การศึกษาและการออกแบบการผลิตเชิงพาณิชย์ของกระบวนการดูดซับแยกโลหะทองแดงจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการใช้ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

โดย

นางสาวญาชนาภา ญาณชวกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาและการออกแบบการผลิตเชิงพาณิชย์ของกระบวนการดูดซับแยกโลหะทองแดงจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการใช้ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

โดย

นางสาวญาชนาภา ญาณชวกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

STUDY AND DESIGN OF COMMERCIAL PRODUCTION OF COPPER RECOVERY PROCESS FROM ELECTRONICS INDUSTRY WASTEWATER USING TANNIN ADSORBENT

By

Yachanapha Yanachawakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

Master of Engineering Program in Engineering Management

Department of Industrial Engineering and Management

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2016

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาและการออกแบบการผลิตเชิงพาณิชย์ของกระบวนการดูดซับแยกโลหะทองแดงจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการใช้ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน” เสนอโดย นางสาวญาชนา ภา ญาณชวกุล เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองแท่ง ทองลิ่ม)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์)

...../...../.....

5740202 : สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม
คำสำคัญ : การแยะโลหะทองแดง / แทนนิน / การดูดซับ / การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

ญาชนาภา ญาณชวกุล : การศึกษาและการออกแบบการผลิตเชิงพาณิชย์ของกระบวนการดูดซับแยกโลหะทองแดงจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการใช้ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน. อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์. 122 หน้า.

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาและออกแบบการผลิตเชิงพาณิชย์ของกระบวนการดูดซับแยกโลหะทองแดงจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการใช้ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน โดยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินเป็นกุญแจสำคัญสำหรับระบบการแยกโลหะทองแดงกลับคืนจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จึงจำเป็นต้องทราบสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการดูดซับ จากวิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 พบว่าที่สารละลายทองแดง 25 มิลลิลิตร การทดลองทั้งหมด 24 การทดลองมีค่าร้อยละการแยกทองแดงมากกว่า 99 โดยที่ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลาย 5 อุณหภูมิของสารละลาย 30 องศาเซลเซียสและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน 0.6 กรัม คือค่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับทองแดงในสารละลาย

การขยายขนาดการแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับนำร่อง (Pilot scale) ในห้องปฏิบัติการและจากการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม DWSIM Version 4.0 พบว่าร้อยละความสามารถในการดูดซับแยกโลหะทองแดงออกจากสารละลาย 99.60 นอกจากตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินจะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมแล้ว ระบบการแยกโลหะทองแดงกลับคืนจากน้ำทิ้งด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินยังสามารถสร้างโอกาสในการรับผลประโยชน์จากการขายโลหะทองแดง จากการคำนวณทางเศรษฐศาสตวิศวกรรมพบว่าจุดคุ้มทุนของระบบการแยกโลหะทองแดงจากน้ำทิ้งน้อยกว่า 4 ปี และภายใน 5 ปี บริษัทจะมีกำไรสะสมมากกว่า 75 ล้านบาท

เพื่อให้เห็นภาพเกี่ยวกับการการลงทุนในระบบนี้ ถ้าองค์กรต้องบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปนเพื่อให้ถูกต้องตามกฎหมายโดยว่าจ้างบริษัทอื่นเข้ามารับกำจัด (Third party) ผลรวมค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปีประมาณ 66.22 ล้านบาท ในทางตรงกันข้าม ถ้าองค์กรดำเนินระบบการแยกโลหะทองแดงในน้ำทิ้งด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน องค์กรจะได้รับผลประโยชน์ (Cost benefit) ในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยที่ประมาณ 165 บาทต่อกิโลกรัม ระยะเวลาเฉลี่ย 8 ปี ผลประโยชน์ปีละประมาณ 36 ล้านบาท จำนวนเงินผลประโยชน์นี้รวมถึงค่าใช้จ่ายต่าง ๆ และการคืนทุนจากการลงทุนเริ่มต้น ถ้ามองถึงในระดับที่ยั่งยืน (Sustainable level) ผลประโยชน์ที่องค์กรจะได้รับปีละประมาณ 66.91 ล้านบาท จากการคำนวณผลประโยชน์เฉลี่ยใน 8 ปีแรก องค์กรจะมีแนวโน้มได้รับผลประโยชน์ที่เพิ่มขึ้นถึง 248% เมื่อเปรียบเทียบกับการที่องค์กรต้องเสียค่าใช้จ่ายให้กับบริษัทที่เข้ามาจัดการบำบัดน้ำเสีย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ลายมือชื่อนักศึกษา..... ปีการศึกษา 2559
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....

52404202 : MAJOR : ENGINEERING MANAGEMENT
KEY WORDS : COPPER RECOVERY / TANNIN / ADSORPTION / 2^3 FACTORIAL DESIGN
YACHANAPHA YANACHAWAKUL : STUDY AND DESIGN OF COMMERCIAL PRODUCTION OF COPPER RECOVERY PROCESS FROM ELECTRONICS INDUSTRY WASTEWATER USING TANNIN ADSORBENT. THESIS ADVISORS : ASST.PROF. CHOOSAK PORNSING, PhD. 122 pp.

This thesis aims to study and design of commercial production of copper recovery process from electronics industry wastewater using tannin adsorbent that synthesized from White Popinac leaves. The tannin adsorbent is a key element in streamlining the wastewater recovery operations overheaded by finding the leanest, efficient, and optimal condition for copper adsorption in order to improve the cash flow of an organization. Investigation of the use of tannin adsorbent synthesized from White Popinac leaves for the recovery of copper [Cu(II)] from aqueous solutions was studied. The effect of initial solution pH, adsorption temperature and adsorbent dosage was investigated by using 2^3 factorial design method to find the optimum adsorption condition in lab scale by conducting three replicate each. The results obtained from the Inductivity Couple Plasma (ICP) spectrometer reflect that all 24 conditions had copper adsorption capacity of more than 99%. The copper solution 25 mL which initial 50 ppm at pH 5, tannin absorbent 0.6 grams and temperature 30^{o}C enhanced the optimum efficiency of adsorption process in lab scale.

Scaled-up results from laboratory and simulation from DWSIM Version 4.0 showed 99.60% of copper adsorption capacity. This copper recovery method by using tannin adsorbent sysnthesized from White Popinac leaves is environmentally friendly and creates a huge marketing opportunity for the organization to step into the next level of growth. Engineering economic analysis showed that the break even point of the investment is less than 4 years, additionally the company would have the accumulate profit of 75 million Baht at least within 5 years of operation.

For the perspective of the investment on this system, if the wastewater generated from a given facility is being sold by the company to a third party for disposal legally. The average annual spending is about 66.22 Million Baht. On the other hand, if the company implements copper recovery system by using tannin adsorbent, the average 8 years benefit is at 36 million Baht per year. This benefit includs the various overheads and payback interest on initial investment. If we are looking at a sustainable level, the annual benefit is about 66.91 million baht. By using the first 8 year average benefits, the return on investment is up to 248% when compare to the company who dispose its wastewater by a third party agent

---

Department of Industrial Engineering and Management Graduate School, Silpakorn University
Student's signature ..... Academic Year 2016
Thesis Advisor's signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือและอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองแท่ง ทองลิ่ม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ เสนอแนะและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องตลอดมา ตั้งแต่ต้นจนเสร็จเรียบร้อย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรยุทธ เลิศบำรุงสุข และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประกร รามกุล สำหรับความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ เครื่องมือวิจัย อุปกรณ์และสารเคมี

ขอขอบพระคุณ Mr. Kirubhananthan Subramoneyam ฝ่ายบริหารกลยุทธ์โซ่อุปทาน (Strategic Supply Chain Management) บริษัทฟาบริเนท จำกัด สำหรับคำแนะนำที่มีคุณค่า

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่เจียระไน จรรยงพันธ์ สำหรับความช่วยเหลือสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย 1

กรอบแนวความคิด 5

จุดประสงค์ของการวิจัย 5

สมมุติฐาน 5

ขอบเขตของการวิจัย 6

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 6

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7

เทคโนโลยีในการดูดซับโลหะ 7

ทองแดง 9

การแยกโลหะทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม 12

กระถิน 15

การดูดซับทองแดงด้วยแทนนินในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) 16

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) 23

การขยายขนาดจากระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) สู่ระดับอุตสาหกรรม (Factory scale) 32

การศึกษาความเป็นไปได้ (Feasibility) 37

วิศวกรรมต้นทุน และเศรษฐศาตร์วิศวกรรม 43

3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 55

การสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน 55

การแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 56

บทที่ หน้า

3 วิธีการดำเนินงานวิจัย (ต่อ)

การการขยายขนาดการแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับนำร่อง (Pilot scale) 58

การคำนวณข้อมูลตัวแปรต่างๆของระบบการแยกทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีทางวิศวกรรมต้นทุนและเศรษฐศาตร์วิศวกรรม 60

4 ผลการดำเนินงานวิจัยและการอภิปรายผล 63

การสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน 63

การแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 66

การขยายขนาดการแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับนำร่อง (Pilot scale) 72

การคำนวณข้อมูลตัวแปรต่างๆของระบบการแยกทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีทางวิศวกรรมต้นทุนและเศรษฐศาตร์…….. 81

5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 103

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย 103

ข้อเสนอแนะ 105

รายการอ้างอิง 106

ภาคผนวก 110

ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ 112

ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง 114

ภาคผนวก ค ขั้นตอนการดำเนินงาน 117

ภาคผนวก ง การพัฒนาตนเอง 119

ประวัติผู้วิจัย 122

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์	2
1.2	ปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมการถลุงทองแดงในประเทศจีน	2
2.1	ตารางแสดงคุณสมบัติของทองแดง	10
2.2	ปัจจัยและค่าที่ใช้ในการทดลอง	29
2.3	สภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3	29
2.4	วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการออกแบบการทดลอง	32
4.1	เปรียบเทียบค่าสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงจากผลการทดลองและจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์ที่การขยายขนาด 10 เท่า	73
4.2	เปรียบเทียบค่าสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงจากผลการทดลองและจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์ที่การขยายขนาด 20 เท่า	75
4.3	ต้นทุนราคาวัตถุดิบ สารเคมีและปริมาณการใช้	82
4.4	ต้นทุนของระบบการสังเคราะหัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน ต้นทุนของระบบการดูดซับ ต้นทุนของระบบการแยกโลหะทองแดงออกจากตัวดูดซับและต้นทุนในส่วนของค่าติดตั้ง	87
4.5	ต้นทุนในส่วนของพลังงาน	88
4.6	ต้นทุนในส่วนของพนักงาน	90
4.7	ราคาขายทองแดงต่ำสุด สูงสุดและเฉลี่ย (ดอลล่าร์สหรัฐอเมริกาต่อตัน) ในรอบ 1 ปี ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2558 - สิงหาคม พ.ศ. 2559	91
4.8	ราคาขายทองแดงต่ำสุด สูงสุดและเฉลี่ย (บาทต่อกิโลกรัม) ในรอบ 1 ปี ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2558 – สิงหาคม พ.ศ. 2559	92
4.9	การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 1-4 ในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าต่ำสุด	93
4.10	การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 5-8 ในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าต่ำสุด	94
4.11	การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 1-4 ในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ย	95

ตารางที่ หน้า

4.12 การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 5-8 ในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ย..... 95

4.13 การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 1-4 ในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่สูงสุด 97

4.14 การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 5-8 ในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่สูงสุด 97

4.15 เปรียบเทียบจุดคุ้มทุน กำไรสะสมและ %ROI ปีที่ 5 ของราคาขายทองแดงทั้ง 3 กรณี 98

4.16 การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 1-4 ในกรณีประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง 75% ของความสามารถในกระบวนการแยกโลหะทองแดง 100

4.17 การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 5-8 ในกรณีประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง 75% ของความสามารถในกระบวนการแยกโลหะทองแดง 101

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	การพยากรณ์ปริมาณการใช้ทองแดงทั่วโลกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 – 2593	1
1.2	ราคาของทองแดงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533 – 2565	3
2.1	กระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์	8
2.2	การไหลของกระบวนการแยกโลหะออกจากน้ำทิ้งด้วยวิธีการตกตะกอน	8
2.3	ราคาขายเฉลี่ยอย่างเป็นทางการของทองแดงในเดือนมกราคม พ.ศ.2559	12
2.4	กากตะกอนที่มีการปนเปื้อนโลหะทองแดง	13
2.5	ภาพรวมของการแยกโลหะทองแดงออกจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของบริษัท Fujitsu	14
2.6	โครงสร้างของแทนนินชนิดรวมตัวแน่น	16
2.7	โครงสร้างแทนนินชนิดสลายตัวได้	17
2.8	ประเภทของวิธีการขยายขนาด	34
2.9	เส้นต้นทุนรวม ต้นทุนผันแปร และต้นทุนคงที่	46
2.10	เส้นต้นทุนการผลิตระยะสั้นประเภทต่างๆ	47
2.11	เส้นต้นทุนเฉลี่ยระยะยาว	48
2.12	เส้นต้นทุนเฉลี่ยระยะยาว	48
2.13	เส้นกำไรรวมสูงสุด	51
2.14	จุดคุ้มทุน	53
4.1	ผลผลิตร้อยละของตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินในระดับห้องปฏิบัติการ (1 เท่า) และในระดับนำร่อง (10 และ 20 เท่า)	64
4.2	การกรองตะกอนแทนนิน	65
4.3	ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน	65
4.4	ร้อยละการแยกทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่ปัจจัยต่างๆ	67
4.5	ความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดง (กรัม) ด้วยตัวดูดซับแทนนินที่ปัจจัยต่างๆ	68
4.6	การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูล	69
4.7	ผลกระทบของแต่ละปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน	69
4.8	ผลจากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab 17	70

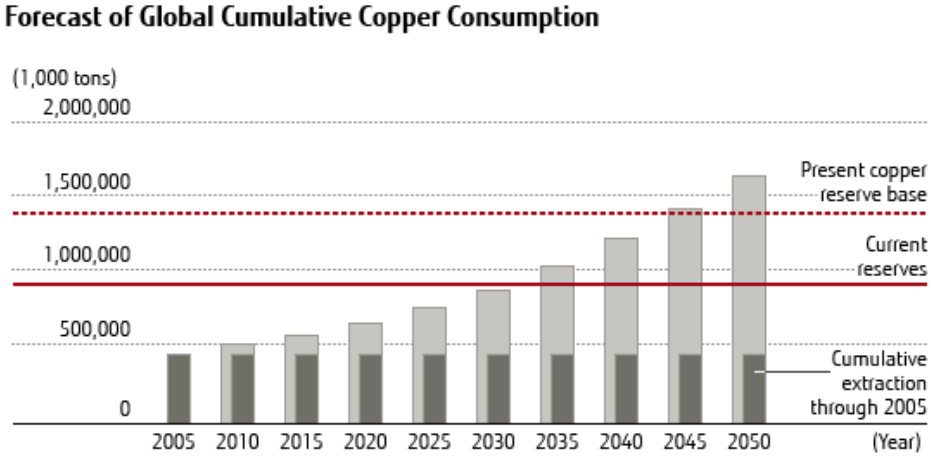
รูปที่ หน้า

4.9 ระดับปัจจัยที่เหมาะสม 71
4.10 ร้อยละการแยกทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่ระดับการขยายขนาด 10 เท่า..... 73
4.11 ร้อยละการแยกทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่ระดับการขยายขนาด 20 เท่า..... 74
4.12 เปรียบเทียบร้อยละการแยกทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่ระดับห้องปฏิบัติการ ระดับการขยายขนาด 10 เท่าและระดับการขยายขนาด 20 เท่า 76
4.13 เปรียบเทียบปริมาณตัวดูดซับแทนนินในสารละลายทองแดงที่ระดับห้องปฏิบัติการระดับการขยายขนาดการทดลอง 10 1และ 20 เท่า..... 77
4.14 การไหลของกระบวนการดูดซับโลหะทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนิน 78
4.15 ค่าที่ป้อนในโปรแกรม DWSIM 79
4.16 ปริมาณโลหะทองแดงที่ถูกดูดซับ คำนวณโดยใช้โปรแกรม DWSIM 80
4.17 ระบบการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน 83
4.18 ระบบการกรองกากตะกอน 84
4.19 ระบบการดูดซับทองแดงในน้ำทิ้ง 85
4.20 เตาอบ 86
4.21 การทำงานของระบบและตำแหน่งที่มีการใช้พนักงานควบคุม 89
4.22 ราคาขายทองแดงเฉลี่ยในรอบ 1 ปี ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2558 - สิงหาคม พ.ศ. 2559 91
4.23 จุดคุ้มทุนในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าต่ำสุด..... 94
4.24 จุดคุ้มทุนในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ย 95
4.25 จุดคุ้มทุนในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าสูงสุด 98
4.26 จุดคุ้มทุนในกรณที่ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง 75% ของความสามารถในกระบวนการแยกโลหะทองแดง..... 101

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ทองแดงเป็นโลหะที่ใช้มากที่สุดโลหะหนึ่งในรูปของโลหะอิสระ ทำให้มีแนวโน้มปริมาณการใช้ทองแดงเพิ่มขึ้นทุกปี ดังรูปที่ 1.1 เป็นการพยากรณ์ปริมาณการใช้ทองแดงทั่วโลกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 – 2593 [1] เนื่องจากทองแดงมีสมบัติที่ดีเยี่ยมหลายประการ เช่น สมบัติการนำไฟฟ้าและความร้อนดี ทนต่อการผุกร่อน แข็งแรง สามารถดึงเป็นเส้นและตีเป็นแผ่นบางๆได้ จึงทำให้มีการใช้ทองแดงอย่างมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่นการทำเส้นลวดไฟฟ้า การทำแผงวงจรไฟฟ้า (IC) แผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) การผลิตเครื่องมือไฟฟ้าต่างๆ หรือแม้กระทั่งการใช้เพื่อเคลือบผิวของโลหะ



รูปที่ 1.1 การพยากรณ์ปริมาณการใช้ทองแดงทั่วโลกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 – 2593

ที่มา: Fujitsu Ltd. **Contributing to Resource Reuse by Recovering High Concentrations of Copper from Wastewater**. เข้าถึงเมื่อ 28 มกราคม 2559. เข้าถึงได้จาก http://www.fujitsu.com/global/about/environment/operation/activities/waste/casestudy/01/.

การใช้ทองแดงในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะในกระบวนการชุบทองแดงและกระบวนการสร้างผิวทองแดงที่ผนังของรูทำให้มีน้ำทิ้งเกิดขึ้นมากกว่า 45,000 ลิตรต่อวัน [2]

ซึ่งในน้ำทิ้งนี้มีสารละลายโลหะทองแดงเจือปนอยู่ นอกจากนี้อุตสาหกรรมการถลุงแร่ทองแดงก็มีสารละลายทองแดงเจือปนในน้ำทิ้งเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 1.1 และ 1.2 พบว่าพบมีโลหะทองแดงเข้มข้น 4.50 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [3] และอุตสาหกรรมถลุงทองแดงในประเทศจีน พบโลหะทองแดงเจือปนในน้ำทิ้ง 11.9 มิลลิกรัมต่อลิตร [3]

ตารางที่ 1.1 ปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (mg/L)
ทองแดง	4.5
สังกะสี	2.6
นิเกิล	2.6
แคดเมียม	1.2
ตะกั่ว	0.6

ที่มา: American Eletroplaters' Society. **Pollution Control for the Electronics Industry**. เข้าถึงเมื่อ 28 มกราคม 2559. เข้าถึงได้จาก http://infohouse.p2ric.org/ref/33/32737.pdf.

ตารางที่ 1.2 ปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมการถลุงทองแดงในประเทศจีน

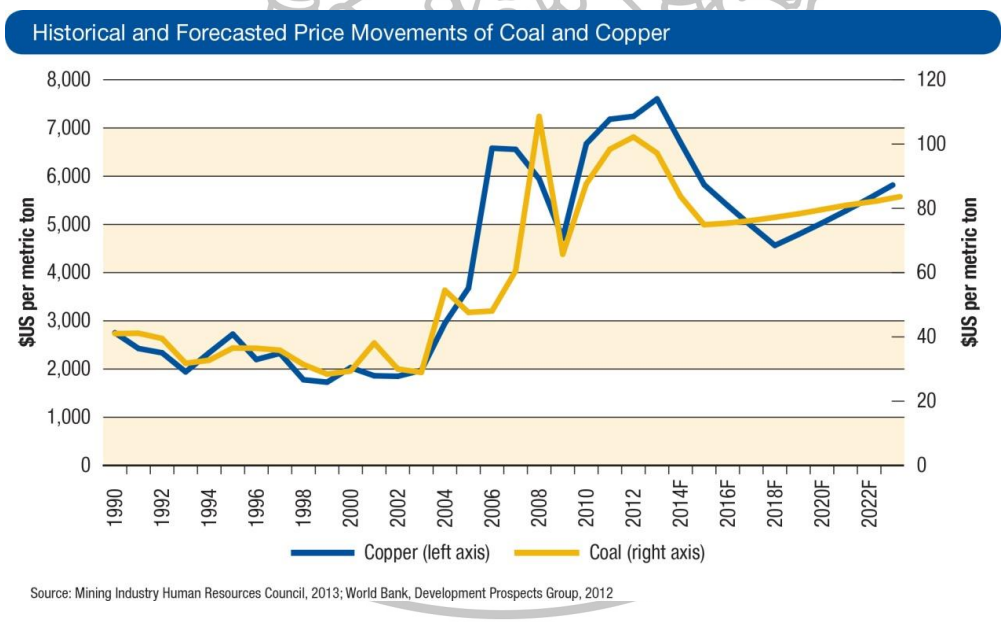
โลหะหนัก	ทองแดง	สังกะสี	ตะกั่ว	แคดเมียม
ความเข้มข้น (mg/L)	11.9	10.58	1.67	1.21

ที่มา: Chun-rong W. et al, "Adsorption of Zinc and Copper Heavy Metal Ions from Smelting Wastewater Using Modified Lava Particles." **Polish Journal of Environmental Studies** (2013): 1863-1869

ทองแดงเป็นโลหะที่ร่างกายมนุษย์ต้องการในปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น (trace element) จำเป็นสำหรับกระบวนการเผาผลาญอาหาร (metabolism) วัยผู้ใหญ่ต้องการทองแดงเพียง 2 mg/วัน แต่ถ้าร่างกายได้รับทองแดงในปริมาณที่สูงจะทำให้เกิดโทษและเป็นพิษ อาจเกิดอาการอาเจียน เหน็บชา และสำลัก หรือถ้าได้รับทองแดงมากเกินความจำเป็นก็อาจทำให้เสียชีวิตได้

ตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องทำให้ทางอุตสาหกรรมต้องบำบัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ค่าทองแดงต้องไม่เกิน 2.0 mg/L ทำให้อุตสาหกรรมต้องบำบัดน้ำทิ้งให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

ในขณะที่ราคาของทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี [4] ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ทำให้ผู้ที่เกี่ยวข้องทั้งจากฝ่ายนักวิจัย นักอุตสาหกรรม และนักสิ่งแวดล้อมมีความสนใจในการพัฒนานวัตกรรมและเทคโนโลยีในการแยกโลหะทองแดงจากน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม เพื่อลดความสูญเสีย เพิ่มโอกาสในการสร้างกำไร และเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 1.2 ราคาของทองแดงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533 – 2565

ที่มา: Mining Industry Human Resources Council. **Economic Overview and Trends**. เข้าถึงเมื่อ 28 มกราคม 2559. เข้าถึงได้จาก http://www.mininghrforecasts.ca/en/Economic-Overview-and-Trends.asp.

ในปัจจุบันมีวิธีการต่าง ๆ ในการแยกโลหะ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การแลกเปลี่ยนไอออน การแยกด้วยเมมเบรนและการดูดซับ [5] จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการแยกโลหะมีค่าที่อยู่ในสารละลาย เมื่อเปรียบเทียบวิธีการต่างๆพบว่า การดูดซับดูเหมือนจะเป็น

วิธีการที่เหมาะสมในการแยกโลหะมีค่าในกรณีที่มีความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและมีประสิทธิภาพ ซึ่งสารดูดซับโลหะทองแดงที่กำลังได้รับความสนใจศึกษาทั้งในแง่ประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในเชิงอุตสาหกรรม คือสารแทนนิน (Tannin)

สารแทนนิน (Tannin) คือสารประกอบจำพวกโพลีฟีนอล (Poly Phenol) ในธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง สามารถพบได้ในส่วนต่างๆของพืช เช่น เมล็ด ผล รากและเปลือก ซึ่งแทนนินมีความสามารถในการตะกอนไอออนโลหะได้หลายชนิด ตามวารสารวิชาการต่าง ๆ เช่น วารสารของ Ayhan I. Sengil และคณะ ในปีพ.ศ. 2552 และ วารสารของ Meral Yurtsever ในปีพ.ศ. 2552 โดยในช่วงหลายปีที่ผ่านมา งานวิจัยได้ให้ความสำคัญเกี่ยวกับสารชีวมวล (Biomass) มากขึ้น เนื่องจากต้นทุนต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีประสิทธิภาพสูง ส่งผลให้การใช้แทนนินเป็นตัวดูดซับ (Tannin adsorbent) จึงมีมากขึ้น [6]

ดังนั้นตัวดูดซับที่ทำจากแทนนินจึงเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสำหรับดูดซับไอออนของทองแดงออกจากสารละลาย [5] ซึ่งงานวิจัยที่ผ่าน ๆ มา เป็นเพียงการหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในระดับห้องปฏิบัติการเคมี เป็นการศึกษาปัจจัยเดียว ๆ เพื่อหาสภาวะสมดุล (Equilibriums) ทำให้ได้ปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในสภาวะนั้น ๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีการศึกษาการนำตัวดูดซับแทนนินไปใช้อย่างจริงจังในระดับอุตสาหกรรม และยังไม่มีการหาปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of experimental, DOE) ซึ่งเป็นการหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดโดยคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย ทำให้สามารถกำหนดค่าปัจจัยต้นแบบที่เหมาะสมของกระบวนการแยกทองแดงจากสารละลายหรือน้ำทิ้งอุตสาหกรรมในระดับเชิงพาณิชย์ เป็นการพัฒนาความเป็นไปได้ให้สามารถนำตัวดูดซับแทนนินไปใช้ในเชิงพาณิชย์ และเป็นการออกแบบกระบวนการต้นแบบที่มีกำลังการผลิตเชิงพาณิชย์

1.2 กรอบแนวความคิด

1.3 จุดประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 เพื่อกำหนดปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการแยกไอออนทองแดงในสารละลายด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

1.3.2 เพื่อออกแบบกระบวนการต้นแบบสำหรับแยกทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมในระดับเชิงพาณิชย์

1.4 สมมุติฐาน

ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินสามารถแยกโลหะทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม ตัวดูดซับนี้จะประหยัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อบำบัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งหน่วยปฏิบัติการ (unit operation) นี้ มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่ต่ำ และสามารถแยกโลหะหนักอย่างทองแดงออกจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมได้ ดังนั้นจึงมีจุดเหมาะสมที่ต่ำที่สุดที่คุ้มค่ากับการลงทุน

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 งานวิจัยนี้มีขอบเขตในการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน ซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น

1.5.2 งานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลาย โดยใช้สารละลายทองแดงมาตรฐานด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

1.5.3 งานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้โรงงานกรณีศึกษา เพื่อทำการออกแบบและวิเคราะห์กระบวนการดูดซับทองแดง โดยนำข้อมูลจากโรงงานกรณีศึกษามาเป็นข้อมูลในการออกแบบ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถแยกทองแดงจากสารละลาย โดยใช้แทนนินสังเคราะห์จากใบกระถิน

1.6.2 สามารถแยกทองแดงจากสารละลายโดยกระบวนการที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

1.6.3 สามารถกำจัดหรือเพิ่มมูลค่าให้กับของพืชที่ไม่มีราคา

1.6.4 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในเชิงพาณิชย์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

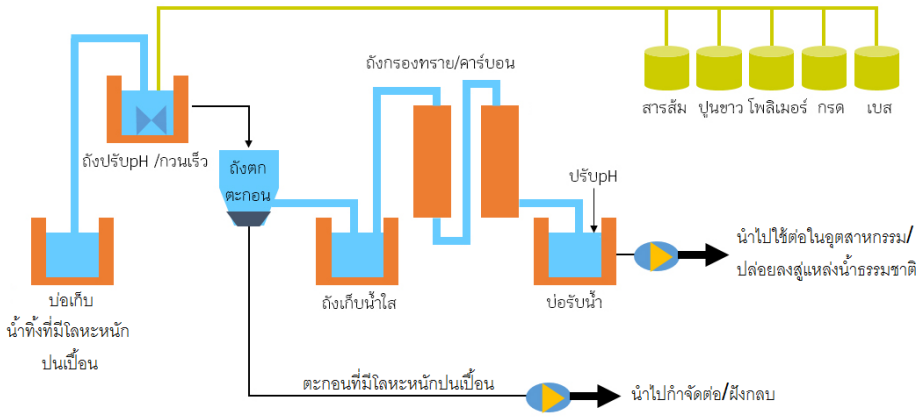
บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการแยกไอออนของทองแดงออกจากสารละลายน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมโดยใช้ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน และยังเป็นการออกแบบกระบวนการต้นแบบสำหรับแยกทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมในระดับเชิงพาณิชย์ เป็นการหาหนทางในการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อให้เกิดดุลยภาพ (Equilibrium) ระหว่างความต้องการกับการใช้ทรัพยากรเพื่อสนองความต้องการอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นจึงควรมีความรู้ความเข้าใจในหลักการและแนวคิดพื้นฐานในการศึกษา ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 9 ส่วนคือ เทคโนโลยีในการดูดซับโลหะ ทองแดง การแยกโลหะทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม กระถิน การดูดซับทองแดงด้วยแทนนินในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) การขยายขนาดจากระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) สู่ระดับอุตสาหกรรม (Factory scale) การศึกษาความเป็นไปได้ (Feasibility) วิศวกรรมต้นทุนและเศรษฐศาตร์วิศวกรรม

2.1 เทคโนโลยีในการดูดซับโลหะ

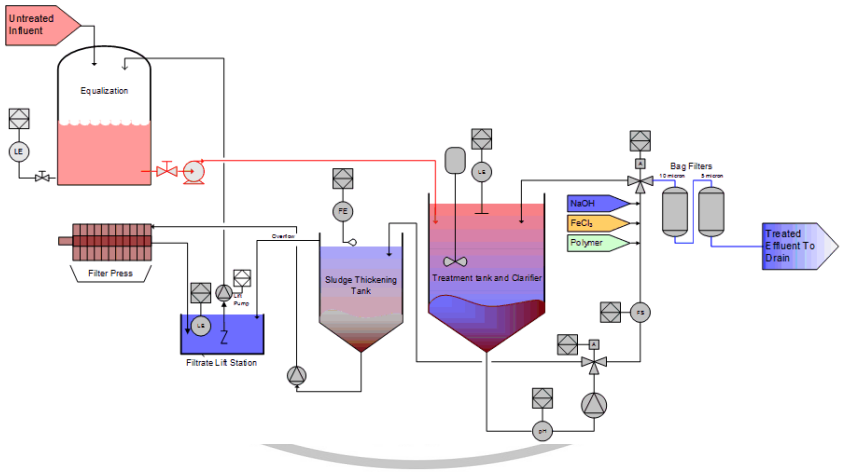
วิธีการแยกโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งมี 3 วิธี คือ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ ซึ่งกระบวนการแยกโลหะในน้ำทิ้งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น เทคโนโลยีของการบำบัดน้ำเสีย ความเข้มข้น ความเป็นกรด-ด่างของน้ำทิ้ง และกลไกการกำจัดโลหะ โดยเทคนิคที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือ วิธีทางเคมี เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange) และการตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมี (Chemical precipitation) [7]

ปัจจุบันในประเทศไทยมีการแยกโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีการทางเคมี [7] เริ่มจากการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำทิ้งและทำให้โลหะหนักตกตะกอน [8] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม. **อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (IC และ PCB)**. เข้าถึงเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก http://www2.diw.go.th/I_Standard/Web/pane_files/Industry 25.asp.



รูปที่ 2.2 การไหลของกระบวนการแยกโลหะออกจากน้ำทิ้งด้วยวิธีการตกตะกอน

ที่มา: Digital Analysis Corporation. Heavy Metal Removal from Industrial Wastewater. เข้าถึงเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก http://www.phadjustment.com/TArticles/Heavy_Metal_Reduction.html.

วิธีการดังกล่าวมีข้อเสียคือ ไม่สามารถแยกโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งได้อย่างสมบูรณ์ จำเป็นต้องมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (reagent) ซึ่งต้องใช้พลังงานมาก ทำให้เกิดงานวิจัยในการพัฒนากระบวนการดูดซับ (Absorption) โดยใช้ตัวดูดซับชีวมวล (Biomass absorbent) ที่เป็นวิธีทาง

กายภาพร่วมกับวิธีทางเคมีหรือที่เรียกว่าการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) ทำให้ไม่มีการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในสารละลายจึงไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จึงเป็นวิธีการแยกโลหะหนักที่ประหยัดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

กระบวนการดูดซับ หรือกระบวนการดูดติดที่ผิว หมายถึง กระบวนการแยกมวลสาร ซึ่งอาจอยู่ในรูปของโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่มีอยู่ในสารละลายให้เกาะอยู่บนผิวของของแข็ง ซึ่งจัดอยู่ในกระบวนการบำบัดทางกายภาพ-เคมี เพื่อทำให้สารละลายดังกล่าวมีความสะอาดมากขึ้นด้วยกลไกของกระบวนการดังกล่าว สารที่เกี่ยวข้องในกระบวนการดูดซับ ประกอบไปด้วยสาระสำคัญจำนวน 2 ชนิด คือ สารถูกดูดซับ (Adsorbate) และสารที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ ซึ่งเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) [6]

กลไกของกระบวนการดูดซับ แบ่งออกได้ 2 แบบ คือ กระบวนการดูดซับทางกายภาพ และกระบวนการดูดซับทางเคมี [6]

กระบวนการดูดซับทางกายภาพ เมื่อประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับหมดสภาพไปแล้ว ต้องทำการฟื้นฟูสภาพใหม่ (Regeneration) เพื่อให้วัสดุดูดซับมีความสามารถในการดูดซับได้ดีเช่นเดิม ซึ่งมักใช้ความร้อนสูงในการฟื้นฟู

กระบวนการดูดซับทางเคมี เมื่อประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับหมดสภาพไปแล้ว ไม่สามารถทำการฟื้นฟูสภาพใหม่ (Regeneration) เหมือนกับกระบวนการดูดซับแบบแรก

การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) ด้วยตัวดูดซับชีวมวล (Biomass absorbent) เริ่มจากการเลือกสารชีวภาพ (Biomass raw material) ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะไปผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะ โดยมีการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะที่หมู่เคมีต่างๆของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากใบกระถินจึงเป็นทางเลือกสำหรับการแยกโลหะทองแดงออกจากสารละลายน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

2.2 ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่มนุษย์รู้จักและนำมาใช้งานเป็นเวลานานมากที่สุดประเภทหนึ่ง ทองแดงมีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cu ซึ่งมาจากภาษาลาตินว่า Cuprum ที่หมายถึงชื่อเกาะไซปรัส (Cyprus) อันเป็นแหล่งแร่ทองแดงขนาดใหญ่ที่มีการค้นพบและนำโลหะทองแดงมาใช้ประโยชน์เมื่อหลายพันปีก่อน แร่ทองแดงสามารถพบในสภาพบริสุทธิ์โดยธรรมชาติ คือพบในสภาพที่เป็นโลหะ (Metallic state) หรือในสภาพทองแดงธรรมชาติ (Native copper) ทำให้รวบรวมและนำมาหลอมเป็นโลหะ

สำหรับใช้งานได้ง่าย แต่ถือเป็นธาตุที่พบปริมาณไม่มากบนผิวโลก (ประมาณ 0.0001% ของธาตุบนพื้นผิวโลกทั้งหมด) และถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแร่อะลูมิเนียมและเหล็กที่มีปริมาณ 8.07% และ 5.06% ของธาตุทั้งหมด ตามลำดับ [9] โดยคุณสมบัติทั่วไปของทองแดงสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 [10]

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของทองแดง

คุณสมบัติทั่วไป	
ชื่อ, สัญลักษณ์, เลขอะตอม	ทองแดง, Cu, 29
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
ลักษณะ	copper, metallic
มวลอะตอม	63.546 กรัม/โมล
คุณสมบัติทางกายภาพ	
สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่น	8.96 g/cm^3
จุดหลอมเหลว	1084.62 °C
จุดเดือด	2562 °C
ความร้อนของการหลอมเหลว	13.26 KJ/mol
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	300.40 KJ/mol

ที่มา: วิกิพีเดียสารสารานุกรมเสรี. **ทองแดง**. เข้าถึงเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก https://th.wikipedia.org/wiki//%E0%B8%97%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%94%E0%B8%87.

2.2.1 การใช้ประโยชน์ของโลหะทองแดง

โลหะทองแดงมีคุณสมบัติเด่นมากมายโดยเฉพาะการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่สูง มีความต้านทานการกัดกร่อน สามารถแปรรูปด้วยวิธีต่าง ๆ ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีความแข็งแกร่งและมีความต้านทานความล้าสูง ดังนั้นโลหะทองแดงจึงมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ดังนี้ [11]

2.2.1.1 เนื่องจากทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีการใช้งานส่วนใหญ่จึงเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ใช้ทำสายไฟ เคเบิล มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไดนาโม พัดลม ระบบควบคุมในโรงงาน อุปกรณ์ไฟฟ้า ระบบจ่ายกำลัง เครื่องปรับอากาศ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ

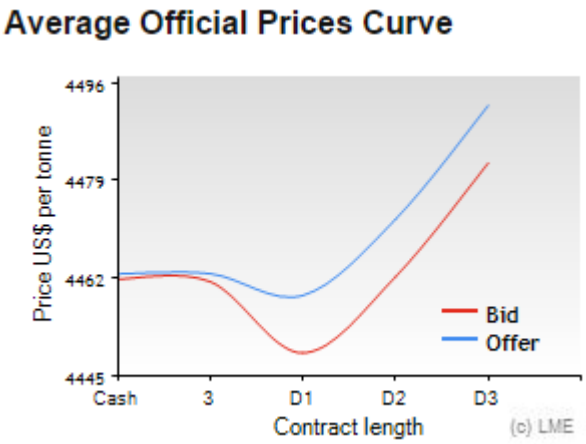
2.2.1.2 ด้วยคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนทองแดงจึงนำมาใช้ในการก่อสร้างหลายอย่าง เช่น ทำหลังคา ท่อน้ำและข้อต่อต่าง ๆ ระบบให้ความร้อน และระบบปรับอากาศ

2.2.1.3 ใช้ทำเครื่องจักรกล เครื่องใช้ในบ้าน เนื่องจากขึ้นรูปง่าย และเนื่องจากมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนของน้ำทะเลและมีการถ่ายเทความร้อนสูง จึงใช้ทำท่อ วาล์ว ข้อต่อในโรงกลั่นน้ำจากน้ำทะเล อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และเครื่องมือกลอื่น ๆ

2.2.1.4 ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ และชิ้นส่วนเครื่องบิน เรือเดินสมุทร หัวจักรรถไฟ อุปกรณ์สวิตซ์ และสัญญาณต่าง ๆ

2.2.1.5 การใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ ของทองแดง เช่น ใช้ผลิตยุทธภัณฑ์ ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี เครื่องวัดต่างๆ เครื่องประดับ เครื่องตกแต่ง เหรียญกษาปณ์ บรรจุภัณฑ์ และใช้ผลิตโลหะผสม เช่น ทองเหลือง และทองสัมฤทธิ์ เป็นต้น

เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะที่มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ทำให้ทองแดงเป็นโลหะที่มีราคาในการซื้อและการขาย ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นกราฟแสดงราคาขายเฉลี่ยอย่างเป็นทางการของทองแดงในเดือนมกราคม พ.ศ.2559 [12]



รูปที่ 2.3 ราคาขายเฉลี่ยอย่างเป็นทางการของทองแดงในเดือนมกราคม พ.ศ.2559
ที่มา: The London Metal Exchange. **LME Copper**. เข้าถึงเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก http://www.lme.com/metals/non-ferrous/copper/#tab3.

จากรูปที่ 2.3 กราฟแกน X คือระยะเวลาสัญญาที่มีการชำระหนี้ของการซื้อขายทองแดง ส่วนแกน Y คือราคาทองแดง (ดอลล่าร์สหรัฐอเมริกาต่อตัน) กราฟเส้นสีแดง คือราคาเสนอซื้อ (Bidding) เป็นราคาที่ทางบริษัทผู้ขายตั้งราคาเพื่อจะขาย และกราฟเส้นสีน้ำเงิน คือราคาเสนอขาย (Offer) เป็นราคาที่ทางผู้ซื้อเสนอราคาเพื่อที่จะซื้อ โดยจากกราฟนี้ ไม่ว่าผู้ซื้อทองแดงจะจ่ายเงินสดทันที หรือจ่ายที่หลังตามระยะเวลาของสัญญาให้แก่บริษัทผู้ขาย พบว่าทองแดงเป็นโลหะที่มีราคาที่สามารถนำไปสู่การเพิ่มอัตรากำไรขั้นต้นจากมุมมองของค่าใช้จ่าย ด้วยเหตุนี้ถ้าอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์สามารถแยกโลหะทองแดงกลับออกมาจากน้ำทิ้งและขายสู่ตลาด ก็เท่ากับเป็นการสร้างกำไรให้กับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อีกทางหนึ่ง

2.3 การแยกโลหะทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม

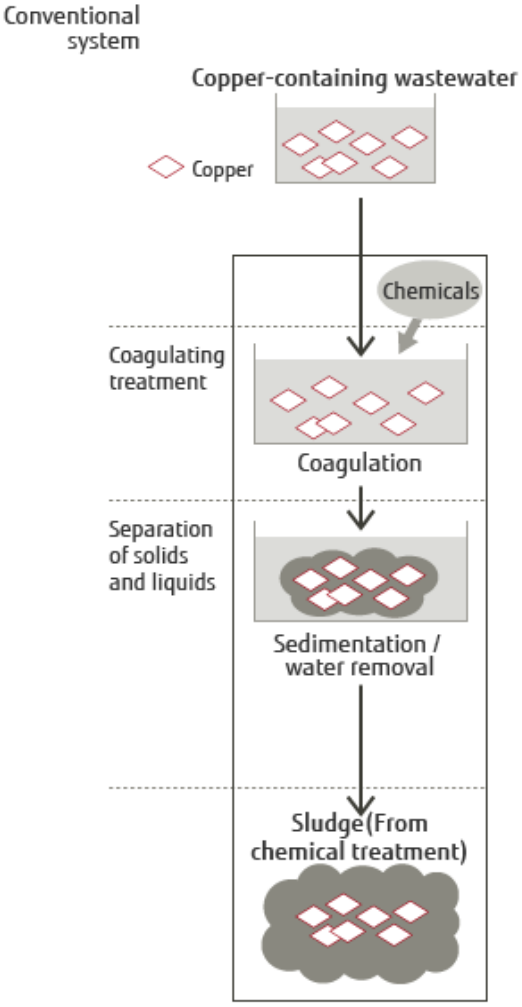
ในปัจจุบันมีวิธีต่างๆที่ใช้แยกโลหะทองแดงออกจากสารละลายน้ำทิ้ง เช่น กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange) และวิธีรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) แต่วิธีที่ได้รับความนิยมคือวิธีการตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) ด้วยสังกะสีหรือเหล็ก หรือการใช้วิธีเติม Reducing agent เช่น โซเดียมโบโรไฮไดรด์ทำให้เกิดตะกอนของทองแดง ทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เกิดขึ้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการจะอยู่ในรูปของตะกอนของแข็ง (Sludge) ที่เป็นของเสียดัง

แสดงในรูปที่ 2.4 โดยของเสียดังกล่าวมักมีสถานะเป็นของเหลวและกากตะกอนที่มีการปนเปื้อนโลหะทองแดง [1] ซึ่งต้องได้รับการกำจัดต่อไปอย่างถูกวิธี

จากวิธีการแยกโลหะทองแดงจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ตะกอนโลหะทองแดงยังมีความบริสุทธิ์ไม่เพียงพอ จึงไม่สามารถหลอมเป็นแท่งโลหะทองแดงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ทางอุตสาหกรรมต้องส่งกากตะกอนนี้ไปสู่บริษัทที่รับกำจัดของเสียต่อไป ซึ่งบริษัทที่รับไปกำจัดต่ออาจต้องใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีด้วยวิธี Electrorefining หรืออาจใช้การสกัดโดยกระบวนการสารละลายเคมีอีกครั้ง [13] เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของโลหะทองแดงที่ต้องการจากตะกอนดังกล่าว

รูปที่ 2.4 กากตะกอนที่มีการปนเปื้อนโลหะทองแดง

ที่มา: Fujitsu Ltd. **Contributing to Resource Reuse by Recovering High Concentrations of Copper from Wastewater**. เข้าถึงเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก http://www.fujitsu.com/global/about/environment/operation/activities/waste/casestudy/01/.



รูปที่ 2.5 ภาพรวมของการแยกโลหะทองแดงออกจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของบริษัท Fujitsu

ที่มา: Fujitsu Ltd. **Contributing to Resource Reuse by Recovering High Concentrations of Copper from Wastewater**. เข้าถึงเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก http://www.fujitsu.com/global/about/environment/operation/activities/waste/casestudy/01/.

วิธีการแยกโลหะทองแดงออกจากน้ำทิ้งด้วยวิธีการตกตะกอนเคมี (Chemical precipitation) ของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มีข้อเสียคือไม่สามารถทำให้ตะกอนโลหะทองแดงมีความบริสุทธิ์มากพอที่จะหลอมเป็นแท่งโลหะทองแดง ทำให้อุตสาหกรรมเองไม่สามารถเพิ่มรายได้กลับคืนสู่อุตสาหกรรมเอง แต่กลับต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการส่งกากตะกอน (sludge) ที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการเหล่านี้เพื่อไปกำจัดอย่างถูกวิธี

2.4 กระถิน

กระถิน (White Popinac) เป็นไม้พุ่มขนาดเล็กถึงไม้ต้นขนาดใหญ่ สูงได้ถึงประมาณ 10 เมตร กระถินจัดเป็นไม้กลุ่มเนื้อแข็งปานกลาง (Medium Hardwood) มีถิ่นกำเนิดในอเมริกากลาง และแพร่กระจายไปทั่วโลกโดยเฉพาะในประเทศเขตร้อน กระถินทนต่อสภาพความแห้งแล้งได้ดี และการเจริญเติบโตเร็ว ขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ด ไม้สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง เป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณขี้เถ้าและควันน้อย ทำเยื่อกระดาษ เฟอร์นิเจอร์ ใบอ่อนและฝักอ่อนสามารถใช้เป็นอาหารมนุษย์ได้ หรือจะนำใบ กิ่งและก้านไปทำปุ๋ยชีวภาพช่วยปรับปรุงสภาพดินก็ได้ ที่สำคัญใบสามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนชั้นดีในการผลิตอาหารสัตว์ โดยราคาใบป่นหยาบ ขายเฉลี่ยอยู่ที่ 2,650 บาทต่อตัน และราคาใบป่นละเอียด ขายเฉลี่ยอยู่ที่ 3,000 บาทต่อตัน [14]

2.4.1 ปัจจัยแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการปลูก

กระถินมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี แม้ในที่มีความแห้งแล้งและพื้นที่ที่มีน้ำท่วมเป็นระยะก็สามารถขึ้นได้ แต่เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ละติจูดน้อยกว่า 10° ที่ความสูงไม่เกิน 1,000 เมตรจากระดับน้ำทะเลเฉลี่ย และละติจูดระหว่าง 10°-25° ที่ความสูงไม่เกิน 500 เมตรจากระดับน้ำทะเล และยังพบว่าเติบโตได้ดีในดินที่กำเนิด จากหินปูน มีความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) เป็นกลางหรือมี pH ระหว่าง 5.5-7.5 [14]

2.4.1 แหล่งผลิตกระถิน

ปัจจุบันในประเทศไทยมีการปลูกกระถินเพื่อทำใบกระถินแห้งและผลิตใบกระถินป่น ปีละประมาณ 60,000 ตัน โดยมีแหล่งผลิตใหญ่อยู่ในหลายจังหวัดในเขตภาคตะวันออก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางบางส่วน ในขณะเดียวกันจังหวัดนครราชสีมาก็เป็นอีกจังหวัดหนึ่งที่ผลิตใบกระถินแห้งและกระถินป่นส่งจำหน่ายให้เกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์และโรงงานผสมอาหารสัตว์ โดยเฉพาะฟาร์มเกษตรกรโคนมในพื้นที่ ซึ่งมีฟาร์มเกษตรกรโคนมเป็นจำนวนมากที่มีความต้องการการนำไปใช้ทั้งกระถินแห้งและกระถินป่นมาเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ ให้ผลิตน้ำนมสูงและมีความต่อเนื่องสม่ำเสมอ เนื่องจากในใบกระถินมีโปรตีนสูง มีเยื่อใยต่ำ ที่สำคัญมีราคาค่อนข้างถูก และหาได้ง่ายในท้องถิ่น [15]

เนื่องจากกระถินเป็นพืชที่หาได้ง่ายในประเทศไทย และมีราคาขายที่ไม่สูง ซึ่งเหมาะสมในการเลือกมาเป็นวัตถุดิบที่ใช้สังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนิน นอกจากนี้ ถึงแม้ในอนาคตกระถินจะขาด

ตลาด ก็ยังสามารถเพาะปลูกได้เอง เพราะกระถินสามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกสภาพอากาศ ทำให้ไม่ต้องกังวลเรื่องการขาดแคลนกระถินที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ตัวดูดซับ

2.5 การดูดซับทองแดงด้วยแทนนินในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale)

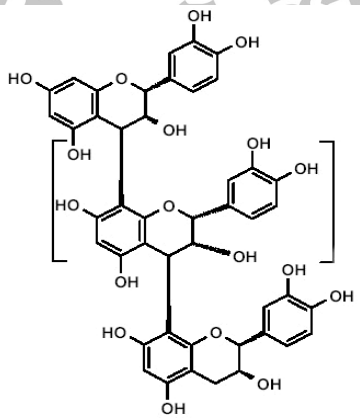
จากงานวิจัยเรื่องการแยกทองแดงในสารละลายด้วยแทนนินที่สังเคราะห์จากพืชไทย ของนางสาวญาชนาภา ญาณชวกุล ในปี พ.ศ. 2553 พบว่าการแยกไอออนของทองแดงในสารละลายโดยใช้ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน ซึ่งการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินนั้น ใช้ต้นทุนต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีประสิทธิภาพสูง จากงานวิจัยเรื่องนี้พบว่าสามารถดูดซับทองแดงได้มากที่สุดถึง 97.02% [5] ดังนั้นจึงขออธิบายเกี่ยวกับแทนนิน การสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน และกลไกในการแยกทองแดงออกจากสารละลายพอสังเขป ดังนี้

2.5.1 แทนนิน

แทนนินคือสารประกอบจำพวกฟีนอลที่ละลายน้ำ (water-soluble phenolics) ที่มีหมู่ hydroxyl เป็นจำนวนมากและโมเลกุลมีโครงสร้างที่ซับซ้อน พบได้ในพืชหลายชนิดจากราก เปลือก ก้าน และผล [6]

แทนนิน มี 2 ชนิด คือ แทนนินชนิดรวมตัวแน่น (condensed tannins) และแทนนินชนิดสลายตัวได้ (hydrolysable tannins) [6]

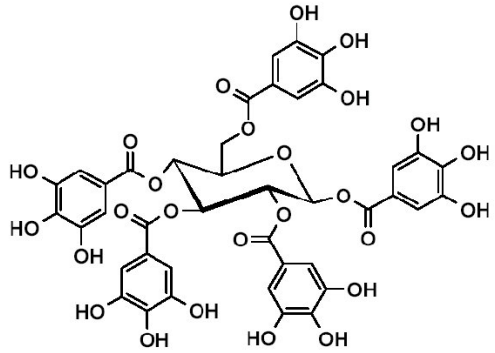
1) แทนนินชนิดรวมตัวแน่น (condensed tannins) เป็นสารประกอบ polyphenols ที่มีความซับซ้อน ดังแสดงรูปที่ 2.6 โดยพืชที่เป็นแหล่งของแทนนินชนิดรวมตัวแน่น เช่น เปลือกอบเชย เปลือกชินโคนา เปลือกหลิว เปลือกโอ๊ค เปลือกและใบของ hamamelis ราก krameria ราก male fern เปลือกโกโก้ ใบชา เป็นต้น



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของแทนนินชนิดรวมตัวแน่น

ที่มา: ญาชนาภา ญาณชวกุล, “การดูดซับไอออนโละมีค่าด้วยแทนนินจากพืชไทย” (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2553),13.

2) แทนนินชนิดสลายตัวได้ (hydrolysable tannins) ที่บริเวณกึ่งกลางของแทนนินชนิดสลายตัวได้ประกอบด้วยหมู่ polyol carbohydrate (D-glucoase) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 สามารถถูกแยกออกเป็นโมเลกุลเล็กๆ พบมากในส่วนใบ ฝัก และส่วนที่ปูดออกมาจากปกติเมื่อต้นไม้ได้รับอันตราย (gall) เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนของน้ำตาล และส่วนที่สองเป็น phenolic acid



รูปที่ 2.7 โครงสร้างแทนนินชนิดสลายตัวได้

ที่มา: ญาชนาภา ญาณชวกุล, “การดูดซับไอออนโละมีค่าด้วยแทนนินจากพืชไทย” (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2553),14.

ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้ตัวดูดซับแทนนินแยกโลหะจากสารละลายในช่วงปี พ.ศ. 2545 - 2552 เช่น การแยกแพลทินัมและพัลลาเดียมในสารละลายโดยใช้เมมเบรนจาก bayberry tannin-immobilized collagen fiber แทนนินที่มีเส้นใยคอลลาเจนและการดูดซับทองคำ การดูดซับไอออนของตะกั่วโดยใช้ modified quebracho tannin resin กลไกการแยกทองคำจากสารละลายโดยใช้นวัตกรรมแทนนินเจลจาก natural condensed tannin การใช้เจลจากเปลือกลูกพลับในการแยกทองคำ การดูดซับทองแดงในสารละลายโดยใช้แทนนินเจลจากต้นไมยราบ การแยกไอออนของปรอทจากสารละลายโดยใช้ bayberry tannin-immobilized collagen fiber การแยกทอเรียมจากสารละลายโดยใช้ตัวดูดซับคอลลาเจนแทนนินไฟเบอร์ และการดูดซับแบบแข่งขันของไอออนตะกั่ว ทองแดงและสังกะสีในสารละลายโดยใช้แทนนินเรซินที่ทำจากสาหร่ายพวงองุ่น สำหรับรายละเอียดมีดังนี้ [6]

He-wei Ma et al. ได้ทำการสร้างชุดอุปกรณ์เมมเบรน โดยนำ bayberry tannin-immobilized collagen fiber มาใส่ใน plate ซึ่งแต่ละ plate มีพื้นที่ 63.6 ตารางเซนติเมตร และมีระยะห่างระหว่าง plate 50 มิลลิเมตร จำนวนทั้งหมด 3 ชั้น พบว่าการดูดซับแพลทินัมและพัลลาเดียมด้วย bayberry tannin-immobilized collagen fiber มีค่า pH ที่เหมาะสมคือ 3 และ 4

ตามลำดับ สามารถดูดซับแพลทินัมและพัลลาเดียมได้ถึง 30.8 และ 22.4 mg/g ตามลำดับ ส่วนจลนศาสตร์การดูดซับ สอดคล้องตาม pseudo-second order และ isotherm สอดคล้องตาม Langmuir เมื่อใช้ bayberry tannin-immobilized collagen fiber 0.1 กรัม ที่อุณหภูมิ 293 K สามารถดูดซับแพลทินัมและพัลลาเดียมได้ 68.4 และ 44.2 % ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มน้ำหนักตัวดูดซับเป็น 0.4 กรัม พบว่าสามารถดูดซับแพลทินัมและพัลลาเดียมได้เพิ่มขึ้นถึง 97.4 และ 95 % ตามลำดับ โดยความสามารถในการดูดซับยังเพิ่มตามอุณหภูมิ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 293 เป็น 313 K พบว่าความสามารถในการดูดซับแพลทินัมและพัลลาเดียมเพิ่มขึ้นเป็น 68.4 และ 92.8% ตามลำดับ แม้ใช้ตัวดูดซับเพียง 0.1 กรัมเท่าเดิม และเมื่อนำแพลทินัมและพัลลาเดียมมาผสมกับโลหะชนิดอื่น คือ แมงกานีส สังกะสีและทองแดง พบว่าการใช้เมมเบรนเพียงชั้นเดียวสามารถเลือกดูดซับแพลทินัมและพัลลาเดียมได้ดีกว่าโลหะชนิดอื่น ซึ่งสามารถแยกทองแดง สังกะสีและแมงกานีสออกจากตัวดูดซับได้โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก 0.1 M และแยกแพลทินัมออกจากพัลลาเดียมได้โดยใช้ thiourea 0.1 M แสดงว่า bayberry tannin-immobilized collagen fiber สามารถเลือกแยกแพลทินัมและพัลลาเดียมจากสารละลายที่มีโลหะชนิดอื่นผสมอยู่ได้

Xuepin Liao et al. ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับทองคำระหว่างแทนนินที่มาจากเปลือกของต้นเบเบอร์รี่และต้นสนลาร์ช ชนิดของกระบวนการดูดซับ และจลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับทองคำ ซึ่งจากการสกัดด้วยอะซิโตนกับน้ำให้ค่าแทนนินจากเปลือกต้นเบเบอร์รี่ 76.3 % และเปลือกต้นสนลาร์ช 72.7% จากนั้นนำผงแทนนินที่ได้มาผสมกับเส้นใยคอลลาเจนที่มาจากหนังสัตว์ เพื่อป้องกันไม่ให้แทนนินละลายน้ำระหว่างการดูดซับ ซึ่งจากการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับของเบเบอร์รี่แทนนินมีมากกว่าลาร์ชแทนนินถึงประมาณ 10% เนื่องจากโครงสร้างที่แตกต่างกันของพืชสองชนิดนี้ ซึ่งเบเบอร์รี่แทนนินมีหมู่ของฟีนอลมากกว่าลาร์ชแทนนินนั่นเอง และจากการทดลองหาความสามารถในการดูดซับทองคำที่อุณหภูมิต่างๆของสารละลายทองคำ พบว่าความสามารถในการดูดซับทองคำแปรผันตามอุณหภูมิ แสดงว่าเป็นกระบวนการดูดซับเชิงเคมี ทำวิเคราะห์ความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับที่มีการดูดซับ ที่อุณหภูมิคงที่ พบว่าสอดคล้องตามสมการของไอโซเทอม Langmuir และจากการศึกษาหาจลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับทองคำด้วยแทนนินในสารละลายทองคำ พบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาสอดคล้องตาม Pseudo second order

Meral Yurtsever and I. Ayhan Sengil ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายโดยใช้ modified quebracho tannin resin ที่สภาวะต่างๆคือ pH เริ่มต้นของสารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วและเวลา พบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วขึ้นกับอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นตาม แสดงว่าเป็นกระบวนการดูด

ซับแบบดูดความร้อน ที่ pH 5 แทนนินเรซินสามารถดูดซับตะกั่วได้สูงที่สุด นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วสูงขึ้น พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว 150 mg/g แทนนินเรซินสามารถดูดซับตะกั่วได้ถึง 83.517 mg/g และแทนนินเรซินใช้เวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลเพียง 10 นาที ซึ่งไม่ขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว จากข้อมูลที่สภาะสมดุลพบว่าไอโซเทอมของการดูดซับสอดคล้องตาม Langmuir ส่วนจลนศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องตาม preudo second order และที่สภาวะ pH 5 อุณหภูมิ 296 K แทนนินเรซินสามารถดูดซับปรอทได้มากที่สุดถึง 86.207 mg/g

Takeshi Ogata and Yoshi Nakano ศึกษาการแยกทองคำออกจากสารละลายทองมาตรฐานโดยใช้แทนนินเจลในการแยก ซึ่งการดูดซับทองคำ เกิดจากปฏิกิริยารีดักชัน โดย trivalent ของไอออนทองคำไปเป็นโลหะทองคำบนพื้นผิวของอนุภาคแทนนินเจล และปฏิกิริยาออกซิเดชันของกลุ่ม hydroxyl ในอนุภาคแทนนินเจลเปลี่ยนเป็นกลุ่ม carbonyl โดยแทนนินเจลสามารถดูดซับทองคำได้สูงถึง 8000 mg Au/g dried gel เมื่อตรวจสอบหาโลหะทองคำที่ถูกดูดซับด้วยอนุภาคแทนนินเจลด้วย X-ray diffraction (XRD) พบว่าที่ค่า 2θ = 38.1, 44.4, 64.6, 77.5, 81.6 และ 98.0 องศา เป็น pattern ของโลหะทองคำ เนื่องจาก trivalent ของไอออนทองคำในสารละลาย aqueous chloride ถูกรีดิวซ์ไปเป็นโลหะทองคำในอนุภาคแทนนินเจล จากนั้นใช้ Fourier transform infrared spectrometry (FT-IR) ตรวจสอบอนุภาคแทนนินเจลบริสุทธิ์และอนุภาคแทนนินเจลก่อนและหลังการดูดซับ พบว่าช่วงความยาวคลื่น 3600-3000, 1620-1610, 1460-1440 และ 1300-1100 cm^{-1} เป็นปฏิกิริยา oxidation ของกลุ่ม hydroxyl ใน tannin gel particles ไปเป็นกลุ่ม carbonyl

Durga Parajuli et al. ได้ทำการเตรียมเจลดูดซับจากเปลือกลูกพลับโดยตรง ไม่มีการสกัดแทนนินออกก่อน เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการสกัดแทนนิน พบว่าแทนนินเจลเลือกดูดซับไอออนของทองคำได้ดีกว่าโลหะชนิดอื่น คือ ทองแดง เหล็ก แพลเลเดียม แพลทินัม ดีบุกและสังกะสี ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองคำเพิ่ม ความสามารถในการดูดซับทองคำจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการแยกทองคำของแทนนินเจลจากเปลือกลูกพลับกับวัตถุดิบที่มีแทนนินคือ ชาเขียว ชาอู่หลงและเปลือกลูกพลับสด พบว่าแทนนินเจลจากเปลือกลูกพลับมีความสามารถในการแยกทองคำสูงที่สุดถึง 100% และเมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการแยกทองคำกับสารเคมีที่มีกลุ่ม hydroxyl คือ กรด oxalic กรด ascorbic และกรด gallic พบว่าแทนนินเจลจากเปลือกลูกพลับมีความสามารถในการแยกทองคำสูงที่สุดถึง 100% เมื่อนำแทนนินเจลจากเปลือกลูกพลับไปวิเคราะห์ด้วย XRD พบ pattern ของโลหะทองคำที่ผิวของแทนนินเจล และเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้อง digital micrograph พบโลหะทองคำแวววาวที่ผิวของแทนนินเจลเช่นกัน ซึ่งแทนนินเจลจากเปลือกลูกพลับมีความสามารถในการแยกทองคำจากสารละลายและ

สามารถเปลี่ยนอิออนของทองคำเป็นโลหะทองคำที่ผิวของแทนนินเจลได้ จึงเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสมราคาและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในการแยกโลหะมีค่าในสารละลาย

Ayhan I. Sengil and Mahmut Ozacar ได้ทำการศึกษากลไกการดูดซับ ไอโซเทอมการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับโดยใช้แทนนินเจลที่สังเคราะห์จากแทนนินในต้นไมยราบสำหรับการแยกทองแดงจากสารละลาย พบว่าที่ pH 5 แทนนินเจลมีความสามารถในการดูดซับทองแดงมากที่สุด อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับทองแดงสูงขึ้น จากข้อมูลการดูดซับที่สภาวะสมดุลสอดคล้องตามสมการของ Langmuir และจลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องตาม pseudo-second-order เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับทองแดงด้วยตัวดูดซับชนิดอื่น เช่น modified jute fibres, Tectona grandis L.f leave powder และ activated popular sawdust มีค่า 8.40, 15.43 และ 13.49 mg/g ตามลำดับ ในขณะที่แทนนินเจลจากต้นไมยราบมีค่าสูงถึง 43.71 mg/g แสดงว่าแทนนินเจลจากต้นไมยราบเป็นตัวดูดซับในการแยกทองแดงที่ดี กลไกการดูดซับทองแดงด้วยแทนนินเจลเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่ผิวของแทนนินเจลระหว่างไอออนของทองแดงและกลุ่ม phenolic บนผิวของแทนนินเจล จึงสามารถเปลี่ยนไอออนของทองแดงในสารละลายเป็นโลหะทองแดงที่ผิวของแทนนินเจลได้

Xin Huang, Xuepin Liao and Bi Shi ได้ทำการศึกษาการแยกปรอทในสารละลายโดยใช้แทนนินจากเปลือกของต้น myrica esculenta ทำการสกัดแทนนินด้วยอะซิโตนและน้ำแล้วนำมา immobilized ด้วยคอลลาเจนไฟเบอร์ พบว่า pH เริ่มต้นของสารละลายที่มากกว่า 4 ส่งผลให้ bayberry tannin-immobilized collagen fiber มีความสามารถในการดูดซับปรอท 198.49 mg/g กลไกการดูดซับปรอทเกิดจากในเบเบอร์รี่แทนนินมี phenolic hydroxyl ทำให้สามารถจับกับไอออนของปรอทในสารละลายได้ ความสามารถในการดูดซับปรอทจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของสารละลาย ความสามารถในการดูดซับเพิ่มตามน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อเพิ่มน้ำหนักตัวดูดซับจาก 0.2 เป็น 1 กรัมต่อลิตร พบว่าความสามารถในการดูดซับปรอทเพิ่มจาก 32.38 % เป็น 98.34% ไอโซเทอมของการดูดซับสอดคล้องตามสมการ Langmuir โดยความสามารถในการดูดซับปรอทจากการคำนวณด้วยสมการของ Langmuir มีค่า 622.31 mg/g ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง 619.78 mg/g ข้อดีของ bayberry tannin-immobilized collagen fiber คือสามารถ desorbed ได้ด้วยการใช้กรดแลคติก 0.1 M และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 4 ครั้งโดยที่ความสามารถในการดูดซับมีค่าเท่าเดิม

Yunhang Zeng et al. ได้ทำการศึกษาการใช้คอลลาเจนจากหนังวัวในการทำตัวดูดซับชนิดใหม่ที่เป็น immobilized แทนนินในการแยกทอเรียมจากสารละลาย ศึกษาความสามารถในการดูดซับ ผลกระทบของ pH จลนศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับ จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ใช้

คอลลาเจนไฟเบอร์ 1 กรัมผสมกับแทนนิน 0.5 กรัม แต่การศึกษาครั้งนี้เป็นการเตรียมตัวดูดซับชนิดใหม่ ผู้วิจัยใช้ wattle แทนนิน 1.5 กรัมผสมกับคอลลาเจน 1 กรัม พบว่าตัวดูดซับชนิดใหม่นี้ไม่มีรูพรุน ทำให้การดูดซับเกิดเฉพาะที่ผิวเท่านั้น ที่ pH 4 ความสามารถในการดูดซับทอเรียมสูงถึง 141.48 mg/g ซึ่งมากกว่าการใช้ตัวดูดซับแบบเก่า ที่มีความสามารถในการดูดซับทอเรียมเพียง 56 mg/g จลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องตาม pseudo-second-order ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง มีความผิดพลาดน้อยกว่า 3.5% และจากข้อมูลการดูดซับที่สภาวะสมดุลสอดคล้องตามสมการของ Langmuir

Ayhan I. Sengil and Mahmut Ozacar ได้ทำการศึกษาความสามารถของแทนนินเรซินที่ทำจากสาหร่ายพวงองุ่นในการเลือกโลหะที่ผสมกัน คือ ตะกั่ว ทองแดงและสังกะสี เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้โลหะแบบชนิดเดียว จากการทดลองพบว่าขนาดรัศมีของแทนนินเรซินมีผลต่อการดูดซับ ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นถ้าขนาดแทนนินเรซินลดลง ที่ pH 5 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะแบบชนิดเดียวของแทนนินเรซินมีค่าสูงที่สุด สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงถึง 98.2% และดูดซับทองแดงและสังกะสีได้ 44 และ 37.5% ตามลำดับ จากข้อมูลการดูดซับที่สภาวะสมดุลสอดคล้องตาม Langmuir จากการคำนวณตามสมการของ Langmuir พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับที่มากที่สุดของไอออนตะกั่ว ทองแดงและสังกะสีในสารละลายแบบชนิดเดียวโดยใช้แทนนินเรซินคือ 138.9, 45.44 และ 35.51 mg/g ตามลำดับ ส่วนการดูดซับโลหะโลหะผสมสองและสามชนิดพบว่าเป็นแบบการแข่งขัน แทนนินเรซินมีความสามารถในการดูดซับโลหะต่ำ เมื่อเทียบกับการดูดซับโลหะแบบชนิดเดียว ตะกั่วสามารถถูกดูดซับได้มากกว่าทองแดงและสังกะสี โดยในสารละลายโลหะผสมสามชนิดพบว่าความสามารถในการดูดซับของตะกั่วมากกว่าทองแดง และสังกะสีเกิดการดูดซับน้อยที่สุด

จากตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้ตัวดูดซับแทนนินแยกโลหะจากสารละลายในช่วงปีพ.ศ. 2545 – 2552 พบว่าตัวดูดซับแทนนินมีความสามารถสูงในการแยกโลหะออกจากสารละลาย ดังนั้นตัวดูดซับแทนนินจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการแยกโลหะทองแดงออกจากน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

2.5.2 การสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน

จากงานวิจัยเรื่องการแยกทองแดงในสารละลายด้วยแทนนินที่สังเคราะห์จากพืชไทย ของนางสาวญาชนาภา ญาณชวกุล ในปี พ.ศ. 2553 มีวิธีการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินดังนี้ [5]

1) นำใบกระถิน 100 กรัม ผสมกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ปริมาณ 30 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปกรวย (Conical Flask) แล้วทำการรีฟลักซ์เพื่อกันการระเหยของสารละลาย ควบคุมความเร็วรอบที่ 250 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2) เมื่อครบกำหนดเวลา ปรับ pH ของสารละลายให้เป็นกลางด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต

3) กรองตะกอน และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำตะกอนที่ได้มาอบและบด โดยคัดแยกขนาดให้มีขนาดอนุภาคเท่ากัน (Mono size) เพื่อนำไปใช้ในการดูดซับ

2.5.3 กลไกในการแยกทองแดงออกจากสารละลาย

กลุ่ม hydroxyl ในตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินถูก oxidize ไปเป็นกลุ่ม carbonyl [6] ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนของทองแดงกับหมู่ hydroxyl ของตัวดูดซับแทนนิน โดยแทนนินจะสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะที่ form ตัวเป็นประจุลบเท่านั้น ซึ่งไอออนของทองแดงในสารละลายมีการ form เป็นประจุลบ ทำให้ hydroxyl ในแทนนินสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะทองแดงได้

โดยกลไกการแยกทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินในสารละลายทองแดง เกิดจากหมู่ฟังก์ชัน O-H ของตัวดูดซับแทนนินเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ C=O จึงให้อิเล็กตรอน [6] ดังแสดงในสมการ (1) และเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับไอออนของทองแดงในสารละลาย จึงเปลี่ยนไอออนของทองแดงเป็นโลหะทองแดง ดังแสดงในสมการ (2)

$$R - OH \rightarrow R = O + H^{+} + e^{-} \quad (1)$$

$$Cu^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cu^{0} \quad (2)$$

สรุปคือ กลไกการแยกทองแดงในสารละลายเกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ระหว่างตัวดูดซับแทนนินและไอออนของทองแดง จึงเป็นผลทำให้เกิดการรีดิวซ์ไอออนทองแดง (Cu^{2+})เป็นโลหะทองแดง (Cu^{0})

จากงานวิจัยนี้พบว่าผู้วิจัยศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) โดยศึกษาตัวแปร 3 ชนิดคือ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) ความเข้มข้นของสารละลายทองแดงเริ่มต้น และ

ปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์เท่านั้น ผู้วิจัยได้ศึกษาแยกทีละปัจจัย โดยการเพิ่มค่าของตัวแปรและวัดค่าปริมาณทองแดงที่ดูดซับได้ นำค่ามา plot กราฟ เพื่อหาจุดสมดุล (Equlibriums) ของทั้งสามตัวแปร หลังจากนั้นนำค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากแต่ละกราฟ มาเป็นเงื่อนไข (condition) ในการหาความสามารถในการดูดซับทองแดงที่มากที่สุดในสารละลาย

นอกจากนี้งานวิจัยส่วนมากที่เกี่ยวกับการดูดซับโลหะในสารละลายด้วยตัวดูดซับแทนนิน เป็นงานวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) มีตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในช่วงปีพ.ศ. 2545 – 2552 ดังได้กล่าวไปแล้วในตอนต้น ซึ่งจากงานวิจัยต่าง ๆ เหล่านี้พบว่าเป็นเพียงการหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในระดับห้องปฏิบัติการเคมี เป็นการศึกษาปัจจัยเดียว ๆ เพื่อหาสภาวะสมดุล (Equilibriums) ทำให้ได้ปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในสภาวะนั้น ๆ โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีการศึกษาการนำตัวดูดซับแทนนินไปใช้อย่างจริงจังในระดับอุตสาหกรรม และยังไม่มีการหาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of experimental, DOE) ซึ่งเป็นการหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด โดยคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย ทำให้สามารถกำหนดค่าปัจจัยต้นแบบที่เหมาะสมของกระบวนการแยกทองแดงจากสารละลายหรือน้ำทิ้งอุตสาหกรรมในระดับเชิงพาณิชย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

การออกแบบการทดลองเป็นการออกแบบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถศึกษาผลของหลาย ๆ ปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย และทำให้ทราบอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างปัจจัยต่างๆ การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของปัจจัย(factors) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของผลตอบ (response) ที่เกิดขึ้น [16]

กระบวนการที่มีปัจจัย (factors) หรือ input (X1, X2, X3, X4) ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่า Y หรือค่าผลตอบ (response) ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพ (quality characteristic) ของกระบวนการ ในการออกแบบการทดลอง ต้องทำการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของ X และ Y โดยที่พยายามใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ได้จะทำให้มีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ (process knowledge) เพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการต่อไป [17]

2.6.1 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

หลักการพื้นฐานของการทดลองประกอบด้วย การทำซ้ำ การสุ่ม และการบล็อกกิง [16]

2.6.1.1 การทำซ้ำ (Replication) หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ประการแรกการทำซ้ำทำให้สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ซึ่งเป็นหน่วยวัดขั้นพื้นฐาน สำหรับพิจารณาว่า ความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้น มีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สอง ถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง การทำซ้ำทำให้สามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบ

2.6.1.2 การสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับการทดลอง แต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม วิธีการเชิงสถิติกำหนดข้อมูล (ความผิดพลาด) ข้อมูลจะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการ กระจายเป็นแบบอิสระ การสุ่มจะทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริงและสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

2.6.1.3 การบล็อกกิง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลองบล็อกกิงอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน มากกว่า เซ็ตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดจากการบล็อกกิง

2.6.2 ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลอง

ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม มีส่วนปะกอบด้วย ทรีทเมนต์ หน่วยทดลอง ปัจจัย และตัวแปรตอบสนอง [17]

2.6.2.1 ทรีทเมนต์ (Treatment) คือ สิ่งหรือวิธีปฏิบัติต่อสิ่งทดลอง เพื่อวัดผลเปรียบเทียบตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.6.2.2 หน่วยทดลอง (Experiment unit) เป็นมาตรฐานหรือหน่วยที่ใช้วัดอิทธิพลของทรีทเมนต์ ซึ่งโดยคำจัดความ หมายถึง สิ่งหนึ่งหรือกลุ่มหนึ่งของการทดลอง ซึ่งได้รับจากทรีทเมนต์เดียวกันในการกระทำครั้งใดครั้งหนึ่ง หน่วยทดลองมีขนาดไม่จำกัด อาจผันแปรได้จากการทดลองหนึ่งไปสู่อีกการทดลองหนึ่ง ถึงแม้จะใช้สิ่งทดลองเหมือนกันก็ตาม ในการทดลองแต่ละครั้งจึงต้องให้คำจำกัดความของหน่วยทดลองให้ชัดเจน

2.6.2.3 ปัจจัย (Factor) ได้แก่กลุ่มของทรีตเมนต์ทั้งหลายที่มีความเกี่ยวข้องกัน (A Particular Class of Related Treatment) อาจใช้คำว่าตัวแปรอิสระก็ได้ ปัจจัยนั้นอาจเป็นไปได้ทั้งข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยปัจจัยสามารถแบ่งออกได้เป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors)

และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors)

ปัจจัยที่ควบคุมได้ หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการดำเนินการทดลอง

ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ อาจเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุน ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ แบ่งออกเป็น

1) ตัวแปรรบกวน (Noise Variable) หรือ Background Variable เป็นตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสอบ (Response Variable) ในการทดลอง แต่ไม่ใช่ปัจจัยที่เรากำลังทำการศึกษา ส่วนใหญ่มักเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม ในธรรมชาติ เช่น ลม ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก เวลาและอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุม เป็นต้น

2) Nuisance Variable คือ ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองแต่เราไม่ทราบมาก่อน เราสามารถกำจัดอิทธิพลของ Nuisance Variable ได้โดยการสุ่ม

2.6.2.4 ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) คือ ตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลอง เรียกอีกอย่างว่า ตัวแปร ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระ ในการทดลองหนึ่งๆ อาจวัดค่าตัวแปรตามมากกว่า 1 ก็ได้ การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจาก ความไว (Sensitivity) ความเชื่อถือได้ (Reliability) การแจกแจงของตัวแปรและความเป็นไปได้ทั้งปฏิบัติ ส่วนการเลือกตัวแปรตามจะต้องพิจารณาว่าค่าสังเกตที่ได้รับจาก ทรีทเมนต์หนึ่งๆควรมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสมมติฐานความปกติ (Normality) เป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบการทดลอง อาจจะใช้การแปลงข้อมูล (Transformation) ค่าสังเกตที่มีการแจกแจงไม่ปกติเป็นแบบปกติ

2.6.3 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง

รูปแบบของการออกแบบการทดลองนั้นมีหลายวิธี เช่น การทดลองเชิงเปรียบเทียบแบบง่าย การทดลองปัจจัยเดียว การออกแบบบล็อกสุ่ม การออกแบบลาตินสแควร์ การบล็อกและการคอนฟาวด์ในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียบแบบ การทดลองเชิงแฟกทอเรียลกับปัจจัยแบบสุ่ม การออกแบบ Nested การออกแบบ Split-Plot การออกแบบการทดลองสำหรับฟิตพื้นผิวผลตอบ และการออกแบบการทดลองทากูชิ เป็นต้น ผู้วิจัยขอยกตัวอย่างรูปแบบการทดลอง 3 วิธี คือ การออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ การออกแบบการทดลองแบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ และ การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล [16]

2.6.3.1 การออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) เป็นแผนการทดลองแบบง่ายสุด เหมาะสมกับการทดลองที่ไม่สามารถแยกได้ว่าหน่วยทดลองที่นำมาใช้นั้นมีลักษณะแตกต่างกันอย่างไรก่อนการทดลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแผน

ทดลองนี้จะแยกสาเหตุของ ความผันแปรของข้อมูลทั้งหมดว่า เนื่องมาจากอิทธิพลของทรีทเมนต์แต่เพียงอย่างเดียว ไม่มีสาเหตุจากปัจจัยอื่น จึงเรียกข้อมูลนี้ว่า ข้อมูลแบบแจกแจงทางเดียว (One-Way Classification)

ตามแผนการทดลองนี้แสดงว่า เมื่อหน่วยทดลองได้รับทรีทเมนต์ที่ต้องการทดสอบแล้ว ความแตกต่างของข้อมูลที่เก็บได้จากแต่ละหน่วยทดลองจะต้องเกิดจากอิทธิพลของทรีทเมนต์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้แผนการทดลองมี ประสิทธิภาพสูงสุด หน่วยทดลองที่นำมาใช้ควรมีลักษณะที่สม่ำเสมอและคล้ายคลึงกันมากที่สุด (Homogenous) หรือมีความผันแปรระหว่างหน่วยทดลองน้อยที่สุด หลักสำคัญของแผนการทดลองนี้คือ การจัดทรีทเมนต์ให้กับ หน่วยทดลองหรือจัดหน่วยทดลองให้กับทรีทเมนต์จะต้องเป็นไปโดยสุ่ม ไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับการสุ่ม

2.6.3.2 การออกแบบการทดลองแบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design: RCB) ในบางการทดลองอาจประสบปัญหาเกี่ยวกับหน่วยทดลองที่ใช้ไม่มีความสม่ำเสมอ ทำให้การใช้แผนการทดลองแบบสุ่มตลอดไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากความผันแปรของข้อมูลจะไม่ใช่ผลของ ทรีทเมนต์เพียงอย่างเดียว แต่ยังมีความผันแปรที่เกิดจากหน่วยทดลองรวมอยู่ด้วย ซึ่งความผันแปรส่วนหลังนี้ จะไปรวมอยู่กับความคลาดเคลื่อนของการทดลอง ทำให้ผลรวมของผลบวกของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนมีค่าสูงขึ้น มีผลต่อการทดสอบทำให้ผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงต้องพยายามแยกผลอันเกิดจากอิทธิพลอื่นที่ไม่ใช่ทรีทเมนต์ออกจากความแปรปรวนทั้งหมด เพื่อให้แน่ใจว่าผลที่นำมาวิเคราะห์นั้นเป็นอิทธิพลของทรีทเมนต์ (Treatment Effect) เพียงอย่างเดียว

แผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อก เป็นวิธีหนึ่งในหลายๆวิธีของการจำแนกแบบสองทาง (Two-Way Classification) จะใช้เมื่อหน่วยทดลองมีความแตกต่างกัน 2 ลักษณะ คือ ทางแนวนอน (Row) และแนวตั้ง (Column) มีหลักการคือ พยายามจัดหน่วยทดลองที่มีความคล้ายคลึงกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งเรียกว่า บล็อก ดังนั้นความแปรปรวนระหว่างหน่วยในบล็อกเดียวกันจึงมีค่าต่ำ และให้ความแตกต่างระหว่างบล็อกมีค่าสูง ในแต่ละบล็อกกระทำ โดยสุ่ม กรณีนี้จะทำให้แยกความแตกต่างระหว่างบล็อกออกมาจากยอดรวมของผลบวกของกำลังสองได้

2.6.3.3 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) เป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ในกรณีที่มีปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยทุกๆ Treatment Combination ของปัจจัยทุกตัวที่ศึกษาจะถูกพิจารณาไปพร้อมๆกัน ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักคือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย หรือที่เรียกว่า “อันตรกิริยา” (Interactions) เช่น กรณีที่ศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัย A, B และ C ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท คือ

ผลกระทบหลัก หรือผลกระทบปัจจัยเดี่ยว (Main Effect) คือผลกระทบกรณีที่สนใจพิจารณาปัจจัยเดี่ยว ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัย A ผลกระทบของปัจจัย B และผลกระทบของปัจจัย C

ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two-Factor or 2 Ways Interactions) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันเป็นคู่ (ครั้งละ 2 ปัจจัย) ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัยร่วม (อันตรกิริยา) AB, AC และBC

ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (Three-Factor or 3-ways Interactions) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยสามปัจจัยพร้อมกัน ในที่นี้ได้แก่ ผลกระทบร่วม ABC อันตรกิริยา (Interactions) คือ “ความล้มเหลวของผลต่างของค่าตอบสนอง (Y) ที่จะมีค่าต่าง เท่ากัน เมื่อผู้ทดลองทำการเปลี่ยนค่าระดับของปัจจัยที่หนึ่ง (จากระดับที่ 1 ไปสู่ระดับที่ 2 เป็นต้น) ภายใต้แต่ละระดับของปัจจัยที่สอง”

2.6.3.3.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เป็นการออกแบบเชิแฟกทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุด จะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย เช่น ปัจจัย A และปัจจัย B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ ส่วนปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งในแต่ละเรพลิเคตของการทดลองจะประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ a x b การทดลอง และโดยปกติจะมีจำนวนเรพลิเคตทั้งหมด n ครั้ง

2.6.3.3.2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบการทดลองในกรณีมีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิความดัน หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร คนงาน และใน 2 ระดับที่กล่าวนี้จะแทนด้วยระดับสูงและต่ำของปัจจัยหนึ่ง ๆ ใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น 2^k ข้อมูล การออกแบบการทดลองแบบนี้มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้

2.6.3.3.3 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ หรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3^k หมายถึง การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัย ประกอบด้วย 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ ระดับกลางและระดับสูง ซึ่งสัญลักษณ์ที่ใชแทนระดับทั้งสามอาจจะใช้ตัวเลข -1, 0 และ 1 ตามลำดับ สังเกตว่าการทดลองแบบนี้จะมีระดับที่สามของปัจจัยเพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง ซึ่งทำให้สามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบ และปัจจัยที่สนใจในลักษณะที่เป็นสมการแบบควอดราติกได้

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เนื่องจากเป็นวิธีการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยหลักตั้งแต่ 2 ปัจจัยหลัก

ขึ้นไป สามารถศึกษาปัจจัยหลักหลายๆปัจจัยพร้อมกัน ซึ่งสามารถแสดงกิริยาระหว่างปัจจัยได้ การออกแบบเช่นนี้มีประโยชน์อย่างมากเมื่อมีหลายปัจจัยที่ต้องการจะตรวจสอบ ซึ่งปกติในการออกแบบจะแทนระดับสูงด้วยเครื่องหมาย " + " และจะแทนระดับต่ำด้วยเครื่องหมาย " - " โดยผู้วิจัยเลือกวิจัยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

จากงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมาพบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับโลหะ คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลาย ปริมาณตัวดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ [6] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้กรองเฉพาะปัจจัยหลักที่มีผลต่อการดูดซับโลหะทองแดงด้วยแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน ประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลักดังนี้

X1 ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) ของน้ำทิ้ง

X2 อุณหภูมิของน้ำทิ้ง

X3 ปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

ส่วนค่าผลตอบหรือค่า Y คำนวณจากความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำทิ้ง (มิลลิลกรัม) ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (3) [6] โดยตัวอย่างการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ก

$$q = (C_i - C_t) V \qquad (3)$$

เมื่อ C_i และ C_t คือ ความเข้มข้นของทองแดงเริ่มต้นและที่เวลา t ใดๆ (มิลลิกรัม/ลิตร) และ V คือ ปริมาตรของน้ำทิ้ง (ลิตร)

จากปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย การทดลองนี้จะมีจำนวนของการทดลองเท่ากับ $2^3 = 8$ การทดลอง ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวมการทดลองทั้งสิ้น 24 การทดลอง โดยปัจจัย และค่าที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 2.2 และ 2.3 ผู้วิจัยอ้างอิงข้อมูลการทดลองเบื้องต้นจากงานวิจัยเรื่อง Copper recovery from aqueous solution using tannin adsorbent synthesized from Thai plant [6]

ตารางที่ 2.2 ปัจจัยและค่าที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		หน่วย
	ต่ำ (-)	สูง (+)	
ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) ของน้ำทิ้ง (A)	5	6	-
อุณหภูมิของน้ำทิ้ง (B)	30	40	องศาเซลเซียส
ปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน (C)	0.4	0.6	กรัม

หมายเหตุ: ทำการศึกษาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงในสารละลาย 50 ppm และระยะเวลาในการดูดซับ 48 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.3 สภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

การทดลอง	(A)	(B)	(C)
1	+	-	-
2	+	-	+
3	+	+	+
4	+	+	-
5	-	-	-
6	-	-	+
7	-	+	+
8	-	+	-

แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3 ปัจจัย เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (4) [16]

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \mathcal{E}_{ijkl} \qquad (4)$$

เมื่อ i คือ 1,2,...,a ; j = 1,2,...,b ; k = 1,2,...,c ; l = 1,2,...,n

γ_{ijk} คือ ค่าที่สังเกตได้

μ คือ ค่าเฉลี่ยทั้งหมด

α_i คือ อิทธิพลของปัจจัย A

β_j คือ อิทธิพลของปัจจัย B

γ_k คือ อิทธิพลของปัจจัย C

$(\alpha\beta)_{ij}$ คือ ผลร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B

$(\alpha\gamma)_{ik}$ คือ ผลร่วมของปัจจัย A และปัจจัย C

$(\beta\gamma)_{jk}$ คือ ผลร่วมของปัจจัย B และปัจจัย C

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ คือ ผลร่วมของปัจจัย A ปัจจัย B และปัจจัย C

$\mathcal{E}_{ijkl}$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

สมมติฐานทางสถิติที่ต้องการทดสอบ [16] คือ

1) การทดสอบอิทธิพลของปัจจัยหลัก

$H_0 : \alpha_i = 0$ และ $H_1 : \alpha_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

$H_0 : \beta_j = 0$ และ $H_1 : \beta_j \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

$H_0 : \gamma_k = 0$ และ $H_1 : \gamma_k \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

2) การทดสอบผลร่วมของปัจจัยหลัก

$H_0 : (\alpha\beta)_{ij} = 0$ และ $H_1 : (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

$H_0 : (\alpha\gamma)_{ik} = 0$ และ $H_1 : (\alpha\gamma)_{ik} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

$H_0 : (\beta\gamma)_{jk} = 0$ และ $H_1 : (\beta\gamma)_{jk} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

$H_0 : (\alpha\beta\gamma)_{ijk} = 0$ และ $H_1 : (\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ i$\neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

การประมาณค่าผลของปัจจัยด้วยการคำนวณหาค่าผลรวมของกำลังสอง (SS) คำนวณดังสมการที่ (5) [16]

$$SS_{Tr} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC} \quad (5)$$

โดย

$$SS_T = \sum_{i}^{a}\sum_{j}^{b}\sum_{k}^{c}\sum_{l}^{n} y_{ijkl}^2 - CT \quad (6)$$

$$SS_A = \frac{1}{bcn}\sum_{i}^{a} y_i^2 - CT \quad (7)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn}\sum_{j}^{b} y_j^2 - CT \quad (8)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn}\sum_{k}^{c} y_k^2 - CT \quad (9)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn}\sum_{i}^{a}\sum_{j}^{b} y_{ij}^2 - CT - SS_A - SS_B \quad (10)$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn}\sum_{i}^{a}\sum_{k}^{c} y_{ik}^2 - CT - SS_A - SS_C \quad (11)$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an}\sum_{j}^{b}\sum_{k}^{c} y_{jk}^2 - CT - SS_B - SS_C \quad (12)$$

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n}\sum_{i}^{a}\sum_{j}^{b}\sum_{k}^{c} y_{ijk}^2 - CT - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} \quad (13)$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} - SS_{ABC} \quad (14)$$

$$CT = \frac{y_{ijk}}{abcn} \quad (15)$$

สำหรับค่าต่างๆ สรุปได้ตามตารางที่ 2.4 [17]

ตารางที่ 2.4 วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการออกแบบการทดลอง

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
ทรีทเมนต์	SS_{Tr}	abc - 1		
A	SS_A	a - 1	MS_A	MS_A / MS_E
B	SS_B	b - 1	MS_B	MS_B / MS_E
C	SS_C	c - 1	MS_C	MS_C / MS_E
AB	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	MS_{AB}	MS_{AB} / MS_E
AC	SS_{AC}	(a-1)(c-1)	MS_{AC}	MS_{AC} / MS_E
BC	SS_{BC}	(b-1)(c-1)	MS_{BC}	MS_{BC} / MS_E
ABC	SS_{ABC}	(a-1)(b-1)(c-1)	MS_{ABC}	MS_{ABC} / MS_E
Error	SS_E	abc(n-1)	MS_E	

แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเรียล 3 ปัจจัยนี้ มีการพิจารณาผลร่วมของปัจจัยที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ และสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลอง

2.7 การขยายขนาดจากระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) สู่ระดับอุตสาหกรรม (Factory scale)

การขยายขนาด (Scale-up) คือความสำเร็จในการดำเนินงานในระดับเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีการออกแบบและกระบวนการดำเนินงานส่วนหนึ่งที่มาจากการทดลองและการดำเนินงานในระดับที่มีขนาดเล็กกว่า โดยคำว่าความสำเร็จในที่นี้ รวมถึงการประสบความสำเร็จในด้านค่าใช้จ่ายในการผลิตที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพตามที่ต้องการ [18,19]

บ่อยครั้งที่มีงานวิจัยที่ประสบความสำเร็จ แต่ท้ายที่สุดแล้วกลับไม่สามารถนำผลการทดลองที่ประสบความสำเร็จในห้องปฏิบัติการมาพัฒนาจนถึงขั้นสามารถผลิตหรือใช้ประโยชน์ได้จริงในเชิงพาณิชย์ ทั้งนี้เนื่องมาจากการขาดความรู้ และประสบการณ์ในการขยายขนาด ทั้งนี้ไม่เพียงแต่ขาดประสบการณ์หรือขาดความรู้เท่านั้น โดยวัตถุประสงค์สำคัญในการขยายขนาดนั้นเกิดขึ้นจากความต้องการที่จะนำผลความสำเร็จจากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ มาเพิ่มการ

ผลิตเพื่อการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์เพื่อให้ประสบความสำเร็จ ซึ่งปัจจัยที่ทำให้การขยายขนาดไม่ประสบความสำเร็จ มีปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ดังนี้ [18]

ปัญหาสิ่งปนเปื้อน (impurity) หลายครั้งที่วิศวกรละเลยไม่ให้ความสำคัญกับสิ่งปนเปื้อนที่มักเกิดขึ้นกับโรงงาน โดยเฉพาะในกระบวนการที่มีการ Recycle จะเกิดสิ่งเจือปนที่เป็นปัญหา เช่น น้ำที่สะสมในกระบวนการผลิตไฮโดรคาร์บอน ในขณะที่การทดลองในห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ปัญหาสิ่งปนเปื้อนนี้มักจะมองไม่เห็น หรือถูกมองข้ามไป หลังจากที่โรงงานถูกสร้างขึ้น ในขณะที่ปัญหาการปนเปื้อนยังอยู่ การจะแก้ไขปัญหาหรือปรับปรุงกระบวนการค่อนข้างมีค่าใช้จ่ายสูง และมีความยากลำบากในการแก้ไขปัญหา

ปัญหาการกำหนดขอบเขตการระเบิด (explosive limits) การเดินเครื่องภายในโรงงานต้องมีความปลอดภัยจากการระเบิด เนื่องจากจะเป็นเรื่องใหญ่มาก ในกรณีที่เกิดปัญหาไฟไหม้ ทางโรงงานยังพอมีเวลาที่จะแก้ไขปัญหาได้ทัน แต่หากเกิดการระเบิดเมื่อไหร่ จะไม่มีโอกาสแก้ไขได้เลย หลายครั้งสารเคมีบางอย่าง เมื่อทดสอบในอุปกรณ์เล็ก ๆ คำตอบที่ได้ค่อนข้างปลอดภัย เนื่องจากอุปกรณ์ขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวนอกต่อหน่วยปริมาตรค่อนข้างมาก ดังนั้นการระบายความร้อนจะเกิดได้ดีกว่าอุปกรณ์ตัวใหญ่ ๆ ดังนั้นการออกแบบเครื่องมือจะต้องคำนึงถึงการใช้งานจริงด้วย

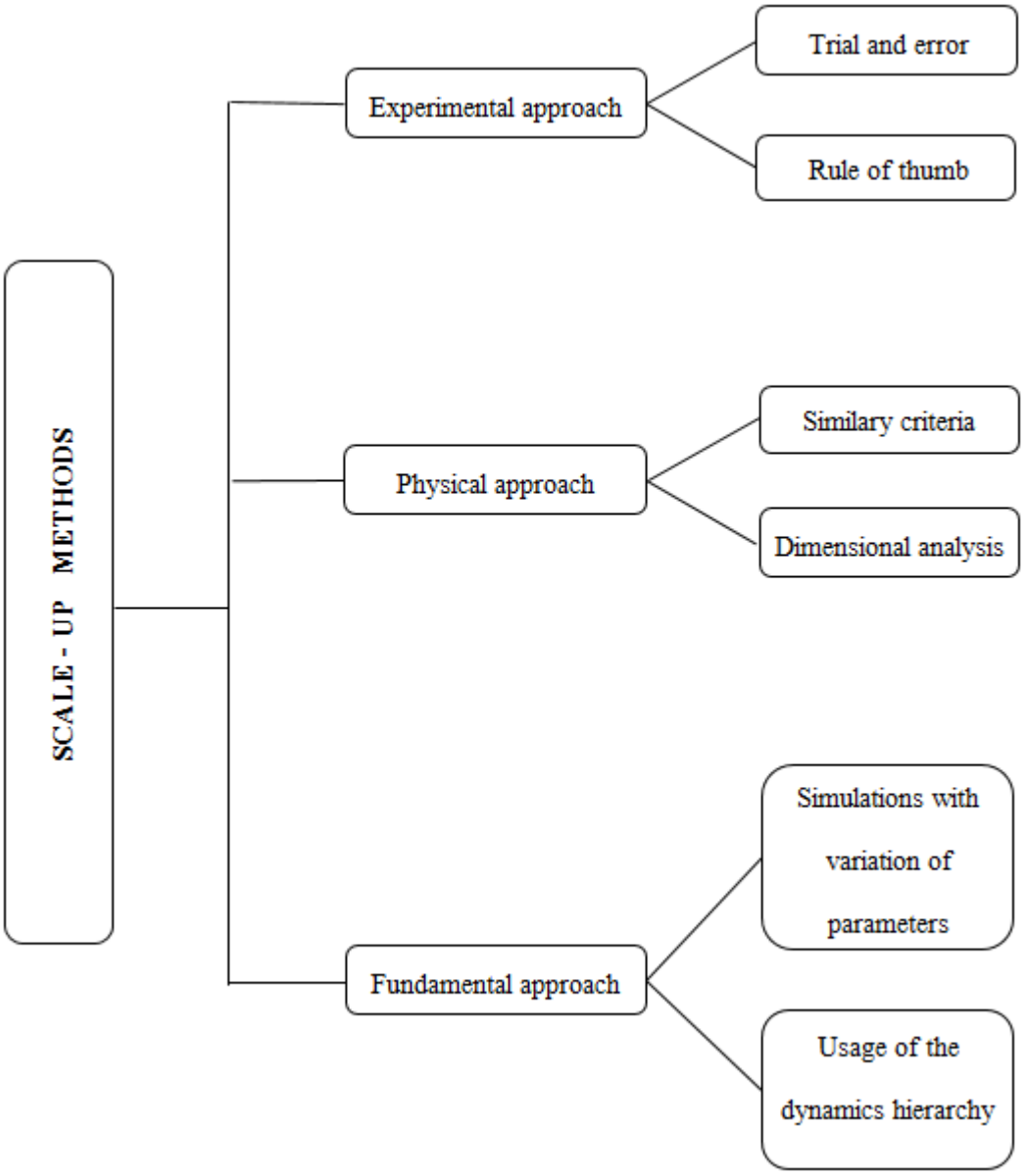
ปัญหาการเก็บรักษาวัสดุที่อาจเกิดการเสื่อมสภาพหรือวัสดุอาจลุกติดไฟได้เอง (unstable materials) วัสดุที่ไม่เสถียรซึ่งรวมตั้งแต่วัตถุดิบจนถึงผลิตภัณฑ์ เมื่อเก็บหรือวางทิ้งไว้ อาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอากาศ เกิดการสะสมความร้อน ทำให้อุณหภูมิเริ่มเพิ่มขึ้น การเกิดปฏิกิริยาก็จะเร็วขึ้น การปลดปล่อยความร้อนก็จะเพิ่มทวีคูณขึ้นจนเกิดการติดไฟ หรือในบางเงื่อนไขอาจเกิดการระเบิดได้ หากทราบสาเหตุว่าเกิดได้อย่างไร และปรากฏการณ์เป็นอย่างไร ก็สามารถหาวิธีป้องกันที่มีประสิทธิภาพล่วงหน้าได้

2.7.1 การขยายขนาด

แม้ว่าการขยายขนาดจะเป็นหน้าที่ความรับผิดชอบของวิศกรเคมีที่ต้องออกแบบและหาค่าที่ดีที่สุดที่มีประสิทธิภาพสำหรับอุตสาหกรรมนั้นๆ แต่ตั้งแต่ปีคศ. 1960 พบว่าไม่มีวิธีการขยายขนาดที่มีนัยสำคัญในการขยายขนาดของกระบวนการทางเคมี [19]

กระบวนการทั่วไปในการขยายขนาด สามารถจำแนกได้เป็น 3 `กระบวนการ คือ กระบวนการทดลอง (Experimental) กระบวนการทางกายภาพ (Physical) และกระบวนการเบื้องต้น (Fundamental) วิธีการที่ได้รับความนิยมจากวิศกรเคมีในการขยายขนาดกระบวนการทาง

เคมีแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่ง 2 กระบวนการแรก คือ กระบวนการทดลองและกระบวนการทางกายภาพ หรือถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าวิธีการขยายขนาดแบบดั้งเดิม (traditional) [19]



รูปที่ 2.8 ประเภทของวิธีการขยายขนาด

2.7.1.1 กระบวนการทดลอง (Experimental)

กระบวนการทดลองหรือ Empirical approach เป็นวิธีที่เหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการขยายขนาดส่วนการผลิตขึ้นเพียงทีละ 10-20 เท่าตามลำดับ จนกระทั่งได้ในระดับมากสุดที่ต้องการ หลายครั้งต้องมีการปรับปลี่ยนแก้ไขหลายรอบจึงก่อให้เกิดความล่าช้า แต่ข้อดี คือได้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างแน่นอน จะสังเกตได้ว่าเมื่อสิ้นสุดการดำเนินการตามแนวทางนี้ จุดเริ่มต้นกับผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้จะแตกต่างกันได้ค่อนข้างมาก [18,19] โดยวิธีการ Empirical approach นี้ สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 วิธีการคือ

Trial and error วิธีการนี้ต้องมีการวางแผนอย่างรอบคอบในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นและเพียงพอ ตัวแปรต้องครอบคลุมความหลากหลายในการดำเนินงาน โดยปกติข้อมูลการออกแบบสำหรับกระบวนการทางเคมี มาจากส่วนหนึ่งของประสบการณ์ของวิศวกรเคมี ผลการทดลองจากระดับห้องปฏิบัติการหรือจากการรวบรวมงานวิจัยต่างๆ [19]

Rules of thumb เป็นการเสนอแนะทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมโดยใช้ประสบการณ์ทางวิศวกรรม และใช้หลักการของอัตราส่วน (Ratio) โดยทั่วไปวิธีนี้นิยมประยุกต์ใช้กับงานด้านชีวภาพ ค่าที่ทำการขยายขนาดเช่น กำลังต่อปริมาตร อัตราความเร็วใบมีด หรือเวลาในการผสม [19]

2.7.1.2 กระบวนการทางกายภาพ (Physical)

กระบวนการทางกายภาพ แบ่งย่อยได้เป็น 2 วิธีคือ Similarity criteria และ Dimensional analasis โดยวิธี Similarity criteria ครอบคลุมความสัมพันธ์ระหว่างระบบทางกายภาพที่ขนาดต่างๆกัน ส่วนการใช้ Dimensionless numbers หรือการคำนวณค่าไร้มิติ เป็นวิธีหนึ่งที่ถูกใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับปัญหาของการไหล ให้อยู่ในรูปไร้มิติ

ถ้าตัวแปรทุกตัวที่เกี่ยวข้องในระบบของทั้งสองขนาดมีค่าเท่ากัน จะทำให้ระบบทั้งสองขนาดมี Geometric, Kinematic และ Dynamic Similarity เท่ากันด้วย หรือมีความเหมือนกันอย่างสมบูรณ์ (Complete similarity) ซึ่งจะทำให้กระบวนการทั้งสองกระบวนการมีผลลัพธ์เหมือนกัน 100% [20]

สำหรับถังปฏิกรณ์แบบกวน ค่า Dimensionless numbers ที่เกี่ยวข้องที่ต้องคำนวณ เช่นค่า Reynold number มีผลต่อระดับความปั่นป่วนในถัง, ค่า Froude number มีผลต่อพฤติกรรมคลื่นและพื้นผิวในถังกวน และค่า Weber number มีผลต่อการเกิดฟองในถังกวน [21]

2.7.1.3 กระบวนการเบื้องต้น (Fundamental)

กระบวนการเบื้องต้นเป็นวิธีที่นิยมใช้เมื่อต้องการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลของของไหลในระดับการขยายขนาดจำนวนสูง ๆ มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ

กระบวนการที่อัตรส่วนต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบกระบวนการมากกว่า 1,000 ครั้ง ทำให้ค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือ แต่มีข้อเสีย คือ ค่อนข้างมีค่าใช้จ่ายสูง และใช้เวลานานกว่าแนวทางอื่น ๆ [18,21]

การขยายขนาดมีหลายระดับและหลายวิธีการ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และความเหมาะสม อาทิเช่น หากมีโรงงานขนาดใหญ่อยู่แล้ว อาจทำการทดสอบในโรงงานจริง หรือหากมีโมเดลที่ดี ก็อาจจะทำการจำลองเพื่อศึกษาทำนายผลก่อน แล้วนำผลที่ได้มาช่วยในการขยายขนาด ทั้งนี้ในหลาย ๆ ครั้ง อาจเริ่มต้นจากการดูข้อมูลพื้นฐานที่มีอยู่ว่าตรงกับที่ต้องการหรือไม่ หรือในบางครั้งอาจจะทดสอบระดับนำร่อง (Pilot scale) ก่อนการทดสอบระดับเต็มรูปแบบ (Full scale) [18]

จากที่กล่าวมาข้างต้น วิธีการขยายขนาดจากระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับเชิงพาณิชย์ แต่ละขั้นมีหลายรูปแบบ และหลายวิธีการขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์หลัก ไม่ว่าอุตสาหกรรมจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่เพียงใด สิ่งสำคัญคือ วัตถุประสงค์พื้นฐานของการขยายขนาด คือความต้องการที่จะลดความเสี่ยงและข้อผิดพลาดในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นการขยายขนาดจากระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับนำร่องก่อนจึงมีความจำเป็นก่อนที่จะพัฒนาไปสู่ระดับเต็มรูปแบบ [18,19]

งานวิจัยนี้ แบ่งหน่วยปฏิบัติการเป็น 3 หน่วย ดังนี้

จากหน่วยปฏิบัติการทั้ง 3 หน่วยนี้ ผู้วิจัยจะทำการทดสอบระดับนำร่อง (Pilot scale) ก่อน โดยผู้วิจัยเลือกขยายขนาดด้วยวิธีกระบวนการทดลองหรือ Empirical approach เนื่องจากหน่วยปฏิบัติการเป็นระบบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch) และไม่มีการไหลของของไหลใด ๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งผู้วิจัยจะทำการขยายขนาดการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน และการดูดซับทองแดงในน้ำทิ้ง โดยทำการทดลองอีกสองครั้ง แต่ขยายขนาดเป็น 10 และ 20 เท่า ซึ่งจะนำค่าปัจจัยทั้งหมดที่เหมาะสมที่สุด (optimize) ไม่ว่าจะเป็นค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) ของน้ำทิ้ง อุณหภูมิของน้ำทิ้งและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 นำค่าความสามารถในการแยกโลหะทองแดงในน้ำทิ้งมาวิเคราะห์เป็นผลที่ได้จากการขยายขนาดของส่วนการผลิตครั้งนี้

2.8 การศึกษาความเป็นไปได้ (Feasibility)

การศึกษาความเป็นไปได้ (Feasibility) คือการพิจารณาถึงความเหมาะสมและการประเมินผลประโยชน์เปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายที่ใช้ไปในการพัฒนาระบบขององค์กร หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นกระบวนการควบคุมของการระบุปัญหาและโอกาส การกำหนดเป้าหมาย การอธิบายถึงสถานการณ์ของธุรกิจ การระบุผลลัพธ์ของความสำเร็จให้ชัดเจน และการประเมินช่วงของต้นทุนและผลประโยชน์ที่ได้รับจากทางเลือกต่าง ๆ ที่มี ซึ่งการศึกษาจะช่วยสนับสนุนกระบวนการตัดสินใจของการทำธุรกิจและพัฒนาโครงการ ด้วยการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ โดยวัตถุประสงค์ของการจัดทำเพื่อวิเคราะห์และเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการลงทุนในโครงการนั้น ๆ ว่าน่าลงทุนหรือไม่ มีกำไรเท่าไร ต้องใช้งบประมาณเท่าไร และจะคืนทุนเมื่อไร ออกมาเป็นข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ตัดสินใจได้

ในการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการพัฒนาระบบ มีปัจจัยที่ใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการพิจารณา 3 ประการ คือ ความเป็นไปได้ด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility) ความเป็นไปได้ด้านเทคนิค (Technical Feasibility) และความเป็นไปได้ด้านการปฏิบัติงาน (Operational Feasibility)

2.8.1 ความเป็นไปได้ด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility)

การศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทน (Cost-Benefits Analysis) เป็นการศึกษาถึงผลตอบแทนทางการเงินและต้นทุนที่เกิดขึ้นจากโครงการพัฒนาระบบ

วัตถุประสงค์ที่สำคัญของการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ คือการจำแนกผลตอบแทน ต้นทุนที่จะใช้ในโครงการพัฒนาระบบในการวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนจะใช้ฟังก์ชั่นทางการเงินเพื่อคำนวณหาต้นทุนและกำไร ตลอดจนผลตอบแทนที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีวิธีการ คือการพิจารณาผลตอบแทนที่จะได้รับจากโครงการ พิจารณาต้นทุนของโครงการ และคำนวณผลตอบแทนสุทธิที่จะได้รับจากโครงการ

2.8.1.1 การพิจารณาผลตอบแทนที่จะได้รับจากโครงการ

ผลตอบแทนของโครงการเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้บริหารให้ความสนใจเทียบเท่ากับต้นทุนที่ต้องใช้ การที่โครงการพัฒนาระบบจะสามารถเพิ่มผลประโยชน์ที่อยู่ในรูปของกำไรให้กับองค์กรได้นั่นหมายถึงใช้ต้นทุนน้อยนั่นเอง ซึ่งการพิจารณาถึงผลตอบแทนของ โครงการสามารถจำแนกลักษณะได้เป็น 2 ประเภท คือ ผลตอบแทนที่จับต้องได้ (Tangible Benefits) และผลตอบแทนที่จับต้องไม่ได้ (Intangible Benefits)

ผลตอบแทนที่จับต้องได้ หมายถึง ผลตอบแทนที่สามารถประเมินค่าเป็นตัวเงินได้ เช่น กำไร การลดต้นทุนต่อหน่วย การลดผิดพลาดของการนำเข้าข้อมูล การเพิ่มความเร็วในการประมวลผลข้อมูลที่นำเข้า การเพิ่มยอดขาย เป็นต้น สำหรับตัวอย่าง เช่น การลดต้นทุนทางด้านการติดต่อสื่อสาร จากเดิมที่เคยใช้โทรศัพท์เพื่อการแจ้งข่าวสารบางประการแก่ลูกค้า หากหันมาใช้การส่งจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ตแทน ในกรณีที่บริษัทนั้นมีการเชื่อมต่อเครือข่ายอินเตอร์เน็ตอยู่แล้ว จะทำให้ประหยัดต้นทุนในการดำเนินงาน เมื่อต้นทุนลดจะหมายถึงผลกำไรเพิ่มขึ้นนั่นเอง

ผลตอบแทนที่จับต้องไม่ได้ หรือผลตอบแทนที่ไม่ใช่ตัวเงิน หมายถึง ผลตอบแทนไม่สามารถวัดค่าเป็นตัวเงินได้ หรือยากแก่การประเมินค่า เช่น การเพิ่มภาพลักษณ์ที่ดีให้แก่องค์กร การสร้างขวัญและกำลังใจแก่พนักงาน การคืนผลประโยชน์สู่สังคม และการเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสินใจของผู้บริหาร เป็นต้น

2.8.1.2 การพิจารณาต้นทุนของโครงการ

ต้นทุนสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ ต้นทุนที่จับต้องได้ (Tangible Costs) และต้นทุนที่จับต้องไม่ได้ (Intangible Costs)

ต้นทุนที่จับต้องได้ คือ ต้นทุนในส่วนของการพัฒนาระบบที่มีสามารถประเมินค่าเป็นตัวเงินได้ เช่น ต้นทุนในการซื้อเครื่องคอมพิวเตอร์ เงินเดือน และต้นทุนที่ใช้ในการดำเนินงานเมื่อทำการติดตั้งระบบ (ค่าใช้จ่ายในการฝึกอบรมพนักงานและค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบ)

ต้นทุนที่จับต้องไม่ได้ คือ ต้นทุนในส่วนของการพัฒนาระบบที่ไม่สามารถประเมินค่าเป็นตัวเงินได้ ได้แก่ ความไม่เต็มใจในการทำงานของพนักงาน และการทำงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ

จากลักษณะของต้นทุนที่เป็นต้นทุนที่จับต้องได้และจับต้องไม่ได้ นักวิเคราะห์ระบบยังสามารถจำแนกต้นทุนในส่วนของการพัฒนาระบบออกได้อีก 2 ประเภท คือ ต้นทุนที่เกิดขึ้นครั้งเดียว (One-time Costs) และต้นทุนที่เกิดขึ้นซ้ำ (Recurring Costs)

ต้นทุนที่เกิดขึ้นครั้งเดียว คือ ต้นทุนที่เกิดขึ้นในการเริ่มต้นโครงการ และเกิดขึ้นเมื่อมีการเริ่มใช้งานระบบ เช่น ค่าใช้จ่ายในการซื้อเครื่องคอมพิวเตอร์ใหม่ ค่าใช้จ่ายในการซื้อซอฟต์แวร์ และค่าใช้จ่ายในการฝึกอบรม

ต้นทุนที่เกิดขึ้นซ้ำ คือต้นทุนที่เกิดในระหว่างดำเนินงานของระบบใหม่ เช่น ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาโปรแกรม การซื้อสื่อเก็บข้อมูลเพิ่มเติม ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการติดต่อสื่อสาร และค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับอุปกรณ์

ในส่วนของการพัฒนาระบบ ต้นทุนยังสามารถจำแนกได้อีก 2 ประเภท คือต้นทุนคงที่ (Fixed Costs) และต้นทุนผันแปร (Variable Costs)

ต้นทุนคงที่ คือ ต้นทุนที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามการใช้งานหรือการผลิตอื่น ๆ เช่น ค่าบำรุงไฟฟ้า น้ำประปา และเงินเดือนพนักงาน

ต้นทุนผันแปร คือ ต้นทุนที่แปรผันไปตามการใช้งานหรือการผลิตอื่น ๆ เช่น ค่าใช้โทรศัพท์ที่ไม่รวมค่าบริการรายเดือนที่ต้องจ่ายเท่ากันในทุก ๆ เดือน

2.8.1.3 การคำนวณผลตอบแทนสุทธิที่จะได้รับจากโครงการ

เมื่อพิจารณาต้นทุนและผลตอบแทนที่จะเกิดขึ้นจากโครงการพัฒนาระบบแล้ว จะต้องนำต้นทุนและผลตอบแทนที่พิจารณาแล้วมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาผลตอบแทนสุทธิที่จะได้รับจากโครงการพัฒนาระบบที่จัดว่าเป็นการลงทุน ดังนั้นจึงต้องหาผลตอบแทนสุทธิเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลตอบแทนสุทธิที่ได้จากโครงการลงทุนอื่น ๆ ขององค์กร ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างเทคนิคการเปรียบเทียบที่นิยมใช้กันส่วนใหญ่ 3 เทคนิค ได้แก่ มูลค่าเงินปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV) อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (Return of Investment : ROI) และการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน (Break-Even Point Analysis)

2.8.2 ความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิค (Technical Feasibility)

การศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้เข้าใจถึงความสามารถในการพัฒนาระบบใหม่ขององค์กรและเป็นการประเมินเทคนิคของระบบใหม่ที่ใช้ ในการแก้ปัญหาโดยอาจจะอาศัยคำถามเพื่อเป็นแนวทางในการประเมิน เช่น เทคโนโลยีที่จะนำมาใช้นั้นสามารถรองรับปริมาณลูกค้าที่อาจเพิ่มจำนวนมากขึ้น และสามารถปรับเข้ากับปัญหาที่จะเกิดขึ้นได้หรือไม่ เทคโนโลยีที่มีอยู่เดิมนั้นสามารถปรับใช้กับระบบใหม่ได้หรือไม่ ถ้าไม่ได้ องค์กรสามารถซื้อมาได้โดยมีค่าใช้จ่ายที่ผู้บริหารพึงพอใจหรือไม่ และบุคลากรขององค์กรมีความเชี่ยวชาญกับเทคโนโลยีที่จะนำมาใช้มากพอหรือไม่ [22]

นอกจากประเมินความสามารถขององค์กรในการพัฒนาระบบของโครงการพัฒนาระบบที่คัดเลือกมาว่ามีความสามารถเพียงพอหรือไม่แล้ว ยังจะต้องทำการประเมินระดับความเสี่ยงของโครงการ เนื่องจากผู้บริหารย่อมมีความคาดหวังผลตอบแทนที่ได้จากโครงการมากกว่าความเสี่ยงในด้านต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการประเมินความเสี่ยงของโครงการเพื่อป้องกันผลลัพธ์ที่ไม่พึงประสงค์ที่อาจเกิดขึ้น อันเนื่องจากการนำเทคโนโลยีเข้ามาใช้งานกับระบบใหม่ โดยผลลัพธ์ที่อาจเป็นไปได้หากไม่มีการประเมินความเสี่ยงของโครงการ เช่น ทำให้การคาดหวังที่จะได้รับผลตอบแทนนั้นล้มเหลว ทำให้การประมาณการต้นทุนผิดพลาด ทำให้การประมาณการระยะเวลาในการดำเนินโครงการผิดพลาด ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบไม่เป็นไปตามที่คาดไว้ หรือทำให้ไม่สามารถติดตั้งระบบใหม่เข้ากับระบบคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่แล้วได้ [23]

นักวิเคราะห์ระบบหรือผู้บริหารควรมีการป้องกันการเกิดความเสี่ยงในด้านต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้แล้ว โดยอาจจะมีการแต่งตั้งทีมงานเพื่อคอยควบคุมไม่ให้เกิดผลลัพธ์ดังกล่าวได้ อาจจะใช้เทคนิคในการประเมินปัจจัยที่จะทำให้เกิดความเสี่ยงได้ทั้งหมด 4 ประการ [23] ได้แก่

2.8.2.1 ขนาดของโครงการ

โครงการที่มีขนาดใหญ่จะมีความเสี่ยงมากกว่าโครงการที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากโครงการที่มีขนาดใหญ่จะยากต่อการบริหารโครงการ

2.8.2.2 โครงสร้างของโครงการ

โครงการที่มีการดำาเนินงานอย่างมีโครงสร้างและมีความต้องการ (Requirement) ที่ไม่ซับซ้อน ย่อมมีความเสี่ยงน้อยกว่าโครงการที่มีความต้องการที่มีความซับซ้อน

2.8.2.3 เทคโนโลยีที่นำมาใช้ ในโครงการ

โครงการที่นำเทคโนโลยีที่มีมาตรฐานมาใช้ย่อมมีความเสี่ยงต่อความเข้าใจของกลุ่มผู้ใช้งานน้อยกว่าโครงการที่นำเทคโนโลยีที่ไม่มีมาตรฐานเพียงพอ หรือล้ำยุคเกินไป

2.8.2.4 ความคุ้นเคยของผู้ใช้งานกับการพัฒนาระบบสารสนเทศ

ผู้ใช้งานที่มีความคุ้นเคยกับระบบสารสนเทศ จะมีความเข้าใจในขั้นตอนการทำางานได้ดีกว่าผู้ใช้งานที่ไม่มีความคุ้นเคย

2.8.3 ความเป็นไปได้ทางด้านการปฏิบัติงาน (Operational Feasibility)

ความเป็นไปได้ทางด้านการปฏิบัติงานเป็นการประเมินถึงระบบใหม่เมื่อมีการใช้งาน ว่าจะสามารถแก้ไขปัญหาของระบบเดิมได้มากน้อยเพียงใด รวมถึงความรู้สึกของผู้ใช้ระบบที่มีต่อการทำงานของระบบใหม่ด้วยการจะประเมินว่าระบบใหม่นั้นจะสามารถแก้ ไขปัญหาของระบบเดิมได้มากน้อยเพียงใด โดยมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้ [22,23]

2.8.3.1 ประสิทธิภาพ (Performance)

ระบบใหม่นั้นมีความเร็วในการทำางานมากน้อยเพียงใด

2.8.3.2 สารสนเทศ (Information)

สารสนเทศที่จะได้จากระบบใหม่นั้น มีความถูกต้อง ตรงประเด็น และสามารถใช้ร่วมกันได้หรือไม่

2.8.3.3 เศรษฐศาสตร์ (Economy)

ระบบใหม่นั้นสามารถช่วยลดต้นทุนหรือเพิ่มกำไรให้กับองค์กรได้อย่างไร

2.8.3.4 การควบคุม (Control)

มีความสามารถในการควบคุมระบบเพื่อป้องกันการโกงและการยักยอก และมีความถูกต้องปลอดภัยของข้อมูลมากน้อยเพียงใด

2.8.3.5 ประสิทธิผล (Efficiency)

ระบบใหม่จะต้องมีการใช้แหล่งทรัพยากรมากที่สุดเพียงใด เช่น ทรัพยากรบุคคล เวลา และข้อมูล เป็นต้น

2.8.3.6 การบริการ (Services)

ระบบใหม่มีการเตรียมการบริการเมื่อเกิดปัญหาแก่ผู้ใช้งาน และมีความยืดหยุ่นหรือไม่

2.8.4 ตัวอย่างงานวิจัยการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ

สำหรับตัวอย่างงานวิจัยการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ ผู้วิจัยขอยกตัวอย่าง 3 โครงการที่เกี่ยวข้องกับระบบบำบัดน้ำเสีย รายละเอียดมีดังนี้

2.8.4.1 การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อนำก๊าซชีวภาพมาใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตยางแท่งมาตรฐาน 20 ในสังกัดการยางแห่งประเทศไทย ในอำเภอวังสามหมอ จังหวัดอุดรธานี

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจกระบวนการผลิตและระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตยางแท่งมาตรฐาน 20 ในสังกัดการยางแห่งประเทศไทย ในอำเภอวังสามหมอ จังหวัดอุดรธานี โดยศึกษารูปแบบและทางเลือกด้านเทคนิคในการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อนำก๊าซชีวภาพมาใช้ในกระบวนการผลิต ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ความเป็นไปได้ด้านการเงิน และทดสอบความสามารถในการรับความเปลี่ยนแปลงในการลงทุนปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสีย เครื่องมือทางการเงินที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ ดัชนีความสามารถในการทำกำไร อัตราผลตอบแทนภายใน อัตราผลตอบแทนภายในที่มีการปรับค่าแล้ว และการทดสอบค่าความแปรเปลี่ยน จากผลการศึกษาพบว่า 3 ขั้นตอนแรกของกระบวนการผลิตทั้งหมด 8 ขั้นตอน มีน้ำเสียเกิดขึ้น 150 ลูกบาศก์เมตรต่อการผลิตยาง 80 ตันต่อวัน น้ำเสียจำนวนนี้ถูกนำมาบำบัดด้วยบ่อเติมอากาศ 7 บ่อ เป็นการเพิ่มออกซิเจนให้น้ำเพื่อลดความสกปรก ทางเลือกใหม่เป็นบ่อหมักย่อยประยุกต์ให้น้ำเสียไหลตามแนวนอนปิดคลุมด้วยพลาสติกความหนาแน่นสูง เพื่อเก็บก๊าซชีวภาพที่ได้ 1,271 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งเทียบเท่าก๊าซหุงต้ม 584 กิโลกรัมต่อวัน โดยใช้ 7 บ่อเดิมที่มีอยู่มาแปลงสภาพ ผลการศึกษาด้านการเงินที่อายุโครงการ 11 ปี และต้นทุนเงินทุนร้อยละ 5 ต่อปี พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 76,055 บาท อัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับร้อยละ 5.06 อัตราผลตอบแทนภายในที่มีการปรับค่าแล้วเท่ากับร้อยละ 5.03 และ ดัชนีกำไรเท่ากับ 1.00 แสดงว่า

โครงการมีความคุ้มค่าในการลงทุน ผลการทดสอบค่าความแปรเปลี่ยน บ่งชี้ว่าโครงการมีความเสี่ยงสูงต้องได้รับการดูแลอย่างใกล้ชิด เนื่องจากโครงการแทบไม่สามารถรับความเปลี่ยนแปลงในทางลบได้เลย [24]

2.8.4.2 การศึกษาความเป็นไปได้ของการบำบัดคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำโดยใช้ผักกระเฉด

การศึกษาความเป็นไปได้ของการบำบัดคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำโดยใช้ผักกระเฉด เพื่อศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ซึ่งได้แก่ ไนเตรท แอมโมเนีย บีโอดี ฟอสฟอรัสรวม ตะกอนแขวนลอย ความเป็นกรด - ด่าง และความเค็ม รวมถึงชีวมวลรวมของผักกระเฉด และปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว ปรอท และแคดเมียม ทั้งในน้ำทิ้งและผักกระเฉด เมื่อใช้ระดับชีวมวลของผักกระเฉดและระยะเวลาในอัตรต่าง ๆ ณ แปลงทดลองสร้างขึ้นภายในพิเชษฐ์ฟาร์มเลี้ยงกุ้งกุลาดำในพื้นที่น้ำจืด อำเภอนาสร้าง จังหวัดปราจีนบุรี ระหว่างเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2546 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2547 ผู้วิจัยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ใช้รูปแบบการทดลอง 5 x 3 Factorial Arrangement (4 ซ้ำ) สำหรับคุณภาพน้ำ และใช้รูปแบบการทดลอง 4 x 3 Factorial Arrangement (4 ซ้ำ) สำหรับการศึกษาชีวมวลของพักกระเฉด จะใช้ผักกระเฉดที่ระดับชีวมวล 0.2 0.4 0.6 และ 0.8 กิโลกรัม โดยมีระดับชีวมวลของผักกระเฉด 0 กิโลกรัมเป็นกลุ่มควบคุม ซึ่งทุกระดับจะทำการศึกษาที่ระยะเวลา 10 20 และ 30 วัน จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า คุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ซึ่งได้แก่ ไนเตรท แอมโมเนีย บีโอดี ฟอสฟอรัสรวม ตะกอนแขวนลอย มีแนวโน้มลดลงตามระดับชีวมวลและระยะเวลาในการบำบัดที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเป็นกรด - ด่าง มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับชีวมวลของผักกระเฉดเพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบำบัดนานขึ้น ขณะที่ความเค็มมีค่าเท่ากับ 0 ppt โดยที่ระดับชีวมวลของผักกีะเฉด 0.8 กิโลกรัม ที่ระยะเวลา 30 วัน จะสามารถบำบัดคุณภาพน้ำทิ้งได้มากกว่าผักกระเฉดในทุก ๆ ระดับ สำหรับชีวมวลรวมของผักกระเฉดนั้น ที่ระดับชีวมวลเริ่มต้น 0.2 กิโลกรัม จะมีชีวมวลเพิ่มขึ้น ส่วนที่ระดับชีวมวลอื่น ๆ มีชีวมวลลดลง นอกจากนี้ปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว ปรอท และแคดเมียม ทั้งในน้ำทิ้งและผักกระเฉด มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด จึงสรุปได้ว่า การใช้ผักกระเฉดบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในเขตพื้นที่น้ำจือมีความเป็นไปได้ แต่ต้องมีระดับชีวมวลของผักกระเฉดกับปริมาณน้ำทิ้งที่เหมาะสมต่อกัน [25]

2.8.4.3 Economic feasibility study for wastewater treatment: A cost–benefit analysis

การจัดการทรัพยากรน้ำ ในส่วนของภาพรวมควรถูกจัดการโดยทีมสหวิชาชีพ (multidisciplinary) ในส่วนของมุมมองการวิจัยทางเศรษฐศาสตร์ในการออกแบบและการดำเนินการตามนโยบายการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำที่มีประสิทธิภาพ แนวทางในการบริหาร

จัดการน้ำตามข้อกำหนดของกฎหมายสหภาพยุโรปว่าด้วยการจัดการลุ่มน้ำ (WFD) การวิเคราะห์ต้นทุน-ผลประโยชน์ (Cost–benefit analysis; CBA) เป็นหนึ่งในวิธีการทางเศรษฐศาสตร์ที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจที่มีระบบ นอกจากนี้ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียยังเกี่ยวข้องกับผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามผลประโยชน์นี้มักไม่ได้ถูกคำนวณเพราะไม่มีมูลค่าตลาด สำหรับงานวิจัยนี้ใช้แนวคิดราคาเงา (shadow price) มีการคำนวณผลประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อมที่มาจากการบำบัดน้ำเสีย การคำนวณผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมใช้การประมาณและคำนวณต้นทุนของระบบบำบัดน้ำเสีย มีการคำนวณกำไรสุทธิ (net profit) 3 กรณี คือ กรณีที่ไม่มีการขายน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว กรณีที่มีการขายน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว 50% และกรณีที่มีการขายน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วทั้งหมด ถึงแม้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย (operating cost) จะสูง แต่ค่าเฉลี่ยของกำไรสุทธิของทั้ง 3 กรณียังให้ค่าที่เป็นบวก แสดงให้เห็นว่าโครงการบำบัดน้ำเสียมีศักยภาพทางเศรษฐศาสตร์ ถึงแม้จะไม่มีการขายน้ำหลังกระบวนการบำบัดก็ตาม ซึ่งการศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์นี้มีประโยชน์สำหรับโรงงานบำบัดน้ำเสีย [26]

จากการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการด้วยการใช้ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินในการแยกทองแดงออกจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ นำมาซึ่งการศึกษาวิศวกรรมต้นทุนและเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม เนื่องจากการพิจารณาผลตอบแทนที่จะได้รับจากโครงการเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ด้านเศรษฐศาสตร์ถึงการวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนที่จะได้จากโครงการ ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการที่ได้รับการยอมรับอย่างมาก

2.9 วิศวกรรมต้นทุน และเศรษฐศาตร์วิศวกรรม

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบต้นแบบสำหรับแยกทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินในระดับเชิงพาณิชย์ จึงควรมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม ซึ่งเป็นการนำเอาเศรษฐศาสตร์มาประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรม เพื่อให้สามารถใช้ทรัพยากรที่มีอยู่กับงานด้านวิศวกรรมอย่างประหยัดหรือใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.9.1 ต้นทุนการผลิต (Cost of Production)

การวิเคราะห์เรื่องต้นทุนการผลิตมีรากฐานมาจากการวิเคราะห์เรื่องการผลิต ทั้งนี้เพราะในการผลิตสินค้า ผู้ผลิตได้รวบรวมปัจจัยการผลิตจากเจ้าของปัจจัยการผลิตมาใช้ในการผลิต ดังนั้นจึงต้องจ่ายค่าผลตอบแทนให้เจ้าของปัจจัยการผลิตนั้นๆ ในรูปของค่าเช่า ค่าจ้าง ดอกเบี้ย และกำไร

ซึ่งค่าใช้จ่ายๆต่างๆที่จ่ายให้กับเจ้าของปัจจัยการผลิตรวมเรียกว่า ต้นทุนการผลิต โดยต้นทุนการผลิต หมายถึง ค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการผลิตสินค้าและบริการในจำนวนที่ต้องการ ต้นทุนการผลิตสามารถจำแนกได้ดังนี้ [27]

ต้นทุนที่เห็นได้ชัด (Explicit Cost) หมายถึง ต้นทุนที่จ่ายออกไปจริงสามารถบันทึกลงในบัญชีได้ เช่น ค่าแรงงาน ค่าวัตถุดิบ ค่าโฆษณา เป็นต้น

ต้นทุนโดยปริยาย (Implicit Cost) หมายถึง ต้นทุนที่ไม่ได้จ่ายออกไปเป็นเงินจริงแต่เป็นค่าเสียโอกาสที่จะใช้ปัจจัยการผลิตไปทำประโยชน์อื่น เรียกว่า “ต้นทุนค่าเสียโอกาส (Opportunity Cost)” เช่น ค่าจ้างตัวเอง หรือค่าเช่าอาคารของตนเอง สิ่งเหล่านี้ถือเป็นต้นทุนการผลิตเพราะเจ้าของปัจจัยการผลิตเสียโอกาสได้รับผลตอบแทน

ต้นทุนทางบัญชี (Accounting Cost) หมายถึง ต้นทุนที่จ่ายออกไปจริงและจดบันทึกลงบัญชีไว้

ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ (Economics Cost) หมายถึง ต้นทุนทุกอย่างที่เกิดขึ้นในการผลิตไม่ว่าจะจ่ายออกไปจริงหรือไม่ก็ตาม ด้วยเหตุนี้ ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์จึงสูงกว่าต้นทุนทางบัญชี ทำให้กำไรทางเศรษฐศาสตร์น้อยกว่ากำไรทางบัญชี

2.9.2 ต้นทุนกับระยะเวลา (Cost and Time Period)

การผลิตแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือระยะการผลิตในระยะสั้นและการผลิตในระยะยาว [28]

การผลิตในระยะสั้น (Short – Run Period) เป็นการผลิตในระยะเวลาที่ประกอบด้วยปัจจัยคงที่ (Fixed Factors) และปัจจัยผันแปร (Variable Factors) ต้นทุนการผลิตในระยะสั้นจึงประกอบด้วยต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร โดยต้นทุนคงที่จะไม่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนผลผลิต ส่วนต้นทุนผันแปรจะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนผลผลิต

การผลิตในระยะยาว (Long – Run Period) เป็นการผลิตในระยะเวลาที่ผู้ผลิตสามารถเปลี่ยนแปลงปัจจัยการผลิตทุกชนิดได้ตามต้องการ ดังนั้น การผลิตในระยะยาวปัจจัยการผลิตทุกชนิดจะเป็นปัจจัยผันแปร ต้นทุนการผลิตในระยะยาวจะประกอบด้วยต้นทุนผันแปรเพียงอย่างเดียว

2.9.2.1 การวิเคราะห์ต้นทุนในระยะสั้น (The Short – Run Cost Analysis)

การผลิตในระยะสั้น ใช้ปัจจัยการผลิต 2 ชนิดคือ ปัจจัยคงที่ และปัจจัยผันแปร ดังนั้น ต้นทุนการผลิตในระยะสั้นจึงมี 2 ชนิดคือ ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) และต้นทุนผันแปร (Variable Cost) สามารถคำนวณหาต้นทุนชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost : FC) ต้นทุนชนิดนี้จะมีจำนวนคงที่ตลอดไม่ว่าปริมาณการผลิตจะมากหรือน้อย แม้จะไม่ทำการผลิตเลยก็จะเกิดต้นทุนคงที่ ต้นทุนประเภทนี้ เช่น ค่าเสื่อมของเครื่องจักร เป็นต้น

ต้นทุนผันแปร (Variable Cost : VC) ต้นทุนนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนสินค้าที่ผลิต ถ้าผลิตมากจะเสียต้นทุนชนิดนี้มาก และถ้าไม่ผลิตก็ไม่เสียเลย ต้นทุนประเภทนี้ เช่น ค่าจ้างแรงงาน เป็นต้น

ต้นทุนรวม (Total Cost : TC) เป็นต้นทุนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการใช้ปัจจัยการผลิตชนิดต่างๆ ในการผลิตสินค้าและบริการจำนวนหนึ่ง ในระยะสั้น ต้นทุนรวมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$TC = TFC + TVC \tag{16}$$

โดย TFC คือ ต้นทุนคงที่ทั้งหมด

TVC คือ ต้นทุนผันแปรทั้งหมด

ต้นทุนคงที่เฉลี่ย (Average Fixed Cost : AFC) เป็นต้นทุนคงที่ทั้งหมดเฉลี่ยต่อปริมาณผลผลิต 1 หน่วย หรือ

$$AFC = \frac{TFC}{Q} \tag{17}$$

โดย TFC คือ ต้นทุนคงที่ทั้งหมด

Q คือ ปริมาณการผลิตทั้งหมด

ต้นทุนผันแปรเฉลี่ย (Average Variable Cost : AVC) เป็นต้นทุนผันแปรทั้งหมดเฉลี่ยต่อปริมาณผลผลิต 1 หน่วย หรือ

$$AVC = \frac{TVC}{Q} \tag{18}$$

โดย TVC คือ ต้นทุนผันแปรทั้งหมด

Q คือ ปริมาณการผลิตทั้งหมด

ต้นทุนเฉลี่ย (Average Cost : AC) เป็นต้นทุนทั้งหมดเฉลี่ยต่อปริมาณผลผลิต 1 หน่วย หรือ

$$AC = \frac{TC}{Q} \tag{19}$$

นอกจากนี้ยังสามารถหาได้จาก AC = AFC + AVC (20)

โดย TC คือ ต้นทุนผันแปร

Q คือ ปริมาณการผลิตทั้งหมด

AFC คือ ต้นทุนคงที่เฉลี่ย

AVC คือ ต้นทุนผันแปรเฉลี่ย

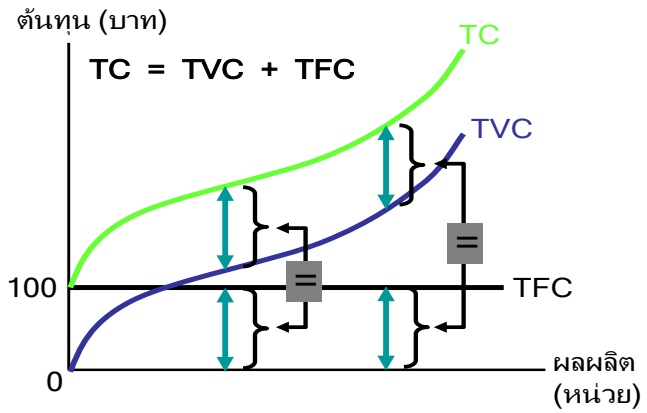
ต้นทุนเพิ่มหรือต้นทุนหน่วยสุดท้าย (Marginal Cost : MC) เป็นการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนรวมเมื่อปริมาณผลผลิตเปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย หรือ

$$MC = \frac{\Delta TC}{\Delta Q} \tag{21}$$

โดย ΔTC คือ ผลต่างของต้นทุนรวม

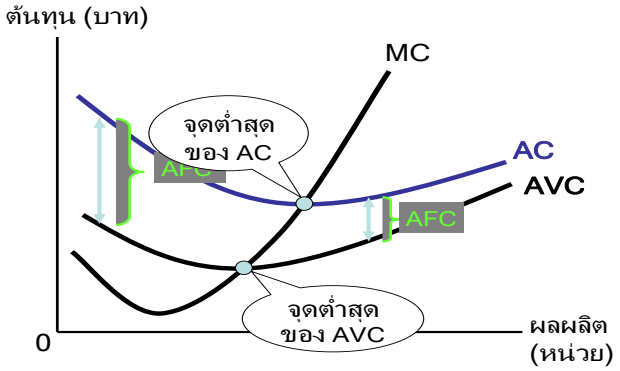
ΔQ คือ ผลต่างของปริมาณการผลิต

จากความสัมพันธ์ของต้นทุนประเภทต่างๆ ในการผลิตระยะสั้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 และ 2.10



รูปที่ 2.9 เส้นต้นทุนรวม ต้นทุนผันแปร และต้นทุนคงที่

ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.**ต้นทุนการผลิตและการตัดสินใจผลิต**. เข้าถึงเมื่อ 29 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก http://bmk.fte.rmuti.ac.th/newbmk/images/elearning/economicanalysis/ch4cost.pdf.



รูปที่ 2.10 เส้นต้นทุนการผลิตระยะสั้นประเภทต่างๆ

ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.**ต้นทุนการผลิตและการตัดสินใจผลิต**. เข้าถึงเมื่อ 29 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก http://bmk.fte.rmuti.ac.th/newbmk/images/elearning/economicanalysis/ch4cost.pdf.

จากความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนผันแปรเฉลี่ยกับต้นทุนเพิ่มและต้นทุนเพิ่มกับต้นทุนเฉลี่ย สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ ได้ดังนี้ [28]

2.9.2.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนผันแปรเฉลี่ย (AVC) กับต้นทุนเพิ่ม (MC)

ตราบที่ MC มีค่าน้อยกว่า AVC , AVC จะมีค่าลดลงเมื่อผู้ผลิตขยายการผลิตออกไป

ตราบที่ MC มีค่ามากกว่า AVC , AVC จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อผู้ผลิตขยายการผลิตออกไป

MC จะมีค่าเท่ากับ AVC ณ จุดที่ AVC มีค่าต่ำสุด

2.9.2.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนเพิ่ม (MC) กับต้นทุนเฉลี่ย (AC)

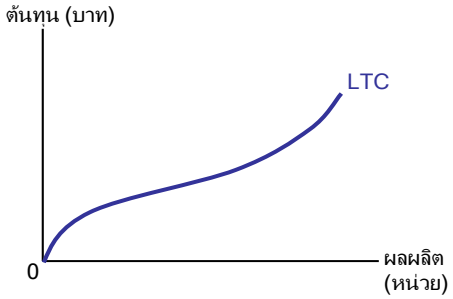
ตราบที่ MC มีค่าน้อยกว่า AC , AC จะมีค่าลดลงเมื่อผู้ผลิตขยายการผลิตออกไป

ตราบที่ MC มีค่ามากกว่า AC , AC จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อผู้ผลิตขยายการผลิตออกไป

MC จะมีค่าเท่ากับ AC ณ จุดที่ AC มีค่าต่ำสุด

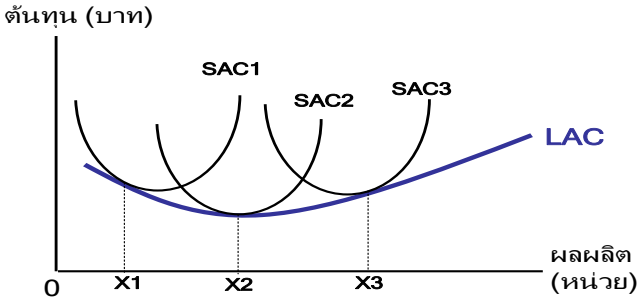
2.9.2.2 การวิเคราะห์ต้นทุนในระยะยาว (Long – Run Cost Analysis)

ในระยะยาวผู้ผลิตสามารถเปลี่ยนแปลงขนาดการผลิตให้เหมาะสมกับที่ต้องการได้ ปัจจัยทุกชนิดที่ใช้ในการผลิตเป็นปัจจัยผันแปร ดังนั้น ต้นทุนการผลิตในระยะยาวจึงมีเฉพาะแต่ต้นทุนผันแปรเท่านั้น โดยในระยะยาวผู้ผลิตสามารถปรับปรุงขนาดของโรงงานให้เหมาะสมกับระดับผลผลิตได้ ดังนั้น จึงสามารถเลือกขนาดของโรงงานที่เสียต้นทุนเฉลี่ยต่ำสุดโดยใช้วิธีการสร้างโรงงานใหม่ให้ใหญ่กว่าเดิมหรือสร้างเพิ่มเติมจากโรงงานเดิม [28]



รูปที่ 2.11 เส้นต้นทุนเฉลี่ยระยะยาว

ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.**ต้นทุนการผลิตและการตัดสินใจผลิต**. เข้าถึงเมื่อ 29 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก http://bmk.fte.rmuti.ac.th/newbmk/images/elearning/economicanalysis/ch4cost.pdf.



รูปที่ 2.12 เส้นต้นทุนเฉลี่ยระยะยาว

ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.**ต้นทุนการผลิตและการตัดสินใจผลิต**. เข้าถึงเมื่อ 29 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก http://bmk.fte.rmuti.ac.th/newbmk/images/elearning/economicanalysis/ch4cost.pdf.

จากรูปที่ 2.12 ให้มีโรงงาน 3 ขนาด แต่ละขนาดเหมาะสมสำหรับการผลิตระดับต่างๆ และแต่ละโรงงานมีต้นทุนเฉลี่ยระยะสั้น (Short-Run Average Cost : SAC) คือ SAC1 SAC2 และ SAC3 ตามลำดับ ในระยะยาวขนาดของโรงงานที่เหมาะสมในการผลิตจะพิจารณาจากปริมาณผลผลิตที่ต้องการคือ ถ้าต้องจำนวนผลผลิต OX1 ต้องสร้างโรงงานที่มีขนาดของต้นทุน SAC1 เพราะจะเสียค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการใช้โรงงานในขนาดอื่นๆ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าในโรงงานขนาดต่างๆ นั้นจะมีอยู่ขนาดหนึ่งซึ่งเหมาะสมที่สุด (Optimum Scale of Plant) คือ เสียต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยต่ำสุดเมื่อ

เปรียบเทียบกับโรงงานในขนาดต่างๆ ขนาดของโรงงานขนาดที่เหมาะสมนี้จะอยู่ ณ จุดต่ำสุดของเส้น SAC ที่สัมผัสกับจุดต่ำสุดของเส้น LAC ดังนั้น โรงงานที่มีต้นทุน SAC2 ผลผลิตที่เหมาะสม (Optimum Output) คือ OX2 หรือเส้นต้นทุนเฉลี่ยในระยะยาว (LAC) ได้มาจากเส้น SAC ของโรงงานขนาดต่างๆ แต่อย่างไรก็ตาม ผู้ผลิตไม่จำเป็นจะต้องสร้างโรงงานที่มีขนาดเหมาะสมที่สุดและทำการผลิต ณ ระดับที่เหมาะสม (Optimum Output) นั้น ยกเว้นในกรณีที่มีการแข่งขันสมบูรณ์ (Perfect Competition) [29]

2.9.3 รายรับจากการผลิต (Revenues)

การที่ผู้ผลิตจะเปลี่ยนแปลงการผลิตหรือไม่นั้นจะพิจารณาจากผลการดำเนินการ ถ้าผลการดำเนินการได้รับกำไรก็จะขยายการผลิต ผลการดำเนินการเป็นการเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนและรายรับจากการผลิต โดยรายรับจากการผลิตคือ รายได้ที่ผู้ผลิตได้รับจากการขายผลผลิตในราคาที่กำหนด ซึ่งถ้าราคาสินค้าสูงขึ้นจำนวนสินค้าที่ขายได้มีปริมาณลดลง รายได้จากการผลิตจะลดลงด้วย และเนื่องจากราคาของสินค้าในแต่ละระดับคือ รายรับของผู้ผลิตจากการขายสินค้านั้นๆ ดังนั้นราคาต่อหน่วยสินค้า ณ ระดับการขายจะเท่ากับรายรับเฉลี่ย (Average Revenue : AR) ของผู้ผลิต ณ ระดับการขายนั่นเอง ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นรายรับรวม รายรับเฉลี่ย และรายรับเพิ่ม [29]

รายรับรวม (Total Revenue : TR) หมายถึง รายรับทั้งหมดที่ผู้ผลิตได้รับจากการขายสินค้า รายรับรวมหาได้จาก

$$TR = P*Q \tag{22}$$

โดยที่ P คือ ราคาสินค้าต่อหน่วย

Q คือ ปริมาณสินค้าที่ขายได้

รายรับเฉลี่ย (Average Revenues : AR) หมายถึง รายรับรวมเฉลี่ยต่อจำนวนสินค้าทั้งหมดที่ขายได้ รายรับเฉลี่ยหาได้จาก

$$AR = \frac{TR}{Q} \tag{23}$$

โดยที่ TR คือ ส่วนเปลี่ยนแปลงของรายรับรวม

Q คือ ส่วนเปลี่ยนแปลงของจำนวนสินค้าที่ขายได้

รายรับเพิ่ม (Marginal Revenue :MR) หมายถึง รายรับรวมที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อขายสินค้าเปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย รายรับเพิ่มหาได้จาก

$$MR = \frac{\Delta TR}{\Delta Q} \tag{24}$$

โดยที่ ΔTR คือ ส่วนเปลี่ยนแปลงของรายรับรวม

ΔQ คือส่วนเปลี่ยนแปลงของจำนวนสินค้าที่ขายได้

โดยความสัมพันธ์ระหว่างรายรับรวม (TR) รายรับเฉลี่ย (AR) และรายรับเพิ่ม (MR) สามารถสรุปได้ดังนี้

ในขณะที่รายรับเพิ่มมีค่าเป็นบวก รายรับรวมจะเพิ่มขึ้นเมื่อขายสินค้าได้เพิ่มขึ้น

เมื่อรายรับเพิ่มมีค่าเป็นศูนย์ รายรับรวมจะมีค่าสูงสุด

เมื่อรายรับเพิ่มมีค่าเป็นลบ รายรับรวมจะมีค่าลดลงเมื่อขายสินค้าเพิ่มขึ้น

ในขณะที่รายรับรวมมีค่าเพิ่มขึ้น รายรับเฉลี่ยและรายรับเพิ่มจะมีค่าลดลง

รายรับเฉลี่ยจะมีค่าลดลงเมื่อขายสินค้าได้เพิ่มขึ้นและมีค่ามากกว่ารายรับเพิ่มเสมอไม่ว่าจะขายสินค้าได้จำนวนเท่าใด

2.9.4 กำไรสูงสุด

กำไร (Profit) หมายถึง ผลต่างระหว่างต้นทุนการผลิตทั้งหมด (Total Cost) กับรายรับจากการขายผลผลิตทั้งหมด (Total Revenue) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [29]

$$P = TR - TC \tag{25}$$

โดยที่ P คือ กำไร

TR คือ รายรับจากการขายผลผลิตทั้งหมด (Total Revenue)

TC คือ ต้นทุนจากการผลิตทั้งหมด (Total Cost)

ต้นทุนในทางเศรษฐศาสตร์จะคำนวณจากรายจ่ายทั้งที่ได้จ่ายจริงและไม่จ่ายจริง หรือรวมต้นทุนค่าเสียโอกาส (Opportunity Cost) ไว้ด้วยจึงสูงกว่าต้นทุนทางบัญชี หรือในทางเศรษฐศาสตร์ได้รวมกำไรปกติ (Normal Profit) ไว้ในต้นทุนการผลิตด้วย ดังนั้น สามารถสรุปความสัมพันธ์ของรายรับรวม (TR) และต้นทุนรวม (TC) ได้ดังนี้ [28]

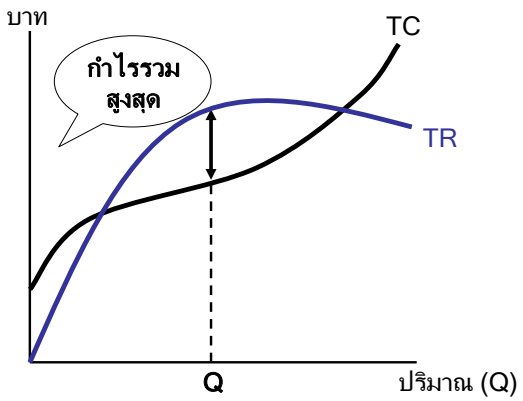
ถ้ารายรับรวม (TR) มีค่าเท่ากับต้นทุนรวม (TC) ผู้ผลิตจะได้รับกำไรปกติ (Normal Profit)

ถ้ารายรับรวม (TR) มีค่ามากกว่าต้นทุนรวม (TC) ผู้ผลิตจะได้รับกำไรเกินปกติหรือกำไรส่วนเกิน (Excess Profit)

ในการผลิตทั่วไป ผู้ผลิตย่อมต้องการได้รับกำไรสูงสุด (Maximized Profit) จากการผลิต การที่จะได้รับกำไรสูงสุดจากการผลิตมีวิธีพิจารณา 2 วิธี [28] คือ

เปรียบเทียบระหว่างค่ารายรับรวม (TR) และค่าต้นทุนรวม (TC) ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการผลิต ปริมาณการผลิตที่จะให้กำไรสูงสุดคือ ปริมาณการผลิตที่ทำให้ค่ารายรับรวม (TR) มากกว่าค่าต้นทุนรวม (TC) มากที่สุด

เปรียบเทียบจากค่ารายรับเพิ่ม (MR) และค่าต้นทุนเพิ่ม (MC) โดยตราบใดที่รายรับเพิ่ม (MR) มากกว่าต้นทุนเพิ่ม (MC) ผู้ผลิตจะสามารถขยายการผลิตออกไปได้จนถึงจุดที่มีค่าเท่ากัน เพราะจะได้รับกำไรเพิ่มขึ้นจากการขยายการผลิตนั้น



รูปที่ 2.13 เส้นกำไรรวมสูงสุด

ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.**ต้นทุนการผลิตและการตัดสินใจผลิต**. เข้าถึงเมื่อ 29 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก http://bmk.fte.rmuti.ac.th/newbmk/images/elearning/economicanalysis/ch4cost.pdf.

2.9.5 การคำนวณหาความเหมาะสมของทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของกระบวนการต้นแบบในการดูดซับทองแดงในสารละลายน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

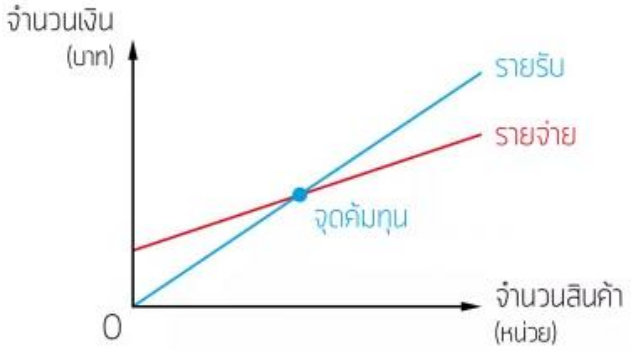
การวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของกระบวนการต้นแบบนี้ ใช้วิธีการคิดต้นทุนรวม (Total cost) ของกระบวนการต้นแบบในการดูดซับทองแดงจากน้ำทิ้งด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน โดยต้นทุนรวม ประกอบด้วยรายจ่ายคงที่ (Fixed cost) เช่น ค่าเช่าที่ และรายจ่ายแปรผันต่อชิ้นสินค้า (Variable cost) เช่น ค่าวัตถุดิบ ค่าจ้าง ค่าไฟฟ้า เป็นต้น วิธีการคิดต้นทุนรวมแสดงดังสมการที่ (26)

ต้นทุนรวม (Total cost) = ต้นทุนสารเคมีและวัตถุดิบต่างๆ + ต้นทุนในระบบการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน + ต้นทุนในระบบการดูดซับ + ต้นทุนในระบบการแยกโลหะทองแดงออกจากตัวดูดซับ + ต้นทุนในส่วนของพลังงาน + ต้นทุนในส่วนของค่าติดตั้ง + ต้นทุนในส่วนของพนักงาน (26)

เนื่องจากการใช้แทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินสามารถดูดซับโลหะทองแดงในน้ำทิ้งและจากกระบวนการต้นแบบสามารถหลอมโลหะทองแดงออกจากตัวดูดซับเพื่อนำทองแดงไปขายต่อได้นั้น จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์การประมาณจุดคุ้มทุน (Break – Even Point Forecasting) และการประมาณระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Period Forecasting)

2.9.5.1 จุดคุ้มทุน

จุดคุ้มทุน หมายถึง ระดับปริมาณการผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เกิดรายได้รวมเท่ากับต้นทุนรวมของกระบวนการ (ต้นทุนผันแปร + ต้นทุนคงที่) หรือจุดที่รายรับเท่ากับรายจ่าย [29] ดังรูปที่ 2.14 โดยการคำนวณจุดคุ้มทุนของการแยกโลหะทองแดงออกจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (27) และ (28)



รูปที่ 2.14 จุดคุ้มทุน

ที่มา: สำนักงานพัฒนาชุมชนอำเภอสุคิริน จ.นราธิวาส. **วิธีคำนวณจุดคุ้มทุน B.E.P. หรือ Break Even Point**. เข้าถึงเมื่อ 29 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก http://sukhirin.cdd.go.th/th/index.php/2015-02-18-15-46-28/111-b-e-p-break-even-point.

$$\text{จุดคุ้มทุน (หน่วยขายที่คุ้มทุน)} = \frac{\text{ต้นทุนคงที่รวม}}{\text{(ราคาขายทองแดงต่อหน่วย – ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย)}} \quad (27)$$

$$\text{จุดคุ้มทุน (ยอดขายที่คุ้มทุน)} = \text{หน่วยขายทองแดงที่คุ้มทุน} * \text{ราคาขายทองแดงต่อหน่วย} \quad (28)$$

การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนเป็นการวางแผนการทำกำไรจากการดำเนินงานของธุรกิจโดยมองที่ราคาขาย ต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนจะใช้ในการวางแผนระยะสั้น ๆ เช่นต่อเดือนหรือต่อปี เป็นต้น [29]

2.9.5.2 ระยะเวลาคืนทุน

ระยะเวลาคืนทุน หมายถึง ระยะเวลาที่ได้รับผลตอบแทนในรูปของกระแสเงินสดเข้าเท่ากับกระแสเงินสดจ่ายลงทุน โดยไม่คำนึงถึงเรื่องมูลค่าของเงินตามระยะเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง การคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนจึงมองที่กระแสเงินสดรับ ไม่ใช่ตัวกำไรหรือขาดทุนของกิจการ โดย ณ จุดได้ที่ผลสะสมของกระแสเงินสดรับเท่ากับเงินลงทุนในครั้งแรกก็จะได้ระยะเวลาคืนทุนนั้นเอง [30] คำนวณได้ดังสมการ (29)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{ปริมาณทองแดง (หน่วย) ณ จุดคุ้มทุน}}{\text{ปริมาณทองแดง (หน่วย) ที่ขายได้โดยเฉลี่ย 1 ปี}} \quad (29)$$

การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนจึงเป็นการวิเคราะห์โครงการลงทุนที่มีระยะค่อนข้างนาน และพิจารณาความเสี่ยงจากการลงทุน เพื่อใช้ในการเลือกโครงการลงทุน โดยดูจากระยะเวลาคืนทุนที่เร็วที่สุด เพราะจะทำให้ผู้ประกอบการมีความเสี่ยงจากการลงทุนน้อยที่สุดด้วย [30]

2.9.5.3 การคำนวณค่าตอบแทนจากการลงทุน (Return on Investment)

การคำนวณค่าตอบแทนจากการลงทุนหรือ ROI คืออัตราส่วนของกำไรสุทธิกับค่าใช้จ่ายของบริษัท เป็นการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางการเงิน คำนวณได้ดังสมการที่ (30) [31]

$$ROI = \frac{\text{รายได้จากการลงทุน} - \text{ต้นทุน}}{\text{ต้นทุน}} * 100\% \quad (30)$$

% ROI ที่ได้จากการคำนวณควรมี % ที่สูง เช่น 80% ROI ตัวเลขที่ได้บอกให้ทราบว่า เมื่อลงทุนไป 100 บาท จะได้ผลประโยชน์สุทธิจากการดำเนินงาน 80 บาทต่อปี

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการแยกไอออนทองแดงในสารละลายด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน และเพื่อออกแบบกระบวนการต้นแบบสำหรับแยกทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมในระดับเชิงพาณิชย์ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ขั้นตอน คือการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน การแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 การขยายขนาดการแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับนำร่อง (Pilot scale) และการคำนวณข้อมูลตัวแปรต่างๆของระบบการแยกทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีทางวิศวกรรมต้นทุนและเศรษฐศาตร์วิศวกรรม

3.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1.1 ใบกระถิน

3.1.1.2 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

3.1.1.3 กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

3.1.1.4 โซเดียมไบคาร์โบเนต ($NaHCO_3$)

3.1.1.5 น้ำกลั่น

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.2.1 ครกบด

3.1.2.2 เตาให้ความร้อนพร้อมเครื่องกวน (Hot Plate Stirrer)

3.1.2.3 ตู้อบ

3.1.2.4 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.1.2.5 เทอร์โมมิเตอร์

3.1.2.6 pH meter

3.1.2.7 เครื่องแก้วที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1.3 วิธีการทดลองสำหรับระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale)

3.1.3.1 นำใบกระถิน 100 กรัม ผสมกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 30 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปกรวย (Conical Flask) ปั่นเพื่อให้สารเข้ากัน โดยมีการทำรีฟลักซ์เพื่อกันการระเหยของสารละลาย ควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.1.3.2 เมื่อครบกำหนดเวลา ปรับ pH ของสารละลายให้เป็นกลางด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต

3.1.3.3 กรองตะกอน และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำตะกอนที่ได้มาอบและบด

3.1.3.4 คำนวณผลผลิตร้อยละของการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน

3.1.4 วิธีการทดลองสำหรับระดับนำร่อง (Pilot scale)

สำหรับระดับนำร่องนี้ จะทำการขยายขนาดการผลิต 10 และ 20 เท่าของระดับห้องปฏิบัติการ

3.1.4.1 อัตราส่วนสำหรับการขยายขนาดการผลิต 10 เท่า นำใบกระถิน 1 กิโลกรัม ผสมกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 300 มิลลิลิตร และสำหรับการขยายขนาดการผลิต 20 เท่า นำใบกระถิน 2 กิโลกรัม ผสมกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 600 มิลลิลิตร

3.1.4.2 นำสารที่ได้จากข้อ 1 ใส่ในขวดรูปกรวย (Conical Flask) ปั่นเพื่อให้สารเข้ากัน โดยมีการทำรีฟลักซ์เพื่อกันการระเหยของสารละลาย ควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.1.4.3 เมื่อครบกำหนดเวลา ปรับ pH ของสารละลายให้เป็นกลางด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต

3.1.4.4 กรองตะกอน และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำตะกอนที่ได้มาอบและบด

3.1.4.5 คำนวณผลผลิตร้อยละของการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถินด้วยการขยายขนาดการผลิตทั้ง 10 เท่าและ 20 เท่า

3.2 การแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

การทดลองนี้ใช้สารละลายทองแดงมาตรฐานความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่อง Inductivity couple plasma spectrometer (ICP) ในการวัดค่าความเข้มข้นของทองแดงหลังการดูดซับ

3.2.1 การแยกทองแดงออกจากสารละลายด้วยตัวดูดซับแทนนินสังเคราะห์จากใบกระถิน

ศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแยกทองแดงในสารละลายด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน ได้แก่ pH เริ่มต้นในสารละลาย อุณหภูมิของสารละลายและน้ำหนักของตัวดูดซับ ดังตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 ในบทที่ 2 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2.2 ปัจจัยและค่าที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		หน่วย
	ต่ำ (-)	สูง (+)	
ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) ของน้ำทิ้ง (A)	5	6	-
อุณหภูมิของน้ำทิ้ง (B)	30	40	องศาเซลเซียส
ปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน (C)	0.4	0.6	กรัม

หมายเหตุ: ทำการศึกษาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงในสารละลาย 50 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตรและระยะเวลาในการดูดซับ 48 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.3 สภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

การทดลอง	(A)	(B)	(C)
1	+	-	-
2	+	-	+
3	+	+	+
4	+	+	-
5	-	-	-
6	-	-	+
7	-	+	+
8	-	+	-

การแยกทองแดงออกจากสารละลายด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินมีวิธีการทดลองดังนี้

3.2.1.1 นำสารละลายทองแดงมาตรฐาน 50 ppm กำหนด ปรับ pH ของสารละลายให้ได้ตามเงื่อนไขที่ต้องการ โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.2.1.2 ใส่ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์ได้จากข้อ 3.1.3 ตามค่าที่ใช้ในการทดลองใส่ลงในสารละลายทองแดงตามอุณหภูมิที่ออกแบบการทดลองไว้แล้ว หลังจากนั้นตั้งสารละลายให้นิ่งโดยไม่มีการกวน เมื่อครบ 48 ชั่วโมง หยุดปฏิกิริยาโดยการกรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย

3.2.1.3 นำสารละลายที่ได้มาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือ ด้วยเครื่อง Inductivity couple plasma spectrometer (ICP)

3.2.1.4 คำนวณความสามารถในการดูดซับทองแดง (มิลลิกรัม) คำนวณได้จากสมการที่ (3) ในบทที่ 2

$$q = (C_i - C_t) V \qquad (3)$$

เมื่อ C_i และ C_t คือ ความเข้มข้นของทองแดงเริ่มต้นและที่เวลา t ใดๆ (มิลลิกรัม/ลิตร) และ V คือ ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)

3.2.1.5 จากการทดลองนี้จะได้ค่าสภาวะที่เหมาะสม (Optimum) ของค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) ของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลายและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินในการแยกทองแดงออกจากสารละลาย ทำให้ได้ความสามารถสูงสุดในการดูดซับทองแดง นำค่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดมาทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง เพื่อคำนวณหาความสามารถสูงสุดในการดูดซับทองแดง

3.3 การขยายขนาดการแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับนำร่อง (Pilot scale)

นำค่าสภาวะที่เหมาะสม (Optimum) ของค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) ของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลายและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.2 มาใช้ในการขยายขนาดในระดับนำร่อง โดยศึกษาการขยายขนาดที่ 10 และ 20 เท่าของระดับปฏิบัติการ โดยนำตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.1.4 มาใช้ในการทดลอง

3.3.1 การขยายขนาด 10 เท่าของระดับปฏิบัติการ

3.3.1.1 นำสารละลายทองแดงมาตรฐาน 500 ppm ปริมาตร 250 มิลลิลิตร กำหนด ปรับ pH ของสารละลายให้ได้ตามเงื่อนไขสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3.1.2 ใส่ตัวดูดซับน้ำหนัก 10 เท่าตามเงื่อนไขสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 ลงในสารละลายทองแดงตามอุณหภูมิที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 หลังจากนั้นตั้งสารละลายให้นิ่งโดยไม่มีการกวน เมื่อครบ 48 ชั่วโมง หยุดปฏิกิริยาโดยการกรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย

3.3.1.3 นำสารละลายที่ได้มาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือ ด้วยเครื่อง Inductivity couple plasma spectrometer (ICP)

3.3.1.4 คำนวณความสามารถในการดูดซับทองแดง (มิลลิกรัม) คำนวณได้จากสมการที่ (3)

3.3.1.5 จากข้อ 3.3.1.1 - 3.3.1.4 ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.3.2 การขยายขนาด 20 เท่าของระดับปฏิบัติการ

3.3.2.1 นำสารละลายทองแดงมาตรฐาน 1000 ppm ปริมาตร 500 มิลลิลิตร กำหนด ปรับ pH ของสารละลายให้ได้ตามเงื่อนไขสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3.2.2 ใส่ตัวดูดซับน้ำหนัก 20 เท่าตามเงื่อนไขสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 ลงในสารละลายทองแดงตามอุณหภูมิที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 หลังจากนั้นตั้งสารละลายให้นิ่งโดยไม่มีการกวน เมื่อครบ 48 ชั่วโมง หยุดปฏิกิริยาโดยการกรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย

3.3.2.3 นำสารละลายที่ได้มาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือ ด้วยเครื่อง Inductivity couple plasma spectrometer (ICP)

3.3.2.4 คำนวณความสามารถในการดูดซับทองแดง (มิลลิกรัม) คำนวณได้จากสมการที่ (3)

3.3.2.5 จากข้อ 3.3.2.1 - 3.3.2.4 ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

ผลการทดลองในหัวข้อนี้เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงในสารละลายด้วยแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินที่ได้จากการขยายขนาดการผลิต 10 และ 20 เท่า เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงที่ได้จากในระดับห้องปฏิบัติการที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของข้อ 3.2

3.4 การคำนวณข้อมูลตัวแปรต่างๆของระบบการแยกทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีทางวิศวกรรมต้นทุนและเศรษฐศาตร์วิศวกรรม

การวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของกระบวนการต้นแบบในการดูดซับทองแดงจากน้ำทิ้งด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน ใช้วิธีการคิดต้นทุนรวม (Total cost) ตามสมการที่ (26) ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 คือ

ต้นทุนรวม (Total cost) = ต้นทุนสารเคมีและวัตถุดิบต่างๆ + ต้นทุนในระบบการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน + ต้นทุนในระบบการดูดซับ + ต้นทุนในระบบการแยกโลหะทองแดงออกจากตัวดูดซับ + ต้นทุนในส่วนของพลังงาน + ต้นทุนในส่วนของค่าติดตั้ง + ต้นทุนในส่วนของพนักงาน (26)

เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะแยกทองแดงออกจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จึงจำเป็นต้องตั้งสมมติฐานดังนี้

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้มีเงินทุนและกระแสเงินสดสำหรับการลงทุนในทุกโครงการโดยไม่ต้องกู้เงินผ่านธนาคาร นอกจากนี้องค์กรยังสามารถสนับสนุนค่าใช้จ่ายจำเป็นที่เกิดขึ้นและค่าใช้จ่ายรายเดือน (Capital Expenditure (CAPEX))

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้มีพื้นที่เพียงพอในการติดตั้งเครื่องมือ เครื่องจักรและอุปกรณ์ไม่ต้องเช่าที่ดินเพิ่ม ในขณะที่องค์กรบรรลุเป้าหมายมาตรฐานความปลอดภัยอาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม (HSE)

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้มีการปล่อยน้ำทิ้ง 50 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้มีการปล่อยน้ำทิ้งที่มีโลหะทองแดงเจือปนประมาณ 5,000 ppm ต่อวัน

น้ำทิ้งของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้มีเพียงโลหะทองแดงเท่านั้นที่เจือปน

ระบบการแยกทองแดงออกจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้ เป็นระบบแบบไม่ต่อเนื่อง

ราคาของสารเคมี วัตถุดิบต่างๆที่ทางผู้จัดส่ง (supplier) เสนอให้กับทางอุตสาหกรรม ได้รวมค่าจัดส่งที่จัดสามารถส่งถึงอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้ (Incoterm Delivered Duty Unpaid (DDU) หรือ Delivered Duty Paid (DDP))

ไม่มีการคิดค่าเสื่อมราคาในระบบการแยกทองแดงออกจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้

ไม่มีการคิดค่าซ่อมบำรุงเครื่องจักรและอุปกรณ์ในระบบการแยกทองแดงออกจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้

อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้ คำนวณโดยใช้เกณฑ์ของสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (The Board of Investment of Thailand: BOI) เนื่องจากอุตสาหกรรมแห่งนี้ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่ส่งเสริมการลงทุน

3.4.1 ต้นทุนคงที่

ต้นทุนรวมประกอบด้วย 4 ส่วน ดังนี้

3.4.1.2 ต้นทุนในระบบการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน

ประเมินต้นทุนราคาของระบบจากราคาสารเคมีและราคาอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตที่ผู้จัดส่ง (supplier) เสนอให้กับทางอุตสาหกรรม

3.4.1.2 ต้นทุนในระบบการดูดซับ

ประเมินต้นทุนราคาของอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในระบบการดูดซับ จากราคาที่ผู้จัดส่ง (supplier) เสนอให้กับทางอุตสาหกรรม

3.4.1.3 ต้นทุนในระบบการแยกโลหะทองแดงออกจากตัวดูดซับ

ประเมินต้นทุนราคาของอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการหลอมโลหะทองแดงเพื่อกลับคืนมาจากตัวดูดซับ จากราคาที่ผู้จัดส่ง (supplier) เสนอให้กับทางอุตสาหกรรม

3.4.1.4 ต้นทุนในส่วนของค่าติดตั้ง

ประเมินต้นทุนราคาของการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน ระบบการดูดซับ และระบบการแยกโลหะทองแดงออกจากตัวดูดซับที่ผู้จัดส่ง (supplier) เสนอให้กับทางอุตสาหกรรม

ดังนั้นต้นทุนคงที่รวมของกระบวนการต้นแบบในการดูดซับทองแดงจากน้ำทิ้งด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน คือต้นทุนรวมทั้งหมดของ 3.4.1.1 ถึง 3.4.1.4

3.4.2 ต้นทุนผันแปร

ต้นทุนผันแปรประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

3.4.2.1 ต้นทุนของสารเคมี และวัตถุดิบต่างๆ

ประเมินต้นทุนราคาของสารเคมี และวัตถุดิบต่างๆจากราคาที่ผู้จัดส่ง (supplier) เสนอให้กับทางอุตสาหกรรม

3.4.2.2 ต้นทุนในส่วนของพลังงาน

ประเมินต้นทุนพลังงานจากอัตราค่าไฟฟ้า อัตราการใช้ไฟของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ และจำนวนชั่วโมงการทำงาน

3.4.2.3 ต้นทุนในส่วนของพนักงาน

ประเมินจากจำนวนพนักงานที่ดูแลระบบและค่าจ้างพนักงาน

3.4.3 จุดคุ้มทุน

จุดคุ้มทุนสามารถคำนวณตามสมการที่ (27) คือ

$$\text{จุดคุ้มทุน (หน่วยขายที่คุ้มทุน)} = \frac{\text{ต้นทุนคงที่รวม}}{(\text{ราคาขายทองแดงต่อหน่วย} - \text{ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย})} \quad (27)$$

โดยราคาขายทองแดงต่อหน่วยยึดตามราคาขายทองแดงโลก

3.4.4 ระยะเวลาคืนทุน

ระยะเวลาคืนทุนสามารถคำนวณตามสมการที่ (29) คือ

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{ปริมาณทองแดง (หน่วย) ณ จุดคุ้มทุน}}{\text{ปริมาณทองแดง (หน่วย) ที่ขายได้โดยเฉลี่ย 1 ปี}} \quad (29)$$

โดยปริมาณทองแดง (หน่วย) ที่ขายได้โดยเฉลี่ย 1 ปี คำนวณจากปริมาณทองแดงที่สามารถหลอมกลับคืนมาได้จากตัวดูดซับ

ภาพรวมขั้นตอนทั้งหมดของการดำเนินงานวิจัยแสดงในภาคผนวก ค

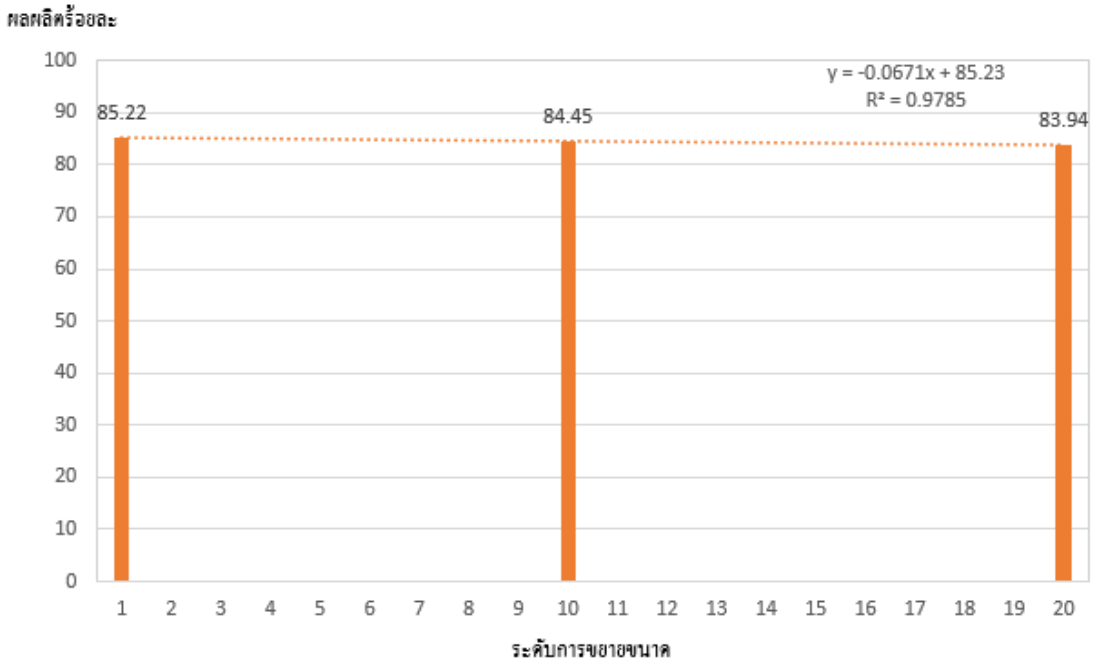
บทที่ 4
ผลการดำเนินงานวิจัยและการอภิปรายผล

เนื่องจากงานวิจัยนี้ แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ การสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน การแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 การขยายขนาดการแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับนำร่อง (Pilot scale) และการคำนวณข้อมูลตัวแปรต่างๆของระบบการแยกทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีทางวิศวกรรมต้นทุนและเศรษฐศาตร์วิศวกรรม

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งหมดสามารถแสดงผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลองได้ตามลำดับดังนี้

4.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน

หัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลผลิตร้อยละของการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถินในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) และในระดับนำร่อง (Pilot scale) ซึ่งในระดับนำร่องมีการขยายขนาดการผลิตเป็น 10 และ 20 เท่า ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ข.1 โดยสามารถเปรียบเทียบค่าผลผลิตร้อยละของการผลิตทั้ง 3 ขนาดได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลผลิตร้อยละของตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินในระดับห้องปฏิบัติการ (1 เท่า) และในระดับนำร่อง (10 และ 20 เท่า)

จากรูปที่ 4.1 พบว่าผลผลิตร้อยละ (%Yield) ของการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถินในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) มีค่า 85.22 และในระดับนำร่อง (Pilot scale) ที่มีการขยายขนาดการผลิตเป็น 10 เท่า มีค่าผลผลิตร้อยละ 84.42 และจากการขยายขนาดการผลิตเป็น 20 เท่า มีค่าผลผลิตร้อยละ 83.94 จากค่าผลผลิตร้อยละทั้งสามค่านี้ นำมาซึ่งสมการคำนวณค่าผลผลิตร้อยละ ดังสมการที่ (31)

$$y = -0.0671x + 85.23 \quad (31)$$

เมื่อ x คือระดับของการขยายขนาด และ y คือค่าผลผลิตร้อยละของตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

จากค่าผลผลิตร้อยละของการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถินในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับนำร่องที่มีการขยายขนาดการผลิตเป็น 10 และ 20 เท่านั้น มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination : R Square: R^2) ที่ 0.9785 โดยค่า x

สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า y ได้ 97.85 % นั่นหมายถึงสมการที่ได้มีประสิทธิภาพสูงในการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร

รูปที่ 4.2 การกรองตะกอนแทนนิน

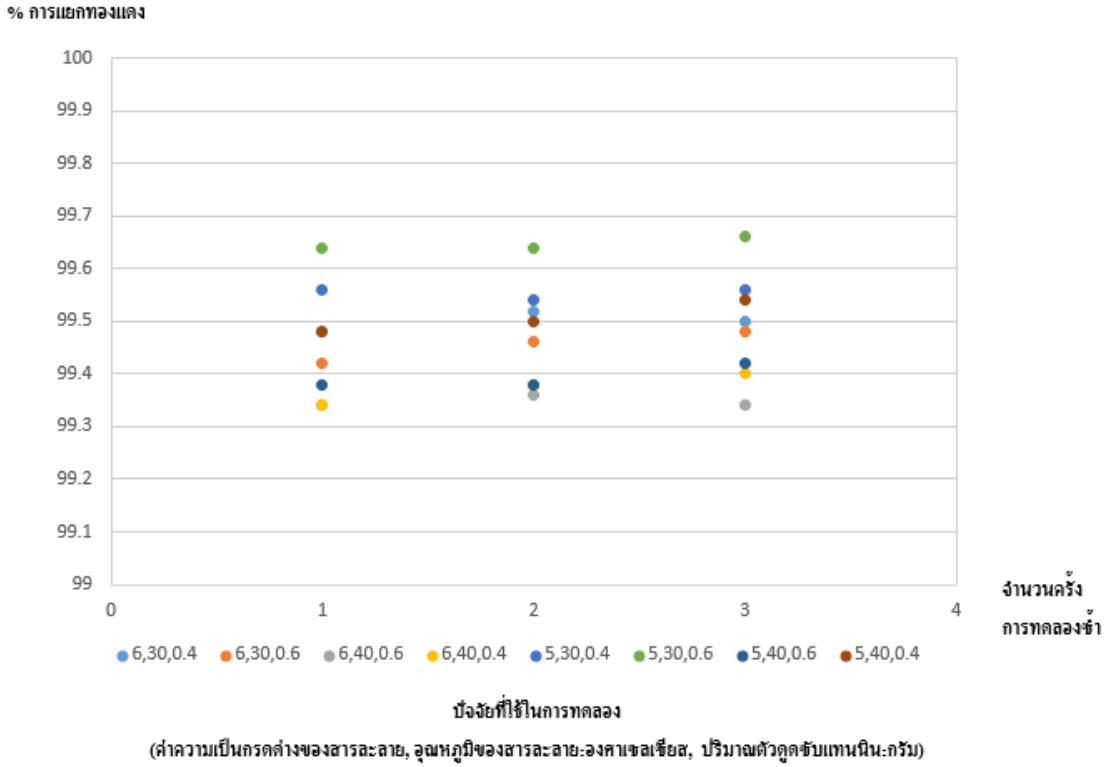
รูปที่ 4.3 ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

ค่าผลผลิตร้อยละของตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน จากการขยายขนาดการผลิตเป็น 10 และ 20 เท่านั้น พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าผลผลิตร้อยละที่ได้จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ จากรูปที่ 4.1 พบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มเป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งความคลาดเคลื่อนของ

ค่าผลผลิตร้อยละของการขยายขนาดนั้น อาจเป็นผลมาจากขั้นตอนการกรองตะกอนและล้างตะกอน เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการเคมีมีขนาดที่จำกัด แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 จึงไม่สามารถกรองตะกอนและล้างตะกอนได้ในครั้งเดียว ผู้วิจัยต้องแบ่งกรองตะกอนและล้างตะกอนหลายรอบ อาจส่งผลให้ตัวดูดซับแทนนินสูญหายได้ในขณะทำการทดลอง อย่างไรก็ดีวิธีการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถินนี้ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ตัวดูดซับแทนนินที่ได้มีสีดำตามรูปที่ 4.3 สามารถใช้วิธีการสังเคราะห์นี้ในการขยายขนาดการผลิต โดยการปรับอัตราส่วนระหว่างใบกระถินและกรดซัลฟิวริกเข้มข้นในอัตราส่วนเริ่มต้นใบกระถิน 100 กรัมต่อกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 30 มิลลิลิตร เช่นถ้าต้องการขยายขนาดการผลิตเป็น 50 เท่า ให้ทำการปรับอัตราส่วนใช้ใบกระถิน 5,000 กรัม หรือ 50 กิโลกรัมต่อกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1,500 มิลลิลิตร หรือ 1.5 ลิตร ซึ่งถ้าคำนวณตามสมการที่ (31) จะได้ค่าผลผลิตร้อยละ 81.88 หรือสามารถสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถินได้ 40.94 กิโลกรัม

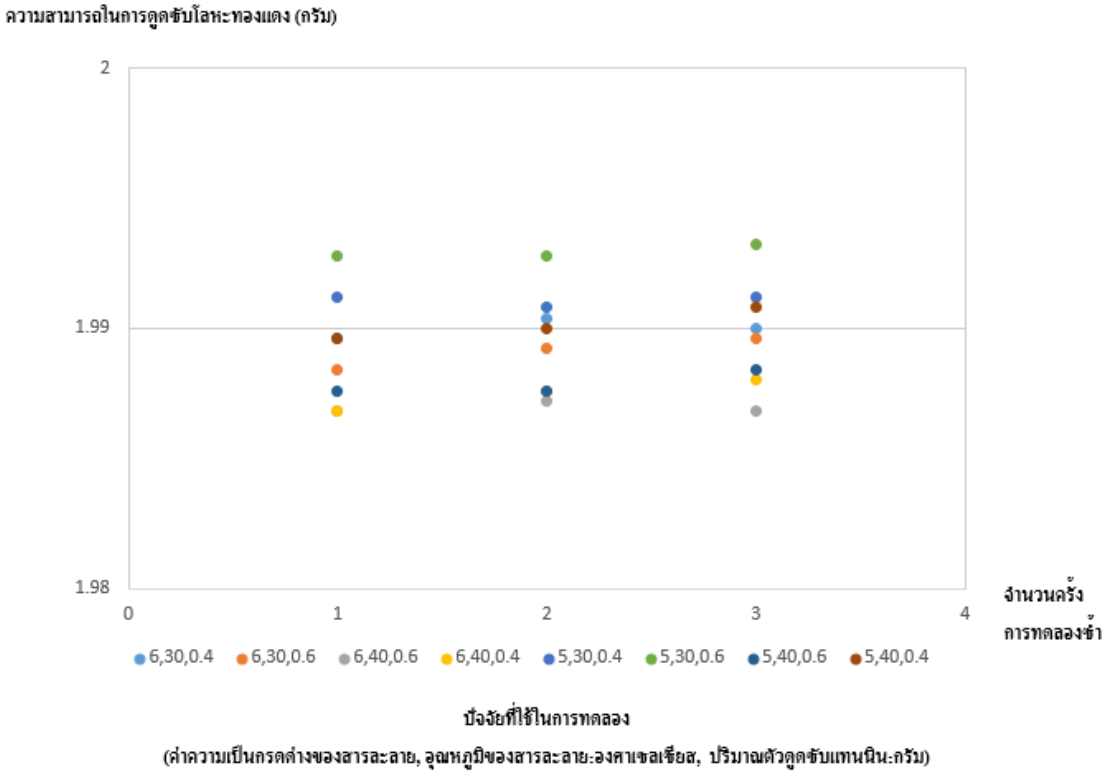
4.2 การแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

การทดลองนี้ใช้สารละลายทองแดงมาตรฐานความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ทำการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายทองแดงหลังการดูดซับ โดยใช้เครื่อง Inductivity couple plasma spectrometer (ICP) ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการศึกษาปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย คือค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลายและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน โดยมีจำนวนของการทดลองเท่ากับ 8 การทดลอง ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวมการทดลองทั้งสิ้น 24 การทดลอง ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ข.2 และผลการคำนวณร้อยละการแยกทองแดง (% Recovery) แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ร้อยละการแยกทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่ปัจจัยต่างๆ

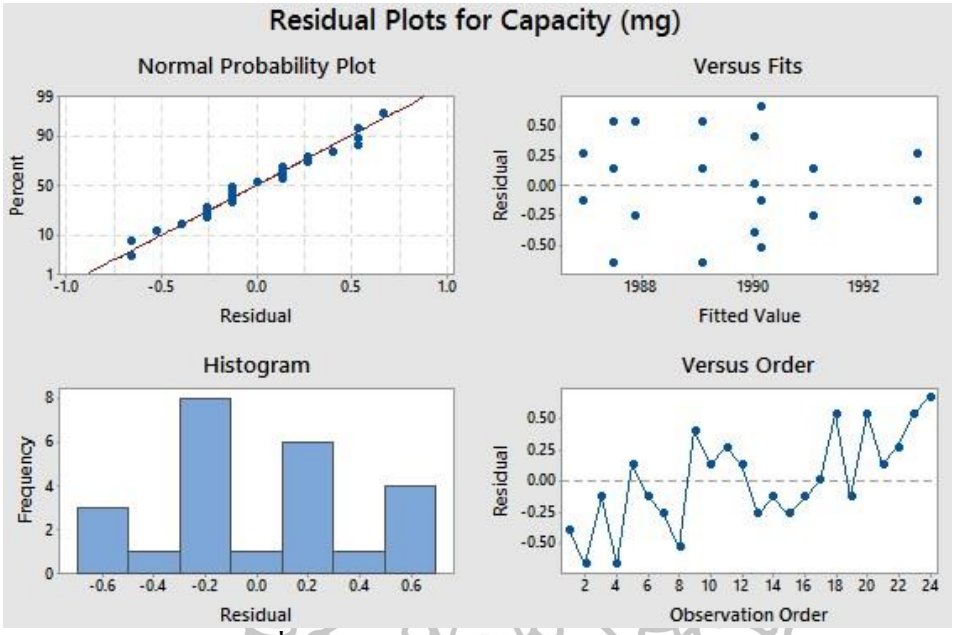
จากรูปที่ 4.4 พบว่าทั้ง 24 การทดลองมีค่าร้อยละการแยกทองแดงมากกว่า 99 โดยปัจจัยที่ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลาย 5 อุณหภูมิของสารละลาย 30 องศาเซลเซียสและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน 0.6 กรัม ให้ค่าร้อยละการแยกทองแดงมากที่สุดทุกการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละการแยกทองแดง 99.65



รูปที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดง (กรัม) ด้วยตัวดูดซับแทนนินที่ปัจจัยต่างๆ

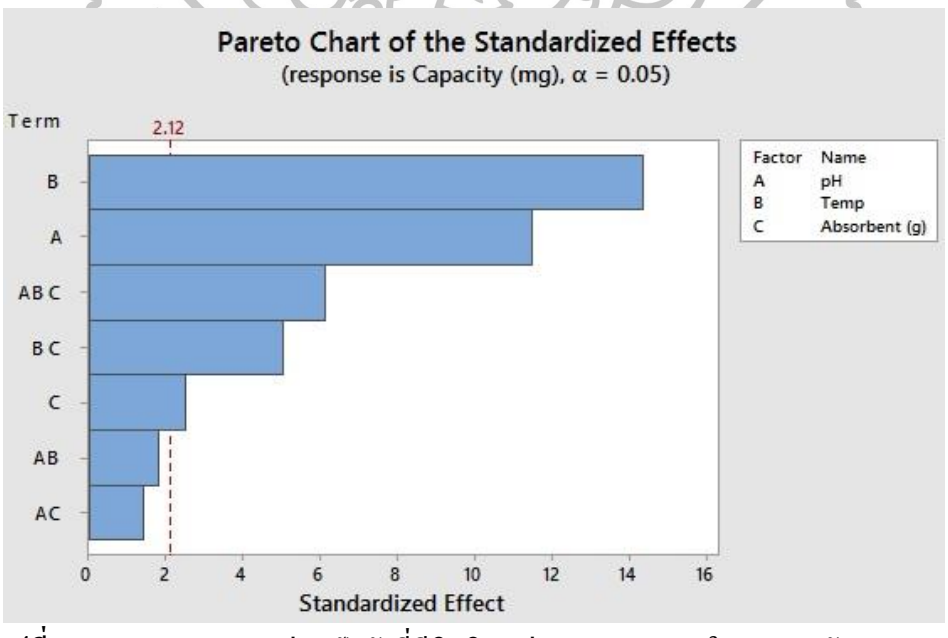
เมื่อคำนวณความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินตามสมการที่ (3) พบว่าการทดลองทั้ง 24 การทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ให้ค่าความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงมากกว่า 1.986 กรัม โดยปัจจัยที่ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลาย 5 อุณหภูมิของสารละลาย 30 องศาเซลเซียสและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน 0.6 กรัม มีค่าความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงมากที่สุดทั้ง 3 ครั้งของการทดลองซ้ำ โดยมีค่าเฉลี่ยความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงที่ 1.993 กรัม

จากข้อมูลที่ได้เชิงแฟกทอเรียล เมื่อนำมาวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อแสดงความถูกต้องของรูปแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab 17 แสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูล

จากการพิจารณารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ตามรูปที่ 4.6 พบว่ามีการกระจายแบบปกติ ลักษณะจุดของส่วนตกค้างบนกราฟเรียงตัวกันมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงและมีความเป็นอิสระต่อกัน จากกราฟพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ จึงสามารถสรุปได้ว่าการทดลองทั้ง 24 การทดลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ



รูปที่ 4.7 ผลกระทบของแต่ละปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

Factorial Regression: Capacity (mg) versus pH, Temp, Absorbent (g)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	85.3067	12.1867	58.97	0.000
Linear	3	71.2800	23.7600	114.97	0.000
pH	1	27.3067	27.3067	132.13	0.000
Temp	1	42.6667	42.6667	206.45	0.000
Absorbent (g)	1	1.3067	1.3067	6.32	0.023
2-Way Interactions	3	6.3200	2.1067	10.19	0.001
pH*Temp	1	0.6667	0.6667	3.23	0.091
pH*Absorbent (g)	1	0.4267	0.4267	2.06	0.170
Temp*Absorbent (g)	1	5.2267	5.2267	25.29	0.000
3-Way Interactions	1	7.7067	7.7067	37.29	0.000
pH*Temp*Absorbent (g)	1	7.7067	7.7067	37.29	0.000
Error	16	3.3067	0.2067		
Total	23	88.6133			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.454606	96.27%	94.64%	91.60%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		1989.43	0.09	21438.77	0.000	
pH	-2.1333	-1.0667	0.0928	-11.49	0.000	1.00
Temp	-2.6667	-1.3333	0.0928	-14.37	0.000	1.00
Absorbent (g)	-0.4667	-0.2333	0.0928	-2.51	0.023	1.00
pH*Temp	0.3333	0.1667	0.0928	1.80	0.091	1.00
pH*Absorbent (g)	-0.2667	-0.1333	0.0928	-1.44	0.170	1.00
Temp*Absorbent (g)	-0.9333	-0.4667	0.0928	-5.03	0.000	1.00
pH*Temp*Absorbent (g)	1.1333	0.5667	0.0928	6.11	0.000	1.00

รูปที่ 4.8 ผลจากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab 17

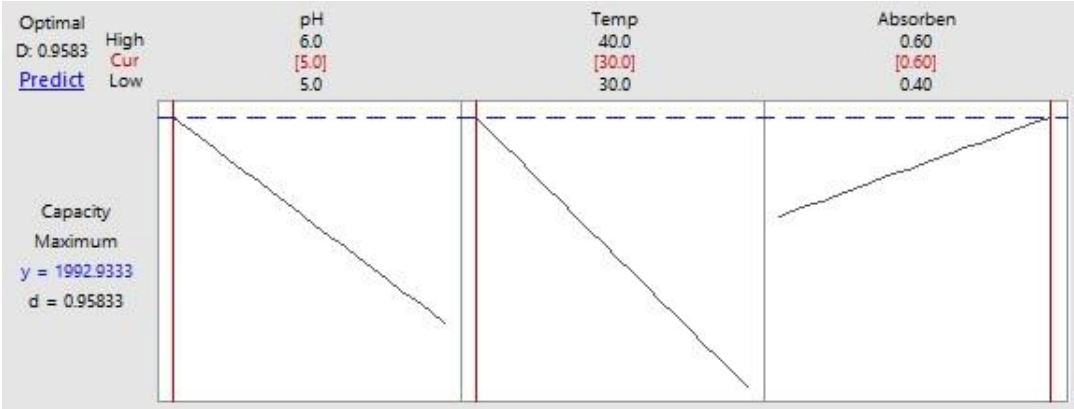
ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงแผนภาพพาเรนโตตามรูปที่ 4.7 และการวิเคราะห์ความถดถอย (Factorial regression) ตามรูปที่ 4.8 พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีรายละเอียดดังนี้

ผลกระทบปัจจัยเดี่ยว (Main Effect): ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองได้แก่ ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลายและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (2-Ways Interactions): ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองได้แก่ อุณหภูมิของสารละลายและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (3-Ways Interactions): ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองได้แก่ ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลายและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

เงื่อนไขทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้น มีผลต่อความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 4.9 ระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ผลของการหาจุดที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน จากค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab 17 ตามรูปที่ 4.9 พบว่าปัจจัยที่แนะนำมีค่าค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลาย 5 อุณหภูมิของสารละลาย 30 องศาเซลเซียสและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน 0.6 กรัม ซึ่งจากค่าที่โปรแกรม Minitab 17 แนะนำนี้ สอดคล้องกับผลการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยที่เงื่อนไขค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลาย 5 อุณหภูมิของสารละลาย 30 องศาเซลเซียสและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน 0.6 กรัม มีค่าความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงเฉลี่ย 1,992.93 มิลลิกรัม

จากงานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับโลหะทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนิน ส่วนมากไอโซเทอมในการดูดซับทองแดงสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ตัวอย่างงานวิจัยเช่น Biosorption of Cu(II) from aqueous solutions by mimosa tannin gel [32], Adsorptive removal of Cu(II) from aqueous solutions using collagen-tannin resin [33] และ Adsorption of heavy metal ions by tannin gel [34]

แบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์ แสดงดังสมการที่ (31) [32]

$$\frac{Ce}{Qe} = \frac{1}{KL} + \frac{aL}{KL} Ce \qquad (31)$$

เมื่อ Ce คือ ความเข้มข้นของสารละลายทองแดงที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

Qe คือ ความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

KL และ aL คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

จากงานวิจัย Copper recovery from aqueous solution using tannin adsorbent synthesized from Thai plant ของนางสาวญาชนาภา ญาณชวกุล ที่ได้ทำการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน มีค่าคงที่แลงเมียร์ KL และ aL เท่ากับ 20.247 และ 0.54 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ [5] จึงเป็นที่มาของสมการแบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์ของการดูดซับโลหะทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน แสดงได้ดังสมการที่ (32)

$$\frac{Ce}{Qe} = \frac{1}{20.247} + \frac{0.54}{20.247} Ce \qquad (32)$$

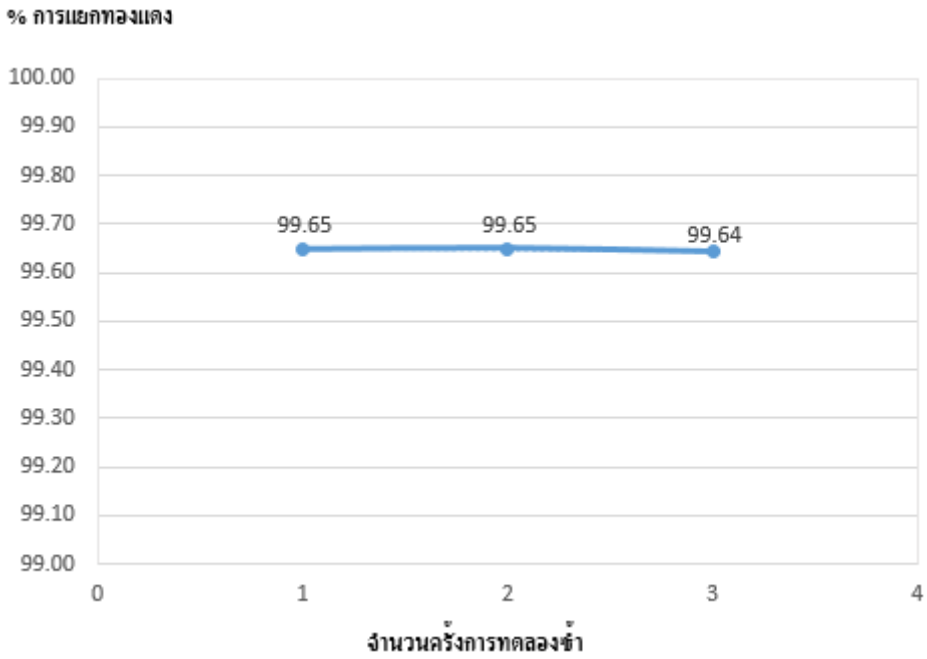
ผลจากการคำนวณความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงด้วยสมการที่ (32) โดยใช้ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายทองแดงหลังการดูดซับด้วยเงื่อนไขค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลาย 5 อุณหภูมิของสารละลาย 30 องศาเซลเซียสและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน 0.6 กรัม พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดง 3,321.60 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อพิจารณาพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงจากการทดลอง 3,321.56 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับทฤษฎีแบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์

4.3 การขยายขนาดการแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับนำร่อง (Pilot scale)

ค่าสภาวะที่เหมาะสม (Optimum) ที่ได้จากหัวข้อ 3.2 มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลาย 5 อุณหภูมิของสารละลาย 30 องศาเซลเซียสและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน 0.6 กรัม ทำการขยายขนาด 10 และ 20 เท่าของระดับปฏิบัติการดังนี้

4.3.1 การขยายขนาด 10 เท่าของระดับปฏิบัติการ

การทดลองนี้ใช้สารละลายทองแดงมาตรฐานความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm ปริมาตร 250 มิลลิลิตรและตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน 6 กรัม นำสารละลายหลังการดูดซับวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือ ด้วยเครื่อง Inductivity couple plasma spectrometer (ICP) ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ข.3 และผลคำนวณร้อยละการแยกทองแดง (% Recovery) แสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ร้อยละการแยกทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่ระดับการขยายขนาด 10 เท่า

จากรูปที่ 4.10 พบว่าร้อยละการแยกทองแดงที่ระดับการขยายขนาด 10 เท่า ทั้ง 3 การทดลองมีค่ามากกว่า 99 โดยร้อยละการแยกทองแดงเฉลี่ย 99.65 และยังพบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง แสดงว่าผลการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง เกิดจากกระบวนการทดลองที่มีความคงสภาพ (Stable) ซึ่งเมื่อคำนวณความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงด้วยแบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์ตามสมการที่ (33) เปรียบเทียบกับค่าสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงจากผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

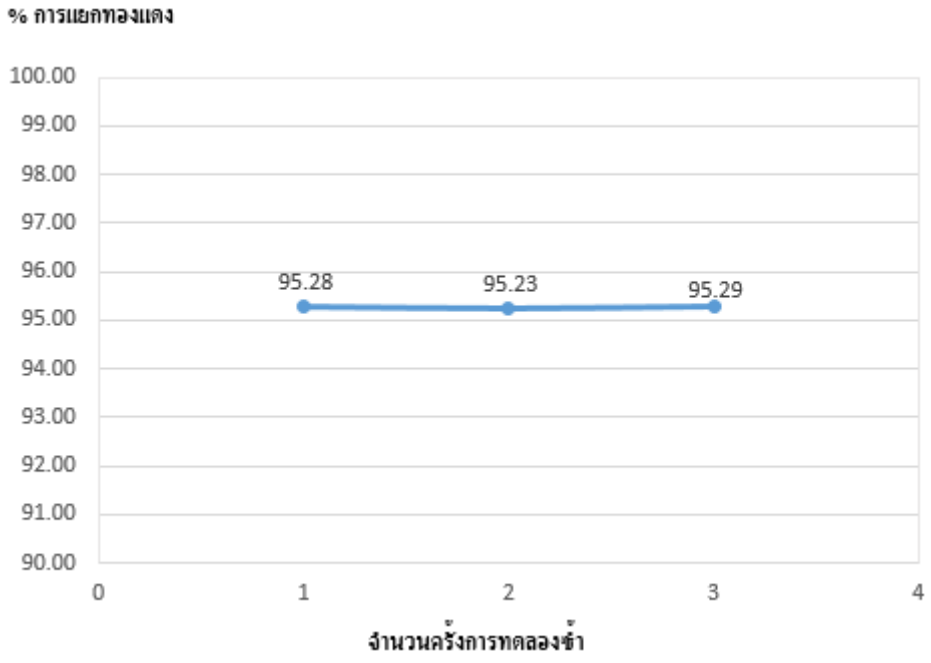
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงจากผลการทดลองและจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์ที่การขยายขนาด 10 เท่า

จำนวนครั้งการทดลอง	**ความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดง (มิลลิกรัมต่อกรัม)**		**ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)**
	ผลจาการทดลอง	**ผลจากการคำนวณ**	
1	325.367	324.637	0.516
2	325.300	324.998	0.213
3	325.333	324.818	0.364
ค่าเฉลี่ย	325.333	324.818	0.365

จากตารางที่ 4.1 ความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์ จากการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้งพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้ง 3 การทดลองมีค่าเฉลี่ย 0.365 แสดงว่าผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณอยู่ใกล้กับค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับทฤษฎีแบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์

4.3.2 การขยายขนาด 20 เท่าของระดับปฏิบัติการ

การทดลองนี้ใช้สารละลายทองแดงมาตรฐานความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 ppm ปริมาตร 500 มิลลิลิตรและตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน 12 กรัม นำสารละลายทองแดงหลังการดูดซับวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือ ด้วยเครื่อง Inductivity couple plasma spectrometer (ICP) ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ข.4 และผลการคำนวณร้อยละการแยกทองแดง (% Recovery) แสดงได้ดังรูปที่ 4.11



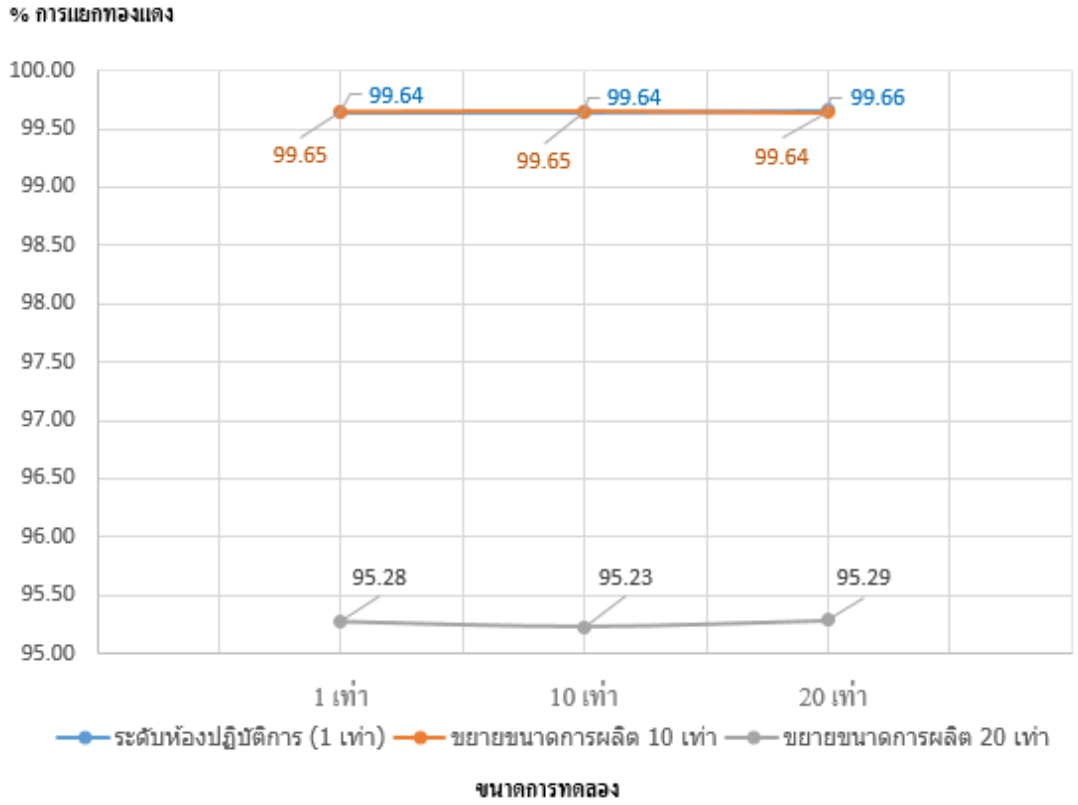
รูปที่ 4.11 ร้อยละการแยกทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่ระดับการขยายขนาด 20 เท่า

จากรูปที่ 4.11 พบว่าร้อยละการแยกทองแดงที่ระดับการขยายขนาด 20 เท่า ทั้ง 3 การทดลองมีค่ามากกว่า 95 โดยร้อยละการแยกทองแดงเฉลี่ย 95.27 และยังพบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง แสดงว่าผลการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง เกิดจากกระบวนการทดลองที่มีความคงสภาพ (Stable) ซึ่งเมื่อคำนวณความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงด้วยแบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์ตามสมการที่ (33) เปรียบเทียบกับค่าสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงจากผลการทดลอง แสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงจากผลการทดลองและจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์ที่การขยายขนาด 20 เท่า

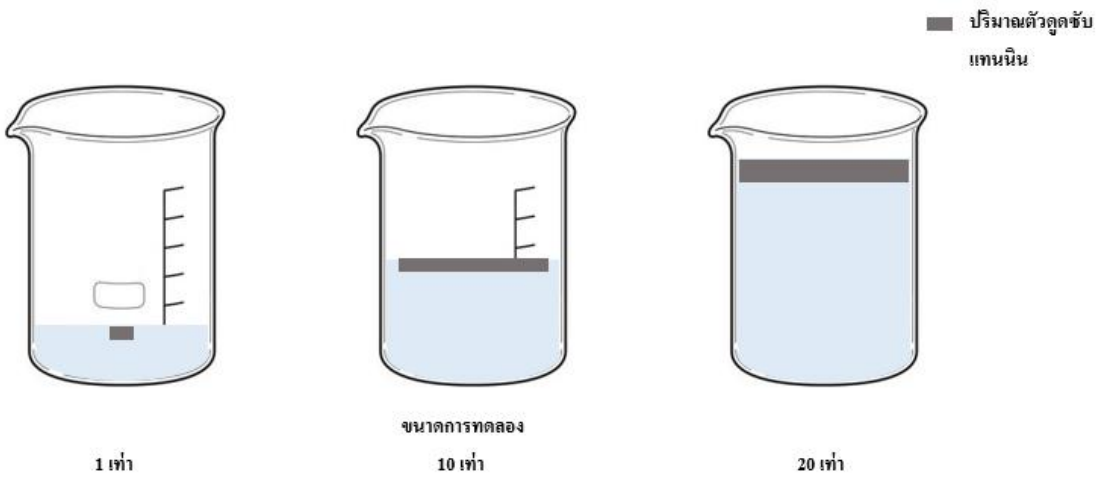
จำนวนครั้งการทดลอง	ความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดง (มิลลิกรัมต่อกรัม)		ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)
	ผลจากการทดลอง	ผลจากการคำนวณ	
1	158.800	180.390	15.270
2	158.720	180.470	15.380
3	158.820	180.380	15.250
ค่าเฉลี่ย	158.780	180.410	15.300

จากตารางที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์ ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง เนื่องด้วยการคำนวณความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงด้วยการใช้แบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์ ต้องคำนวณจากค่าความเข้มข้นของสารละลายทองแดงหลังการดูดซับที่สภาวะสมดุลเท่านั้น และจากการขยายขนาดการทดลองเป็น 20 เท่านี้ ส่งผลให้ค่าร้อยละการแยกทองแดงมีค่าที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าร้อยละการแยกทองแดงที่ได้จากระดับห้องปฏิบัติการและจากการขยาดขนาดการทดลองเป็น 10 เท่า แสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบร้อยละการแยกทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่ระดับห้องปฏิบัติการ ระดับการขยายขนาด 10 เท่าและระดับการขยายขนาด 20 เท่า

ผลร้อยละการแยกทองแดงในระดับการขนายขนาด 20 เท่ามีค่าน้อยกว่าผลร้อยละการแยกทองแดงในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับการขยายขนาด 10 เท่า เนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการเคมีมีจำกัด ทำให้ผู้วิจัยต้องใช้ภาชนะขนาดเดียวกันในการบรรจุตัวดูดซับแทนนินขณะที่ทำการดูดซับโลหะทองในสารละลาย ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ ระดับการขยายขนาด 10 และ 20 เท่า ซึ่งขนาดของภาชนะนี้ ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดง



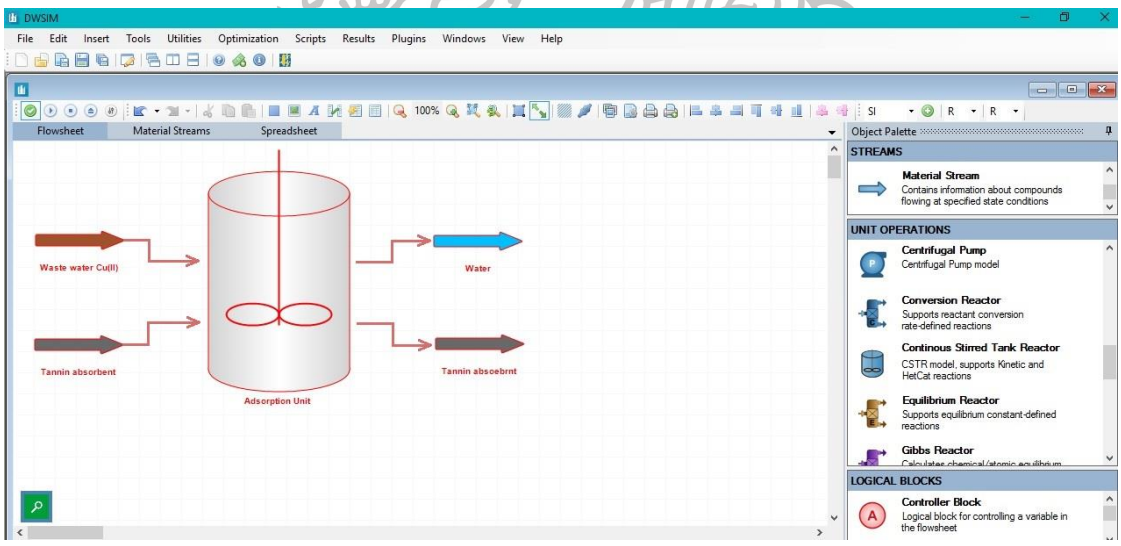
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบปริมาณตัวดูดซับแทนนินในสารละลายทองแดงที่ระดับห้องปฏิบัติการ ระดับการขยายขนาดการทดลอง 10 และ 20 เท่า

จากรูปที่ 4.13 จำลองปริมาณตัวดูดซับแทนนินในสารละลายทองแดงที่ระดับห้องปฏิบัติการ ระดับการขยายขนาดการผลิต 10 เท่าและระดับการขยายขนาดการผลิต 20 เท่า จากรูปจำลองนี้แสดงถึงการใช้ภาชนะในการทดลองขนาดเท่ากัน เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับแทนนินเป็น 20 เท่า ทำให้ตัวดูดซับแทนนินบางส่วนไม่สัมผัสกับสารละลายทองแดง ส่งผลให้ผลร้อยละการแยกโลหะทองแดงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและที่ระดับการขยายขนาดการทดลอง 10 เท่า [35] ซึ่งถ้าตัวดูดซับแทนนินทั้งหมดมีการสัมผัสกับสารละลายจนถึงจุดสมดุล (Equilibrium) เช่นเดียวกับการทดลองในระดับปฏิบัติการและการทดลองการขยายขนาด 10 เท่า ผลร้อยละการแยกโลหะทองแดงจะมีค่ามากกว่า 99 และเนื่องจากการทดลองขยายขนาด 20 เท่า ปฏิกิริยาการดูดซับเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของสารละลายทองแดงหลังกระบวนการดูดซับ เมื่อคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงด้วยแบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์จึงมีค่าที่แตกต่างอย่างมากจากค่าความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงที่ได้จากการทดลอง

ผลจากการศึกษาการขยายขนาดการแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับนำร่อง โดยใช้กระบวนการทดลองหรือ Empirical approach ทำการขยายการการผลิตเป็น 10 และ 20 เท่า พบว่าที่ระดับการขยายขนาด 10 เท่ามีค่าร้อยละการแยกทองแดงและความสามารถในการดูดซับโลหะทองใกล้เคียงกับค่าที่ได้ในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากตัวดูดซับแทนนินสัมผัสกับสารละลายทองแดงได้อย่างสมบูรณ์ จากจุดนี้สามารถกล่าวได้ว่า ถ้าตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบ

กระถินทำปฏิกิริยาสมบูรณ์จนกระบวนการดูดซับโลหะทองแดงเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibriums) ผลร้อยละการแยกโลหะทองแดงในสารละลายจะมากที่สุดถึง 99.65

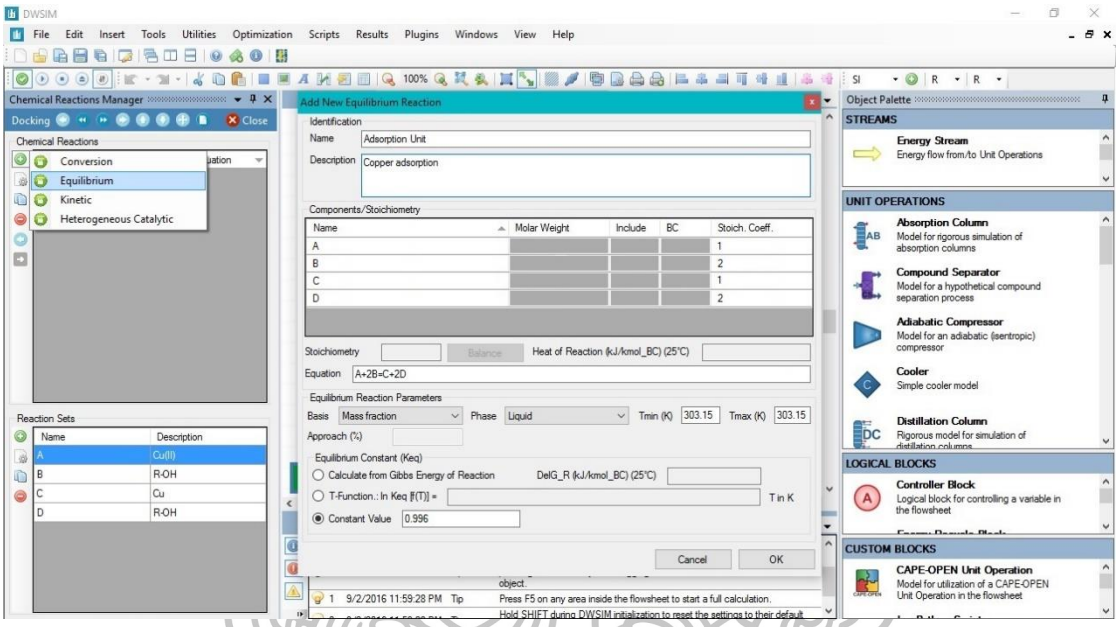
ปัจจุบันมีการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบกระบวนการผลิต ทำให้การออกแบบกระบวนการมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น เนื่องจากในฐานข้อมูล (Library) ของโปรแกรมมีข้อมูลทางด้านกายภาพและเทอร์โมไดนามิกส์ของสารต่างๆที่เป็นที่รู้จักและนิยมในอุตสาหกรรมทั่วไป สำหรับสารที่มีความเฉพาะเจาะจงมากและไม่มีฐานข้อมูล ผู้ใช้สามารถใส่ข้อมูลเบื้องต้น เช่น สูตรโครงสร้าง ความหนาแน่น จุดเดือดหรือข้อมูลอื่น ๆ ที่มีอยู่ลงในโปรแกรม เพื่อให้โปรแกรมทำการประมาณข้อมูลทางกายภาพและทางเทอร์โมไดนามิกส์เบื้องต้นในการนำไปใช้ในการออกแบบ สำหรับการขยายขนาดเท่ากับขนาดในระดับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ปริมาตรน้ำทิ้ง 50 ลูกบาศก์เมตร และความเข้มข้นของทองแดงในน้ำทิ้ง 5,000 ppm ผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรม DWSIM version 4.0 สำหรับการจำลองกระบวนการทางเคมี เพื่อหาค่าปริมาณทองแดงหลังกระบวนการดูดซับ



รูปที่ 4.14 การไหลของกระบวนการดูดซับโลหะทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนิน

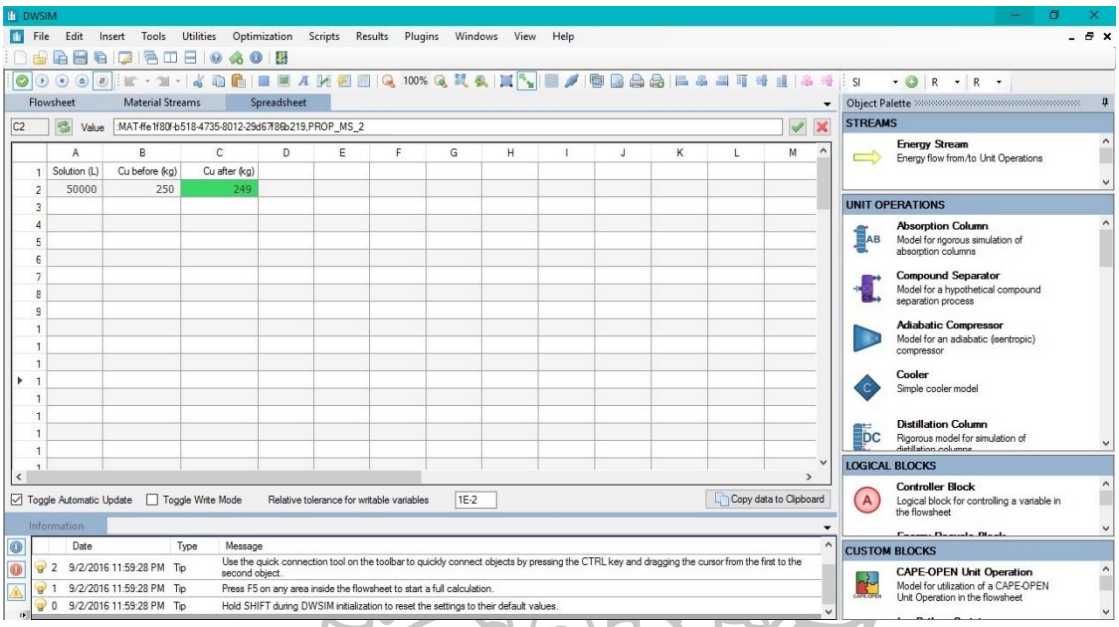
จากรูปที่ 4.14 น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมและตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เคมี (Reactor) หลังจากกระบวนการสิ้นสุด น้ำทิ้งและตัวดูดซับแทนนินหลังกระบวนการดูดซับเป็นผลิตภัณฑ์ของกระบวนการผลิตนี้

การหาปริมาณทองแดงหลังกระบวนการดูดซับทำได้โดยการเลือกปฏิกิริยาเคมีที่สนใจเป็นสภาวะสมดุล (Equilibrium) เนื่องจากการทดลองในห้องปฏิบัติการทราบค่าคงที่ที่สภาสะสมดุล (K equilibrium constant) และทราบสมการปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น ส่งผลให้สามารถใช้ค่าปริมาณความสัมพันธ์ (stoichiometry) ป้อนค่าในโปรแกรม DWSIM เพื่อคำนวณได้ตามรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ค่าที่ป้อนในโปรแกรม DWSIM

จากการคำนวณปริมาณทองแดงหลังกระบวนการดูดซับด้วยโปรแกรม DWSIM version 4.0 พบว่าที่น้ำทิ้ง 50 ลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นทองแดงในน้ำทิ้ง 5,000 ppm ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินสามารถดูดซับโลหะทองแดงได้ 249 กิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละการแยกโลหะทองแดง 99.60 แสดงได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ปริมาณโลหะทองแดงที่ถูกดูดซับ คำนวณโดยใช้โปรแกรม DWSIM

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าร้อยละการแยกโลหะทองแดงที่ได้จากห้องปฏิบัติการเคมีและจากการใช้โปรแกรม DWSIM คำนวณ พบว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการเคมีในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) และการขยายขนาดการผลิต (Scale up) เป็น 10 เท่า มีค่าร้อยละการแยกโลหะทองแดง 99.65 และจากการจำลองกระบวนการผลิตโดยการขยายขนาดเท่ากับขนาดของการผลิตจริงในอุตสาหกรรมโดยใช้โปรมแกรม DWSIM version 4.0 มีค่าร้อยละการแยกโลหะทองแดง 99.60 ซึ่งค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก แสดงว่ากระบวนการดูดซับทองแดงด้วยแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ ค่าร้อยละการดูดซับทองแดงมากกว่า 99 และยังสามารถนำวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ โดยปริมาณทองแดงหลังกระบวนการดูดซับที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม DWSIM นำมาคำนวณวิศวกรรมต้นทุนและเศรษฐศาตร์วิศวกรรมในหัวข้อถัดไป

4.4 การคำนวณข้อมูลตัวแปรต่างๆของระบบการแยกทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีทางวิศวกรรมต้นทุนและเศรษฐศาตร์วิศวกรรม

งานวิจัยนี้มีสมมติฐานดังนี้

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้มีเงินทุนและกระแสเงินสดสำหรับการลงทุนในทุกโครงการโดยไม่ต้องกู้เงินผ่านธนาคาร นอกจากนี้องค์กรยังสามารถสนับสนุนค่าใช้จ่ายจำเป็นที่เกิดขึ้นและค่าใช้จ่ายรายเดือน (Capital Expenditure (CAPEX))

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้มีพื้นที่เพียงพอในการติดตั้งเครื่องมือ เครื่องจักรและอุปกรณ์ไม่ต้องเช่าที่ดินเพิ่ม ในขณะที่องค์กรบรรลุเป้าหมายมาตรฐานความปลอดภัยอาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม (HSE)

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้มีการปล่อยน้ำทิ้ง 50 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้มีการปล่อยน้ำทิ้งที่มีโลหะทองแดงเจือปนประมาณ 5,000 ppm ต่อวัน

น้ำทิ้งของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้มีเพียงโลหะทองแดงเท่านั้นที่เจือปน

ระบบการแยกทองแดงออกจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้ เป็นระบบแบบไม่ต่อเนื่อง

ราคาของสารเคมี วัตถุดิบต่างๆที่ทางผู้จัดส่ง (supplier) เสนอให้กับทางอุตสาหกรรม ได้รวมค่าจัดส่งที่จัดสามารถส่งถึงอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้ (Incoterm Delivered Duty Unpaid (DDU) หรือ Delivered Duty Paid (DDP))

ไม่มีการคิดค่าเสื่อมราคาในระบบการแยกทองแดงออกจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้

ไม่มีการคิดค่าซ่อมบำรุงเครื่องจักรและอุปกรณ์ในระบบการแยกทองแดงออกจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้

อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้ คำนวณโดยใช้เกณฑ์ของสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (The Board of Investment of Thailand: BOI) เนื่องจากอุตสาหกรรมแห่งนี้ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่ส่งเสริมการลงทุน

จากสมการที่ (26) สามารถคำนวณต้นทุนรวม (Total cost) จากผลรวมของต้นทุนสารเคมีและวัตถุดิบต่าง ๆ ต้นทุนในระบบการสังเคราะหตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน ต้นทุนในระบบ

การดูดซับ ต้นทุนในระบบการแยกโลหะทองแดงออกจากตัวดูดซับ ต้นทุนในส่วนของพลังงาน ต้นทุนในส่วนของค่าติดตั้งและต้นทุนในส่วนของพนักงาน

4.4.1 ต้นทุนสารเคมีและวัตถุดิบ

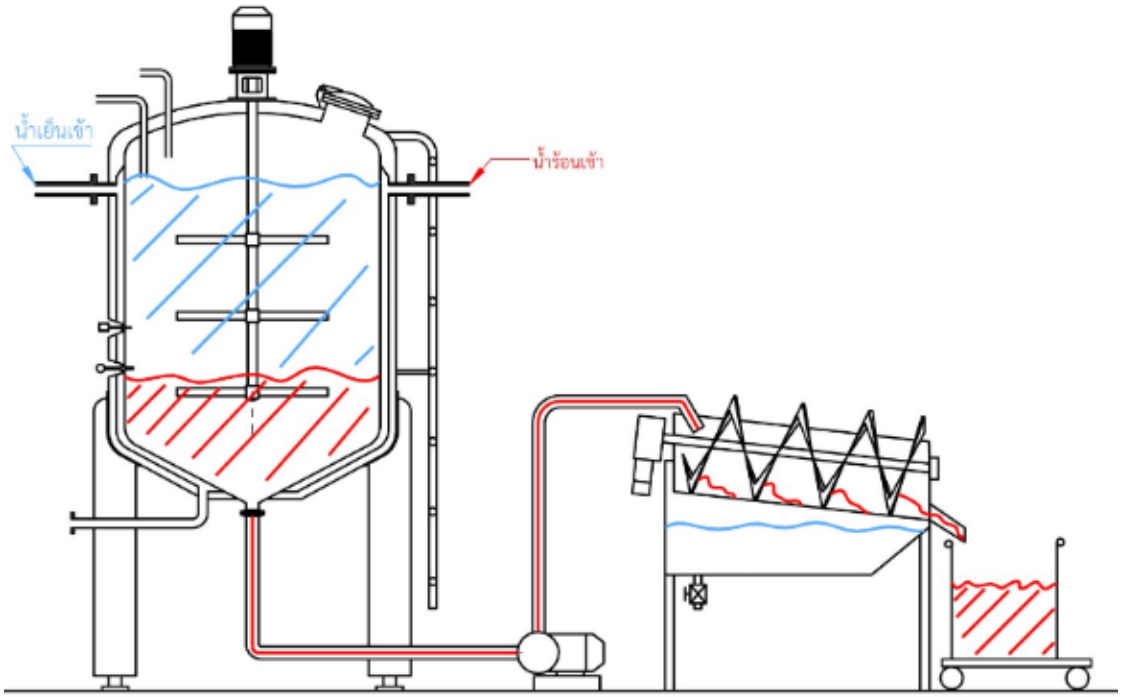
เนื่องจากอุตสาหกรรมมีการปล่อยน้ำทิ้งวันละ 50 ลูกบาศก์เมตร จากการคำนวณสัดส่วนการผลิตพบว่าต้องใช้ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน 1,200 กิโลกรัม โดยสังเคราะห์จากใบกระถินดิบประมาณ 1,500 กิโลกรัม นอกจากนี้ยังต้องใช้กรดซัลฟิวริกในการะบวนการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินประมาณ 45 ลิตร ซึ่งผลรวมของต้นทุนสารเคมีและวัตถุดิบต่าง ๆ เท่ากับ 13,842.59 บาท รายละเอียดปริมาณการใช้สารเคมี วัตถุดิบต่าง ๆ และราคาเฉลี่ยของตลาดแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ต้นทุนราคาวัตถุดิบ สารเคมีและปริมาณการใช้

วัตถุดิบ/สารเคมี	**ราคา (บาท/หน่วย)**	**ปริมาณที่ต้องใช้**	**ราคารวม (บาท)**
ใบกระถินดิบ	7 บาท ต่อกิโลกรัม	1,500 กิโลกรัม	10,500.00
โซเดียมไบคาร์โบเนต ($NaHCO_3$)	7,000 บาท ต่อ 1 ตัน	90 กิโลกรัม	630.00
กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)	900 บาท ต่อ 30 ลิตร	45 ลิตร	1,350.00
กรดไฮโดรคลอริก (HCl)	437 บาท ต่อ 25 กิโลกรัม	N/A ใช้เพื่อปรับค่า pH เท่านั้น	437.00
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	20 บาท ต่อ 1 กิโลกรัม	N/A ใช้เพื่อปรับค่า pH เท่านั้น	20.00
		ราคารวม (Total cost)	**12,937.00**
		ราคารวม vat 7%	**13,842.59**

4.4.2 ต้นทุนในระบบการสังเคราะหตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน ต้นทุนในระบบการดูดซับ ต้นทุนในระบบการแยกโลหะทองแดงออกจากตัวดูดซับ และต้นทุนในส่วนของค่าติดตั้ง

เนื่องจากงานวิจัยนี้ แบ่งหน่วยปฏิบัติการเป็น 3 หน่วย คือการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน การดูดซับทองแดงในน้ำทิ้งและการหลอมเพื่อแยกทองแดง

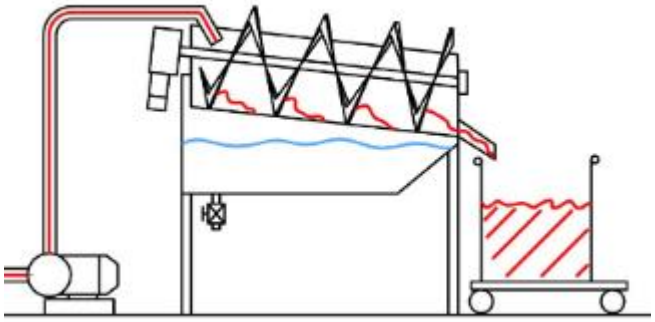


รูปที่ 4.17 ระบบการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน

ระบบการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถินดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 ระบบมีการป้อนน้ำหล่อเย็นและน้ำร้อนรอบ ๆ ถังปฏิกรณ์เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเคมีที่ 100 องศาเซลเซียสโดยมีเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ นอกจากนี้ภายในถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลูกบาศก์เมตรมีการติดตั้งใบกวนเพื่อให้ใบกระถินดิบทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับกรดซัลฟิวริกที่มีการป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ผ่านทางท่อด้านข้างถังปฏิกรณ์ มีการติดตั้งเซนเซอร์วัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เนื่องจากต้องมีการปรับค่าความเป็นกรดด่างให้มีค่า 7 โดยการใส่โซเดียมไบคาร์โบเนต อีกทั้งมีท่อป้อนน้ำกลั่นเพื่อช่วยในขั้นตอนการปรับค่าความเป็นกรดด่างของสารในถังปฏิกรณ์เคมี จากขนาดของถังปฏิกรณ์สามารถผลิตตัวดูดซับแทนนินได้มากที่สุดถึง 2,400 กิโลกรัม แต่ระบบการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำทิ้งใช้ตัวดูดซับแทนนินเพียง 1,200 กิโลกรัม จำนวนตัวดูดซับแทนนินที่

สังเคราะห์จากใบกระถินที่เกินมา 1,200 กิโลกรัม เตรียมล่วงหน้าเพื่อใช้ดูดซับในกระบวนการถัดไป

เมื่อใบกระถินทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ภายในถังปฏิกรณ์แล้ว จะมีปั๊มดูดสารในถังไปสู่ขั้นตอนการกรองตะกอน โดยสารจะถูกป้อนสู่ท่อตะแกรงกรองสไปรัลที่ขนาดรูกรอง 0.5 มิลลิเมตร เพื่อแยกน้ำและกากตะกอนออกจากกัน โดยกากตะกอนจะไหลออกไปที่ภาชนะรองรับด้านข้าง ส่วนน้ำจะไหลสู่ด้านล่างของท่อตะแกรงกรอง แสดงได้ดังรูปที่ 4.18



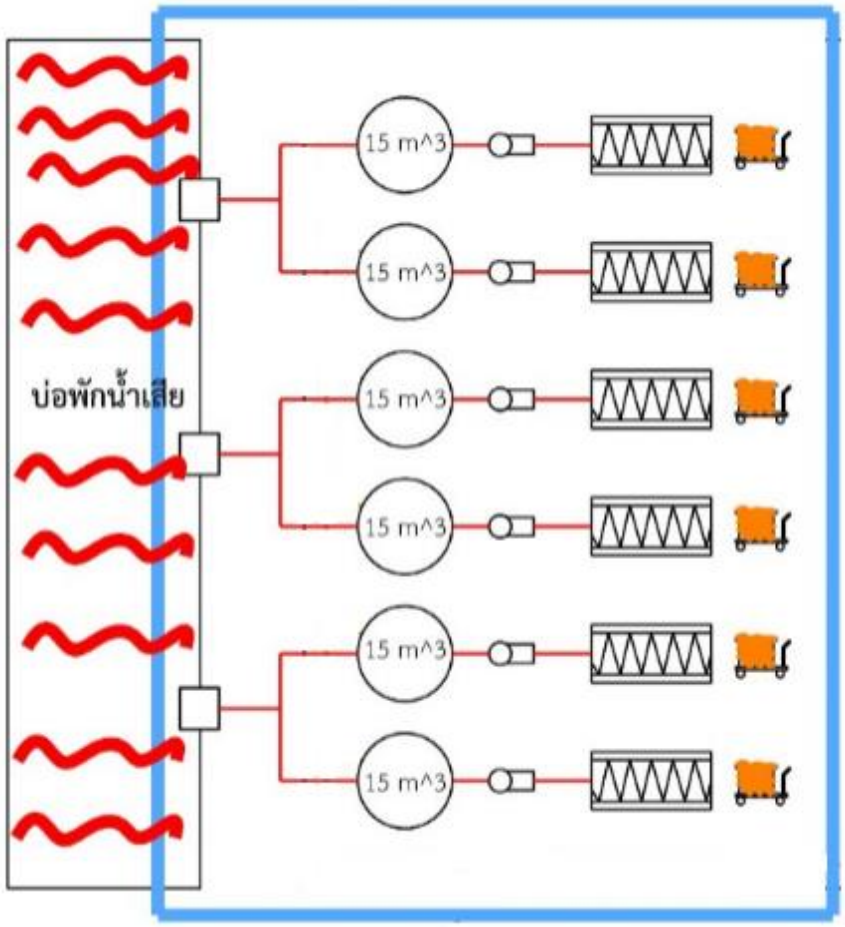
รูปที่ 4.18 ระบบการกรองกากตะกอน

กากตะกอนแทนนินที่ได้หลังจากการกรองมีการนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส หลังจากกากตะกอนแทนนินแห้งจะได้ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

สำหรับระบบการดูดซับทองแดงในน้ำทิ้ง น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จะถูกดูดจากบ่อพักน้ำทิ้งเข้าสู่ถังปฏิกรณ์เคมี โดยอุตสาหกรรมมีการปล่อยน้ำทิ้งวันละ 50 ลูกบาศก์เมตร ทำให้ต้องใช้ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินปริมาณ 1,200 กิโลกรัม ระบบมีการแบ่งถังปฏิกรณ์ออกเป็น 6 ถังย่อยเพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้อย่างสมบูรณ์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งในถังปฏิกรณ์แต่ละใบมีขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร ภายในถังมีการติดตั้งใบกวนรูปแบบเดียวกับถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนิน มีท่อป้อนกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับค่าความเป็นกรดด่างของน้ำทิ้งให้มีค่า 5 ถังปฏิกรณ์แต่ละใบมีเซนเซอร์วัดความเป็นกรดด่างและวัดอุณหภูมิ โดยมีการป้อนน้ำเย็นและน้ำร้อนรอบถังปฏิกรณ์เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของในทิ้งในการทำปฏิกิริยาเคมีที่ 30 องศาเซลเซียส

น้ำทิ้งในบ่อพักจะถูกดูดเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แต่ละใบ โดยที่ข้างตัวถังจะมีกระจกใส เพื่อมองเห็นระดับน้ำทิ้งที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ระบบมีวาล์วเปิดปิดแยกน้ำทิ้งเข้าแต่ละถัง น้ำทิ้งถูกป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ถังละประมาณ 8 ลูกบาศก์เมตร มีการใส่ตัวดูดซับแทนนินลงในถังปฏิกรณ์ถังละ 200

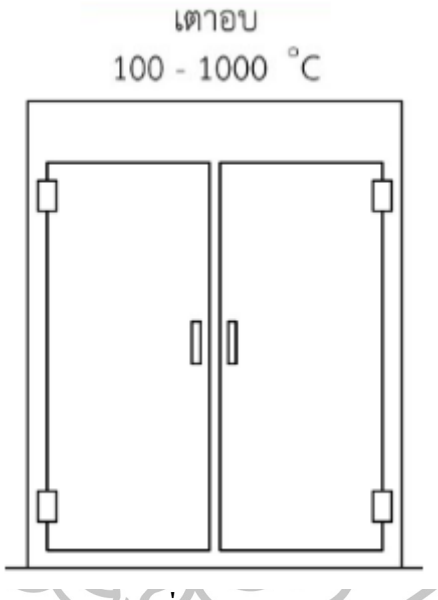
กิโลกรัม หลังจากปฏิกิริยาการดูดซับสิ้นสุด เกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างสมบูรณ์ กากตะกอนตัวดูดซับแทนนินที่ได้แต่ละถังปฏิกรณ์จะถูกนำไปกรองเพื่อแยกน้ำและกากตะกอน โดยใช้ระบบการกรองแยกตะกอนรูปแบบเดียวกับรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.19 ระบบการดูดซับทองแดงในน้ำทิ้ง

กากตะกอนที่ได้หลังจากการบวนการดูดซับทองแดงถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเพื่อเผากากตะกอน ซึ่งตู้อบที่ใช้ในระบบสามารถปรับอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 100 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ความจุมากที่สุดที่ตู้อบสามารถจุได้คือ 3,000 กิโลกรัม แสดงได้ดังรูปที่ 4.20 ภายหลังจากการเผากากตะกอนตัวดูดซับแทนนินจะได้โลหะทองแดง จากการจำลองกระบวนการผลิตด้วยโปรแกรม DWSIM version 4.0 สามารถแยกโลหะทองแดงกลับคืนมาจากน้ำทิ้งที่ความเข้มข้น 5,000 ppm ได้ 249 กิโลกรัม

ตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องทำให้ทางอุตสาหกรรมต้องบำบัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ค่าทองแดงต้องไม่เกิน 2.0 ppm จากการศึกษาที่ค่าความเข้มข้นทองแดงเริ่มต้นในน้ำทิ้ง 5,000 ppm หลังการดูดซับด้วยแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน น้ำทิ้งหลังกระบวนการดูดซับ ทองแดงมีค่าความเข้มข้น 1.97 ppm ซึ่งน้อยกว่า 2.0 ppm นอกจากนี้ทางบริษัทยังสามารถทำการบำบัดขั้นต้นเพื่อนำน้ำหลังกระบวนการบำบัดมาใช้หมุนเวียนในอุตสาหกรรม เป็นการลดปริมาณการใช้น้ำ ทำให้บริษัทมีกำไรมากขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 4.20 เตาอบ

จากการสอบถามราคาบริษัทรับเหมาติดตั้งอุปกรณ์ 3 บริษัท พบว่าต้นทุนในระบบการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน ต้นทุนในระบบการดูดซับ ต้นทุนในระบบการแยกโลหะทองแดงออกจากตัวดูดซับ และต้นทุนในส่วนของค่าติดตั้งมีราคาเฉลี่ย แสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ต้นทุนของระบบการสังเคราะหตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน ต้นทุนของระบบการดูดซับ ต้นทุนของระบบการแยกโลหะทองแดงออกจากตัวดูดซับ และต้นทุนในส่วนของค่าติดตั้ง

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม (บาท)
ถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร	6	ใบ	2,800,000.00	16,800,000.00
ถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 16 ลูกบาศก์เมตร	1	ใบ	4,700,000.00	4,700,000.00
ปั๊ม	7	ตัว	280,000.00	1,960,000.00
เครื่องกรองกากตะกอน	7	เครื่อง	250,000.00	1,750,000.00
ตู้อบ	1	เครื่อง	3,500,000.00	3,500,000.00
ถังใส่สารขนาด 500 กิโลกรัม	6	ชุด	140,000.00	840,000.00
ถังใส่สารขนาด 300 กิโลกรัม	8	ชุด	80,000.00	640,000.00
ระบบท่อ	1	ชุด	1,500,000.00	1,500,000.00
ระบบ Chiller	1	ชุด	2,500,000.00	2,500,000.00
Factory and Footing	1	ชุด	10,000,000.00	10,000,000.00
ระบบไฟฟ้าควบคุม	1	ชุด	3,000,000.00	3,000,000.00
ค่าติดตั้ง	1	ชุด	3,500,000.00	3,500,000.00
			ราคารวม	**50,690,000.00**
			ราคารวม vat 7%	**54,238,300.00**

ผลรวมต้นทุนของระบบการสังเคราะหตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน ต้นทุนในระบบการดูดซับ ต้นทุนในระบบการแยกโลหะทองแดงออกจากตัวดูดซับ และต้นทุนในส่วนของค่าติดตั้งมีค่า 54,238,300.00 บาท

4.4.3 ต้นทุนในส่วนของพลังงาน

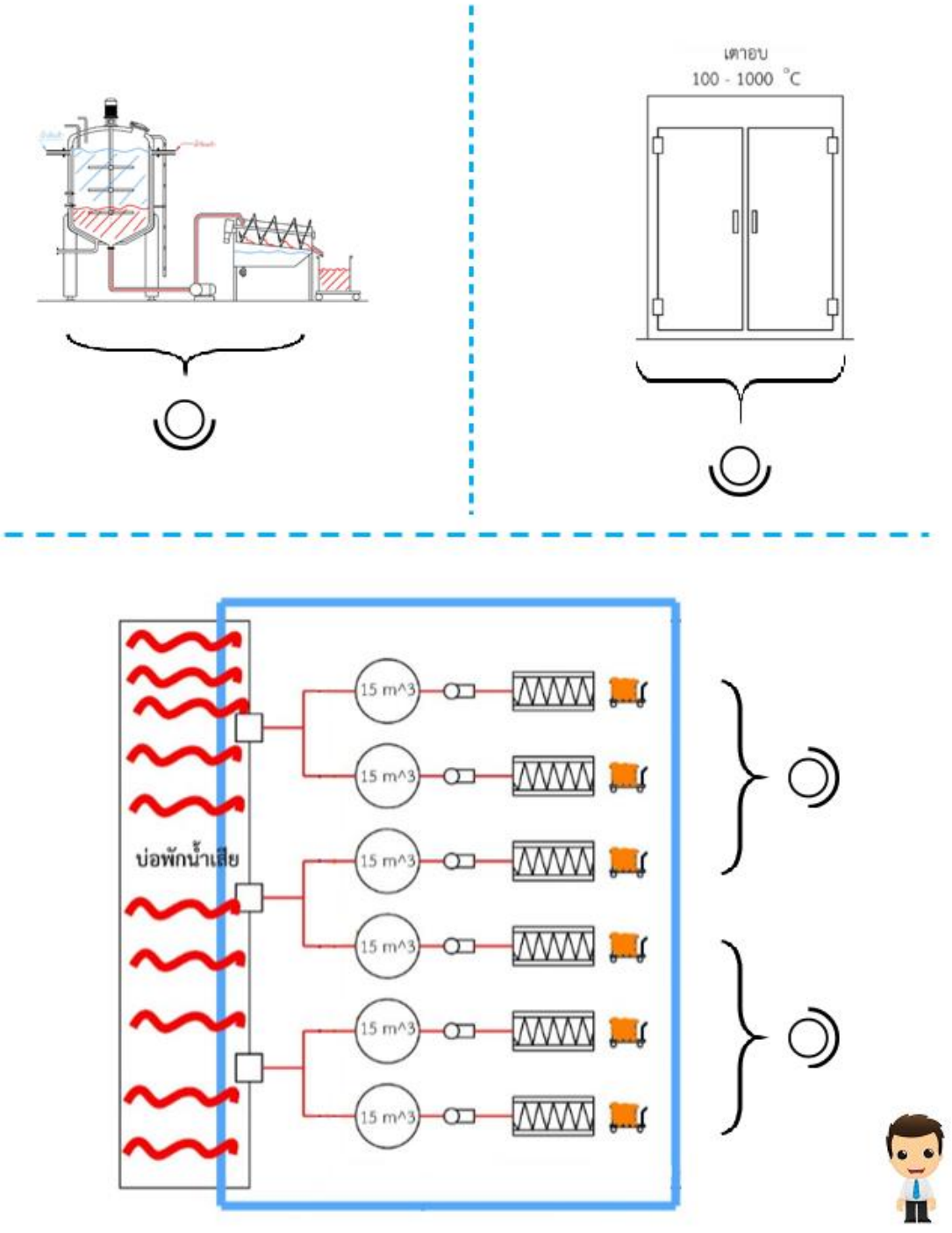
ต้นทุนในส่วนของพลังงานสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ต้นทุนในส่วนของพลังงาน

กระบวนการ	จำนวนชั่วโมงการทำงาน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	BTU	จำนวน (ชุด)	ผลรวมกิโลวัตต์ต่อชั่วโมง
สังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนิน	24	100	180	1	0.6330
อบตัวดูดซับแทนนิน	1	200	360	1	0.1055
กระบวนการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำทิ้ง	12	30	54	6	1.1395
เผาตัวดูดซับแทนนินเพื่อแยกโลหะทองแดง	11	800	1440	1	4.6422

เนื่องจากอุตสาหกรรมแห่งนี้ตั้งอยู่ในพื้นที่ส่งเสริมการลงทุน อัตราค่าไฟฟ้าจึงคำนวณจากเกณฑ์ค่าไฟฟ้าของสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (The Board of Investment of Thailand: BOI) พบว่าต้นทุนพลังงานทั้งหมดของระบบ 2,066.57 บาทต่อหนึ่งกระบวนการ (Batch) ในการผลิตตัวดูดซับทองแดงที่สังเคราะห์จากใบกระถิน 1,200 กิโลกรัม สำหรับดูดซับทองแดงในน้ำทิ้ง 5,000 ppm จำนวน 50 ลูกบาศก์เมตรและเผาตัวดูดซับแทนนินเพื่อหลอมทองแดงกลับคืนมา

4.4.4 ต้นทุนในส่วนของพนักงาน



รูปที่ 4.21 การทำงานของระบบและตำแหน่งที่มีการใช้พนักงานควบคุม

จากรูปที่ 4.21 หน่วยปฏิบัติการถูกแบ่งเป็น 3 หน่วย คือหน่วยการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน หน่วยการดูดซับทองแดงในน้ำทิ้งและหน่วยการอบและเผาตัวดูดซับแทนนินเพื่อแยกทองแดง รายละเอียดการทำงานของพนักงานมีดังนี้

หน่วยการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน มีพนักงาน 1 คน ใช้เวลาในการใส่วัตถุดิบ ใส่สารเคมี เปิดปิดเครื่องปฏิกรณ์ จัดเตรียมกากตะกอนตัวดูดซับแทนนินเพื่อรอส่งเข้าตู้อบ รวมเวลาพนักงานทำงานทั้งหมด 2 ชั่วโมง หน่วยการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถินใช้เวลาทำงานทั้งระบบ 12 ชั่วโมง

หน่วยการดูดซับทองแดงในน้ำทิ้ง มีพนักงาน 2 คนในการควบคุมดูแลเครื่องปฏิกรณ์เคมี 6 เครื่อง โดยพนักงาน 1 คน ควบคุมและดูแลเครื่องปฏิกรณ์คนละ 3 เครื่อง แต่ละคนใช้เวลาในการเปิดปิดน้ำทิ้งป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ใส่ตัวดูดซับแทนนิน จัดเตรียมตะกอนตัวดูดซับแทนนินเพื่อรอส่งเข้าตู้อบ รวมเวลาพนักงานทำงานทั้งหมด 1 ชั่วโมง 30 นาที หน่วยการดูดซับทองแดงในน้ำทิ้งใช้เวลาทำงานทั้งระบบ 12 ชั่วโมง

หน่วยการอบและเผาตัวดูดซับแทนนินเพื่อแยกทองแดง มีพนักงาน 1 คน ใช้เวลาในการใส่กากตะกอนแทนนิน ตัวดูดซับแทนนินหลังกระบวนการดูดซับ เวลาในการเปิดปิดเครื่อง เวลาในการนำสารออกจากตู้อบและชั่งสารตามน้ำหนักจัดเตรียมใส่ถัง รวมเวลาพนักงานทำงานทั้งหมด 1 ชั่วโมง หน่วยการเผาตัวดูดซับแทนนินเพื่อแยกทองแดงใช้เวลาทำงานทั้งระบบ 11 ชั่วโมงและ 1 ชั่วโมงสำหรับการรอให้สารคลายความร้อน รวมระบบใช้เวลาทำงานทั้งหมด 12 ชั่วโมง

ทั้งนี้สำหรับหน่วยปฏิบัติการทั้ง 3 หน่วย มีผู้ควบคุม (Supervisor) 1 คน สำหรับเดินตรวจเพื่อช่วยเหลือในกรณีฉุกเฉินหรือขาดแคลนกำลังพล

ตารางที่ 4.6 ต้นทุนในส่วนของพนักงาน

หน่วยปฏิบัติการ	ค่าจ้าง (บาทต่อเดือน)	จำนวนพนักงาน	จำนวนชั่วโมงการทำงาน	รวมค่าจ้าง (บาทต่อเดือน)
สังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนิน	7,000	1	2	1,750.00
ดูดซับทองแดงในน้ำทิ้ง	7,000	2	1.5	2,625.00
อบ เผาสารและชั่งน้ำหนักจัดเตรียมสารใส่ถัง	7,000	1	2	1,750.00
ผู้ควบคุม	10,000	1	8	10,000.00
			รวมค่าจ้างทั้งหมด (บาทต่อเดือน)	**16,125.00**

จากตารางที่ 4.6 การคำนวณต้นทุนรวมในส่วนของพนักงานเท่ากับ 16,125.00 บาทต่อเดือน

4.4.5 จุดคุ้มทุน

ราคาขายทองแดงเฉลี่ยในรอบ 1 ปีที่ผ่านมา ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2558 - สิงหาคม พ.ศ. 2559 รายงานราคาขายทองแดงในแถบเอเชียจาก London Metal Exchange Centre แสดงได้ดังรูปที่ 4.22

รูปที่ 4.22 ราคาขายทองแดงเฉลี่ยในรอบ 1 ปี ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2558 - สิงหาคม พ.ศ. 2559
ที่มา: The London Metal Exchange. **LME Copper**. เข้าถึงเมื่อ 2 กันยายน 2559. เข้าถึงได้จาก http://www.lme.com/en-gb/metals/non-ferrous/copper/monthly-overview/.

ตารางที่ 4.7 ราคาขายทองแดงต่ำสุด สูงสุดและเฉลี่ย (ดอลล่าร์สหรัฐอเมริกาต่อตัน) ในรอบ 1 ปี ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2558 - สิงหาคม พ.ศ. 2559

ราคาทองแดง (ดอลล่าร์สหรัฐอเมริกา)	
ต่ำสุด	4,620.00
เฉลี่ย	4,772.45
สูงสุด	4,924.00

ตารางที่ 4.7 เป็นข้อมูลที่ได้จาก London Metal Exchange Centre จากการแปลงค่าสกุลเงินดอลล่าร์สหรัฐอเมริกาเป็นสกุลเงินบาท มีอัตราแลกเปลี่ยนที่ต่ำที่สุดในรอบปีจนถึงวันที่ 2 กันยายน 2559 อยู่ที่ 34.53 บาท ดังนั้นราคาขายทองแดงในหน่วยบาทต่อกิโลกรัม แสดงได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ราคาขายทองแดงต่ำสุด สูงสุดและเฉลี่ย (บาทต่อกิโลกรัม) ในรอบ 1 ปี ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2558 – สิงหาคม พ.ศ. 2559

ราคาทองแดง	(ดอลล่าร์ต่อตัน)	(บาทต่อตัน)	(บาทต่อกิโลกรัม)
ต่ำสุด	4,620.00	159,528.60	159.53
เฉลี่ย	4,772.45	164,792.70	164.79
สูงสุด	4,924.00	170,025.72	170.03

หมายเหตุ : อัตราแลกเปลี่ยนสกุลเงินดอลล่าร์สหรัฐอเมริกาเป็นสกุลเงินบาทอยู่ที่ 34.53 บาท

โลหะทองแดงสามารถกลับคืน (Recovery) จากตัวดูดซับแทนนินหลังกระบวนการดูดซับ โดยการเผาไหม้ตัวดูดซับแทนนินที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 11 ชั่วโมง แสดงว่า 1 วัน บริษัทสามารถเผาไหม้ตัวดูดซับแทนนินได้ 2 รอบ ซึ่งแต่ละรอบโลหะทองแดงสามารถกลับคืนมาได้ 249 กิโลกรัม ดังนั้น 1 วัน (24 ชั่วโมง) โลหะทองแดงสามารถกลับคืนมาได้ 498 กิโลกรัม สำหรับการคำนวณจุดคุ้มทุน งานวิจัยถูกแบ่งการคำนวณเป็น 3 กรณี คือ

กรณีราคาขายทองแดงมีค่าต่ำสุด

กรณีราคาขายทองแดงมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ย

กรณีราคาขายทองแดงมีค่าสูงสุด

เนื่องจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้มีเงินทุนและกระแสเงินสดสำหรับการลงทุนในทุกโครงการโดยไม่ต้องกู้เงินผ่านธนาคาร แต่เนื่องจากต้นทุนของระบบการสังเคราะหตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน ต้นทุนของระบบการดูดซับ ต้นทุนของระบบการแยกโลหะทองแดงออกจากตัวดูดซับ และต้นทุนในส่วนของค่าติดตั้งมีค่าเท่ากับ 54,238,300.00 บาท ส่งผลให้อุตสาหกรรมแห่งนี้ต้องยืมเงินภายในบริษัทมาหมุนเวียน โดยบริษัทคิดอัตราดอกเบี้ยร้อยละ 1.50 ระยะเวลายืมเงิน 3 ปี ทำให้ต้องมีการชำระหนี้คืนแก่บริษัทปีละ 18,350,624.83 บาท รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 3 ปี

สำหรับต้นทุนที่เกิดขึ้นซ้ำทุกปี (Recurring Cost) คำนวณจากต้นทุนใบกระถินดิบและสารเคมี ต้นทุนในส่วนของพนักงานและต้นทุนในส่วนของพลังงาน บริษัทมี 22 วันทำงานต่อเดือน

ต้นทุนที่เกิดซ้ำทุกปี = (13,842.59*22*12) + (2,066.57*2*22*12) + (16,125*12)

= 4,939,092.72 บาทต่อปี

ดังนั้นต้นทุนที่เกิดขึ้นซ้ำทุกปีมีค่าเท่ากับ 4,939,092.72 บาทต่อปี

4.4.5 กรณีราคาทองแดงมีค่าต่ำสุด

จากตารางที่ 4.8 พบว่าราคาขายทองแดงต่ำสุดอยู่ที่ 159.53 บาทต่อกิโลกรัม คิดเป็นจำนวนเงินที่บริษัทสามารถขายโลหะทองแดงได้ 79,445.94 บาทต่อวัน หรือประมาณ 20,973,728.16 บาทต่อปี

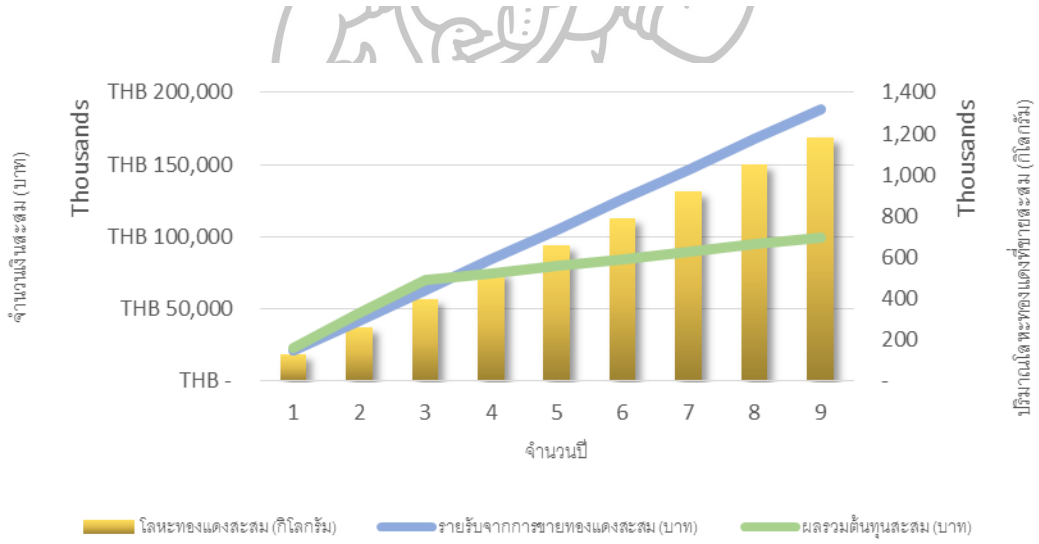
จากรายรับจากการขายทองแดง ต้นทุนที่เกิดขึ้นซ้ำทุกปีและการชำระหนี้ของบริษัท นำมาซึ่งการคำนวณผลกำไรหรือขาดทุนของการดำเนินกิจกรรมในแต่ละปี รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 1-4 ในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าต่ำสุด

รายละเอียด	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4
รายรับจากการขายทองแดง	20,973,728.16	20,973,728.16	20,973,728.16	20,973,728.16
รายรับจากการขายทองแดง (สะสม)	20,973,728.16	41,947,456.32	62,921,184.48	83,894,912.64
ต้นทุนที่เกิดซ้ำทุกปี	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72
การชำระหนี้แก่บริษัท	18,350,624.83	18,350,624.83	18,350,624.83	-
ผลรวมต้นทุน	23,289,717.55	23,289,717.55	23,289,717.55	4,939,092.72
ผลรวมต้นทุน (สะสม)	23,289,717.55	46,579,435.11	69,869,152.66	74,808,245.38
กำไร/ขาดทุน ก่อนเสียภาษี (สะสม)	(5,790,436.06)	(15,055,133.76)	(24,319,831.45)	12,292,032.93

ตารางที่ 4.10 การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 5-8 ในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าต่ำสุด

รายละเอียด	ปีที่ 5	ปีที่ 6	ปีที่ 7	ปีที่ 8
รายรับจากการขายทองแดง	20,973,728.16	20,973,728.16	20,973,728.16	20,973,728.16
รายรับจากการขายทองแดง (สะสม)	104,868,640.80	125,842,368.96	146,816,097.12	167,789,825.28
ต้นทุนที่เกิดซ้ำทุกปี	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72
การชำระหนี้แก่บริษัท	-	-	-	-
ผลรวมต้นทุน	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72
ผลรวมต้นทุน (สะสม)	79,747,338.10	84,686,430.82	89,625,523.54	94,564,616.26
กำไร/ขาดทุน ก่อนเสียภาษี (สะสม)	76,429,834.57	140,567,636.21	204,705,437.84	268,843,239.48



รูปที่ 4.23 จุดคุ้มทุนในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าต่ำสุด

จากรูปที่ 4.23 พบว่าจุดคุ้มทุนของการขายทองแดงในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 450 ตัน ระยะเวลาจุดคุ้มทุนอยู่ที่ประมาณ 3 ปี 5 เดือน โดยปีที่ 4 บริษัทจะมีกำไรสะสม 12,292,032.93 บาทและกำไรจากการขายทองแดงจะเพิ่มขึ้นทุกปี

จากการคำนวณค่าตอบแทนจากการลงทุนหรือ ROI คำนวณได้จากสมการที่ (30) เมื่อเข้าสู่ปีที่ 5 ของการดำเนินกิจกรรม %ROI มีค่าประมาณ 325 หรืออาจกล่าวได้ว่าลงทุนไป 100 บาท จะได้ผลประโยชน์สุทธิจากการดำเนินงาน 325 บาทต่อปี

4.4.6 กรณีราคาทองแดงมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ย

จากตารางที่ 4.8 พบว่าราคาขายทองแดงมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 164.79 บาทต่อกิโลกรัม คิดเป็นจำนวนเงินที่บริษัทสามารถขายโลหะทองแดงได้ 82,066.76 บาทต่อวัน หรือประมาณ 21,665,625.66 บาทต่อปี

จากรายรับจากการขายทองแดง ต้นทุนที่เกิดขึ้นซ้ำทุกปีและการชำระหนี้ของบริษัท นำมาซึ่งการคำนวณผลกำไรหรือขาดทุนของการดำเนินกิจกรรมในแต่ละปี รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.11 การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 1-4 ในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ย

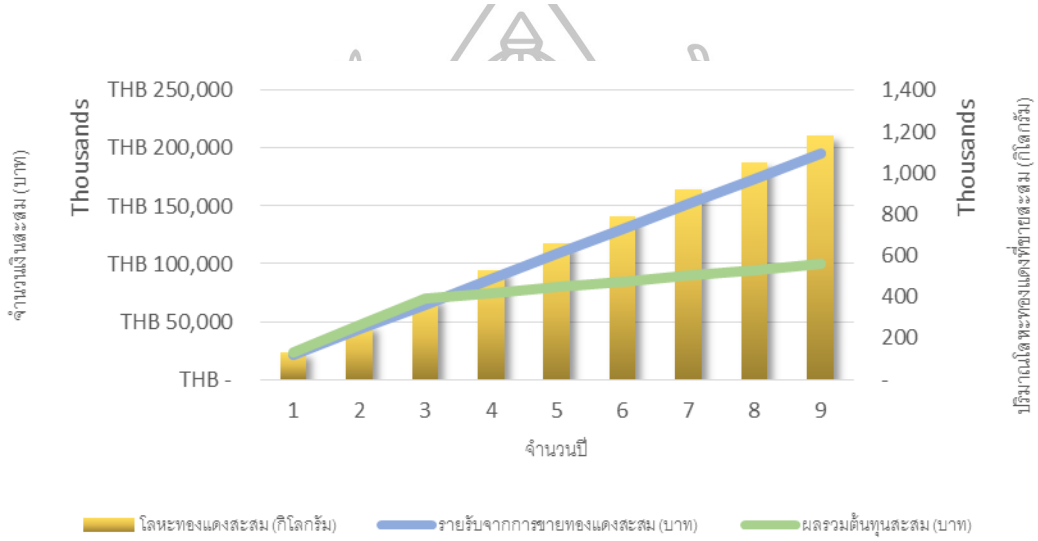
รายละเอียด	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4
รายรับจากการขายทองแดง	21,665,625.66	21,665,625.66	21,665,625.66	21,665,625.66
รายรับจากการขายทองแดง (สะสม)	21,665,625.66	43,331,251.31	64,996,876.97	86,662,502.63
ต้นทุนที่เกิดซ้ำทุกปี	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72
การชำระหนี้แก่บริษัท	18,350,624.83	18,350,624.83	18,350,624.83	-
ผลรวมต้นทุน	23,289,717.55	23,289,717.55	23,289,717.55	4,939,092.72
ผลรวมต้นทุน (สะสม)	23,289,717.55	46,579,435.11	69,869,152.66	74,808,245.38
กำไร/ขาดทุน ก่อนเสียภาษี (สะสม)	(4,060,232.17)	(10,556,603.63)	(17,052,975.09)	22,327,215.52

ตารางที่ 4.12 การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 5-8 ในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ย

รายละเอียด	ปีที่ 5	ปีที่ 6	ปีที่ 7	ปีที่ 8
รายรับจากการขายทองแดง	21,665,625.66	21,665,625.66	21,665,625.66	21,665,625.66
รายรับจากการขายทองแดง (สะสม)	108,328,128.29	129,993,753.94	151,659,379.60	173,325,005.26
ต้นทุนที่เกิดซ้ำทุกปี	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72
การชำระหนี้แก่บริษัท	-	-	-	-
ผลรวมต้นทุน	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72

ตารางที่ 4.12 การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 5-8 ในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ย (ต่อ)

รายละเอียด	ปีที่ 5	ปีที่ 6	ปีที่ 7	ปีที่ 8
ผลรวมต้นทุน (สะสม)	79,747,338.10	84,686,430.82	89,625,523.54	94,564,616.26
กำไร/ขาดทุน ก่อนเสียภาษี (สะสม)	89,233,343.39	156,139,471.26	223,045,599.13	289,951,727.00



รูปที่ 4.24 จุดคุ้มทุนในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ย

จากรูปที่ 4.24 พบว่าจุดคุ้มทุนของการขายทองแดงในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 440 ตัน ระยะเวลาจุดคุ้มทุนอยู่ที่ประมาณ 3 ปี 4 เดือน โดยปีที่ 4 บริษัทจะมีกำไรสะสม 22,327,215.52 บาทและกำไรจากการขายทองแดงจะเพิ่มขึ้นทุกปี

จากการคำนวณค่าตอบแทนจากการลงทุนหรือ ROI คำนวณได้จากสมการที่ (30) เมื่อเข้าสู่ปีที่ 5 ของการดำเนินกิจกรรม %ROI มีค่าประมาณ 339 หรืออาจกล่าวได้ว่าลงทุนไป 100 บาท จะได้ผลประโยชน์สุทธิจากการดำเนินงาน 339 บาทต่อปี

4.4.7 กรณีราคาทองแดงมีค่าสูงสุด

จากตารางที่ 4.8 พบว่าราคาขายทองแดงสูงสุดอยู่ที่ 170.03 บาทต่อกิโลกรัม คิดเป็นจำนวนเงินที่บริษัทสามารถขายโลหะทองแดงได้ 84,672.81 บาทต่อวัน หรือประมาณ 22,353,621.46 บาทต่อปี

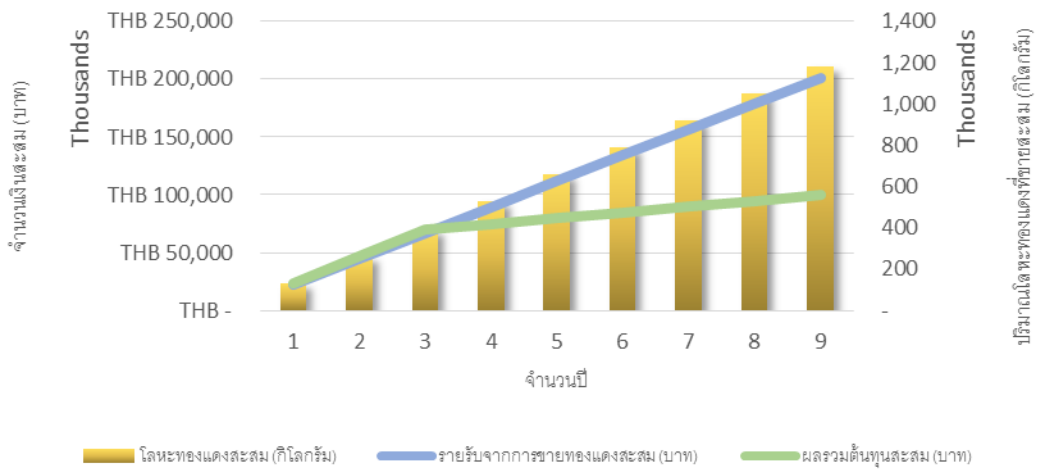
จากรายรับจากการขายทองแดง ต้นทุนที่เกิดขึ้นซ้ำทุกปีและการชำระหนี้ของบริษัท นำมาซึ่งการคำนวณผลกำไรหรือขาดทุนของการดำเนินกิจกรรมในแต่ละปี รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.13 และตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.13 การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 1-4 ในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าสูงสุด

รายละเอียด	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4
รายรับจากการขายทองแดง	22,353,621.46	22,353,621.46	22,353,621.46	22,353,621.46
รายรับจากการขายทองแดง (สะสม)	22,353,621.46	44,707,242.92	67,060,864.38	89,414,485.84
ต้นทุนที่เกิดซ้ำทุกปี	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72
การชำระหนี้แก่บริษัท	18,350,624.83	18,350,624.83	18,350,624.83	
ผลรวมต้นทุน	23,289,717.55	23,289,717.55	23,289,717.55	4,939,092.72
ผลรวมต้นทุน (สะสม)	23,289,717.55	46,579,435.11	69,869,152.66	74,808,245.38
กำไร/ขาดทุน ก่อนเสียภาษี (สะสม)	(2,340,242.66)	(6,084,630.91)	(9,829,019.17)	32,303,154.66

ตารางที่ 4.14 การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 5-8 ในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าสูงสุด

รายละเอียด	ปีที่ 5	ปีที่ 6	ปีที่ 7	ปีที่ 8
รายรับจากการขายทองแดง	22,353,621.46	22,353,621.46	22,353,621.46	22,353,621.46
รายรับจากการขายทองแดง (สะสม)	111,768,107.30	134,121,728.76	156,475,350.22	178,828,971.68
ต้นทุนที่เกิดซ้ำทุกปี	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72
การชำระหนี้แก่บริษัท				
ผลรวมต้นทุน	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72
ผลรวมต้นทุน (สะสม)	79,747,338.10	84,686,430.82	89,625,523.54	94,564,616.26
กำไร/ขาดทุน ก่อนเสียภาษี (สะสม)	101,961,265.74	171,619,376.82	241,277,487.90	310,935,598.98



รูปที่ 4.25 จุดคุ้มทุนในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าสูงสุด

จากรูปที่ 4.25 พบว่าจุดคุ้มทุนของการขายทองแดงในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าต่ำสุด อยู่ที่ประมาณ 420 ตัน ระยะเวลาจุดคุ้มทุนอยู่ที่ประมาณ 3 ปี 2 เดือน โดยปีที่ 4 บริษัทจะมีกำไรสะสม 32,303,154.66 บาทและกำไรจากการขายทองแดงจะเพิ่มขึ้นทุกปี

จากการคำนวณค่าตอบแทนจากการลงทุนหรือ ROI คำนวณได้จากสมการที่ (30) เมื่อเข้าสู่ปีที่ 5 ของการดำเนินกิจกรรม %ROI มีค่าประมาณ 353 หรืออาจกล่าวได้ว่าลงทุนไป 100 บาท จะได้ผลประโยชน์สุทธิจากการดำเนินงาน 353 บาทต่อปี

จุดคุ้มทุน กำไรสะสมและ %ROI ปีที่ 5 ของราคาขายทองแดงทั้ง 3 กรณี สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบจุดคุ้มทุน กำไรสะสมและ %ROI ปีที่ 5 ของราคาขายทองแดงทั้ง 3 กรณี

ราคาขายทองแดง	จุดคุ้มทุน (เดือน)	กำไรสะสม (บาท)	%ROI
ต่ำสุด	53	76,429,834.57	325
เฉลี่ย	52	89,233,343.39	339
สูงสุด	50	101,961,265.74	353

ในกรณีที่อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจ้างบริษัทรับกำจัดน้ำเสียเพื่อขนส่งน้ำทิ้งจากบ่อพักน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมนั้น ๆ รวมถึงการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปนและการกำจัดกากตะกอนที่เกิดขึ้นภายหลังจากกระบวนการบำบัดประมาณ 0.55 ดอลล่าร์สหรัฐอเมริกาต่อแกลลอน [36] หรือประมาณ 18.99 บาทต่อแกลลอน คำนวณจากอัตราแลกเปลี่ยนค่าสกุลเงินดอลล่าร์สหรัฐอเมริกาเป็นสกุลเงินบาทที่ 34.53 บาท ซึ่งจากงานวิจัยนี้มีสมมติฐานว่าบริษัทมีการปล่อยน้ำทิ้ง 50 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถ้าบริษัทไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียติดตั้งอยู่ภายในบริษัท บริษัทจะต้องจ้างบริษัทอื่นเพื่อรับน้ำเสียไปกำจัดต่อไป ส่งผลให้บริษัทนั้น ๆ จะมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปนและกำจัดกากตะกอนหลังกระบวนการบำบัดประมาณ 250,839.73 บาทต่อวัน

งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการแยกโลหะทองแดงออกจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินและออกแบบต้นแบบอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในอุตสาหกรรม จากการคำนวณจุดคุ้มทุนทั้ง 3 กรณีของราคาขายทองแดงพบว่าปีที่ 5 บริษัทจะมีกำไรสะสมตามตารางที่ 4.25 แต่ถ้าบริษัทนั้น ๆ จ้างบริษัทอื่นมากำจัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปน ในระยะเวลา 5 ปี บริษัทนั้น ๆ จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนรวมทั้งสิ้นประมาณ 331,108,446.24 บาท

ในกรณีที่อุตสาหกรรมนั้น ๆ มีระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับบำบัดโลหะหนักอยู่แล้ว จะมีค่ากำจัดกากตะกอนต่อปีอยู่ที่ 709,586.58 ดอลล่าร์สหรัฐอเมริกา [37] คิดเป็นเงินไทยประมาณ 24,502,024.83 บาท ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ที่ได้เสนอวิธีการแยกโลหะทองแดงออกจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถินและออกแบบต้นแบบอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในอุตสาหกรรม จากการคำนวณจุดคุ้มทุนทั้ง 3 กรณีของราคาขายทองแดงพบว่าปีที่ 5 บริษัทจะมีกำไรสะสมตามตารางที่ 4.25 แต่ถ้าบริษัทนั้น ๆ จ้างบริษัทอื่นมากำจัดกากตะกอน ภายในระยะเวลา 5 ปี บริษัทจะต้องเสียค่าใช้จ่ายประมาณ 122,510,124.13 บาท

ปกติอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ขนาดใหญ่จะมีการคำนวณประเมินความเสี่ยงสำหรับเหตุการณ์ฉุกเฉินที่เกิดขึ้น เช่น ประสิทธิภาพของเครื่องจักรลดลงหรือเหตุสุดวิสัยต่าง ๆ โดยบริษัทจะคำนวณที่ร้อยละ 75 ของความสามารถของกระบวนการนั้น ๆ

จากงานวิจัยนี้พบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน เมื่อจำลองกระบวนการผลิตด้วยโปรแกรม DWSIM version 4.0 สามารถแยกโลหะทองแดงกลับคืนมาจากน้ำทิ้งที่ความเข้มข้น 5,000 ppm ได้ 249 กิโลกรัมหรือร้อยละ 99.60 เมื่อพิจารณาความเสี่ยงที่ร้อยละ 75 ของความสามารถกระบวนการ พบว่าความสามารถใน

การแยกโลหะทองแดงกลับคืนมาจากน้ำทิ้งที่ความเข้มข้น 5,000 ppm ได้ 186.75 กิโลกรัมหรือร้อยละ 74.70

จากกระบวนการแยกกลับคืนทองแดง (Recovery) จากตัวดูดซับแทนนินหลังกระบวนการดูดซับโดยการเผาไหม้ตัวดูดซับแทนนินที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 11 ชั่วโมง ใน 1 วัน บริษัทสามารถเผาไหม้ตัวดูดซับแทนนินได้ 2 รอบ ซึ่งแต่ละรอบโลหะทองแดงสามารถกลับคืนมาได้ 186.75 กิโลกรัม ดังนั้น 1 วัน (24 ชั่วโมง) โลหะทองแดงสามารถกลับคืนมาได้ 373.50 กิโลกรัม

สำหรับการคำนวณจุดคุ้มทุน ผู้วิจัยขอยกตัวอย่างพิจารณาโดยใช้ราคาขายทองแดงที่มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ย จากตารางที่ 4.8 พบว่าราคาขายทองแดงมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 164.79 บาทต่อกิโลกรัม คิดเป็นจำนวนเงินที่บริษัทสามารถขายโลหะทองแดงได้ 61,549.07 บาทต่อวัน หรือประมาณ 16,248,953.16 บาทต่อปี

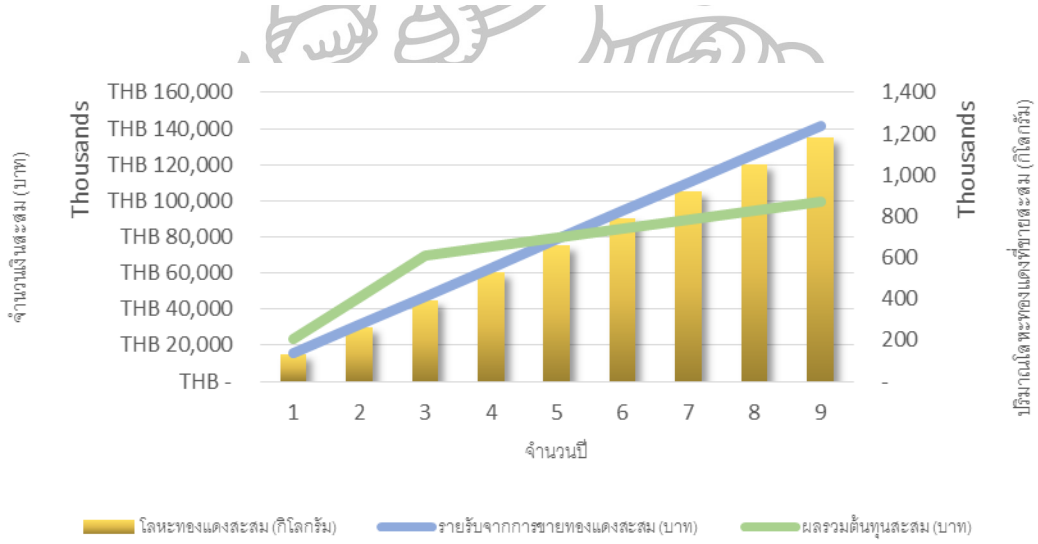
จากรายรับจากการขายทองแดง ต้นทุนที่เกิดขึ้นซ้ำทุกปีและการชำระหนี้ของบริษัท นำมาซึ่งการคำนวณผลกำไรหรือขาดทุนของการดำเนินกิจกรรมในแต่ละปี รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.16 และตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.16 การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 1-4 ในกรณีประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง 75% ของความสามารถในกระบวนการแยกโลหะทองแดง

รายละเอียด	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4
รายรับจากการขายทองแดง	15,730,158.07	15,730,158.07	15,730,158.07	15,730,158.07
รายรับจากการขายทองแดง (สะสม)	15,730,158.07	31,460,316.15	47,190,474.22	62,920,632.30
ต้นทุนที่เกิดซ้ำทุกปี	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72
การชำระหนี้แก่บริษัท	18,350,624.83	18,350,624.83	18,350,624.83	-
ผลรวมต้นทุน	23,289,717.55	23,289,717.55	23,289,717.55	4,939,092.72
ผลรวมต้นทุน (สะสม)	23,289,717.55	46,579,435.11	69,869,152.66	74,808,245.38
กำไร/ขาดทุน ก่อนเสียภาษี (สะสม)	(18,898,901.12)	(49,137,142.92)	(79,375,384.71)	(63,737,064.43)

ตารางที่ 4.17 การคำนวณกำไรหรือขาดทุนในการดำเนินกิจกรรมระหว่างปีที่ 5-8 ในกรณีประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง 75% ของความสามารถในกระบวนการแยกโลหะทองแดง

รายละเอียด	ปีที่ 5	ปีที่ 6	ปีที่ 7	ปีที่ 8
รายรับจากการขายทองแดง	15,730,158.07	15,730,158.07	15,730,158.07	15,730,158.07
รายรับจากการขายทองแดง (สะสม)	78,650,790.37	94,380,948.45	110,111,106.52	125,841,264.60
ต้นทุนที่เกิดซ้ำทุกปี	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72
การชำระหนี้แก่บริษัท	-	-	-	-
ผลรวมต้นทุน	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72	4,939,092.72
ผลรวมต้นทุน (สะสม)	79,747,338.10	84,686,430.82	89,625,523.54	94,564,616.26
กำไร/ขาดทุน ก่อนเสียภาษี (สะสม)	(20,572,806.89)	22,591,450.65	65,755,708.19	108,919,965.72



รูปที่ 4.26 จุดคุ้มทุนในกรณีที่ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง 75% ของความสามารถในกระบวนการแยกโลหะทองแดง

จากรูปที่ 4.26 พบว่าจุดคุ้มทุนของการขายทองแดงในกรณีที่กรณีประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง 75% ของความสามารถในกระบวนการแยกโลหะทองแดงอยู่ที่ประมาณ 700 ตัน ระยะเวลาจุดคุ้มทุนอยู่ที่ประมาณ 5 ปี โดยปีที่ 6 บริษัทจะมีกำไรสะสม 22,591,450.65 บาทและกำไรจากการขายทองแดงจะเพิ่มขึ้นทุกปี

จากการคำนวณค่าตอบแทนจากการลงทุนหรือ ROI คำนวณได้จากสมการที่ (30) เมื่อเข้าสู่ปีที่ 5 ของการดำเนินกิจกรรม %ROI มีค่าประมาณ 218 หรืออาจกล่าวได้ว่าลงทุนไป 100 บาท จะได้ผลประโยชน์สุทธิจากการดำเนินงาน 218 บาทต่อปี

การซ่อมบำรุง (Maintenance) แบ่งได้เป็น 2 ระยะ คือระยะสั้นและระยะยาว สำหรับแผนซ่อมบำรุงระยะสั้น บริษัทมีการใช้การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) โดยมีการใช้คู่มือการปฏิบัติงาน (Standard Operating Procedure : SOP) อย่างเคร่งครัด ซึ่งการใช้การบำรุงเชิงป้องกันนี้เพื่อการบำรุงรักษาที่พนักงานต้องทำประจำและการซ่อมบำรุงเครื่องจักรหรืออุปกรณ์เมื่อครบอายุตามที่ได้กำหนดไว้ เพื่อป้องกันและลดสภาพการเสื่อมสภาพของเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ หลีกเลี่ยงการเกิดการขัดข้องที่ฉุกเฉินจนส่งผลให้ระบบทำงานไม่เสร็จตามเป้าหมาย จนส่งผลให้ค่าผลผลิตร้อยละในการแยกทองแดงออกจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรม (% Yield) ของระบบลดลง

สำหรับแผนซ่อมบำรุงระยะยาว เพื่อป้องกันการหยุดชะงัก (interruption) ของสายการผลิตของระบบหน่วยการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน หน่วยการดูดซับทองแดงในน้ำทิ้ง และหน่วยการอบและเผาตัวดูดซับแทนนินเพื่อแยกทองแดง ควรมีการโอเวอร์ฮอน (overhaul) ทุก ๆ 6 ปี ทั้งนี้เนื่องจากบริษัทที่เสนอราคาขายและติดตั้งระบบจากทั้ง 3 บริษัท แนะนำว่าในการใช้งานระบบจริงในอุตสาหกรรมควรมีการทำโอเวอร์ฮอนทุก ๆ 8 ปี เพื่อป้องกันไม่ให้เครื่องจักรเกิดปัญหาการหยุดชะงักในการผลิต งบประมาณการ (budget) จึงถูกคำนวณทุก ๆ 6 ปี โดยในทุก ๆ 6 ปี บริษัทต้องมีการเชิญหน่วยงานอิสระ (Independence Party) เพื่อทำการตรวจสอบ (audit) สภาพของเครื่องจักรทั้งหมด ซึ่งทุก ๆ 6 ปี บริษัทจะคำนึงถึงงบประมาณ 54,238,300 บาทสำหรับการโอเวอร์ฮอนระบบทั้งหมด

จากการคำนวณข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ของระบบการแยกทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีทางวิศวกรรมต้นทุนและเศรษฐศาตร์วิศวกรรมพบว่าระบบการแยกทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน สามารถสร้างกำไรสะสมคืนให้แก่บริษัทได้ เมื่อพิจารณาราคาขายทองแดงทั้ง 3 กรณี ไม่ว่าจะเป็นในกรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าต่ำ มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ย หรือมีค่าสูงสุด จุดคุ้มทุนของระบบการแยกทองแดงน้อยกว่า 4 ปี และในปีที่ 8 ทั้ง 3 กรณี มีกำไรสะสมมากกว่า 250 ล้านบาท ซึ่งเมื่อพิจารณาความเสี่ยงในกรณีที่ความสามารถของกระบวนการลดลง 75% ของความสามารถของกระบวนการเดิม พบว่าจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 5 ปี และในปีที่ 8 บริษัทยังคงมีกำไรสะสมมากกว่า 100 ล้านบาท

บทที่ 5
สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

เนื่องจากงานวิจัยนี้ แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ขั้นตอน คือการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน การแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 การขยายขนาดการแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับนำร่อง (Pilot scale) และการคำนวณข้อมูลตัวแปรต่างๆของระบบการแยกทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีทางวิศวกรรมต้นทุนและเศรษฐศาตร์วิศวกรรม จากการวิจัย สรุปผลการทดลองได้ตามลำดับดังนี้

5.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถิน

วิธีการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนนินจากใบกระถินด้วยกรดซัลฟิวริกตามวิธีการในงานวิจัยนี้ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ สามารถใช้วิธีการสังเคราะห์นี้ในการขยายขนาดการผลิต โดยการปรับอัตราส่วนระหว่างใบกระถินและกรดซัลฟิวริกในอัตราส่วนเริ่มต้น (1 เท่า) คือใบกระถิน 100 กรัมต่อกรดซัลฟิวริก 30 มิลลิลิตร โดยค่าผลผลิตร้อยละของตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน สามารถคำนวณได้จาก

$$y = -0.0671x + 85.23$$

เมื่อ x คือระดับของการขยายขนาด และ y คือค่าผลผลิตร้อยละของตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

5.2 การแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

จากการออกแบบการทดลองด้วยการพิจารณาปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยคือ ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลายและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน พบว่าสภาวะที่เหมาะสม (Optimum) ในการแยกทองแดงออกจากสารละลาย 25 มิลลิลิตร ในระดับห้องปฏิบัติการที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลาย 5

อุณหภูมิของสารละลาย 30 องศาเซลเซียสและปริมาณตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน 0.6 กรัม โดยที่เงื่อนไขดังกล่าวนี้ก่อให้เกิดร้อยละการแยกทองแดงออกจากสารละลายมากกว่า 99

5.3 การขยายขนาดการแยกทองแดงออกจากสารละลายในระดับนำร่อง (Pilot scale)

จากการขยายขนาดการแยกทองแดงออกจากสารละลายในห้องปฏิบัติการและจากการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม DWSIM Version 4.0 โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม (Optimum) ในกระบวนการดูดซับ สามารถขยายขนาดได้จากอัตราส่วนเริ่มต้น คือตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน 0.6 กรัมต่อสารละลายทองแดง 25 มิลลิลิตร โดยตัวดูดซับแทนนินทั้งหมดต้องมีการสัมผัสกับสารละลายจนถึงจุดสมดุล (Equilibrium) และมีการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับอย่างสมบูรณ์จะส่งผลให้ค่าร้อยละการแยกโลหะทองแดงมีค่าประมาณ 99.60

5.4 การคำนวณข้อมูลตัวแปรต่างๆของระบบการแยกทองแดงในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีทางวิศวกรรมต้นทุนและเศรษฐศาตร์วิศวกรรม

เมื่อพิจารณาจากราคาขายทองแดงที่ต่ำสุด มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยและสูงสุดในรอบหนึ่งปีที่ผ่านมา พบว่าจุดคุ้มทุนของทั้ง 3 กรณีน้อยกว่า 4 ปี และบริษัทมีกำไรสะสมจากการขายทองแดงเพิ่มขึ้นทุกปี รายละเอียดดังนี้

กรณีราคาขายทองแดงต่ำสุด จากการคำนวณพบว่าจุดคุ้มทุนของการขายทองแดงอยู่ที่ประมาณ 450 ตัน ระยะเวลาจุดคุ้มทุนอยู่ที่ประมาณ 3 ปี 5 เดือน โดยปีที่ 5 บริษัทจะมีกำไรสะสม 76,429,834.57 บาท

กรณีราคาขายทองแดงมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ย จากการคำนวณพบว่าจุดคุ้มทุนของการขายทองแดงอยู่ที่ประมาณ 440 ตัน ระยะเวลาจุดคุ้มทุนอยู่ที่ประมาณ 3 ปี 4 เดือน โดยปีที่ 5 บริษัทจะมีกำไรสะสม 89,233,343.39 บาท

กรณีราคาขายทองแดงสูงสุด จากการคำนวณพบว่าจุดคุ้มทุนของการขายทองแดงอยู่ที่ประมาณ 420 ตัน ระยะเวลาจุดคุ้มทุนอยู่ที่ประมาณ 3 ปี 2 เดือน โดยปีที่ 5 บริษัทจะมีกำไรสะสม 101,961,265.74 บาท

สำหรับสรุปเกี่ยวการการลงทุน ถ้าองค์กรต้องบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปนเพื่อให้ถูกต้องตามกฎหมายโดยว่าจ้างบริษัทอื่นเข้ามารับกำจัด (Third party) ผลรวมค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปีประมาณ 66.22 ล้านบาท ในทางตรงกันข้าม ถ้าองค์กรดำเนินระบบการแยกโลหะทองแดงในน้ำทิ้งด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน องค์กรจะได้รับผลประโยชน์ (Cost benefit) ใน

กรณีที่ราคาขายทองแดงมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยที่ ประมาณ 165 บาทต่อกิโลกรัม ระยะเวลาเฉลี่ย 8 ปี ผลประโยชน์ปีละประมาณ 36 ล้านบาท จำนวนเงินผลประโยชน์นี้รวมถึงค่าใช้จ่ายต่าง ๆ และการคืนทุนจากการลงทุนเริ่มต้น ถ้ามองถึงในระดับที่ยั่งยืน (Sustainable level) ผลประโยชน์ที่องค์กรจะได้รับปีละประมาณ 66.91 ล้านบาท จากการคำนวณผลประโยชน์เฉลี่ยใน 8 ปีแรก องค์กรจะมีแนวโน้มได้รับผลประโยชน์ที่เพิ่มขึ้นถึง 248% เมื่อเปรียบเทียบกับการที่องค์กรต้องเสียค่าใช้จ่ายให้กับบริษัทที่เข้ามาจัดการบำบัดน้ำเสีย

ข้อเสนอแนะ

ตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากพืชที่มีแทนนินเป็นองค์ประกอบ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับโลหะชนิดอื่น ๆ ในสารละลาย แต่ต้องทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกโลหะนั้น ๆ ออกจากสารละลายก่อน จึงจะทำให้เกิดผลร้อยละการแยกโลหะที่มากที่สุด

มหาวิทยาลัยศิลปากร

รายการอ้างอิง

[1] Fujitsu Ltd., (2016) "**Contributing to Resource Reuse by Recovering High Concentrations of Copper from Wastewater"**. เข้าเมื่อวันที่ 28 มกราคม 2559. เข้าถึงได้จาก http://www.fujitsu.com.

[2] American Eletroplaters' Society, (2016) "**Pollution Control for the Electronics Industry"**. เข้าเมื่อวันที่ 28 มกราคม 2559. เข้าถึงได้จาก http://infohouse.p2ric.org /ref/ 33/32737. pdf.

[3] W Chun-rong et al. (2013). "Adsorption of Zinc and Copper Heavy Metal Ions from Smelting Wastewater Using Modified Lava Particles". **Pol. J. Environ. Stud.** Vol. 22, No. 6, P1863-1869.

[4] Mining Industry Human Resources Council, (2016) **"Economic Overview and Trends"**. เข้าเมื่อวันที่ 28 มกราคม 2559. เข้าถึงได้จาก http://www.mininghrforecasts.ca/en/Economic-Overview-and-Trends.asp.

[5] Y. Yanachawakul et al. (2010). "Copper recovery from aqueous solution using tannin adsorbent synthesized from Thai plant". **The 17th Regional Symposium on Chemical Engineering**. P198-202.

[6] ญาชนาภา ญาณชวกุล. (2553). "การดูดซับไอออนโละมีค่าด้วยแทนนินจากพืชไทย" . วิทยานิพนธ์สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

[7] กรมโรงงานอุตสาหกรรม, (2016) **"อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (IC และ PCB)"**. เข้าเมื่อวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก http://www2.diw.go.th/I_Standard/Web/pane_ files/Industry25.asp.

[8] Digital Analysis Corporation (2016), **"Heavy Metal Removal from Industrial Wastewater"**. เข้าเมื่อวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก http://www.phadjustment.com/TArticles/Heavy_Metal_Reduction.html.

[9] ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และสโรช ฐิติเกียรติพงศ์. (2538). **"วัสดุในงานวิศวกรรม"**. ซีเอ็ดยูเคชั่น, หน้า 26-27.

[10] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, (2016) **"ทองแดง"**. เข้าเมื่อวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก https://th.wikipedia.org/wiki /%E0%B8%97%E0%B8%A%E0%B8 %87%E0%B9 %81%E0%B8%94%E0%B8%87

[11] สุวิชช์ สัมปัตตะวนิช และงามพิศ อังคทะวานิช.(2518). **"ทองแดง"**. กองเศรษฐธรณีวิทยา กรม ทรัพยากรธรณี, หน้า 5.

[12] The London Metal Exchange, (2016) **"LME Copper"**. เข้าเมื่อวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก http://www.lme.com/metals/non-ferrous/copper/#tab3

[13] โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการนำวัสดุเหลือใช้และกากของเสียมาใช้ประโยชน์ กรม อุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, (2558) **"เทคโนโลยีการแยกสกัดโลหะมีค่าและโลหะพื้นฐานจากขยะอิเล็กทรอนิกส์"**. เข้าเมื่อวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2559. เข้าถึงได้จาก https://www.google .co.th/url? sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd =1&cad=r ja&uact=8&ved=0ahUKEwjkkbn80Mn LAhUWBo4KHbEzBkAQFggbM AA&url =http%3A%2F%2Fwww.dpim.go.th%2Fservice%2 Fdownload%3 Farticleid 3D349 8%26F%3D6472&usg=AFQjCNFYeJRgCBV3uZnBwU9NBcx75yrv4w.

[14] บริษัท ทิพวัฒน์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด, (2557) **"กระถินยักษ์ (Leucaena)"**, เข้าเมื่อวันที่ 19 มิถุนายน 2559. เข้าถึงได้จาก http://www.thaibiomass.com/uploads/3/4/6/3/3463780 /_leucaena _lencocephala_20140515.pdf.

[15] ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา, (2556) **"การผลิตกระถินป่นส่งจำหน่ายโรงงานอาหารสัตว์สำหรับเกษตรกรรายย่อยในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา"**, เข้าเมื่อวันที่ 19 มิถุนายน 2559. เข้าถึงได้จาก https://www.gotoknow.org/posts/243003.

[16] รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ รศ.ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2551). **"การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง"**. ท้อป, หน้า 35-55.

[17] ปารเมศ ชุติมา. (2545). **"การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม"**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 25-49.

[18] ศ.กิตติคุณ ดร.วิวัฒน์ตัณฑะพานิชกุล. (2553). **"Introduction to Scale-up of Chemical Processes"**. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), หน้า 27-31.

[19] Jean-Paul Euzen. (1993). **"Scale-up methodology for chemical processes"**. Gulf Pub. Co., P120-130.

[20] F. Garcia-Ochoa and E. Gomez. (2009). "Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview". **Biotechnology Advances**, Volume 27(2), P153–176.

[21] T. Knowlton et al. (2005). "Scale-up of fluidized-bed hydrodynamics". **Powder Technology**, Volume 150(2), P72–77.

[22] ชนงกรณ์ กุณฑลบุตร. (2557). **"การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนทางธุรกิจ Feasibility study".** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 9-20.

[23] ฐาปนา ฉิ่นไพศาล. (2556). **"การบริหารโครงการและการศึกษาความเป็นไปได้ Project management and feasibility study"**. ธีระฟิล์มและไซเท็กซ์, หน้า 30-40.

[24] ธนลักษมณ์ ศิรินภาทรัพย์และคณะ. (2559). "การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อนำก๊าซชีวภาพมาใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตยางแท่งมาตรฐาน 20 ในสังกัดการยางแห่งประเทศไทย ในอำเภอวังสามหมอ จังหวัดอุดรธานี". **วารสารเศรษฐศาสตร์และกลยุทธ์การจัดการ**, ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2559 คณะเศรษฐศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[25] ปิยนุช บุญศิริชัย. (2547). "การศึกษาความเป็นไปได้ของการบำบัดคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำโดยใช้ผักกระเฉด" วิทยานิพนธ์สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์ สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษา สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

[26] M. Senante et al. (2010). "Economic feasibility study for wastewater treatment: A cost–benefit analysis". **Science of the Total Environment**, Volume 408, P4396-4402.

[27] บุษบา พฤกษาพันธุ์รัตน์. (2555). **"เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม Engineering economy"**. ท้อป, หน้า 53-62.

[28] จิรรัตน์ ธีระวราพฤกษ์. (2552). **"เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม"**. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, หน้า 48-55.

[29] ไพบูลย์ แย้มเผื่อน. (2548). **"เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม"**. ซีเอ็ดยูเคชั่น, หน้า 38-52.

[30] วันชัย ริจิรวนิช และชอุ่ม พลอยมีค่า. (2545). **"เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม"**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 44-49.

[31] Frederick R. Rohs. (2004). "Return on Investment (ROI): Calculating the Monetary Return of a Leadership DEvelopment Program". **Journal of Leadership Education**, Volume3, P2.

[32] I. Sengila and M. Ozacarb. (2008). "Biosorption of Cu(II) from aqueous solutions by mimosa tannin gel". **Journal of Hazardous Materials**, Volume 157(2), P277-285.

[33] X. Suna et al. (2011). "Adsorptive removal of Cu(II) from aqueous solutions using collagen-tannin resin". **Journal of Hazardous Materials**, Volume 186(2), P1058-1063.

[34] Y. Suzuki et al. (2004). "Adsorption characteristics of tannin for heavy metal ions". **AIChE 2003 Annual Meeting**. P265-274.

[35] พรสวรรค์ อัศวแสงรัตน์ และวีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์. (2553). “การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ”. **วิศวสารลาดกระบัง,** ปีที่ 27 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2553 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[36] Oberlin Filter Company, (2014) **“Heavy Metal Wastewater Treatment”**. เข้าเมื่อวันที่ 9 กันยายน 2559. เข้าถึงได้จาก http://www.oberlinfilter.com/heavy-metal-wastewater-filtration.

[37] EMWATER Efficient management of wastewater project, (2015) **“Operation costs of wastewater treatment plants”**. เข้าเมื่อวันที่ 9 กันยายน 2559. เข้าถึงได้จาก https://cgi.tuharburg.de/~awwweb/wbt/emwater/documents/lesson_c2.pdf.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

การหาความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน

ตัวอย่าง การหาความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดง 35 ppm ปริมาตร 20 มิลลิลิตร pH 5 ด้วยตัวดูดซับแทนนินที่สังเคราะห์จากใบกระถิน 0.25 กรัม เวลาในการดูดซับ 48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างการคำนวณ

หลังกระบวนการดูดซับ เมื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองแดงหลังการดูดซับด้วย Inductivity couple plasma spectrometer (ICP) พบว่ามีค่า 0.65 ppm

$q = (C_i - C_t)V$

= (ความเข้มข้นเริ่มต้น – ความเข้มข้นหลังการดูดซับ) * ปริมาตรสารละลาย

$= (35 - 0.65)\ \frac{\text{มิลลิกรัม}}{\text{ลิตร}} * \frac{20\ \text{ลิตร}}{1000}$

= 0.687 มิลลิกรัม

ตัวดูดซับ 0.25 กรัม สามารถดูดซับโลหะทองแดงได้ 0.687 มิลลิกรัม

ดังนั้นตัวดูดซับ 1 กรัม จะสามารถดูดซับโลหะทองแดงได้ 0.687 / 0.25 = 2.748 มิลลิกรัม

แสดงว่าตัวดูดซับแทนนินมีประสิทธิภาพในการดูดโลหะทองแดง 2.748 มิลลิกรัม/กรัม

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลอง

ข.1 ตารางน้ำหนักใบกระถินก่อนและหลังการสังเคราะห์ตัวดูดซับแทนในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) และในระดับนำร่อง (Pilot scale) ที่ 10 และ 20 เท่า

ขนาดการผลิต	น้ำหนักใบกระถิน ก่อนการสังเคราะห์ (กรัม)	น้ำหนักใบกระถิน หลังการสังเคราะห์ (กรัม)
1 เท่า	100.00	85.22
10 เท่า	1,000.00	844.50
20 เท่า	2,000.00	1,678.80

ข.2 ตารางผลความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายหลังกระบวนการดูดซับในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

การทดลองที่	ความเข้มข้นของทองแดงเริ่มต้น (ppm)	ความเป็นกรดด่าง (pH)	อุณหภูมิของสารละลาย	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นของทองแดงหลังกระบวนการดูดซับ (ppm)
1	50	6	30	0.40	0.26
2	50	6	30	0.60	0.29
3	50	6	40	0.60	0.33
4	50	6	40	0.40	0.33
5	50	5	30	0.40	0.22
6	50	5	30	0.60	0.18
7	50	5	40	0.60	0.31
8	50	5	40	0.40	0.26
9	50	6	30	0.40	0.24
10	50	6	30	0.60	0.27
11	50	6	40	0.60	0.32
12	50	6	40	0.40	0.31
13	50	5	30	0.40	0.23
14	50	5	30	0.60	0.18
15	50	5	40	0.60	0.31
16	50	5	40	0.40	0.25
17	50	6	30	0.40	0.25
18	50	6	30	0.60	0.26

ข.2 ตารางผลความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายหลังกระบวนการดูดซับในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 (ต่อ)

การทดลองที่	ความเข้มข้นของทองแดงเริ่มต้น (ppm)	ความเป็นกรดด่าง (pH)	อุณหภูมิของสารละลาย	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นของทองแดงหลังกระบวนการดูดซับ (ppm)
19	50	6	40	0.60	0.33
20	50	6	40	0.40	0.30
21	50	5	30	0.40	0.22
22	50	5	30	0.60	0.17
23	50	5	40	0.60	0.29
24	50	5	40	0.40	0.23

ข.3 ตารางผลความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายหลังกระบวนการดูดซับในระดับนำร่อง (Pilot scale) 10 เท่า

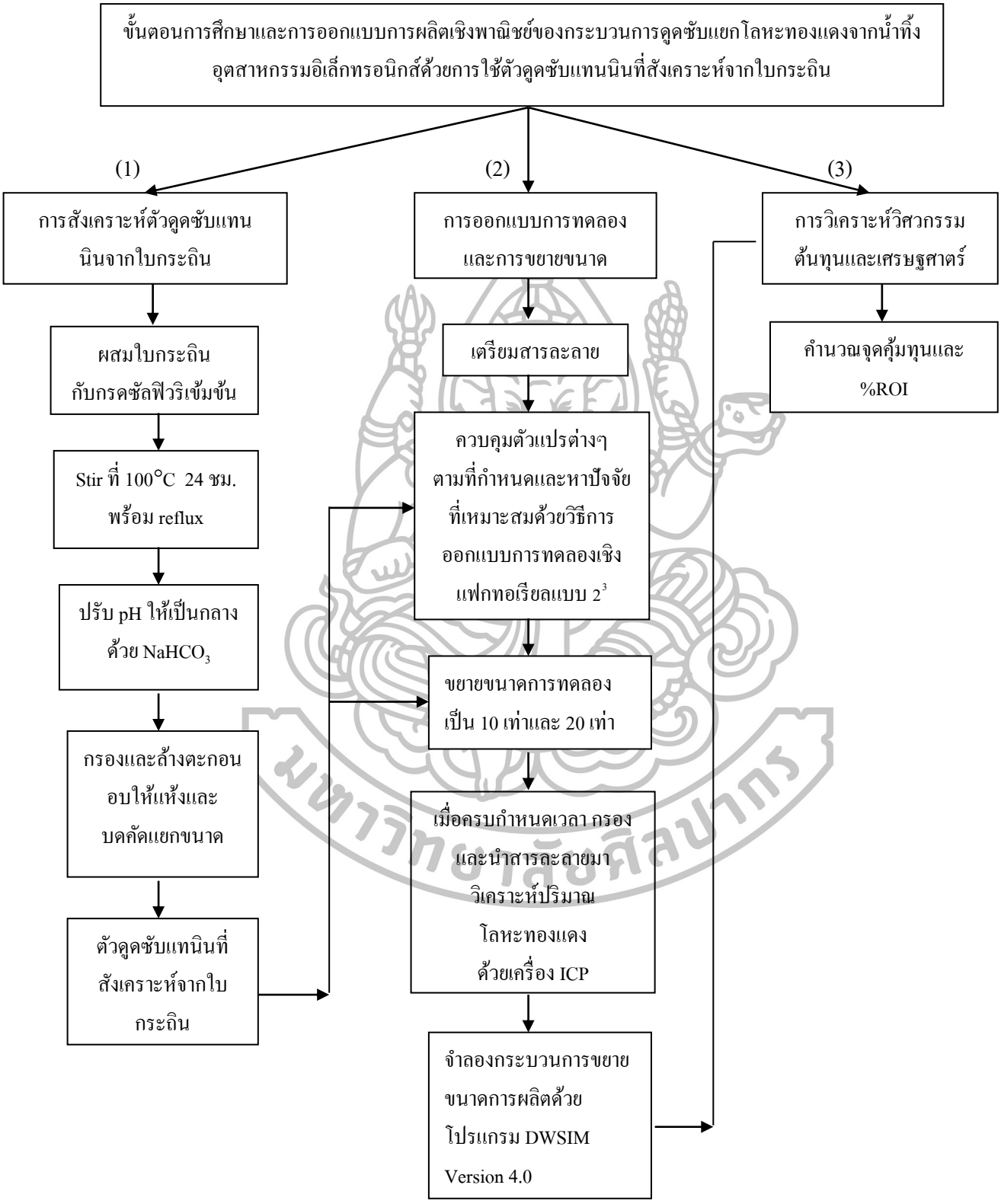
การทดลองที่	ความเข้มข้นของทองแดงเริ่มต้น (ppm)	ความเป็นกรดด่าง (pH)	อุณหภูมิของสารละลาย	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นของทองแดงหลังกระบวนการดูดซับ (ppm)
1	500	6	30	6.00	1.75
2	500	6	30	6.00	1.75
3	500	6	40	6.00	1.80

ข.4 ตารางผลความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายหลังกระบวนการดูดซับในระดับนำร่อง (Pilot scale) 20 เท่า

การทดลองที่	ความเข้มข้นของทองแดงเริ่มต้น (ppm)	ความเป็นกรดด่าง (pH)	อุณหภูมิของสารละลาย	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นของทองแดงหลังกระบวนการดูดซับ (ppm)
1	1000	6	30	12.00	23.60
2	1000	6	30	12.00	23.85
3	1000	6	40	12.00	23.55

ภาคผนวก ค

ขั้นตอนการดำเนินงาน



ภาคผนวก ง

การพัฒนาตนเอง

ง.1 การพัฒนาตนเองในปีพ.ศ. 2557

เข้าร่วมการประชุมวิชาการด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรม ครั้งที่ 5 (The 5th Conference on Industrial Operations Development 2014: CIOD 2014) วันที่ 9 พฤษภาคม 2557 ณ โรงแรมรามาการ์เดนส์ กรุงเทพมหานคร จัดโดยคณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ในการประชุมครั้งนี้ ได้ทำความรู้จักกับผู้เข้าร่วมการประชุมวิชาการ ดังนี้

1) ผู้ช่วยศาสตรจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ

2) ดร.วรพจน์ มีดม

3) ดร.สุวัจน์ ด่านสมบูรณ์

4) ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล

5) คุณนัตพงศ์ โชติพันธ์

ง.2 การพัฒนาตนเองในปีพ.ศ. 2558

เข้าร่วมการประชุมวิชาการ 8th ATRANS Symposium "Transportation for A Better Life" วันที่ 21 สิงหาคม 2558 ณ โรงแรมสวิสโฮเต็ล ปาร์คนายเลิศ กรุงเทพมหานคร จัดโดยสมาคมวิจัยวิทยาการขนส่งแห่งเอเชีย

ในการประชุมครั้งนี้ ได้ทำความรู้จักกับผู้เข้าร่วมการประชุมวิชาการ ดังนี้

1) รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ นฤปิติ

2) รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย สุมาลี

3) ผู้ช่วยศาสตรจารย์ ดร.มาโนช โลหเตปานนท์

4) ดร.สโรช บุญศิริพันธ์

5) คุณอรวิทย์ เหมะจุฑา

ง.2 การพัฒนาตนเองในปีพ.ศ. 2559

เข้าร่วมนำเสนอผลงานแบบบรรยาย (Oral Presentation) การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ "The 6th International Conference on Sciences and Social Sciences 2016 : Mutual Community Engagement toward Global Understanding and Sustainable Well-being" ระหว่างวันที่ 22 - 23 กันยายน 2559 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม จัดโดยมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

ในการนำเสนอผลงานครั้งนี้ ได้ทำความรู้จักกับผู้เข้าร่วมการประชุมวิชาการ ดังนี้

1) รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย บุษหมั่น
2) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิกร สายแก้ว
3) ดร.พัชราภรณ์ พิมพ์จันทร์
4) คุณภาคภูมิ มุกดาสนิท
5) Miss Tran Thi Tuyen

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวญาชนาภา ญาณชวกุล
ที่อยู่	64/120 ซอย 10/1 หมู่บ้านเทพประทาน เวฬุวนาราม 12 เขตดอนเมือง แขวงดอนเมือง 10210
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2548	สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนราชโบริกานุเคราะห์ จังหวัดราชบุรี
พ.ศ.2552	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัญฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี จากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
พ.ศ.2554	สำเร็จการศึกษาปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
พ.ศ.2556	เข้าศึกษาต่อระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ.2554	วิศวกรวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัท เอส.ซี.เอช. อินดัสตรี้ จำกัด จังหวัดราชบุรี
พ.ศ.2558	วิศวกรคุณภาพ บริษัท เอส วี ไอ จำกัด (มหาชน)

มหาวิทยาลัยศิลปากร