสารชะละลายทองคำโดยมีการจัดการของเสีย

กรณีศึกษา	นิยาม	
	กระบวนการที่ใช้สัดส่วนของสารชะละลาย ต่อน้ำหนักซากหลังบัดเท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัม	
	ชนิดสารชะละลาย	วิธีการจัดการของเสีย
1		ไม่มีการจัดการของเสีย
1.1	กรดกัดทอง	จัดการของเสียด้วยการบำบัดน้ำเสียและฝังกลบตะกอน
1.2		จัดการของเสียด้วยการบำบัดน้ำเสียและเผาทำลายตะกอน ในเตาเผาเฉพาะของเสียอันตราย
3		ไม่มีการจัดการของเสีย
3.1	สารประกอบ	จัดการของเสียด้วยการบำบัดน้ำเสียและฝังกลบตะกอน
3.2	โซลยอน	จัดการของเสียด้วยการบำบัดน้ำเสียและเผาทำลายตะกอน ในเตาเผาเฉพาะของเสียอันตราย

4.8.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการของเสีย

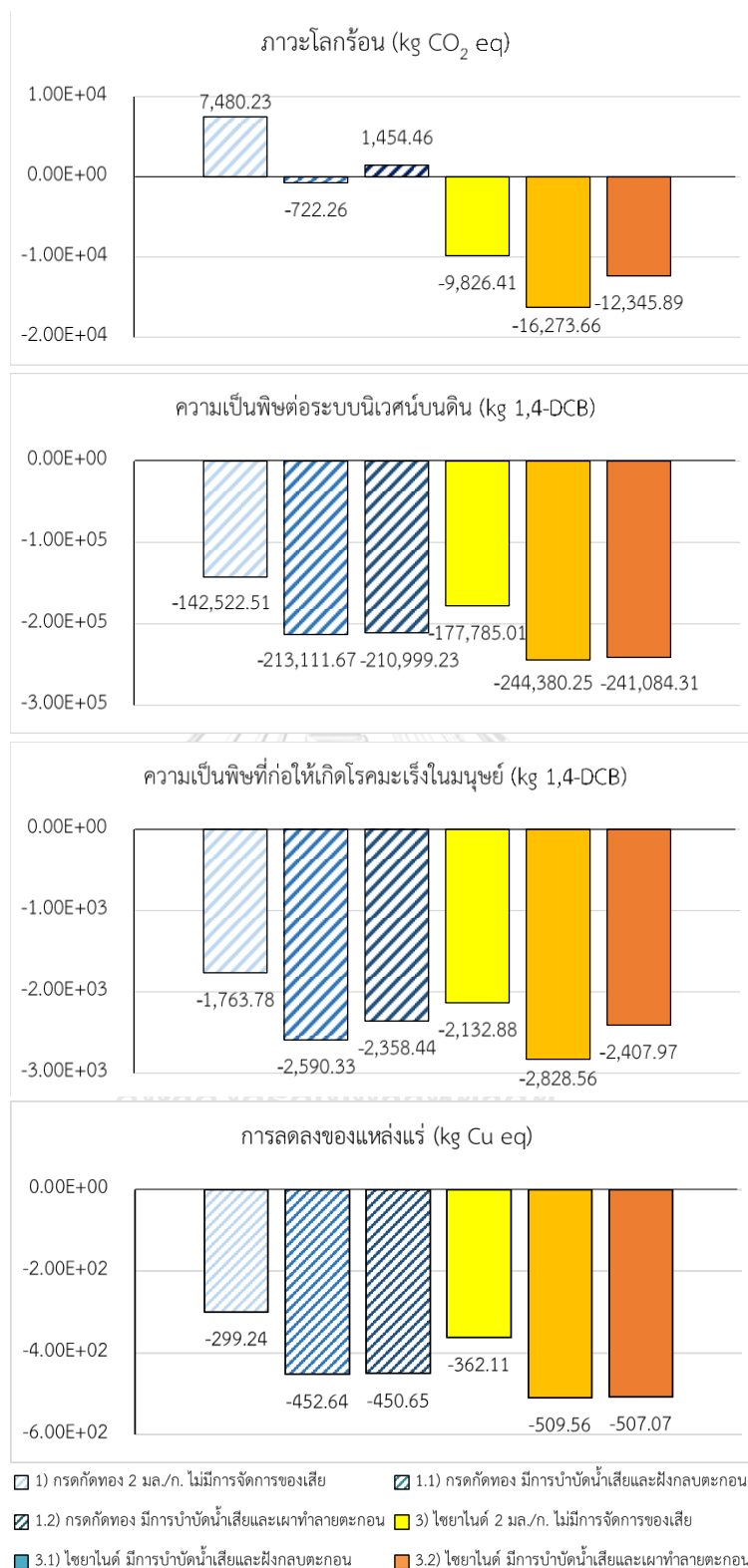
1) ผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการของเสีย

ผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนของกรณีศึกษาที่ 1 1.1 1.2 3 3.1 และ 3.2 คิดเป็น 7,480.23 -722.26 1,454.46 -9,826.41 -16,273.66 และ -12,345.89 kg CO₂ eq ตามลำดับ

ผลกระทบต่อความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์บนดินของกรณีศึกษาที่ 1 1.1 1.2 3 3.1 และ 3.2 คิดเป็น -142,522.51 -213,111.67 -210,999.23 -177,785.01 -244,380.25 และ -241,084.31 kg 1,4-DCB ตามลำดับ

ผลกระทบต่อความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ของกรณีศึกษาที่ 1 1.1 1.2 3 3.1 และ 3.2 คิดเป็น -1,763.78 -2,590.33 -2,358.44 -2,132.88 -2,828.56 และ -2,407.97 kg 1,4-DCB ตามลำดับ

ผลกระทบต่อกรดลงของแหล่งแร่ของกรณีศึกษาที่ 1 1.1 1.2 3 3.1 และ 3.2 คิดเป็น -299.24 -452.64 -450.65 -362.11 -509.56 และ -507.07 kg Cu eq ตามลำดับ รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4-13



ภาพที่ 4-13 ผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการของเสีย

2) การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการของเสีย

ผลกระทบของกรณีศึกษาที่ 1.1 1.2 3.1 และ 3.2 ที่มีการจัดการน้ำเสียด้วยการแยกทองแดง เงินและตะกั่วจากน้ำเสียเพื่อเข้าสู่กระบวนการนำกลับคืนและบำบัดน้ำเสีย ส่วนตะกอนถูกกำจัดด้วยการฝังกลบหรือเผาทำลายในเตาเผาเฉพาะสำหรับของเสียอันตราย เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 1 และ 3 ที่ไม่มีการจัดการของเสียพบว่า ค่าผลกระทบของกรณีศึกษาที่ 1.1 1.2 3.1 และ 3.2 ลดลงจากกรณีศึกษาที่ 1 และ 3 ที่ไม่มีการจัดการของเสีย เนื่องจากการแยกโลหะทองแดง เงิน และตะกั่วออกจากน้ำเสียเพื่อเข้าสู่กระบวนการนำกลับคืนและการบำบัดน้ำเสีย จะทำให้ผลกระทบลดลงได้มากกว่าการเพิ่มขึ้นของผลกระทบจากการกำจัดตะกอนอย่างเหมาะสมด้วยการฝังกลบและเผาทำลายในเตาเผาเฉพาะของเสียอันตราย รายละเอียดแสดงดังภาคผนวกที่ ง.3

โดยวิธีการจัดการของกรณีศึกษาที่ 1.1 และ 3.1 จัดการตะกอนของเสียด้วยการฝังกลบจะก่อให้เกิดผลกระทบทั้ง 4 ด้านต่ำกว่ากรณีศึกษาที่ 1.2 และ 3.2 ที่จัดการตะกอนของเสียด้วยการเผาทำลายในเตาเผาเฉพาะของเสียอันตราย ซึ่งการฝังกลบยังเป็นวิธีการจัดการของเสียที่ได้รับความนิยมในการจัดการของเสียมากกว่าการเผาทำลายและเห็นได้ชัดในผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากผลกระทบของการฝังกลบส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นจากก๊าซมีเทนที่ปลดปล่อย ซึ่งเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในหลุมฝังกลบและมักให้ค่าผลกระทบต่ำกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลและปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาทำลาย อย่างไรก็ตามค่าผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนของการเผาทำลายจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการเผาและแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเผา (Eriksson และ Finnveden, 2009) โดยการจัดการตะกอนของเสียที่เกิดจากกระบวนการสามารถทำได้ทั้งการฝังกลบและการเผาทำลายตามความเหมาะสมด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และเทคโนโลยีร่วมด้วย

ถึงแม้ว่าการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจะทำให้ผลกระทบโดยรวมของทุกกรณีการศึกษาลดลง แต่เมื่อเทียบผลกระทบระหว่างกรณีศึกษาที่ 1.1 และ 1.2 ที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย กับกรณีศึกษาที่ 3.1 และ 3.2 ที่ใช้สารประกอบโซเดียมไนต์เป็นสารชะละลาย โดยมีการจัดการของเสียและบำบัดน้ำเสียเช่นเดียวกันพบว่า กรณีศึกษาที่ 3.1 และ 3.2 ลดผลกระทบได้มากกว่ากระบวนการที่ใช้กรดกัดทอง เนื่องจากปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการยังคงส่งผลเสียมากกว่าผลดีที่เกิดจากการจัดการของเสียที่เหมาะสม และจะเห็นได้ชัดว่ากระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายยังไม่

สามารถลดผลกระทบได้เทียบเท่ากับกระบวนการที่ใช้สารประกอบโซยาไนต์ที่ได้รับความนิยมสูงในระดับอุตสาหกรรมรีไซเคิลทองคำ ถึงแม้ว่าจะมีการจัดการของเสียอย่างเหมาะสมเช่นเดียวกันก็ตาม รายละเอียดแสดงดังภาคผนวกที่ ง.3

4.8.2 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการของเสียและลดการใช้สารเคมี

การลดการใช้สารเคมีด้วยการชะละลายซ้ำเป็นแนวทางในการลดผลกระทบของกระบวนการที่ใช้กรดกัดทอง ให้สามารถเทียบเท่ากับกระบวนการที่ใช้สารประกอบโซยาไนต์เป็นสารชะละลาย โดยอ้างอิงกรณีศึกษาที่ 1.1 ที่ใช้กรดกัดทองและกรณีศึกษาที่ 3.1 ที่ใช้สารประกอบโซยาไนต์เป็นสารชะละลายทองคำที่สัดส่วนเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักซากหลังบด 1 กรัม และมีการจัดการของเสียด้วยการบำบัดน้ำเสียและฝังกลบตะกอนเป็นกรณีฐานในการเปรียบเทียบผลกระทบ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4-26

ตารางที่ 4-26 กรณีศึกษาผลกระทบของกระบวนการการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและโซยาไนต์เป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสียและลดการใช้สารเคมีที่เกิดขึ้น

กรณีศึกษา	นิยาม	
	กระบวนการที่ใช้สัดส่วนของสารชะละลาย ต่อน้ำหนักซากหลังบดเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัม	
	สารชะละลาย	วิธีการจัดการของเสีย
1.1	กรดกัดทอง	จัดการของเสียด้วยการบำบัดน้ำเสียและฝังกลบตะกอน
1.1ก		- ลดการใช้สารเคมีด้วยการชะละลายซ้ำ 2 ครั้ง
1.1ข		- ลดการใช้สารเคมีด้วยการชะละลายซ้ำ 3 ครั้ง
1.1ค		- ลดการใช้สารเคมีด้วยการชะละลายซ้ำ 9 ครั้ง
3.1	สารประกอบ โซยาไนต์	จัดการของเสียด้วยการบำบัดน้ำเสียและฝังกลบตะกอน

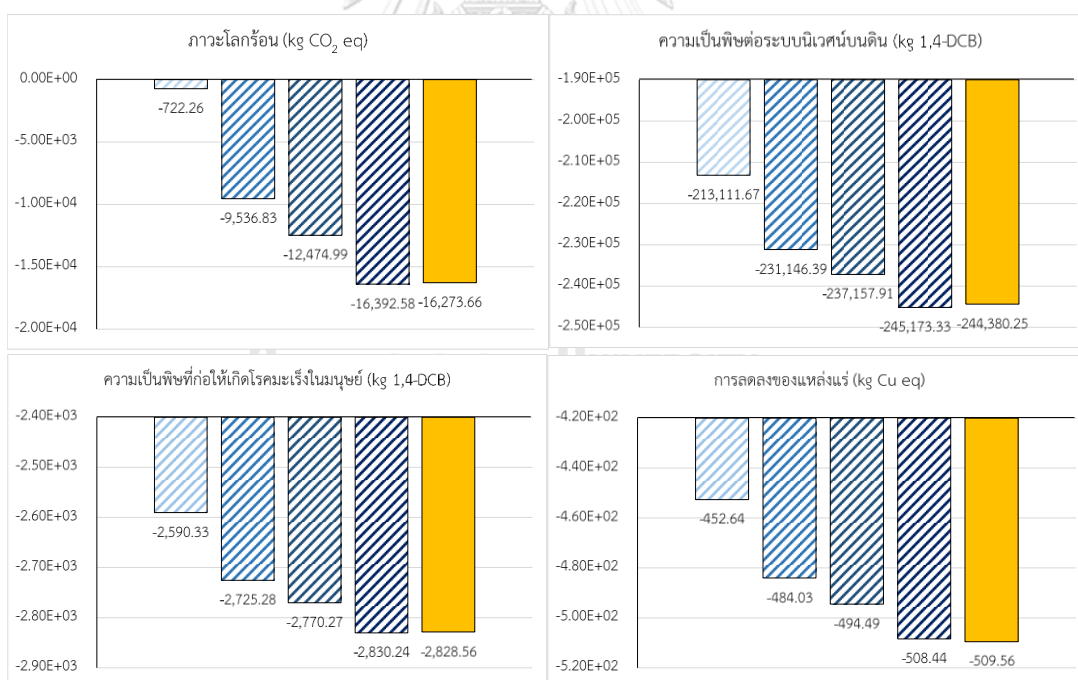
1) ผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการของเสียและลดการใช้สารเคมี

ผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนของกรณีศึกษาที่ 1.1 1.1ก 1.1ข 1.1ค และ 3.1 คิดเป็น -722.26 -9,536.83 -12,474.99 -16,392.58 และ -16,273.66 kg CO₂ eq ตามลำดับ

ผลกระทบต่อความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์บนดินของกรณีศึกษาที่ 1.1 1.1ก 1.1ข 1.1ค และ 3.1 คิดเป็น ผลกระทบทั้งสิ้น -213,111.67 -231,146.39 -237,157.91 -245,173.33 และ -244,380.25 kg 1,4-DCB ตามลำดับ

ผลกระทบต่อความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ของกรณีศึกษาที่ 1.1 1.1ก 1.1ข 1.1ค และ 3.1 คิดเป็น -2,590.33 -2,725.28 -2,770.27 -2,830.24 และ -2,828.56 kg 1,4-DCB ตามลำดับ

ผลกระทบต่อกรดลงของแหล่งแร่ของกรณีศึกษาที่ 1.1 1.1ก 1.1ข 1.1ค และ 3.1 คิดเป็น -452.64 -484.03 -494.49 -508.44 และ -509.56 kg Cu eq ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4-14



- 1.1) กรดกัดทอง 2 มล./ก. มีการจัดการของเสีย
- 1.1ก) กรดกัดทอง มีการจัดการของเสียและชะละลายซ้ำ 2 ครั้ง
- 1.1ข) กรดกัดทอง มีการจัดการของเสียและชะละลายซ้ำ 3 ครั้ง
- 1.1ค) กรดกัดทอง มีการจัดการของเสียและชะละลายซ้ำ 9 ครั้ง
- 3.1) โซดาไฟ 2 มล./ก. มีการจัดการของเสีย

ภาพที่ 4-14 ผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการของเสียและลดการใช้สารเคมี

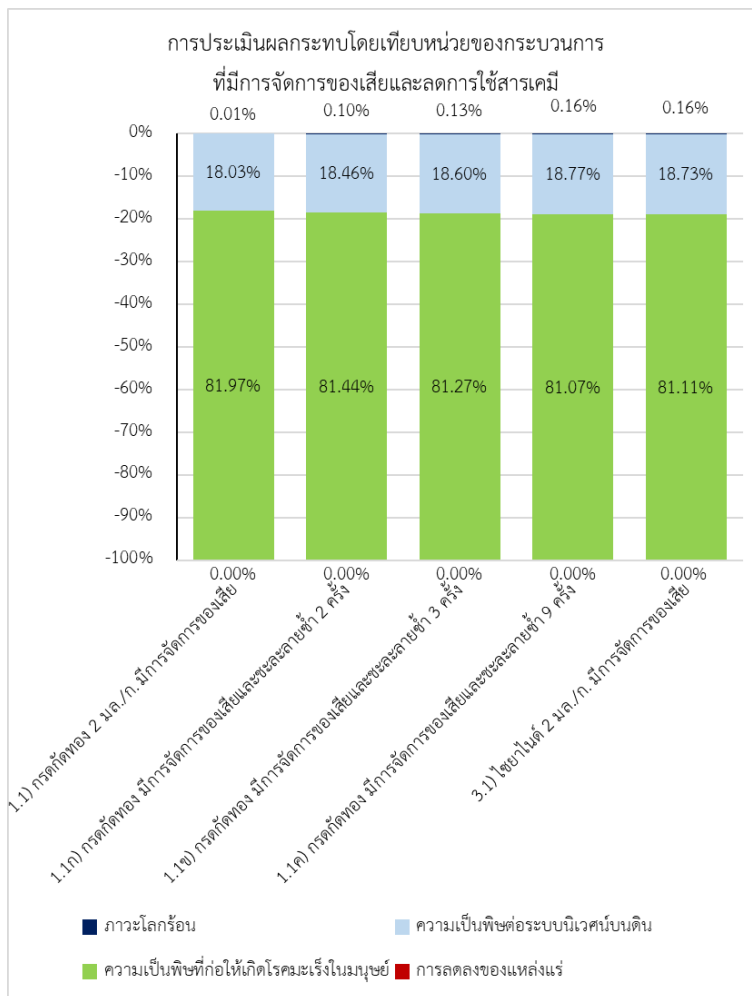
2) ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการของเสียและลดการใช้สารชะละลาย

การเปรียบเทียบผลกระทบของกรณีศึกษาที่ 1.1ก 1.1ข 1.ค ที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสียและลดการใช้สารเคมีด้วยการชะละลายซ้ำ 2 3 และ 9 ครั้งตามลำดับ พบว่าค่าผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำบน ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์และการลดลงของแหล่งแร่จะลดลงเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาที่ 1.1 ที่มีการจัดการของเสียเพียงเท่านั้น ซึ่งในการศึกษาได้มีการเข้าเยี่ยมชมอุตสาหกรรมการรีไซเคิลทองคำจากซากอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองและพบว่าการลดการใช้สารเคมีด้วยการชะละลายซ้ำก่อนจะตกตะกอนแยกทองคำจากสารชะละลาย (ชโล มะลิคำ, 2562)

ทั้งนี้ เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งที่ใช้สารละลายซ้ำพบว่า ค่ากลุ่มผลกระทบทั้ง 4 ด้านจะลดลงในอัตราที่ต่ำลง เห็นได้จากผลต่างระหว่างผลกระทบของกระบวนการที่ไม่มีการชะละลายซ้ำและมีการชะละลายซ้ำที่ 2 และ 3 ครั้ง ตามลำดับ หรือสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการชะละลายซ้ำ ผลกระทบที่ลดลงนั้นจะแตกต่างกันน้อยลงในทุกครั้งที่ชะละลายซ้ำ

3) การวิเคราะห์ผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลที่มีการจัดการของเสียและลดการใช้สารชะละลายโดยการเทียบหน่วย

การแสดงผลกระทบโดยการเทียบหน่วย (Normalization) จะทำให้สามารถเปรียบเทียบค่าผลกระทบของแต่ละกลุ่มที่มีหน่วยแตกต่างกันได้ (Stranddorf และคณะ, 2005) โดยพบว่าค่าผลกระทบที่ลดลงของกรณีศึกษาที่ 1.1ก 1.1ข และ 1.1ค สามารถจำแนกได้เป็นค่าความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ลดลงคิดเป็นร้อยละ 81.07 – 81.44 ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำบนดินลดลงคิดเป็นร้อยละ 18.46 – 18.77 ภาวะโลกร้อนลดลงคิดเป็นร้อยละ 0.10 - 0.16 การลดลงของแหล่งแร่ลดลงคิดเป็นร้อยละ 0.00 ของค่าผลกระทบรวมทั้ง 4 ด้าน รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4-15



ภาพที่ 4-15 ผลกระทบโดยเทียบหน่วย (Normalization) ของกระบวนการรีไซเคิล
ที่มีการจัดการของเสียและลดการใช้สารเคมี

ผลกระทบโดยเทียบหน่วยยังแสดงให้เห็นว่า กระบวนการรีไซเคิลที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายและมีการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจะต้องชะละลายซ้ำถึง 9 ครั้งเพื่อให้น้ำเสียลดลงไปประมาณ 9 เท่า ดังกรณีศึกษาที่ 1.1ค จึงทำให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นที่ต่ำกว่ากรณีศึกษาที่ 3.1 กระบวนการรีไซเคิลที่ใช้สารประกอบโซลันด์และมีการจัดการของเสียได้

ทั้งนี้ เมื่อศึกษาผลกระทบทั้ง 18 ด้านที่ประเมินด้วยวิธี Recipe โดยการเทียบหน่วยพบว่า ผลกระทบของกรณีศึกษาที่ 1.1ข การชะละลายด้วยกรดกัดทองซ้ำ 3 ครั้ง เพียงพอที่จะทำให้ค่าผลกระทบรวมต่ำกว่ากรณีศึกษาที่ 3.1c กระบวนการรีไซเคิลที่ใช้สารประกอบโซลันด์เป็นสารชะละลายและมีการจัดการของเสีย รายละเอียดแสดงดังภาคผนวกที่ ง.4

จากการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยโปรแกรม SimaPro สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการนำทองคำกลับคืนจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองโดยมีการบำบัดน้ำเสีย ฝังกลบตะกอนอย่างปลอดภัยและลดการใช้สารเคมีด้วยการชะละลายซ้ำตั้งแต่ 3 ครั้งขึ้นไป จะเป็นแนวทางที่มีศักยภาพเทียบเท่ากับกระบวนการนำทองคำกลับคืนที่ใช้สารประกอบโซเดียมไนต์ซึ่งเป็น สารเคมีนิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรมรีไซเคิลทองคำจากซากอิเล็กทรอนิกส์ได้ ทั้งนี้ การศึกษาจะต้อง อาศัยข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเป็นไปได้ของการใช้กรดกัดทองในการชะละลายซ้ำ

4.8.3 ภาพรวมการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองและสารประกอบโซเดียมไนต์

ตารางที่ 4-27 ผลกระทบที่ลดลงของกระบวนการต่อ 1 กิโลกรัมของทองคำที่นำกลับคืนได้

กลุ่มผลกระทบ	หน่วย	ค่าผลกระทบต่อทองคำที่นำกลับคืน 1 กิโลกรัม	
		กรณีศึกษาที่ 1 และ 1.1ข	กรณีศึกษาที่ 3 และ 3.1
ภาวะโลกร้อน	kg CO ₂ eq	-19,955.22	-6,447.25
ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์บนดิน	kg 1,4-DCB	-94,635.40	-66,595.24
ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์	kg 1,4-DCB	-1,006.49	-695.68
การลดลงของแหล่งแร่	kg Cu eq	-195.25	-147.45

ตารางที่ 4-27 แสดงผลกระทบที่ลดลงของกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย เมื่อมีการจัดการของเสียและลดการใช้สารเคมีในกรณีศึกษาที่ 1.1ข เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 1 ที่ไม่มีการจัดการของเสียพบว่าผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนลดลงทั้งสิ้น 19,955.22 kg CO₂ eq ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์บนดินลดลงทั้งสิ้น 94,635.40 kg 1,4-DCB ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ลดลงทั้งสิ้น 1,006.49 kg 1,4-DCB และการลดลงของแหล่งแร่ลดลงทั้งสิ้น 195.25 kg Cu eq ต่อทองคำที่นำกลับคืน 1 กิโลกรัม

ผลกระทบที่ลดลงต่อทองคำที่นำกลับคืน 1 กิโลกรัมของกระบวนการที่ใช้สารประกอบโซเดียมไนต์เป็นสารชะละลาย เมื่อมีการจัดการของเสียในกรณีศึกษาที่ 3.1 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 3 ที่ไม่มีการจัดการของเสียพบว่า ผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนลดลงทั้งสิ้น 6,447.25 kg CO₂ eq ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์บนดินลดลงทั้งสิ้น 66,595.24 kg 1,4-DCB ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิด

โรคมะเร็งในมนุษย์ลดลงทั้งสิ้น 695.68 kg 1,4-DCB และการลดลงของแหล่งแร่ลดลงทั้งสิ้น 147.45 kg Cu eq ต่อทองคำที่นำกลับคืน 1 กิโลกรัม

ตารางที่ 4-28 ผลกระทบที่ลดลงของกระบวนการต่อ 1 กิโลกรัมของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

กลุ่มผลกระทบ	หน่วย	ค่าผลกระทบที่ลดลงต่อซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูง 1 กิโลกรัม	
		กรณีศึกษา 1 และ 1.1ข	กรณีศึกษา 3 และ 3.1
ภาวะโลกร้อน	kg CO ₂ eq	-15.49	-3.10
ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนดิน	kg 1,4-DCB	-82.35	-32.24
ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์	kg 1,4-DCB	-0.89	-0.34
การลดลงของแหล่งแร่	kg Cu eq	-0.17	-0.07

ตารางที่ 4-28 แสดงผลกระทบที่ลดลงของกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย เมื่อมีการจัดการของเสียและลดการใช้สารเคมีในกรณีศึกษาที่ 1.1ข เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 1 ที่ไม่มีการจัดการของเสียพบว่าผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนลดลงทั้งสิ้น 15.49 kg CO₂ eq ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนดินลดลงทั้งสิ้น 82.35 kg 1,4-DCB ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ลดลงทั้งสิ้น 0.89 kg 1,4-DCB และการลดลงของแหล่งแร่ลดลงทั้งสิ้น 0.17 kg Cu eq ต่อซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 1 กิโลกรัม

ผลกระทบที่ลดลงของกระบวนการที่ใช้ไฮยาไนด์เป็นสารชะละลาย เมื่อมีการจัดการของเสียในกรณีศึกษาที่ 3.1 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 3 ที่ไม่มีการจัดการของเสียพบว่า ผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนลดลงทั้งสิ้น 3.10 kg CO₂ eq ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนดินลดลงทั้งสิ้น 32.24 kg 1,4-DCB ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ลดลงทั้งสิ้น 0.34 kg 1,4-DCB และการลดลงของแหล่งแร่ลดลงทั้งสิ้น 0.07 kg Cu eq ต่อซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 1 กิโลกรัม

ตารางที่ 4-29 ผลกระทบที่ลดลงสูงสุดเมื่อกระบวนการมีการจัดการของเสียที่เหมาะสม

ผลกระทบ (หน่วย)	สารเคมี ที่ใช้ ชะละลาย ทองคำ	ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่กำจัดโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรม (ตัน)			
		2558	2559	2560	2561
		934.48	941.25	937.14	945.10
		ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูง ที่กำจัดโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรม (ตัน)			
		20.95	21.10	21.01	21.19
ค่าผลกระทบที่ลดลงสูงสุด					
ภาวะโลกร้อน (kg CO ₂ eq)	กรดกัดทอง	-3.24 × 10 ⁵	-3.27 × 10 ⁵	-3.25 × 10 ⁵	-3.28 × 10 ⁵
	ไซยาไนด์	-6.50 × 10 ⁴	-6.55 × 10 ⁴	-6.52 × 10 ⁴	-6.57 × 10 ⁴
ความเป็นพิษ ต่อระบบนิเวศบนดิน (kg 1,4-DCB)	กรดกัดทอง	-1.73 × 10 ⁶	-1.74 × 10 ⁶	-1.73 × 10 ⁶	-1.74 × 10 ⁶
	ไซยาไนด์	-6.75 × 10 ⁵	-6.80 × 10 ⁵	-6.77 × 10 ⁵	-6.83 × 10 ⁵
ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิด มะเร็งในมนุษย์ (kg 1,4-DCB)	กรดกัดทอง	-1.86 × 10 ⁴	-1.87 × 10 ⁴	-1.87 × 10 ⁴	-1.88 × 10 ⁴
	ไซยาไนด์	-7.07 × 10 ³	-7.12 × 10 ³	-7.09 × 10 ³	-7.15 × 10 ³
การลดลงของแหล่งแร่ (kg Cu eq)	กรดกัดทอง	-3.56 × 10 ³	-3.59 × 10 ³	-3.57 × 10 ³	-3.61 × 10 ³
	ไซยาไนด์	-1.49 × 10 ³	-1.50 × 10 ³	-1.50 × 10 ³	-1.51 × 10 ³

ตารางที่ 4-29 แสดงผลกระทบที่ลดลงสูงสุดของกระบวนการเมื่อมีการปรับปรุงกระบวนการโดยจัดการของเสียที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสม โดยอ้างอิงปริมาณคาดการณ์ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกกำจัดโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรมจากการวิเคราะห์ผังการไหลพบว่า หากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงได้แก่ หน่วยความจำ ซีพียูและส่วนประกอบของการ์ดแสดงผลเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายทองคำทั้งหมด และจัดการของเสียอย่างเหมาะสมโดยบำบัดน้ำเสียและแยกโลหะที่ถูกชะละลายร่วมด้วยได้แก่ ทองแดง เงินและตะกั่วออกจากน้ำเสียเพื่อเข้าสู่กระบวนการนำกลับคืน ลดการใช้สารเคมีด้วยการชะละลายซ้ำ 3 ครั้ง พร้อมทั้งกำจัดตะกอนของเสียด้วยการฝังกลบ จะสามารถลดผลกระทบของกระบวนการได้เฉลี่ยดังนี้ ภาวะโลกร้อน 3.26 × 10⁵ kg CO₂ eq ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนดิน 1.73 × 10⁶ kg 1,4-DCB ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ 1.87 × 10⁴ kg 1,4-DCB และการลดลงของแหล่งแร่ 3.58 × 10³ kg Cu eq ของปีที่ทำการศึกษา

หากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรมเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลที่ใช้โซเดียมไนต์เป็นสารชะละลายทองคำทั้งหมด และจัดการของเสียอย่างเหมาะสมโดยบำบัดน้ำเสียและแยกโลหะที่ถูกชะละลายร่วมด้วย ได้แก่ ทองแดง เงินและตะกั่วออกจากน้ำเสียเพื่อเข้าสู่กระบวนการนำกลับคืนต่อไป พร้อมทั้งกำจัดตะกอนของเสียด้วยการฝังกลบพบว่า สามารถลดผลกระทบได้เฉลี่ยดังนี้ ภาวะโลกร้อน 6.53×10^4 kg CO₂ eq ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์บนดิน 6.79×10^5 kg 1,4-DCB ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ 7.11×10^3 kg 1,4-DCB และการลดลงของแหล่งแร่ 1.50×10^3 kg Cu eq ของปีที่ทำการศึกษา

4.9 ผลการเปรียบเทียบต้นทุนของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบโซเดียมไนต์เป็นสารชะละลายทองคำ

ตารางที่ 4-30 รายการต้นทุนการใช้สารเคมีและไฟฟ้าของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบโซเดียมไนต์เป็นสารชะละลาย

รายการ	ราคา	หน่วย
1. กรดไนตริก (68%)	28.60	บาท/กิโลกรัม
2. กรดไฮโดรคลอริก (35%)	18.00	บาท/กิโลกรัม
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (50%)	48.00	บาท/กิโลกรัม
4. โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์	9.10	บาท/กิโลกรัม
5. สารประกอบโซเดียมไนต์	74.50	บาท/กิโลกรัม
6. ฟลอยเทลลิก	60.80	บาท/กิโลกรัม
7. ค่าน้ำ	20.00	บาท/ลูกบาศก์เมตร
8. ค่าไฟฟ้า	3.00	บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง

หมายเหตุ: ราคาประมาณการในระดับอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4-31 ต้นทุนการใช้สารเคมีและไฟฟ้าของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายต่อทองคำที่นำกลับคืนได้ 1 กิโลกรัม

รายการ	กระบวนการที่ใช้สารชะละลาย		หน่วย
	กรดกัดทอง	สารประกอบไซยาไนด์	
1. การใช้สารเคมี	127,000 42,000*	23,000	บาท/ทองคำ 1 กก.
2. การใช้ไฟฟ้า	84,000	84,000	บาท/ทองคำ 1 กก.

หมายเหตุ: * ต้นทุนเมื่อมีการลดการใช้สารเคมีโดยการชะละลายซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ 4-31 แสดงต้นทุนของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายพบว่า กระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายมีต้นทุนของสารเคมีทั้งสิ้น 127,000 บาท หรือคิดเป็น 5.5 เท่าของกระบวนการที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์ และหากลดการใช้สารเคมีด้วยการชะละลายซ้ำ 3 ครั้งจะทำให้ต้นทุนของสารเคมีลดลงเหลือ 42,000 บาท หรือคิดเป็น 1.8 เท่าของกระบวนการที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์ต่อทองคำที่นำกลับคืนได้ 1 กิโลกรัมโดยประมาณ

กระบวนการที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายมีต้นทุนของสารเคมีทั้งสิ้น 23,000 บาทต่อทองคำที่นำกลับคืนได้ 1 กิโลกรัม โดยกำหนดให้ต้นทุนการใช้ไฟฟ้าเท่ากันคิดเป็น 84,000 บาทต่อทองคำที่นำกลับคืนได้ 1 กิโลกรัมโดยประมาณ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายทองคำ โดยเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ใช้สารประกอบโซเดียมไนต์ ซึ่งเป็นสารเคมีที่ได้รับความนิยมในระดับอุตสาหกรรมเหมืองแร่และรีไซเคิลในปัจจุบัน และหาแนวทางในการลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ โดยตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ หน่วยความจำ (RAM) ซีพียู (CPU) และส่วนประกอบของการ์ดจอ (PCI card) ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 การศึกษาปริมาณของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในประเทศไทย

ปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรหลัก (Mainboard) และการ์ดแสดงผล (PCI card) ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะสามารถจำแนกตามแหล่งกำเนิดซาก ดังนี้ 1) ซากที่เกิดขึ้นในประเทศ ได้แก่ คริวเรือน สำนักงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์ 2) ซากที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมในประเทศ ซึ่งอ้างอิงจากตามเอกสารกำกับการขนส่งของเสียอันตราย 3) ซากที่เกิดจากการนำเข้าและส่งออกตามพิธีศุลกากรของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 8471.41.10 และพิธีศุลกากรของซากคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ไม่ใช่ประเภทพกพา 8534.00.10 ถึง 8534.00.90 ที่ถูกเคลื่อนย้ายเพื่อกำจัดข้ามแดนภายใต้อนุสัญญาบาเซลหรือกำกับต่อท้ายด้วยรหัสสถิติ 899

5.2 การวิเคราะห์ผังการไหลในระดับผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์ทำให้เห็นถึงแนวโน้มของปริมาณที่เกิดขึ้นและวิธีที่รับจัดการซากในประเทศไทยซึ่งพบว่า ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงวงจรรวมและการ์ดจอของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะที่เกิดขึ้นในประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2558 – 2561 มีปริมาณเฉลี่ย 1,838.38 ตันต่อปี มีการเก็บซากไว้ในระบบเฉลี่ย 496.57 ตันต่อปี มีการจัดการซากโดยผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ว่าด้วยเรื่องการจัดการ

สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 และตรวจติดตามโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมเฉลี่ย 402.32 ต้นต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 29.95 ของซากที่ได้รับจัดการทั้งหมด มีการจัดการซากโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรมเฉลี่ย 939.49 ต้นต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 70.05 ของซากที่ได้รับจัดการทั้งหมด ซึ่งการจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรมจะไม่ได้รับการตรวจติดตามกระบวนการโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม และอาจส่งผลกระทบต่อการควบคุมผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ได้ แหล่งกำเนิดซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรมได้แก่ ครั้วเรือ สำนักรงานและโรงแรม/อะพาร์ตเมนต์

ส่วนประกอบของซากแผงวงจรรวมและการ์ดแสดงผล ได้แก่ หน่วยความจำ ซีพียูและส่วนประกอบของการ์ดแสดงผล ซึ่งเป็นแผงวงจรชนิดที่มีโลหะมีค่าสูงนั้นจะนิยมคัดแยกออกจากซากแผงวงจรชนิดอื่นๆเพื่อเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลโลหะมีค่า โดยแผงวงจรที่มีค่าสูงทั้งสามชนิดที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรมคิดเป็นปริมาณเฉลี่ย 21.06 ต้นต่อปี ซึ่งปริมาณในส่วนนี้จะนำมาอ้างอิงเพื่อให้ประเมินค่าผลกระทบที่ลดลงสูงที่สุดเมื่อกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไฮยาไนด์เป็นสารชะละลายมีการจัดการอย่างเหมาะสม

5.3 การศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหน่วยความจำ ซีพียู และส่วนประกอบของการ์ดแสดงผลถูกรวบรวมเพื่อนำมาศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทอง โดยผ่านกระบวนการดังต่อไปนี้ การบดลดขนาด การปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไนตริก การชะละลายด้วยกรดกัดทองและการตกตะกอนทองคำด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ ผลการศึกษาพบว่า ในขั้นตอนการลดขนาดทำให้มีการสูญเสียปริมาณซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บางส่วน ในขั้นตอนการปรับสภาพมีการสูญเสียทองคำต่ำกว่าร้อยละ 2 โดยประมาณ ในขั้นตอนการชะละลายด้วยกรดกัดทอง อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อโดยตรงต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายได้ ขณะที่ปริมาณกรดกัดทองและระยะเวลาในการชะละลายไม่ส่งผลให้ปริมาณทองคำที่ชะละลายได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขั้นตอนการตกตะกอนทองคำด้วยโซเดียมเมตา-

ไบซัลไฟต์ ทองคำสามารถนำกลับคืนได้เฉลี่ยร้อยละ 95.25 โดยความบริสุทธิ์ของทองคำมีค่าแตกต่างกันตามองค์ประกอบของสารชะละลายกรดกัดทองของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิด ซึ่งสามารถทำให้มีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99.99 โดยการชะละลายซ้ำหรือการหลอม

5.4 การศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลาย

อุตสาหกรรมเหมืองแร่และรีไซเคิลทองคำจะใช้ไซยาไนด์ในความเข้มข้นที่ต่ำหรือประมาณร้อยละ 6 - 8 เมื่อทองคำชะละลายในสารประกอบไซยาไนด์แล้วสามารถแยกทองคำด้วยวิธีทางไฟฟ้า โดยทองคำจะไปจับกับขั้วไฟฟ้าลบที่เป็นแท่งฟอยเหล็ก และสามารถแยกตะกอนทองคำจากฟอยเหล็กด้วยการชะละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก การศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำจากกระบวนการที่ใช้ไซยาไนด์เป็นสารชะละลายนั้นพบว่า จะสามารถชะละลายทองคำคิดเป็นร้อยละ 60 ของกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองที่ระยะเวลาในการชะละลายเท่ากัน ขณะที่กระบวนการที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์ชะละลายทองคำจะใช้ปริมาณสารเคมีในกระบวนการรวมที่ต่ำกว่ากระบวนการที่ใช้กรดกัดทอง และเมื่อแยกทองคำทางไฟฟ้าจะให้ร้อยละการนำกลับคืนเท่ากับ 99.5 ความบริสุทธิ์ของตะกอนทองคำจะอยู่ในช่วงร้อยละ 90-99

5.5 การวิเคราะห์ฝังการไหลในระดับองค์ประกอบ

การวิเคราะห์ฝังการไหลในระดับองค์ประกอบพบว่า เมื่อลดปริมาณการใช้กรดกัดทองหรือสารประกอบไซยาไนด์ลงจาก 6 มิลลิลิตรเป็น 2 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักซาก จะทำให้ปริมาณทองคำที่นำกลับคืนได้ รวมถึงปริมาณเงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายร่วมด้วยมีปริมาณลดลง ขณะที่น้ำเสียเกิดขึ้นจะลดลงเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ มีการกำกับช่วงความไม่แน่นอนของข้อมูลในการประเมินเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นจากการคำนวณ

การเปรียบเทียบปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายพบว่า นอกเหนือจากกรดกัดทองและไซยาไนด์ที่กำหนดให้มีปริมาณเท่ากันแล้ว สารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนอื่นๆ เช่น การปรับสภาพด้วยกรดไนตริก การตกตะกอนทองคำด้วยโซเดียม-เมตาไบซัลไฟต์ การแยกทองคำด้วยไฟฟ้าและการแยกทองคำออกจากฟอยเหล็กจะมีปริมาณที่

แตกต่างกันตามความเหมาะสมของแต่ละกระบวนการ ทำให้ภาพรวมของกระบวนการที่ใช้
 กรดกัดทองมีการใช้สารเคมีในปริมาณที่มากกว่ากระบวนการที่ใช้สารประกอบโซเดียมไฮไดรอกไซด์

5.6 การศึกษาและประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ กรดกัดทองและสารประกอบโซเดียมไฮไดรอกไซด์เป็นสารชะละลาย

การประเมินวัฏจักรชีวิตของกรณีศึกษาที่ใช้กรดกัดทองและโซเดียมไฮไดรอกไซด์ที่ไม่มีการจัดการของเสีย
 โดยคำนวณภายใต้หน่วยการทำงาน 1 กิโลกรัมของทองคำที่นำกลับคืนได้พบว่า ทั้งสองกระบวนการ
 ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยแสดงค่าผลกระทบรวมแบบเทียบหน่วยเป็นค่าบวก ขณะที่ผลกระทบ 4
 กลุ่มที่สนใจได้แก่ ผลกระทบที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนดิน ความเป็น
 พิษที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์และการลดลงของแหล่งแร่แสดงเป็นค่าบวกและลบที่ต่างกัน ซึ่ง
 สามารถจำแนกตามค่าของผลกระทบได้ดังนี้ กิจกรรมที่เพิ่มศักยภาพของกลุ่มผลกระทบแสดงเป็นค่า
 บวกเป็นผลมาจากการใช้สารเคมีในกระบวนการ กิจกรรมที่ลดศักยภาพของกลุ่มผลกระทบแสดงเป็น
 ค่าลบเป็นผลจากการนำกลับคืนของทองคำ และเมื่อวิเคราะห์ผลกระทบรวมจะพบว่ากระบวนการที่
 ใช้กรดกัดทองมีผลกระทบมากกว่ากระบวนการที่ใช้สารประกอบโซเดียมไฮไดรอกไซด์เนื่องจากใช้สารเคมีรวมใน
 กระบวนการมากกว่าในการนำกลับคืนทองคำ 1 กิโลกรัมที่เท่ากัน

5.7 การเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบโซเดียมไฮไดรอกไซด์เป็นสารชะละลายเมื่อมีการจัดการที่ เหมาะสม

การจัดการของเสียในกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะทำให้ผลกระทบต่อ
 สิ่งแวดล้อมลดลง ซึ่งสามารถทำได้โดยการแยกโลหะที่ชะละลายร่วมด้วยเช่น ทองแดง เงิน และตะกั่ว
 ออกจากน้ำเสียพร้อมทั้งบำบัดน้ำเสีย ส่วนตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถนำไปฝังกลบหรือเผาทำลายใน
 เต้าเผาสำหรับขยะอันตรายตามความเหมาะสม ทั้งนี้ การฝังกลบจะส่งผลกระทบต่อ
 ทำลาย และถึงแม้ว่ากระบวนการที่ใช้กรดกัดทองจะมีการจัดการของเสีย แต่ยังคงพบว่าผลกระทบที่
 เกิดขึ้นนั้นลดลงได้ต่ำกว่ากระบวนการที่ใช้สารประกอบโซเดียมไฮไดรอกไซด์ที่มีการจัดการของเสียอย่าง
 เหมาะสม

การลดปริมาณสารเคมีด้วยการใช้สารชะละลายซ้ำตั้งแต่ 3 ครั้งขึ้นไป จะเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดผลกระทบของกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองได้ และทำให้ผลกระทบรวมแบบเทียบหน่วยลดลงมากกว่ากับผลกระทบที่ลดลงของกระบวนการที่ใช้สารประกอบโซเดียมไนต์ที่มีการจัดการของเสียอย่างเหมาะสมได้

การประเมินผลกระทบที่ลดลงสูงที่สุดเมื่อกระบวนการรีไซเคิลที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายมีการจัดการของเสียอย่างเหมาะสมและลดปริมาณสารชะละลายด้วยการใช้ซ้ำ 3 ครั้ง อ้างอิงจากปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรมดังนี้ ภาวะโลกร้อนลดลง 3.26×10^5 kg CO₂ eq ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์บนดินลดลง 1.73×10^6 kg 1,4-DCB ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ลดลง 1.87×10^4 kg 1,4-DCB การลดลงของแหล่งแร่ลดลง 3.58×10^3 kg Cu eq

การประเมินผลกระทบที่ลดลงสูงที่สุดเมื่อกระบวนการรีไซเคิลที่ใช้สารประกอบโซเดียมไนต์เป็นสารชะละลายมีการจัดการของเสียอย่างเหมาะสม อ้างอิงจากปริมาณซากที่ถูกจัดการโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรมดังนี้ ภาวะโลกร้อนลดลง 6.53×10^4 kg CO₂ eq ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์บนดินลดลง 6.79×10^5 kg 1,4-DCB ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ลดลง 7.11×10^3 kg 1,4-DCB การลดลงของแหล่งแร่ลดลง 1.50×10^3 kg Cu eq

5.8 การเปรียบเทียบต้นทุนของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบโซเดียมไนต์เป็นสารชะละลาย

กระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลายมีการใช้สารเคมีรวมมากกว่า ทำให้ต้นทุนด้านสารเคมีคิดเป็น 127,000 บาทต่อทองคำที่นำกลับคืนได้ 1 กิโลกรัมโดยประมาณ ซึ่งมากกว่ากระบวนการที่ใช้โซเดียมไนต์ถึง 5.5 เท่านี้ หากมีการลดการใช้สารเคมีด้วยการชะละลายซ้ำจะสามารถลดต้นทุนด้านสารเคมีลงเหลือ 42,000 บาทต่อทองคำที่นำกลับคืนได้ 1 กิโลกรัมโดยประมาณ หรือคิดเป็น 1.8 เท่าของต้นทุนด้านสารเคมีของกระบวนการที่ใช้สารประกอบโซเดียมไนต์เป็นสารชะละลาย

บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ

6.1 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

6.1.1 ปริมาณซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ของคอมพิวเตอร์ประเภทตั้งโต๊ะประเมินจากปริมาณที่รายงานต่อกรมศุลกากรและกรมโรงงานอุตสาหกรรมและอ้างอิงจากผลการศึกษาและงานวิจัยก่อนหน้า ซึ่งมีปริมาณบางส่วนที่ไม่ได้รายงานต่อแหล่งข้อมูลหรือนอกเหนือจากแหล่งข้อมูลที่กล่าวไปข้างต้น ทำให้การประเมินปริมาณที่เกิดขึ้นในประเทศมีความคลาดเคลื่อนได้ อย่างไรก็ตามผลกระทบที่ลดลงสูงที่สุดได้จากการอ้างอิงปริมาณที่ถูกรวบรวมโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งหากมีการศึกษาปริมาณซากที่เกิดขึ้นเพิ่มเติม ก็จะทำให้การประเมินผลกระทบมีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

6.1.2 ซากคอมพิวเตอร์ แผงวงจรหลัก การ์ดจอ หน่วยความจำ ซีพียูที่ใช้ในการศึกษามีน้ำหนักที่แตกต่างกันตามรุ่น ขนาดและปีที่ผลิต โดยในการศึกษาจะเลือกคอมพิวเตอร์และแผงวงจรหลักที่มีความหลากหลายมากที่สุด ส่วนการ์ดจอ หน่วยความจำและซีพียูจะศึกษาให้มีความคล้ายคลึงกันมากที่สุดตามขนาดหรือน้ำหนัก และแสดงเปรียบเทียบกับน้ำหนักตัวอย่างซากที่ได้จากอุตสาหกรรมซึ่งประกอบกิจการรวบรวมซาก อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักของซากอุปกรณ์ดังกล่าวอาจส่งผลให้ค่าผลกระทบมีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าความเป็นจริง ทั้งนี้จะไม่ส่งผลต่อการเปรียบเทียบผลกระทบของแต่ละกรณีเนื่องจากการใช้สัดส่วนเดียวกันในการคำนวณ

6.1.3 งานวิจัยนี้ได้มีการใช้เครื่องบดลดขนาดที่ทำให้เกิดการสูญเสียซากร้อยละ 24.13 ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบของซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ได้ ทั้งนี้ จะไม่ส่งผลกระทบต่อผลการศึกษาปัจจัยต่างๆในการชะละลายทองคำด้วยกรดกัดทอง เนื่องจากตัวอย่างซากที่ผ่านการบดลดขนาดมีความเป็นเนื้อเดียวกัน โดยการเลือกเครื่องบดที่มีให้ร้อยละการสูญเสียลดลงจะเป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินวิจัยต่อไป

6.1.4 การศึกษาในครั้งนี้แสดงค่าผลกระทบที่ลดลงสูงที่สุดเมื่อซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ผ่านกระบวนการที่มีการใช้กรดกัดทองหรือสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายและมีการจัดการของเสียที่เหมาะสม โดยปริมาณซากที่ถูกรวบรวมโดยผู้ประกอบการที่ไม่ใช่โรงงานอุตสาหกรรมนั้นไม่ได้เข้า

สู่กระบวนการรีไซเคิลที่ใช้กรดกัดทองหรือสารประกอบไฮยาไนด์ทั้งหมด โดยสามารถเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลประเภทอื่นๆ เช่น กระบวนการที่ใช้ความร้อน (Pyrometallurgical process) กระบวนการทางกล (Mechanical process) ดังนั้นการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับปริมาณที่เข้าสู่กระบวนการที่ใช้กรดกัดทองหรือสารประกอบไฮยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยอ้างอิงจากอุตสาหกรรมที่ดำเนินการในปัจจุบัน จะเป็นข้อมูลสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่ลดลงได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

6.1.5 ความเป็นไปได้ของการลดผลกระทบด้วยการใช้สารชะละลายซ้ำจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้จริง

6.2 ข้อเสนอแนะในการประยุกต์ใช้เชิงวิศวกรรม

6.2.1 เนื่องจากมีปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมากที่ถูกกำจัดโดยไม่ผ่านการตรวจติดตามและควบคุมดูแลโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม จึงควรส่งเสริมให้เกิดนโยบายการรวบรวมซากเพื่อให้สามารถจัดการอย่างเป็นระบบ สามารถทราบปริมาณที่เกิดขึ้นจริงเพื่อเป็นข้อมูลไปพัฒนากระบวนการรีไซเคิลที่เหมาะสมกับปริมาณซากต่อไป

6.2.2 สามารถจัดการของเสียที่เกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสมโดยการแยกโลหะชนิดอื่นๆ ที่ถูกชะละลายร่วมด้วยเช่น เงิน ทองแดงและตะกั่วเพื่อนำเข้าสู่กระบวนการนำกลับคืนได้อีกครั้ง กากตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถกำจัดในหลุมฝังกลบหรือเผาทำลายในเตาเผาเฉพาะของเสียอันตราย

6.2.3 ทราบผลกระทบที่เกิดจากการใช้สารเคมีในการชะละลายทองคำได้แก่ กรดกัดทองและสารประกอบไฮยาไนด์ และสามารถลดผลกระทบจากสารเคมีด้วยการใช้สารชะละลายซ้ำได้



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

ภาพการทดลองศึกษาร้อยละการนำกลับคืนและความบริสุทธิ์ของทองคำ
ที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ ก.1 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหน่วยความจำ ซีพียูและส่วนประกอบของการ์ดแสดงผลที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ก.2 ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลังลดขนาด



ภาพที่ ก.3 เครื่องบดลดขนาด NARA YIJU



ภาพที่ ก.4 การปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไนตริก



ภาพที่ ก.5 การชะละลายซากแมงวงจรรีเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทอง



ภาพที่ ก.6 การตกตะกอนด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์



ภาพที่ ก.7 ตะกอนของโลหะ



ภาคผนวก ข

ผลของปริมาณกรดกัดทอง อุณหภูมิ และระยะเวลาในการชะละลาย
ต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข.1 ผลของปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

ตารางที่ ข.1.1 ผลของปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

ปริมาณของกรดกัดทอง (มิลลิลิตร) ต่อน้ำหนักซาก (กรัม)	สัดส่วนโดยน้ำหนักของโลหะ ที่ชะละลายได้ต่อน้ำหนักซาก			
	ทองคำ (ppm)	เงิน (ppm)	ทองแดง (%)	ตะกั่ว (ppm)
2 : 1	436.90	70.48	5.78	902.51
2 : 1	392.81	118.44	7.31	980.37
2 : 1	324.55	73.40	7.06	1,054.39
ค่าเฉลี่ย 2 : 1	384.75 ± 56.61	87.44 ± 26.89	6.72 ± 0.82	979.09 ± 75.95
4 : 1	391.44	96.36	8.00	1080.99
4 : 1	307.74	156.37	7.98	735.94
4 : 1	398.58	106.12	7.87	911.86
ค่าเฉลี่ย 4 : 1	365.92 ± 50.51	119.62 ± 32.20	7.95 ± 0.07	909.60 ±172.53
6 : 1	413.17	285.92	11.17	1395.90
6 : 1	518.14	250.08	9.86	1431.68
6 : 1	566.20	181.24	11.05	1656.77
ค่าเฉลี่ย 6 : 1	499.17 ± 78.26	239.08 ± 53.20	10.70 ± 0.73	1494.78 ±141.42

ตารางที่ ข.1.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

ANOVA

Description		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Au (ppm)	Between Groups	31201.431	2	15600.715	3.940	0.081
	Within Groups	23760.366	6	3960.061		
	Total	54961.797	8			
Ag (ppm)	Between Groups	38301.515	2	19150.758	12.517	0.007
	Within Groups	9180.054	6	1530.009		
	Total	47481.570	8			
Cu (%)	Between Groups	24.861	2	12.430	30.999	0.001
	Within Groups	2.406	6	0.401		
	Total	27.267	8			
Pb (ppm)	Between Groups	613212.372	2	306606.186	16.562	0.004
	Within Groups	111073.285	6	18512.214		
	Total	724285.657	8			

ตารางที่ ข.1.3 ผลความแตกต่างระหว่างปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณโลหะที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

1) ผลความแตกต่างระหว่างปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

ปริมาณของกรดกัดทอง (มิลลิลิตร) ต่อน้ำหนักซาก (กรัม)	2 : 1	4 : 1	6 : 1
2 : 1		0.929	0.145
4 : 1			0.091
6 : 1			

หมายเหตุ: * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

2) ผลความแตกต่างระหว่างปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณเงินที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

ปริมาณของกรดกัดทอง (มิลลิลิตร) ต่อน้ำหนักซาก (กรัม)	2 : 1	4 : 1	6 : 1
2 : 1		0.599	0.008*
4 : 1			0.022*
6 : 1			

หมายเหตุ: * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3) ผลความแตกต่างระหว่างปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณทองแดงที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

ปริมาณของกรดกัดทอง (มิลลิลิตร) ต่อน้ำหนักซาก (กรัม)	2 : 1	4 : 1	6 : 1
2 : 1		0.242	0.009*
4 : 1			0.045*
6 : 1			

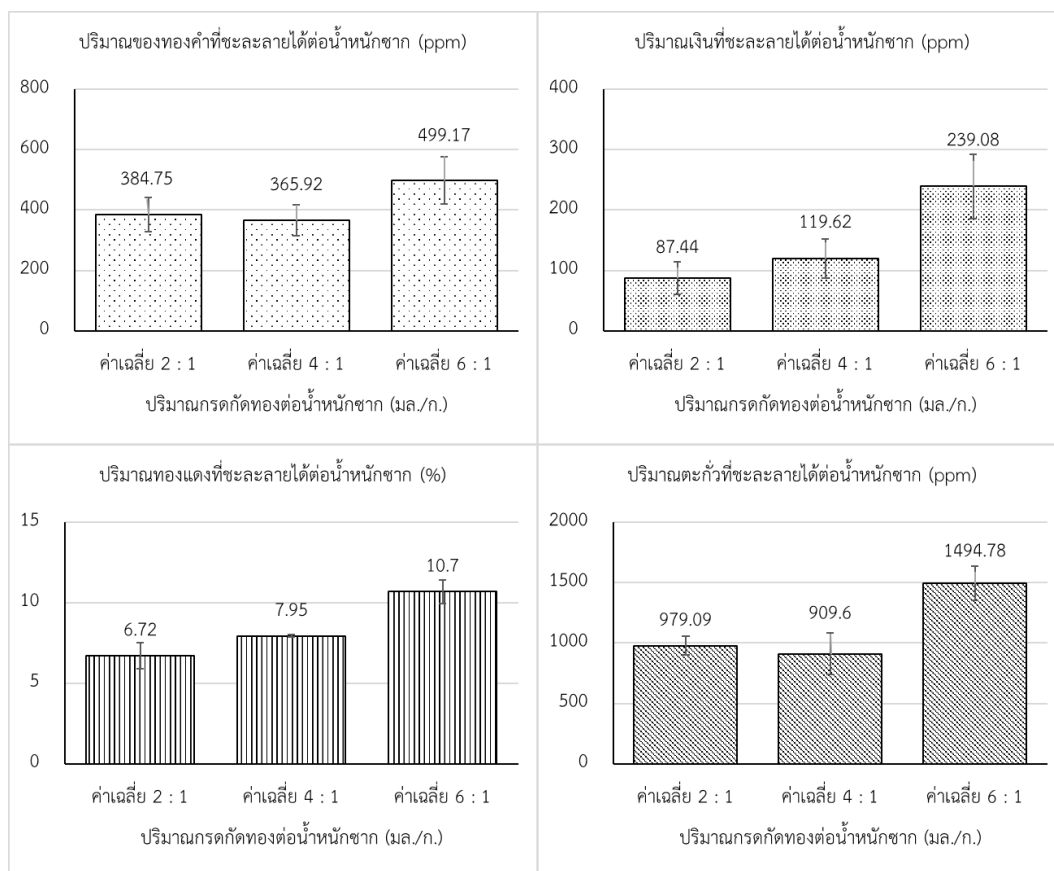
หมายเหตุ: * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4) ผลความแตกต่างระหว่างปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

ปริมาณของกรดกัดทอง (มิลลิลิตร) ต่อน้ำหนักซาก (กรัม)	2 : 1	4 : 1	6 : 1
2 : 1		0.812	0.008*
4 : 1			0.004*
6 : 1			

หมายเหตุ: * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ภาพที่ ข.1 ผลของปริมาณกรดกัดทองต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)



ภาคผนวก ข.2 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

ตารางที่ ข.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนโดยน้ำหนักของโลหะ ที่ได้จากการชะละลายต่อน้ำหนักซาก			
	ทองคำ (ppm)	เงิน (ppm)	ทองแดง (%)	ตะกั่ว (ppm)
25	443.69	320.78	9.89	1,539.52
25	452.69	293.80	9.89	1,647.33
25	-	-	9.89	1,599.00
25	560.37	293.67	10.76	1,880.70
25	560.37	302.66	10.63	1,845.40
25	-	-	10.72	1,837.97
ค่าเฉลี่ย 25	504.28 ± 64.87	302.73 ± 12.75	10.29 ± 0.45	1,724.98 ± 146.84
50	557.28	296.61	10.25	1,904.53
50	548.29	278.64	10.25	1,820.93
50	-	-	10.25	1,787.50
50	518.04	284.47	11.31	2,092.83
50	506.06	281.48	11.34	2,116.96
50	-	-	11.31	2,124.39
ค่าเฉลี่ย 50	532.41 ± 24.30	285.30 ± 7.91	10.79 ± 0.59	1,974.52 ± 155.06
75	620.11	287.59	11.70	2,270.15
75	632.09	359.48	11.76	2,303.59
75	-	-	11.64	2,220.01
75	695.73	296.88	12.11	3,010.67
75	707.72	326.87	12.07	2,992.08
75	-	-	12.18	2,949.31
ค่าเฉลี่ย 75	663.91 ± 44.21	317.71 ± 32.51	11.91 ± 0.24	2,624.30 ± 395.45

ตารางที่ ข.2.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

ANOVA

Description		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Au (ppm)	Between Groups	58086.919	2	29043.459	12.902	0.002
	Within Groups	20259.144	9	2251.016		
	Total	78346.062	11			
Ag (ppm)	Between Groups	2104.170	2	1052.085	2.463	0.140
	Within Groups	3844.931	9	427.215		
	Total	5949.100	11			
Cu (%)	Between Groups	8.237	2	4.119	20.594	0.000
	Within Groups	3.000	15	0.200		
	Total	11.237	17			
Pb (ppm)	Between Groups	2586495.647	2	1293247.823	19.208	0.000
	Within Groups	1009927.903	15	67328.527		
	Total	3596423.550	17			

ตารางที่ ข.2.3 ผลความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิต่อปริมาณโลหะที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

1) ผลความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

อุณหภูมิ (°C)	25	50	75
25		0.805	0.023*
50			0.011*
75			

หมายเหตุ: * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

2) ผลความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิต่อปริมาณเงินที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

อุณหภูมิ (°C)	25	50	75
25		0.167	0.781
50			0.305
75			

หมายเหตุ: * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3) ผลความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิต่อปริมาณทองแดงที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

อุณหภูมิ (°C)	25	50	75
25		0.330	0.000*
50			0.011*
75			

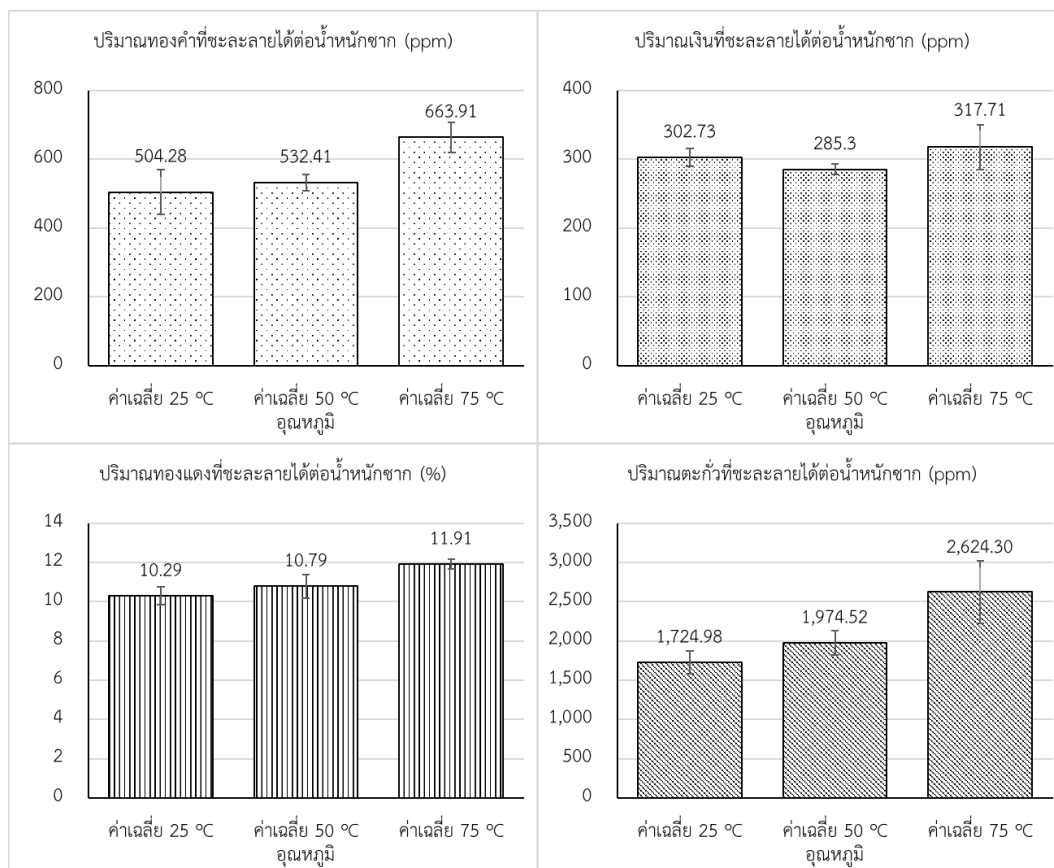
หมายเหตุ: * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4) ผลความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิต่อปริมาณตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

อุณหภูมิ (°C)	25	50	75
25		0.047*	0.005*
50			0.023*
75			

หมายเหตุ: * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ภาพที่ ข.2 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)



ภาคผนวก ข.3 ผลของระยะเวลาในการชะละลายต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

ตารางที่ ข.3.1 ผลของเวลาต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

เวลาในการ ชะละลาย (ชั่วโมง)	สัดส่วนโดยน้ำหนักของโลหะ ที่ได้จากการชะละลายต่อน้ำหนักซาก			
	ทองคำ (ppm)	เงิน (ppm)	ทองแดง (%)	ตะกั่ว (ppm)
0.5	656.35	266.74	12.65	2,352.12
0.5	656.35	275.73	12.67	2448.74
0.5	-	-	12.64	2439.449
0.5	569.74	257.88	12.01	2161.891
0.5	557.75	230.90	11.99	2174.905
0.5	-	-	12.03	2132.144
ค่าเฉลี่ย 0.5	610.05 ± 53.69	257.81 ± 19.37	12.33 ± 0.36	2,284.87 ± 145.47
1	620.11	287.59	11.70	2,270.15
1	632.09	359.48	11.76	2,303.59
1	-	-	11.64	2,220.01
1	695.73	296.88	12.11	3,010.67
1	707.72	326.87	12.07	2,992.08
1	-	-	12.18	2,949.31
ค่าเฉลี่ย 1	663.91 ± 44.21	317.71 ± 32.51	11.91 ± 0.24	2,624.30 ± 395.45
2	668.37	245.77	12.26	1,978.70
2	662.37	389.63	12.26	2,032.59
2	-	-	12.26	1,952.69
2	629.62	305.81	12.57	1,734.01
2	623.62	269.84	12.57	1,839.96
2	-	-	12.57	1,700.55
ค่าเฉลี่ย 2	645.99 ± 22.64	302.76 ± 62.95	12.41 ± 0.17	1,873.08 ± 136.49

ตารางที่ ข.3.1 (ต่อ) ผลของเวลาต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

เวลาในการ ชะละลาย (ชั่วโมง)	สัดส่วนโดยน้ำหนักของโลหะ ที่ได้จากการชะละลายต่อน้ำหนักซาก			
	ทองคำ (ppm)	เงิน (ppm)	ทองแดง (%)	ตะกั่ว (ppm)
4	673.21	341.09	12.84	2,333.36
4	676.20	290.23	12.86	2,344.49
4	-	-	12.82	2,322.23
4	817.31	353.27	13.20	2,492.50
4	820.30	281.42	13.12	2,511.07
4	-	-	13.10	2,529.63
ค่าเฉลี่ย 4	746.76 ± 83.21	316.50 ± 35.95	12.99 ± 0.17	2,422.21 ± 98.29

ตารางที่ ข.3.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของเวลาต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

ANOVA

Description		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Au (ppm)	Between Groups	40219.096	3	13406.365	4.369	0.027
	Within Groups	36821.660	12	3068.472		
	Total	77040.755	15			
Ag (ppm)	Between Groups	9465.642	3	3155.214	1.888	0.186
	Within Groups	20059.472	12	1671.623		
	Total	29525.114	15			
Cu (%)	Between Groups	3.544	3	1.181	19.988	0.000
	Within Groups	1.182	20	0.059		
	Total	4.726	23			
Pb (ppm)	Between Groups	0.018	3	0.006	11.760	0.000
	Within Groups	0.010	20	0.001		
	Total	0.028	23			

ตารางที่ ข.3.3 ผลความแตกต่างระหว่างเวลาต่อปริมาณโลหะที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

1) ผลความแตกต่างระหว่างเวลาต่อปริมาณทองคำที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

เวลา (ชั่วโมง)	0.5	1	2	4
0.5		0.586	0.763	0.163
1			0.964	0.492
2				0.311
4				

หมายเหตุ: * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

2) ผลความแตกต่างระหว่างเวลาต่อปริมาณเงินที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

เวลา (ชั่วโมง)	0.5	1	2	4
0.5		0.217	0.438	0.231
1			0.953	1.000
2				0.963
4				

หมายเหตุ: * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3) ผลความแตกต่างระหว่างเวลาต่อปริมาณทองแดงที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

เวลา (ชั่วโมง)	0.5	1	2	4
0.5		0.182	0.993	0.022*
1			0.011*	0.000*
2				0.001*
4				

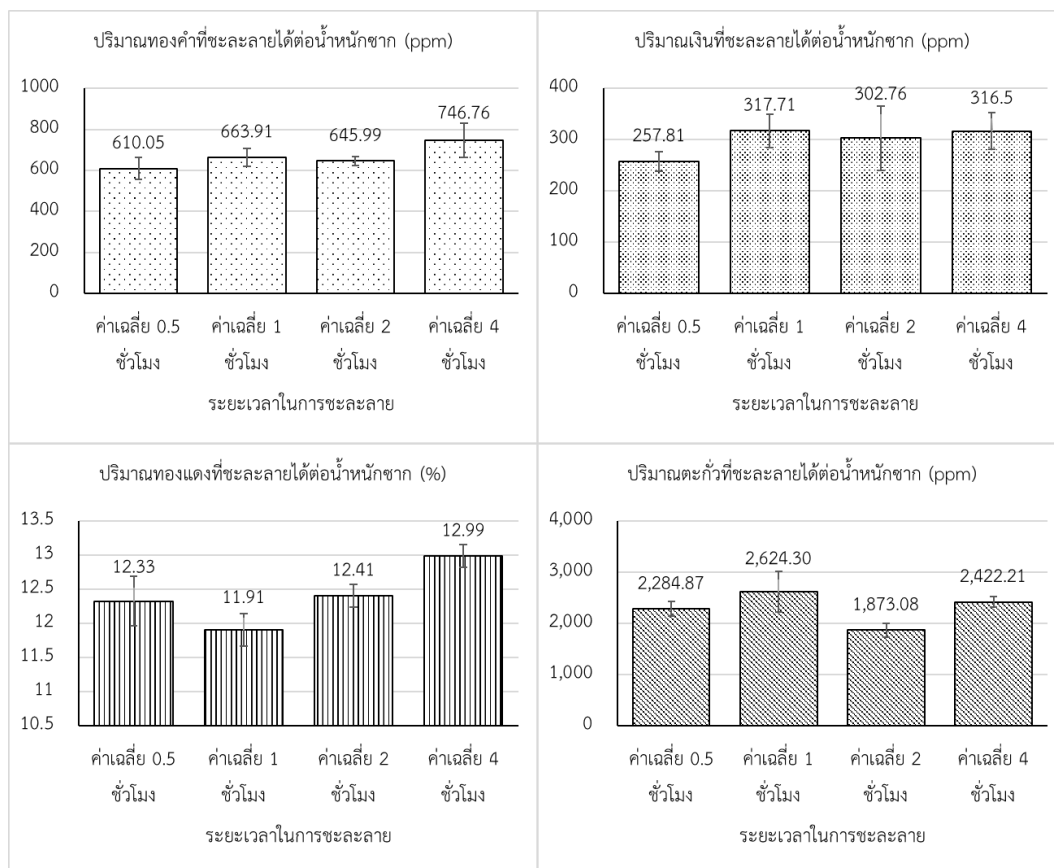
หมายเหตุ: * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4) ผลความแตกต่างระหว่างเวลาต่อปริมาณตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)

เวลา (ชั่วโมง)	0.5	1	2	4
0.5		0.369	0.003*	0.371
1			0.021*	0.773
2				0.000*
4				

หมายเหตุ: * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ภาพที่ ข.3 ผลของเวลาต่อปริมาณทองคำ เงิน ทองแดงและตะกั่วที่ชะละลายได้จากหน่วยความจำ (RAM)





ภาคผนวก ค

ค่าความไม่แน่นอนของแหล่งข้อมูลและข้อมูลเพิ่มเติม
สำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลในระดับผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ค ความไม่แน่นอนของข้อมูลหรือค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Coefficients of variation; CV)

ตารางที่ ค.1 ความไม่แน่นอนของข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์

แหล่งข้อมูล	ความไม่แน่นอนของข้อมูล (ร้อยละ)					รวม
	ความน่าเชื่อถือ	ความสมบูรณ์ของข้อมูล	ความสัมพันธ์ด้านเวลา	ความสัมพันธ์ด้านพื้นที่	ความสัมพันธ์ด้านอื่น	
กรมศุลกากร	6.8	2.3	0.0	0.0	13.7	15.47
กรมโรงงานอุตสาหกรรม	6.8	2.3	0.0	0.0	13.7	15.47
การคำนวณปริมาณซากจากครัวเรือน	6.8	2.3	2.3	0.0	13.7	15.64
การคำนวณปริมาณซากจากสำนักงาน	20.6	6.8	2.3	0.0	2.3	21.94

ตารางที่ ค.2 ความไม่แน่นอนของข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลระดับองค์ประกอบของกระบวนการที่ใช้กรดกัดทองเป็นสารชะละลาย

ผลิตภัณฑ์ / สารเคมี	ความไม่แน่นอนของข้อมูล (ร้อยละ)					รวม
	ความน่าเชื่อถือ	ความสมบูรณ์ของข้อมูล	ความสัมพันธ์ด้านเวลา	ความสัมพันธ์ด้านพื้นที่	ความสัมพันธ์ด้านอื่น	
ซากแผงวงจร	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8
ซากหลังบัด	6.8	0.0	0.0	0.0	13.7	15.29
สารเคมีในขั้นตอนการชะละลายและตกตะกอน	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8

ตารางที่ ค.3 ความไม่แน่นอนของข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลระดับองค์ประกอบของกระบวนการที่ใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลาย

ผลิตภัณฑ์ /สารเคมี/ ขั้นตอน	ความไม่แน่นอนของข้อมูล (ร้อยละ)					
	ความ น่าเชื่อถือ	ความ สมบูรณ์ ของข้อมูล	ความสัมพันธ์ ด้านเวลา	ความสัมพันธ์ ด้านพื้นที่	ความสัมพันธ์ ด้านอื่น	รวม
ซากแผงวงจร	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8
ซากหลังบัด	6.8	0.0	0.0	0.0	13.7	15.29
สารเคมีใน ขั้นตอนการ ชะละลาย	6.8	4.5	6.8	6.8	2.3	12.82
สารเคมีใน ขั้นตอนการ แยกทองคำ ทางไฟฟ้า	6.8	2.3	2.3	0.0	2.3	7.88
สารเคมีใน ขั้นตอนการ แยกทองคำ จากฝอยเหล็ก	6.8	2.3	20.6	6.8	2.3	22.97

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับการวิเคราะห์ผังการไหลระดับผลิตภัณฑ์

ชื่อสารเคมี	ความหนาแน่น (ก./มล.)
น้ำกลั่น	0.997
กรดไนตริก (สารละลายเข้มข้น 65%)	1.180
กรดไฮโดรคลอริก (สารละลายเข้มข้น 37%)	1.380
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ของแข็ง)	2.100
โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (ของแข็ง)	1.480
โพแทสเซียมไซยาไนด์ (ของแข็ง)	1.520



ภาคผนวก ง

ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตและการเปรียบเทียบผลกระทบ

ของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ง.1 ข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการ

ตารางที่ ง.1.1 ข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการของผลิตภัณฑ์

ชื่อ	คำอธิบาย
ทองคำ	Gold {RoW} treatment of precious metal from electronics scrap, in anode slime, precious metal extraction APOS, S
เงิน	Silver {RoW} treatment of precious metal from electronics scrap, in anode slime, precious metal extraction APOS, S
ทองแดง	Copper {RoW} treatment of metal part of electronics scrap, in blister-, by electrolytic refining APOS, S
ตะกั่ว	Lead {RoW} treatment of electronics scrap, metals recovery in copper smelter APOS, S

ตารางที่ ง.1.2 ข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการของสารขาเข้า

ชื่อ	คำอธิบาย
น้ำกลั่น	Water, deionized, from tap water, at user {RoW} production APOS, S
กรดไฮโดรคลอริก	Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RoW} hydrochloric acid production, from the reaction of hydrogen with chlorine APOS, S
กรดไนตริก	Nitric acid, without water, in 50% solution state {RoW} nitric acid production, product in 50% solution state APOS, S
โซเดียมไฮดรอกไซด์	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RoW} chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell APOS, S
โซเดียมซัลไฟต์	Sodium sulfite {RoW} production APOS, S
โซเดียมไซยาไนด์	Sodium cyanide {RoW} production APOS, S
เหล็ก	Steel, unalloyed {RoW} steel production, converter, unalloyed APOS, S

ตารางที่ ง.1.3 ข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการของน้ำเสีย

ชื่อ	คำอธิบาย
น้ำ	Water, TH
ทองคำ	Gold
เงิน	Silver
ทองแดง	copper
ตะกั่ว	Lead
กรดไนตริก	Nitric acid
สารประเภทคลอไรด์	Chlorides, unspecified
ไซยาไนด์	Cyanide compounds
โซเดียมไฮดรอกไซด์	Sodium hydroxide
เหล็ก	Iron compounds, unspecified

ตารางที่ ง.1.4 ข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการของพลังงานไฟฟ้าและความร้อน

ชื่อ	คำอธิบาย
พลังงานไฟฟ้า จากก๊าซธรรมชาติ	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, natural gas, conventional power plant APOS, S
พลังงานไฟฟ้า จากถ่านหิน	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hard coal APOS,
พลังงานไฟฟ้า จากพลังงานน้ำ	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, reservoir, tropical region APOS, S
พลังงานไฟฟ้า จากน้ำมันดีเซล	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, oil APOS, S
พลังงานความร้อน	Heat, district or industrial, natural gas {RoW} heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW APOS, S

หมายเหตุ: อ้างอิงสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของกฟผ. ปี พ.ศ. 2562 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2562)

ตารางที่ ง.1.5 ข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการของการจัดการของเสีย

ชื่อ	คำอธิบาย
ตะกอน	Sludge, hazardous

ตารางที่ ง.1.6 ข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการของการจัดการของเสีย

ชื่อ	คำอธิบาย
การบำบัดน้ำเสีย	Wastewater treatment, chemical reduction/oxidation process, municipal wastewater, at wastewater treatment plant RER
การฝังกลบ	Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill APOS, S
การเผาทำลาย	Hazardous waste, for incineration {RoW} treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration APOS, S

ภาคผนวก ง.2 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไฮยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยไม่มีการจัดการของเสีย

ตารางที่ ง.2.1 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของกรณีศึกษาที่ 1 2 3 และ 4 ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไฮยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยไม่มีการจัดการของเสีย

กลุ่มผลกระทบ	หน่วย	ค่าผลกระทบของกรณีศึกษาที่			
		1	2	3	4
ภาวะโลกร้อน	kg CO ₂ eq	7,480.23	20,077.87	-9,826.41	-8,042.34
การลดลงของโอโซน ในชั้นสตราโทสเฟียร์	kg CFC11 eq	0.30	0.40	-0.04	-0.04
การก่อให้เกิดรังสีไอออน	kBq Co-60 eq	-720.14	66.91	-1,293.55	-1,190.01
การเพิ่มขึ้นของโอโซน ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ มนุษย์	kg NOx eq	5.02	32.60	-29.86	-26.49
การเกิดฝุ่นขนาดเล็ก	kg PM 2.5 eq	-2.85	21.58	-26.70	-23.64
การเพิ่มขึ้นของโอโซนที่ ส่งผลกระทบต่อระบบ นิเวศน์บนบก	kg NOx eq	2.06	29.90	-33.05	-29.61
ความเป็นกรดในดิน	kg SO ₂ eq	-10.21	35.17	-71.18	-65.22
การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร ในแหล่งน้ำจืด	kg P eq	-4.58	0.79	-8.84	-8.19
การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร ในทะเล	kg N eq	-1.19	-0.75	-1.27	-0.88
ความเป็นพิษ ต่อระบบนิเวศน์บนดิน	kg 1,4-DCB	-142,522.51	-110,938.50	-177,785.01	-174,107.02
ความเป็นพิษในแหล่งน้ำจืด	kg 1,4-DCB	86,176.48	77,768.02	80,578.65	72,523.27
ความเป็นพิษในทะเล	kg 1,4-DCB	102,248.17	92,313.15	95,496.84	85,910.46
ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิด โรคมะเร็งในมนุษย์	kg 1,4-DCB	-1,763.78	-1,300.46	-2,132.88	-2,068.90
ความเป็นพิษที่ไม่ก่อให้เกิด โรคมะเร็งในมนุษย์	kg 1,4-DCB	-49,550.37	-39,096.94	-61,030.14	-60,323.34
การลดลงของพื้นที่	m ² a crop eq	-232.43	-57.67	-379.28	-357.73
การลดลงของแหล่งแร่	kg Cu eq	-299.24	-258.13	-362.11	-358.48
การลดลงของแหล่งฟอสซิล	kg oil eq	-1,693.44	1,013.41	-4,105.41	-3,545.97
การใช้น้ำ	m ³	42.40	300.27	-171.99	-127.44

ตารางที่ ง.2.2 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตโดยการเทียบหน่วยของกรณีศึกษาที่ 1 2 3 และ 4 ที่ใช้กรดกำถองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยไม่มีการจัดการของเสีย

กลุ่มผลกระทบ	ค่าผลกระทบของกรณีศึกษาที่			
	1	2	3	4
ภาวะโลกร้อน	0.94	2.51	-1.23	-1.01
การลดลงของโอโซน ในชั้นสตราโทสเฟียร์	5.00	6.73	-0.70	-0.68
การก่อให้เกิดรังสีไอออน	-1.50	0.14	-2.69	-2.48
การเพิ่มขึ้นของโอโซน ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์	0.24	1.58	-1.45	-1.29
การเกิดฝุ่นขนาดเล็ก	-0.11	0.84	-1.04	-0.92
การเพิ่มขึ้นของโอโซนที่ส่งผล กระทบต่อระบบนิเวศบนบก	0.12	1.68	-1.86	-1.67
ความเป็นกรดในดิน	-0.25	0.86	-1.74	-1.59
การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร ในแหล่งน้ำจืด	-7.05	1.22	-13.62	-12.61
การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร ในทะเล	-0.26	-0.16	-0.28	-0.19
ความเป็นพิษ ต่อระบบนิเวศบนดิน	-137.53	-107.06	-171.56	-168.01
ความเป็นพิษในแหล่งน้ำจืด	70,233.83	63,380.93	65,671.60	59,106.46
ความเป็นพิษในทะเล	99,078.48	89,451.44	92,536.43	83,247.23
ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิด โรคมะเร็งในมนุษย์	-636.73	-469.47	-769.97	-746.87
ความเป็นพิษที่ไม่ก่อให้เกิด โรคมะเร็งในมนุษย์	-332.48	-262.34	-409.51	-404.77
การลดลงของพื้นที่	-0.04	-0.01	-0.06	-0.06
การลดลงของแหล่งแร่	0.00	0.00	0.00	0.00
การลดลงของแหล่งฟอสซิล	-1.73	1.03	-4.19	-3.62
การใช้น้ำ	0.16	1.13	-0.64	-0.48
ค่าผลกระทบรวม	168,201.09	152,011.06	156,827.48	141,007.46

ภาคผนวก ง.3 ผลการเปรียบเทียบผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและไซยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสีย

ตารางที่ ง.3.1 ผลการเปรียบเทียบของกรณีศึกษาที่ 1 1.1 1.2 3 3.1 และ 3.2 ที่ใช้กรดกัดทองและไซยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสีย

กลุ่มผลกระทบ	หน่วย	ค่าผลกระทบของกรณีศึกษาที่		
		1	1.1	1.2
ภาวะโลกร้อน	kg CO ₂ eq	7,480.23	-722.26	1,454.46
การลดลงของโอโซน ในชั้นสตราโทสเฟียร์	kg CFC11 eq	0.30	0.27	0.27
การก่อให้เกิดรังสีไอออน	kBq Co-60 eq	-720.14	-1,153.65	-1,120.36
การเพิ่มขึ้นของโอโซน ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์	kg NOx eq	5.02	-14.33	-12.57
การเกิดฝุ่นขนาดเล็ก	kg PM2.5 eq	-2.85	-17.53	-15.90
การเพิ่มขึ้นของโอโซนที่ส่งผล กระทบต่อระบบนิเวศบนบก	kg NOx eq	2.06	-18.17	-16.38
ความเป็นกรดในดิน	kg SO ₂ eq	-10.21	-47.58	-43.69
การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร ในแหล่งน้ำจืด	kg P eq	-4.58	-12.15	-11.33
การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร ในทะเล	kg N eq	-1.19	-1.96	-2.41
ความเป็นพิษ ต่อระบบนิเวศบนดิน	kg 1,4-DCB	-142,522.51	-213,111.67	-210,999.23
ความเป็นพิษในแหล่งน้ำจืด	kg 1,4-DCB	86,176.48	-4,926.56	-5,012.40
ความเป็นพิษในทะเล	kg 1,4-DCB	102,248.17	-6,513.46	-6,627.10
ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิด โรคมะเร็งในมนุษย์	kg 1,4-DCB	-1,763.78	-2,590.33	-2,358.44
ความเป็นพิษที่ไม่ก่อให้เกิด โรคมะเร็งในมนุษย์	kg 1,4-DCB	-49,550.37	-92,829.94	-95,003.26
การลดลงของพื้นที่	m ² a crop eq	-232.43	-401.44	-377.60
การลดลงของแหล่งแร่	kg Cu eq	-299.24	-452.64	-450.65
การลดลงของแหล่งฟอสซิล	kg oil eq	-1,693.44	-4,312.36	-4,106.68
การใช้น้ำ	m ³	42.40	-53.70	-45.74

ตารางที่ ง.3.1(ต่อ) ผลการเปรียบเทียบของกรณีศึกษาที่ 1 1.1 1.2 3 3.1 และ 3.2 ที่ใช้กรดกัดทอง และสารประกอบไฮยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสีย

กลุ่มผลกระทบ	หน่วย	ค่าผลกระทบของกรณีศึกษาที่		
		3	3.1	3.2
ภาวะโลกร้อน	kg CO ₂ eq	-9,826.41	-16,273.66	-12,345.89
การลดลงของโอโซน ในชั้นสตราโทสเฟียร์	kg CFC11 eq	-0.04	-0.05	-0.05
การก่อให้เกิดรังสีไอออน	kBq Co-60 eq	-1,293.55	-1,644.75	-1,587.82
การเพิ่มขึ้นของโอโซน ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์	kg NOx eq	-29.86	-45.62	-42.60
การเกิดฝุ่นขนาดเล็ก	kg PM2.5 eq	-26.70	-38.56	-35.70
การเพิ่มขึ้นของโอโซนที่ส่งผล กระทบต่อระบบนิเวศบนบก	kg NOx eq	-33.05	-49.67	-46.58
ความเป็นกรดในดิน	kg SO ₂ eq	-71.18	-102.55	-95.79
การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร ในแหล่งน้ำจืด	kg P eq	-8.84	-15.58	-14.09
การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร ในทะเล	kg N eq	-1.27	-1.15	-2.00
ความเป็นพิษ ต่อระบบนิเวศบนดิน	kg 1,4-DCB	-177,785.01	-244,380.25	-241,084.31
ความเป็นพิษในแหล่งน้ำจืด	kg 1,4-DCB	80,578.65	-5,120.55	-5,293.17
ความเป็นพิษในทะเล	kg 1,4-DCB	95,496.84	-6,800.52	-7,028.93
ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิด โรคมะเร็งในมนุษย์	kg 1,4-DCB	-2,132.88	-2,828.56	-2,407.97
ความเป็นพิษที่ไม่ก่อให้เกิด โรคมะเร็งในมนุษย์	kg 1,4-DCB	-61,030.14	-98,694.42	-102,953.62
การลดลงของพื้นที่	m ² a crop eq	-379.28	-526.74	-484.19
การลดลงของแหล่งแร่	kg Cu eq	-362.11	-509.56	-507.07
การลดลงของแหล่งฟอสซิล	kg oil eq	-4,105.41	-6,408.36	-6,063.55
การใช้น้ำ	m ³	-171.99	-245.33	-231.77

ตารางที่ ง.3.2 ผลการเปรียบเทียบโดยการเทียบหน่วยของกรณีศึกษาที่ 1 1.1 1.2 3 3.1 และ 3.2 ที่ใช้การกัดทองและสารประกอบไซยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสีย

กลุ่มผลกระทบ	ค่าผลกระทบของกรณีศึกษาที่					
	1	1.1	1.2	3	3.1	3.2
ภาวะโลกร้อน	0.94	-0.09	0.18	-1.23	-2.04	-1.55
การลดลงของโอโซน ในชั้นสตราโทสเฟียร์	5.00	4.49	4.50	-0.70	-0.84	-0.82
การก่อให้เกิดรังสีไอออน	-1.50	-2.40	-2.33	-2.69	-3.42	-3.30
การเพิ่มขึ้นของโอโซน ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ มนุษย์	0.24	-0.70	-0.61	-1.45	-2.22	-2.07
การเกิดฝุ่นขนาดเล็ก	-0.11	-0.69	-0.62	-1.04	-1.51	-1.40
การเพิ่มขึ้นของโอโซนที่ ส่งผลกระทบต่อระบบ นิเวศน์บนบก	0.12	-1.02	-0.92	-1.86	-2.80	-2.62
ความเป็นกรดในดิน	-0.25	-1.16	-1.07	-1.74	-2.50	-2.34
การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร ในแหล่งน้ำจืด	-7.05	-18.72	-17.44	-13.62	-23.99	-21.70
การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร ในทะเล	-0.26	-0.42	-0.52	-0.28	-0.25	-0.43
ความเป็นพิษ ต่อระบบนิเวศน์บนดิน	-137.53	-205.65	-203.61	-171.56	-235.83	-232.65
ความเป็นพิษในแหล่งน้ำจืด	70,233.83	-4,015.15	-4,085.11	65,671.60	-4,173.24	-4,313.94
ความเป็นพิษในทะเล	99,078.48	-6,311.54	-6,421.66	92,536.43	-6,589.71	-6,811.03
ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิด โรคมะเร็งในมนุษย์	-636.73	-935.11	-851.40	-769.97	-1,021.11	-869.28
ความเป็นพิษที่ไม่ก่อให้เกิด โรคมะเร็งในมนุษย์	-332.48	-622.89	-637.47	-409.51	-662.24	-690.82
การลดลงของพื้นที่	-0.04	-0.07	-0.06	-0.06	-0.09	-0.08
การลดลงของแหล่งแร่	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
การลดลงของแหล่งฟอสซิล	-1.73	-4.40	-4.19	-4.19	-6.54	-6.18
การใช้น้ำ	0.16	-0.20	-0.17	-0.64	-0.92	-0.87
ค่าผลกระทบรวม	168,201.09	-12,115.72	-12,222.50	156,827.48	-12,729.23	-12,961.07

ภาคผนวก ง.4 ผลการเปรียบเทียบผลกระทบของกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไฮยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสียและลดการใช้สารเคมี

ตารางที่ ง.4.1 ผลการเปรียบเทียบของกรณีศึกษาที่ 1.1 1.1ก 1.1ข 1.1ค และ 3.1 ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบไฮยาไนด์เป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสียและลดการใช้สารเคมี

กลุ่มผลกระทบ	หน่วย	ค่าผลกระทบของกรณีศึกษาที่				
		1.1	1.1ก	1.1ข	1.1ค	3.1
ภาวะโลกร้อน	kg CO ₂ eq	-722.26	-9,536.83	-12,474.99	-16,392.58	-16,273.66
การลดลงของโอโซน ในชั้นสตราโทสเฟียร์	kg CFC11 eq	0.27	0.11	0.06	-0.02	-0.05
การก่อให้เกิดรังสีไอออน	kBq Co-60 eq	-1,153.65	-1,464.16	-1,567.66	-1,705.66	-1,644.75
การเพิ่มขึ้นของโอโซน ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์	kg NOx eq	-14.33	-32.03	-37.93	-45.80	-45.62
การเกิดฝุ่นขนาดเล็ก	kg PM2.5 eq	-17.53	-29.95	-34.09	-39.61	-38.56
การเพิ่มขึ้นของโอโซนที่ ส่งผลกระทบต่อระบบ นิเวศน์บนบก	kg NOx eq	-18.17	-36.01	-41.95	-49.88	-49.67
ความเป็นกรดในดิน	kg SO ₂ eq	-47.58	-78.50	-88.81	-102.55	-102.55
การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร ในแหล่งน้ำจืด	kg P eq	-12.15	-14.20	-14.89	-15.80	-15.58
การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร ในทะเล	kg N eq	-1.96	-1.80	-1.74	-1.67	-1.15
ความเป็นพิษ ต่อระบบนิเวศน์บนดิน	kg 1,4-DCB	-213,111.67	-231,146.39	-237,157.91	-245,173.33	-244,380.25
ความเป็นพิษในแหล่งน้ำจืด	kg 1,4-DCB	-4,926.56	-5,103.43	-5,162.38	-5,240.99	-5,120.55
ความเป็นพิษในทะเล	kg 1,4-DCB	-6,513.46	-6,766.18	-6,850.42	-6,962.74	-6,800.52
ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิด โรคมะเร็งในมนุษย์	kg 1,4-DCB	-2,590.33	-2,725.28	-2,770.27	-2,830.24	-2,828.56
ความเป็นพิษที่ไม่ก่อให้เกิด โรคมะเร็งในมนุษย์	kg 1,4-DCB	-92,829.94	-97,577.44	-99,159.92	-101,269.92	-98,694.42
การลดลงของพื้นที่	m ² a crop eq	-401.44	-479.13	-505.03	-539.56	-526.74
การลดลงของแหล่งแร่	kg Cu eq	-452.64	-484.03	-494.49	-508.44	-509.56
การลดลงของแหล่งฟอสซิล	kg oil eq	-4,312.36	-5,659.17	-6,108.11	-6,706.69	-6,408.36
การใช้น้ำ	m ³	-53.70	-174.19	-214.36	-267.91	-245.33

ตารางที่ ง.4.2 ผลการเปรียบเทียบผลกระทบโดยการเทียบหน่วยของกรณีศึกษาที่ 1.1 1.1ก 1.1ข 1.1ค และ 3.1 ที่ใช้กรดกัดทองและสารประกอบโซลานีนด์เป็นสารชะละลายโดยมีการจัดการของเสีย และลดการใช้สารเคมี

กลุ่มผลกระทบ	ค่าผลกระทบของกรณีศึกษาที่				
	1.1	1.1ก	1.1ข	1.1ค	3.1
ภาวะโลกร้อน	-0.09	-1.19	-1.56	-2.05	-2.04
การลดลงของโอโซน ในชั้นสตราโทสเฟียร์	4.49	1.82	0.92	-0.26	-0.84
การก่อให้เกิดรังสีไอออน	-2.40	-3.05	-3.26	-3.55	-3.42
การเพิ่มขึ้นของโอโซน ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์	-0.70	-1.56	-1.84	-2.23	-2.22
การเกิดฝุ่นขนาดเล็ก	-0.69	-1.17	-1.33	-1.55	-1.51
การเพิ่มขึ้นของโอโซนที่ส่งผล กระทบต่อระบบนิเวศบนบก	-1.02	-2.03	-2.36	-2.81	-2.80
ความเป็นกรดในดิน	-1.16	-1.92	-2.17	-2.50	-2.50
การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร ในแหล่งน้ำจืด	-18.72	-21.87	-22.93	-24.33	-23.99
การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร ในทะเล	-0.42	-0.39	-0.38	-0.36	-0.25
ความเป็นพิษ ต่อระบบนิเวศบนดิน	-205.65	-223.06	-228.86	-236.59	-235.83
ความเป็นพิษในแหล่งน้ำจืด	-4,015.15	-4,159.29	-4,207.34	-4,271.40	-4,173.24
ความเป็นพิษในทะเล	-6,311.54	-6,556.43	-6,638.06	-6,746.90	-6,589.71
ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิด โรคมะเร็งในมนุษย์	-935.11	-983.83	-1,000.07	-1,021.72	-1,021.11
ความเป็นพิษที่ไม่ก่อให้เกิด โรคมะเร็งในมนุษย์	-622.89	-654.74	-665.36	-679.52	-662.24
การลดลงของพื้นที่	-0.07	-0.08	-0.08	-0.09	-0.09
การลดลงของแหล่งแร่	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
การลดลงของแหล่งฟอสซิล	-4.40	-5.77	-6.23	-6.84	-6.54
การใช้น้ำ	-0.20	-0.65	-0.80	-1.00	-0.92
ค่าผลกระทบรวม	-12,115.72	-12,615.21	-12,781.71	-13,003.71	-12,729.23

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ. คู่มือการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ [ออนไลน์]. 2551.

แหล่งที่มา: <http://infofile.pcd.go.th/haz/handbookelect.pdf> [3 มีนาคม 2562].

กรมควบคุมมลพิษ. รายงานสถานการณ์ของเสียอันตรายจากชุมชน ปี พ.ศ. 2559 [ออนไลน์]. 2559.

แหล่งที่มา: http://infofile.pcd.go.th/haz/wsthazcom_annual59.pdf [3 มีนาคม 2562].

กรมควบคุมมลพิษ. รายงานสถานการณ์ของเสียอันตรายจากชุมชน ปี พ.ศ. 2560 [ออนไลน์]. 2560.

แหล่งที่มา: http://infofile.pcd.go.th/haz/wsthazcom_annual60.pdf [3 ตุลาคม 2562].

กรมควบคุมมลพิษ. มหันตภัยไดออกซิน (dioxins) [ออนไลน์]. 2561. แหล่งที่มา:

http://www.pcd.go.th/info_serv/haz_dioxin.html [28 กุมภาพันธ์ 2562].

กรมทรัพยากรธรณี. การเกิดแร่ทองคำ [ออนไลน์]. 2544. แหล่งที่มา:

http://www.dmr.go.th/download/poster/04_gold.pdf [9 มีนาคม 2562].

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. คู่มือการขออนุญาตนำสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกนอกบริเวณโรงงาน

ตามกฎหมายโรงงาน [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา: <http://www.diw.go.th/km/factory/pdf/คู่มือขออนุญาตนำกาก.pdf> [19 กุมภาพันธ์ 2562].

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2562. ปริมาณซากอิเล็กทรอนิกส์ที่รายงานตามเอกสารกำกับการขนส่งของเสียอันตราย.

กรมศุลกากร. คู่มือพิกัตอัตราศุลกากรและรหัสเฉพาะสำหรับของเสียอันตราย [ออนไลน์]. 2562.

แหล่งที่มา: http://itd.customs.go.th/igt/th/main_frame.jsp [8 กันยายน 2562].

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. เทคโนโลยีรีไซเคิลทองคำจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

[ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://www.dpim.go.th/purchase/article?catid=228&articleid=4819> [5 สิงหาคม 2562].

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. การบริหารจัดการอุตสาหกรรมเหมืองแร่และอุตสาหกรรม

พื้นฐานอย่างโปร่งใสและยั่งยืน [ออนไลน์]. 2558. แหล่งที่มา : <http://www.dpim.go.th/maincontent/viewdetail?catid=116&articleid=6580> [9 มีนาคม 2562].

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. การนำโลหะจากเศษซากอิเล็กทรอนิกส์กลับมาใช้ใหม่ [ออนไลน์]. 2562. แหล่งที่มา <http://www.dpim.go.th/recycling/article?catid=228&articleid=3498> [5 พฤษภาคม 2562].

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของ กฟผ. ปี 2562[ออนไลน์]. 2562. แหล่งที่มา: https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=2455&Itemid=116 [10 ธันวาคม 2562].

ฉวีวรรณ จันทร์เณร, ศรากร อักษรแก้ว. 2561. การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการผลิตโลหะเป้าหมายจากแร่ที่อยู่ภายใต้การกำกับดูแลของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่เพื่อเป็นแนวทางในการ Recycle โลหะจากของเสียที่มีศักยภาพ : กรณีศึกษาทองคำและสังกะสี. กรุงเทพมหานคร: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

ชณิภรณ์ เรืองฤทธิ์. 2559. การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น กรณีศึกษาถุงพลาสติกสำหรับอาหาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชมพูนุช พรหมภักดี. แนวทางการรับมือปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย (The Ways to Cope with Problem of Electronic Waste in Thailand) [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา : http://library.senate.go.th/document/Ext4246/4246717_0002.PDF [31 มกราคม 2562]

ชลอ มะลิก้า. กรรมการผู้จัดการ, บริษัท ไฮโดร แอนด์ ไฟโรเมท จำกัด. การชะละลายซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรดกัดทองในระดับอุตสาหกรรม. สัมภาษณ์. [19 กรกฎาคม 2562].

ณรงค์ศักดิ์ อังคะสุวพลา, สลิธร เทพตระการพร, ปรียานุช บุรณะภักดี และ เอิบบุญ สุทธิประภา. โรคพิษตะกั่ว [ออนไลน์]. 2562. แหล่งที่มา: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=22&chap=6&page=t22-6-infodetail02.html> [1 มีนาคม 2562]

ณิชา บุณณสิงห์. ขยะอิเล็กทรอนิกส์ [ออนไลน์]. 2559. แหล่งที่มา: <http://library2.parliament.go.th/ebook/content-ebbas/2559-nicha.pdf> [19 กุมภาพันธ์ 2562].

ไทยรัฐออนไลน์. ทหารหลายโรงงานขอขายย่อยลอบใช้ไซยาไนด์สกัดทอง [ออนไลน์]. 2557. แหล่งที่มา: <https://www.thairath.co.th/content/443549> [20 กันยายน 2561].

ปราโมทย์ ภูพานทอง. 2545. การศึกษาผลของตัวแปรต่อการแยกทองจากสารละลายไซยาไนด์ด้วยไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: กองโลหะกรรม กรมทรัพยากรธรณี.

ปราโมทย์ ภูพานทอง. 2554. การทำทองให้บริสุทธิ์ด้วยกรดกัดทองและสารประกอบซิลไฟด์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

ปรีชา จารุวาระกุล. 2550. ไซยาไนด์กับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ. 20 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

เปรมฤดี กาญจนปิยะ และคณะ. E-waste การรีไซเคิลซากแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ [ออนไลน์]. 2554 <https://famsuantua.files.wordpress.com/2016/02/000429.pdf> [25 ธันวาคม 2561].

โพสต์ทูเดย์. จนท.ลุยตรวจโรงงานรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ผิดกฎหมาย-อันตราย ที่ฉะเชิงเทรา [ออนไลน์]. 2561. แหล่งที่มา: <https://www.posttoday.com/social/general/551996> [3 มีนาคม 2562].

วลัยพร मुखสุวรรณ. ฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี [ออนไลน์]. 2551. <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=12> [14 กันยายน 2562].

ศิริพร สูงปานเขา. การกำเนิดทองคำ [ออนไลน์]. 2559. แหล่งที่มา: http://www.dmr.go.th/download/article/article_20170505152119.pdf [21 กันยายน 2561].

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย. 2562. โครงการการวิจัยเพื่อศึกษาวิเคราะห์ผังการไหล และจัดทำระบบฐานข้อมูลการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และของเสียอันตรายชุมชนในประเทศไทย.

ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. ขยะอิเล็กทรอนิกส์...ชุมชนทรัพย์ของธุรกิจรีไซเคิลขยะ [ออนไลน์]. 2562.

<http://library.dip.go.th/multim6/edoc/2560/26220.pdf> [6 สิงหาคม 2562].

เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล. การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment of Product) [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: https://www.researchgate.net/profile/Sate_Sampattagul/publication/303793131_Life_Cycle_Assessment_of_Products_karprameinwadcakrchiwitk_hxngphlitphanth/links/5752ba5808ae17e65ec3924d/Life-Cycle-Assessment-of-Products-karprameinwadcakrchiwitk_hxngphlitphanth.pdf [19 กุมภาพันธ์ 2562].

สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. LCA Cycle Assessment: LCA (หลักการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์) [ออนไลน์]. 2546 แหล่งที่มา: <http://www.thaiecoproduct.com/index.php/knowledge/14-knowledge-lca.html> [3 มีนาคม 2562].

สมาคมค้าทองคำ. คุณสมบัติและประโยชน์ของทองคำ [ออนไลน์]. 2561. แหล่งที่มา: <https://www.goldtraders.or.th/PageView.aspx?page=5> [20 กันยายน 2561]

สายใจ วิทยาอนุมาส. การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย [ออนไลน์]. 2560. แหล่งที่มา: <https://tdri.or.th/wp-content/uploads/2018/04/wb133.pdf> [28 ธันวาคม 2561]

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. สภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรม เดือนมกราคม 2560 [ออนไลน์]. 2560. แหล่งที่มา: http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/summary_report/industryeconomicssituationreportjan2017.pdf [28 ธันวาคม 2561]

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. จำนวนครัวเรือนจำแนกตามภาคและจังหวัด พ.ศ. 2552-2561 [ออนไลน์]. 2562. แหล่งที่มา: <http://statbbi.nso.go.th/staticreport/page/sector/th/08.aspx> [6 สิงหาคม 2562]

สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ฐานข้อมูลวัฏจักรชีวิตของวัสดุพื้นฐานและพลังงานของประเทศ [ออนไลน์]. 2562. แหล่งที่มา: <http://www.thaicidatabase.net/index.php/history-life-cycle-assessment-lca> [19 กุมภาพันธ์ 2562]

ภาษาอังกฤษ

Advance circuit. PCB's and why they contain gold [Online]. 2018. Available from: <https://www.4pcb.com/blog/pcbs-and-why-they-contain-gold/> [2018, Aug 20].

Araujo, M. G., Magrini, A., Mahler, C. F., and Bilitewski, B. 2012. A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil. Waste Manage 32: 335-342.

Bizzo, W. A., Figueiredo, R. A., and Andrade, V. F. De. 2014. Characterization of Printed Circuit Boards for Metal and Energy Recovery after Milling and Mechanical Separation. Materials 7(6): 4555-4566.

Bogar, Z. O., Capraz O., and Gungor, A. 2019. An Overview of Methods used for Estimatinf E-waste Amount. Electronic Waste Management and Treatment Technology: 53-75.

Brug, et al., Recovery of gold from solution in aqua regia [online]. 1974. Available from: <http://www.freepatentsonline.com/3856507.html> [2019, June 5].

Brunner, P. H., and Rechberger, H. 2005. Practical Handbook of material flow analysis. 2nd edition. Washington, D.C.: CRC Press.

Chancerel, P. 2010. Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment (an assessment of the recovery of gold and palladium). Doctoral dissertation, Berlin Institute of Technology.

Chancerel, P., Meskers, C. E. M., Hageluken, C., and Rotter, V. S. 2009. Assessment of precious metal flow during preprocessing of waste electrical and electronic equipment. Journal of Industrial Ecology 13(5): 791-810.

Charles, R. G., Douglas, P., Hallin, I. L., Matthews, I., and Liversage, G. 2017. An investigation of trends in precious metal and copper content of RAM modules in

- WEEE: Implications for long term recycling potential Waste Management 60: 505-520.
- Chauhan, G., Jadhao, P. R., Pant, K. K., and Nigam, K. D. P. 2018. Novel technologies and conventional processes for recovery of metals from waste electrical and electronic equipment: Challenges & opportunities - A review. Journal of Environmental Chemical Engineering 6: 1288-1304.
- Chen, M., and Ma, L. Q. 2001. Comparison of Three Aqua Regia Digestion Methods for Twenty Florida Soils. Soil Science Society of America journal 65: 491-499.
- Dehchenari, M. A., Hosseinpoor, S., Aali, R., Iran, N. S., and Mehdipour, M. 2017. simple method for extracting gold from WEEE using hydrometallurgy process. Environment Health engineering and Management Journal 4(1): 55-58.
- Eriksson, O., and Finnveden, G. 2009. Plastic waste as fuel – CO₂ – neutral or not?. Energy & Environment Science 2: 907-914.
- Eygen, E. V., Meester, S. D., Tran, H. P., and Dewulf, J. 2016. Resource savings by urban mining: The case of desktop and laptop computers in Belgium. Resource, Conservation and Recycling 107: 53-64.
- Gorauskiene, I., and Stasiskiene, Z. Employment of material flow analysis in optimization of e-waste management systems. 10TH Linnaeus ECO-TECH, pp. 504-516. Kalmar, Sweden. November 22-24, 2010.
- Hong, J., Shi, W., Wang, Y., Chen, W., and Li, X. 2015. Life cycle assessment of electronic waste treatment. Waste Management 38: 357-365.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., Hollander, A., Zijp, M., and Zelm, R. V. Recipe 2016 V1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level [Online]. 2016. Available from: <https://www.rivm.nl/sites/default/files/2018->

11/Report%20ReCiPe_Update_20171002_0.pdf [2018, February 28]

Ikhlayel, M. 2016. Differences of methods to estimate generation of waste electrical and electronic equipment for developing countries: Jordan as a case study. Resources, Conservation and Recycling 108: 134-139.

International organization for standardization. ISO 14040:1997 [online]. 1997. Available from: <https://web.stanford.edu/class/cee214/Readings/ISOLCA.pdf> [3 March 2018]

Jain, A., and Sareen, R. 2006. E-waste assessment methodology and validation in India. Journal of Material Cycles and Waste Management 8: 40- 45.

Laner, D., Feketitsch, J., Rechberger, H., and Fellner, J. 2015. A Novel Approach to Characterize Data Uncertainty in Material Flow Analysis and its Application to Plastics Flows in Austria. Journal of Industrial Ecology 20: 1050-1063.

Lau, K. Y. W., Chung, S. S., and Zhang, C. 2013. A material flow analysis on current electrical and electronic waste disposal from Hong Kong households. Waste Management 33: 714-721.

McClelland, G. E., Wroblewski, M. D., and Eisele, J. A. 1985. Production of High- Purity Gold from Zinc Precipitates and Steel Wool Cathodes by hydrometallurgical Refining: Information circular. United stated Department of the interior, bureau of mines; 9002.

Mecucci, A., and Scott, K. 2002. Leaching and electrochemical recovery of copper lead and tin scrap printed circuit boards. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 77: 449-457.

Petter, P. M. H., Veit, H. M., and Bernardes, A. M. 2014. Evaluation of gold and silver leaching from printed circuit board of cellphones. Waste Management 34: 475-

482.

- Razi, M. H. A. R. 2016. Resourceful recycling process of waste desktop computers: A review study. Resource, Conservation and Recycling 110: 30-47.
- REWR. eScrap Refiner's Gold Mining Guide [Online]. 2012. Available from: http://refinementofpreciousmetals.com/Rev_0.7.1.pdf [2019, May 7]
- Rubin, R. S., Casto, M. A. S. De., Brandao, D., Schalch, V., and Ometto, A. R. 2014. Utilization of Life Cycle Assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap. Journal of Cleaner Production 64: 297-305.
- S&P Dow Jones Indices. Environmental Net Benefit of Gold Recycling [online]. 2017. Available from: <https://i.dell.com/sites/doccontent/corporate/corp-comm/en/Documents/gold-environment-benefits.pdf?newtab=true> [10 December 2019]
- Sahan, Y., and Drastinawati. 2016. Gold Separation of Handphone Circuit Board Scraps (PCBs) by Leaching Process. International Journal of Environment Research & Clean Energy, 3.
- Sheng, P. P., and Etsell, T. H. 2007. Recovery of gold from computer circuit board scrap using aqua regia. Waste Management and Research 25: 380-383.
- Steubing, B., Boni, H., Schlupe, M., Silva, U., and Ludwig, C. 2010. Assessment computer waste generation in Chile using material flow analysis. Waste Management 30: 473-482.
- Stranddorf, H. K., Hoffmann, L., Schmidt, A., and FORCE technology. Impact categories, normalization and weighting in LCA [Online]. 2005. Available from: <https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2005/87-7614-574-3/pdf/87-7614-575-1.pdf> [2019, may 17]

- Szalatkiewicz, J. 2014. Metals Content in Printed Circuit Board Waste. Polish Journal of Environmental Studies 23(6): 2365-2369.
- Uhlig, H. H. 1948. Corrosion Handbook. Toronto, Canada.: John Wiley and Sons Inc.
- Wangthanachoti, N. Marketing Manager, Nique Inter Corporation Ltd. Interview [2019, 26 October 2019].
- Xiao, K., Yi, P., Yan, L., Bai, Z., Dong, C., Dong, P., and Gao, X. 2017. Corrosion behavior of silver-plated circuit boards in a simulated marine environment with industrial pollution. Materials, 10.
- Zhang, Y., Liu, s., Xie, H., Zeng, X., and Li, J. 2012. Current status on leaching precious metals from waste printed circuit boards. Procedia Environmental Sciences 16: 560-568.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาววิรัชฎา พงษ์หิรัญ
วัน เดือน ปี เกิด	1 มีนาคม 2538
สถานที่เกิด	ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2559 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2560 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	85/11 ซอยเลิศฤทธิ์ 1 ถนนคชาธร ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี
ผลงานตีพิมพ์	Waristha Ponghiran, Sutha Khaodhiar, Siriporn Borrirukwisitsak, and Ampira Charoensaeng. 2019. The Use of Aqua Regia for Gold Recovery from RAM in Discarded Printed Circuit Boards. The 15th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology, Alpensia Resort Convention Center, Pyeongchang, Gangwon-do, KOREA, October 13-17, 2019, 279-283.