

ผังการไหลและวัฏจักรชีวิตของการจัดการกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment of Sulfuric Acid Waste
from Lead-Acid Battery Management



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผังการไหลและวัฏจักรชีวิตของการจัดการกรดซัลฟิวริกจาก แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด
โดย	น.ส.กนกพร อินแดง
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชตชนก อัทฒพงษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ (ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก (รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชตชนก อัทฒพงษ์)
.....	กรรมการ (ศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ)
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอมมา อาสนจินดา)

กนกพร อินแดง : ผังการไหลและวัฏจักรชีวิตของการจัดการกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด. (Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment of Sulfuric Acid Waste from Lead-Acid Battery Management) อ.ที่ปรึกษาหลัก :
 รศ. ดร.สุธา ขาวเอียร, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.ชดชนก อัทธพงษ์

ประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558-2560 มีปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้วชนิดตะกั่ว-กรดคิดเป็นร้อยละ 88 จากแบตเตอรี่ใช้แล้วทั้งหมด ซึ่งองค์ประกอบหลักอย่างตะกั่ว และ พลาสติกมีการรีไซเคิลอย่างเป็นระบบ แต่กรดซัลฟิวริกในแบตเตอรี่นั้น มักถูกจัดการโดยการปล่อยผสมรวมกับน้ำเสียของโรงงานหรือรับสภาพแล้วแยกตะกอนที่เกิดขึ้นไปฝังกลบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเปรียบเทียบแนวทางการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดและปริมาณกรดซัลฟิวริกในประเทศไทยด้วยการสร้างแผนผังการไหล พบว่ามีการส่งออกแบตเตอรี่มากกว่าการนำเข้า และ ในช่วง 3 ปีที่ผ่านมาแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดใช้แล้วมีแนวโน้มถูกจัดการอย่างถูกต้องที่เพิ่มขึ้น การตกผลึกยิปซัมด้วยการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าปริมาณตะกอนแคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นแปรผันตามค่าพีเอชสุดท้ายของสารละลายตะกอนที่ได้ส่วนใหญ่เป็นยิปซัมในระบบผลึกเป็นโมโนคลินิก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดผลึกรูปแผ่นมีขนาดและมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างลดลง ขณะที่ผลึกรูปแท่งและรูปเข็มมีความยาวและปริมาณเพิ่มขึ้นและ การตกตะกอนแคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่ ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 พบว่าโลหะที่เจือปน เช่น แมกนีเซียม มีผลทำให้ขนาดของผลึกเล็กลงเมื่อเทียบกับผลึกยิปซัมจากธรรมชาติ ตะกอนที่ได้เป็นยิปซัมในระบบผลึกเป็นโมโนคลินิกและ เกิดขึ้นรูปแท่งเพียงอย่างเดียวในการเปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว 1 ตัน ทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่การปรับสภาพให้เป็นกลาง และการผลิตเป็นยิปซัมในโปรแกรม SimaPro 8.3 และ ใช้วิธีการคำนวณผลกระทบ CML-IA baseline พบว่าผลกระทบหลักของทั้ง 3 วิธี คือ ด้านการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ ด้านการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด และ ด้านการก่อให้เกิดสภาวะความเป็นกรด โดยสาเหตุหลักของแต่ละวิธีมาจากการใช้ไฟฟ้า ตะกอนไปหลุมฝังกลบ และ น้ำเสียตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6070427521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Lead-acid battery Material flow analysis Gypsum precipitation Life cycle assessment
 Kanokporn Intang : Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment of Sulfuric Acid Waste
 from Lead-Acid Battery Management. Advisor: Assoc. Prof. Sutha Khaodhiar, Ph.D. Co-
 advisor: Asst. Prof. Chodchanok Attaphong, Ph.D.

In Thailand from 2015 to 2016, 88% of spent batteries are Lead-acid batteries (LABs) in which their main composition (lead and plastic) are recyclable. Whilst, sulfuric acid treatment is not uninterested issue. A typical method for treatment of spent acid before discharge is neutralization and subsequently the precipitate from this neutralization are then landfilled. This research focuses on the comparison of spent sulfuric treatment methods. The material flow analysis was used as an evaluation tool to estimate the number of spent LABs and sulfuric acid. The material flow analysis revealed that the exporting of LABs is larger than importing. The proper management of spent LABs is also increasing due to tax incentive policy. Regarding the factors influence the quality and quantity of gypsum precipitation by the reaction between H_2SO_4 and $Ca(OH)_2$ in a batch system, the result showed that the quantity of calcium sulfate depends on the pH value of the solution. Most precipitates are gypsum with a monoclinic crystal pattern. With increasing the concentration of sulfuric acid, plate-like crystal size decrease while needle-like and rod-like crystals are growing more and their lengths also increase. Thus, precipitates of spent sulfuric acid from traction battery with 10% $Ca(OH)_2$ showed that metals in spent sulfuric acid affect both quality and quantity of gypsum. This precipitate has a smaller crystal size than natural gypsum but its crystal pattern still is the same. The environmental impact of each treatment method including, regeneration, neutralization, and recycling of gypsum, were considered within the system boundary of Gate-to-Gate. The functional unit is 1 ton of spent sulfuric acid. A software used in this study and research methodology were SimaPro 8.3 and CML-IA baseline. The main environmental impacts of those treatment methods were human toxicity, fresh aquatic ecotoxicity and acidification. Electricity consumption, landfilling of solid waste and wastewater generation were the key parameters in each treatment method.

Field of Study:	Environmental Engineering	Student's Signature
Academic Year:	2019	Advisor's Signature
		Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเสียร และ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชตชนก อัทธมงคล ที่เอื้อเฟื้อกรุณาให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางในการทำงานวิจัย ตลอดจนช่วยแก้ไข และสนับสนุนในด้านต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ และคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอมมา อาสนจินดา ที่ได้ให้เกียรติสละเวลาเพื่อการสอบวิทยานิพนธ์นี้ และได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ซึ่งช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความเอื้อเฟื้ออุปถัมภ์สถานที่ และอำนวยความสะดวกในระหว่างการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากโปรแกรมวิจัย (Research Program) และ ขอขอบคุณคำแนะนำที่เป็นประโยชน์จาก ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอบคุณ บริษัท นำแสงจักรกล จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์กรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่ และ ให้ความรู้เกี่ยวกับแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า และ การจัดการของเสียที่เกิดขึ้นภายในโรงงาน

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนส่งเสริมทางการศึกษา ให้การสนับสนุนทางด้านกำลังใจ คำปรึกษา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์ที่สุด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่อื่น ๆ ที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจเป็นอย่างดีทั้งในขณะศึกษา และดำเนินงานวิจัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	16
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	16
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	18
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย.....	18
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	18
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	19
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
2.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด.....	20
2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด.....	20
2.1.2 มลพิษและความเสี่ยงจากองค์ประกอบของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด.....	25
2.1.3 การจัดการและปริมาณของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในไทย	27
2.1.4 กระบวนการรีไซเคิลแบตเตอรี่ในปัจจุบัน.....	29
2.2 กรดซัลฟิวริก	31
2.2.1 แนวทางการจัดการกรดซัลฟิวริก.....	31
2.2.2 มาตรฐานสารอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด.....	35

2.3 ยิปซัม 37	
2.3.1 ยิปซัมสังเคราะห์ (synthetic gypsum).....	39
2.3.2 การดีไฮเดรตของยิปซัม (Dehydration of gypsum).....	40
2.4 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis, MFA)	41
2.4.1 นิยาม	41
2.4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ.....	43
2.5 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA).....	49
2.5.1 อนุกรมมาตรฐาน ISO 14040	50
2.5.2 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต	51
2.6 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....	59
2.6.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดกรดซัลฟิวริก.....	59
2.6.2 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material flow analysis) และ การประเมินวัฏจักรชีวิตแบบเตอริตะกัว-กรด (Life Cycle Assessment, LCA)	71
บทที่ 3 แผนการดำเนินงานวิจัย	74
3.1 แผนการวิจัยที่ 1.....	74
3.1.1. การดำเนินการวิจัย.....	76
3.2 แผนการวิจัยที่ 2.....	87
3.2.1 การเตรียมวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย.....	87
3.2.2 การดำเนินการวิจัย.....	89
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	92
4.1 ผลการทดลองแผนการวิจัยที่ 1.....	92
4.1.1 การประเมินจำนวนแบคทีเรียชนิดตะกัว-กรดในประเทศไทย	92
4.1.2 การประเมินปริมาณกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบคทีเรียชนิดตะกัว-กรดในประเทศไทย	

4.1.3 การไหลของวัสดุในแต่ละวิธีการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว.....	106
4.1.4 การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม.....	109
4.1.5 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายจากการบำบัดกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว.....	122
4.2 ผลการทดลองแผนการวิจัยที่ 2.....	124
4.2.1 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่.....	124
4.2.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณและสมบัติพิษจากการเติมปูนขาวในกรดซัลฟิวริก บริสุทธิ์.....	126
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	140
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	140
5.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	142
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ.....	143
6.1 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม.....	143
6.2 ประโยชน์ในการประยุกต์ใช้เชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	143
ภาคผนวก.....	144
ภาคผนวก ก.....	145
ภาคผนวก ข.....	152
ภาคผนวก ค.....	157
บรรณานุกรม.....	159
ประวัติผู้เขียน.....	160

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2- 1 สัดส่วนองค์ประกอบจากแบคทีเรียชนิดตะกั่ว-กรด.....	24
ตารางที่ 2- 2 องค์ประกอบในแบคทีเรีย กับ ลักษณะความเสี่ยง	25
ตารางที่ 2- 3 ค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสารเคมีของตะกั่วและกรดซัลฟิวริก	26
ตารางที่ 2- 4 ปริมาณของแบคทีเรียชนิดตะกั่ว-กรดตามวิธีกำจัด/บำบัด.....	28
ตารางที่ 2- 5 ปริมาณการนำเข้า-ส่งออกแบคทีเรียใช้แล้วแบบตะกั่ว-กรดระหว่างปี พ.ศ. 2558 - 2560.....	29
ตารางที่ 2- 6 ต่างชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการปรับสภาพกรด	33
ตารางที่ 2- 7 ผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีต่อสมบัติของยิปซัม.....	34
ตารางที่ 2- 8 ประเภทของกรดซัลฟิวริกในแบคทีเรียชนิดตะกั่ว-กรด	36
ตารางที่ 2- 9 ปริมาณสารเคมีที่ควบคุมในกรดซัลฟิวริกในแบคทีเรียชนิดตะกั่ว-กรด	36
ตารางที่ 2- 10 สมบัติของไดไฮเดรตและแอนไฮเดรต	37
ตารางที่ 2- 11 องค์ประกอบของแรยิปซัมที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยทั่วไป.....	38
ตารางที่ 2- 12 คุณลักษณะของแรยิปซัมตาม มอก. 595-2528	39
ตารางที่ 2- 13 ชนิดของยิปซัมสังเคราะห์.....	39
ตารางที่ 2- 14 ตัวอย่างการเลือกตัวบ่งชี้ของระบบ	44
ตารางที่ 2- 15 ตัวอย่างตารางการบันทึกข้อมูลสำหรับการทำ MFA.....	45
ตารางที่ 2- 16 ข้อดีและข้อจำกัดของการประเมินวัฏจักรชีวิต.....	49
ตารางที่ 2- 17 ผลของไอออนโลหะต่อรูปผลึกจากงานวิจัยของ Deng และคณะ	65
ตารางที่ 2- 18 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	67
ตารางที่ 3- 1 กระบวนการที่เกี่ยวข้อง และ ผลิตภัณฑ์ที่เข้าและออกจากระบบ.....	77
ตารางที่ 3- 2 ชนิดและแหล่งที่มาของข้อมูล.....	79

ตารางที่ 3- 3 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์การไหลของสาร	83
ตารางที่ 3-4 รายการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่.....	89
ตารางที่ 3-5 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออียิปซัมจากกรดซัลฟิวริก บริสุทธิ์	90
ตารางที่ 3-6 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออียิปซัมจากกรดซัลฟิวริกของ แทนครั้นแบตเตอรี่	91
ตารางที่ 4- 1 ค่าที่ใช้ในการประเมินจำนวนแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด และ แหล่งที่มา.....	92
ตารางที่ 4- 2 ปริมาณนำเข้า ส่งออก และ ผลิตในประเทศของแบตเตอรี่ใหม่ชนิดตะกั่ว-กรด (ตัน) 94	
ตารางที่ 4- 3 สัดส่วนของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดที่ถูกส่งไปโรงงานแต่ละประเภทใน ปี พ.ศ. 2558 ...	95
ตารางที่ 4- 4 ปริมาณของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ตามโรงงานรับกำจัดในปี พ.ศ. 2558-2560 (ตัน) .95	
ตารางที่ 4- 5 ปริมาณแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในปี พ.ศ. 2558-2560	100
ตารางที่ 4- 6 ปริมาณกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในปี พ.ศ. 2558 - 2560	102
ตารางที่ 4- 7 ค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างผังการไหลของแบตเตอรี่.....	102
ตารางที่ 4- 8 บัญชีรายการมวลสารของการฟื้นฟูสภาพกรดซัลฟิวริก.....	110
ตารางที่ 4- 9 บัญชีรายการมวลสารของการปรับสภาพกรดซัลฟิวริกให้เป็นกลาง.....	111
ตารางที่ 4- 10 บัญชีรายการมวลสารของการผลิตเป็นอียิปซัม	112
ตารางที่ 4- 11 ค่าร้อยละของผลกระทบที่ลดลงเมื่อเทียบกับการปรับสภาพให้เป็นกลางจากการฟื้นฟู สภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และ การผลิตเป็นอียิปซัม.....	119
ตารางที่ 4- 12 การประมาณค่าใช้จ่ายการบำบัดน้ำเหมืองกรด	123
ตารางที่ 4- 13 ความเข้มข้นของโลหะที่พบในกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า	125
ตารางที่ 4- 14 ความเข้มข้นของไอออนลบที่พบในกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า.....	125
ตารางที่ ก.1. 1 ความหมายของการบ่งชี้คุณภาพข้อมูลโดยการให้คะแนน 1 ถึง 4	146
ตารางที่ ก.1. 2 การแปลงค่าคะแนนเป็นค่า CV	147
ตารางที่ ก.1. 3 คะแนนที่ได้จากการประเมินคุณภาพข้อมูล	147
ตารางที่ ก.1. 4 ค่า CV ที่ได้จากการประเมินคุณภาพข้อมูล	148

ตารางที่ ก.2.1 ข้อมูลปริมาณแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดจากกรมศุลกากร (จีน).....	150
ตารางที่ ก.2. 2 ข้อมูลปริมาณการผลิตแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดในประเทศไทย (จีน).....	151
ตารางที่ ข. 1 รายการฐานข้อมูลที่ใช้.....	153
ตารางที่ ข. 2 ค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่.....	154
ตารางที่ ข. 3 ค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการปรับสภาพให้เป็นกลาง.....	155
ตารางที่ ข. 4 ค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการผลิตเป็นยิปซัม.....	156
ตารางที่ ค. 1 การคาดการณ์ค่าใช้จ่ายจากการบำบัดน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรด.....	158



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2- 1 องค์ประกอบและโครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด	24
รูปที่ 2- 2 ปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้วแต่ละประเภท ในช่วงปี 2558 - 2560	27
รูปที่ 2- 3 แผนผังกระบวนการจัดการซากแบตเตอรี่	30
รูปที่ 2- 4 แผนผังแนวทางการจัดการองค์ประกอบหลักในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด	31
รูปที่ 2- 5 สัญลักษณ์ที่ใช้ในแผนผังการไหลของวัสดุ	42
รูปที่ 2- 6 ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ	43
รูปที่ 2- 7 ตัวอย่างการนำ Sankey diagram มาแสดงวิธีการจัดการแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด	48
รูปที่ 2- 8 กรอบการดำเนินงานการประเมินวัฏจักรชีวิตจากอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040	51
รูปที่ 2- 9 ขั้นตอนการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์	56
รูปที่ 3- 1 แผนรวมการดำเนินงานวิจัย	75
รูปที่ 3- 2 แผนการดำเนินงานวิจัยที่ 1	76
รูปที่ 3- 3 โครงร่างผังการไหล	77
รูปที่ 3- 4 แผนการดำเนินงานของการศึกษาที่ 2	81
รูปที่ 3- 5 แผนผังกระบวนการย่อยและสสารในระบบ	85
รูปที่ 3- 6 แผนการดำเนินงานวิจัยที่ 2	88
รูปที่ 4- 1 สัดส่วนตามชนิดการนำเข้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	93
รูปที่ 4- 2 ผังการไหลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558 (ต้น/ปี).....	97
รูปที่ 4- 3 ผังการไหลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2559 (ต้น/ปี).....	98
รูปที่ 4- 4 ผังการไหลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2560 (ต้น/ปี).....	99
รูปที่ 4- 5 กระบวนการผลิตของโรงงานลำดับที่ 60	100

รูปที่ 4- 6	ผังการไหลของกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558 (ตัน/ปี).....	103
รูปที่ 4- 7	ผังการไหลของกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2559 (ตัน/ปี).....	104
รูปที่ 4- 8	ผังการไหลของกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2560 (ตัน/ปี).....	105
รูปที่ 4- 9	ผังการไหลของวัสดุในแต่ละวิธีการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว.....	108
รูปที่ 4- 10	แผนผังกระบวนการฟื้นฟูสภาพกรดซัลฟิวริก	109
รูปที่ 4- 11	แผนผังกระบวนการปรับสภาพให้เป็นกลาง	111
รูปที่ 4- 12	แผนผังกระบวนการผลิตเป็นยิปซัม	112
รูปที่ 4- 13	ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ แบบเทียบหน่วย	114
รูปที่ 4- 14	ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ตามชนิดวัตถุุดิบ และ ผลิตภัณฑ์ที่ได้	114
รูปที่ 4- 15	ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการปรับสภาพให้เป็นกลางแบบเทียบหน่วย	116
รูปที่ 4- 16	ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการปรับสภาพให้เป็นกลาง ตามชนิดวัตถุุดิบ และ ผลิตภัณฑ์ที่ได้	116
รูปที่ 4- 17	ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการปรับสภาพให้เป็นกลางแบบเทียบหน่วย	118
รูปที่ 4- 18	ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการปรับสภาพให้เป็นกลาง ตามชนิดวัตถุุดิบ และ ผลิตภัณฑ์ที่ได้	118
รูปที่ 4- 19	เปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว 1 ตัน และ 7,439 ตัน	122
รูปที่ 4- 20	กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นระหว่างกรดซัลฟิวริกใช้แล้วกับโลหะที่พบ.....	126
รูปที่ 4- 21	ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์.....	127

รูปที่ 4- 22 ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์.....	128
รูปที่ 4- 23 ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลาร์	129
รูปที่ 4- 24 ความสัมพันธ์ของปริมาณแคลเซียมซัลเฟตกับค่าพีเอชสุดท้ายของสารละลาย.....	130
รูปที่ 4- 25 โครงร่างผลึกของตะกอนแคลเซียมซัลเฟตจากการทดลอง	132
รูปที่ 4- 26 ผลึกแคลเซียมซัลเฟตมาตรฐาน	134
รูปที่ 4- 27 ผลึกที่ได้จากกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ กับ Ca(OH)_2 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	135
รูปที่ 4- 28 ผลึกที่ได้จากกรดซัลฟิวริก 1 โมลาร์ กับ Ca(OH)_2 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	136
รูปที่ 4- 29 ผลึกที่ได้จากกรดซัลฟิวริก	137
รูปที่ 4- 30 ผลึกที่ได้จากกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	139



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558-2560 มีปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้ว และตัวสะสมประจุจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ มากกว่า 10,000 ตันต่อปี ซึ่งมีปริมาณแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด คิดเป็นค่าประมาณได้มากถึงร้อยละ 88 เพราะการบำรุงรักษาที่ง่าย และมีราคาถูก โดยวิธีการกำจัดที่นิยมมากที่สุดคือ การนำกลับมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีอื่น ๆ คิดเป็นร้อยละ 72 (กรมโรงงาน, 2558) อีกทั้งยังมีการส่งออกแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดไปยังประเทศต่าง ๆ มากกว่าการนำเข้าถึง 20 เท่า ในช่วงปี พ.ศ. 2554-2558 (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2560) โดยแบตเตอรี่จัดเป็นวัตถุอันตรายที่เป็นของเสียเคมีวัตถุตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้มีองค์ประกอบหลักเป็นตะกั่ว (Lead) ซึ่งเป็นโลหะที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจ และ พลาสติกที่ราคาผันผวนตามราคาของน้ำมันดิบ จึงทำให้มีอัตราการรีไซเคิลที่สูงเพื่อนำกลับตะกั่วและพลาสติก ขณะที่วิธีการที่พบได้ทั่วไปตามกลุ่มอุตสาหกรรมของสารอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นกรดซัลฟิวริกนั้น คือ ปล่อยผสมรวมกับน้ำเสียของโรงงานหรือปรับสภาพแล้วแยกตะกอนที่เกิดขึ้นไปฝังกลบ ซึ่งเป็นเพียงการเปลี่ยนนิวภาคของของเสีย และเป็นการจัดการที่ไม่ยั่งยืน ทั้งยังทำให้เสียพื้นที่ในการใช้ประโยชน์จากการฝังกลบ นอกจากนี้กรดซัลฟิวริกที่มาจากแบตเตอรี่มีฤทธิ์กัดกร่อนอย่างรุนแรง (ค่าพีเอชต่ำกว่า 2) ซึ่งหากสัมผัส หรือสูดดม จะทำให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรงของระบบทางเดินหายใจและผิวหนัง และมีตะกั่วเจือปนอยู่ แม้ในปริมาณน้อย แต่ถ้าวินเข้าสู่ร่างกายติดต่อกันเป็นเวลานานก็สามารถก่อให้เกิดพิษเรื้อรัง (Chronic effect) กับมนุษย์ได้ เช่น เกิดอาการโลหิตจาง (Anaemia) ดังนั้นถ้าเกิดการรั่วไหลน้ำกรดชนิดนี้จะส่งผลอย่างมากต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การเกิดสภาพกรดขึ้นในแหล่งน้ำ และ พื้นที่โดยรอบ อีกทั้งในปัจจุบันยังไม่มี การเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย และความเหมาะสมของแต่ละวิธีการจัดการ ทั้งที่เป็นแบตเตอรี่ชนิดหลัก ๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม จากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้มีแนวคิดที่จะศึกษา และเปรียบเทียบวิธีการจัดการกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดใช้แล้ว รวมทั้งทำการศึกษาความเหมาะสมในการนำกรดซัลฟิวริกไปผลิตเป็นยิปซัมเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป เช่น อุตสาหกรรมการก่อสร้าง

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาปริมาณน้ำกรดจากแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด จากการประเมินปริมาณของแบตเตอรี่ใช้แล้วชนิดตะกั่ว-กรดของประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลจากรายงานขออนุญาตนำวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกนอกบริเวณโรงงานรายปี (สก.2) จากกรมโรงงานอุตสาหกรรม และรายงานสถิติการนำเข้า-ส่งออก จากกรมศุลกากรเป็นหลัก จากการวิเคราะห์ข้อมูลในเบื้องต้น พบว่า น้ำกรดจากแบตเตอรี่ชนิดนี้ถูกจัดการโดย 2 กลุ่ม ได้แก่ ผู้ผลิตและจัดจำหน่ายแบตเตอรี่ที่มีโรงงานในเครือเป็นโรงงานรีไซเคิลวัตถุพิษในแบตเตอรี่โดยเฉพาะ มีขั้นตอนแยกน้ำกรดอย่างชัดเจน แล้วจึงนำน้ำกรดไปปรับสภาพก่อนปล่อยรวมกับระบบบำบัดน้ำเสีย และผู้ที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการเก็บรวบรวมแบตเตอรี่โดยไม่มีการแปรสภาพ ซึ่งมักจัดการอย่างง่าย คือ เททิ้งลงแหล่งน้ำโดยตรงโดยไม่มีการเจือจาง หรือลักลอบทิ้งช่วงฝนตกหนัก จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด สามารถนำไปผลิตเป็นยิปซัมเพื่อใช้ในการผลิตแผ่นยิปซัมและอุตสาหกรรมซีเมนต์ ซึ่งผลึกยิปซัมเกิดจากรวมตัวของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) เป็นตะกอนแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) โดยคุณสมบัติของยิปซัมที่เหมาะสมกับการนำไปใช้จะขึ้นอยู่กับ ความบริสุทธิ์ รูปร่างผลึก ขนาดผลึก และ ค่าความชื้น (Cann G.M., Claisse P.A. and Lorimer J.P.,2007) โดยความเร็วรอบการกวนผสมและค่าพีเอชของระบบ มีผลน้อยมากต่อการเกิดผลึกยิปซัม (Gominšek T., Lubej A. and Pohar C.)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกจะวิเคราะห์ผังการไหลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วใช้แล้วในปัจจุบัน โดยอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis) เพื่อประมาณปริมาณน้ำกรดจากแบตเตอรี่ โดยใช้ข้อมูลปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้วในประเทศไทย และ ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากวิธีการจัดการกรดด้วยวิธีต่าง ๆ ได้แก่ การปรับสภาพให้เป็นกลาง การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และ การตกตะกอนเป็นผลึกยิปซัม ด้วยการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment) เพื่อหาแนวทางปฏิบัติที่จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยที่สุด หรือ แนวทางที่ตอบรับกับความต้องการของอุตสาหกรรม ในส่วนที่ 2 ทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณ คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของยิปซัมที่ผลิตได้จากกรดซัลฟิวริก คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ นำค่าที่เหมาะสมมาทดลองในกรดซัลฟิวริกจากแทครคั้นแบตเตอรี่ เพื่อวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ รูปร่างขนาด และปริมาณของผลึกยิปซัม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อประเมินปริมาณน้ำกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่ใช้แล้วแบบตะกั่ว-กรด ชนิด แทรคชั่นแบตเตอรี่ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย
- 1.2.2 เพื่อประเมินปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะสมบัติยิปซัม ได้แก่ รูปผลึก ขนาด และ ปริมาณยิปซัมที่เปลี่ยนแปลงไป ในกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ และ ในกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ใช้แล้วแบบตะกั่ว-กรด ชนิดแทรคชั่นแบตเตอรี่
- 1.2.3 เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของวิธีการจัดการน้ำกรดจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด โดยใช้แนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

- 1.3.1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการจัดการน้ำกรดจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดของประเทศไทย ในปัจจุบันได้ โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis) และ การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment) รวมถึงการประเมินค่าใช้จ่าย จะมีส่วนช่วยให้ทราบถึงประเด็นปัญหา และ ทราบถึงวิธีการจัดการที่ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดของวิธีการจัดการน้ำกรดจากแบตเตอรี่ในปัจจุบัน
- 1.3.2 ความแตกต่างของความเข้มข้นซัลเฟต ความเข้มข้นและอัตราการเติมของปูนขาว ส่งผลให้สมบัติยิปซัม ได้แก่ รูปผลึก ขนาด ความชื้น และปริมาณยิปซัมเปลี่ยนแปลงไป เมื่อควบคุมความเร็ว กวนผสม อุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยา และ อุณหภูมิอบแห้งผลึก
- 1.3.3 ชนิดและระดับความเข้มข้นของโลหะที่เจือปนในกรดซัลฟิวริกจากแทรคชั่นแบตเตอรี่มีผลทำให้ลักษณะสมบัติยิปซัม ได้แก่ รูปผลึก ขนาด ความชื้น และความบริสุทธิ์ เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเปรียบเทียบกับยิปซัมที่ผลิตจากกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 เก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องระหว่างปี พ.ศ.2558 ถึง พ.ศ. 2560 ของปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้วชนิดตะกั่ว-กรด จากรายงานขออนุญาตนำวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกนอกบริเวณโรงงานรายปี (สก.2) จากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ปริมาณการนำเข้า-ส่งออกในประเทศไทย จากรายงานสถิติของกรมศุลกากร ปริมาณการผลิตแบตเตอรี่รวมทั้งประเทศ จากสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม และ กำลัง

การผลิตของบริษัทที่ออกและเสนอขายหลักทรัพย์ จากสำนักงานคณะกรรมการกำกับหลักทรัพย์และตลาดหลักทรัพย์

1.4.2 วิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis) โดยใช้โปรแกรม STAN version 2.6.601.0

1.4.3 ทำการทดลองตกผลึกยิปซัมจากกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์และกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ใช้แล้วแบบตะกั่ว-กรด ชนิดแทรกชั้นแบตเตอรี่ (Traction battery) โดยดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิห้อง เพื่อพิจารณาความบริสุทธิ์และสมบัติของยิปซัม ที่แต่ละความเข้มข้นของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และ H_2SO_4

1.4.4 ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแต่ละวิธีการจัดการน้ำกรดจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดโดยใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment; LCA)

1.4.5 ประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ด้วยโปรแกรม SimaPro version 8.2

1.4.6 กำหนดขอบเขตการศึกษาแบบ Gate-to-Gate ซึ่งพิจารณาเพียงแค่บางส่วนของวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ ในงานวิจัยนี้ คือ การจัดการน้ำกรดใช้แล้วจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

1.4.7 หน่วยอ้างอิงหรือหน่วยทำงาน (Functional unit) คือ 1 ตันของน้ำกรดจากแทรกชั้นแบตเตอรี่ (Traction battery) หลังหมดสภาพการใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้าจำนวน 1 เซลล์ ที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 โวลต์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงปริมาณแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด และ น้ำกรดจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ที่เกิดขึ้นในประเทศไทย โดยอาศัยผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่รวบรวมจากหน่วยงานต่าง ๆ เพื่อให้สามารถนำข้อมูลมาใช้เป็นแนวทางในการจัดการของเสียจากแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

1.5.2 ทราบถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับแต่ละวิธีการจัดการน้ำกรดจากแบตเตอรี่ใช้แล้ว เพื่อนำไปใช้เป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการจัดการน้ำกรดจากแบตเตอรี่ใช้แล้วของโรงงานอุตสาหกรรม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในชีวิตประจำวัน ทั้งในการใช้งานทั่วไปและในภาคอุตสาหกรรม รวมถึงใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานในอุปกรณ์ หรือยานพาหนะ จึงทำให้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง โดยแบตเตอรี่ก็มีหลากหลายประเภทความการใช้งาน หากแบ่งประเภทหลัก ๆ สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด ได้แก่ แบตเตอรี่ชนิดอัดกระแสไฟใหม่ไม่ได้ หรือแบบปฐมภูมิ (Disposable battery หรือ Primary cell หรือ Dry cell) และแบตเตอรี่แบบอัดกระแสไฟใหม่ได้ หรือแบบทุติยภูมิ (Rechargeable battery หรือ Secondary cell หรือ Storage battery)

2.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

เป็นแบตเตอรี่ชนิดแรกที่มีนำมาใช้อย่างกว้างขวาง และถูกพัฒนามาก่อนแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีการจุพลังงาน สามารถจ่ายไฟฟ้าได้มาก และมีราคาต้นทุนถูกกว่าชนิดอื่น เนื่องจากวัตถุดิบหาได้ง่าย มีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน และ อัตราส่วนประสิทธิภาพต่อราคาสูง (ชุตีธัม อาภาพิพัฒน์, 2555) แบตเตอรี่ชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่มแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ คือ แบตเตอรี่ที่สามารถอัดประจุไฟใหม่ และนำกลับมาใช้งานได้อีกเรื่อย ๆ จนกว่าจะหมดอายุการใช้งาน หรือ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อีก แบตเตอรี่ชนิดนี้มีการนำมาใช้และแปรรูปใหม่มากถึงร้อยละ 95

2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

2.1.1.1 ประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

หากพิจารณาจากการบำรุงรักษาและลักษณะของแบตเตอรี่สามารถแบ่งออกได้ 5 ประเภท ดังนี้

1) แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบน้ำ (Flooded)

เป็นแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดที่มีน้ำหนักรวมมาก และเป็นชนิดแรกที่มีการนำไปใช้สแตนด์บายเครื่องยนต์ และต้องมีการบำรุงรักษาโดยเติมน้ำกลั่นลงในช่องของแบตเตอรี่อย่างสม่ำเสมอเพื่อยืดอายุการใช้งาน เนื่องจากเทคนิคและวัสดุที่ใช้ผลิต ทำให้มีการระเหยของสารอิเล็กโทรไลต์ หรือน้ำกรดได้ง่าย

2) แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบปิดผนึก (Sealed)

เป็นแบตเตอรี่ที่มีลักษณะภายในคล้ายกับแบบแรก แต่จะมีการปิดผนึกเซลล์ไว้ เพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ หรือน้ำกรด และช่วยลดการระเหยของน้ำกรดจากแบตเตอรี่อีกด้วย

3) แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบ AGM (Absorbent Glass Mat)

เป็นแบตเตอรี่ขั้นสูงที่สามารถชาร์จไฟฟ้าได้ไวกว่าชนิดน้ำมากถึง 5 เท่า เหมาะกับยานพาหนะที่ต้องการแหล่งพลังงานประสิทธิภาพสูง มักพบได้ในรถไฮบริด เนื่องจากมีราคาและค่าบำรุงรักษาค่อนข้างสูง โดยแบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีแผ่นใยแก้วเป็นฉนวน (Micro glass-fibre separators) กั้นระหว่างแผ่นธาตุประจุบวกและแผ่นธาตุประจุลบ รวมถึงมีหน้าที่ดูดซับน้ำกรดในแบตเตอรี่ไว้ เพื่อป้องกันการรั่วไหลหากแบตเตอรี่แตก

4) แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบเจล (Gel)

เป็นแบตเตอรี่ที่มีการนำเจลมาใช้ดูดซับน้ำกรด ซึ่งเจลนั้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนให้ดีขึ้น นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังทนทานต่อการประจุกระแสไฟฟ้าที่มากเกินไป (overcharge) ได้ ทำให้มีอายุการใช้งานที่นาน

5) แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบ VRLA (Valve-regulated lead acid)

เป็นแบตเตอรี่ที่มีการติดตั้งเซฟตี้วาล์ว (Safety valve) เพื่อใช้ระบายก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจน เมื่อในเซลล์แบตเตอรี่มีความดันภายในสูงเกินไป เพื่อป้องกันแบตเตอรี่เสียหาย

หากแบ่งประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดตามคุณสมบัติการใช้งาน สามารถจัดแบ่งได้ 3 ประเภทดังนี้ (นพรุจ ฤทธานนท์, 2554)

1) แบตเตอรี่รถยนต์ (Starting Lighting and Ignition, SLI) เป็นแบตเตอรี่ที่ออกแบบมาใช้กับงานที่ต้องการการคายประจุน้อย (Shallow cycle) มักใช้ในรถยนต์เป็นส่วนใหญ่ แบตเตอรี่ชนิดนี้มีแผ่นเพลทแบบบางทั้งบวกและลบ ลักษณะการออกแบบเช่นนี้เป็นการเพิ่มพื้นที่การทำปฏิกิริยา มีผลทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้จ่ายกระแสสูง ๆ ในช่วงเวลาสั้น ๆ ได้ ถึงแม้ว่าไม่ได้ออกแบบมาสำหรับงานคายประจุมาก (Deep cycle)

2) แบตเตอรี่รถไฟฟ้า (Motive power หรือ Traction battery) เป็นแบตเตอรี่ที่ออกแบบมาให้มีความทนทาน และ อายุการใช้งานนาน มักใช้กับงานลักษณะที่ต้องการการคายประจุมาก ส่วนใหญ่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า รถยกไฟฟ้า รถไฟฟ้าในสนามกอล์ฟ แบตเตอรี่ชนิดนี้มีจำนวนแผ่นเพลทต่อ

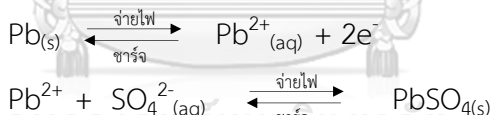
เซลล์น้อยกว่าแบบที่ใช้ในรถยนต์ แต่แผ่นเพลทที่ใช้จะหนากว่าและทนทานกว่าวัสดุที่นำมาทำกริด (Grid) มีการใช้ตะกั่ว-พลวง เพื่อให้สามารถคายประจุได้มาก

3) แบตเตอรี่สำหรับระบบไฟฟ้า (Stationary battery) เป็นแบตเตอรี่ที่ถูกนำไปใช้ในระบบสำรองไฟฟ้า (UPS) เพื่อจ่ายไฟฟ้าสำรองให้กับระบบคอมพิวเตอร์ ระบบโทรศัพท์ และระบบไฟฟ้า มีลักษณะโดยรวมคล้ายกับแบตเตอรี่รถยนต์ และ แบตเตอรี่รถไฟฟ้า

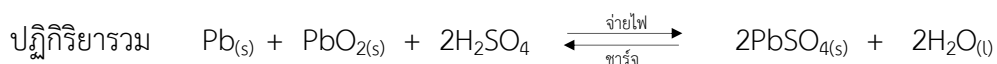
2.1.1.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่

โดยหลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดนี้ คือ ขั้วของแบตเตอรี่จะทำจากตะกั่ว โดยแผ่นธาตุประจุบวก (แคโทด) ทำจากตะกั่วไดออกไซด์ (Lead dioxide, PbO_2) และ แผ่นธาตุประจุลบ (แอโนด) ทำจากตะกั่ว (Lead, Pb) ขั้วทั้ง 2 ของแบตเตอรี่ต้องมีความพรุนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาและเพิ่มกำลังไฟฟ้า ส่วนสารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) ถูกใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิออนของซัลเฟต (SO_4^{2-}) และ ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการอัดประจุหรือชาร์จ โดยที่ขั้วลบเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ขณะที่ขั้วบวกเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ได้ Pb^{2+} ไปรวมกับ SO_4^{2-} เกิดเป็น ตะกั่วซัลเฟต (Lead sulfate, $PbSO_4$) ดังสมการ

ขั้วลบ



ขั้วบวก



เห็นได้ว่าปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถย้อนกลับได้ ผ่านกระบวนการที่เรียกว่า การประจุไฟ โดยขั้วลบของแบตเตอรี่ได้รับอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดภายนอกเข้าไป ทำให้แผ่นธาตุลบปล่อยอิเล็กตรอนสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และไปสู่แผ่นธาตุบวกต่อไป

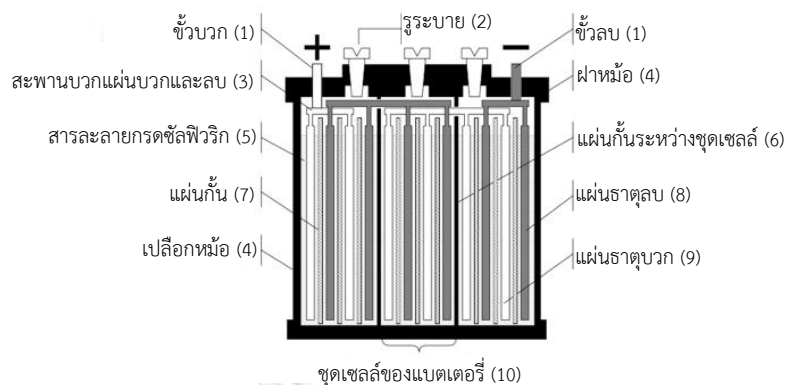
การเกิดปฏิกิริยาจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนถึงสถานะที่มีการเกิดซัลเฟชัน (Sulfatation) หรือ การเกิดเกลือซัลเฟตในแบตเตอรี่ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการสะสมเพิ่มขึ้นของตะกั่วซัลเฟตที่ขั้วแบตเตอรี่ จนไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ไม่สามารถเคลื่อนระหว่างขั้วทั้ง 2 ของแบตเตอรี่ได้ ปฏิกิริยาทางเคมีก็จะไม่เกิดขึ้น และจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบ อีกต่อไป ทำให้แบตเตอรี่หมดอายุการใช้งานในที่สุด

2.1.1.3 องค์ประกอบของแบตเตอรี่

จากรูปที่ 2-1 องค์ประกอบและโครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด โดยมีหน้าที่และทำจากวัสดุที่แตกต่างกัน ดังนี้ (สมศักดิ์ มินคร, 2554;)

- 1) ขั้วบวก (positive terminal) และ ขั้วลบ (negative terminal) ทำจากตะกั่ว เป็นจุดเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ
- 2) ระบาย (plug or vent cap) เป็นจุดเติมน้ำกลั่นลงในแบตเตอรี่ และ ทำหน้าที่เป็นช่องระบายก๊าซออกจากเซลล์แบตเตอรี่
- 3) สะพานรวมแผ่นบวกและลบ (connectors) ทำจากตะกั่ว มีหน้าที่เชื่อมรวมแผ่นบวกและรวมแผ่นลบในแบตเตอรี่ โดยสะพานที่เชื่อมแผ่นบวกมีชั้นยื่นขึ้นมาเป็นขั้วบวก และสะพานที่เชื่อมแผ่นลบมีชั้นยื่นขึ้นมาเป็นขั้วลบ
- 4) เปลือกและฝาหม้อ (cap and box) ในแบตเตอรี่รุ่นเก่าทำจาก อีโบนีต์ หรือ ยางแข็ง แต่ในปัจจุบันทำจากพลาสติกพอลิโพรไพลีน (polypropylene) หรือ โคพอลิเมอร์ (Co-polymer)
- 5) สารละลายกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid solution) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่
- 6) แผ่นกั้นระหว่างชุดเซลล์ (element separators) มักทำจากวัสดุชนิดเดียวกันกับกล่อง
- 7) แผ่นกั้น (plate separators) ทำจากพลาสติก PVC หรือ วัสดุที่มีรูพรุน เพื่อกั้นแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบออกจากกัน โดยมีร่องเล็ก ๆ ระหว่างแผ่นกั้นกับแผ่นธาตุเพื่อให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ไหลผ่าน
- 8) แผ่นธาตุลบ (negative plates) ประกอบด้วยโลหะตะกั่ว มีสีเทา ที่จับตัวกันแน่นกับโครงที่ทำจากตะกั่วผสมพลวง
- 9) แผ่นธาตุบวก (positive plates) ประกอบด้วยตะกั่วเปอร์ออกไซด์ จับตัวกันแน่นกับโครงชนิดเดียวกับแผ่นธาตุลบ มีหน้าที่สำคัญในการกักไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่

10) ชุดเซลล์ของแบตเตอรี่ (battery element) ประกอบด้วยแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบที่วางเรียงสลับกัน โดยมีแผ่นกั้นอยู่ระหว่างแผ่นธาตุ



รูปที่ 2- 1 องค์ประกอบและโครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด
(ดัดแปลงจาก สำนักเลขาธิการอนุสัญญาบาเซล, 2003)

องค์ประกอบต่าง ๆ ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดที่ผ่านการใช้งานแล้ว มีองค์ประกอบหลักเป็นตะกั่ว (ร้อยละ 61 - 65 โดยน้ำหนัก) และสารอิเล็กโทรไลต์ (ร้อยละ 16 - 25 โดยน้ำหนัก) ดังตารางที่ 2-1 สัดส่วนองค์ประกอบจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ซึ่งเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ใหม่พบว่า องค์ประกอบหลักยังคงเป็นตะกั่วและสารอิเล็กโทรไลต์

ตารางที่ 2- 1 สัดส่วนองค์ประกอบจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

แหล่งที่มา	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ตะกั่ว	กล่อง	สารอิเล็ก-	แผ่นกั้น
	โครง	แบตเตอรี่	โทรไลต์	และอื่นๆ
	แบตเตอรี่ใหม่			
Zhang, 2013	64.0	5.0	28.0	3.0
Tsoufias, Pappis, และ Minner, 2002	67.6	7.5	20.0	4.9

ตารางที่ 2- 1 (ต่อ) สัดส่วนองค์ประกอบจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

แหล่งที่มา	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	ตะกั่ว		กล่อง	สารอิเล็ก-	แผ่นกั้น
	โครง	Lead paste	แบตเตอรี่	โทรไลต์	และอื่นๆ
	แบตเตอรี่ใช้แล้ว				
Zakiyya, Distya และ	30.7	34.7	5.9	25.1	3.6
Ellen, 2018	25.0	38.0	10.0	22.0	5.0
Prengaman และ	25.0	38.0	5.0	22.0	10.0
Mirza, 2017					
Unterreiner, Jülch, และ Reith, 2016		61.0	10.0	16.0	2.0
Zhang และคณะ, 2016	24-30	30-40	22-30	11-30	-

2.1.2 มลพิษและความเสี่ยงจากองค์ประกอบของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

องค์ประกอบหลักในแบตเตอรี่ล้วนแต่ก่อให้เกิดความพิษ เป็นสารเคมีอันตราย สามารถติดไฟและระเบิดได้ ซึ่งสามารถเป็นแหล่งกำเนิดความเสี่ยงได้โดยง่าย ทำให้ในขั้นตอนการขนส่ง จัดเก็บ และแยกชิ้นส่วนเพื่อรีไซเคิลแบตเตอรี่ มีโอกาสที่จะเกิดความเสี่ยงประเภทต่าง ๆ ตามลักษณะขององค์ประกอบ ดังตารางที่ 2-2 องค์ประกอบในแบตเตอรี่ กับ ลักษณะความเสี่ยง

ตารางที่ 2- 2 องค์ประกอบในแบตเตอรี่ กับ ลักษณะความเสี่ยง

องค์ประกอบ	ลักษณะความเสี่ยง	ลักษณะทางกายภาพ	แหล่งกำเนิด
ตะกั่ว	ความเป็นพิษ	ของแข็ง	ขี้แบตเตอรี่ และ โครงแผ่นธาตุ
พลวง	ความเป็นพิษ	ของแข็ง	แผ่นธาตุ
กรดซัลฟิวริก	กัดกร่อน	ของเหลว	สารอิเล็กโทรไลต์
ไฮโดรเจน	การระเบิด	ก๊าซ	อิเล็กโทรไลต์ของน้ำ

ที่มา Zhang Chen Zhang และ Liu (2016)

ตะกั่ว สารประกอบตะกั่ว และ พลวง ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อทั้งมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ขณะที่อยู่ในแบตเตอรี่จะมีลักษณะเป็นของแข็ง จึงไม่สามารถก่อให้เกิดการสัมผัสและการแพร่กระจายระหว่างการนำกลับมาใช้ใหม่ การจัดเก็บ และ การขนส่ง ส่วนกรดซัลฟิวริกอยู่ในรูปของเหลวที่สามารถแพร่กระจายได้ง่าย หากเกิดการรั่วไหลออกมาจะสามารถกัดกร่อนและอายุการใช้งานแบตเตอรี่ลดลง

นอกจากนี้ค่าขีดจำกัดการสัมผัสสารเคมี (Exposure limits) ของตะกั่ว และ กรดซัลฟิวริกแสดงดังตารางที่ 2-3 โดยมีค่าต่าง ๆ ดังนี้

1) ค่า PEL (The permissible exposure limit) คือ ปริมาณของสารเคมีที่ผู้ปฏิบัติงานจะสัมผัสกับสารเคมีได้อย่างปลอดภัย

2) ค่า TLV - TWA (Threshold Limit Value – Time-Weight Average) หรือเรียกว่า ค่าความเข้มข้นสารเคมีเฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อวัน หรือ 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ ในบรรยากาศการทำงานที่เชื่อว่าพนักงานเกือบทุกคนสามารถสัมผัสซ้ำ ๆ ได้โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพแบบเรื้อรัง

3) ค่า TLV – STEL (Threshold Limit Value – Short-term Exposure Limit) หรือเรียกว่าค่าความเข้มข้นสารเคมีสูงสุดในระยะเวลาสั้น ๆ (15 นาที) ในบรรยากาศการทำงานที่เชื่อว่าพนักงานเกือบทุกคนสามารถสัมผัสได้โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง โดยในหนึ่งวันพนักงานสามารถสัมผัสสารเคมีในความเข้มข้นที่ระดับ STEL ได้ไม่เกิน 4 ครั้ง และแต่ละครั้งควรเว้นระยะเวลาห่างกันไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง

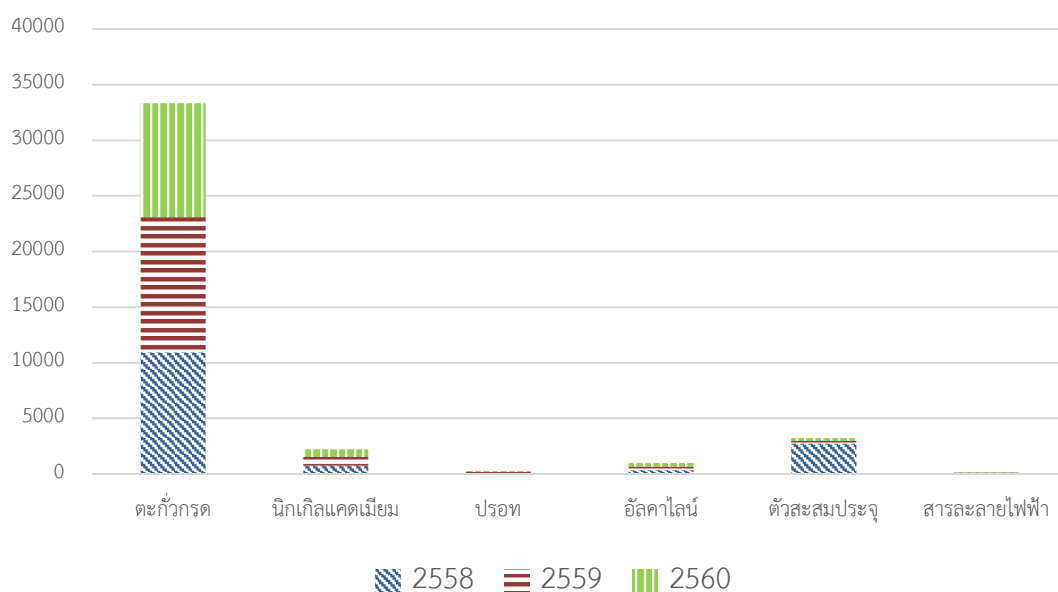
4) ค่า IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health) หรือเรียกว่า ค่าความเข้มข้น สารเคมีในบรรยากาศที่อาจเป็นอันตรายต่อชีวิตและสุขภาพแบบเฉียบพลัน หากไม่สามารถหนีออกจากบริเวณนั้นได้ทันภายในระยะเวลา 30 นาที

ตารางที่ 2- 3 ค่าขีดจำกัดการสัมผัสสารเคมีของตะกั่วและกรดซัลฟิวริก

สาร	ค่า PEL (OSHA)	ค่า TLV (ACGIH)		ค่า IDLH
		TWA	STEL	
ตะกั่ว	0.05 mg/m ³	0.05 mg/m ³	-	100 mg/m ³
กรดซัลฟิวริก	1 mg/m ³	1 mg/m ³	3 mg/m ³	15 mg/m ³

2.1.3 การจัดการและปริมาณของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในไทย

ปริมาณแบตเตอรี่และตัวสะสมประจุ (รหัสของชนิดและประเภทของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ใช้แล้ว: 16 06 XX) ของประเทศไทย จากรายงานขออนุญาตนำวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกนอกบริเวณโรงงานรายปี (สก.2) ประจำปี พ.ศ. 2558 - 2560 มีปริมาณรวมถึง 15,762 ตัน ซึ่งมีแบตเตอรี่ชนิดใช้ตะกั่วร้อยละ 87- 89 ของปริมาณแบตเตอรี่ทั้งหมด ซึ่งมีปริมาณมากที่สุด และสามารถแบ่งปริมาณเป็นของเสียแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ ในช่วงปี 2558 - 2560 ได้ ดังรูปที่ 2- 2



รูปที่ 2- 2 ปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้วแต่ละประเภท ในช่วงปี 2558 - 2560

หากจากรายงานขอขยายระยะเวลาในการกักเก็บสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในบริเวณโรงงาน (สก.1) และ รายงานขออนุญาตนำวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกนอกบริเวณโรงงานรายปี (สก.2) ประจำปี 2558 พบว่ามีปริมาณแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (รหัส 16 06 01) จำนวน 1,551.74 ตัน และ 10,149.971 ตัน ตามลำดับ หากพิจารณาจาก สก.2 จะสามารถแบ่งปริมาณของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดตามวิธีกำจัด/บำบัด ได้ดังตารางที่ 2-4 พบว่าวิธีที่นิยมมากที่สุด คือ การนำกลับมาใช้ด้วยวิธีอื่น ๆ เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจอยู่ 2 ส่วน ได้แก่ ตะกั่วและพลาสติก ตะกั่วเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้ต้องมีการผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) เนื่องจากเป็นสารอันตรายที่มีความเป็นพิษ แผ่นธาตุบวกและลบที่ทำจากตะกั่วถูกแช่ในน้ำกรดที่ทำหน้าที่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นจึงมีโอกาสนั้น

สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีตะกั่วเจือปนอยู่ในประเทศไทยมีค่ามาตรฐานของตะกั่วในระดับเลือดของคนทั่วไปอยู่ที่ไม่เกิน 40 ไมโครกรัมต่อลิตร และ ผู้ที่ทำงานสัมผัสตะกั่วไม่ควรเกิน 60 ไมโครกรัมต่อลิตร (กระทรวงสาธารณสุข, 2559)

ตารางที่ 2- 4 ปริมาณของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดตามวิธีกำจัด/บำบัด

รหัสของเสีย	วิธีกำจัด/บำบัด	ปริมาณแบตเตอรี่ (ตัน)		
		ปี 2558	ปี 2559	ปี 2560
011	คัดแยกประเภทเพื่อจำหน่ายต่อ	2	22	76.6
021	กักเก็บในภาชนะบรรจุ	1154.55	1705.406	1681.904
039	นำกลับมาใช้ซ้ำด้วยวิธีอื่น ๆ	11.5	15	10
042	ทำเชื้อเพลิงผสม	10	-	0.5
049	นำกลับมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีอื่น ๆ	8890.35	9642.934	8198.24
052	เข้ากระบวนการนำโลหะกลับมาใหม่	137.13	237.5	125.5
071	ฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล เฉพาะของเสียไม่อันตรายเท่านั้น	1	-	-
072	ฝังกลบอย่างปลอดภัย	2	-	-
073	ฝังกลบอย่างปลอดภัย เมื่อทำการปรับเสถียร หรือ ทำให้เป็นก้อนแข็งแล้ว	141.65	81.01	107.35
075	เผาทำลายในเตาเผาเฉพาะสำหรับของเสียอันตราย	36.4	147.40	53.05
081	รวบรวมและส่งออกนอกประเทศ	550	305	-

จากรายงานทางสถิติของกรมศุลกากร ตามพิกัดอัตราศุลกากรประเภท 8507.10 หม้อสะสมไฟฟ้าเลดแอซิด ชนิดที่ใช้สำหรับสตาร์ทเครื่องยนต์แบบลูกสูบ และ 8507.20 หม้อสะสมไฟฟ้าเลดแอซิดอื่น ๆ ซึ่งคือ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด โดยมีทั้งแบตเตอรี่ใหม่ และแบตเตอรี่ใช้แล้ว ดังตารางที่

2-5 พบว่าประเทศมีการส่งออกแบตเตอรี่ใหม่ชนิดตะกั่ว-กรดเฉลี่ย 9 ล้านชิ้น ในระหว่างปี พ.ศ. 2558 -2560

ตารางที่ 2- 5 ปริมาณการนำเข้า-ส่งออกแบตเตอรี่ใช้แล้วแบบตะกั่ว-กรดระหว่างปี พ.ศ. 2558 - 2560

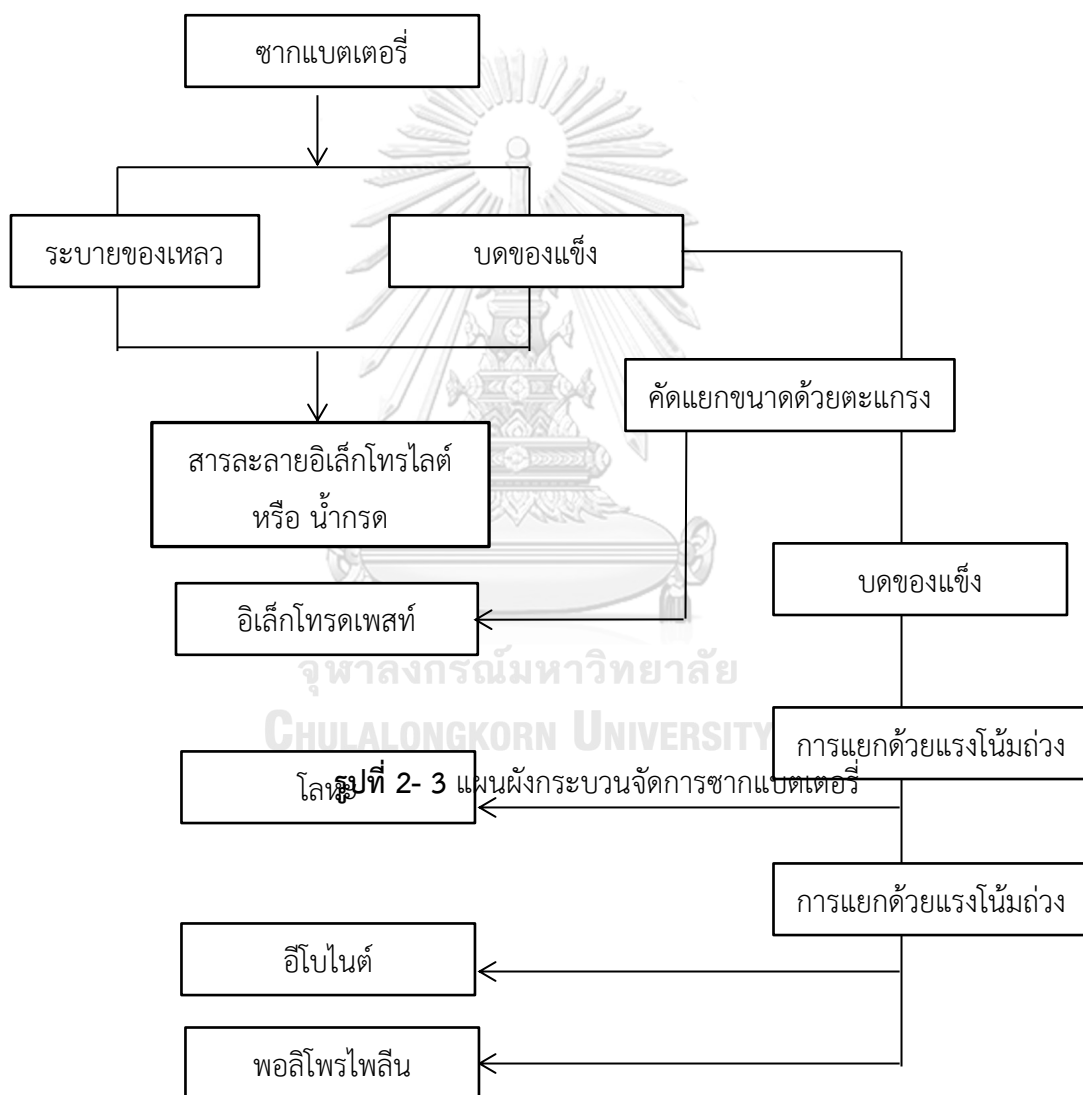
	ปี 2558		ปี 2559		ปี 2560	
	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่	เก่า	ใหม่
นำเข้า (ชิ้น)	3	5,596,363	302	6,745,503	14,676	8,797,516
ส่งออก (ชิ้น)	4	7,664,986	70	8,742,695	386	10,307,118

2.1.4 กระบวนการรีไซเคิลแบตเตอรี่ในปัจจุบัน

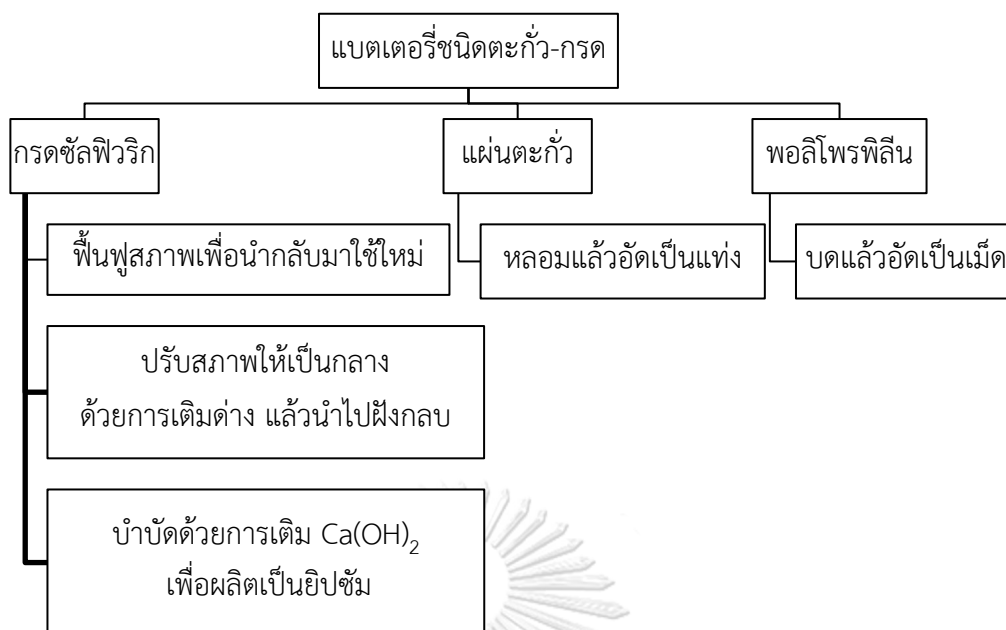
จากแนวทางการจัดการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด โดยสำนักเลขาธิการแห่งอนุสัญญาบาเซล (Technical guidelines for the environmentally sound management of waste lead-acid batteries by Secretariat of the Basel Convention) การจัดการเริ่มต้นจากขนส่งแบตเตอรี่มายังโรงงานรีไซเคิล (recycle) ซึ่งมีการใช้ระบบอัตโนมัติในการแยกชิ้นส่วนเพื่อลดการสัมผัสระหว่างของเสียกับผู้ปฏิบัติงานให้น้อยที่สุด โดยมีแผนผังแสดงกระบวนการดังรูปที่ 2-3

ส่วนในประเทศไทยมีการจัดทำคู่มือบัญชีของเสียที่เป็นแหล่งทรัพยากรทดแทน (กลุ่มยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ และ กลุ่มคริวเรือน, 2559) ที่กล่าวถึงการนำกลับมาใช้ใหม่ขององค์ประกอบแต่ละส่วนของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด จากรูปที่ 2-4 โดยแบ่งองค์ประกอบหลักของแบตเตอรี่เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ตะกั่ว พอลิโพรพิลีน และ กรดซัลฟิวริก เห็นได้ว่าตะกั่วและพลาสติกมีแนวทางในการรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาเป็นวัตถุดิบใหม่อย่างชัดเจน ขณะที่การจัดการกรดซัลฟิวริกนั้นมีแนวทางที่แนะนำได้มากถึง 3 ทาง การเลือกแนวทางการจัดการส่วนใหญ่มักพิจารณาถึงความคุ้มค่า

ทางเศรษฐกิจ ลักษณะของของเสียการจัดการที่เป็นไปตามข้อกำหนดหรือกฎหมาย แนวทางที่ไม่ก่อให้เกิดความสับสนต่อผู้ปฏิบัติงาน รวมถึงผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by-product) ที่อาจเกิดขึ้น



(ดัดแปลงจาก สำนักเลขาธิการอนุสัญญาบาเซล, 2003)



รูปที่ 2- 4 แผนผังแนวทางการจัดการองค์ประกอบหลักในกรดซัลฟิวริก-กรด
(ดัดแปลงจาก คู่มือบัญชีของเสียที่เป็นแหล่งทรัพยากรทดแทน, 2556)

2.2 กรดซัลฟิวริก

กรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรดแก่ ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน ละลายในน้ำได้ มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนโลหะต่าง ๆ ได้ดี หากสัมผัสผิวหนังดวงตาโดยไอหรือสารละลายจะทำให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรง เยื่อตาและกระจกตาอักเสบ และอาจทำให้ตาบอดได้ หากสูดดมไอระเหยจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อจมูกในระบบทางเดินหายใจ รู้สึกแสบร้อนตามจมูก ลำคอ หายใจถี่ และอาจเกิดภาวะขาดออกซิเจน ทำให้เสียชีวิตได้ และเป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 3 (เฉพาะที่ความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก) ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ.2535

2.2.1 แนวทางการจัดการกรดซัลฟิวริก

การจัดการกรดซัลฟิวริกที่เป็นของเสีย สามารถแบ่งได้หลายวิธีตามชนิดและลักษณะของเสีย

2.2.1.1 การฟื้นฟูสภาพกรดซัลฟิวริกที่ใช้งานแล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

ขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพกรดซัลฟิวริกจากคู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูง โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553) มีขั้นตอนดังนี้

1) ฟ้นกรดซัลฟิวริกที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานแล้ว หรือ มีสิ่งเจือปน (Waste sulfuric acid) ให้เป็นละอองเข้าไปเผา (Combustion) กับ น้ำมันเชื้อเพลิง หรือ ก๊าซธรรมชาติใน

เตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 950-1,050 °C เพื่อให้กรดซัลฟิวริกสลายตัวเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกซิเจน และ น้ำ ดังสมการ $\text{H}_2\text{SO}_4 (\text{l}) + \text{Heat} \rightarrow \text{SO}_2 (\text{g}) + 1/2\text{O}_2 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} (\text{g})$

2) ก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ นำมาผ่านหม้อน้ำ (Boiler) เพื่อลดอุณหภูมิ จากขั้นตอนนี้จะได้ไอน้ำเป็นผลพลอยได้สำหรับใช้ในการสนับสนุนกระบวนการผลิต หรือ ใช้ในกระบวนการอื่น ๆ

3) ผ่านก๊าซไปยังหอฟอกก๊าซ (Scrubber) เพื่อแยกเอาสิ่งเจือปนบางส่วนออก และผ่านหอทำให้ก๊าซเย็น (Gas cooling) เพื่อดักจับไอน้ำ โดยอาจใช้ทั้งแบบสัมผัสโดยตรงกับสารหล่อเย็น (Direct contact) หรือ โดยการผ่านตัวกลาง (Cooling media)

4) ก๊าซผ่าน Mist precipitator เพื่อดักจับฝุ่นควบแน่นฟุ้งของโลหะหนักและละอองไอกรด ได้ เป็นก๊าซที่สะอาดพร้อมผลิตเป็นกรดซัลฟิวริก

5) ก๊าซสะอาดที่ได้ ถูกนำมาผ่านหอทำให้อากาศแห้ง (Drying tower) เพื่อลดความชื้นอากาศ โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารดูดความชื้น

6) ก๊าซที่ได้จากหอทำให้อากาศแห้ง จะผ่านเข้าไปในเครื่องให้ความร้อน (Gas heating) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้มีค่าที่เหมาะสมกับที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถทำงานได้

7) เมื่อผ่านมารอบทุกขั้นตอนแล้ว จะได้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่สะอาด ไม่มีความชื้น พร้อมนำไปผลิตเป็นกรดซัลฟิวริก

2.2.1.2 การปรับสภาพและตกตะกอนของเสียที่เป็นกรดซัลฟิวริกเจือจาง

มีขั้นตอนหลัก คือ ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง การตกตะกอนสิ่งปนเปื้อน และการแยกของแข็งออกจากของเหลว โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1) การปรับสภาพให้เป็นกลางและการตกตะกอน โดยการเติมด่างให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง โดยการพิจารณาเลือกต่างชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2-6 กรณีที่ของเสียมีโลหะหนักเจือปน การปรับค่าพีเอชมีผลต่อการตกตะกอนของโลหะหนักที่ค่าพีเอชต่าง ๆ ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยาในถังปรับสภาพให้เป็นกลาง (Neutralization tank) จะต้องไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ และในถังควรติดตั้งใบกวนเพื่อช่วยให้มีการผสมและเกิดปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 2- 6 ต่างชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการปรับสภาพกรด

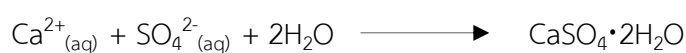
ชื่อเรียก	ชื่อทางเคมี	สูตรเคมี	ข้อดี	ข้อเสีย
ปูนขาว (Lime)	แคลเซียมไฮดรอกไซด์	Ca(OH) ₂	ใช้งานง่าย ถูก พร้อมใช้ งานได้ทันที	มีตะกอนยิปซัม และ มีภาระต้องบำบัด
โซดาไฟ (Caustic Soda)	โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	ราคาแพง ไม่มี ตะกอน	ทำปฏิกิริยากับกรด รุนแรง
หินปูน (Lime Stone)	แคลเซียมคาร์บอเนต	CaCO ₃	หาง่าย ถูก ปรับค่าพี เอชช่วงแคบ ๆ ได้	มีตะกอนยิปซัม และ มีภาระต้องบำบัด
โซดาแอส (Soda Ash)	โซเดียมคาร์บอเนต	NaCO ₃	หาง่าย ถูก ปรับค่าพี เอชช่วงแคบ ๆ ได้	-

ที่มา กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553)

2) การแยกของแข็งออกจากของเหลว หลังจากที่ตะกอนรวมตัวหนามากขึ้นให้แยกตะกอนออกมาด้วยการกรองหรือวิธีการตกตะกอนทำชั้น (Clarifier/Thickener) โดยหากตะกอนที่ได้จากการแยกต้องนำไปบำบัดหรือกำจัดตามที่กฎหมายกำหนด ยกตัวอย่างเช่น นำไปฝังกลบ

2.2.1.3 บำบัดด้วยการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) เพื่อผลิตเป็นยิปซัม

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ ปูนขาว สามารถปรับสภาพให้สารละลายเป็นกลางได้อย่างรวดเร็วทำให้การควบคุมค่าพีเอชเป็นไปได้ยาก การบำบัดวิธีนี้อาศัยหลักการเกิดผลึก (Crystallization) ของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต หรือ ยิปซัม ซึ่งเป็นการรวมตัวกันระหว่างแคลเซียม (Ca²⁺) จากปูนขาว และ ซัลเฟต (SO₄²⁻) จากกรดซัลฟิวริก โดยมีสมการดังนี้



จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า สมบัติของยิปซัม ได้แก่ ขนาดผลึก รูปร่างผลึก ความบริสุทธิ์ และ ปริมาณของยิปซัมขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของซัลเฟต ความเข้มข้นของปูนขาว อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา และ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนอื่น ๆ โดยผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีต่อสมบัติต่อยิปซัม สามารถแสดงได้ ดังตารางที่ 2- 7

ตารางที่ 2- 7 ผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีต่อสมบัติต่อยิปซัม

พารามิเตอร์	ผลต่อยิปซัม	อ้างอิง
ค่าพีเอช	- มีผลเล็กน้อย หรือ ไม่มีผล - ประสิทธิภาพการบำบัดด้วย $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จะลดลงที่ค่าพีเอชเป็นกลาง	Umetsu (1991); Gominšek และ คณะ (2005); Geldenhuis, Maree, Beer และ Hlabela (2003)
ความเร็วกวนผสม	- มีผลเล็กน้อยต่อขนาดผลึก (300 – 750 rpm)	Gominšek และ คณะ (2005); Sayan, Titiz-Sargut, และ Avci (2007); Deng และคณะ (2013)
อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา	- ที่ 25°C และ 70°C พบแคไธไฮเดรท - ที่ 100 °C เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ H_2SO_4 ไธไฮเดรทเปลี่ยนเป็นเฮมิไฮเดรท และ แอนไฮเดรท - เพิ่มอุณหภูมิทำให้ขนาดผลึกเพิ่มอัตราการตกตะกอนเพิ่ม แต่ความหนาแน่นเนื้อลดลง - ขนาดผลึกใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ	Ling และ Demopoulos (2004) Al-Othman และ Demopoulos (2009); Deng และคณะ (2013)
ความเข้มข้นปูนขาว	- มีผลต่อรูปร่างผลึกที่ 25°C และ ขนาดผลึกใหญ่ขึ้นเมื่อลดความเข้มข้น - ที่ 25°C ขนาดผลึกใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้น $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Gominšek และ คณะ (2005); Deng และคณะ (2013)

ตารางที่ 2- 7 (ต่อ) ผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีต่อสมบัติต่อยิปซัม

พารามิเตอร์	ผลต่อยิปซัม	อ้างอิง
ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก	- มีผลต่อการอิมตัวยิ่งยวด - ความเข้มข้นกรดเพิ่มทำให้อัตราตกตะกอนลดลงและเพิ่มความหนาแน่นเนื้อ	Al-Othman และ Demopoulos (2009)
ไอออน	- ไอออนของโลหะมีผลอย่างมากต่อการยับยั้งการเกิดผลึก ($Cd > Cu > Fe > Cr$) - Fe^{2+} และ Fe^{3+} ทำให้รูปร่างและขนาดผลึกเปลี่ยนแปลง - Fe^{3+} ผลีกรูปเข็ม, แท่ง Al^{3+} ผลีกรูปจาน Mg^{2+} ผลีกรูปจาน Zn^{2+} ผลีกรูปดอกไม้ - Mg^{+} ลดการเกิดยิปซัมที่พีเอช 9.6 แต่ช่วยให้ตกตะกอนดีขึ้นที่ 12.5	Hamdona และ Hadad (2007); Sayan และ คณะ (2007); Deng และคณะ (2013); Tolonen Rämö และ Lassi (2015)

2.2.2 มาตรฐานสารอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

น้ำกรดในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดเป็นกรดซัลฟิวริกที่มีคุณลักษณะที่ต้องการตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กรดซัลฟิวริกสำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (มอก. 13-2530) ลักษณะทั่วไป ต้องไม่มีควัน ไม่มีตะกอน และไม่มีสี โดยแบ่งกรดซัลฟิวริกออกเป็น 5 ประเภทความเข้มข้นของกรด ดังตารางที่ 2-8 และได้กำหนดปริมาณสารเคมีอื่น ๆ ไว้ ดังตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2- 8 ประเภทของกรดซัลฟิวริกในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

ประเภทที่	ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	ไม่น้อยกว่า 93.2
2	49.5 – 50.5
3	36.5 – 37.5
4	31.8 – 34.2
5	28.3 – 29.5

ที่มา มอก. 13-2530

ตารางที่ 2- 9 ปริมาณสารเคมีที่ควบคุมในกรดซัลฟิวริกในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

สารเคมี	เกณฑ์ที่กำหนดสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)				
	ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5
สารอินทรีย์	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
แพลทินัม	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
ส่วนที่เหลือจาก การเผาไหม้	300	160	120	105	90
กรดซัลฟิวรัส	40	22	16	14	13
เหล็ก	50	27	20	18	16
ทองแดง	50	27	20	18	16
สังกะสี	40	22	16	14	13
สารหนู	1	0.5	0.4	0.4	0.3
แอนติโมนี	1	0.5	0.4	0.4	0.3

ตารางที่ 2- 9 (ต่อ) ปริมาณสารเคมีที่ควบคุมในกรดซัลฟิวริกในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

สารเคมี	เกณฑ์ที่กำหนดสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)				
	ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5
ซีลีเนียม	20	11	8	7	6
นิกเกิล	1	0.5	0.4	0.4	0.3
แมงกานีส	0.2	0.11	0.08	0.07	0.06
ไนเตรต	5	2.7	2.0	1.8	1.6
แอมโมเนียม	10	5	4	4	3
คลอไรด์	10	5	4	4	3

ที่มา มอก 13-2530

2.3 ยิปซัม

ยิปซัม หรือ แกลบแก้ว หรือ แร่เกลือจัดเป็นแร่โลหะมีสูตรเคมี คือ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ มีส่วนประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 32.6 ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละ 46.5 และ น้ำ (H_2O) ร้อยละ 20.9 (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2550) มีแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ คือ เกิดจากน้ำทะเลระเหยออก แล้วมีการสะสมเป็นชั้น ๆ เหมือนเกลือหิน หรือ อาจเกิดจากการแปรสภาพของแอนไฮเดรตโดยการดูดน้ำ พบได้บริเวณภูเขาไฟ โดยเฉพาะบริเวณที่มีหินปูน เนื่องจากหินปูนสามารถทำปฏิกิริยากับไอกำมะถันได้ ยิปซัมจากธรรมชาติมักมีสีเทา และมีความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 8-10 แคลเซียมซัลเฟตที่พบได้มี 3 ลักษณะ ได้แก่ ไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เฮมิไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) และ แอนไฮเดรต (CaSO_4) แต่ที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเป็นไดไฮเดรตและแอนไฮเดรต โดยมีการเปรียบเทียบสมบัติได้ตามตารางที่ 2-10

ตารางที่ 2- 10 สมบัติของไดไฮเดรตและแอนไฮเดรต

คุณสมบัติ	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CaSO_4
ค่าความถ่วงจำเพาะ (g/cm^3)	2.32	2.89
ความแข็งของมอร์ (Mohr)	1.5 – 2.0	3.0 – 3.5
ความทนแรงอัด (compressive) (MPa)	17	80
ความทนแรงดึง (tension) (MPa)	2	7

ตารางที่ 2- 10 (ต่อ) สมบัติของไดไฮเดรตและแอนไฮเดรต

คุณสมบัติ	CaSO ₄ ·2H ₂ O	CaSO ₄
ดัชนีความเปราะ (brittleness index)	8.5	11.0
การหลอมละลาย (Fusibility)	5	2
สภาพรับได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility)	-0.44 × 10 ⁻³	-0.37 × 10 ⁻³
สภาพการนำไฟฟ้า (Dielectric conductivity) (S/m)	5.2 – 6.2	5.7 – 7.0

ที่มา Lushnikova และ Dvorkin

แอนไฮเดรตมีโครงสร้างผลึกที่หนาแน่นกว่าไดไฮเดรต เนื่องจากไม่มีผลึกของน้ำอยู่ในโครงสร้าง และทำให้มีค่าของคุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties) มากกว่าไดไฮเดรต โดยทั่วไปการนำยิปซัมมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุประสาน (binders) จะต้องมียิปซัม หรือ มี CaSO₄·2H₂O + CaSO₄ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80

ซึ่งองค์ประกอบของแรียิปซัมที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยทั่วไป ดังตารางที่ 2- 11 และคุณลักษณะของแรียิปซัมตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (มอก. 595-2528) ที่แบ่งยิปซัมออก 4 ชนิด ตามคุณภาพ ดังตารางที่ 2- 12

ตารางที่ 2- 11 องค์ประกอบของแรียิปซัมที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยทั่วไป

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
แคลเซียมซัลเฟต (CaSO ₄)	อย่างน้อย 96
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	32.4
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	46.42
เฟอร์ริกไตรออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	0.02
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	0.40
คลอรีน (Cl)	0.11
ความชื้น (Free water)	0.2
อนุของน้ำในเนื้อแร่ (Combine water)	20.15

ที่มา กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2550

ตารางที่ 2- 12 คุณลักษณะของแรยิปซัมตาม มอก. 595-2528

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)			
	ชั้นคุณภาพ			
	1	2	3	4
แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	≥95.0	≥90.0	≥80.0	≥70.0
ซิลิกา (SiO ₂) และ สารที่ไม่ละลายอื่น ๆ	ไม่เกิน 1.0	ไม่เกิน 3.0	-	-
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	ไม่เกิน 0.3	ไม่เกิน 0.3	-	-
อัลคาไลน์ที่ละลายน้ำได้ (เทียบเป็น Na ₂ O)	ไม่เกิน 0.2	ไม่เกิน 0.2	-	-
คลอไรด์ (เทียบเป็น NaCl)	ไม่เกิน 0.2	ไม่เกิน 0.2	-	-

ที่มา มอก. 595-2528

2.3.1 ยิปซัมสังเคราะห์ (synthetic gypsum)

นอกจากแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติแล้วยิปซัวยังเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เรียกว่า ยิปซัมสังเคราะห์ (synthetic gypsum) สามารถแบ่งออกได้หลายชนิดตามกระบวนการดังตารางที่ 2-13 และมีปริมาณของแคลเซียมซัลเฟตอยู่ในช่วงร้อยละ 80-90 โดยน้ำหนัก ยิปซัมสังเคราะห์จะต้องถูกนำไปกำจัดสิ่งเจือปนหรือ ลดความเป็นอันตรายของสิ่งเจือปน ซึ่งบางครั้งทำได้ยากเนื่องจากสิ่งเจือปนนั้นอยู่ภายในผลึกแคลเซียมซัลเฟต เช่น ฟอสไฟยิปซัม (Phosphogypsum) มีการปนเปื้อนของเสียอุตสาหกรรมที่มีระดับของกำมะถันตกค้างสูง

ตารางที่ 2- 13 ชนิดของยิปซัมสังเคราะห์

ชนิดของยิปซัม	กระบวนการผลิต
Phosphogypsum	การผลิตปุ๋ยเคมีจากแร่ฟอสเฟตและกรดซัลฟิวริก
Flue gas desulphurization gypsum (FGD)	กระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกมาจากโรงงานไฟฟ้าเชื้อเพลิงถ่านหิน

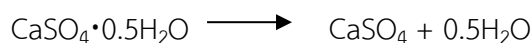
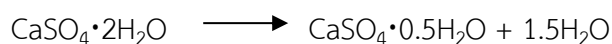
ตารางที่ 2- 13 (ต่อ) ชนิดของยิปซัมสังเคราะห์

ชนิดของยิปซัม	กระบวนการผลิต
DeSulphoGypsum (DSG)	กระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกมาจากโรงงานไฟฟ้าเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงก๊าซ
Borogypsum	การผลิตกรดบอริก
Fluorogypsum (fluoroanhydrite)	การผลิตกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) จากแร่ฟลูออสปาร์ (fluospar)
Ferrogypsum	การใช้ปูนขาวบำบัดสารละลาย iron vitrol
Titanogypsum	การผลิตไททานเนียมไดออกไซด์
Red gypsum	ของเสียที่มีเฟอร์ริกเจือปนจากอุตสาหกรรมไททานเนียมไดออกไซด์
H-acid gypsum	การปรับปรุงสภาพกรดซัลฟิวริกระหว่างการผลิตสีย้อม
Hydrolysis gypsum	การไฮโดรไลซิสของลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) ด้วยกรดซัลฟิวริก
Citrogypsum	การผลิตกรดซิตริก
Tantratogypsum	การผลิตกรดทาร์ทาริก

ที่มา Lushnikova และ Dvorkin

2.3.2 การดีไฮเดรตของยิปซัม (Dehydration of gypsum)

กระบวนการการดีไฮเดรตประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่ การเกิดเอมิไฮเดรต และการเกิดแอนไฮเดรต (Lushnikova และ Dvorkin, 2016)



ทั้ง 2 ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic) โดยเอมิไฮเดรตจะเกิดเป็นรูปอัลฟา (α -) หรือ เบต้า (β -) ขึ้นกับอุปกรณ์ และ เทคโนโลยีที่ใช้ในการเผาหรือให้ความร้อนแก่ยิปซัม โดย α -เอมิไฮเดรต ใช้พลังงานความร้อนในการระเหยน้ำ 83.2 กิโลจูล/โมล ขณะที่ β -เอมิไฮเดรตใช้ 85.3 กิโลจูล/โมล

2.4 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis, MFA)

เป็นการศึกษาปริมาณของสารหรือวัสดุที่ผ่านเข้า-ออก และสะสมอยู่ในกระบวนการหรือระบบที่เรากำหนดขอบเขตไว้ช่วงเวลาหรือพื้นที่ที่เราสนใจ เป็นการเชื่อมโยงกันของแหล่งกำเนิด เส้นทางผ่าน และรูปต่าง ๆ ของวัสดุในระบบ โดยอาศัยกฎอนุรักษ์มวลสาร (law of conservation of matter) อาจเรียกการวิเคราะห์นี้ว่า การทำบัญชีการไหลของสารหรือวัสดุ (ทางกายภาพ) มีหลักการคือ การทำสมดุลมวลสาร (mass balance) มีสมการทั่วไป คือ

$$\text{สารที่สะสมในระบบ} = \text{สารที่เข้าสู่ระบบ} - \text{สารที่ออกจากระบบ}$$

การวิเคราะห์การไหลของวัสดุเป็นเครื่องมือที่ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจ ในเชิงการจัดการทรัพยากร การจัดการของเสีย และการจัดการสิ่งแวดล้อม เนื่องจากในการทำสมดุลจากสารขาเข้า สารขาออก และสารที่สะสมในระบบ จะทำให้เห็นถึงเส้นทางการไหลและสามารถระบุจุดกำเนิดของเสียหรือภาระทางสิ่งแวดล้อมปรากฏขึ้นชัดเจน นอกจากนี้ปริมาณที่สะสมในระบบที่ระบุได้นั้น สามารถนำมาใช้คำนวณย้อนกลับ หรือ นำมาหาวิธีการหรือปรับปรุงการนำไปใช้ไปประโยชน์ได้ ข้อควรระวัง คือ การกำหนดช่วงเวลาการศึกษาระยะสั้น อาจเห็นการเปลี่ยนแปลงในระบบน้อย แต่ข้อมูลในระยะสั้นนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบได้ เมื่อทำการศึกษาในระยะยาว

2.4.1 นิยาม

2.4.1.1 สสาร (Substance)

สสารตามความหมายของราชบัณฑิตยสถานได้ระบุความหมายไว้ว่า สิ่งที่มีมวลสาร ต้องการที่อยู่ และสัมผัสได้ อาจมีเพียงสารเดียว เช่น ทองคำ เงิน แก้ว เกลือ น้ำ หรือประกอบด้วยสารหลายสาร เช่น ดินปืน อากาศ ก็ได้ แต่นิยามของสสารที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของวัสดุนั้น คือ สารใด ๆ (สารเคมี) หรือ สารประกอบที่ประกอบด้วยแต่ละหน่วยย่อยชนิดเดียวกันทั้งหมด โดยสสารทุกชนิดจะมีลักษณะที่เฉพาะตัว มีโครงสร้างที่สามารถระบุได้ และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น ไม้ (Wood) ไม่จัดเป็นสสาร เนื่องจากมีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลส ไฮโดรเจน ออกซิเจน และอื่น ๆ ขณะที่ธาตุต่าง ๆ เช่น คาร์บอน ไนโตรเจน แคลเซียม จัดเป็นสสาร หรือ คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนียม แคลเซียมคลอไรด์ จัดเป็นสารประกอบเมื่อพิจารณาที่หน่วยระดับโมเลกุล ในการใช้งานการวิเคราะห์การไหลของวัสดุนี้ทั้งธาตุและสารประกอบจัดเป็นสสาร ในการวิเคราะห์การไหลของวัสดุได้ถูกออกแบบไว้ว่า ในกระบวนการวิเคราะห์สสารที่เข้ามาในระบบจะไม่สามารถถูกทำลาย เปลี่ยนรูป หรือ ย่อยสลายได้ เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (Stable condition)

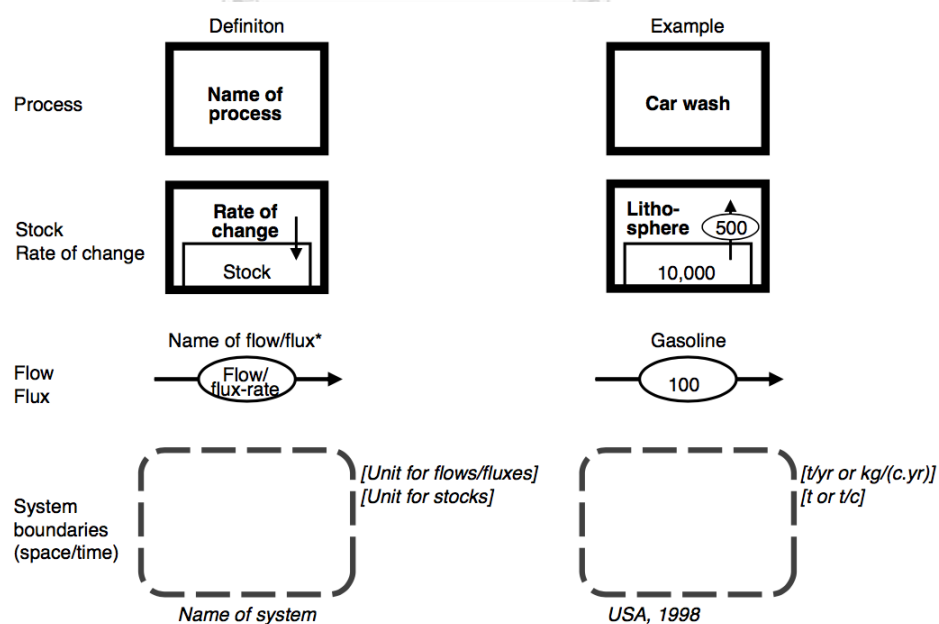
2.4.1.2 ผลิตภัณฑ์ (Goods)

ผลิตภัณฑ์ คือ วัตถุที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจในเชิงบวกหรือในเชิงลบ ผลิตภัณฑ์อาจประกอบด้วยสารชนิดเดียวหรือหลายชนิด เช่น น้ำดื่ม คอนกรีต ขยะ หรือ สลัดจ์ การรายงานการเปลี่ยนแปลงในเชิงมูลค่าหรือปริมาณของวัสดุเหล่านี้มักแสดงผลในเชิงสถิติ ที่จัดทำโดยหน่วยงานรัฐบาล องค์กร หรือ บริษัท ดังนั้นปริมาณของการผลิต (เช่น ต้นต่อปี) เป็นข้อมูลที่จำเป็นต้องมีในการสร้างสมดุลมวลสาร

2.4.1.3 กระบวนการ (Process)

กระบวนการ คือ การแปรสภาพ การขนส่ง หรือ การจัดเก็บวัสดุ การแปรสภาพจะเกิดขึ้นในการผลิตขั้นตอน เช่น การทำเหมืองหรืออุตสาหกรรมโลหะ ที่โลหะจะถูกสกัดออกมาจากร่ ในขั้นการแปรสภาพนั้นหมายรวมถึงการแปรสภาพที่เกิดขึ้นทั้งตามธรรมชาติและเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ด้วย เช่น การสังเคราะห์แสงของต้นไม้ที่แปรสภาพคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นออกซิเจนและชีวมวล หรือ การบริโภคเป็นการเปลี่ยนสภาพจากผลิตภัณฑ์เป็นของเสียหรือมลพิษ นอกจากนี้การขนส่งผลิตภัณฑ์ การถ่ายทอดพลังงาน และการโอนถ่ายข้อมูล ก็จัดเป็นกระบวนการเช่นเดียวกัน

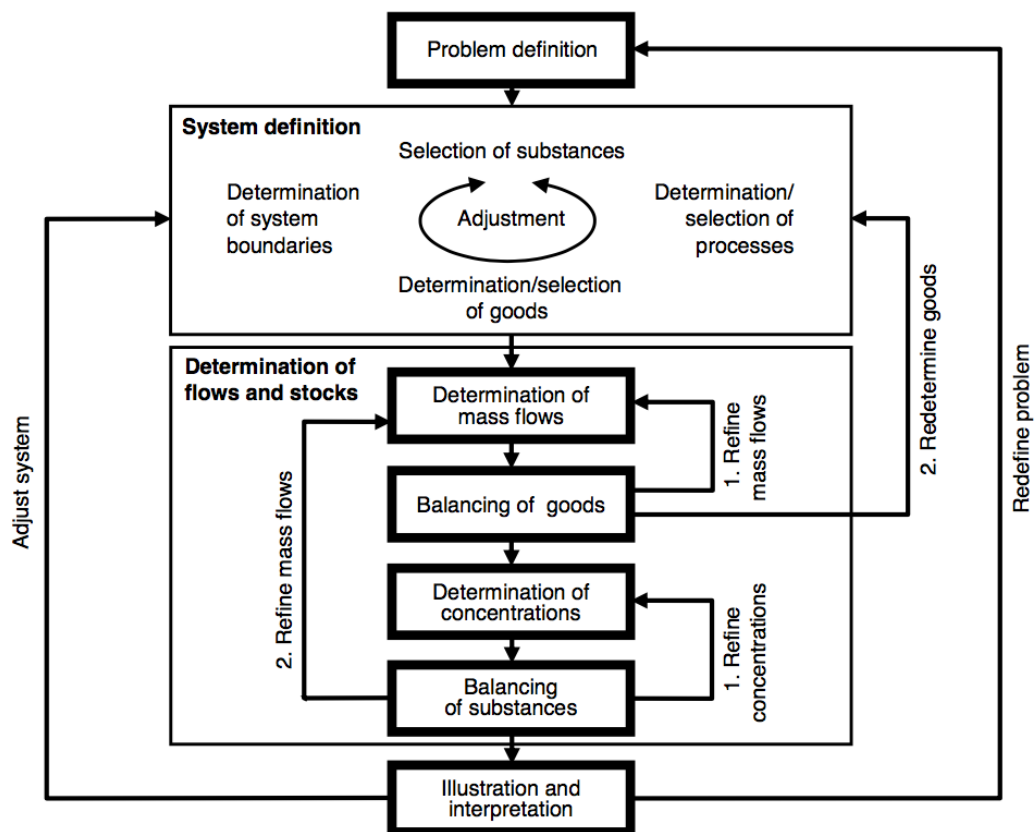
โดยในการวาดแผนผังการไหลสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงดัง รูปที่ 2-5 โดยส่วนของกระบวนการจะถูกแทนด้วย กล่องสี่เหลี่ยม ปริมาณการสะสมภายในกระบวนการ แทนด้วย กล่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็กซ้อนทับกระบวนการนั้น ๆ การไหลในกระบวนการเขียนแทนด้วยลูกศรที่มีทิศทางจากขั้นตอนที่เริ่มไปยังขั้นตอนปลายทาง และขอบเขตของกระบวนการ เป็นเส้นประที่ครอบคลุมกระบวนการทั้งหมด



รูปที่ 2- 5 สัญลักษณ์ที่ใช้ในแผนผังการไหลของวัสดุ
ที่มา Brunner และ Rechberger (2016)

2.4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ

ขั้นตอนในการวิเคราะห์การไหลของวัสดุโดยทั่วไป มักเริ่มจากระบุปัญหาและเป้าหมาย จากนั้นทำการเลือกสารที่เกี่ยวข้อง ขอบเขตของระบบ กระบวนการ และ ผลิตภัณฑ์ ต่อมาทำการประเมินปริมาณของผลิตภัณฑ์หรือสารในระบบ แล้วจึงคำนวณและพิจารณาความไม่แน่นอนของปริมาณการไหลของสารและปริมาณที่สะสมในระบบ การแสดงผลของผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์จะต้องง่ายต่อการสรุปผลและช่วยในการตัดสินใจที่สอดคล้องกับเป้าหมายที่ระบุไว้ ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุแสดงดัง รูปที่ 2-6



รูปที่ 2- 6 ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ

ที่มา Brunner และ Rechberger (2016)

1) การระบุสารที่ศึกษา (Selection of substances)

แนวทางในการเลือกสารที่จะศึกษาขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของระบบ ระดับความแม่นยำที่ต้องการ ลักษณะของระบบที่เราทำการศึกษา ข้อกำหนดหรือกฎหมาย สารที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ กิจกรรมที่เราสนใจ และทรัพยากรในเชิงงบประมาณและแรงงาน เป็นต้น

เนื่องจากจุดประสงค์หลักของการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ คือ การกำหนดให้จำนวนพารามิเตอร์ที่พิจารณามีจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดตัวบ่งชี้ (Indicator elements) โดยตัวบ่งชี้ที่เป็นตัวแทนกลุ่มของสารจะต้องแสดงลักษณะเฉพาะทั้งด้านกายภาพ ชีวภาพ และเคมีของสารในกลุ่ม และสามารถคาดการณ์พฤติกรรมของสารอื่น ๆ ได้ ตัวอย่างการเลือกตัวบ่งชี้ แสดงในตารางที่ 2- 14 สารในกลุ่ม atmophile มีจุดเดือดต่ำและสามารถไหลออกจากระบบไปกับอากาศได้ ส่วนสารในกลุ่ม lithophile มีจุดเดือดสูง มักพบปนเปื้อนอยู่กับถ่านหินหรือตะกรัน ซึ่งตัวบ่งชี้ที่เลือกจะต้องมีความสอดคล้องกับกระบวนการที่เราทำการศึกษา แคดเมียมและเหล็กจึงเป็นตัวบ่งชี้ที่เหมาะสมเมื่อกระบวนการที่เราสนใจ คือ การเผาขยะมูลฝอย ตะกั่วไม่เหมาะสมที่จะเป็นตัวบ่งชี้เพราะเป็นสารตัวเดียวที่สามารถระเหยสู่สิ่งแวดล้อมได้

ตารางที่ 2- 14 ตัวอย่างการเลือกตัวบ่งชี้ของระบบ

กระบวนการ	สารในระบบ		ตัวบ่งชี้
การเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง	กลุ่ม atmophile	Cd, Zn, Sb, Tl, Pb	Cd
	กลุ่ม lithophile	Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni	Fe

2) กำหนดขอบเขตของระบบและระยะเวลาศึกษา (System definition in space and time)

การกำหนดขอบเขตเชิงพื้นที่ของระบบ (Spatial system boundary) มักกำหนดจากกระบวนการหรือโครงการที่เราทำการศึกษา เช่น สมดุลคาร์บอนของชุมชน หรือ วิเคราะห์วัสดุการไหลของโรงงานผลิตไฟฟ้า เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่มักกำหนดตามเขตการปกครอง เช่น ระดับประเทศ ระดับรัฐ ระดับเมือง เนื่องจากข้อมูลที่มีมักแบ่งตามระดับของการปกครอง และ สะดวกต่อการสร้างผังการไหลเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง โดยทั่วไปแล้วการกำหนดขอบเขตให้แคบและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ แต่ต้องครอบคลุมทุกกระบวนการและการไหลของวัสดุที่สำคัญ เช่น ในการศึกษาการอนุรักษ์ทรัพยากร ปริมาณและเส้นทางการไหลของไนโตรเจนเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องมาใช้วิเคราะห์

การกำหนดขอบเขตเชิงเวลาของระบบ (Temporal system boundary) การกำหนดขอบเขตของระยะเวลาการศึกษาจะต้องนานมากพอที่จะเห็นถึงเปลี่ยนแปลงของระบบ กิจกรรมจากมนุษย์ส่วนใหญ่มักใช้ระยะเวลาในการศึกษา 1 ปี ขณะที่การกำหนดขอบเขตระยะสั้นจะเหมาะสมกับการไหลของวัสดุที่ไม่ปกติ หรือ ไม่คงที่

3) การระบุการไหล กระบวนการ และปริมาณสะสมที่เกี่ยวข้อง (Identification of relevant flows, stocks and processes)

การวางแผนผังการไหลของระบบ เป็นการนำข้อมูลที่รวบรวมมาจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรือ จากแหล่งอื่น ๆ เช่น การสอบถามผู้เชี่ยวชาญ จากรายงานของหน่วยงานหรือองค์กร ในขั้นตอนนี้กระแสการไหลของสสารที่มีสัดส่วนน้อยกว่าร้อยละ 1 ของการไหลสสารทั้งหมดจะไม่ถูกนำมาพิจารณา แต่อย่างไรก็ตามหากวิเคราะห์ในกระบวนการย่อยแล้ว ควรจะต้องพิจารณาย้อนกลับไปดูความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ และความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการย่อยและกระแสการไหลของสสารที่เราไม่ได้นำมาพิจารณา โดยตารางที่ 2-15 เป็นตัวอย่างตารางในการบันทึกข้อมูล

จำนวนของกระบวนการที่มีความสำคัญต่อระบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และความซับซ้อนของระบบ บางทีก็สามารถรวมกระบวนการหลาย ๆ กระบวนการไว้เป็นอันเดียว ส่วนใหญ่ถ้ามีกระบวนการรวมทั้งระบบมากกว่า 15 กระบวนการ โดยไม่รวมกระบวนการที่นำเข้า-ส่งออกจากขอบเขตระบบแล้ว จะก่อให้เกิดความยุ่งยากและความซับซ้อนโดยไม่จำเป็น

ตารางที่ 2- 15 ตัวอย่างตารางการบันทึกข้อมูลสำหรับการทำ MFA

วัสดุดิบ	ปริมาณ (ตัน/ปี)	ความเข้มข้นของสสาร (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)				ปริมาณของสสาร (กิโลกรัม/ปี)			สาร n
		สาร ₁	สาร ₂	สาร ₃	สาร _n	สาร ₁	สาร ₂	สาร ₃	
วัสดุดิบ ₁									
วัสดุดิบ ₂									
วัสดุดิบ ₃									
วัสดุดิบ _n									

ที่มา ดัดแปลงจาก Brunner และ Rechberger (2016)

4) การคำนวณปริมาณการไหลของมวลสาร ปริมาณสะสม และ ความเข้มข้น

(Determination of mass flows, stocks and concentrations)

การคำนวณการไหลของมวลสารบางครั้งต้องอาศัยสมมุติฐาน การเปรียบเทียบกับระบบที่มีความคล้ายกัน หรือที่เรียกว่าข้อมูลพรีอกซี (Proxy) ที่สามารถช่วยประมาณหรือคาดการณ์ข้อมูลของระบบที่เราสนใจได้ ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาที่มีวัตถุประสงค์ คือ ปริมาณสังกะสีที่สูญเสียจากขบขยารถยนต์ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยอาศัยข้อมูลของประเทศสวีเดนที่มีการประเมินแล้วได้ ปริมาณสังกะสีที่สูญเสียไปในรถยนต์ 1 คันเท่ากับ 0.032 กิโลกรัมสังกะสีต่อปี โดยตั้งสมมุติฐานว่า ข้อมูลนี้สามารถนำมาใช้สนับสนุนวัตถุประสงค์ของการศึกษาในประเทศสหรัฐอเมริกาได้จากการคูณเข้ากับจำนวนรถยนต์ในประเทศสหรัฐอเมริกา 140 ล้านคัน ได้ผลลัพธ์เป็น 4,500 ตันต่อปี แต่การประมาณอาจต่ำกว่าค่าความเป็นจริง เนื่องจากผู้ใช้รถยนต์ในประเทศสหรัฐอเมริกาขับรถด้วยระยะทางที่ยาวกว่าผู้ใช้รถในประเทศสวีเดน ดังนั้นการข้อมูลพรีอกซีจำเป็นต้องตรวจสอบไปถึงแหล่งที่มา พร้อมทั้งหมายเหตุไว้ด้วย

นอกจากนี้การที่จะทำให้ปริมาณสารเข้าและขาออกสมดุลกันโดยที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าร้อยละ 10 จากปริมาณการไหลทั้งหมดนั้นเป็นไปได้ยาก ตามทฤษฎีแล้วปริมาณการไหลสามารถวัดได้โดยตรงในกิจกรรมขนาดใหญ่ เช่น ในระดับภูมิภาค หรือ เขตลุ่มน้ำ ทำให้ในบางกรณีต้องประเมินความถูกต้องแม่นยำของข้อมูลที่มีอยู่ หรือ ข้อมูลที่ทำการเก็บมา

5) การคำนวณการไหลของสสารและปริมาณสะสมทั้งหมด (Assessment of total material flows and stocks)

การไหลของสสารสามารถคำนวณได้โดยตรงจากการคูณปริมาณของวัตถุดิบกับความเข้มข้นของสสารในวัตถุดิบ ส่วนปริมาณสะสมสามารถคำนวณได้ 2 วิธีตามลักษณะของปริมาณสะสม ดังนี้ วิธีแรก คือ การวัดโดยตรงหรือประมาณจากปริมาตรและความหนาแน่นของของสะสม ซึ่งวิธีเหมาะกับระบบที่มีปริมาณสะสมคงที่เป็นเวลานาน เช่น กระบวนการทางธรรมชาติในดิน หรือ ทะเลสาบขนาดใหญ่ ส่วนวิธีที่ 2 เหมาะสำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสะสมอย่างรวดเร็ว เช่น ในหลุมฝังกลบ ธาตุอาหารในพื้นที่เกษตรกรรม หรือ โลหะในเขตเมือง โดยคำนวณจากความแตกต่างกันระหว่างปริมาณสารเข้าและปริมาณสารเข้าในช่วงระยะเวลาที่เหมาะสม ($t_0 - t$) ที่เวลาเริ่มต้น (t_0) มีปริมาณสะสมที่สามารถทราบได้ จากนั้นจึงใช้สมการในการคำนวณ

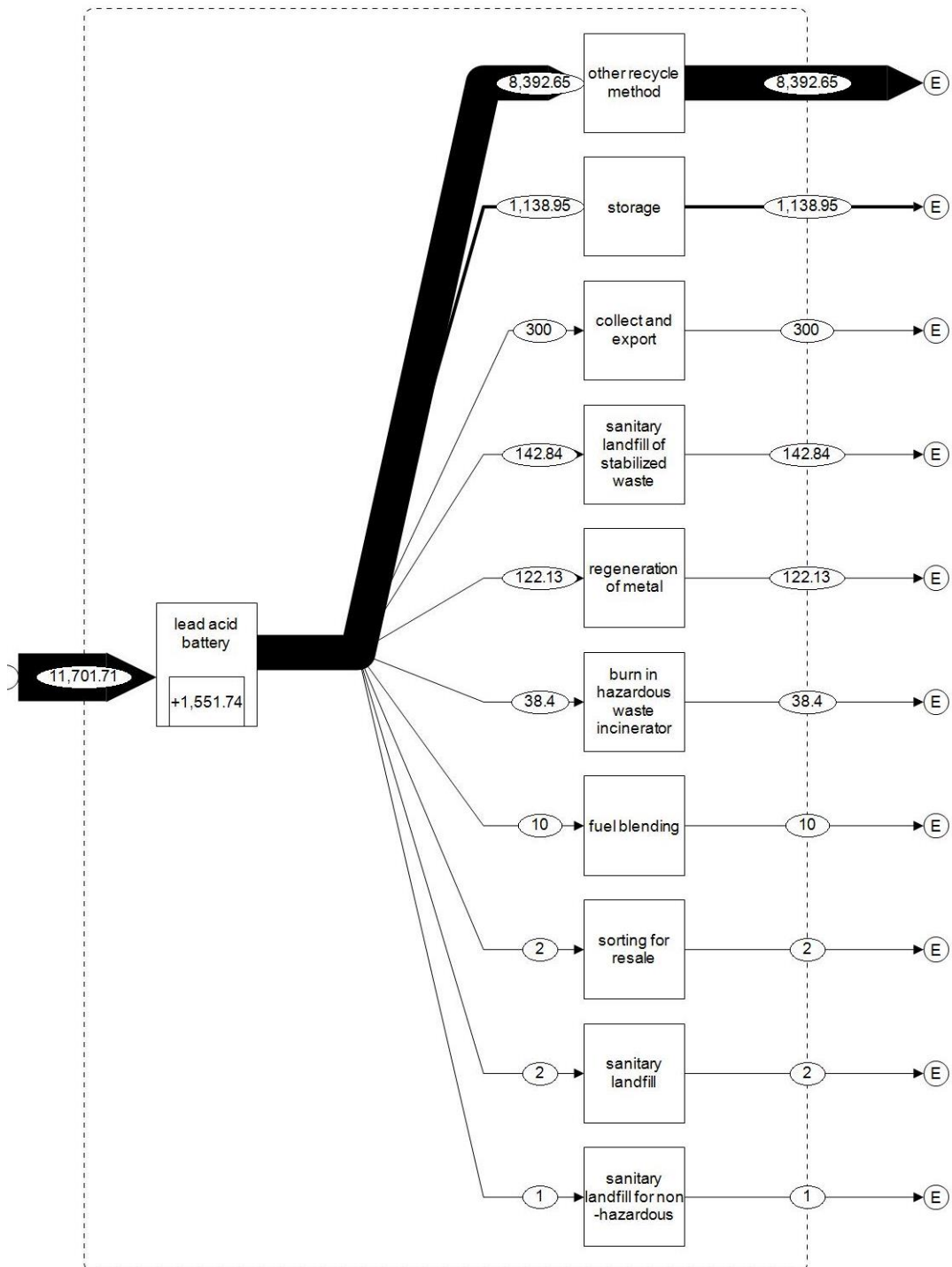
$$m_{\text{stock}}(t) = \int_{t_0}^t \dot{m}_{\text{input}}(\tau) d\tau - \int_{t_0}^t \dot{m}_{\text{output}}(\tau) d\tau + m_{\text{stock}}(t_0)$$

6) การแสดงผลวิเคราะห์ (Presentation of results)

หลักการแสดงผลที่ดีที่สุด สื่อความได้ชัดเจน เข้าใจได้ง่าย นำไปใช้ได้ และ ต้องนำเสนอโดยให้ระลึกเสมอว่ามีกลุ่มผู้รับสารอยู่ 2 ประเภท คือ ผู้เชี่ยวชาญในด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ และการประเมินวัฏจักรชีวิต และ อีกกลุ่มเป็นผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่ไม่คุ้นเคยกับแนวคิดและขั้นตอนในการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ หรือ ไม่ได้มีพื้นฐานทางด้านนี้ ที่มักเป็นผู้ที่บทบาทในการตัดสินใจด้านนโยบาย ดังนั้นการนำเสนอผลการวิเคราะห์ควรมีทั้งรายงานฉบับเต็ม (comprehensive technical report) และ รายงานสรุป (executive summary)

รายงานฉบับเต็มควรมีเนื้อหาตามลำดับ ดังนี้ บทแรก ประกอบด้วย บทคัดย่อ เป็นบทสรุปให้ผู้อ่านได้เนื้อหาหลักและประเด็นสำคัญทั้งหมด โดยควรใช้คำที่เข้าใจได้ง่ายและไม่มีศัพท์เฉพาะทางวิชาการ สารบัญ เป้าหมายและจุดประสงค์การศึกษา ที่มีการลงรายละเอียดและสรุปความรู้พื้นฐานไว้ รวมถึงการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง บทต่อมากล่าวถึงการดำเนินการ ต้องระบุวิธีการศึกษานิยามคำที่เกี่ยวข้อง ระบบที่ทำการศึกษา แหล่งที่มาของข้อมูลทั้งหมด และ การจัดการความไม่แน่นอนข้อมูล ขั้นตอนการดำเนินจะต้องโปร่งใส ตรวจสอบได้ และสามารถทำซ้ำได้ บทต่อมาเป็นผลการศึกษาและการอภิปรายผลการศึกษา แสดงผลข้อมูลเชิงปริมาณทั้งหมด ผลลัพธ์จากการศึกษา และ ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม บทสุดท้ายเป็นบทสรุป

การนำเสนอผลลัพธ์และบทสรุปด้วยแผนภาพหรือแผนผังช่วยให้ผู้รับสารเข้าใจได้ง่ายขึ้น โดยที่แผนผังมีการระบุขอบเขตของระบบ หน่วยที่ใช้ ชนิดและปริมาณของสารขาเข้า สารขาออก และสารที่ถูกสะสมไว้ ความหนาของเส้นทางการไหลควรเป็นตัวแทนของปริมาณสารนั้น ๆ ซึ่งต้องมีความหนาเป็นไปตามสัดส่วนของปริมาณสาร หรือที่เรียกว่า Sankey diagram ดังรูปที่ 2-7 นอกจากนี้ยังควรแสดงผลรวมสารขาเข้าและสารขาออกทั้งหมดไว้ที่เหนือขอบเขตของระบบด้านซ้ายและด้านขวาตามลำดับ ทั้งหมดนี้จะช่วยให้ผู้รับสารเข้าใจระบบและสามารถระบุเส้นทางการหลักได้อย่างรวดเร็ว จำนวนแผนผังที่ต้องมี คือ $n+1$ (n คือ การไหลของสารแต่ละชนิด และ 1 คือ แผนผังการไหลของผลิตภัณฑ์)



รูปที่ 2- 7 ตัวอย่างการนำ Sankey diagram มาแสดงวิธีการจัดการแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

2.5 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA)

การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) คือ วิธีการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมในเชิงปริมาณโดยพิจารณาถึงการใช้ทรัพยากร พลังงาน และการปล่อยของเสียสู่สิ่งแวดล้อมที่ครอบคลุมทุกขั้นตอนตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์หรือบริการ ตั้งแต่เกิดจนตาย (cradle to grave) โดยบรรจุเรื่องของการประเมินวัฏจักรชีวิตไว้ใน ISO 14040 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐานระบบการจัดการสิ่งแวดล้อม ISO 14000 (สถาบันวิทยาการ สวทช., 2555) องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization: ISO) ได้นิยามความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิตในอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 ว่า “เป็นการรวบรวมและประเมินค่าสารขาเข้าและสารขาออก รวมถึงผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่มีโอกาสเกิดขึ้นในระบบผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต” กล่าวคือ การประเมินในลักษณะนี้เน้นผลในเชิงปริมาณชัดเจน ผลลัพธ์ที่ได้เป็นเครื่องมือช่วยตัดสินใจที่สามารถบ่งชี้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อให้สามารถหาแนวทางและดำเนินการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมให้น้อยลง การประเมินด้วยวิธีมีข้อดีและข้อจำกัด ดังตารางที่ 2-16

ตารางที่ 2- 16 ข้อดีและข้อจำกัดของการประเมินวัฏจักรชีวิต

ข้อดี	ข้อจำกัด
- เป็นการวิเคราะห์ที่มองภาพรวมของผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในทุกกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง	- ค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานาน
- บ่งชี้ขั้นตอนหลักที่ก่อให้เกิดผลกระทบ	- ขาดแคลนข้อมูลบัญชีรายการทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ เพราะต้องใช้ข้อมูลจำนวนมาก
- บ่งชี้ประเด็นที่ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมสูงสุดและทำให้ทราบแหล่งที่มาของผลกระทบ	- ความไม่แน่นอนของวิธีการวิเคราะห์บัญชีรายการและการประเมินผลกระทบ
- เป็นฐานข้อมูลที่น่าไปใช้ออกแบบเชิงนิเวศได้	- ผลการประเมินอาจมีความแตกต่างกัน เกิดเนื่องจากวิธีการประเมินแตกต่างกัน
- สามารถแก้ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากการบริหารจัดการทรัพยากรอย่างไม่มีประสิทธิภาพ	

ตารางที่ 2- 16 (ต่อ) เปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของการประเมินวัฏจักรชีวิต

ข้อดี	ข้อจำกัด
- สามารถคำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเชิงปริมาณต่อหน่วยการทำงานของผลิตภัณฑ์ ทำให้สามารถเปรียบเทียบผลกระทบของผลิตภัณฑ์ และวิธีการจัดการสิ่งแวดล้อมได้	- การประเมินวัฏจักรชีวิตเรื่องเดียวกัน แต่มีช่วง ระยะเวลาต่างกัน อาจให้ผลการประเมินไม่ เหมือนกัน หรือขัดแย้งกัน

ที่มา ปัทมาพร ตริเนตร, 2559

2.5.1 อนุกรมมาตรฐาน ISO 14040

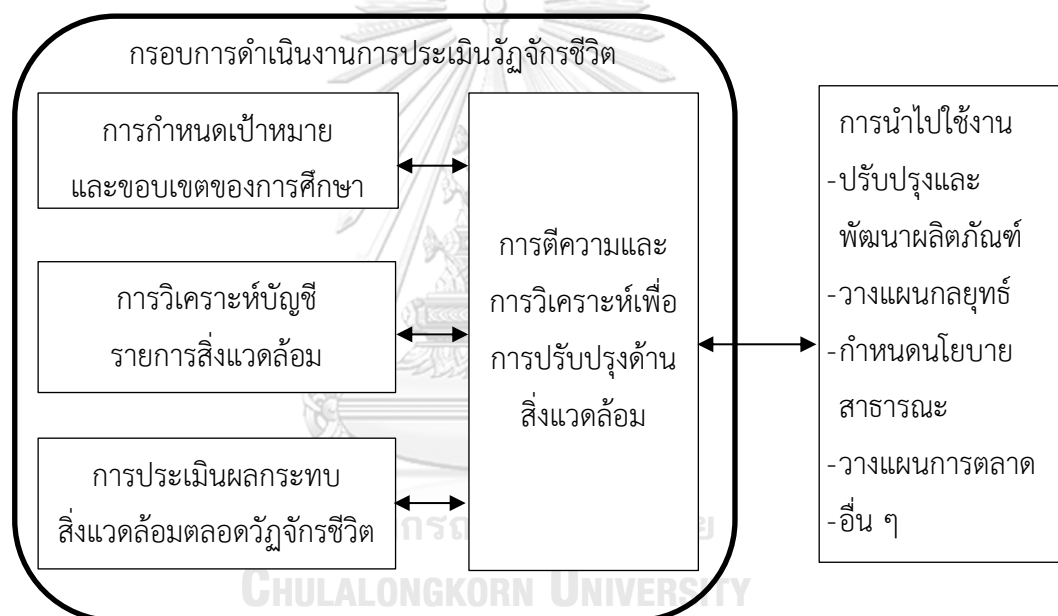
มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิตมี 7 ฉบับ (ชนิภรณ์ เรืองฤทธิ์, 2559)

- ISO 14040 - Life cycle assessment เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึงหลักการนิยามศัพท์ และกรอบการดำเนินงานการประเมินวัฏจักรชีวิต
- ISO 14041 - Life cycle assessment เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึงการกำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขต การวิเคราะห์และจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ (LCI)
- ISO 14042 - Life cycle assessment เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึงการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรของผลิตภัณฑ์ (LCIA)
- ISO 14043 - Life cycle assessment เป็นมาตรฐานกล่าวถึงการแปรผลข้อมูลที่ได้จากการทำ ISO 14041 และ ISO 14042
- ISO/TR 14047 – Life cycle assessment เป็นรายงานทางวิชาการที่ได้แสดงถึงตัวอย่างของการประยุกต์ใช้อนุกรมมาตรฐาน ISO 14042 สำหรับวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
- ISO/TR 14048 – Life cycle assessment เป็นรายงานทางวิชาการที่ได้แสดงถึงตัวอย่างรูปแบบเอกสารของข้อมูลด้านการประเมินวัฏจักรชีวิต
- ISO/TR 14049 – Life cycle assessment เป็นรายงานทางวิชาการที่ได้แสดงถึงการประยุกต์ใช้อนุกรมมาตรฐาน ISO 14041

2.5.2 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต

เนื่องจากวิธีการนี้ต้องอาศัยข้อมูลจำนวนมาก จึงมีโปรแกรมฐานข้อมูลสำเร็จรูปที่ถูกพัฒนาและนิยมใช้สำหรับศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต เช่น SimaPro ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2- 8

- 1) การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา (Goal and scope definition)
- 2) การวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (Inventory analysis)
- 3) การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Impact Assessment: LCA)
- 4) การตีความและการวิเคราะห์เพื่อการปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อม (Interpretation and Improvement Analysis)



รูปที่ 2- 8 กรอบการดำเนินงานการประเมินวัฏจักรชีวิตจากอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 (ดัดแปลงจาก International Standardization Organization, 2006)

- 1) การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา

ขั้นตอนนี้มีความสำคัญ เนื่องจากต้องกำหนดให้ครอบคลุม ชัดเจน และสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา ประกอบด้วย การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and scope) หน้าที่ของผลิตภัณฑ์ (Product function) หน่วยการทำงานของผลิตภัณฑ์ (Functional unit) ขอบเขตระบบ (System boundary) และระบบผลิตภัณฑ์ (Product system)

การกำหนดเป้าหมายต้องมีความชัดเจน ไม่คลุมเครือ สอดคล้องกับการนำไปใช้งาน และกำหนดเหตุผลในการศึกษา การนำผลการศึกษาไปใช้ รวมถึงผู้ใช้ผลการศึกษา (Target audience) โดยผลสรุปที่น่าเชื่อถือสูง มักจะมีขอบเขต ระยะเวลา และงบประมาณที่สูงขึ้น ผลที่ได้จะเป็นข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่ช่วยทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ

การกำหนดขอบเขตการศึกษาเป็นการกำหนดสิ่งที่ต้องการ ประเมินและรายละเอียดภายในระบบ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

- หน้าทีของผลิตภัณฑ์ (Product function) คือการระบุหน้าที่และคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน เนื่องจากผลิตภัณฑ์สามารถมีหน้าที่ได้หลายอย่าง ในกรณีนี้ให้ระบุหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ดังนั้นการระบุหน้าที่ของผลิตภัณฑ์จะต้องสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตที่ทำการศึกษา
- หน่วยการทำงาน (Functional unit) คือการกำหนดขึ้นเพื่อให้ข้อมูลมีหน่วยทำงานเดียวกัน ซึ่งจำเป็นอย่างมากสำหรับการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการ ระหว่างผลิตภัณฑ์ หรือหลายผลิตภัณฑ์ที่รวมเป็นผลิตภัณฑ์เดียว ให้พิจารณาจากปริมาณ คุณสมบัติ ความคงทน ในการใช้งานตามหน้าที่พิจารณา
- ข้อกำหนดคุณภาพข้อมูล ต้องทำการระบุครอบคลุมตัวแปรที่สำคัญ เช่น ช่วงเวลาของข้อมูล ที่มาข้อมูล เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับข้อมูล หากข้อมูลใดต้องใช้สมมติฐานประกอบการวิเคราะห์ จะต้องอธิบายสมมติฐานทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษา เพื่อให้ทราบถึงที่มาของข้อมูลและผลการวิเคราะห์
- ขอบเขตของระบบ (System boundary) ต้องระบุกระบวนการที่พิจารณาในการศึกษา และการกำหนดขอบเขตนั้นมีหลายรูปแบบ (ฉนิภรณ์ เรืองฤทธิ์, 2559) ดังนี้
 - Gate to Gate เป็นการประเมินผลกระทบเฉพาะกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง จากทั้งสายโซ่การผลิต ซึ่งเป็นเพียงบางส่วนของกระบวนการประเมินวัฏจักรชีวิต
 - Gate to Grave เป็นการประเมินที่เริ่มจากกระบวนการผลิต จนได้ผลิตภัณฑ์ ตลอดจนการขนส่ง การกระจายสินค้า และขั้นตอนการกำจัดซาก
 - Cradle to Gate เป็นการประเมินผลกระทบตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่งมายังแหล่งผลิต และการผลิตผลิตภัณฑ์ โดยที่ไม่ได้รวมถึงช่วงการใช้งานหรือการทำลายซาก มักใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถวิเคราะห์ผลกระทบในช่วงการใช้งานได้ เช่น ไฟฟ้า น้ำ และเชื้อเพลิง หรือ เป็นการผลิตเพื่อเป็นวัตถุดิบให้กับผลิตภัณฑ์อื่น

- Cradle to Grave เป็นการประเมินผลกระทบตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ จนถึงขั้นตอนการทำลายซากเมื่อหมดอายุการใช้งาน มักใช้กับผลิตภัณฑ์ที่วิเคราะห์ผลกระทบในช่วงการใช้งานได้ชัดเจน เช่น เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
- Cradle to Cradle เป็นการประเมินรูปแบบพิเศษของ Cradle to Grave ที่พิจารณาถึงขั้นตอนรีไซเคิล ในกรณีที่ขั้นตอนการกำจัดซากเป็นกระบวนการรีไซเคิล

2) การวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อม

ขั้นตอนนี้เป็นการรวบรวมและคำนวณข้อมูลที่ได้จากกระบวนการต่าง ๆ ที่รวบรวมข้อมูลข้อมูลสารขาเข้า (Input) และสารขาออก (Output) ของระบบผลิตภัณฑ์ที่ศึกษาโดยมีมาตรฐานในการรวบรวมข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต บัญชีรายการข้อมูลต้องแสดงทั้งชนิดและปริมาณสารขาเข้า เช่น วัตถุดิบ พลังงาน และสารขาออก เช่น ผลิตภัณฑ์พลอยได้ มลสารที่ปล่อยสู่อากาศ มลสารที่ปล่อยสู่น้ำ ของเสียในรูปของแข็ง (ศุภณี เรียบเลิศศิริ และ แววบุญ แยมแสงสังข์, 2555 ชนิภรณ์ เรื่องฤทธิ์, 2559) โดยมีขั้นตอนการจัดทำบัญชีรายการดังนี้

● การเก็บข้อมูล (Data Collection)

แหล่งของข้อมูลมี 2 ลักษณะ คือ ข้อมูลปฐมภูมิ เป็นข้อมูลที่ได้มาจากแหล่งข้อมูลโดยตรง จึงมีความน่าเชื่อถือ แม่นยำ และเป็นปัจจุบันมากกว่า และ ข้อมูลทุติยภูมิ เป็นข้อมูลที่มาจากการรวบรวมไว้แล้วและสามารถอ้างอิงได้ เช่น หนังสือ วารสาร เอกสารหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หากพบว่ามีข้อมูลที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้โดยตรง สามารถใช้ข้อมูลที่เป็นความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญ การคำนวณทางวิศวกรรม การประมาณจากกระบวนการหรือวัตถุดิบคล้ายกัน เป็นต้น

● การคำนวณข้อมูล (Calculation)

ขั้นนี้เป็นการสร้างผลลัพธ์เพื่อกำหนดบัญชีรายการของแต่ละกระบวนการ และกำหนดหน่วยการทำงานของระบบผลิตภัณฑ์ ในขั้นตอนนี้มีสิ่งที่จะต้องพิจารณาดังนี้

- การตรวจสอบความถูกต้อง การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลในระหว่างการเก็บข้อมูล เช่น ความสัมพันธ์กันของข้อมูลโดยการทำงานสมดุลมวลสาร พลังงาน หรือการวิเคราะห์เปรียบเทียบปัจจัยการปล่อยมลพิษ (Emission factor) เป็นต้น

- การเชื่อมโยงข้อมูลกับกระบวนการย่อย คือ การกำหนดปริมาณอ้างอิง (Reference flow) ของผลิตภัณฑ์ ในแต่ละกระบวนการย่อย เนื่องจากต้องคำนวณปริมาณสารขาเข้าและขาออกของระบบ ภายใต้ความสัมพันธ์กับหน่วยอ้างอิงเดียวกันกับผลิตภัณฑ์ รายละเอียดของข้อมูลควรประกอบด้วย หน่วยอ้างอิง แหล่งที่มาข้อมูล เงื่อนไขข้อมูล เทคโนโลยีหรือระดับของเทคโนโลยีที่ใช้ ข้อมูลเพิ่มเติมในกรณีที่มีการปันส่วน เป็นต้น
- การเชื่อมโยงข้อมูลกับหน่วยการทำงาน คือ การเทียบ (Normalize) ตามหน่วยการทำงาน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบระหว่างรายการที่แตกต่างกันหรือระหว่างผลิตภัณฑ์ที่มีความแตกต่างกันได้ ต้องมีการรวบรวมข้อมูลเฉพาะที่มีความเกี่ยวข้อง ที่สามารถจัดให้อยู่ในกลุ่มผลกระทบสิ่งแวดล้อมเดียวกันได้
- การปรับขอบเขตของระบบให้เหมาะสม มีเพื่อช่วยการตัดสินใจหากต้องการเพิ่มเติมข้อมูลอื่น ๆ และช่วยในการจำกัดข้อมูลขาเข้าและขาออกของสาร

- การปันส่วน (Allocation)

การปันส่วน คือ การแบ่งปริมาณวัตถุดิบ พลังงาน และการปล่อยมลพิษเข้าไปผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดบนหลักการของสมดุลมวลสาร ต้องประมาณให้ใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริงตามความสัมพันธ์และลักษณะของสารขาเข้า-ขาออก การปันส่วนจะทำเมื่อกระบวนการที่ศึกษาเกิดผลิตภัณฑ์ 2 ชนิดขึ้นไป โดยมีผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวที่ถูกนำไปใช้ต่อในกระบวนการอื่นของระบบ ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เหลือจะถูกนำไปเป็นวัตถุดิบในกระบวนการอื่น หรือถูกกำจัดไป หลักการปันส่วนสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ร่วม (Co-product) พลังงานที่ใช้ในระบบ การบริการ และการแปรใช้ใหม่

3) การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์

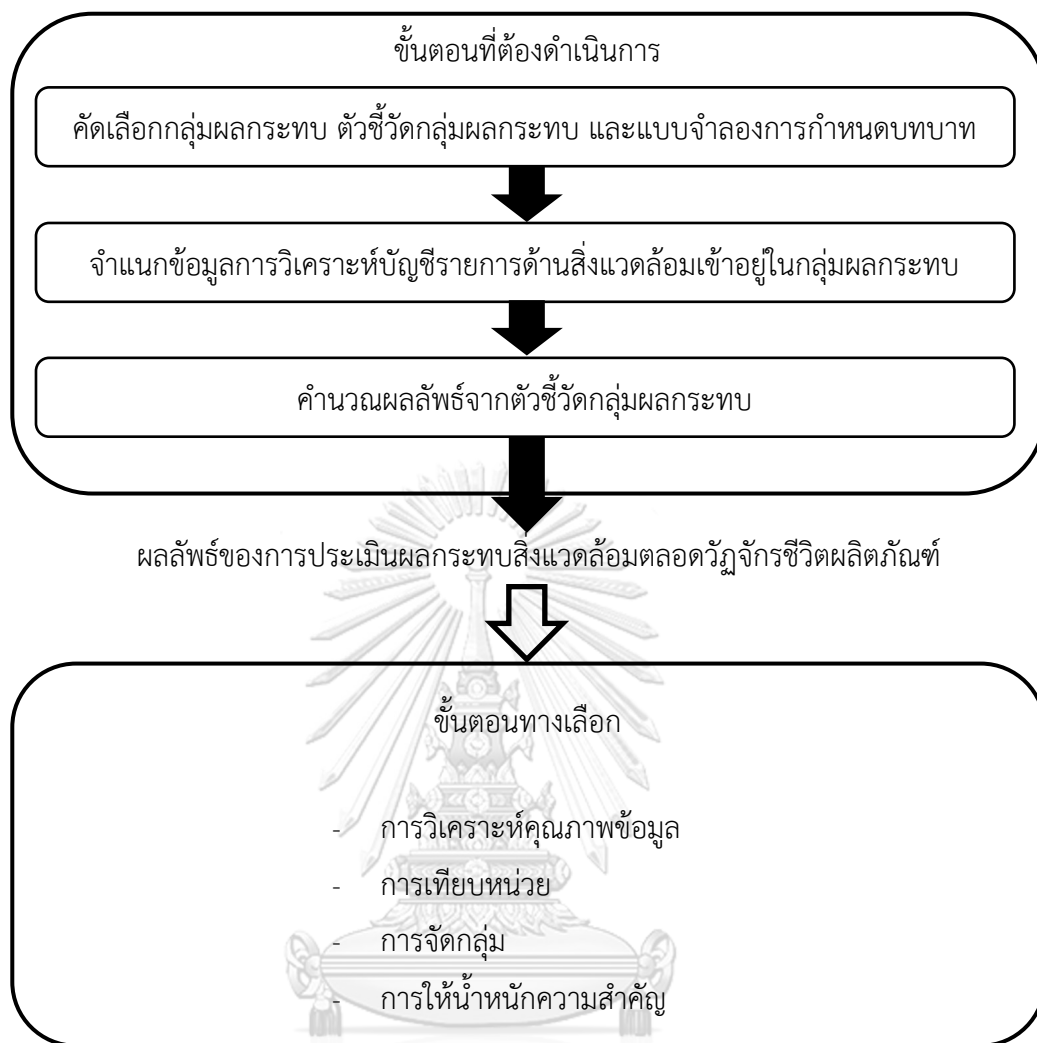
ขั้นตอนการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินนี้ผลกระทบโดยอาศัยข้อมูลในขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อม โดยการจำแนก การจัดกลุ่มผลกระทบ และการคัดเลือกตัวชี้วัดของกลุ่ม ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณสามารถบ่งชี้ได้ว่ากลุ่มผลกระทบใดมีความสำคัญหรือก่อให้เกิดผลกระทบรุนแรงที่สุด และเกิดจากกระบวนการใดของระบบผลิตภัณฑ์ โดยหลักการการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ตามที่กำหนดในมาตรฐาน 14042 แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ ได้แก่ การคัดเลือกกลุ่มผลกระทบ (Impact categories) ตัวชี้วัดกลุ่มผลกระทบ (Category indicators) และแบบจำลองการกำหนดบทบาท (Characterization

models) การจำแนกข้อมูลการวิเคราะห์ปัญหาชี้รายการด้านสิ่งแวดล้อมเข้าอยู่ในกลุ่มผลกระทบ (Classification) และ การกำหนดบทบาท (Characterization) และ ขั้นตอนที่เป็นทางเลือกให้ศึกษาเพิ่มเติม ได้แก่ การเทียบหน่วย (Normalization) การจัดกลุ่ม (Grouping) การให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting) และ การวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูล (Data quality analysis) ดังรูปที่ 2-9

- การคัดเลือกกลุ่มผลกระทบ (Impact categories)
 - กลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญและนิยมนำมาใช้ ได้แก่
 - การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change)
 - การทำให้โลกร้อน (Global warming)
 - การก่อให้เกิดความเป็นกรดในดินและแหล่งน้ำ (Acidification)
 - การทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ (Ozone depletion)
 - การเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหารในแหล่งน้ำ (Eutrophication)
 - การสิ้นเปลืองทรัพยากร (Resource depletion)
 - การสิ้นเปลืองพลังงาน (Energy depletion)
 - การออกซิเดชันที่เกิดจากปฏิกิริยาแสง-เคมี (Photochemical oxidation)
 - การก่อให้เกิดสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ (Human toxicity)
 - การก่อให้เกิดความเป็นพิษในมหาสมุทร (Aquatic ecotoxicity)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต สามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือ ผลกระทบขั้นกลาง (Midpoint category) และผลกระทบปลายทาง (Endpoint category) โดยข้อมูลที่เลือกใช้ผลกระทบขั้นกลางจะแปลผลได้ยาก เนื่องจากผลกระทบขั้นกลาง 1 ชนิด สามารถส่งให้เกิดผลกระทบปลายทางได้หลายชนิด ดังนั้นจึงควรคำนวณไปจนถึงปลายทาง เพื่อทำให้เกิดความเชื่อมโยงระหว่างระบบผลิตภัณฑ์กับผลกระทบอย่างชัดเจน



รูปที่ 2- 9 ขั้นตอนการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์
(ดัดแปลงจาก ISO 14040:2006)

- การคัดเลือกตัวชี้วัดกลุ่มผลกระทบ (Category indicators)
การพิจารณาผลกระทบและตัวชี้วัดผลกระทบปลายทางให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษาและประเภทของผลกระทบที่ได้เลือกไว้
- การคัดเลือกแบบจำลองการกำหนดบทบาท (Characterization models)
การใช้แบบจำลองสำเร็จรูปในการแปลงค่าสารแต่ละตัวในกลุ่มผลกระทบเดียวกันให้อยู่ในรูปตัวเลขที่บ่งบอกถึงค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสารแต่ละตัวก่อให้เกิดผลกระทบ

ต่อสิ่งแวดล้อมในระดับที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบ (Potential environmental impact) ของแต่ละสารแตกต่างกันไปในแต่ละแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่นิยมอย่างแพร่หลาย คือ IPCC model พัฒนาโดยคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)

- การจำแนกข้อมูลเข้าอยู่ในกลุ่มผลกระทบ (Classification)

กลไกของการเกิดผลกระทบแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ผลกระทบแบบคู่ขนาน และผลกระทบแบบอนุกรมหรือแบบต่อเนื่อง โดยพิจารณาจากศักยภาพที่สารเหล่านั้นจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) มีผลกระทบต่อทั้งสุขภาพของมนุษย์ และก่อให้เกิดภาวะความเป็นกรด จัดเป็นผลกระทบแบบคู่ขนาน ส่วนก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ส่งผลกระทบด้านการเกิดโอโซนระดับพื้นดิน (Ground-level ozone formation) ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ เมื่อระเหยขึ้นไปชั้นบรรยากาศ จะก่อให้เกิดผลกระทบด้านการเกิดโอโซนระดับชั้นบรรยากาศ และภาวะความเป็นกรด ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นไม่พร้อมกัน จึงต้องใช้การปันส่วนเข้ามาช่วยคำนวณหาผลกระทบที่เกิดขึ้น

- การกำหนดบทบาท (Characterization)

ในการประเมินผลกระทบในเชิงปริมาณที่มาจากสารต่าง ๆ จะต้องทำการแปลงค่าสารแต่ละตัวในกลุ่มผลกระทบเดียวกันให้อยู่ในรูปตัวบ่งชี้ (Indicator) โดยใช้ค่าแฟคเตอร์ (Characterization factor) มาคูณกับปริมาณสารในแต่ละกลุ่ม เพื่อให้ได้เป็นค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบ (Potential environmental impact) หากต้องการเปรียบเทียบระหว่างผลกระทบด้านต่าง ๆ จะมีการแสดงผลในรูปร้อยละเปรียบเทียบระหว่างผลิตภัณฑ์ที่มีผลกระทบมากกับผลิตภัณฑ์ที่มีผลกระทบน้อยกว่า (ปัทมาพร ตรีเนตร, 2559)

- การเทียบหน่วย (Normalization)

การเปรียบเทียบทำได้โดยการเทียบกับปริมาณทั้งหมดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่กำหนดว่ามีผลกระทบระดับใด เมื่อเทียบกับผลกระทบระดับภูมิภาค ระดับประเทศ ระดับทวีป หรืออ้างอิงกับผลิตภัณฑ์อื่น

- การจัดกลุ่ม (Grouping)

จัดกลุ่มของผลกระทบที่ได้จากการเทียบหน่วย ซึ่งมักแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ได้แก่ ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ผลกระทบต่อระบบนิเวศ ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และ ผลกระทบต่อการใช้ทรัพยากร

- การให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting)

เนื่องจากผลกระทบที่ได้เป็นการเปรียบเทียบกันในเชิงปริมาณ ที่ไม่ได้คำนึงถึงความรุนแรงของแต่ละผลกระทบ โดยน้ำหนักความสำคัญขึ้นอยู่กับ สภาพภูมิประเทศ ประเภทของผลกระทบ ความรุนแรงของผลกระทบ เป็นต้น ดังนั้นการน้ำหนักต้องแสดงเหตุผลและเกณฑ์การให้คะแนนอย่างชัดเจน

- การวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูล (Data quality analysis)

การวิเคราะห์ความถูกต้องและความสมบูรณ์ของข้อมูลที่รวบรวมไว้ โดยใช้เทคนิค ดังนี้ การวิเคราะห์ความถ่วงของข้อมูล (Gravity analysis) การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของข้อมูล (Uncertainty analysis) และการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของข้อมูล (Sensitivity analysis)

4) การตีความและการวิเคราะห์เพื่อการปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อม (Life cycle interpretation)

การแปลผลการศึกษา คือ การนำผลการศึกษาทั้งการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อม และการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมมาเชื่อมโยงแล้ววิเคราะห์เพื่อสรุปผล อธิบายข้อจำกัด และการจัดเตรียมข้อเสนอแนะ รวมถึงจัดทำรายงานสรุปผลการศึกษาให้เข้าใจง่าย ครบถ้วน และต้องมีความ สอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตการศึกษาที่ได้กำหนดไว้ ขั้นตอนนี้จึงทำให้ทราบว่า กระบวนการใดส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (ปัทมาพร ตรีเนตร, 2559) โดยมีขั้นตอนดังนี้

- การจำแนกประเด็นที่สำคัญ (Identification of significant issues)

เป็นการจัดกลุ่มข้อมูลและผลที่ได้จากการประเมินวัฏจักรชีวิต เพื่อนำมาคัดเลือกประเด็น สำคัญที่สอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตการศึกษาที่ได้กำหนดไว้

- การประเมินค่าความไม่แน่นอน (Estimating uncertainty)

เป็นการตรวจสอบความสมบูรณ์ของข้อมูลว่ามีความถูกต้อง ตรงประเด็น และมีความ สอดคล้อง คือ สมมติฐาน วิธีการ และข้อมูลมีความสอดคล้องกับเป้าหมายหรือไม่ โดยทั่วไปจะ อธิบายค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- การจัดทำบทสรุป ข้อเสนอแนะและข้อจำกัด (Conclusions, recommendations and limitations)

เป็นขั้นตอนการสรุปผลการประเมินและแสดงข้อเสนอแนะในการลดผลกระทบ สิ่งแวดล้อม แล้วทำรายงานสรุปผลให้สามารถเข้าใจง่าย ตัวอย่างข้อเสนอแนะในการลดผลกระทบ สิ่งแวดล้อม เช่น การเปลี่ยนชนิดวัสดุดิบ การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้วัสดุดิบ การปรับปรุง กระบวนการผลิต การขนส่ง การจัดการผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน เป็นต้น

2.6 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

2.6.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดกรดซัลฟิวริก

สำนักพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ (2561) ทำการศึกษากระบวนการกำจัดแบตเตอรี่ที่ชำรุด และเสื่อมสภาพการใช้งาน จากระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand alone system) ที่เป็นแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด กระบวนการรีไซเคิลแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดมีการ นำกลับตะกั่ว และชิ้นส่วนที่เป็นพลาสติกอย่างชัดเจนและเป็นระบบ ขณะที่กรดซัลฟิวริกนั้นจัดการได้ ดังนี้ การทำให้เป็นกลางด้วยสารที่มีส่วนผสมคล้ายเบกกิ้งโซดา (NaHCO_3) ได้เป็นโซเดียมซัลเฟต ที่ ลักษณะเป็นผงสีขาว ใช้ในอุตสาหกรรมสบู่ ผงซักฟอก แก้ว และสิ่งทอ ส่วนน้ำจะถูกทำความสะอาด และทดสอบตามมาตรฐานน้ำสะอาดก่อนปล่อยเข้าระบบระบายน้ำ

Adams และ Papangelakis (2000) ทำการศึกษาการเกิดยิปซัมในถังปรับเสถียรแบบไหล ต่อเนื่อง (continuous neutralization reactor) ถึงปฏิกริยามีขนาด 425 มิลลิลิตร อัตราการไหล เข้าถังของสารตั้งต้นปฏิกริยาอยู่ที่ $7 \text{ mL/min} \pm 0.1 \text{ mL/min}$ และระยะเวลาการทำปฏิกริยาอยู่ที่ 30 นาที ± 0.5 นาที พบว่าความเร็วกวนผสมที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเกิดยิปซมน้อยลง เนื่องจากการ มีแรงเฉือนที่มากขึ้น ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไป (จาก 2 เป็น 6) ไม่มีผลต่อการเกิดยิปซัม เนื่องจากค่า การละลายของยิปซัมคงที่ในช่วงพีเอช 2.2-7 อุณหภูมิในช่วง $50\text{-}70^\circ\text{C}$ ทำให้มีอัตราการเกิดผลึก

เพิ่มขึ้น และลดลงในช่วง 70-90°C ระยะเวลาที่เก็บในถังปฏิกิริยาที่สั้น (15 นาที) มีอัตราการเกิดยิปซัมที่มากกว่าการใช้ระยะเวลานาน (50 นาที)

Çetin Eroglu และ Özkar (2001) ทำการศึกษาจลศาสตร์ของการเกิดและเพิ่มขนาดของยิปซัมระหว่างกระบวนการผลิตกรดบอริก โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 60 – 90°C ความเร็วรวมผสมที่ 150 – 400 รอบต่อนาที และ อัตราส่วนโมลาร์ของ $\text{CaO}/\text{H}_2\text{SO}_4$ อยู่ที่ 0.21-0.85 โดยให้ความเข้มข้นซัลเฟตไอออนเริ่มต้นที่ 0.623 โมลต่อลิตร และความเข้มข้น B_2O_3 0.777 โมลต่อลิตร พบว่าความเข้มข้นอิมตัวลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 60°C (5.2 มิลลิโมลต่อลิตร) เป็น 80°C (3.1 มิลลิโมลต่อลิตร) ความเร็วรวมผสมที่กำหนดไม่มีผลต่อการละลาย และผลึกที่ได้จากการละลาย colemanite ในกรดซัลฟิวริก ช่วง 3 นาทีแรกเป็นรูปเข็ม กว้าง 1 ไมครอนและยาว 10-20 ไมครอน เมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที ผลึกมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็นกว้าง 10 ไมครอนและยาว 80 ไมครอน อุณหภูมิและความเร็วรวมผสมไม่มีผลต่อขนาดผลึกยิปซัม

Geldenhuys, Maree, Beer และ Hlabela (2003) ทำการวิจัยเกี่ยวกับการใช้หินปูน (CaCO_3) และ ปูนขาว (Ca(OH)_2) ร่วมกันกำจัดซัลเฟต (SO_4^{2-}) ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตถ่านหิน โดยเริ่มจากใช้ CaCO_3 ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเป็นกลางและเกิด CO_2 จากนั้นจึงเติม Ca(OH)_2 ให้มีค่าพีเอช 12 เพื่อตกตะกอน Mg(OH)_2 และเกิดผลึกยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ทั้ง 2 ขั้นตอนใช้เวลา 1 และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ พบว่าด้วยวิธีการนี้สามารถลดความเข้มข้น SO_4^{2-} ได้มากที่สุด แต่ประสิทธิภาพการบำบัดด้วย Ca(OH)_2 จะลดลงเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเป็นกลาง และสามารถกำจัด SO_4^{2-} ได้มากที่สุดที่ค่าพีเอช 12 นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายยังลดลงถึงร้อยละ 62 เมื่อเทียบกับการใช้ Ca(OH)_2 เพียงชนิดเดียว

Ling และ Demopoulos (2004) ศึกษาการละลายของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0–3.5 โมล/กิโลกรัม น้ำ ที่อุณหภูมิ 100°C พบว่าจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างกรดซัลฟิวริกและไดไฮเดรตหรือเฮมิไฮเดรตนั้นใช้เวลาเพียง 5 นาทีระบบก็เข้าสู่สมดุล และที่อุณหภูมิ 25°C และ 70°C ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0 – 1.5 โมล/ลิตร พบเพียงไดไฮเดรตชนิดเดียว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 100°C ในสารละลายที่ไม่มีความเป็นกรด พบไดไฮเดรตในลักษณะที่กึ่งเสถียร (metastable) ส่วนในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ไดไฮเดรตจะเปลี่ยนเป็น

เฮมิไฮเดรท หรือแอนไฮเดรท นอกจากนี้การละลายมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิ 125-350°C

Abdel-Aal Rashad และ El-Shall (2004) ศึกษาการเกิดผลึกแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรทที่ อัตราการอิมิตัวยิ่งยวดและความเข้มข้นซัลเฟตอิสระที่ต่างกันในการผลิตกรดฟอสฟอริก โดยใช้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์เจือปนและกรดซัลฟิวริกผสมกับกรดฟอสฟอริกเจือจางที่ 80°C ผลการทดลอง พบว่าความเข้มข้นของซัลเฟตอิสระส่งผลต่อขนาด รูปร่าง และอัตราการกรองของผลึกยิปซัม รูปผลึก ของยิปซัมในสารเคมีบริสุทธิ์เป็นรูปเข็มและเป็นแผ่น ๆ นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของซัลเฟตเพิ่มจะ ส่งผลให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้เมื่อตกตะกอนที่ความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากันอัตราการ อิมิตัวยิ่งยวดที่ระดับต่ำ (1.018 และ 1.222) ให้ผลึกยิปซัมที่หนากว่าระดับกลาง (1.502) ซึ่งได้ผลึก รูปเข็ม

Gominšek และ คณะ (2005) ศึกษาเกี่ยวกับการตกตะกอนแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรท ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จากกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ และ 23% กรดซัลฟิวริกใช้แล้วที่มีไอออนของโลหะผสมอยู่ ได้แก่ Fe^{2+} Mg^{2+} Ti^{4+} และ Al^{3+} มาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยทดลองที่ความเข้มข้น ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ต่างกัน ซึ่งควบคุมให้ค่าพีเอชของ สารละลายไม่เกิน 3 เพื่อป้องกันการตกตะกอนของโลหะ และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งผลึก คือ 40 °C จากผลการศึกษาพบว่า ค่าพีเอชของสารละลาย และอัตราการกวนผสมมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการ เกิดผลึกยิปซัม ในขณะที่อุณหภูมิและความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีผลต่อขนาดเฉลี่ย รูปร่าง และความบริสุทธิ์ของผลึก โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา และลดความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ไอออนของโลหะก็มีผลทำให้เกิด การอิมิตัวยิ่งยวด (supersaturation) การเกิดผลึกใหม่ (recrystallization) และขัดขวางการเกิดรูปผลึก ยิปซัมที่เหมาะสม ยิปซัมที่ถูกผลิตจากกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร ในช่วงอุณหภูมิ 70 °C มีขนาดผลึกที่เหมาะสมที่จะถูกนำไปใช้ต่อในการก่อสร้าง (30 $\mu\text{m} < d_{50} < 80 \mu\text{m}$) และได้ผลึกรูปร่างเข็ม

Dutrizac และ Kuiper (2006) ทำการศึกษาการละลายของแคลเซียมซัลเฟตในสารละลาย จากกระบวนการผลิตนิกเกิล โดยใช้เป็นสารละลายสังเคราะห์ที่มีอุณหภูมิ 20-95°C และมี

องค์ประกอบเป็น NiSO_4 , H_2SO_4 , $\text{Fe}(\text{SO}_4)_{1.5}$, Na_2SO_4 และ LiCl ในความเข้มข้นต่าง ๆ มีการเติม แอนไฮเดรตที่เตรียมโดยการนำยิปซัมไปให้ความร้อนที่ 750°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมงเพื่อใช้เป็นตัวหล่อ ผลึก จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การละลายของแคลเซียมซัลเฟตจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของ กรดเพิ่มขึ้นประมาณ $10\%\text{H}_2\text{SO}_4$ ผลการศึกษาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกต่าง ๆ ($0 - 0.7 \text{ M H}_2\text{SO}_4$) ในสารละลาย $1.3 \text{ M NiSO}_4 - 0.2 \text{ M Fe}(\text{SO}_4)_{1.5} - 0.3 \text{ M LiCl}$ มีผลต่อการละลายของ แคลเซียมซัลเฟต พบว่าความเข้มข้นของ H_2SO_4 ที่เปลี่ยนแปลงไปแทบจะไม่มีผลต่อการละลาย โดยการเพิ่มความเข้มข้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60°C จะทำให้ค่าการลดลง ขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจะ ให้ผลที่กลับกัน แต่โดยรวมแล้วการละลายของแคลเซียมซัลเฟตแปรผันตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

Sayan และ คณะ (2007) ได้กล่าวถึงปัจจัยที่มีผลต่อการอัตราการกรงผลึกว่า อัตราการ กรงนั้นขึ้นกับขนาดผลึก การกระจายของขนาด และรูปร่างผลึก จากนั้นจึงทำการศึกษาถึงผลของ Fe^{2+} , Fe^{3+} และ Cr^{3+} ต่อการเกิดผลึกยิปซัม ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ สารละลายกรดซัลฟิวริก ที่อุณหภูมิ 65°C อัตราการกวนผสม 300 รอบต่อนาที และที่ค่าพีเอช 3.5 งานวิจัยนี้จะศึกษาขนาดของผลึก อัตราการกรง และรูปร่างของผลึกยิปซัม พบว่า Fe^{2+} และ Fe^{3+} ทำให้รูปร่างผลึกและขนาดเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับสารละลายบริสุทธิ์ ซึ่งมีผลต่ออัตราการกรง Cr^{3+} ทำให้ได้ผลึกรูปใบไม้ (leaf-like) นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของ Cr^{3+} ที่สูงขึ้น จะให้ผลึกมี ความแข็งแรงที่ลดลง

Hamdona และ Hadad (2007) ทำการศึกษาการเกิดผลึกของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต หรือ ยิปซัมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีไอออนของโลหะบางชนิด ที่มีสมบัติดังนี้ ค่าการ อิมิตวียิงวด 1.05 – 2.49 ค่าพีเอช 8.50 อุณหภูมิ 25°C และมีค่าความแรงไอออน 0.5 M และมีการ เติมเกลือของผลึกยิปซัมบริสุทธิ์เพื่อล่อการเกิดผลึก โดยเตรียมจาก 0.6 M CaCl_2 และ 0.6 M Na_2SO_4 ได้เกลือผลึกยิปซัมที่มีพื้นที่ผิว 0.35 ตารางเมตรต่อกรัม แล้วเก็บไว้เป็นเวลา 2 เดือนก่อน การใช้งาน และใช้กระดาษกรองขนาด 0.22 ไมครอน ในการกรงยิปซัม พบว่าไอออนของโลหะมีผล อย่างมากต่อการยับยั้งการเกิดผลึก แต่มีผลเพียงเล็กน้อยต่อกลไกการตกผลึก และไอออนโลหะที่ ความเข้มข้นต่ำ (10^{-6} โมลต่อลิตร) สามารถชะลอการเกิดผลึกยิปซัมได้ โดยที่ระดับการชะลอการเกิด ผลึกขึ้นกับความเข้มข้น และ ระดับความอิมิตวียิงวดของไอออนโลหะ แคดเมียม (Cd) มีความสามารถ

ชะลออัตราการเกิดปฏิกิริยาได้มากที่สุด ต่อมาเป็น ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) และโครเมียม (Cr) ตามลำดับ และไม่พบว่าเกิดการยับยั้งการเกิดผลึกยิปซัมอย่างสมบูรณ์

Benatti และ คณะ (2009) ได้ศึกษากำจัดซัลเฟตในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้การตกตะกอนแบเรียม และการตกตะกอนแคลเซียม ทดลองปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนซัลเฟต ที่ช่วงค่าพีเอชของน้ำเสียระหว่าง 2-8 ซึ่งปรับค่าพีเอชโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผลการทดลองพบว่าที่ค่าพีเอช 4 และความเข้มข้นของแคลเซียมและแบเรียม 80 กรัมต่อลิตร การตกตะกอนด้วยแคลเซียมสามารถกำจัดซัลเฟตได้มากถึง ร้อยละ 99 เมื่อนำตะกอนมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C จะได้ของแข็งที่มีประกอบด้วย เฮมิไฮเดรต และแอนไฮเดรต แคลเซียมซัลเฟต (ร้อยละ 99.8) และ โลหะอื่น ๆ สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการตกตะกอนขึ้นกับ ความเข้มข้นของแคลเซียม ซึ่งมีผลให้การกำจัดซัลเฟตเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการเติมแคลเซียมที่มากกว่า ความเข้มข้นของซัลเฟตที่สมดุลเพียงเล็กน้อย

Al-Othman และ Demopoulos (2009) ทำการศึกษาการเกิดผลึกยิปซัมและการผลิตกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (3–3.5 M) และกรดซัลฟิวริก (2.6–8 M) ในช่วงอุณหภูมิ 20–60 °C ล้างผลึกที่ได้ด้วยอะซิโตน ก่อนนำไปอบแห้งที่ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ เติมตัวล่อผลึกซึ่งเตรียมจากกรดซัลฟิวริก 6.65 M กับ แคลเซียมคลอไรด์ 3.5 M พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นกรดทำให้อัตราการตกตะกอนลดลงและทำให้ความหนาแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น โดยที่ 2.66 M เป็นความเข้มข้นที่ให้ผลดีที่สุด การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ขนาดผลึกเพิ่ม อัตราการตกตะกอนเพิ่ม แต่ความหนาแน่นเนื้อลดลงทำให้การละลายของยิปซัมเพิ่มขึ้น การเติมตัวล่อผลึกทำให้ผลึกมีความยาวและความหนาเพิ่มขึ้น จากยาว 50 ไมครอน หนา 5 ไมครอน เป็น 100 ไมครอน หนา 20 ไมครอน ผลจากการมีโลหะคลอไรด์ ได้แก่ FeCl_2 NiCl_2 CuCl_2 AlCl_3 และ PbCl_2 พบว่า แนวนอนที่โลหะจะเจือปนในผลึกยิปซัมน้อย (ความเข้มข้นน้อยกว่า 5 ppm) ยกเว้นเพียงตะกั่วซึ่งมีในผลึกมากถึง 95 ppm

Azimi และ Papangelakis (2010) ทำการศึกษาการละลายของยิปซัมและแอนไฮเดรตในสารละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25-250 °C ซึ่งใช้ความเข้มข้นของแคลเซียมเป็นตัวบ่งชี้ว่าระบบได้เข้าสู่สมดุล พบว่าการละลายในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 40 °C ยิปซัมละลายได้ค่อนข้างน้อย (0.01-0.015

mol/kg) แต่ในช่วง 40-45°C มีค่าการละลายของยิปซัมดีที่สุดและค่อย ๆ ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ในสารละลายผสมส่วนใหญ่การละลายของยิปซัมจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และในช่วงอุณหภูมิที่ไม่เกิน 100°C ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของยิปซัมเป็นแอนไฮเดรท นอกจากนี้ยังพบว่ากรดซัลฟิวริกทำให้การละลายของแคลเซียมซัลเฟตในน้ำเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่า ในช่วงอุณหภูมิ 25-250°C ขณะที่การละลายของยิปซัมและแอนไฮเดรทจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมกรดที่มีความเข้มข้นประมาณ 2 โมลาร์ เมื่อศึกษาถึงปัจจัยของโลหะซัลเฟต (NiSO₄ และ MgSO₄) พบว่าทำให้การละลายของแคลเซียมซัลเฟตลดลง

Silva Lima และ Leão (2012) งานวิจัยชิ้นนี้ทำการบำบัดน้ำที่มาจากเหมือง (AMD) โดยการกำจัดซัลเฟตด้วยการใช้หินปูน (limestone) ในการทดลองได้ใช้ถึงปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องซึ่งสามารถลดความเข้มข้นของซัลเฟตจาก 588 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 87 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้เวลาทำปฏิกิริยา 210 นาที หลักการในการกำจัด คือ การดูดซับซัลเฟตไว้กับหินปูน เนื่องจากหินปูนมีแคลเซียมไอออนที่สามารถไปจับซัลเฟตไอออนได้ พบว่าวิธีนี้เหมาะสมกับการบำบัดน้ำจากเหมืองที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 1200 – 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นช่วงความเข้มข้นที่ไม่สามารถใช้การตกตะกอนด้วยปูนขาวบำบัดซัลเฟตได้

Mackie และ Walsh (2012) การบำบัดน้ำเสียจากเหมืองโดยใช้ฝุ่นจากเตาซีเมนต์ (CKD) เป็นสารปรับสภาพเป็นกลาง โดยฝุ่นที่ใช้มีปูนขาวเป็นองค์ประกอบร้อยละ 40 ขึ้นไป 250 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 1 ลิตร ก่อนนำมาผสมกับน้ำเสียจากเหมืองตะกั่ว/สังกะสี (ค่าพีเอช 2.4±0.1) ปรับให้ค่าพีเอชเป็น 9.5 เนื่องจากเป็นจุดที่สังกะสีละลายน้อยที่สุดและเป็นค่าที่โรงงานที่ทำการศึกษาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากเหมือง แล้วทำการกวนเร็ว 1 นาทีที่ 150 รอบต่อนาที มีการเติมโพลีเมอร์ประจุลบ (anionic polymer) 1 มิลลิกรัมต่อลิตร กวนเร็ว 30 วินาที แล้วจึงกวนช้า 2 นาทีที่ 50 รอบต่อนาที ทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที พบว่าสังกะสีและเหล็กในน้ำเสียนลดลงถึงร้อยละ 98 และ 97 ตามลำดับ

Deng และคณะ (2013) งานวิจัยชิ้นนี้สนใจการนำซัลเฟต และไอออนของโลหะกลับมาใช้ใหม่ จากน้ำเสียดังเคราะห์ที่มีฤทธิ์เป็นกรด และมี Fe³⁺ Al³⁺ Mg²⁺ และ Zn²⁺ เป็นองค์ประกอบ อุณหภูมิอบแห้งผลึก 50°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง และค่าพีเอชสุดท้ายของการทดลอง คือ 10 โดยศึกษาผลจากตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของปูนขาว อัตราการกวนผสม และผลจากการมีไอออนโลหะต่อการเกิดผลึกแคลเซียมซัลเฟต พบว่าที่อุณหภูมิ 25 ถึง 70°C ผลึกที่เกิดเป็น

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ทั้งหมด แคลเซียมซัลเฟตที่ได้จะอยู่ในรูปที่มีคงตัวมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนรูปผลึกจะเปลี่ยนจาก plate-like และ needle-like เป็น rod-like เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ การรวมกลุ่มกันของผลึกมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของปูนขาวเพิ่มซึ่งมีผลต่อขนาดของผลึก นอกจากนี้ไอออนของโลหะแม้เพียงเล็กน้อยก็มีผลต่ออัตราการโตของผลึกอย่างชัดเจน ที่อุณหภูมิ 25°C ความเข้มข้นปูนขาวร้อยละ 5 และอัตราการกวนผสม 400 รอบต่อนาที สามารถสรุปได้ออกมาเป็นตารางที่ 2-17

ตารางที่ 2- 17 ผลของไอออนโลหะต่อรูปผลึกจากงานวิจัยของ Deng และคณะ (2013)

ไอออนโลหะ	0.02 mol/L	0.05 mol/L	0.08 mol/L
Mg^{2+}	flake หรือ needle		rod-like
Fe^{2+}	platelet		$\text{Fe}(\text{OH})_2$ ปกคลุมอยู่ที่ผิวของผลึก
Al^{3+}	Platelet หรือ needle		
	มีการรวมกลุ่มของผลึกมากขึ้น เมื่อมีความเข้มข้นของ Al^{3+} มากขึ้น		
Zn^{2+}	มีการรวมกลุ่มของผลึกเป็นรูปดอกไม้ (flower-like)		

นอกจากนี้ยังได้ทดสอบการชะละลายของโลหะหนักจากผลึกยิปซัมพบว่าค่าความเข้มข้นของโลหะในผลึกยิปซัมมีค่า Fe^{3+} Al^{3+} Mg^{2+} และ Zn^{2+} น้อยกว่า ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ซึ่งปลอดภัยต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ

Tolonen Sarpola Hu Rämö และ Lassi (2014) งานวิจัยนี้มีการบำบัดน้ำทิ้งจากเหมืองโดยใช้ผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการผลิตปูนขาว (Quicklime) เป็นสารปรับสภาพให้เป็นกลาง โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ใช้ผลิตภัณฑ์พลอยได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผสมกับน้ำบริสุทธิ์ (Ultrapurified water) เพื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจาก 2.6 เป็น 9.5 ทำการกวนเร็ววนาน 1 นาทีที่ 150 รอบต่อนาที และกวนช้า 5 นาทีที่ 50 รอบต่อนาที ทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที ผลการทดลองที่ได้คือ สามารถกำจัด Al, As, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn ได้มากกว่า 99% และ กำจัดซัลเฟตได้ประมาณ 60%

Tolonen Rämö และ Lassi (2015) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของแมกนีเซียมต่อการตกตะกอนยิปซัมจากการกำจัดซัลเฟตในน้ำทิ้งของเหมือง โดยนำน้ำตัวอย่าง 800 มิลลิเมตร มาทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิห้อง ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) ในน้ำทิ้งซัลเฟตถูกจับอยู่กับแมกนีเซียมในรูปของสารละลาย แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ที่ค่าพีเอช 9.6 ซึ่งแมกนีเซียมเป็นตัวขัดขวางการ

ตกตะกอนยับยั้งด้วยปูนขาว แต่ถ้าหากว่าปรับค่าพีเอชเป็น 12.5 ด้วยการเติม 93% Ca(OH)_2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 จากนั้นทำการกวนเร็ว (150 รอบต่อนาที) 1 นาที ต่อด้วยกวนช้า (50 รอบต่อนาที) อีก 5 นาที และทิ้งไว้ในตกตะกอน 30 นาที ตะกอนที่เกิดขึ้นถูกนำมากรองผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน พบว่าเกิดการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ช่วยการกำจัดซิลเฟตดีขึ้น และ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ยังทำหน้าที่เป็นตัวล่อการเกิดผลึกทำให้การตกผลึกยับยั้งหรือการตกตะกอนร่วมซิลเฟตได้ดียิ่งขึ้น



ตารางที่ 2- 18 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่อผู้วิจัย	สารละลาย	ต่าง	ความเข้มข้น	อุณหภูมิ	โลหะ/สารปนเปื้อน	อื่น ๆ
Geldenhuis, Maree, Beer และ Hlabela (2003)	น้ำเสียจาก กระบวนการผลิตถ่านหิน	CaCO ₃ และ Ca(OH) ₂ ร่วมกัน	-CaCO ₃ ปรับพีเอชให้เป็นกลาง -Ca(OH) ₂ ให้ค่าพีเอช 12 ได้ Mg(OH) ₂ และ เกิดผลึกยิปซัม	-	-	-ประสิทธิภาพการบำบัดด้วย Ca(OH) ₂ จะลดลงเมื่อค่าพีเอชของสารละลายกลายเป็นกลาง
Ling และ Demopoulos (2004)	CaSO ₄ .0.5H ₂ O ใน H ₂ SO ₄ ความเข้มข้น 0-3.5 mol/kg H ₂ O		- พบไดไฮเดรทชนิดเดียวที่อุณหภูมิ 25°C และ 70°C ใน H ₂ SO ₄ ความเข้มข้น 0-1.5 mol/L - ที่ 100 °C เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ H ₂ SO ₄ ไดไฮเดรทเปลี่ยนเป็นเฮมิไฮเดรท และ แอนไฮเดรท ตามลำดับ			- ระบบเขาสู่สมดุลภายใน 5 นาที - เวลาทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง
Gominšek และ คณະ (2005)	23% ซัลฟิวริก ใช้แล้วจากการผลิตTiO ₂ ที่มี Fe ²⁺ Mg ²⁺ Ti ⁴⁺ และ Al ³⁺	Ca(OH) ₂	ลดความเข้มข้น Ca(OH) ₂ ทำให้ขนาดผลึกใหญ่ขึ้น	- <60°C ผลึกรูปจาน - >70°C ผลึกรูปเข็ม - ขนาดผลึกใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ	ทำให้เกิด การอิมตะยิงยวด การเกิดผลึกใหม่ และขัดขวางการเกิดรูปผลึกยิปซัมที่เหมาะสม	- ถึงแบบต่อเนื่อง - อบแห้งที่ 40°C - อัตราความผสมและค่าพีเอชไม่มีผลต่อการเกิดผลึกยิปซัม

ตารางที่ 2- 18 (ต่อ) ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่อผู้วิจัย	สารละลาย	ต่าง	ความเข้มข้น	อุณหภูมิ	โลหะ/สารปนเปื้อน	อื่น ๆ
Hamdona และ Hadad (2007)	NaCl ที่มีไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ		-NaCl มีค่าการอิ่มตัวที่ยังขาด 1.05 – 2.49	อุณหภูมิ 25°C	-ไอออนของโลหะมีผลอย่างมากต่อการยับยั้งการเกิดผลึก -Cd>Cu>Fe>Cr	-ค่าพีเอช 8.50 -ความแรงไอออน 0.5
Sayan, Titz-Sargut, และ Avci (2007)	สารละลายกรดซัลฟิวริก	Ca(OH) ₂	ขนาดผลึก การกระจายขนาด และรูปร่างผลึก มีผลต่ออัตราการกรอง	อุณหภูมิ 65°C	-Fe ²⁺ และ Fe ³⁺ ทำให้รูปร่างและขนาดผลึกเปลี่ยนแปลง -Cr ³⁺ ผลึกรูปใบไม้ และผลึกแข็งแรงลดลง	-อัตราการกรองผสม 300 รอบต่อนาที -ค่าพีเอช 3.5
Benatti และคณะ (2009)	น้ำเสียซัลเฟตจากการระบวนการเพนตัน	BaCl ₂ CaCl ₂	-Ca ²⁺ 80 g/l ที่พีเอช 4 กำจัดซัลเฟตได้ถึง 99% -ผลึกเอมิไฮเดรต และแอนไฮเดรต 99.8%	อุณหภูมิห้อง	-	-ใช้ NaOH ปรับค่าพีเอช -อบแห้งที่ 105 °C

ตารางที่ 2- 18 (ต่อ) ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่อผู้วิจัย	สารละลาย	ต่าง	ความเข้มข้น	อุณหภูมิ	โลหะ/สารปนเปื้อน	อื่น ๆ
Al-Othman และ Demopoulos (2009)	CaCl ₂ (3–3.5M) กับ H ₂ SO ₄ (2.6–8 M)		-ความเข้มข้น H ₂ SO ₄ มีผลต่อการอิมมัลชันยิ่งยวด -ความเข้มข้นกรดเพิ่มทำให้อัตราตกตะกอนลดลงและเพิ่มความหนาแน่นเนื้อ	- ทดสอบที่ 20-60°C - เพิ่มอุณหภูมิทำให้ขนาดผลึกเพิ่ม อัตราการตกตะกอนเพิ่ม แต่ความหนาแน่นเนื้อลดลง	- เติม FeCl ₂ NiCl ₂ CuCl ₂ AlCl ₃ และ PbCl ₂ อย่างละ 0.1 M - พบเพียง Pb ในผลึก	- เติม H ₂ SO ₄ เร็ว ผลึกคล้ายเจล - เติม H ₂ SO ₄ ช้า ผลึกคอลัมน์ยาว 50µm - อบแห้งที่ 60°C นาน 24 ชั่วโมง
Silva Lima และ Leão (2012)	บำบัดน้ำที่มาจากเหมืองที่มี ความเข้มข้นต่ำกว่า 1200 – 2000 mg/l	CaCO ₃	-ลด SO ₄ ²⁻ เหลือ 87 mg/l จาก 588 mg/l -บำบัด SO ₄ ²⁻ ที่มีค่าในช่วงที่ Ca(OH) ₂ บำบัดไม่ได้	-	-	- ถึงปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง - ใช้เวลาทำปฏิกิริยา 210 นาที

ตารางที่ 2- 18 (ต่อ) ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่อผู้วิจัย	สารละลาย	ต่าง	ความเข้มข้น	อุณหภูมิ	โลหะ/สารปนเปื้อน	อื่น ๆ
Deng และคณะ (2013)	น้ำกรด สังเคราะห์ที่มี และมี Fe^{3+} , Al^{3+} Mg^{2+} และ Zn^{2+}	5% $Ca(OH)_2$	ขนาดผลึกใหญ่ขึ้นเมื่อ เพิ่มความเข้มข้น $Ca(OH)_2$	- 25-70 °C ผลึกเกิด เป็นยิบซั่มทั้งหมด - ขนาดผลึกใหญ่ขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ	- Fe^{3+} ผลึกรูปเข็ม, แท่ง - Al^{3+} ผลึกรูปจาน - Mg^{2+} ผลึกรูปจาน - Zn^{2+} ผลึกรูปดอกไม้	-อบแห้งที่ 50 °C
Tolonen Rämö และ Lassi (2015)	น้ำทิ้งของเหมือง ที่มี $MgSO_4$	$Ca(OH)_2$	93% $Ca(OH)_2$ ที่ ความเข้มข้น 10%	อุณหภูมิห้อง (20 ± 2 °C)	- Mg^{2+} ลดการเกิด ยิบซั่มที่พีเอช 9.6 แต่ ช่วยให้ตกตะกอนดีขึ้น ที่ 12.5	-กวนเร็ว (150 rpm) 1 นาที -กวนช้า (50 rpm) 5 นาที

2.6.2 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material flow analysis) และ การประเมินวัฏจักรชีวิตแบบเตอรีตะกั่ว-กรด (Life Cycle Assessment, LCA)

Hischier Wäger และ Gaughhofer (2005) ทำการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากโครงการ Swiss take-back และ ระบบการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์และซากอุปกรณ์ไฟฟ้า (WEEE) ของประเทศสวิตเซอร์แลนด์ โดยใช้การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ เพื่อหาปริมาณที่จัดเก็บได้ในแต่ละปี และ การประเมินวัฏจักรชีวิตและผลกระทบของการมีระบบนำไปรีไซเคิลและไม่มีระบบนำไปรีไซเคิล (นำไปเผาทำลายทั้งหมด) ขอบเขตของระบบเริ่มตั้งแต่ การเก็บรวบรวมซาก ไปจนถึงการผลิตเป็นวัตถุดิบใหม่ หน่วยงาน คือ ปริมาณ WEEE ที่จัดเก็บได้ในหนึ่งปี (2004) จากงานวิจัยพบว่า มีปริมาณของเสียที่ถูกจัดเก็บ คัดแยก และแยกชิ้นส่วนทั้งหมด 75,000 ตัน มีเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านขนาดใหญ่มากถึงร้อยละ 28 อุปกรณ์ให้ความเย็น อุปกรณ์สารสนเทศ และ เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านขนาดใหญ่ มีปริมาณร้อยละ 18 15 และ 10 ตามลำดับ การผลิตวัตถุดิบจากของเสียก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ส่งผลน้อยกว่าการผลิตวัตถุดิบโดยตรงจากธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มอัตราการรีไซเคิลต่อประชากรจาก 4 กิโลกรัม เป็น 11 กิโลกรัมได้

Kuczenski Geyer Zink และ Henderson (2014) ได้วิเคราะห์เส้นทางการไหลของการใช้น้ำมันเครื่องในรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ในช่วงปี 2007 – 2012 โดยรวบรวมข้อมูลจากเอกสารกำกับการณ์ขนส่งของเสียอันตราย ข้อมูลพื้นฐานจากการสำรวจความต้องการ และการประมาณจากการทำสมดุลมวลสาร เพื่อหาอัตราการนำกลับมาของน้ำมันเครื่องใช้แล้วและปริมาณน้ำมันเครื่องที่ถูกจัดการอย่างไม่เหมาะสม รวมถึงผลลัพธ์ของการนำกลับน้ำมันเครื่องใช้แล้ว จากงานวิจัยพบว่าการนำกลับน้ำมันเครื่องทั้งหมดสภาพการใช้งานเพียงร้อยละ 62 ของ ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ควรเป็น (70-80%) ทำให้ต้องมาปรับปรุงประสิทธิภาพระบบการจัดการน้ำมันใช้แล้ว และการจัดทำนโยบายเพื่อลดการจัดการน้ำมันเครื่องอย่างไม่ถูกต้องตามหลัก รวมถึงส่งเสริมการรวบรวมน้ำมันใช้แล้วจากแหล่งอุตสาหกรรม

Unterreiner Jülch และ Reith (2016) ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของเทคโนโลยีการรีไซเคิลแบตเตอรี่ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว-กรด ลิเทียมไอออน และ วานาเดียม ฐานข้อมูลที่ใช้ คือ Ecoinvent v3 หน่วยงาน คือ การใช้พลังงานไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งคำนวณจากอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ และขอบเขตการศึกษาครอบคลุม Cradle to Cradle การคัดเลือกผลกระทบใช้วิธี ReCiPe2008 เทียบกันระหว่างแนวปฏิบัติที่ดี (best-practice-scenario) และ แนวปฏิบัติที่ทำในปัจจุบัน (current-practice-scenario) ผลการศึกษาพบว่า แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีผลกระทบต่อ

ระบบนิเวศน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับระหว่างแบตเตอรี่ทั้ง 3 ชนิด การรีไซเคิลแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด สามารถลดผลกระทบต่อระบบนิเวศได้ประมาณร้อยละ 50 โดยเมื่อเทียบปริมาณวัสดุตั้งแต่ละชนิด ในแบตเตอรี่กับผลกระทบต่อระบบนิเวศพบว่า พลวง (Antimony) แกลเลียม (Gallium) และ เทฟลอน (Polytetrafluoroethylene) ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ลิเทียมไอออน และ วานาเดียม ตามลำดับ เป็นวัสดุที่มีผลกระทบต่อระบบนิเวศมากที่สุด ซึ่งหากต้องการจะลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมควรหาวัสดุชนิดอื่นมาใช้ทดแทน

Zackrisson Fransson Hildenbrand Lampic และ O'Dwyer (2016) ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-แอร์ ฐานข้อมูลที่ใช้ คือ Ecoinvent หน่วยการทำงาน คือ ระยะทางที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ 1 กิโลเมตร ซึ่งอ้างอิงจากความจุแบตเตอรี่และพลังงานของแบตเตอรี่ที่เสียไป และขอบเขตการศึกษาครอบคลุม Cradle to Grave ตั้งแต่การเตรียมวัสดุดิบจนถึงขั้นตอนการรีไซเคิล ซึ่งศึกษาผลกระทบ 3 ด้าน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การลดลงของทรัพยากร (CML-IA baseline version 3.02) และ ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ (USEtox 1.04) พบว่าในขั้นตอนการผลิตก่อให้เกิดผลกระทบหลักในทั้ง 3 ด้าน และ การสูญเสียพลังงานระหว่างการชาร์จแบตเตอรี่ เป็นสาเหตุหลักของผลกระทบสิ่งแวดล้อม เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้พลังงานในแบตเตอรี่ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้งานระยะยาวแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-แอร์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศน้อยกว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน 4-9 เท่า การรีไซเคิลช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ถึงร้อยละ 10-30

Deng Li Li Gao และ Yuan (2017) ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ซิลเฟออร์สำหรับยานพาหนะไฟฟ้า ขอบเขตการศึกษาเริ่มตั้งแต่การได้มาซึ่งวัสดุดิบ ไปจนถึงสิ้นสุดอายุการใช้งาน (End-of-life) หน่วยการทำงาน คือ การขับระยะทาง 1 กิโลเมตรด้วยแบตเตอรี่ลิเทียม-ซิลเฟออร์ขนาดกลาง การคัดเลือกผลกระทบใช้วิธี ReCiPe ซึ่งศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้ทรัพยากรและพลังงาน รวมถึงของเสียและการปลดปล่อยที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาพบว่าช่วงการใช้ผลิตภัณฑ์ก่อให้เกิดผลกระทบด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และ การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ร้อยละ 70 ขณะที่ขั้นตอนการผลิตก่อให้เกิดผลกระทบเพียงร้อยละ 28

Sun และ คณະ (2017) ได้ศึกษาเส้นทางการไหลของตะกั่วจากแบตเตอรี่ใช้แล้วชนิดตะกั่ว-กรดในสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งแหล่งกำเนิดแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดใช้แล้วกว่าร้อยละ 90 มาจากยานพาหนะ เครื่องสำรองไฟฟ้าและปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (UPS) และ จักรยานไฟฟ้า ผู้เก็บ

รวบรวมแบตเตอรี่มีอยู่ 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ ตัวแทนของโรงงานหลอมตะกั่วและสถานที่เก็บรวบรวมขยะขนาดใหญ่ ในขั้นตอนการเก็บรวบรวมแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด สารอิเล็กทรอนิกส์ที่มีตะกั่วปนอยู่จะถูกเททิ้งโดยตรงลงแม่น้ำหรือพื้นดิน จากนั้นตัวแบตเตอรี่จะถูกส่งไปยังโรงงานหลอมตะกั่วที่มีใบอนุญาตถูกต้องตามกฎหมาย (60-70%) และโรงงานที่ไม่ได้รับอนุญาต (30-40%) ในขั้นตอนการแยกชิ้นส่วนแบตเตอรี่ของโรงงานที่ไม่ได้อินุญาต อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการปนเปื้อนในดินและแหล่งน้ำใต้ดิน รวมอันตรายต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน ปัจจุบันสาธารณรัฐประชาชนจีนมีความพยายามที่จะนำแนวคิดทางนโยบายเกี่ยวกับ ความรับผิดชอบที่เพิ่มขึ้นของผู้ผลิต (Extended producer responsibility; EPR) เข้ามาใช้กับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

Ma และคณะ (2018) ได้ทำการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดชนิด SLI ในประเทศจีน โดยใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิตและวิเคราะห์ต้นทุนตลอดชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Costing Analysis) ตั้งแต่ขั้นเตรียมวัตถุดิบ ขั้นประกอบแบตเตอรี่ การขนส่งจนถึงขั้นตอนการรีเจเนอเรชัน โดยเลือกประเมินผลกระทบหลักทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ ผลกระทบทั่วไป (common impact) ของเสียและความเป็นพิษ (waste and toxicity) และ การใช้ทรัพยากร (resource depletion) พบว่าในขั้นเตรียมวัตถุดิบ (Material Preparation) และขั้นรีเจเนอเรชันเป็นขั้นที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด โดยขั้นเตรียมวัตถุดิบส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนมากที่สุด เนื่องจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ส่วนขั้นรีเจเนอเรชัน มีการปลดปล่อยโลหะหนักมากเนื่องจากการวิธีหลอมตะกั่วที่ไม่เหมาะสม

Wang และคณะ (2018) ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว-กรด ลิเทียมแมงกานีส และ ลิเทียมไอออนฟอสเฟต โดยกำหนดขอบเขตการศึกษาครอบคลุม Cradle to Gate หน่วยการทำงาน คือ การใช้พลังงานไฟฟ้า 1,000 กิโลวัตต์ชั่วโมง การคัดเลือกผลกระทบใช้วิธี ReCiPe midpoint (H) ฐานข้อมูลผลกระทบจากการผลิตวัตถุดิบมาจาก Simapro และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด สสารสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อมากที่สุด คือ ดีบุกและตะกั่วจากการผลิตแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ลิเทียมแมงกานีสและกล่องอลูมิเนียมสำหรับการผลิตแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมแมงกานีส และ ลิเทียมไอออนฟอสเฟตและกล่องอลูมิเนียมสำหรับการผลิตแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต นอกจากนี้กรดซัลฟิวริกในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านการเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหารในแหล่งน้ำ (15.59%)

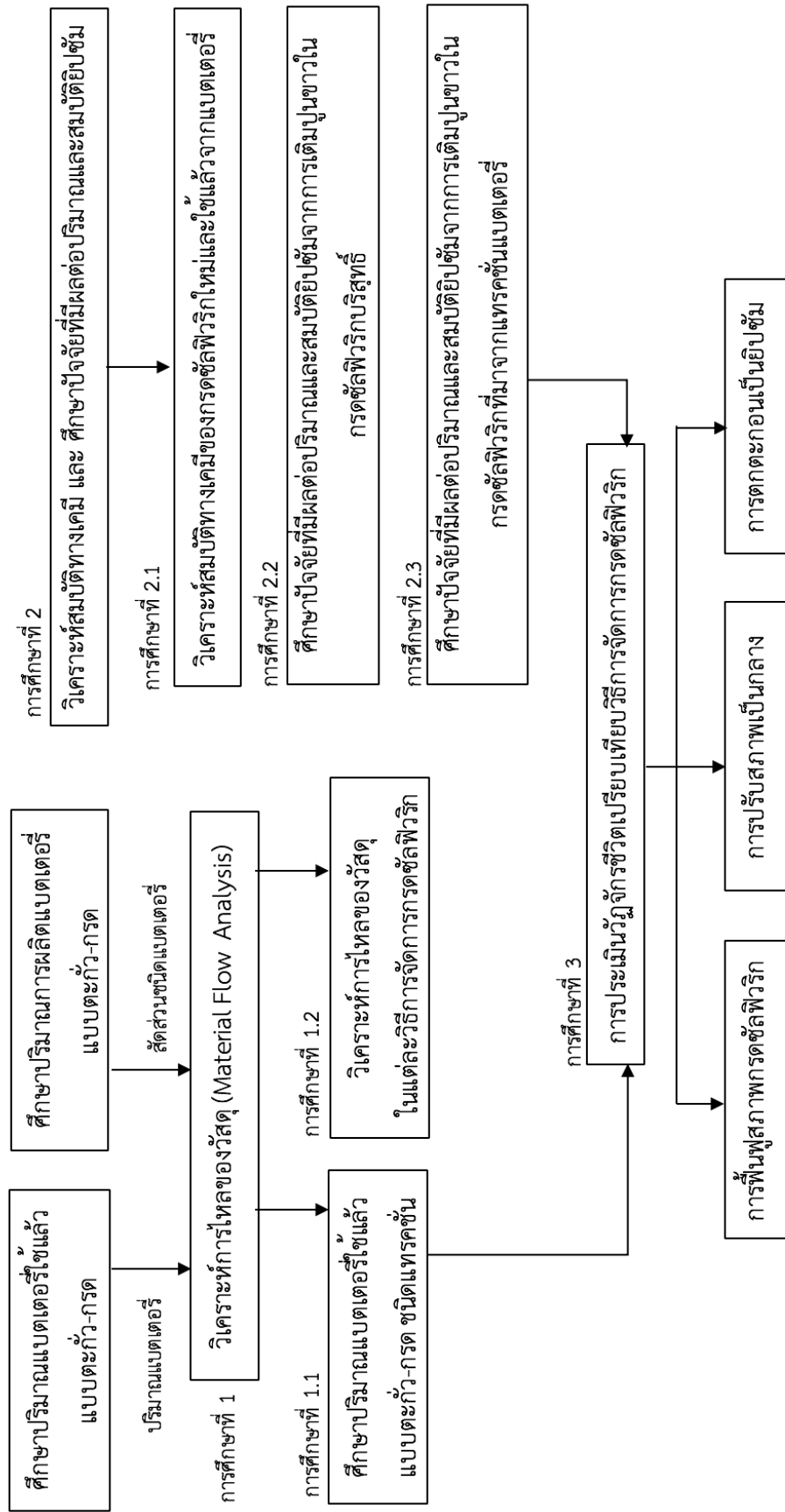
บทที่ 3

แผนการดำเนินงานวิจัย

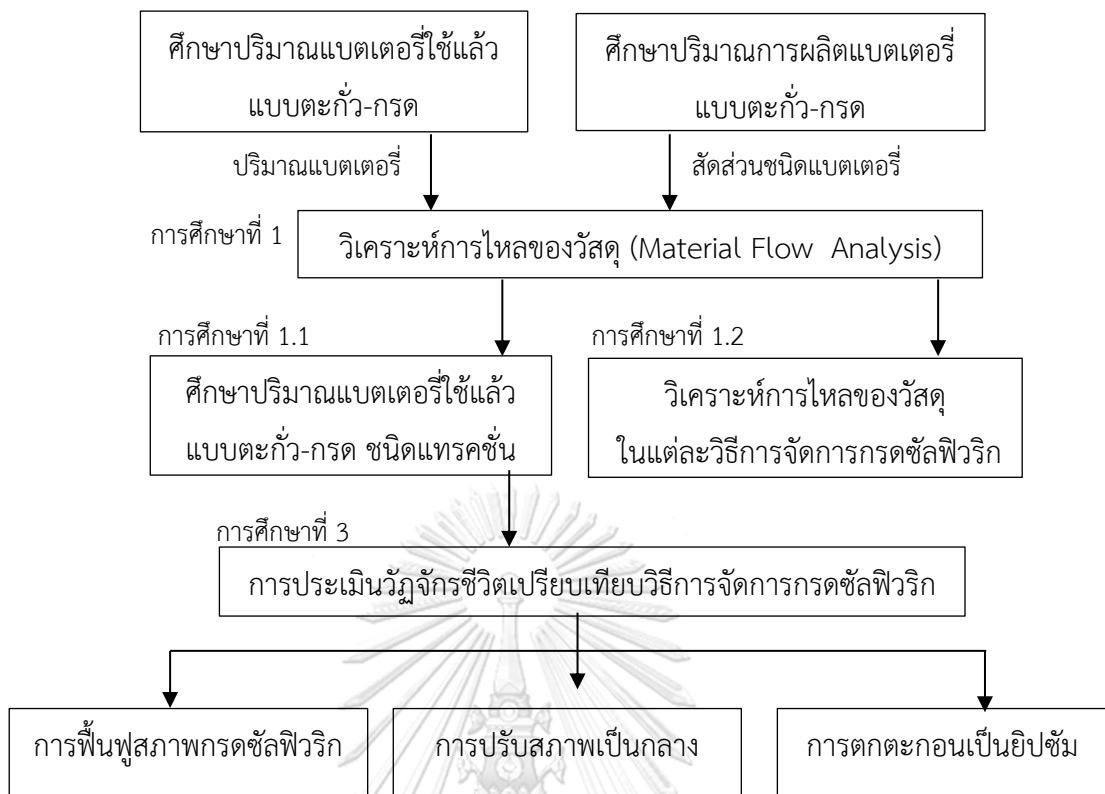
ในงานวิจัยนี้แบ่งแผนการวิจัยออกเป็น 2 แผนงาน โดยมีการดำเนินงานทั้งหมด ดังรูปที่ 3-1 ในแผนการวิจัยที่ 1 เป็นการดำเนินงานวิจัยเพื่อประเมินปริมาณกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ใช้แล้ว ชนิดตะกั่ว-กรด แบบแทรกชั้นแบตเตอรี่ และ เปรียบเทียบการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้วโดยอาศัย เครื่องมือหลัก 2 ชนิด ได้แก่ วิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis, MFA) และ การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) ส่วนแผนการวิจัยที่ 2 เป็นการดำเนินงานวิจัย เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของสมบัติ และ ปริมาณการตกตะกอนยิปซัมในกรดซัลฟิวริกจาก แบตเตอรี่

3.1 แผนการวิจัยที่ 1

ประเมินปริมาณและการจัดการแบตเตอรี่ใช้แล้วชนิดตะกั่ว-กรดในปัจจุบัน โดยวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ แล้วจึงนำมาประมาณ ปริมาณน้ำกรดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการกำจัดแบตเตอรี่ชนิดนี้ จากนั้นทำการเปรียบเทียบแนวทางการจัดการกรดทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การฟื้นฟูสภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ การบำบัดรวมกับน้ำเสีย และการตกตะกอนเป็นผลึกยิปซัม โดย 2 แนวทางแรกใช้การคำนวณตามสมการการเกิดปฏิกิริยา และรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตามลำดับ ส่วนการตกตะกอนเป็นผลึกยิปซัมเก็บข้อมูลจากการทดลอง แล้วนำข้อมูลที่ได้มาประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้วยการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) จากนั้นจึงอภิปรายผลกระทบที่เกิดขึ้นของแต่ละแนวทางโดย เครื่องมือการประเมินวัฏจักรชีวิต ตามแผนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-1 แผนรวมการค้าเงินงานวิจัย

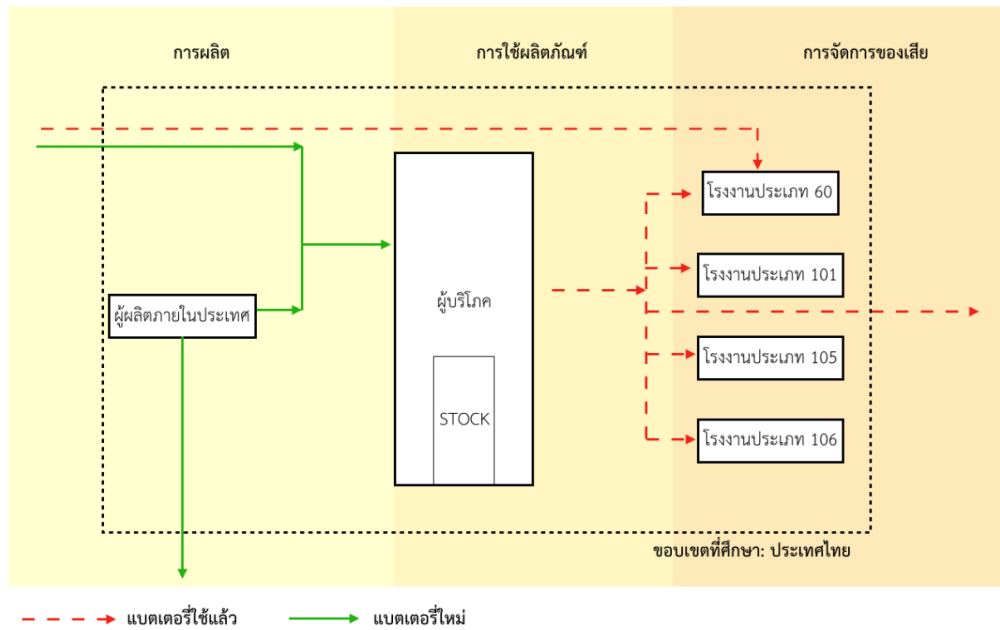


รูปที่ 3- 2 แผนการดำเนินงานวิจัยที่ 1

3.1.1. การดำเนินการวิจัย

การศึกษาที่ 1.1 สร้างผังการไหลเพื่อประเมินปริมาณน้ำกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด รวบรวมข้อมูลที่ต้องการ โดยแบ่งช่วงของผลิตภัณฑ์เป็น 3 ช่วง ได้แก่ การผลิต การใช้ผลิตภัณฑ์ โดยรายละเอียดสารเข้าและขาออกของแต่ละช่วงผลิตภัณฑ์ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 3-1 ซึ่งมีปริมาณสะสมตามรายงานแบบขอขยายระยะเวลาในการกักเก็บสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในบริเวณโรงงาน (สก.1) และ การจัดการของเสีย ที่ถูกส่งไปยังโรงงานประเภทต่าง ๆ ได้แก่ โรงงานประเภท 60 101 105 106 และ อื่น ๆ รวมถึงมีการส่งออกบางส่วน ซึ่งในส่วนการจัดการของเสียจะกำหนดขอบเขตเพียงปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้วจากกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมที่ขึ้นทะเบียนไว้กับกรมโรงงาน ตามที่ได้แจ้งไว้ในรายงานขออนุญาตนำวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกนอกบริเวณโรงงานรายปี (สก.2) จากนั้นจึงรวบรวมข้อมูลปริมาณของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด วิธีการฟื้นฟูกรดซัลฟิวริก และ การบำบัดรวมกับน้ำเสียจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ส่วนข้อมูลการตกตะกอนผลึกยิปซัมมาจากทดลองที่แสดงไว้ในแผนการวิจัยที่ 2 และ แสดงรายการข้อมูลและแหล่งที่มาได้แสดงดังตารางที่ 4-2

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้ององค์ประกอบในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดมี 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ ตะกั่วร้อยละ 61 – 65 พลาสติกร้อยละ 8 - 26 และ กรดซัลฟิวริกร้อยละ 16 – 22 ดังนั้นในการประเมินปริมาณน้ำกรดจากแบตเตอรี่จะใช้ค่าที่มากที่สุดของปริมาณน้ำกรดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการคำนวณ



รูปที่ 3- 3 โครงร่างผังการไหล

ตารางที่ 3- 1 กระบวนการที่เกี่ยวข้อง และ ผลิตภัณฑ์ที่เข้าและออกจากระบบ

กิจกรรม	ผลิตภัณฑ์ที่เข้าและออกจากระบบ
การผลิต	แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศทั้งแบตเตอรี่สำหรับเครื่องยนต์แบบลูกสูบ และ แทรคชั่นแบตเตอรี่ มาจากการนำเข้าจากต่างประเทศและผลิตโดยผู้ผลิตรายใหญ่ของภายในประเทศไทย นอกจากนี้ยังมีการส่งออกไปต่างประเทศด้วย
	จากรายงานสถิติของกรมศุลกากรทำให้ทราบถึงสัดส่วนการนำเข้า-ส่งออกของแบตเตอรี่ทั้ง 2 ชนิดในแต่ละปี จากนั้นนำสัดส่วนที่ได้มาประมาณปริมาณของแบตเตอรี่แต่ละชนิดในเส้นทางการไหลอื่น เช่น ปริมาณของแตรคชั่นแบตเตอรี่ที่ใช้ในประเทศ เนื่องจากรายงานของสถิติ

ตารางที่ 3- 1 (ต่อ) กระบวนการที่เกี่ยวข้อง และ ผลิตภัณฑ์ที่เข้าและออกจากระบบ

การผลิต	<p>อุตสาหกรรมได้รายงานไว้เพียงแบตเตอรี่สำหรับเครื่องยนต์แบบลูกสูบ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศทั้งแบตเตอรี่สำหรับเครื่องยนต์แบบลูกสูบ และ แทรคชั่นแบตเตอรี่ มาจากการนำเข้าจากต่างประเทศและผลิตโดยผู้ผลิตรายใหญ่ของภายในประเทศไทย นอกจากนี้ยังมีการส่งออกไปต่างประเทศด้วย</p> <p>จากรายงานสถิติของกรมศุลกากรทำให้ทราบถึงสัดส่วนการนำเข้า-ส่งออกของแบตเตอรี่ทั้ง 2 ชนิดในแต่ละปี จากนั้นนำสัดส่วนที่ได้มาประมาณปริมาณของแบตเตอรี่แต่ละชนิดในเส้นทางการไหลอื่น เช่น ปริมาณของแตรคชั่นแบตเตอรี่ที่ใช้ในประเทศ เนื่องจากรายงานของสถิติอุตสาหกรรมได้รายงานไว้เพียงแบตเตอรี่สำหรับเครื่องยนต์แบบลูกสูบ</p> <p>ในขั้นตอนนี้มีการแปลงหน่วยจากจำนวนชิ้นของแบตเตอรี่เป็นน้ำหนักของแบตเตอรี่ในหน่วยตัน โดยกำหนดน้ำหนักของแบตเตอรี่สำหรับเครื่องยนต์แบบลูกสูบ และ แทรคชั่นแบตเตอรี่ไว้ที่ 15 และ 30 กิโลกรัมตามลำดับ</p>
การใช้ผลิตภัณฑ์	<p>ผลิตภัณฑ์ที่เข้ากระบวนการเป็นแบตเตอรี่ใหม่ และ ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากกระบวนการเป็นของเสีย และ ส่วนที่สะสมในระบบ โดยปริมาณที่สะสมของแบตเตอรี่ในระบบมาจากการคำนวณหาผลต่างระหว่างปริมาณของแบตเตอรี่ทั้งหมดที่ใช้ภายในประเทศ กับ ปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้วตามรายงาน สก.2</p>
การจัดการของเสีย	<p>แบตเตอรี่ใช้แล้วชนิดตะกั่ว-กรดมีทั้งถูกนำเข้าและส่งออก โดยจากปริมาณแบตเตอรี่ทั้งหมดมีแบตเตอรี่ร้อยละ 84 ถูกนำไปจัดการและรีไซเคิล จากนั้นคำนวณเพื่อหาจำนวนแบตเตอรี่ที่ถูกส่งไปยังโรงงานประเภทต่าง ๆ โดยพิจารณาจากวิธีการจัดการ และ ปริมาณของแบตเตอรี่ถูกส่งไปยังโรงงานแต่ละประเภทจากรายงาน สก.2</p>

ตารางที่ 3-2 ชนิดและแหล่งที่มาของข้อมูล

แหล่งข้อมูล	ประเภทของข้อมูล		กรมโรงงานอุตสาหกรรม	สำนักงานคณะกรรมการกำกับหลักทรัพย์และตลาดหลักทรัพย์	กรมอุตสาหกรรมพาณิชย์	สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการค้า	หน่วยงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม	รายงาน EIA
	ปฐมภูมิ	ทุติยภูมิ						
ปริมาณการของเสียที่ได้รับการกำจัด		/	/					
ข้อมูลวิธีการจัดการ - การฟื้นฟูแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ - การปรับสภาพรวมกับน้ำเสีย - การตกตะกอนสลักยิปซัม		/	/		/			
	/	/	/		/			
		/	/		/			
ปริมาณน้ำเข้า - ส่งออก		/			/			
กำลังการผลิต - ในประเทศไทย - รายโรงงาน		/		/			/	/
		/						/

การศึกษาที่ 1.2 วิเคราะห์การไหลของวัสดุในแต่ละวิธีการจัดการกรดซัลฟิวริก

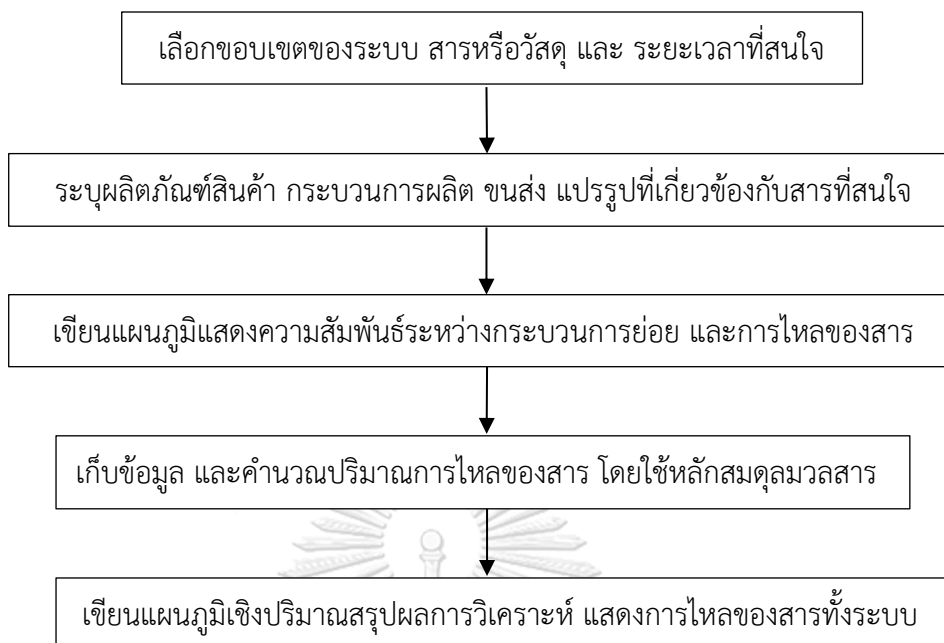
การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดแทรกชั้นแบตเตอรี่จำนวน 1 ตัน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro Version 8.3 คำนวณด้วย CML-IA baseline/World2002 ซึ่งเป็นการประเมินผลกระทบชั้นกลาง (Midpoint Impact Assessment) ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

1. ผลกระทบด้านการทำลายทรัพยากร (Abiotic depletion)
2. ผลกระทบด้านการทำลายเชื้อเพลิงฟอสซิล (Abiotic depletion (fossil fuels))
3. ผลกระทบด้านการเกิดภาวะโลกร้อน (Global warming)
4. ผลกระทบด้านการทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ (Ozone layer depletion)
5. ผลกระทบด้านการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ (Human toxicity)
6. ผลกระทบด้านการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด (Fresh water aquatic ecotoxicity)
7. ผลกระทบด้านการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำเค็ม (Marine aquatic ecotoxicity)
8. ผลกระทบด้านการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อดิน (Terrestrial ecotoxicity)
9. ผลกระทบด้านการออกซิเดชันจากปฏิกิริยาแสง-เคมี (Photochemical oxidation)
10. ผลกระทบด้านการเกิดสภาวะความเป็นกรด (Acidification)
11. ผลกระทบด้านการเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหาร (Eutrophication)

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์การไหลของวัสดุในวิธีการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดของรถยนต์ไฟฟ้า ทั้ง 3 วิธีการ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 3- 4

1. เลือกขอบเขตของระบบ สารหรือวัสดุ และ ระยะเวลาที่สนใจ

ขอบเขตของระบบ คือ การจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว โดยเลือกน้ำกรดที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่ใช้แล้วชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยในช่วงปี 2558 – 2560 และเลือกใช้กรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่หมดอายุการใช้งานหรือประสิทธิภาพการจ่ายไฟไม่ได้ตามมาตรฐาน เพื่อเป็นตัวแทนสมบัติทางเคมีของกรดซัลฟิวริกที่จะถูกจัดการ



รูปที่ 3- 4 แผนการดำเนินงานของการศึกษาที่ 2

2. ระบุผลิตภัณฑ์สินค้า กระบวนการผลิต ขนส่ง แปรรูปที่เกี่ยวข้องกับสารที่สนใจ

ในขั้นตอนนี้มีการจัดทำตารางเพื่อออกแบบการเก็บข้อมูลของสารเคมีหรือวัตถุดิบที่ใช้ในวิธีการจัดการกรดซัลฟิวริก ได้แก่ การฟื้นฟูสภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ การปรับสภาพให้เป็นกลาง และการตกตะกอนเป็นผลึกยิปซัม โดยตัวอย่างการเก็บข้อมูลแสดงดังตารางที่ 3-3

- การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

วิธีการนี้อาศัยการรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยใช้กระบวนการฟื้นฟูกรดซัลฟิวริกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอัลคิเลชัน (Alkylation process) โดยนำกรดซัลฟิวริกที่เกิดขึ้นมาผ่านกระบวนการ Wet gas sulfuric acid หรือ WSA ซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในฟื้นฟูสภาพกรดซัลฟิวริก ข้อดีของกระบวนการนี้ คือ ความร้อนจากกระบวนการนี้ถูกนำไปผลิตเป็นไอน้ำ และ ไม่มีน้ำเสียหรือของเสียเกิดขึ้นในระบบ ซึ่งกระบวนการนี้กระบวนการไปด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

- (1) การสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal hydration)

การนำกรดซัลฟิวริกไปให้ความร้อนในเตาเผาเพื่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และ ไอน้ำ ($\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}_{(g)}$)

- (2) การหล่อเย็น และ ทำให้บริสุทธิ์ (Cooling and purification)

นำก๊าซร้อนที่ได้มาลดความร้อนและดักกรองฝุ่นในก๊าซ

(3) การออกซิเดชัน (Oxidation)

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถูกเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์

(4) การไฮเดรชัน (Hydration)

ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์กลายเป็นไฮดรอกซีสัลฟิวริก ก่อนที่จะควบแน่นเป็นกรดซัลฟิวริก

- การปรับสภาพให้เป็นกลาง

การปรับสภาพกรดซัลฟิวริกให้เป็นกลางด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยรวบรวมข้อมูล
ที่จำเป็นจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง และ ปริมาณสารที่ใช้จากการคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์ ดังสมการ



โดยกรดซัลฟิวริกและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาพอดีกันที่ค่าพีเอช 7 ซึ่งมีวิธีการคำนวณหา
ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ ดังนี้

H_2SO_4 1 โมล (98.07 กรัม) ทำปฏิกิริยาพอดีกับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1 โมล (74.09 กรัม)

ดังนั้น ถ้ามี H_2SO_4 1,000 กิโลกรัม ต้องใช้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เท่ากับ $\frac{74.09 \text{ กรัม}}{98.07 \text{ กรัม}} \times 1000$
= 755 กิโลกรัม $\text{Ca}(\text{OH})_2$

- การผลิตเป็นยิปซัม

นำข้อมูลมาจากการทดลองการเกิดผลึกยิปซัมในกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากกรดยกไฟฟ้า
โดยควบคุมความเร็วกวนผสม และ ดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงเลือกผลการทดลองที่ให้
ยิปซัมที่มีคุณภาพที่สุดมาใช้

ตารางที่ 3- 3 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์การไหลของสาร

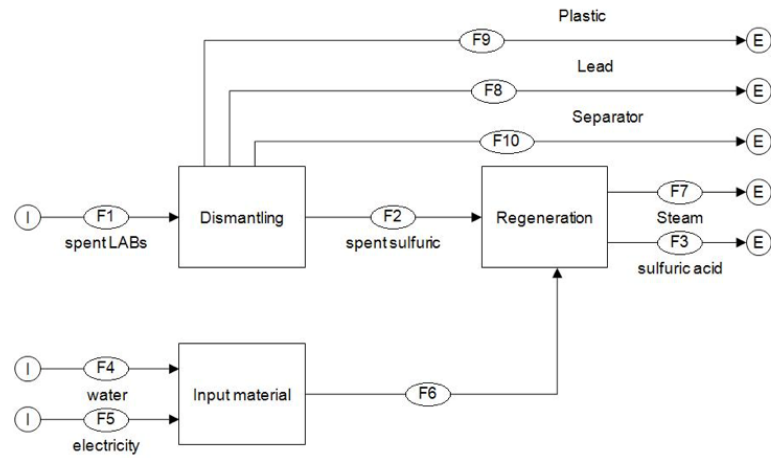
การฟื้นฟูสภาพกรดซัลฟิวริก			
มวลสารขาเข้า	ปริมาณ	หน่วย	หมายเหตุ
วัตถุดิบ			
1.กรดซัลฟิวริก		กิโลกรัม	
พลังงานและสาธารณูปโภค			
1.น้ำ		กิโลกรัม	
2. ไฟฟ้า		กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง	
มวลสารขาออก	ปริมาณ	หน่วย	หมายเหตุ
1.ไอน้ำ			
2.กรดซัลฟิวริก			
การปรับสภาพให้เป็นกลาง			
มวลสารขาเข้า	ปริมาณ	หน่วย	หมายเหตุ
วัตถุดิบ			
1.กรดซัลฟิวริก		กิโลกรัม	
2.ปูนขาว		กิโลกรัม	
พลังงานและสาธารณูปโภค			
1.น้ำ		ลูกบาศก์เมตร	
มวลสารขาออก	ปริมาณ	หน่วย	หมายเหตุ
1.ตะกอนของแข็ง		กิโลกรัม	
CaSO ₄ • 2H ₂ O			
2.น้ำเสีย			

ตารางที่ 3- 3 (ต่อ) ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์การไหลของสาร

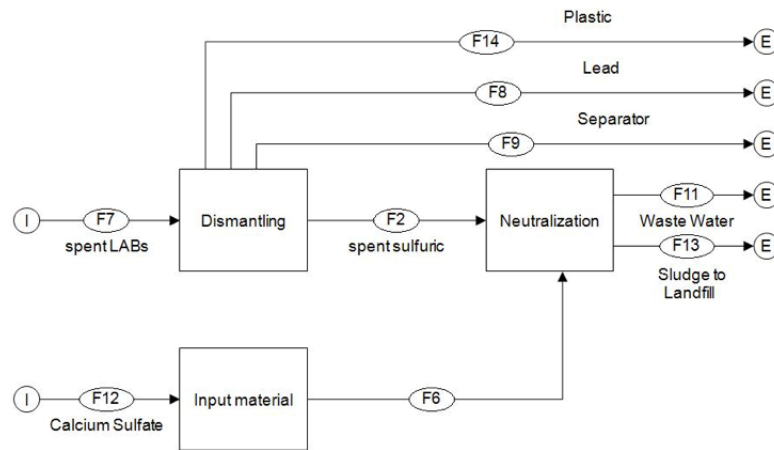
การตกตะกอนยิปซัม			
มวลสารขาเข้า	ปริมาณ	หน่วย	หมายเหตุ
วัตถุดิบ			
1.กรดซัลฟิวริก		กิโลกรัม	
2.ปูนขาว		กิโลกรัม	
พลังงานและสาธารณูปโภค			
1. น้ำ		ลูกบาศก์เมตร	
2. ไฟฟ้า		กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง	
มวลสารขาออก	ปริมาณ	หน่วย	หมายเหตุ
1. ยิปซัม			
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$			
โลหะ			
2. น้ำเสีย		ลูกบาศก์เมตร	

3. เขียนแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการย่อย และการไหลของสาร

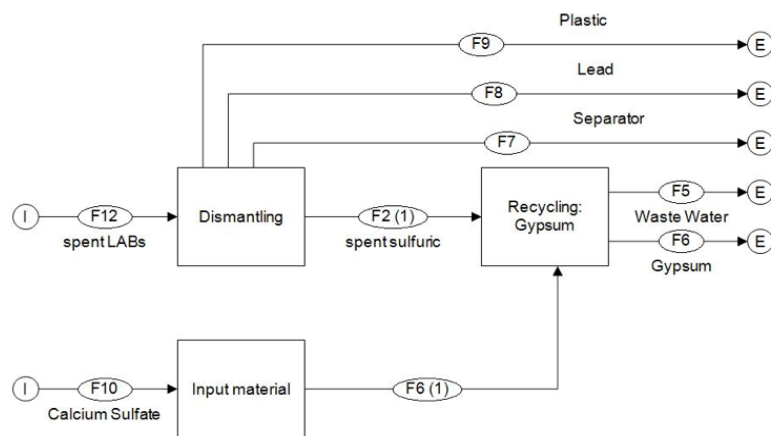
การนำข้อมูลสารขาเข้า สารขาออก และปริมาณสะสมที่รวบรวมได้ของกระบวนการย่อยมาเขียนเป็นแผนภูมิ ดังรูปที่ 3- 5 เป็นการจัดการกรดซัลฟิวริกทั้ง 3 วิธี ระบบได้แก่ 3- 5(ก) การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ 3- 5(ข) การปรับสภาพให้เป็นกลาง และ 3- 5(ค) การตกตะกอนเป็นยิปซัม ขั้นตอนนี้กระแสการไหลของสารที่มีสัดส่วนน้อยกว่าร้อยละ 1 ของการไหลสารทั้งหมดจะไม่ถูกนำมาพิจารณา



ก) การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่



ข) การปรับสภาพให้เป็นกลาง



ค) การตกตะกอนเป็นยิปซั่ม

รูปที่ 3- 5 แผนผังกระบวนการย่อยและสสารในระบบ ก) การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

ข) การปรับสภาพให้เป็นกลาง และ ค) การตกตะกอนเป็นยิปซั่ม

4. เก็บข้อมูลและคำนวณปริมาณการไหลของสาร โดยใช้หลักสมดุลมวลสาร

รวบรวมข้อมูลจากเอกสารและงานที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดกรดซัลฟิวริกด้วยการใช้หินปูน หรือหินปูน การบำบัดน้ำเหมืองเป็นกรด (Acid mine drainage) และการฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ยังอาศัยข้อมูลอ้างอิงจากการจัดการกรดซัลฟิวริกจากแหล่งกำเนิดอื่น ๆ เช่น จากห้องปฏิบัติการ กระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

5. เขียนแผนภูมิเชิงปริมาณสรุปผลการวิเคราะห์ แสดงการไหลของสารทั้งระบบ

นำข้อมูลและแผนผังที่ร่างไว้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม STAN version 2.6.601.0 ซึ่งสามารถแสดงผังการไหลแบบ Sankey diagram ได้ โดยมีการรายงานแผนผังการไหลของการศึกษา ทั้ง 4 หัวข้อ ประกอบด้วย แผนผังแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด แผนผังการฟื้นฟูสภาพกรดซัลฟิวริก แผนผังการบำบัดรวมกับน้ำเสีย และ แผนผังการรีไซเคิลเป็นผลิตภัณฑ์

การศึกษาที่ 1.3 ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นของแต่ละแนวทางการจัดการกรด

ดำเนินการประเมินวัฏจักรชีวิตของแนวทางการจัดการกรด ตามขั้นตอนมาตรฐานการจัดการสิ่งแวดล้อม ISO 14040:2006 และ ISO 14044:2006 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงาน 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา (Goal and scope definition)

งานวิจัยนี้ได้กำหนดผลิตภัณฑ์ หน้าที่ของผลิตภัณฑ์ หน่วยการทำงาน และ ขอบเขตการศึกษาไว้ ดังนี้

- ผลิตภัณฑ์ คือ กรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่หมดอายุการใช้งาน หรือประสิทธิภาพการจ่ายไฟไม่ได้ตามมาตรฐาน
- หน้าที่ของผลิตภัณฑ์ คือ เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่
- หน่วยการทำงาน คือ ปริมาณน้ำกรดจากแท่งขั้วแบตเตอรี่หลังหมดสภาพการใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้าจำนวน 1 เซลล์ ที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 โวลต์ จำนวน 1 ตัน
- ขอบเขตการศึกษา คือ Gate-to-Gate เนื่องจากเป็นการประเมินเพียงการจัดการกรดซัลฟิวริกจากรถยนต์ไฟฟ้าหลังการใช้งาน ซึ่งเป็นแค่บางส่วนของวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์

2. การวิเคราะห์จัดทำบัญชีรายการสารขาเข้าและสารขาออก (Inventory analysis)

จัดเก็บข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกโดยใช้ตารางที่ 3- 3

3. การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Life cycle impact assessment)

การนำข้อมูลของปริมาณสารทุกอันที่เกี่ยวข้องมาประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ด้วยโปรแกรม SimaPro version 8.2 ด้วยการคำนวณผลกระทบแบบ CML-IA baseline/ World2000 และใช้ฐานข้อมูลจาก Ecoinvent version 3.0

4. การแปลผลการศึกษา (Life cycle interpretation)

การนำบัญชีรายการสารในระบบและการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาเชื่อมโยงเพื่อวิเคราะห์ สรุปผล และเพิ่มเติมข้อเสนอแนะ ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษานี้จะต้องสอดคล้องกับเป้าหมายวัตถุประสงค์ และ ขอบเขตที่กำหนดไว้ จากขั้นตอนนี้ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ วิธีการจัดการกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

3.2 แผนการวิจัยที่ 2

ศึกษาการปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของยิปซัม ได้แก่ ความบริสุทธิ์ รูปร่าง ขนาด และค่าความชื้นจากการบำบัดกรดซัลฟิวริกในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดที่หมดอายุการใช้งาน หรือประสิทธิภาพการจ่ายไฟไม่ได้มาตรฐานของรถยนต์ไฟฟ้าด้วยปูนขาว ตามแผนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3-6 โดยจะทำการวิจัยที่ห้องปฏิบัติการศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.1 การเตรียมวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย

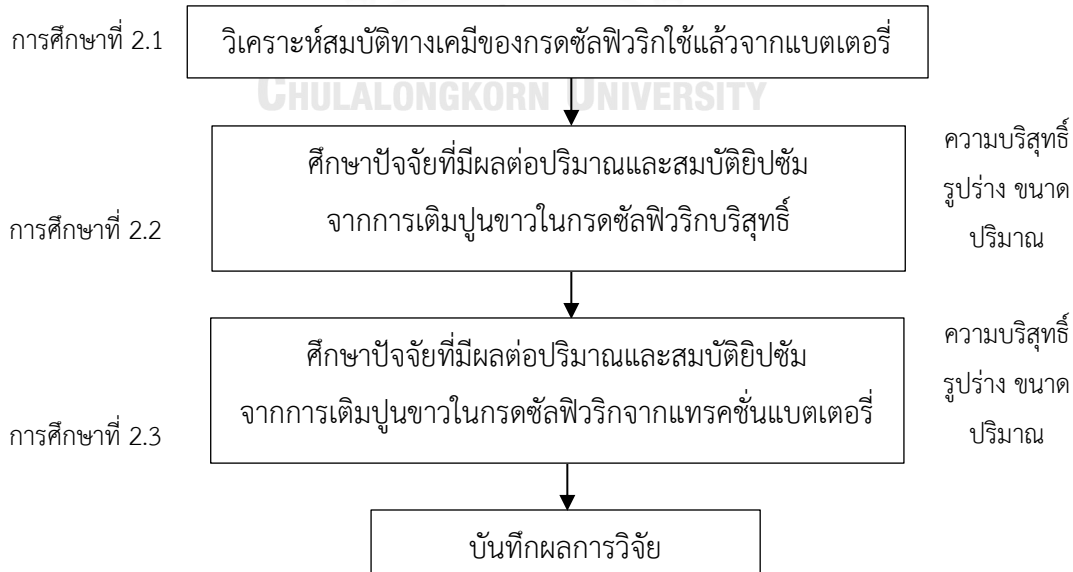
สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ผลิตโดยบริษัท Daejung สารานธรรัฐเกาหลี
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 95 - 97 ผลิตโดยบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
3. กรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดของรถยนต์ไฟฟ้าเข้มข้น 3.27 โมลาร์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น TE214S
2. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP 3100S
3. ตู้อบความร้อน (Oven) ยี่ห้อ WTB Binder รุ่น Model 400(E2)
4. เครื่องวัดพีเอช

5. เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) Model D8 Advance: Bruker AXS, Germany
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)
7. เครื่อง Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (Optima 73000 DV)
8. เครื่อง Ion Chromatography ยี่ห้อ Dionex รุ่น ICS-2500 Automated IC System
9. ปิเปตแบบปริมาตร (Volume pipette)
10. แท่งแก้วขนาด 6 นิ้ว และ 8 นิ้ว
11. ปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร และ 100 มิลลิลิตร
12. ขวดปรับปริมาตร
13. กระดาษกรอง เบอร์ 1 (ขนาด ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง มิลลิเมตร, Whatman)
14. ปุ่มและชุดกรวยแบบสุญญากาศ
15. ขวดฉีดยาตัวอย่าง



รูปที่ 3- 6 แผนการดำเนินงานวิจัยที่ 2

3.2.2 การดำเนินการวิจัย

การศึกษาที่ 2.1 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่

วิเคราะห์องค์ประกอบที่เป็นโลหะด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES) และ วิเคราะห์หาไอออนบวกและไอออนลบในสารตัวอย่างด้วยเครื่อง Ion Chromatography (IC) โดยอ้างอิงไอออนที่เลือกวิเคราะห์บางส่วนจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กรดซัลฟิวริกสำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (มอก. 13-2530) เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเตรียมการทดลองขั้นต่อไป ซึ่งรายการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่แสดงดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 รายการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่

วิเคราะห์องค์ประกอบที่เป็นโลหะ	วิเคราะห์หาไอออนลบ
- ตะกั่ว (Pb)	- ฟลูออไรด์ (F ⁻)
- เหล็ก (Fe)	- คลอไรด์ (Cl ⁻)
- สังกะสี (Zn)	- ไนเตรท (NO ₃ ⁻)
- อลูมิเนียม (Al)	- ซัลเฟต (SO ₄ ²⁻)
- ทองแดง (Cu)	- ฟอสเฟต (PO ₄ ²⁻)
- แมกนีเซียม (Mg)	

การศึกษาที่ 2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณและสมบัติยิปซัมจากการเติมปูนขาวในกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์

ศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ยิปซัมจากกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ ที่มีค่าความเข้มข้น 0.01, 0.1 และ 1 โมลาร์ โดยตัวแปรที่ศึกษาแสดงดัง ตารางที่ 3-5 กำหนดความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 1 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ทำการกวนเร็วที่ 200 รอบต่อนาที ขณะเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ หยุดเติมเมื่อค่าพีเอชอยู่ที่ 6-7 จากนั้นจึงกวนช้าที่ 100 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำของแข็งที่ได้กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 และ อบแห้งที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Tolonen Sarpola Hu Rämö และ Lassi, 2014; Gominšek และ คณະ, 2005) มาวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความบริสุทธิ์ รูปผลึก ขนาดผลึก และปริมาณยิปซัม

ศึกษาหาชนิดของผลึกที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค X-ray diffractometer (XRD) โดยใช้ $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1.5406$ อังสตรอม) โดยปรับกระแส 30 mA ความต่างศักย์ 40 kV ให้กับหลอดกำเนิดรังสี ตั้งค่าอัตราการหมุนของโกนิโอมิเตอร์ที่ 2θ และตั้งพิสัยความมุมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ 5-70 องศา อัตราการเพิ่ม 0.02 องศา ซึ่งข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้จะถูกบันทึกไว้ในหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์โดยสามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม EVA ที่ประกอบด้วยฐานข้อมูล Powder Diffraction File (PDF) และเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล JCPDS's reference PDF โดยสามารถวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ระนาบของการเลี้ยวเบน และ ระยะห่างระหว่างผลึก

ตารางที่ 3-5 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อยิปซัมจากกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์

ลำดับ	พารามิเตอร์
ตัวแปรอิสระ	
1. ความเข้มข้น Ca(OH)_2	1% 5% และ 10%
2. ความเข้มข้น H_2SO_4	0.01, 0.1, และ 1 โมลาร์
ตัวแปรตาม	
1. สมบัติของยิปซัม	ความบริสุทธิ์ รูปผลึก ขนาดผลึก
2. ปริมาณของยิปซัม	
ตัวแปรควบคุม	
1. ความเร็วรอบการกวนผสม	100 และ 200 รอบต่อนาที
2. อุณหภูมิอบแห้ง	50 องศาเซลเซียส

การศึกษาที่ 2.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณและสมบัติยิปซัมจากการเติมปูนขาวในกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ใช้แล้วแบบตะกั่ว-กรดชนิดแทรกชั้นแบตเตอรี่

ศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ยิปซัมจากกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ใช้แล้วแบบตะกั่ว-กรด ชนิดแทรกชั้นแบตเตอรี่โดยเลือกตัวอย่างของที่มีความเข้มข้นของกรดมากที่สุด คือ 3.27 โมลาร์ ตัวแปรที่ศึกษาจะแสดงในตารางที่ 3-6 กำหนดความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากผลการศึกษาที่ 2.2 น้ำหนัก ทำการกวนเร็วที่ 200 รอบต่อนาที ขณะเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ

หยุดเติมเมื่อค่าพีเอชอยู่ที่ 6-7 จากนั้นจึงกวนซ้ำที่ 100 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำของแข็งที่ได้กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 และ อบแห้งที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความบริสุทธิ์ รูปผลึก ขนาดผลึก และปริมาณยิปซัม และ หาชนิดของผลึกที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค X-ray diffractometer

ตารางที่ 3-6 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อยิปซัมจากกรดซัลฟิวริกของแพนครั้นแบตเตอรี่

ลำดับ	พารามิเตอร์
ตัวแปรอิสระ 1. กรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า	ความเข้มข้น 3.27 โมลาร์
ตัวแปรตาม 1. สมบัติของยิปซัม 2. ปริมาณของยิปซัม	ความบริสุทธิ์ รูปผลึก ขนาดผลึก
ตัวแปรควบคุม 1. ความเข้มข้น Ca(OH)_2 2. ความเร็วรอบการกวนผสม 3. อุณหภูมิอบแห้ง	จากการศึกษาที่ 2.2 100 และ 200 รอบต่อนาที 50 องศาเซลเซียส

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ผลการทดลองแผนการวิจัยที่ 1

4.1.1 การประเมินจำนวนแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทย

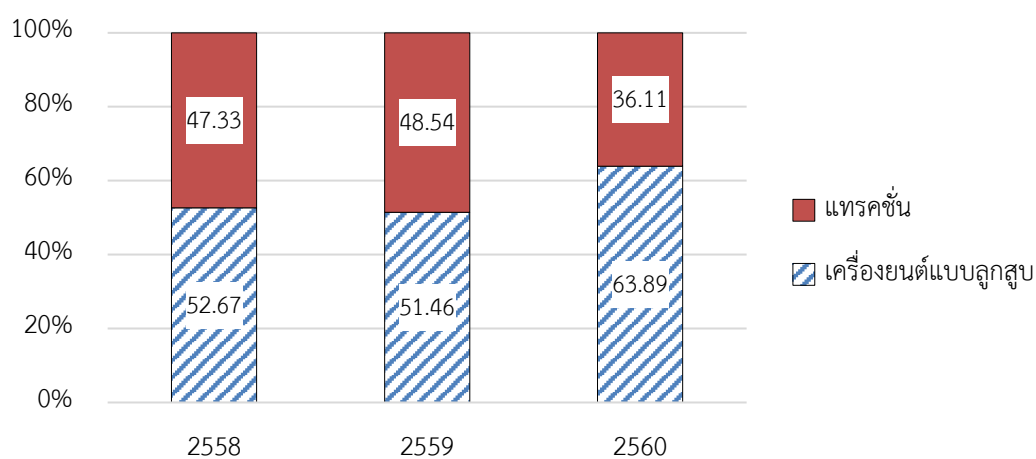
ขั้นตอนการประเมินปริมาณแบตเตอรี่ได้กำหนดขอบเขตของระบบไว้ ดังนี้ ขอบเขตเชิงพื้นที่คือ ประเทศไทย และ ขอบเขตเชิงเวลา คือ ระหว่างปี พ.ศ. 2558 – 2560 โดยแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ประกอบด้วย แบตเตอรี่เครื่องยนต์แบบลูกสูบ และ แบตเตอรี่แบบแทรกชั้น ในขั้นตอนการวิเคราะห์ฟังก์ชันไหลของผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ผลิตภัณฑ์ คือ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด และ กรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่ โดยช่วงของผลิตภัณฑ์ถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้ การผลิต การใช้ผลิตภัณฑ์ และ การจัดการของเสีย โดยค่าที่ใช้ในการตั้งสมมติฐานและแหล่งที่มาแสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4- 1 ค่าที่ใช้ในการประเมินจำนวนแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด และ แหล่งที่มา

ประเภทข้อมูล	ค่าที่ใช้	แหล่งที่มา
น้ำหนักเฉลี่ยของแบตเตอรี่เครื่องยนต์แบบลูกสูบ 1 ลูก	15 กิโลกรัม	https://www.powerstream.com/car-battery-faq.htm
น้ำหนักเฉลี่ยของแบตเตอรี่แบบแทรกชั้น 1 ลูก	30 กิโลกรัม	ค่าเฉลี่ยจากการชั่งน้ำหนักแทรกชั้นแบตเตอรี่ทั้ง 9 ตัวอย่าง
ปริมาณกรดซัลฟิวริกในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด	ร้อยละ 22	Zakiyya, Distya, และ Ellen, 2016
สัดส่วนระหว่างแบตเตอรี่เครื่องยนต์แบบลูกสูบและแบตเตอรี่แบบแทรกชั้น	รูปที่ 4- 1	รายงานการนำเข้าของกรมศุลกากร
การรีไซเคิลแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2560	ร้อยละ 84	รายงานจากศูนย์พัฒนาภูมิภาคแห่งสหประชาชาติ (UNCRD)
ปริมาณนำเข้า-ส่งออกของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดใหม่และใช้แล้ว	ตารางที่4- 2	รายงานการนำเข้าของกรมศุลกากร

ตารางที่ 4- 1 (ต่อ) ค่าที่ใช้ในการประเมินจำนวนแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด และ แหล่งที่มา

ประเภทข้อมูล	ค่าที่ใช้	แหล่งที่มา
ปริมาณที่ผลิตได้ภายในประเทศ	ตารางที่4- 2	สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม
สัดส่วนของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ใช้แล้วที่ถูกส่งไปกำจัดยังโรงงานแต่ละ ประเภท	ตารางที่4- 3	รายงานการขออนุญาตนำวัสดุไม่ใช้แล้ว ออกนอกบริเวณโรงงาน (สก.2) ของปี พ.ศ. 2558



รูปที่ 4- 1 สัดส่วนตามชนิดการนำเข้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

นอกจากค่าที่กำหนดดังตารางข้างต้น สมมติฐานอื่น ๆ ที่ใช้ในการประเมินจำนวนแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ในประเทศไทย มีดังนี้

- ปริมาณแบตเตอรี่ที่นำเข้ามาทั้งหมดถูกส่งไปยังโรงงานประเภท 60 เนื่องจากแบตเตอรี่ใช้แล้วชนิดตะกั่ว-กรดถูกส่งไปยังโรงงานประเภทนี้ มากกว่าร้อยละ 80 ของปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้วทั้งหมดในแต่ละปี

- ปริมาณแบตเตอรี่ที่สะสมในขอบเขตของระบบมาจากผลต่างของปริมาณนำเข้าทั้งหมด กับ ผลรวมของปริมาณที่ถูกกำจัดอย่างถูกวิธีและไม่ถูกวิธี

นำสัดส่วนที่ได้มาคำนวณหาปริมาณของแทครชั้นแบตเตอรี่ที่ถูกส่งออก และ ผลิตขึ้นในประเทศ โดยสัดส่วนของแทครชั้นแบตเตอรี่ในปี พ.ศ. 2558-2560 มีค่าดังนี้ ร้อยละ 47.33 ร้อยละ 48.54 และ ร้อยละ 36.11 ตามลำดับ ได้ผลการคำนวณ ดังตารางที่ 4- 2 ที่แสดงถึงปริมาณการส่งออก และ การผลิตของแบตเตอรี่ทั้ง 2 ชนิด โดยมีปริมาณรวมของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ดังนี้ ในปี

พ.ศ. 2558 มีการส่งออกทั้งหมด 130,942.26 ตัน และ ผลิตได้ 478,813.72 ตัน ในปี พ.ศ. 2559 มีการส่งออกทั้งหมด 146,535.51 ตัน และ ผลิตได้ 542,496.45 ตัน และ ในปี พ.ศ. 2560 ทั้งหมด 182,549.13 ตัน และ ผลิตได้ 396,581.80 ตัน

ตารางที่ 4- 2 ปริมาณนำเข้า ส่งออก และ ผลิตในประเทศของแบตเตอรี่ใหม่ชนิดตะกั่ว-กรด (ตัน)

ปี	ปริมาณนำเข้า (ตัน)		ปริมาณส่งออก (ตัน)		ปริมาณผลิตในประเทศ (ตัน)	
	เครื่องยนต์ แบบลูกสูบ	แทรกชั่น	เครื่องยนต์ แบบลูกสูบ	แทรกชั่น	เครื่องยนต์ แบบลูกสูบ	แทรกชั่น
2558	44,210.2	79,470.4	98,887.3	32,054.9	171,174.4	307,639.4
2559	52,067.6	98,229.8	115,745.3	30,790.2	187,942	354,554.7
2560	84,308.8	95,308	126,664.4	55,884.7	186,155	210,426.4

การคำนวณเพื่อหาปริมาณของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดใช้แล้วที่ถูกส่งไปยังโรงงานแต่ละประเภท ซึ่งอ้างอิงจากฐานข้อมูลปี พ.ศ. 2558 เป็นหลัก โดยแบ่งตามรหัสประเภทโรงงานต่าง ๆ ดังนี้

- ลำดับที่ 60 โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับถลุง ผสม ทำให้ บริสุทธิ์ หลอม หล่อ รีด ดึง หรือ ผลิตโลหะในขั้นต้น ซึ่งมีใช้เหล็กหรือเหล็กกล้า
- ลำดับที่ 64(12) โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โลหะ (การตัด พับ หรือม้วนโลหะ)
- ลำดับที่ 101 โรงงานปรับปรุงคุณภาพของเสียรวม
- ลำดับที่ 105 โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการคัดแยก ฝังกลบสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว
- ลำดับที่ 106 โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับการนำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ใช้แล้วหรือของเสีย จากโรงงานมาผลิตเป็นวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยผ่านกรรมวิธีการผลิตทางอุตสาหกรรม

ผลการวิเคราะห์รายงาน สก.2 ของปี พ.ศ. 2558 ตามรหัสการจัดการของเสีย และ รหัสประเภทโรงงานรับกำจัด พบว่าค่าร้อยละของวิธีการจัดการของเสียที่ส่งไปยังโรงงานประเภทต่าง ๆ มีค่าดังตารางที่ 4- 3 และ นำสัดส่วนที่ได้มาคำนวณเพื่อหาปริมาณของแบตเตอรี่ที่ถูกส่งไปยังโรงงานแต่ละประเภทของปีพ.ศ. 2559 และ พ.ศ. 2560 ได้ค่าดังตารางที่ 4- 4 แสดงน้ำหนักของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดใช้แล้วตามประเภทโรงงานรับกำจัด

ตารางที่ 4- 3 สัดส่วนของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดที่ถูกส่งไปโรงงานแต่ละประเภทใน ปี พ.ศ. 2558

รหัสการจัดการของเสีย	ค่าร้อยละที่ถูกส่งไปยังโรงงานประเภทต่าง ๆ						
	60	64 (12)	101	105	106	ส่งออก	อื่น ๆ
11					100		
21		0.18		44.23	55.6		
39							100
42							100
49	99.72			0.23	0.05		
52	100						
71			100				
72				100			
73			94.56	7.6			
75			100				
81						100	

ตารางที่ 4- 4 ปริมาณของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ตามโรงงานรับกำจัดในปี พ.ศ. 2558-2560 (ตัน)

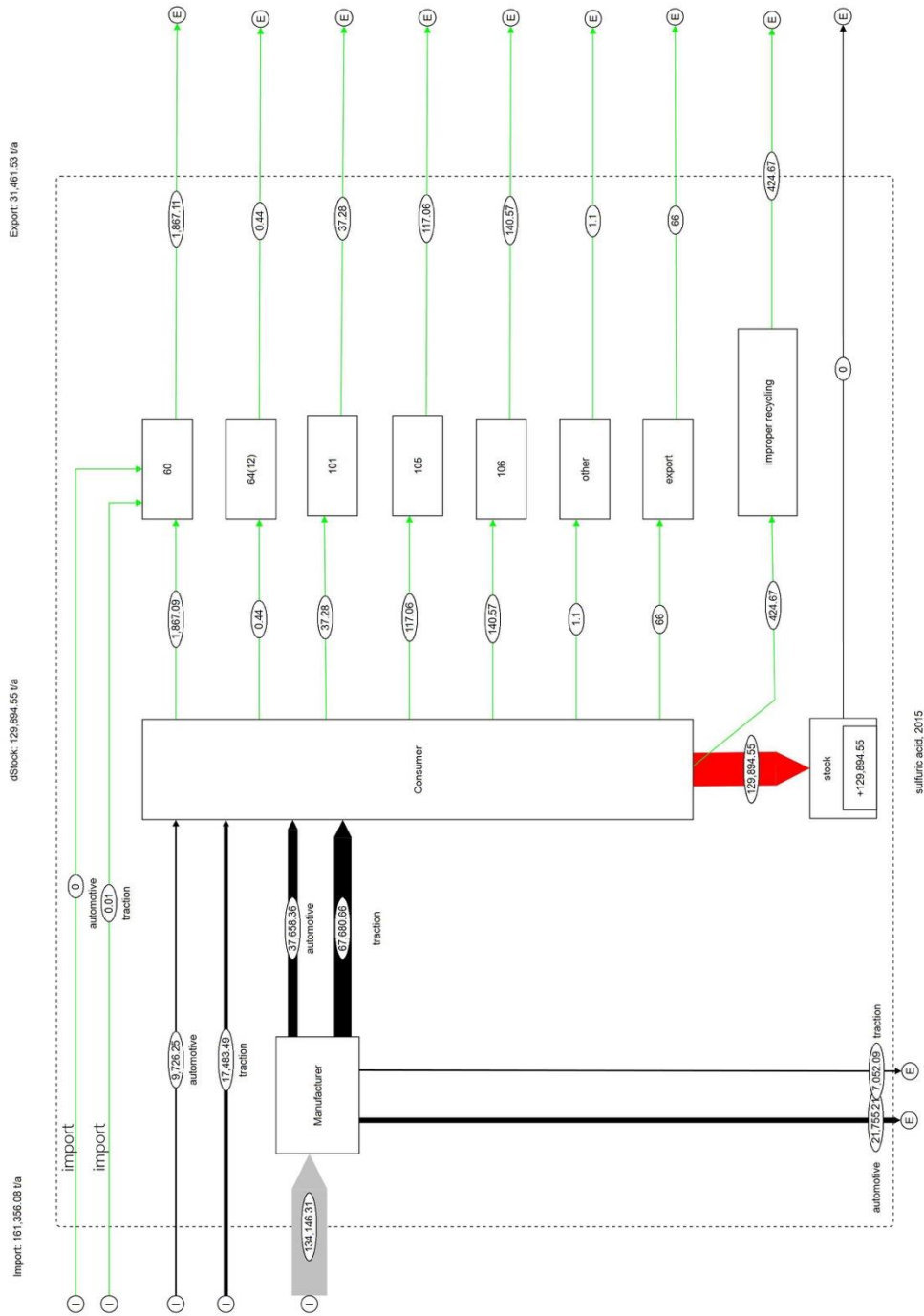
ประเภท โรงงาน	พ.ศ. 2558		พ.ศ. 2559		พ.ศ. 2560	
	เครื่องยนต์	แทรคชั้น	เครื่องยนต์	แทรคชั้น	เครื่องยนต์	แทรคชั้น
	แบบลูกสูบ		แบบลูกสูบ		แบบลูกสูบ	
60	4470	4016.8	5070.9	4783.1	5303.7	2997.6
64(12)	1.1	0.9	1.5	1.4	1.9	1.1
101	89.2	80.2	115.2	108.7	98.7	55.8
105	280.2	251.8	401	378.2	490.7	277.3
106	336.5	302.4	500.7	472.3	648.7	366.6
ส่งออก	158	142	157	148	0	0
อื่น ๆ	2.6	2.4	7.7	7.3	6.7	3.8

จากข้อมูลปริมาณของแบตเตอรี่ที่ใช้แล้วที่ถูกรายงานตามระบบการจัดการของเสียในปี พ.ศ. 2558 2559 และ 2560 อยู่ที่ 10,134.3 12,153.2 และ 10,252.5 ตันต่อปี ตามลำดับ ซึ่งส่วนใหญ่ถูกส่งไปยังโรงงานหลอม (โรงงานลำดับที่ 60) เพื่อผลิตแท่งตะกั่วมากถึงร้อยละ 80 เนื่องจากปัจจุบัน

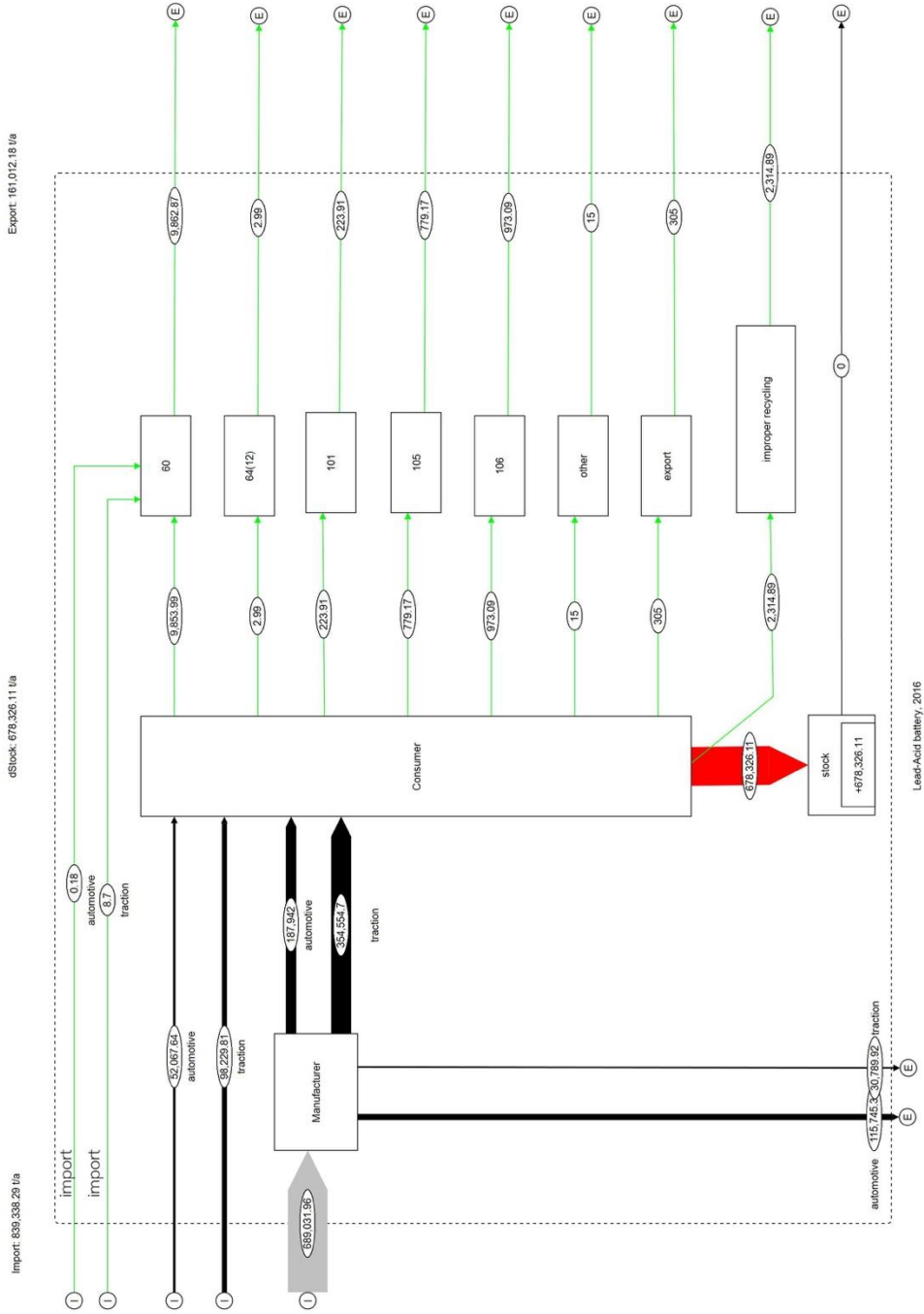
ในประเทศไทยไม่อนุญาตให้การดำเนินกิจการเหมืองแร่ตะกั่ว และเมื่อนำข้อมูลส่วนนี้มาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลจากรายงานของศูนย์พัฒนาภูมิภาคแห่งสหประชาชาติ (UNCRD) ที่ได้กล่าวถึง การรีไซเคิลแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยอยู่ที่ร้อยละ 84 ดังนั้น ทำให้ได้ปริมาณของแบตเตอรี่ใช้แล้วที่ไม่ถูกจัดการเข้าระบบกำจัดของเสียอยู่ที่ 1,930.3 2,314.9 และ 1,952.9 ตันต่อปี

เมื่อแปลงข้อมูลทั้งหมดให้อยู่ในหน่วยน้ำหนัก (ตัน) แล้ว และ นำไปกรอกลงในแผนผังทั้ง 3 ปี ที่ร่างไว้ในโปรแกรม SimaPro โดยแผนผังการไหลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยมีผลิตภัณฑ์ทั้งขาเข้า และ ขาออกระบบเป็นแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดทั้งแบตเตอรี่ใหม่และใช้งานแล้ว ได้แผนผังการไหลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558 2559 และ 2560 โดยกำหนดให้แบตเตอรี่ใช้แล้วที่นำเข้ามาถูกส่งไปยังโรงงานหลอมเท่านั้น ดังรูปที่ 4- 2 4- 3 และ 4- 4 ในภาพรวมการนำเข้าแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดใหม่เฉลี่ยอยู่ที่ 151,198 ตันต่อปี และ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดใช้แล้วทั้ง 2 ชนิดเฉลี่ยที่ 99 ตันต่อปี

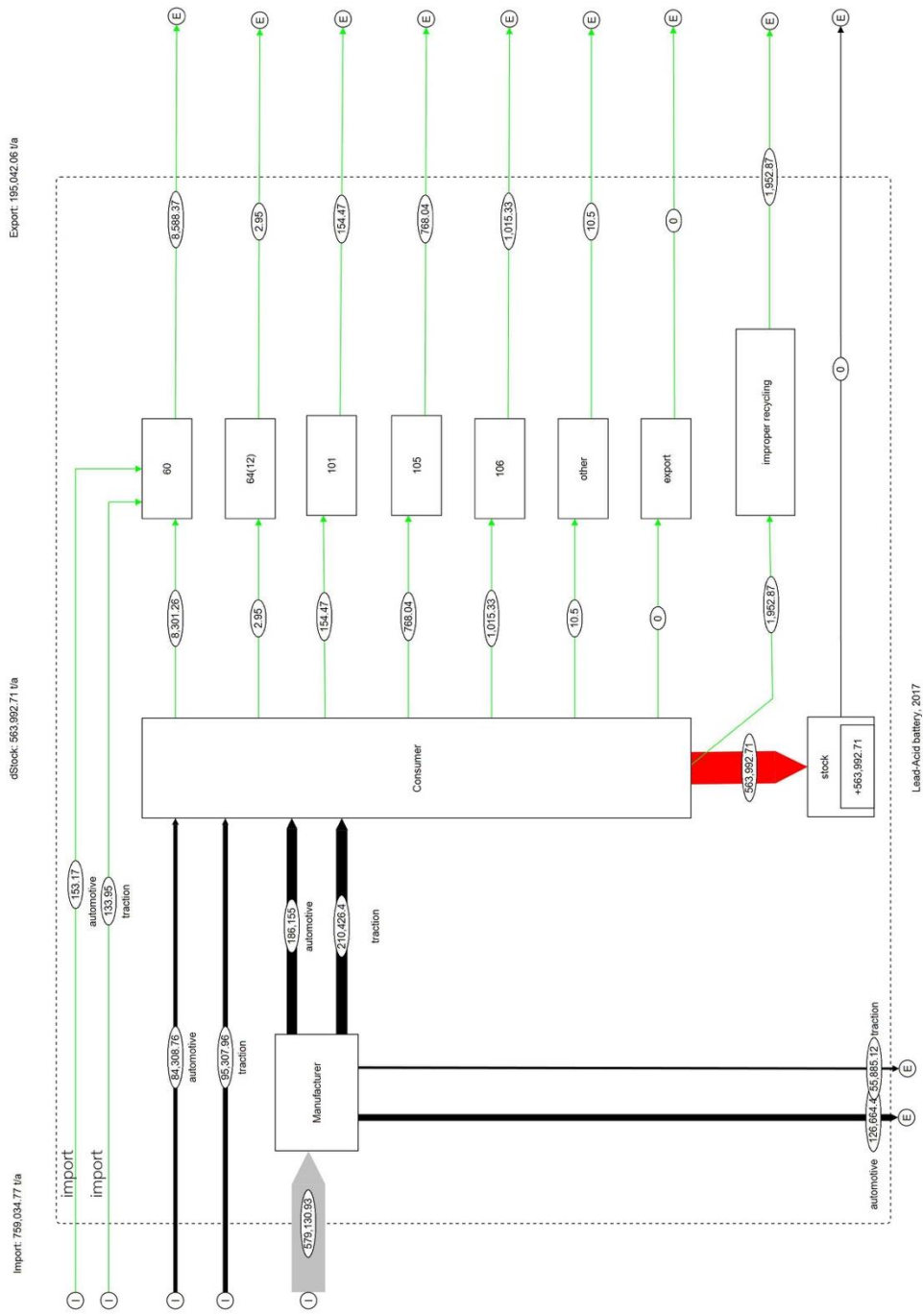
จากการสร้างผังการไหลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558 – 2560 สามารถสรุปปริมาณที่สะสมไว้ในระบบ ปริมาณของแบตเตอรี่ใช้แล้วที่จัดเก็บได้ตามรายงาน สก.2 และ ปริมาณนอกระบบจัดการของเสีย ไว้ดังตารางที่ 4- 5 เห็นได้ชัดว่าปริมาณแบตเตอรี่ที่สะสมอยู่ในระบบมีปริมาณมากคิดเป็นร้อยละ 98 ของปริมาณแบตเตอรี่ที่ถูกส่งต่อมายังผู้บริโภค โดยคาดว่าแบตเตอรี่สะสมมีปริมาณสูงมาก เนื่องจาก 1) ได้รวมถึงแบตเตอรี่ที่อยู่ระหว่างการใช้งาน โดยแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดซึ่งมีอายุการใช้งานเฉลี่ยอยู่ที่ 2-3 ปี 2) แบตเตอรี่ที่เป็นสินค้าคงคลัง (Stock) ตามโรงงานหรือผู้ประกอบการร้านค้า ตัวอย่างเช่น ผู้ประกอบการให้เช่ารถยกไฟฟ้าที่มีการคงคลังสินค้าแทรกชั้นแบตเตอรี่ไว้มากถึง 2,500 เซลล์ 3) จากจำนวนผู้ประกอบการทั่วประเทศที่ส่งรายงาน สก.2 มีเพียง 739 แห่ง ซึ่งประกอบไปด้วยโรงงาน อู่ซ่อมรถที่ได้มาตรฐาน และ ศูนย์บริการขนาดใหญ่เท่านั้น ทำให้ปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้วที่จัดเก็บได้ไม่ครอบคลุมปริมาณจริงที่เกิดขึ้นทั้งหมด นอกจากนี้ยังสามารถพบเห็นร้านค้ารับซื้อแบตเตอรี่เก่าเพื่อนำไปซ่อมและใช้เป็นแบตเตอรี่ที่ไม่ได้มาตรฐานอยู่อีกมาก



รูปที่ 4- 2 ผังการไหลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558 (ต้นปี)



รูปที่ 4-3 ฟังก์ชันไหลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2559 (ต้นปี)

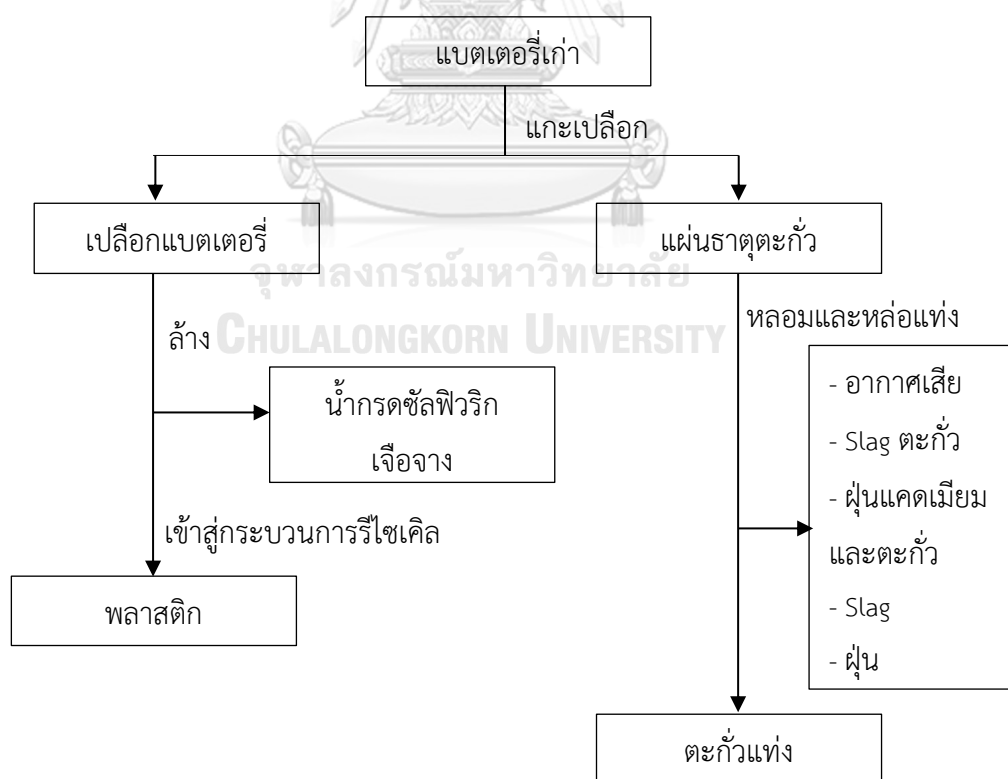


รูปที่ 4-4 ฟังก์ชันการไหลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2560 (ต้นปี)

ตารางที่ 4- 5 ปริมาณแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในปี พ.ศ. 2558-2560

	ปริมาณแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (ตัน)		
	พ.ศ. 2558	พ.ศ. 2559	พ.ศ. 2560
แบตเตอรี่สะสมในระบบ	590,430	678,326	563,993
แบตเตอรี่เครื่องยนต์แบบลูกสูบใช้แล้ว	5,338	6,254	6,550
แบตเตอรี่แทรกซันใช้แล้ว	4,796	5,899	3,702
แบตเตอรี่นอกระบบจัดการของเสีย	1,930	2,315	1,953

เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตของโรงงานลำดับประเภทที่ 60 ในกิจกรรมหล่อตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่า ซึ่งมีขั้นตอนดังภาพที่ 4- 5 จึงได้เลือกโรงงานแห่งหนึ่งมาเป็นตัวแทนเพื่อพิจารณาน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนล้างกล่องแบตเตอรี่ พบว่าขั้นตอนนี้มีการใช้น้ำประมาณ 18 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน น้ำล้างกล่องแบตเตอรี่เป็นกรดซัลฟิวริกเจือจาง (รายงานผลกระทบสิ่งแวดล้อม, 2561) หรือคิดเป็น 6,570 ตันต่อปี (คำนวณบนพื้นฐานการทำงาน 365 วันต่อปี) โดยน้ำกรดเจือจางจะถูกรวบรวมและส่งไปยังระบบบำบัดน้ำเสียรวมของโรงงาน



รูปที่ 4- 5 กระบวนการผลิตของโรงงานลำดับที่ 60

(ดัดแปลงจาก <http://facwaste.diw.go.th/upload/content/doc1462334592.pdf>)

การรวบรวมข้อมูลปริมาณแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดทั้งแบตเตอรี่ใหม่ และ แบตเตอรี่ใช้แล้ว จากหน่วยงานต่าง ๆ ภายในประเทศพบว่าปริมาณของแบตเตอรี่ที่ถูกสะสมไว้ในระบบโดยเฉลี่ยมีมาก ถึง 610,916 ตันต่อปี หรือ คิดเป็นร้อยละ 98 ของปริมาณแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดที่ถูกนำเข้าและถูก ผลิตขึ้นในแต่ละปี หากแบตเตอรี่ที่ถูกสะสมไว้ในระบบทั้งหมดกลายเป็นของเสียที่ต้องได้รับการ จัดการ จำนวนโรงงานผู้รับดำเนินการจัดการแบตเตอรี่ใช้แล้วในปัจจุบันซึ่งมีอยู่เพียง 22 โรงงาน ตาม รายงาน สก.2 อาจไม่เพียงพอต่อการรองรับปริมาณทั้งหมดของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดใช้แล้วจากระบบ

อีกทั้งเมื่อเทียบปริมาณของการจัดการแบตเตอรี่ใช้แล้วชนิดตะกั่ว-กรดในช่วง 3 ปีที่ผ่านมา มีการจัดการแบตเตอรี่ใช้แล้วเพิ่มขึ้นในทุกปี คือ ร้อยละ 1.68 ร้อยละ 1.75 และ ร้อยละ 1.78 เนื่องจากมีการรณรงค์โดยใช้แรงจูงใจทางภาษีตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2543 โดยกรมควบคุมมลพิษ เช่น การ เก็บภาษีจากแบตเตอรี่ใช้ตะกั่วรีไซเคิลในอัตราต่ำกว่าแบตเตอรี่ที่ใช้ตะกั่วจากแหล่งธรรมชาติ นอกจากนี้องค์ประกอบหลักของแบตเตอรี่ชนิดนี้มีวัสดุคืบที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจอย่างตะกั่ว และ พลาสติก

4.1.2 การประเมินปริมาณกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว- กรดในประเทศไทย

จากสมมุติฐานของงานวิจัยระบุไว้ว่าปริมาณของกรดซัลฟิวริกในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดมี ค่าร้อยละ 22 โดยน้ำหนักของแบตเตอรี่ทั้งแบตเตอรี่ใหม่และแบตเตอรี่ใช้แล้ว จากผลการวิเคราะห์ ข้อมูลปริมาณแบตเตอรี่ได้เป็นปริมาณของกรดซัลฟิวริกใช้แล้วที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในประเทศไทยช่วงปี พ.ศ. 2558 - 2560 สามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 4- 6 พบว่าปริมาณของกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ เครื่องยนต์แบบลูกสูบเฉลี่ย 1,344 ตันต่อปี จากแทรกชั้นแบตเตอรี่เฉลี่ย 1,064 ตันต่อปี และ จาก การจัดการอย่างไม่ถูกต้องเฉลี่ย 454 ตันต่อปี นอกจากนี้ยังพบว่ากรดซัลฟิวริกโดยเฉลี่ยกว่า 134,402 ตันต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 80 ของปริมาณกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ถูกสะสมอยู่ ในระบบ หากกรดซัลฟิวริกในส่วนนี้ไม่ได้รับการจัดการที่ถูกต้องจะก่อผลกระทบต่อระบบ นิเวศ เนื่องจากสมบัติความเป็นกรด และ ปริมาณของโลหะที่เจือปนอยู่

เมื่อนำข้อมูลปริมาณกรดซัลฟิวริกมาสร้างแผนผังเส้นทางการไหลของกรดซัลฟิวริกจาก แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ในช่วงปี พ.ศ. 2558 - พ.ศ. 2560 แสดงดังรูปที่ 4-5 4-6 และ 4-7 พบว่า มีปริมาณน้ำกรดที่คาดว่าจะถูกส่งไปโรงงานลำดับประเภทที่ 60 ในระหว่างปี พ.ศ. 2558 – พ.ศ. 2560 มีปริมาณเท่ากับ 1,867 2,170 1,889 ตัน ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยอยู่ 1,975 ตันต่อปี โดยเป็นน้ำกรด

จากแทรกชั้นแบตเตอรี่ร้อยละ 44 หรือ 869 ตัน เมื่อพิจารณาพร้อมกับน้ำเสียจากขั้นตอนการล้างกล่องแบตเตอรี่ของโรงงานประเภทนี้ (6,570 ตันต่อปี) ดังนั้นโรงงานลำดับประเภทที่ 60 จะมีปริมาณน้ำเสียปนเปื้อนกรดซัลฟิวริกที่ต้องจัดการทั้งหมด 7,439 ตันต่อปี ซึ่งข้อมูลปริมาณในส่วนนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาผลกระทบต่อ

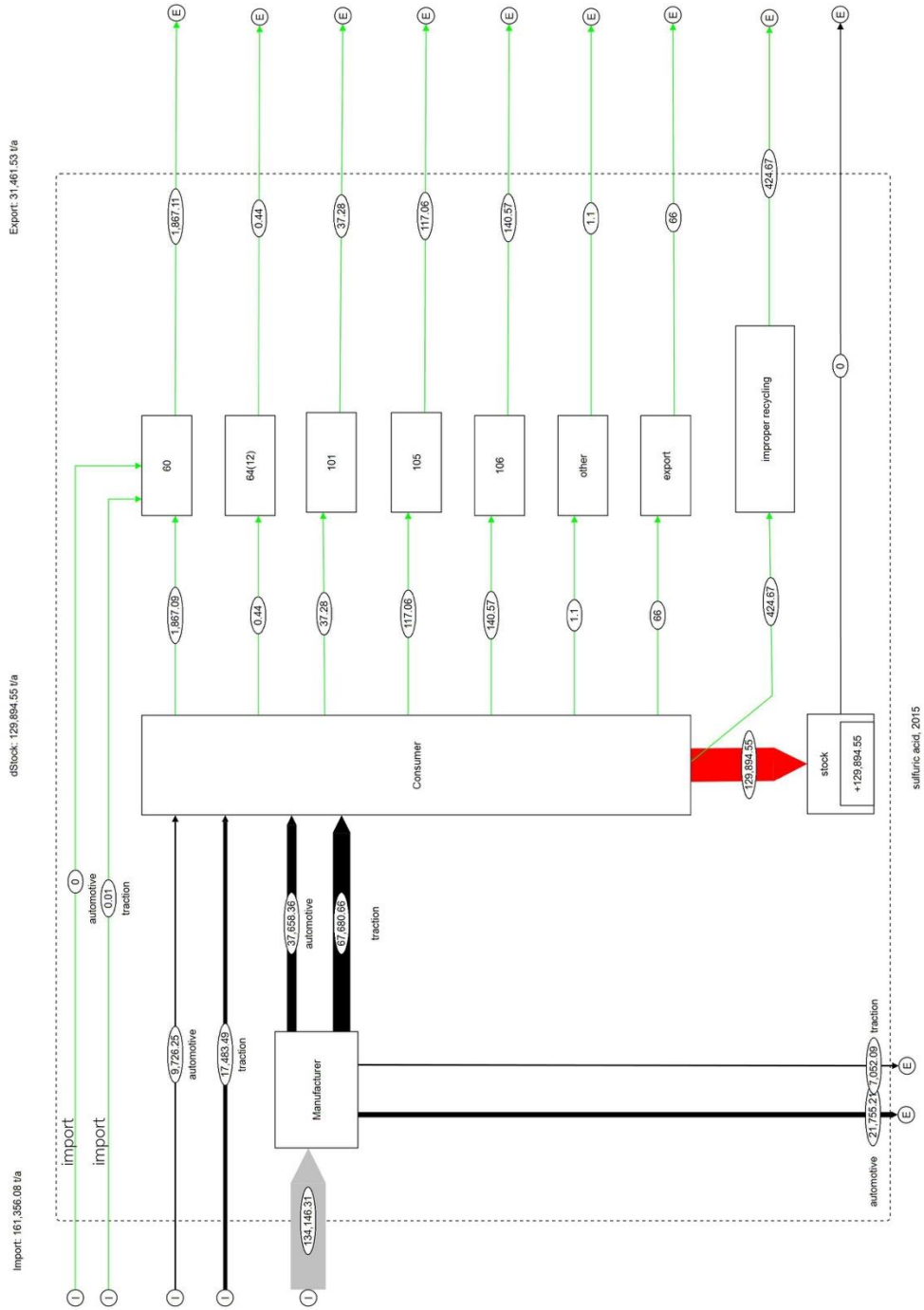
ตารางที่ 4- 6 ปริมาณกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในปี พ.ศ. 2558 - 2560

	ปริมาณกรดซัลฟิวริก (ตัน)			
	2558	2559	2560	เฉลี่ย
สะสมในระบบ	129,895	149,232	124,078	134,402
เครื่องยนต์แบบลูกสูบ	1,174	1,377	1,481	1,344
แทรกชั้น	1,055	1,299	837	1,064
การจัดการอย่างไม่ถูกต้อง	425	509	430	454

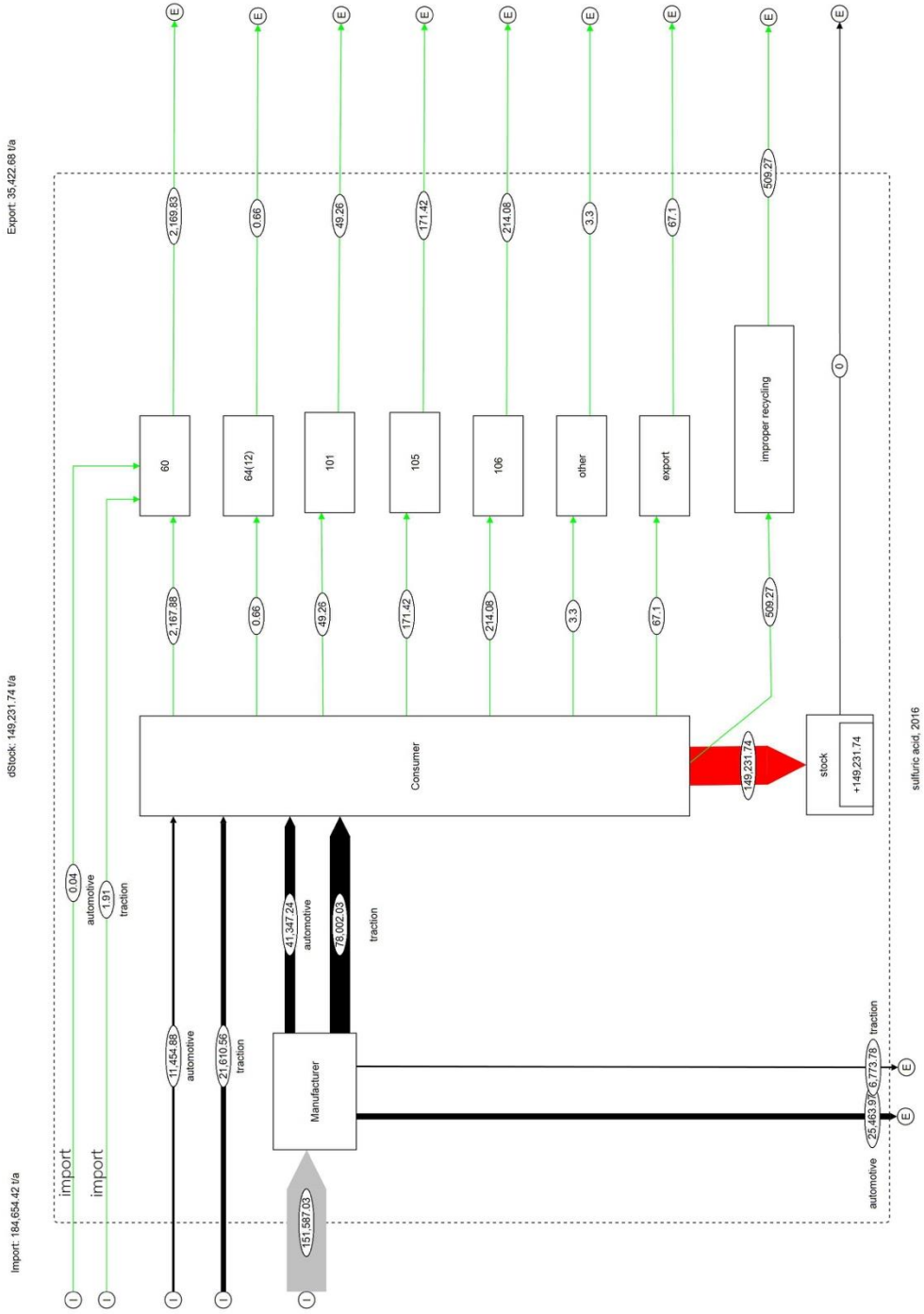
เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดที่ใช้มาประเมินค่าความไม่แน่นอนของข้อมูล (Uncertainty) ดังตารางที่ 4- 7 พบว่าข้อมูลร้อยละรีไซเคิลแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดมีค่าความไม่แน่นอนมากที่สุด เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ นั้นไม่ใช่ข้อมูลของแต่ละปี แต่เป็นข้อมูลการรีไซเคิลแบตเตอรี่ของปี พ.ศ. 2560 เท่านั้น และ ไม่ได้กล่าวถึงวิธีการเก็บข้อมูลโดยละเอียด ขณะที่ปริมาณการนำเข้า-ส่งออกมีค่าความไม่แน่นอนต่ำที่สุด เนื่องจากแหล่งข้อมูลได้จัดเก็บข้อมูลตามประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ทำให้ได้สัดส่วนแบตเตอรี่ทั้ง 2 ชนิด ที่นำไปใช้กับข้อมูลปริมาณแบตเตอรี่ที่ใช้แล้วและที่ผลิตได้ในประเทศ

ตารางที่ 4- 7 ค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างผังการไหลของแบตเตอรี่

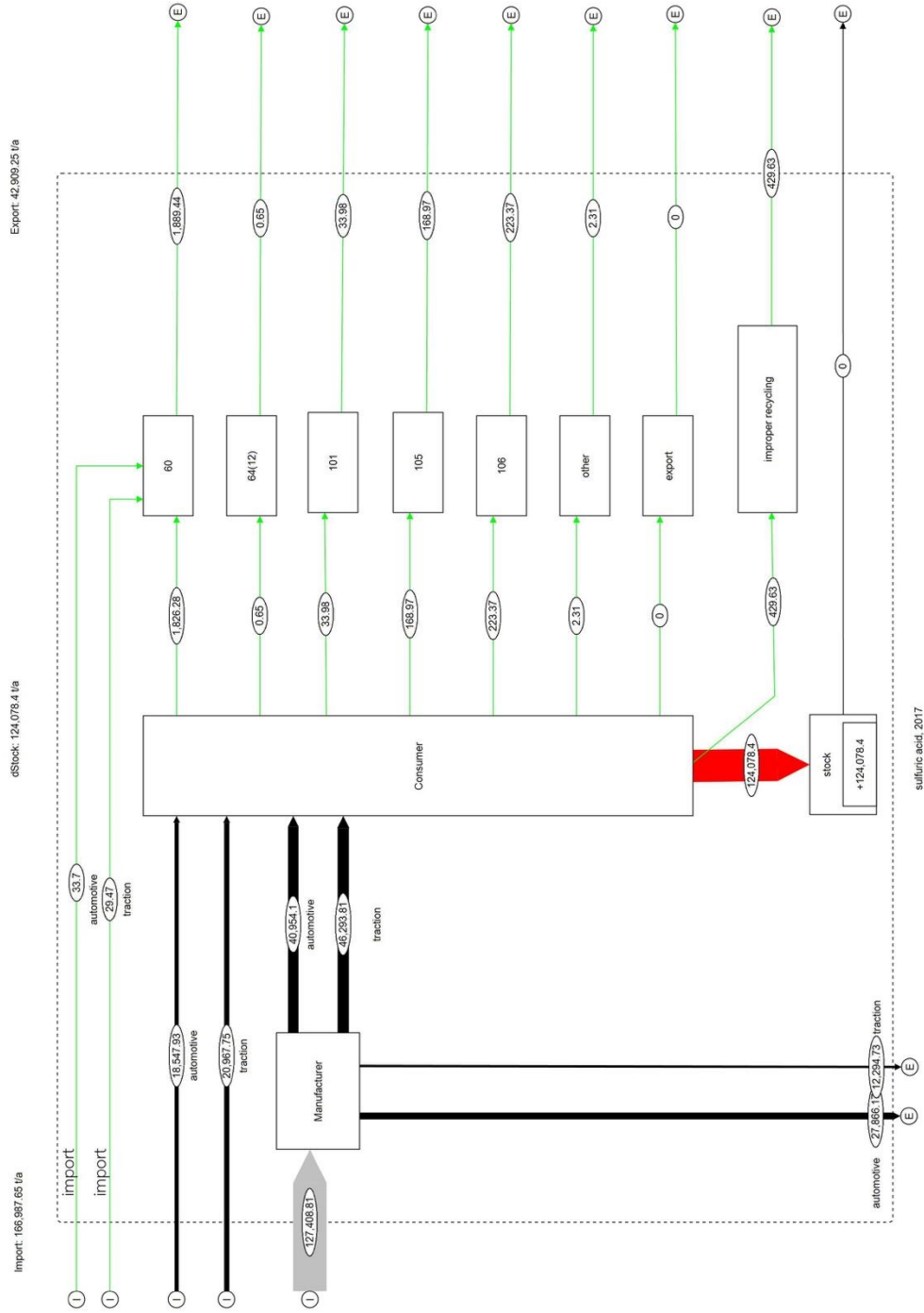
ชนิดข้อมูล	แหล่งข้อมูล	ค่าความไม่แน่นอนข้อมูล (%)
ปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้ว	กรมโรงงานอุตสาหกรรม	8.2
ปริมาณนำเข้า-ส่งออก	กรมศุลกากร	6.8
ปริมาณที่ผลิตได้ในประเทศ	สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม	8.2
ร้อยละรีไซเคิลแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ในประเทศ	ศูนย์พัฒนาภูมิภาคแห่งสหประชาชาติ	21.1



รูปที่ 4-6 ผังการไหลของกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558 (ต้นปี)



รูปที่ 4-7 ฟังก์ชันไหลของกรดซัลฟิวริกจากแปดเทอร์มินัลระหว่างภาคการผลิตในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2559 (ต้นปี)



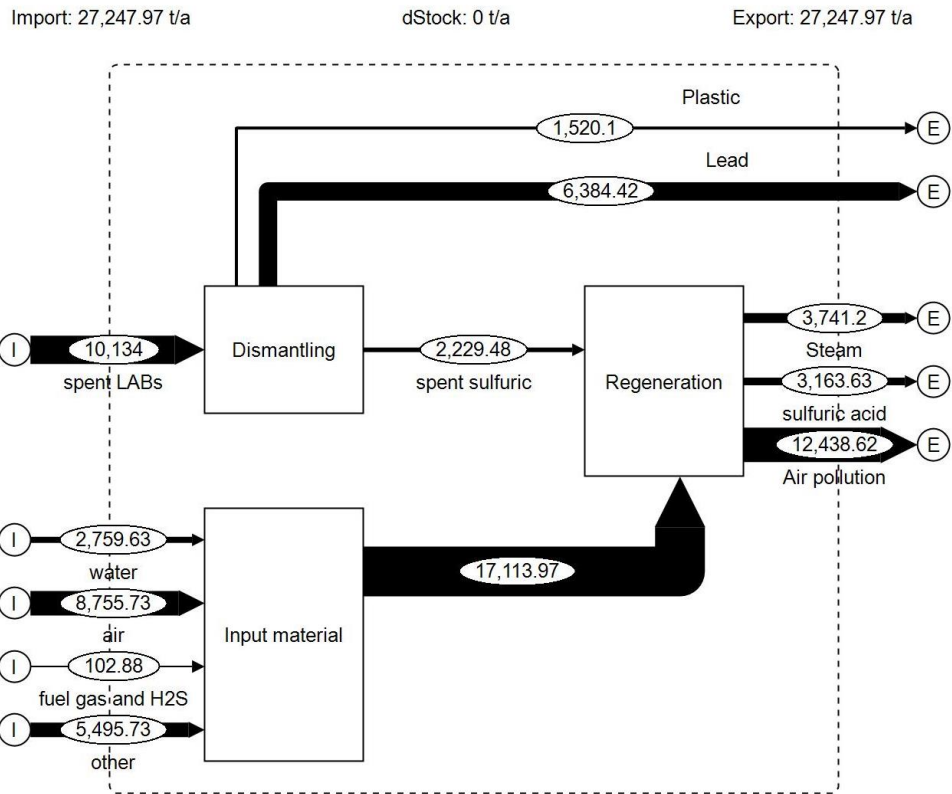
รูปที่ 4-8 ผังการไหลของการผลิตพีวีจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2560 (ต้นปี)

4.1.3 การไหลของวัสดุในแต่ละวิธีการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว

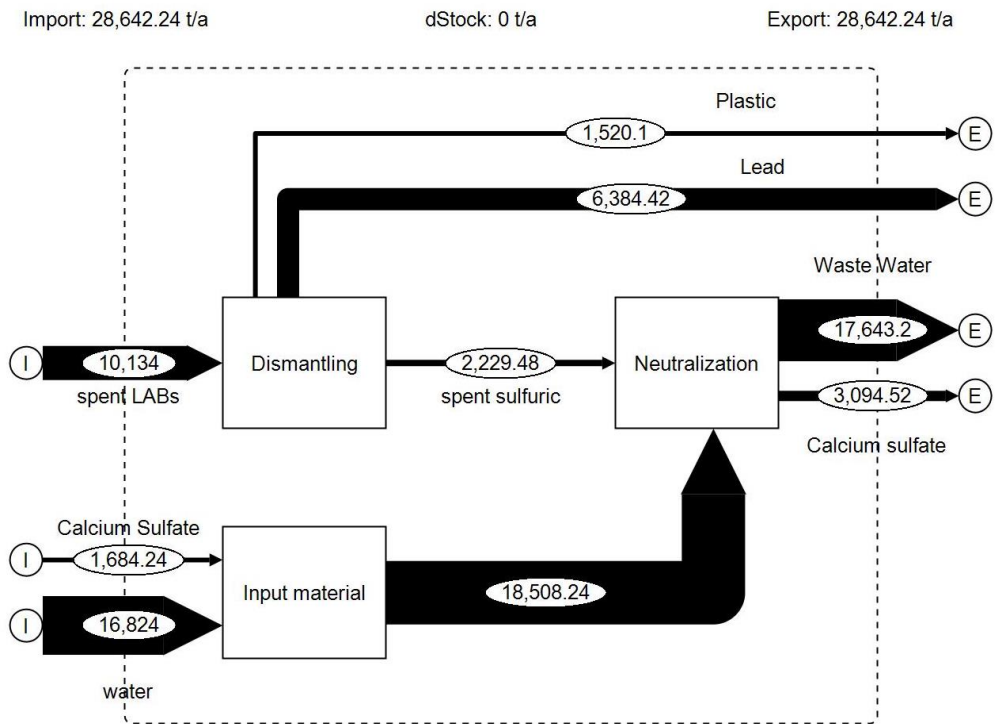
วิธีการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้วที่เลือกมาพิจารณามี 3 วิธี ได้แก่ การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การปรับสภาพให้เป็นกลาง และ การผลิตเป็นยิปซัม โดยนำปริมาณเฉลี่ยของแบตเตอรี่ใช้แล้วทั้ง 3 ปี คือ 10,134 ตัน มาใช้ในการสร้างแผนผัง สารขาเข้าของแผนผัง คือ แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดชนิดใช้แล้ว และ สารเคมีหรือสารอนุมูลโทษที่ใช้ในแต่ละวิธี จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แสดงค่าร้อยละขององค์ประกอบแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดไว้ ดังนี้ ตะกั่วและตะกั่วเพสร้อยละ 63 กรดซัลฟิวริกร้อยละ 22 และ พลาสติกร้อยละ 15 (Pregaman และ Mirza, 2017) ทำให้ได้ปริมาณกรดซัลฟิวริกใช้แล้วในแผนผัง 2,229.48 ตัน นำปริมาณที่ได้ดังกล่าวไปคำนวณหาปริมาณสารเคมีหรือสารอนุมูลโทษที่ใช้ แสดงดังรูปที่ 4-9 แผนผังไหลของวัสดุในแต่ละวิธีการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว จากรูป 4-9(ก) การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ มีสารขาเข้า ได้แก่ น้ำ อากาศ ก๊าซเชื้อเพลิง และ อื่น ๆ รวม 17,113.97 ตัน ได้ผลิตภัณฑ์และสารขาออกเป็น กรดซัลฟิวริก ใช้น้ำร้อน มลพิษทางอากาศ รวม 19,343.45 ตัน

จากรูป 4-9(ข) การปรับสภาพให้เป็นกลาง มีสารขาเข้า ได้แก่ น้ำ และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ รวม 18,508.24 ตัน ได้ผลิตภัณฑ์และสารขาออกเป็น น้ำเสีย และ ตะกอนแคลเซียมซัลเฟต รวม 20,737.72 ตัน และ วิธีสุดท้ายแสดงดังรูป 4-9(ค) การผลิตเป็นยิปซัม น้ำ และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ รวม 18,508.24 ตัน ได้ผลิตภัณฑ์และสารขาออกเป็น น้ำเสีย และ ตะกอนแคลเซียมซัลเฟต รวม 19,831.03 ตัน

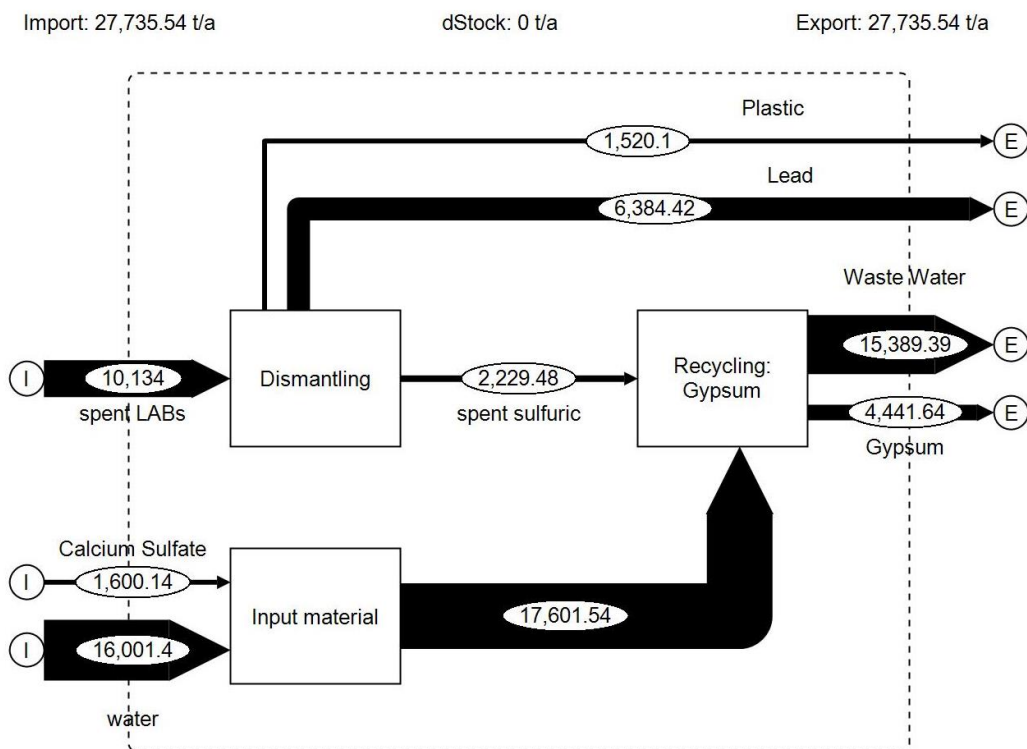
หากพิจารณาถึงปริมาณและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่สนใจ พบว่า จากการจัดการกรดซัลฟิวริก 2,229.48 ตัน วิธีที่ให้ผลิตภัณฑ์มากที่สุด คือ การผลิตเป็นยิปซัม ซึ่งได้ยิปซัมออกมาจำนวน 4,441.64 ตัน รองลงมาเป็นการฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ได้กรดซัลฟิวริกจำนวน 3,163.63 ตัน และ การปรับสภาพให้เป็นกลาง ได้ตะกอนแคลเซียมซัลเฟตเพียง 3,094.52 ตัน



(ก) การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่



(ข) การปรับสภาพให้เป็นกลาง



(ค) การผลิตเป็นยิปซัม

รูปที่ 4- 9 ผังการไหลของวัสดุในแต่ละวิธีการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว

(ก) การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (ข) การปรับสภาพให้เป็นกลาง และ (ค) การผลิตเป็นยิปซัม

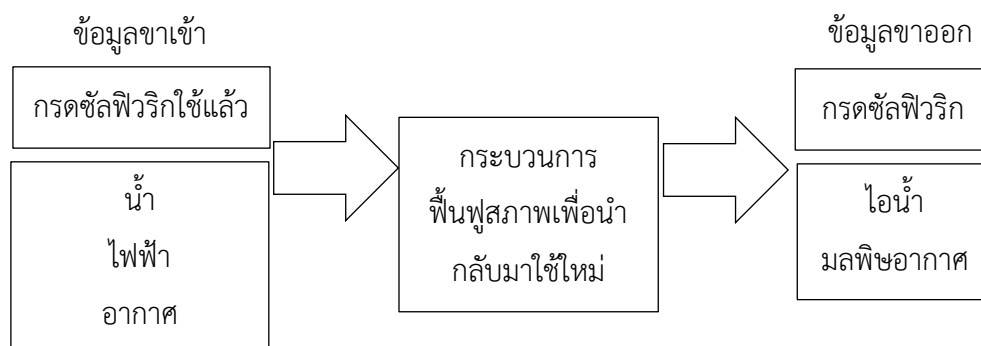
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.4 การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของทางเลือกในการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้วทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การปรับสภาพให้เป็นกลาง และ การผลิตเป็นยิปซัม หน่วยการทำงาน คือ 1 ตัน ของกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว ขอบเขตการศึกษาครอบคลุมแบบ Gate-to-Gate เป็นการศึกษาเพียงการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่เท่านั้น โดยในแต่ละกระบวนการมีสารขาเข้าหลักเป็นกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแทรคชั่นแบตเตอรี่ ที่ได้จากการเก็บตัวอย่างแทรคชั่นแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแทรคชั่นแบตเตอรี่จะไม่ถูกนำไปคำนวณ เนื่องจากการคำนวณผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของโปรแกรมจะครอบคลุมถึงการได้มาซึ่งวัตถุดิบ (Raw material) ในขั้นนี้ คือ การผลิตกรดซัลฟิวริก แต่ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว โดยข้อมูลของวิธีจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว ปริมาณสารเคมีหรือสารฐานูปโภคที่ใช้ และ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแสดงรายละเอียดไว้ดังนี้

1) การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

กรดซัลฟิวริกที่เกิดจากกระบวนการ Wet gas sulfuric acid ใช้ปริมาณของสารขาเข้าและขาออกนำมาจากงานวิจัยของ Atanasova (2017) และ ฐานข้อมูล Ecoinvent version 3.0 โดยมีแผนผังกระบวนการดัง รูปที่ 4- 10 และ รายละเอียดปริมาณสารขาเข้าและขาออก ดังตารางที่ 4-8 จากการนำกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว 1 ตันเข้าสู่กระบวนการ WSA ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นกรดซัลฟิวริกใหม่ที่พร้อมนำไปใช้งาน 1,419.36 กิโลกรัม และ ไอน้ำ 2,327.04 กิโลกรัม



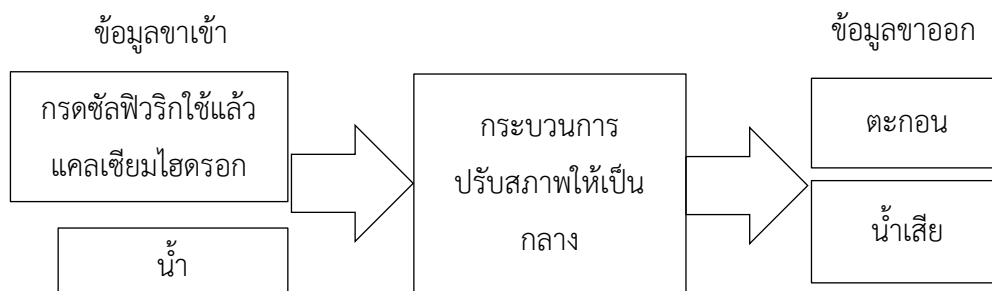
รูปที่ 4- 10 แผนผังกระบวนการฟื้นฟูสภาพกรดซัลฟิวริก

ตารางที่ 4- 8 บัญชีรายการมวลสารของการฟื้นฟูสภาพกรดซัลฟิวริก

รายการ	ปริมาณ	หน่วย	หมายเหตุ
ผลิตภัณฑ์	1,419.36	กิโลกรัมต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	กรดซัลฟิวริก
มวลสารขาเข้า			
กรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	1000	กิโลกรัม	
น้ำ	1,237.79	กิโลกรัมต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	
ไฟฟ้า	214.61	เมกะจูลต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	
มวลสารขาออก			
ไอน้ำ	2,327.04	กิโลกรัมต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	
มลพิษอากาศ			
N ₂	4,196.64	กิโลกรัมต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	
H ₂ O	537.83	กิโลกรัมต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	
C	161.80	กิโลกรัมต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	
H	682.33	กิโลกรัมต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	
SO ₂	1.67	กิโลกรัมต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	

2) การปรับสภาพให้เป็นกลาง

รวบรวมข้อมูลสารขาเข้าและขาออกจากกระบวนการปรับสภาพกรดซัลฟิวริกใช้แล้วให้เป็นกลางด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ คำนวณหาปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยวิธีเดียวกันนี้ ซึ่งมีแผนผังกระบวนการปรับสภาพให้เป็นกลาง ดังรูปที่ 4- 11 ซึ่งมีสารขาเข้าประกอบด้วย กรดซัลฟิวริกใช้แล้ว แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ น้ำ โดยได้ระบุข้อมูลปริมาณของสารขาเข้าและขาออกที่ใช้ในการคำนวณหาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ดังตารางที่ 4- 9 จากการนำกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว 1 ตันเข้าสู่กระบวนการปรับสภาพให้เป็นกลาง



รูปที่ 4- 11 แผนผังกระบวนการปรับสภาพให้เป็นกลาง

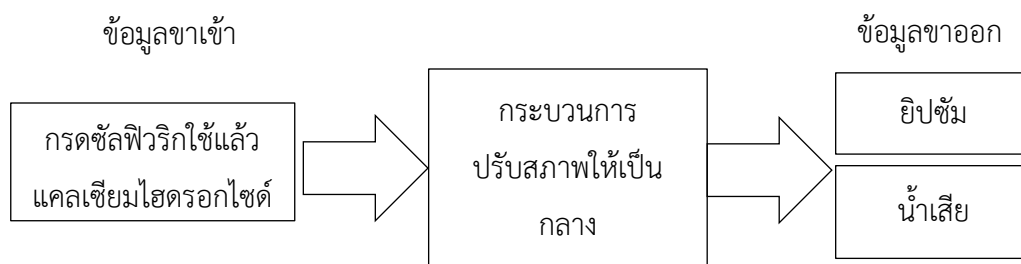
ตารางที่ 4- 9 บัญชีรายการมวลสารของการปรับสภาพกรดซัลฟิวริกให้เป็นกลาง

รายการ	ปริมาณ	หน่วย	หมายเหตุ
ผลิตภัณฑ์	1388	กิโลกรัมต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	ตะกอน แคลเซียมซัลเฟต
มวลสารขาเข้า			
กรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	1,000	กิโลกรัม	
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	755	กิโลกรัมต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	
มวลสารขาออก			
น้ำเสีย	367	กิโลกรัมต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	

3) การผลิตเป็นยิปซัม

ข้อมูลที่ได้รับรวบรวมมาจากการทดลองการเกิดแคลเซียมซัลเฟตจากการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวอย่างกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยตัวอย่างกรดซัลฟิวริกที่ใช้มีความเข้มข้น 3.27 โมลาร์ และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10

ผลการวิเคราะห์ระบบผลึกของแคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้น พบเพียงผลึกของยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เท่านั้น จึงนำปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ และ ปริมาณยิปซัมที่เกิดขึ้นมาใช้ในการคำนวณผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม โดยมีแผนผังกระบวนการผลิตเป็นยิปซัม ดังรูปที่ 4- 12 และปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกที่ใช้ในการคำนวณผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม แสดงดังตารางที่ 4- 10 จากการนำกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว 1 ตันเข้าสู่กระบวนการผลิตเป็นยิปซัม ได้ผลิตภัณฑ์เป็นยิปซัม 1,992.23 กิโลกรัม



รูปที่ 4- 12 แผนผังกระบวนการผลิตเป็นยิปซัม

ตารางที่ 4- 10 บัญชีรายการมวลสารของการผลิตเป็นยิปซัม

รายการ	ปริมาณ	หน่วย	หมายเหตุ
ผลิตภัณฑ์	1,992	กิโลกรัมต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	ยิปซัม
มวลสารขาเข้า			
กรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	1,000	กิโลกรัม	เข้มข้น 3.27 M
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	718	กิโลกรัมต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	เข้มข้นร้อยละ 10
มวลสารขาออก			
น้ำเสีย	512	กิโลกรัมต่อ 1 ตันกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว	

ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากฐานข้อมูล และ วิธีการคำนวณผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของโปรแกรม พิจารณาจากภูมิประเทศในทวีปยุโรป ซึ่งล้อมรอบด้วยแหล่งน้ำเค็มมีผลให้เมื่อประเมินผลกระทบแล้วขนาดของผลกระทบในด้านนี้สูงมาก และ ในงานวิจัยชิ้นนี้มีขอบเขตการประเมินผลกระทบเพียงในประเทศไทยเท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่นำผลกระทบด้านการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำเค็มมาพิจารณา

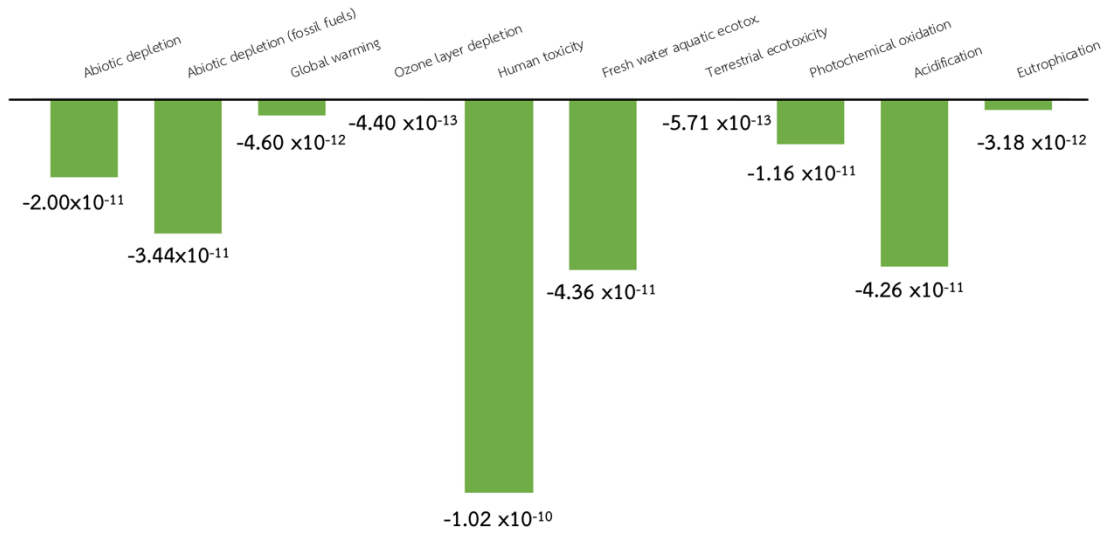
1) การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

จากการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของวิธีการฟื้นฟูสภาพกรดซัลฟิวริกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ พบว่าค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมรวมแบบเทียบหน่วย (normalization) ของกิจกรรมนี้ คือ -2.16×10^{-9} ซึ่งมีค่าติดลบ กล่าวคือการจัดการกรดซัลฟิวริกวิธีนี้ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากมีผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับกิจกรรมอื่น ๆ ได้ เมื่อเปรียบเทียบขนาดของผลกระทบที่เกิดจากวัตถุดิบที่ใช้และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น พบว่าสาเหตุของ

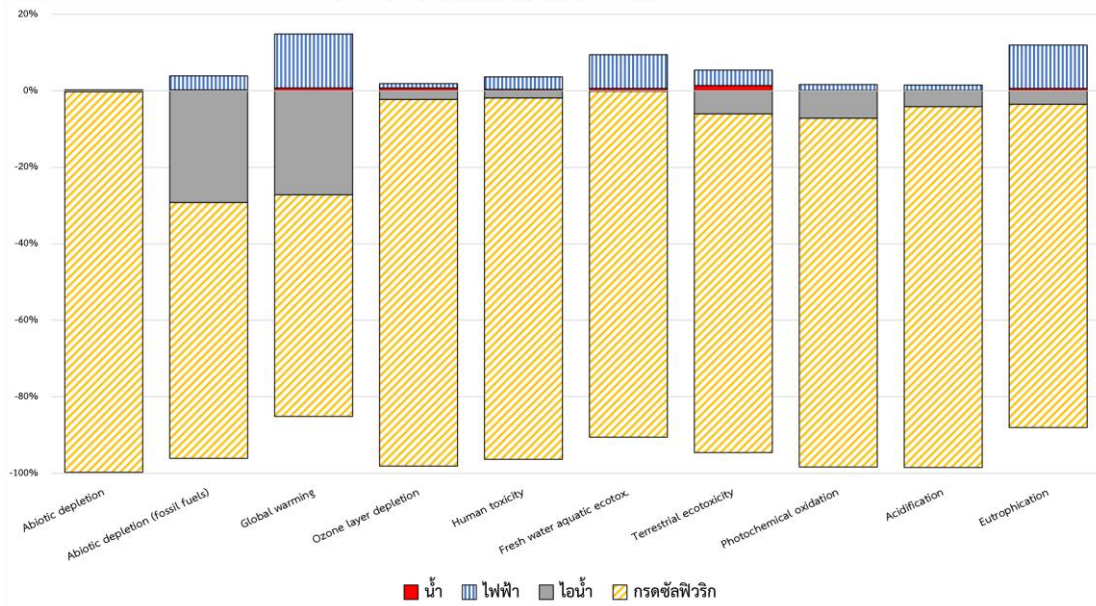
ผลกระทบเกิดจากการใช้ไฟฟ้า และ การใช้น้ำ นอกจากนี้วิธีนี้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ช่วยลดระดับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในทุกด้าน คือ กรดซัลฟิวริก และ ไอ้ น้ำ ที่สามารถนำไปใช้ต่อในกิจกรรมอื่น ๆ ได้ จึงส่งผลให้ผลกระทบรวมของทั้งกระบวนการลดลงจนเป็นค่าติดลบ เมื่อพิจารณาขนาดของผลกระทบแบบเทียบหน่วย ดังรูปที่ 4- 13 พบว่า ผลกระทบที่สามารถลดลงได้มากที่สุด 3 อันดับแรก คือ การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ มีค่า -1.02×10^{-10} หรือคิดเป็นร้อยละ -39 ของค่าผลกระทบรวม การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด มีค่า -4.36×10^{-11} (ร้อยละ -16) และ การก่อให้เกิดสภาพความเป็นกรดมีค่า -4.26×10^{-11} (ร้อยละ -16)

เมื่อพิจารณาผลกระทบตามชนิดวัตถุดิบ และ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ ดังรูปที่ 4- 14 พบว่ากรดซัลฟิวริกใหม่เป็นสาเหตุหลักที่ช่วยทำให้ค่าผลกระทบรวมเป็นค่าติดลบในทุก ๆ ด้านของผลกระทบ เนื่องจากสามารถนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น การผลิตปุ๋ยฟอสเฟต การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า หรือ การผลิตแบตเตอรี่ และ ไอ้ น้ำสามารถนำไปใช้เป็นพาหะพลังงาน (Energy carriers) แทนการใช้เชื้อเพลิงจำพวกน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และ ถ่านหิน ซึ่งการใช้เชื้อเพลิงในกลุ่มนี้เป็นแหล่งกำเนิดของก๊าซเรือนกระจก

ส่วนผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้ไฟฟ้า ก็สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการประเมินนี้เลือกใช้ฐานข้อมูลการผลิตกระแสไฟฟ้าแรงสูงของประเทศไทยโดยใช้กระบวนการผลิตแบบผสม โดยรายงานสถิติจากฝ่ายสื่อสารและประชาสัมพันธ์องค์การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) มีสัดส่วนประเภทเชื้อเพลิงที่ใช้ในระบบของ กฟผ. ปี พ.ศ.2561 ดังนี้ ก๊าซธรรมชาติร้อยละ 60.36 ถ่านหิน (รวมลิกไนต์) ร้อยละ 23.89 พลังงานหมุนเวียนร้อยละ 14.15 และ อื่น ๆ (น้ำมันเตา น้ำมันดีเซล นำเข้าจากต่างประเทศ) ร้อยละ 1.6 ผลกระทบจากการใช้น้ำมีผลค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับการใช้ไฟฟ้า เนื่องจากน้ำที่ใช้ในกระบวนการนี้ถูกใช้คือน้ำหล่อเย็น ที่อาจมีการสูญเสียของน้ำไปได้จากการระเหยเป็นไอ แม้ว่าจะมีส่วนการนำกลับไอ้ น้ำมาใช้ก็ตาม



รูปที่ 4- 13 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
แบบเทียบหน่วย



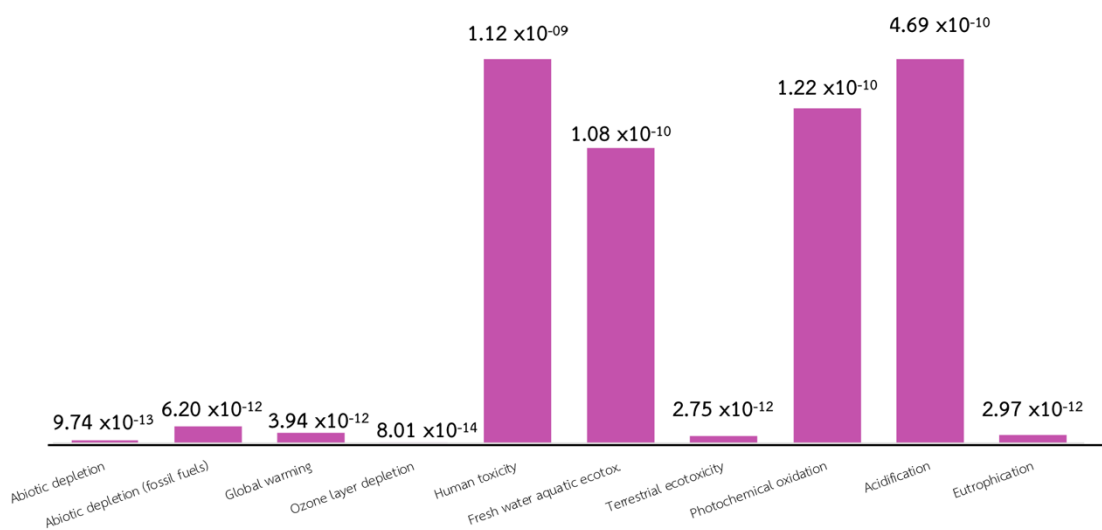
รูปที่ 4- 14 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
ตามชนิดวัตถุดิบ และ ผลิตภัณฑ์ที่ได้

2) การปรับสภาพให้เป็นกลาง

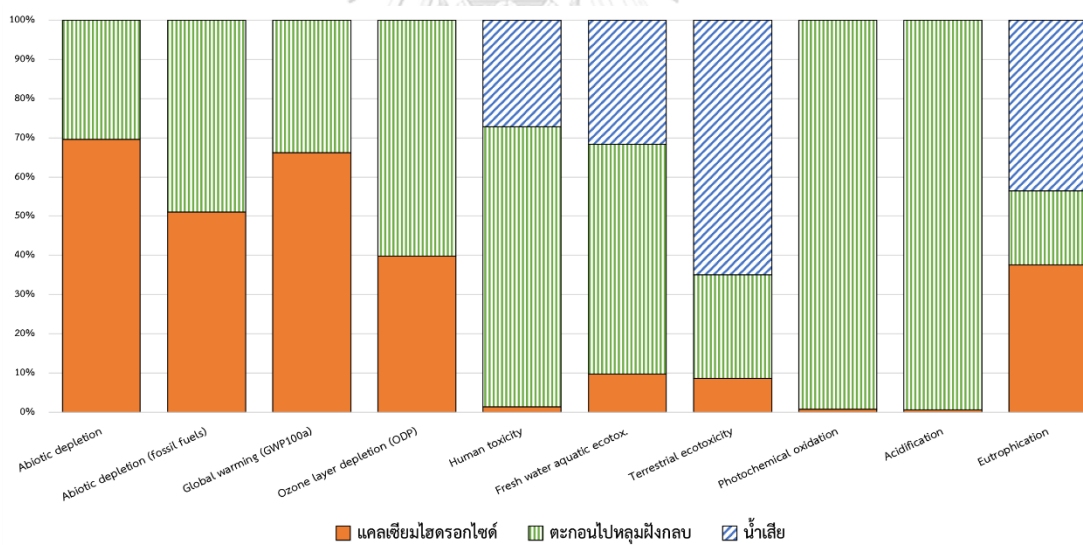
จากการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของวิธีการปรับสภาพให้เป็นกลางเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมรวมแบบเทียบหน่วย (normalization) ของกิจกรรมนี้ คือ 5.99×10^{-8} ดังรูปที่ 4- 15 พบว่า ผลกระทบหลักของวิธีการนี้ คือ การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ ผลกระทบหลักของวิธีการนี้ คือ รองลงมาเป็นการก่อให้เกิดสภาวะความเป็นกรด มีค่า 4.69×10^{-10} (ร้อยละ 24) การออกซิเดชันจากปฏิกิริยาแสง-เคมี มีค่า 1.22×10^{-10} (ร้อยละ 6) และการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด มีค่า 1.08×10^{-10} (ร้อยละ 6) ขณะที่ผลกระทบด้านอื่น ๆ มีค่าเพียงร้อยละ 0 – 0.3

จากรูปที่ 4- 16 วิธีการนี้มีสาเหตุหลักของผลกระทบมาจากตะกอนที่เกิดขึ้นถูกส่งไปหลุมฝังกลบ เนื่องจากเป็นตะกอนที่ขาดสมบัติในการนำไปใช้งานต่อในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อาจมีองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่เหมาะสมแก่การนำไปใช้ต่อ โดยผลกระทบจากการทิ้งตะกอนไปยังหลุมฝังกลบทำให้เกิดก๊าซที่มีความเป็นกรด (Acidic gases) เช่น NO_2 และ SO_2 และ น้ำชะขยะที่เกิดจากกิจกรรมในหลุมฝังกลบมีแนวโน้มที่จะออกสู่อากาศได้ เมื่อสูดดมหรือได้รับ ก๊าซดังกล่าวเข้าสู่ร่างกายมักพบอาการดังต่อไปนี้ ระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ และ หลอดลมตีบ โดยเฉพาะในผู้ป่วยโรคหอบหืด เมื่อพิจารณาจากสมการการเกิดปฏิกิริยาตะกอนที่เกิดขึ้น คือ แคลเซียมซัลเฟต โดยแคลเซียมซัลเฟตสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่สะสมในผลึก ได้แก่ CaSO_4 หรือ แอนไฮไดรรัส $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ หรือ ปูนปลาสเตอร์ และ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ หรือ ยิปซัม ดังนั้นหากควบคุมคุณภาพของตะกอนแคลเซียมซัลเฟต แล้วนำตะกอนไปใช้ประโยชน์ต่อในกิจกรรมอื่น ๆ ก็จะทำให้ค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมลดลงได้เป็นอย่างมาก

ส่วนน้ำเสียที่เกิดขึ้นมาจากฐานข้อมูลที่เลือกใช้วิธีการบำบัดน้ำเสียทางเคมีมาใช้ เนื่องจากเป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป และ ต้องการเปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมกับการตกตะกอนเพื่อผลิตเป็นยิปซัม ดังนั้นค่าผลของกระทบจากน้ำเสียจึงสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามวิธีการบำบัดที่เลือกใช้



รูปที่ 4- 15 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการปรับสภาพให้เป็นกลางแบบเทียบหน่วย



รูปที่ 4- 16 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการปรับสภาพให้เป็นกลาง

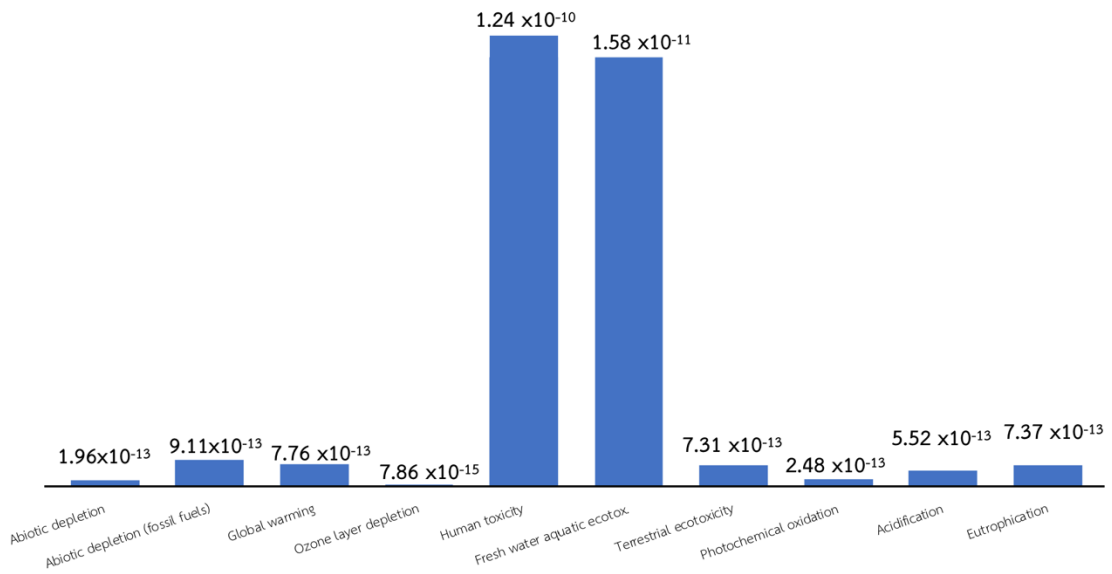
ตามชนิดวัตถุุดิบ และ ผลิตภัณฑ์ที่ได้

3) การผลิตเป็นยิปซัม

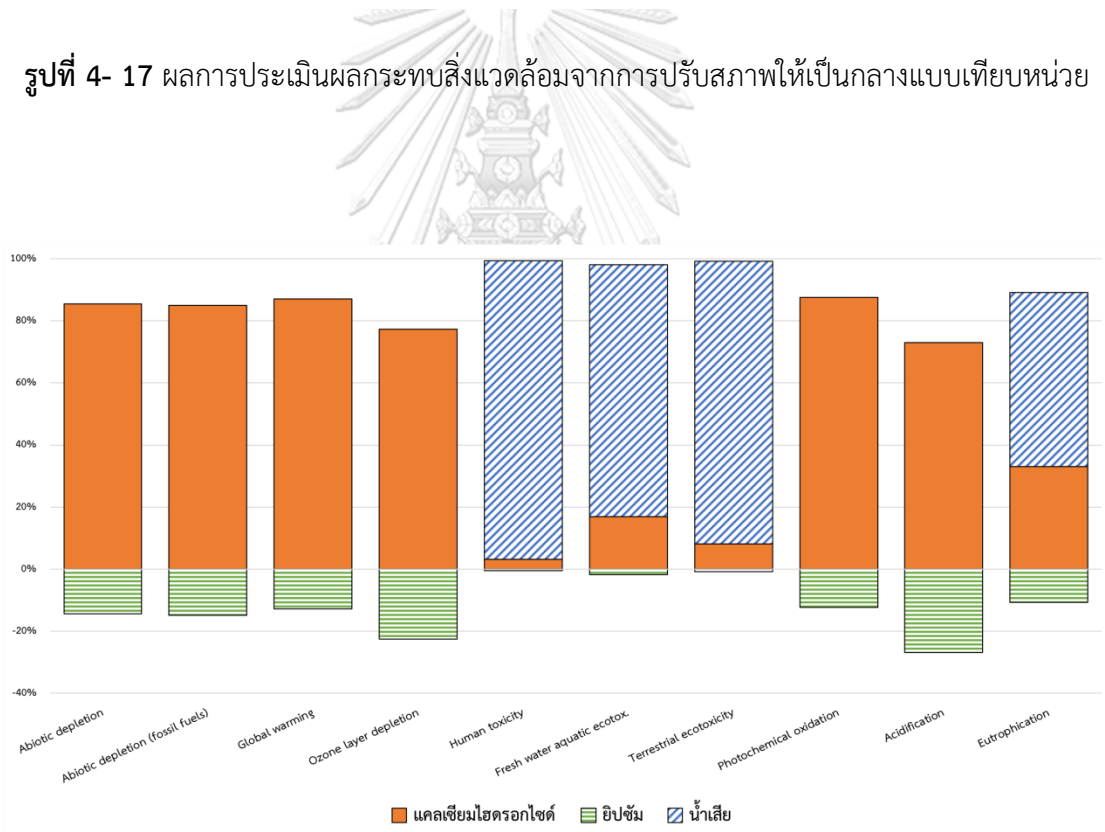
จากการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของวิธีการผลิตเป็นยิปซัม ดังรูปที่ 4- 17 ค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมรวมแบบเทียบหน่วย (normalization) ของกิจกรรมนี้ คือ 5.25×10^{-10} ผลกระทบหลักของวิธีการนี้ คือ ความเป็นพิษต่อมนุษย์ มีค่า 1.24×10^{-11} หรือคิดเป็นร้อยละ 86 รองลงมาเป็นผลกระทบด้านการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด มีค่า 1.58×10^{-11} หรือคิดเป็นร้อยละ 11 และผลกระทบด้านอื่น ๆ มีผลเพียงร้อยละ 0.01 – 0.6

รูปที่ 4- 18 แสดงถึงสาเหตุหลักของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของกิจกรรมนี้ คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากกระบวนการผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์นั้นต้องนำแร่หินปูนที่ได้จากเหมือง มาบดและนำไปผ่านความร้อนด้วยกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำมาผสมกับน้ำในสัดส่วนที่เหมาะสมผ่านเครื่องไฮเดรเตอร์ (Hydrator) ที่มีการให้ความร้อนร่วมด้วย ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในลักษณะผงละเอียดสีขาว ซึ่งในแต่ละขั้นตอนก็มีการใช้ก๊าซธรรมชาติและถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงให้พลังงานความร้อน และ น้ำในกระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพอากาศ นอกจากนี้ยังเกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นจากขั้นตอนการบดหินปูน ผลกระทบด้านเสียงและการสั่นสะเทือนจากการทำเหมือง ดังนั้นจึงทำให้ผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์มีค่าสูง ส่วนผลกระทบต่อแหล่งน้ำจืด มาจากกิจกรรมที่มีการใช้น้ำเพื่อช่วยลดการฟุ้งกระจายของฝุ่น หรือการล้างพื้นที่หน้างาน รวมทั้งน้ำจากบ่อดักตะกอนภายในเหมือง ที่อาจมีการรั่วไหล หรือ ซึมลงดินไปยังแหล่งน้ำจืดหรือแหล่งน้ำบาดาลได้

ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ยิปซัม มีส่วนช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในทุกด้านของผลกระทบ เนื่องจากยิปซัมที่ได้นั้นสามารถนำไปใช้ได้หลากหลายตามจุดประสงค์ โดยใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ ผลิตแผ่นยิปซัมบอร์ด ผลิตเป็นปูนปลาสเตอร์ และ ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เช่นคอนกรีตมวลเบา ดังนั้นหากมีการนำยิปซัมที่ได้จากกระบวนการบำบัดนี้ไปใช้ในอุตสาหกรรมดังกล่าว หรือนำไปใช้ร่วมกับยิปซัมจากธรรมชาติ ก็จะช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่มีสาเหตุมาจากกิจกรรมจากการทำเหมืองแร่ยิปซัม ที่มีการใช้พาหนะ และ อุปกรณ์ขุดเจาะที่ต้องใช้เชื้อเพลิง ซึ่งก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกและมลพิษจากการเผาไหม้ รวมถึงการเกิดซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) และ ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ซึ่งส่งผลให้เกิดฝนกรด



รูปที่ 4- 17 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการปรับสภาพให้เป็นกลางแบบเทียบหน่วย



รูปที่ 4- 18 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการปรับสภาพให้เป็นกลางตามชนิดวัตถุดิบ และ ผลิตภัณฑ์ที่ได้

เมื่อเปรียบเทียบค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของแต่ละวิธี พบว่าผลกระทบหลักของทั้ง 3 วิธี คือ การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด และ การเกิดความเป็นกรด ดังนั้นจึงได้นำผลกระทบสูงสุด 3 อันดับ และ ผลกระทบที่เกี่ยวข้องกับประเด็นปัญหาที่น่าสนใจ คือ ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านการเกิดภาวะโลกร้อน มาพิจารณาเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4- 11 ค่าร้อยละของผลกระทบที่ลดลงจากการฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และ การผลิตเป็นยิปซัมมาเปรียบเทียบกับวิธีการปรับสภาพให้เป็นกลาง พบว่าการฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่สามารถลดผลกระทบด้านการเกิดภาวะโลกร้อนได้มากที่สุด (ร้อยละ 422) รองลงมาเป็นผลกระทบด้านการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ และ การก่อให้เกิดสภาวะความเป็นกรด ตามลำดับ ขณะที่การผลิตเป็นยิปซัมสามารถลดผลกระทบด้านการเกิดฝนได้มากที่สุด (ร้อยละ 99) รองลงมาเป็นการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด และการเกิดภาวะโลกร้อน ตามลำดับ

ตารางที่ 4- 11 ค่าร้อยละของผลกระทบที่ลดลงเมื่อเทียบกับการปรับสภาพให้เป็นกลางจากการฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และ การผลิตเป็นยิปซัม

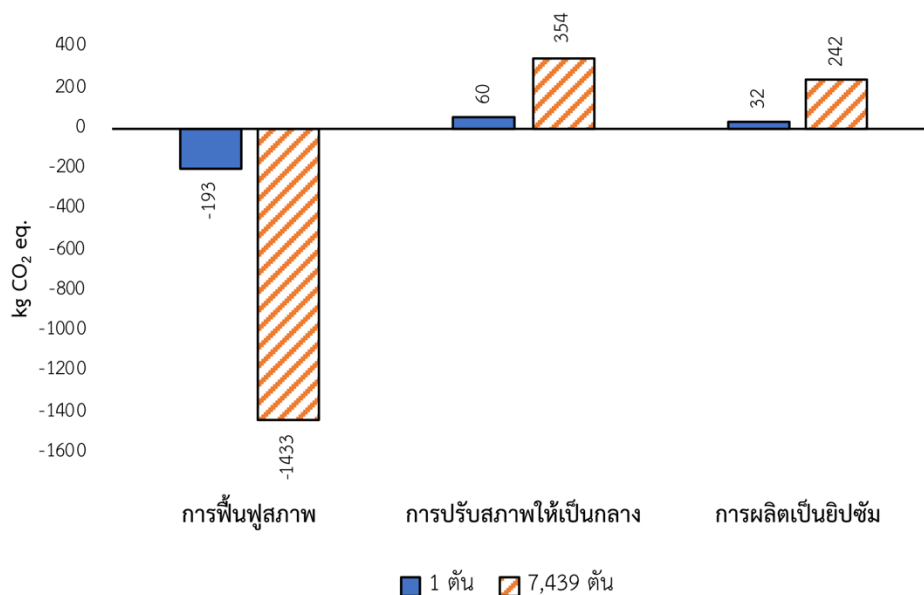
กลุ่มผลกระทบ	การฟื้นฟูสภาพ	การผลิตเป็นยิปซัม
การเกิดภาวะโลกร้อน	422%	47%
การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์	123%	61%
การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด	210%	48%
การก่อให้เกิดสภาวะความเป็นกรด	105%	99%

จากการประเมินปริมาณน้ำเสียปนเปื้อนกรดซัลฟิวริกจากโรงงานลำดับประเภทที่ 60 มีภาระน้ำเสียที่ต้องจัดการจากขั้นตอนแยกชิ้นส่วนของแทครันแบดเตอรี 7,439.2 ตันต่อปี เมื่อนำมาประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมทั้ง 4 ด้าน ดังรูปที่ 4- 19 การเปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมระหว่างกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว 1 ตัน และ กรดซัลฟิวริกใช้แล้ว 7,439 ตัน รูปที่ 4- 19(ก) ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านการเกิดภาวะโลกร้อน พบว่าความแตกต่างค่าผลกระทบของการปรับสภาพให้เป็นกลางและการผลิตเป็นยิปซัมลดลงเหลือร้อยละ 32 จากเดิมที่ต่างกันร้อยละ 47 รูปที่ 4- 19(ข) ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ พบว่าที่การจัดการกรด

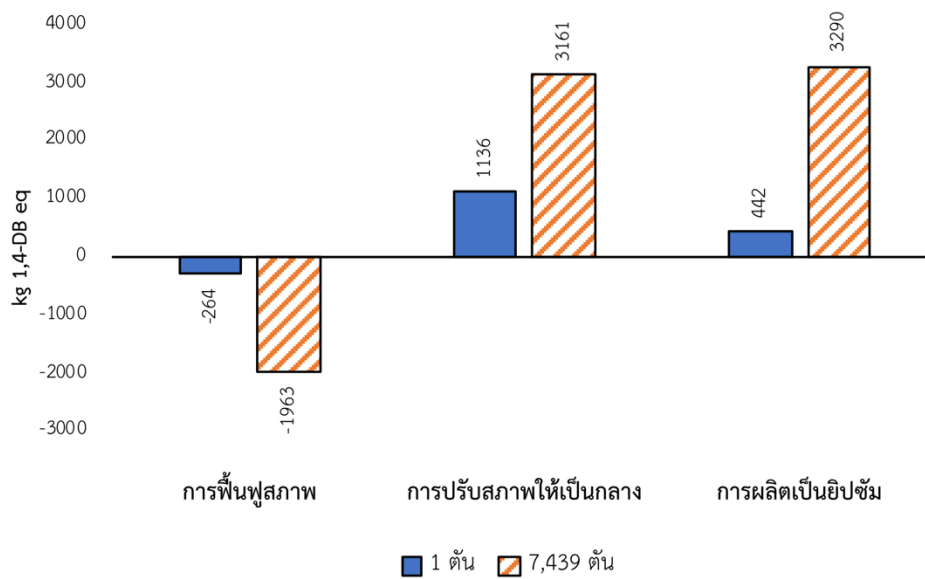
ซัลฟิวริกใช้แล้ว 7,439 ตัน ทำให้การผลิตเป็นยิปซัมให้ค่าผลกระทบสูงกว่าการปรับสภาพให้เป็นกลาง และ ความแตกต่างค่าผลกระทบลดลงเหลือเพียงร้อยละ 4 จากเดิมที่ต่างกันร้อยละ 61 รูปที่ 4- 19(ค) ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด พบว่าที่การจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว 7,439 ตัน ทำให้การผลิตเป็นยิปซัมให้ค่าผลกระทบสูงกว่าการปรับสภาพให้เป็นกลาง และ ความแตกต่างค่าผลกระทบลดลงเหลือเพียงร้อยละ 22 จากเดิมที่ต่างกันร้อยละ 48 และ รูปที่ 4- 19(ค) ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านการก่อให้เกิดสภาวะความเป็นกรด พบว่าความแตกต่างค่าผลกระทบของการปรับสภาพให้เป็นกลางและการผลิตเป็นยิปซามีค่าเท่าเดิม คือ ร้อยละ 99

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าของผลกระทบด้านการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์และแหล่งน้ำจืด ด้วยวิธีการผลิตเป็นยิปซัม มีค่าสูงกว่าวิธีการปรับสภาพเป็นกลาง เนื่องจากปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากวิธีการผลิตเป็นยิปซามีมากกว่าวิธีการปรับสภาพเป็นกลาง ดังนั้นหากสามารถลดปริมาณน้ำเสีย หรือ เลือกวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพและก่อผลเสียน้อยกว่า จะช่วยให้ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของวิธีการผลิตเป็นยิปซามีความเหมาะสมที่จะใช้ยิ่งขึ้น

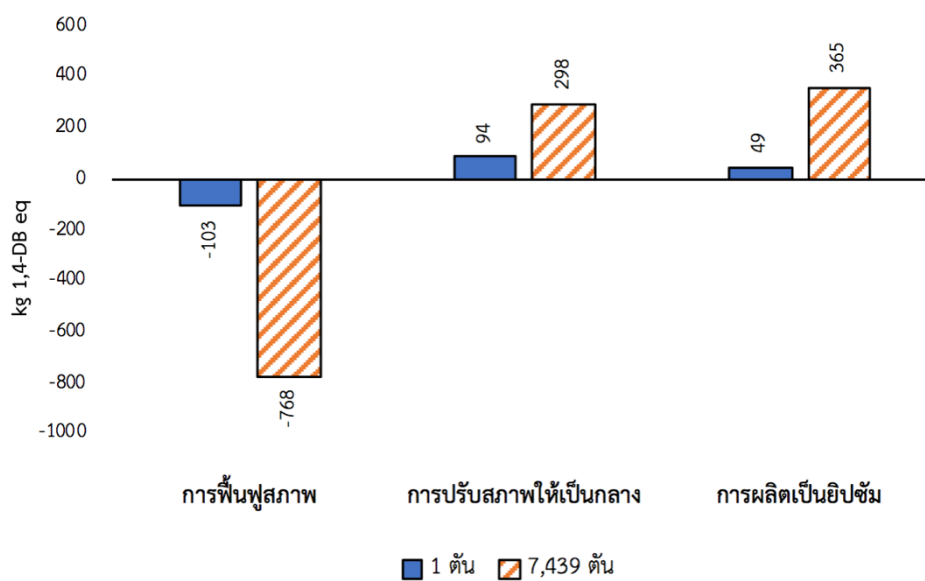
ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้วด้วยวิธีการผลิตเป็นยิปซัมควรใช้เมื่อมีปริมาณกรดซัลฟิวริกใช้แล้วไม่มากนัก แต่หากว่ามีปริมาณกรดมากก็ควรพิจารณาหาทางเลือกในการจัดการน้ำเสียให้ก่อผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด



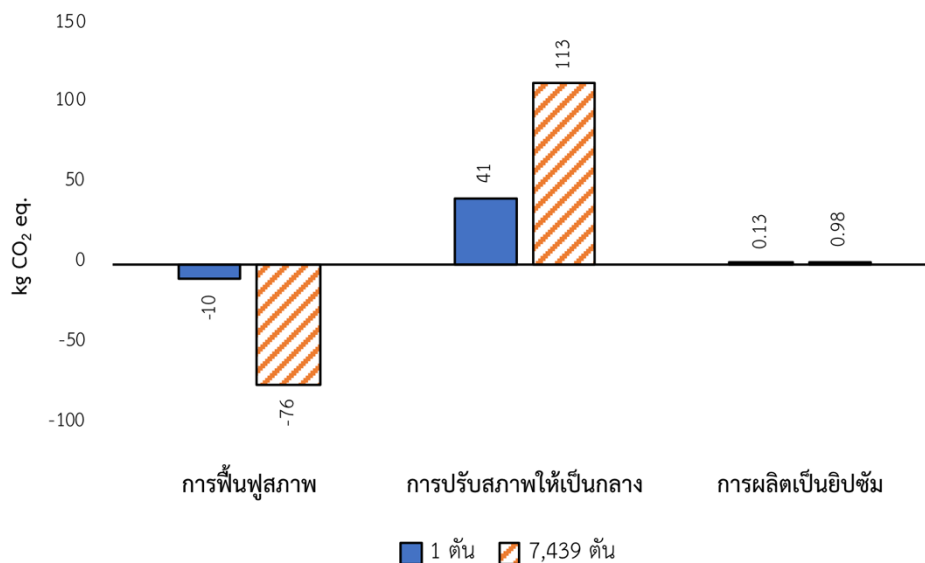
(ก) ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านการเกิดภาวะโลกร้อน



(ข) ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์



(ค) ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด



(ง) ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านการก่อให้เกิดสภาวะความเป็นกรด

รูปที่ 4- 19 เปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว 1 ตัน และ 7,439 ตัน
 (ก) ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านการเกิดภาวะโลกร้อน (ข) ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์ (ค) ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด และ
 (ง) ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านการก่อให้เกิดสภาวะความเป็นกรด

4.1.5 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายจากการบำบัดกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว

น้ำเหมืองเป็นกรด (Acid mine drainage หรือ Acid rock drainage) หมายถึง น้ำที่ระบายออกจากบริเวณโครงการเหมืองแร่ที่ถูกทิ้งร้าง ซึ่งมีค่าพีเอชต่ำ และ อาจพบโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง โดยปกติน้ำเหมืองเป็นกรดสามารถเกิดขึ้นได้เองอย่างช้า ๆ ตามการผุกร่อนของชั้นหินและชั้นดิน ซึ่งอัตราการเกิดน้ำเหมืองเป็นกรดจะสูง เมื่อชั้นหินและดินที่มีแร่ซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบถูกรบกวน (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2550)

จากการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าใช้จ่ายของการบำบัดจากน้ำเหมืองเป็นกรด (Willow และ TenBraak, 1999; Hydrometric, 1998) ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) โดยการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังตารางที่ 4- 12 พบว่าการปรับสภาพโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มีราคาต่อ 1 ตันน้ำเหมืองเป็นกรดสูงกว่าการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีค่าใช้จ่ายอยู่ในช่วง 27 – 123 บาทต่อ 1 ตันน้ำเหมืองเป็นกรด

ตารางที่ 4-12 การประมาณค่าใช้จ่ายการบำบัดน้ำเหมืองกรด

แหล่งกำเนิด	ค่าพีเอชขาเข้า	ความเข้มข้นซัลเฟต (mg SO ₄ /L)	วิธีการบำบัด	ค่าพีเอชขาออก	ค่าใช้จ่ายการบำบัด* (บาท)	
					ต่อ 1,000 แกลลอน	ต่อ 1 ตัน
Argo Tunnel (Denver, CO)	2.0 - 3.0	1,000 - 3,000	การตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ (NaOH)	6.5 - 9.0	724.43	193.03
Eagle Mine (Eagle County, CO)	5.1	4,000	การตกตะกอนด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH) ₂)	6.5 - 9.0	102.51	27.32
Leadville Mine Drainage Tunnel (Leadville, CO)	5.9	370	CO ₂ stripping และการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ (NaOH)	6.5 - 9.0	156.87	41.80
Golden Sunlight Mine (Whitehall, MT)	n/a	n/a	การตกตะกอนด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH) ₂)	n/a	151.56	40.38
Tyrone Mine (Tyrone, NM)	3.41 - 3.96	2,131	การตกตะกอนด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH) ₂)	n/a	15.27	123.04

หมายเหตุ: *คำนวณที่ แกลลอน เท่า ตัน

4.2 ผลการทดลองแผนการวิจัยที่ 2

4.2.1 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างกรดซัลฟิวริกใช้แล้วที่ได้จากแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดของรถยนต์ไฟฟ้า ในช่วง เดือนพฤษภาคม ถึง เดือนตุลาคม พ.ศ. 2561 ทั้งหมด 9 ตัวอย่าง โดยสารตัวอย่างมีค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกอยู่ในช่วง 0.07 โมลาร์ ถึง 3.27 โมลาร์ หรือ คิดเป็นร้อยละ 0.68 ถึง 31.7 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการวิจัยร่วมกับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของของกรดซัลฟิวริกก่อนเริ่มใช้งาน 3 ตัวอย่าง และ หลังหมดอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดของรถยนต์ไฟฟ้า 9 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างก่อนและหลังใช้งานมาจากคนละเซลล์แบตเตอรี่ พบว่าในกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ก่อนเริ่มใช้งาน พบโลหะเพียง 2 ชนิด ได้แก่ สังกะสีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 16.7 ถึง 23 มิลลิกรัมต่อลิตร และ แมกนีเซียมความเข้มข้นอยู่ในช่วง 12.8 ถึง 34.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนกรดซัลฟิวริกที่ผ่านการใช้งานแล้วพบโลหะ ดังนี้ ตะกั่ว เหล็ก สังกะสี อลูมิเนียม ทองแดง และ แมกนีเซียม โดยโลหะที่พบเพิ่มในกรดซัลฟิวริกหลังการใช้งานเป็นโลหะที่ใช้เป็นองค์ประกอบในการผลิตแผ่นธาตุตะกั่ว เพื่อให้แผ่นธาตุตะกั่วมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังตาราง 4- 13 พบว่าโลหะทั้ง 6 ชนิดที่พบในสารตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 95 ของโลหะที่พบในกรดซัลฟิวริก ส่วนอีกร้อยละ 5 เป็นโลหะอื่น ๆ ได้แก่ สารหนู แคดเมียม โคบอลต์ ปรอท แมงกานีส นิกเกิล และ นอกจากโลหะทั้ง 6 ชนิดที่กล่าวมานั้น ยังพบไอออนลบ ได้แก่ ฟลูออไรด์ คลอไรด์ ไนเตรต และ ซัลเฟต โดยแสดงค่าความเข้มข้นของไอออนลบแต่ละชนิดที่พบในกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า ดังตารางที่ 4- 14 เมื่อนำปริมาณของโลหะที่พบในแต่ละสารตัวอย่าง ดังรูปที่ 4- 20 พบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกและความเข้มข้นของโลหะ

ตารางที่ 4- 13 ความเข้มข้นของโลหะที่พบในกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

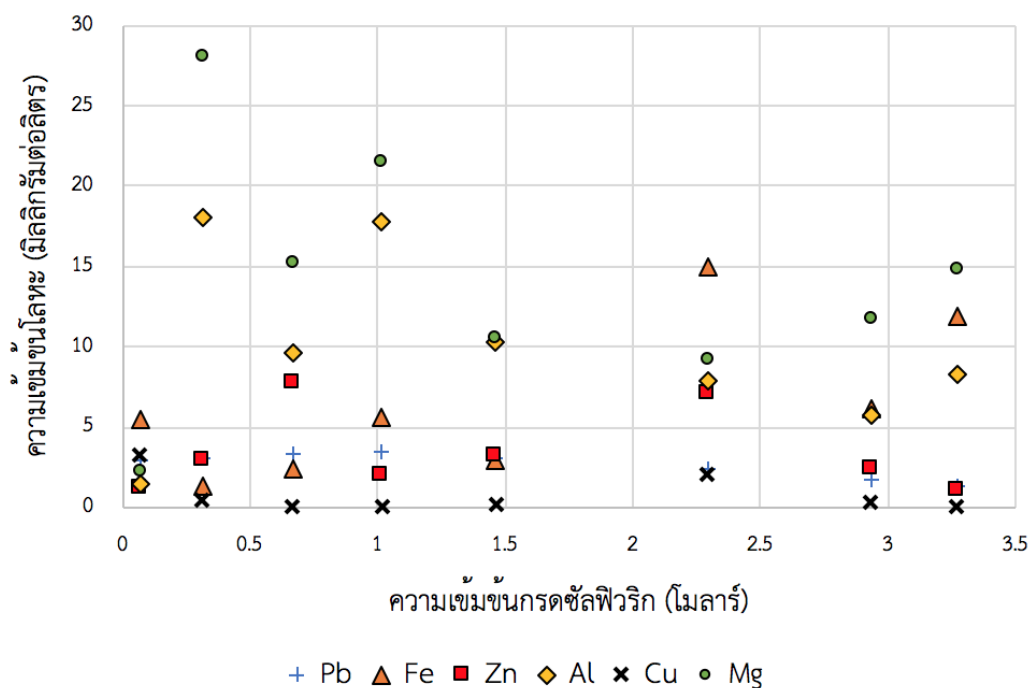
โลหะที่พบ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ก่อนเริ่มใช้งาน	หลังหมดอายุการใช้งาน
ตะกั่ว (Pb)	ไม่พบ	1.34 – 3.46
เหล็ก (Fe)	ไม่พบ	1.27 – 14.93
สังกะสี (Zn)	16.7 - 23	1.11 – 7.71
อลูมิเนียม (Al)	ไม่พบ	1.51 – 17.99
ทองแดง (Cu)	ไม่พบ	0.043 – 3.24
แมกนีเซียม (Mg)	12.8 – 34.8	2.21 – 28.04

หมายเหตุ: เก็บตัวอย่างน้ำกรดก่อนและหลังจากแบตเตอรี่คนละเซลล์

ตารางที่ 4- 14 ความเข้มข้นของไอออนลบที่พบในกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

ไอออนที่พบ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ก่อนเริ่มใช้งาน	หลังหมดอายุการใช้งาน
ฟลูออไรด์ (F ⁻)	0 - 109	0 - 512
โบรไมด์ (Br ⁻)	ไม่พบ	ไม่พบ
คลอไรด์ (Cl ⁻)	ไม่พบ	3.6 - 122.2
ไนเตรต (NO ₃ ⁻)	ไม่พบ	3.7 - 185
ซัลเฟต (SO ₄ ²⁻)	328,558 – 402,454	8,828 – 310,900
ฟอสเฟต (PO ₄ ²⁻)	ไม่พบ	ไม่พบ

หมายเหตุ: เก็บตัวอย่างน้ำกรดก่อนและหลังจากแบตเตอรี่คนละเซลล์



รูปที่ 4- 20 กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นระหว่างกรดซัลฟิวริกใช้แล้วกับโลหะที่พบ

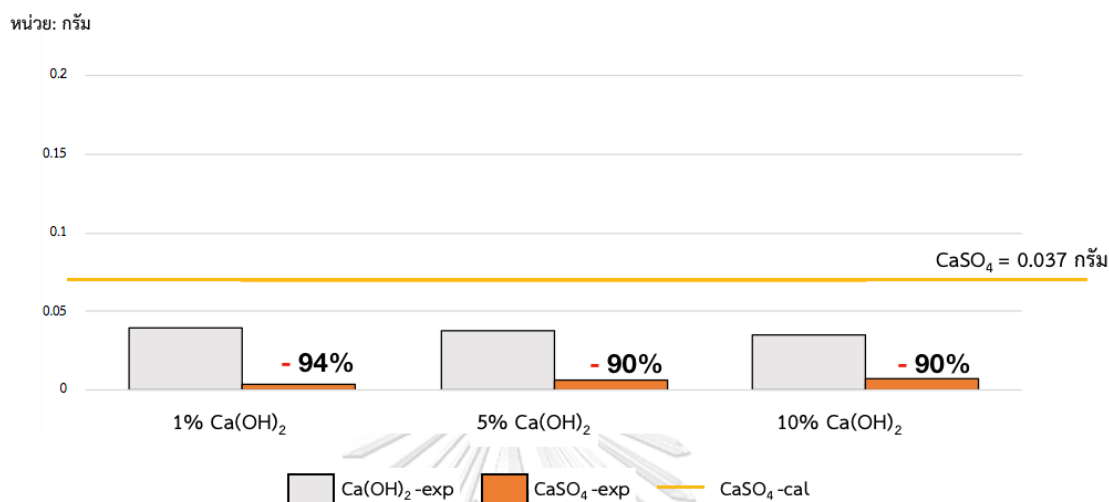
4.2.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณและสมบัติของตะกอนจากการเติมปูนขาวในกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์

ผลการทดลองตกตะกอนผลึกแคลเซียมซัลเฟตในกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ 0.1 โมลาร์ และ 1 โมลาร์ เพื่อให้เป็นตัวแทนของระบบที่มีค่า pH แตกต่างกัน (ค่าพีเอช 0-2) ด้วยการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 1 ร้อยละ 5 และ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

- การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของตะกอนแคลเซียมซัลเฟต

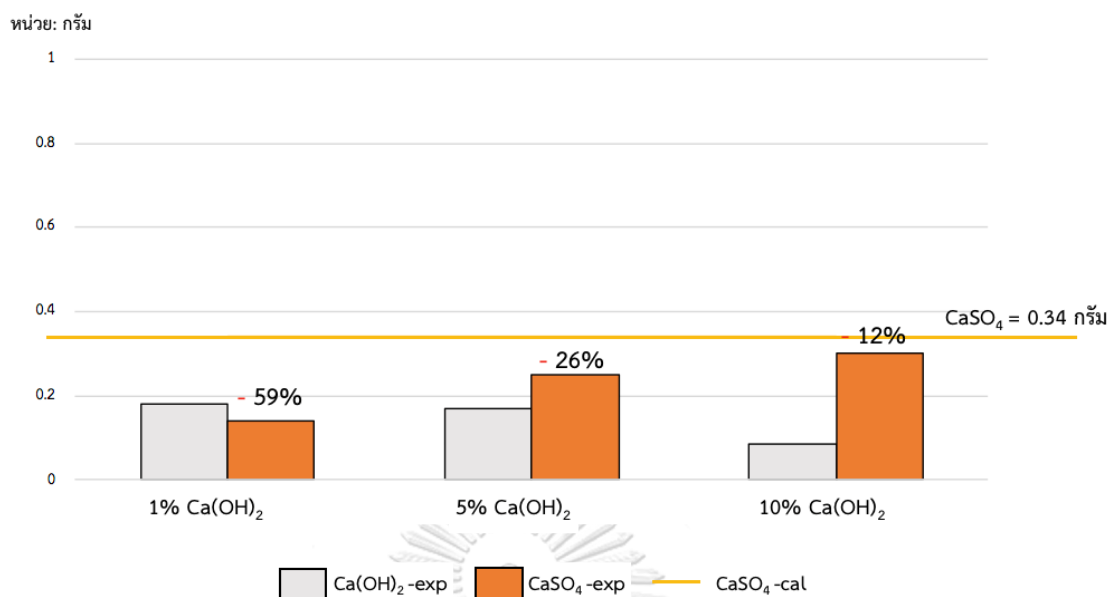
เมื่อนำปริมาณของสารที่ใช้และเกิดขึ้นในจากการทดลองเทียบกับค่าตามสมการปริมาณสารสัมพันธ์ของการเกิดแคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากรูปที่ 4- 21 ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซัลเฟตที่ได้จากการคำนวณ คือ 0.07 กรัม และ 0.037 กรัม ตามลำดับ พบว่าปริมาณแคลเซียมซัลเฟตจากการทดลองมีปริมาณน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณในทุกความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตที่ได้จากการทดลองแปรผันตรงกับร้อยละความเข้มข้นแคลเซียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น โดยที่การเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ ร้อยละ 5 ให้ปริมาณของแคลเซียมซัลเฟตที่ใกล้เคียงกัน คือ 0.073 กรัม และ 0.068 กรัม ตามลำดับ

ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณประมาณร้อยละ 90 ที่ และ จากการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น ร้อยละ 1 ให้ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตเพียง 0.14 กรัม ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณร้อยละ 59



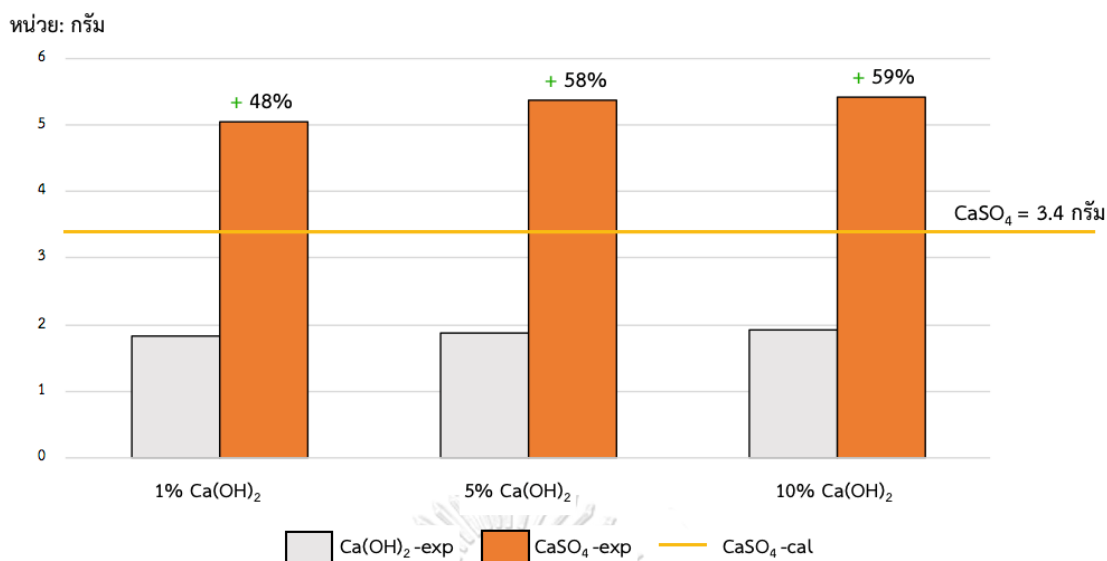
รูปที่ 4- 21 ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์

จากรูปที่ 4- 22 ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาณของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซัลเฟตที่ได้จากการคำนวณ คือ 0.18 กรัม และ 0.34 กรัม ตามลำดับ พบว่าปริมาณแคลเซียมซัลเฟตจากการทดลองมีปริมาณน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณใน ทุกความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตที่ได้จากการทดลองแปรผัน ตรงกับร้อยละความเข้มข้นแคลเซียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น โดยที่การเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความ เข้มข้นร้อยละ 10 จำนวนให้ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตมากที่สุด คือ 0.3 กรัม ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการ คำนวณร้อยละ 12 ที่การเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 5 ให้ปริมาณของแคลเซียมซัลเฟต 0.25 กรัม ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณร้อยละ 26 และ จากการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น ร้อยละ 1 ให้ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตเพียง 0.14 กรัม ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณร้อยละ 59



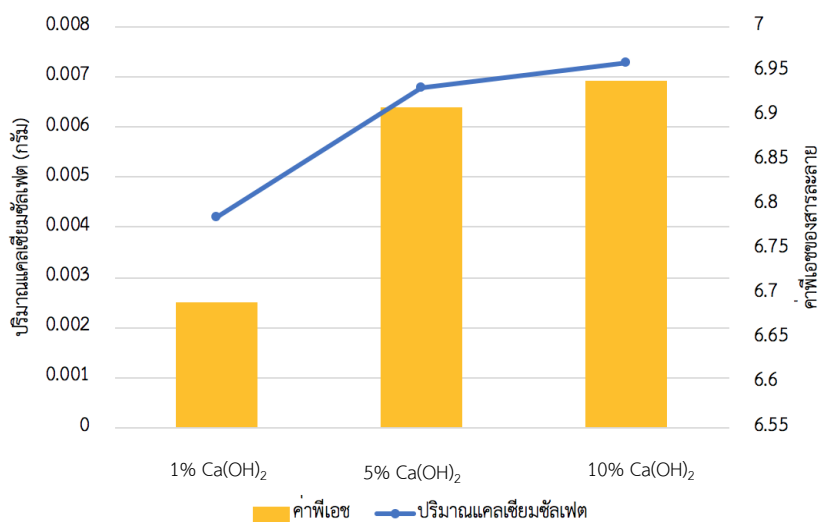
รูปที่ 4- 22 ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์

จากรูปที่ 4- 23 ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซัลเฟตที่ได้จากการคำนวณ คือ 1.85 กรัม และ 3.4 กรัม ตามลำดับ พบว่าปริมาณแคลเซียมซัลเฟตที่ได้จากการทดลองแปรผันตามร้อยละความเข้มข้นแคลเซียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น และได้ปริมาณมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณในทุกความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยที่การเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 ให้ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตมากที่สุด คือ 5.41 กรัม ซึ่งมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณร้อยละ 59 ที่การเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 5 ให้ปริมาณของแคลเซียมซัลเฟต 5.36 กรัม ซึ่งมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณร้อยละ 58 และ จากการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 ให้ปริมาณแคลเซียมซัลเฟต 5.05 กรัม มากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณร้อยละ 48

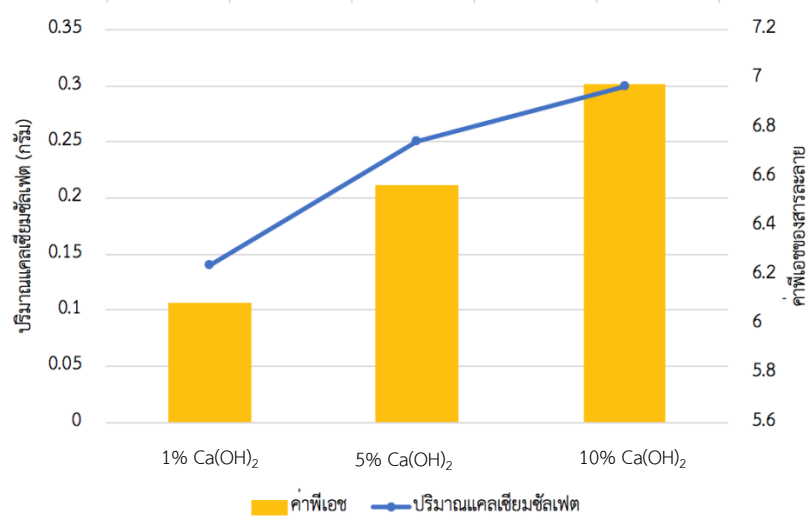


รูปที่ 4- 23 ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลาร์

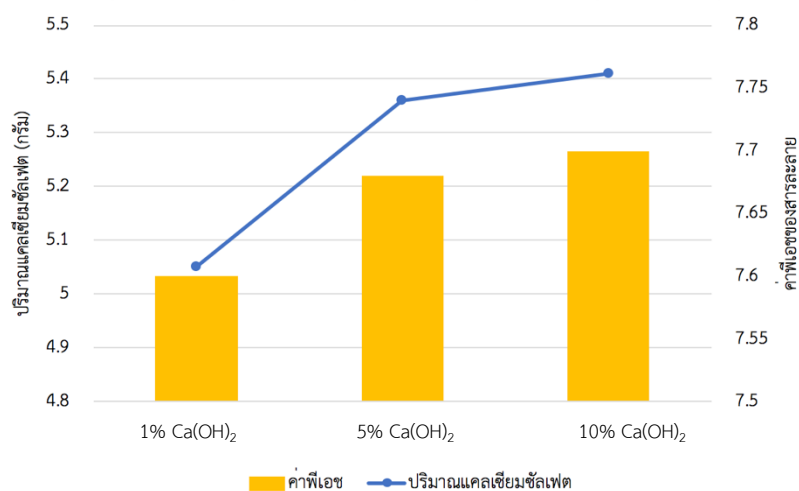
จากรูปที่ 4- 24 ได้เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของปริมาณแคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นกับค่าพีเอชสุดท้ายของสารละลาย พบว่าในทุกความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกปริมาณแคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นแปรผันตามค่าพีเอช ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Shukla Mohandas และ Kumar (2008) ที่กล่าวว่าการตกตะกอนของยิปซัมจะมากขึ้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น



ก) ความสัมพันธ์ที่กรดซัลฟิวริก 0.01 โมลาร์



ข) ความสัมพันธ์ที่กรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์



ค) ความสัมพันธ์ที่กรดซัลฟิวริก 1 โมลาร์

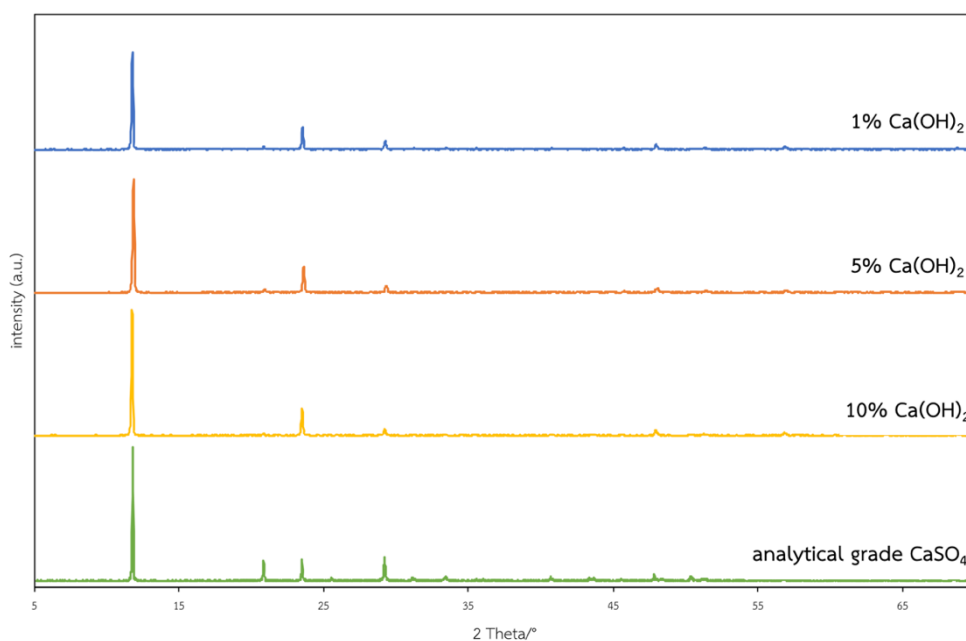
รูปที่ 4- 24 ความสัมพันธ์ของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับค่าพีเอชสุดท้ายของสารละลาย

ก) ความสัมพันธ์ที่กรดซัลฟิวริก 0.01 โมลาร์ ข) ความสัมพันธ์ที่กรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์
และ ค) ความสัมพันธ์ที่กรดซัลฟิวริก 1 โมลาร์

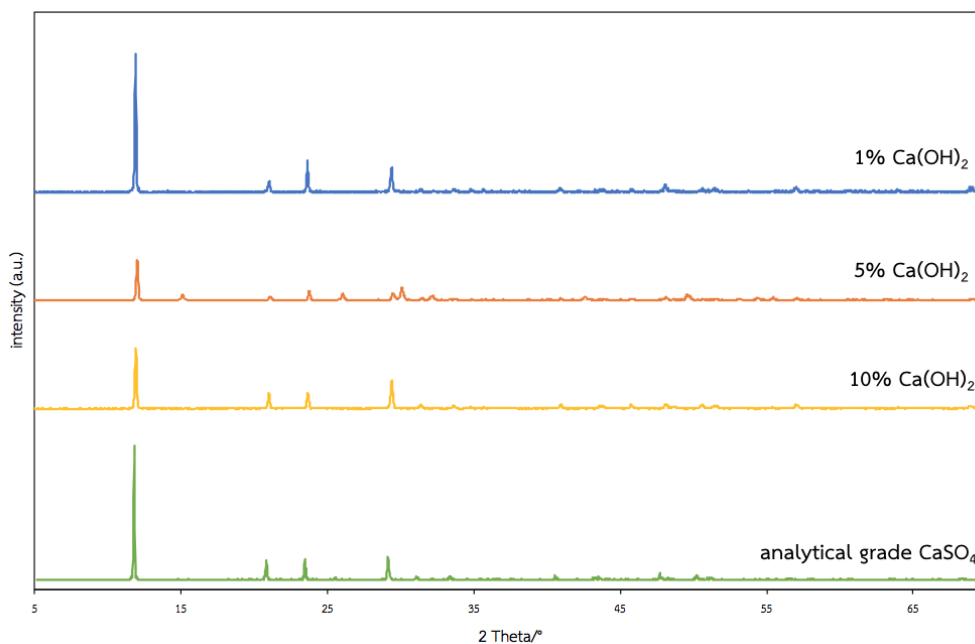
- การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระบบผลึกของแคลเซียมซัลเฟต

นำตะกอนแคลเซียมซัลเฟตที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) เพื่อเป็นการยืนยันว่าตะกอนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแคลเซียมซัลเฟตชนิดใด โดยในช่วง 5° ถึง 70° ผลึกจะปรากฏค่าพีค (Peak) แสดงจำนวนอิเล็กตรอน ซึ่งรูปผลึกยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ในระบบผลึกโมโนคลินิก (Monoclinic) จะแสดงค่าพีคใน 2Theta ที่ 11.63° 20.73° 23.39° และ 31.12° ส่วนผลึกแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรท ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$) ในระบบผลึกเฮกซะโกนอล จะแสดงค่าพีคใน 2Theta ที่ 14.76° 25.7° 29.77° และ 31.76°

จากรูปที่ 4- 25 โครงร่างผลึกของตะกอนแคลเซียมซัลเฟต ที่กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ตะกอนที่เกิดขึ้นนั้นมีปริมาณน้อยมาก (น้อยกว่า 0.05 กรัม) จึงไม่สามารถนำตะกอนมาวิเคราะห์ต่อได้ ที่กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ แสดงดังรูปที่ 4- 25(ก) พบว่าในทุกความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เติมให้ผลึกเป็นยิปซัมในระบบผลึกโมโนคลินิกทั้งหมด และ ที่กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลาร์ แสดงดังรูปที่ 4- 25(ข) มีการเปรียบเทียบระบบผลึกของแคลเซียมซัลเฟตในสารตัวอย่างจากการทดลองกับแคลเซียมซัลเฟตมาตรฐานที่มีระบบผลึกโมโนคลินิก พบว่าจากการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10 และ ร้อยละ 1 ตะกอนที่ได้เป็นยิปซัมในระบบผลึกโมโนคลินิกทั้งหมด ขณะที่การเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 5 ผลึกที่ได้มีทั้งยิปซัมในระบบผลึกโมโนคลินิก และ แคลเซียมซัลเฟตไฮเดรทในระบบผลึกเฮกซะโกนอล



ก) แคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์



ข) แคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลาร์

รูปที่ 4- 25 โครงร่างผลึกของตะกอนแคลเซียมซัลเฟตจากการทดลอง

ก) แคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ

ข) แคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลาร์

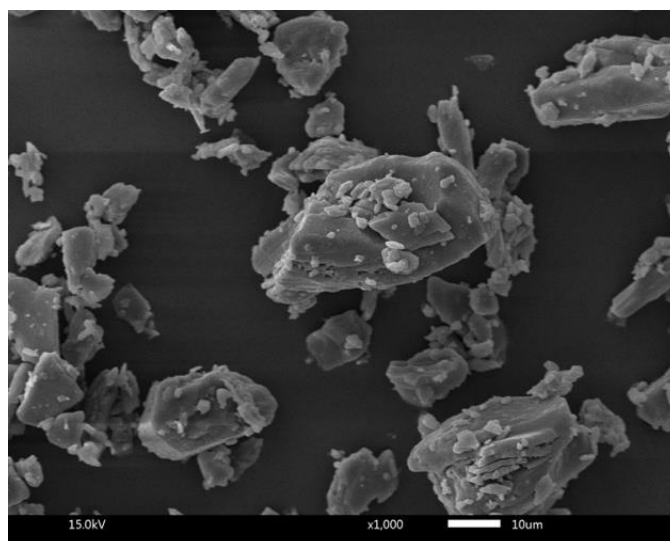
- การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อรูปและขนาดผลึกของแคลเซียมซัลเฟต

การศึกษาลักษณะสัณฐานของผลึกแคลเซียมซัลเฟต โดยใช้กล้องจุลทรรศน์เล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) พบว่าที่แคลเซียมซัลเฟตมาตรฐานผลึกมีรูปร่างและขนาด แสดงดังรูปที่ 4- 26(ก) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า พบว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นทรงสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (rhombohedron) ขนาดของผลึกเมื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางมีความยาวอยู่ในช่วง 10 – 40 ไมโครเมตร และ ความกว้างอยู่ในช่วง 10 - 25 ไมโครเมตร โดยมีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 1.4:1 และ เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) แสดงผลดังภาพ 4- 26(ข) พบว่ามีร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุ ดังนี้ ออกซิเจนร้อยละ 58.94 แคลเซียมร้อยละ 20.42 ซัลเฟอร์ร้อยละ 17.54 และ คาร์บอนร้อยละ 3

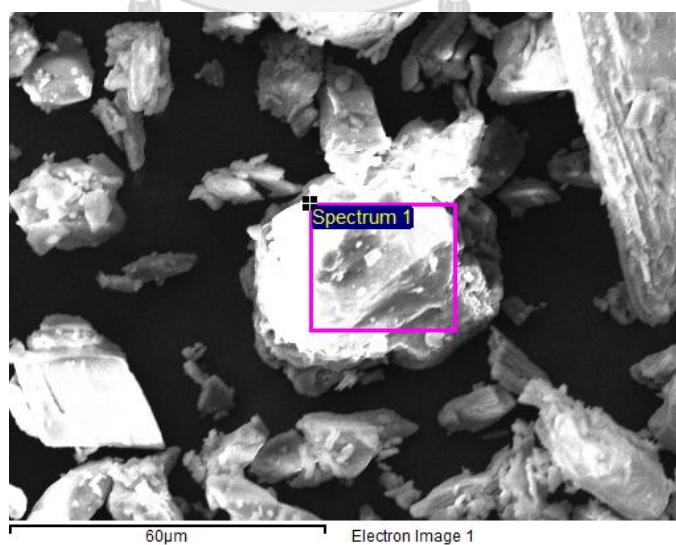
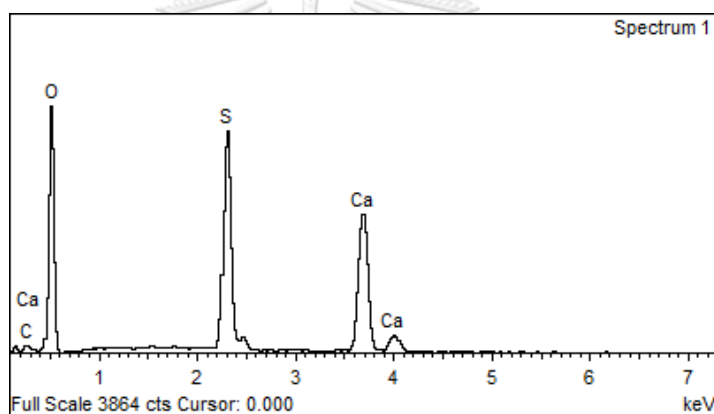
ที่การใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ผลึกที่ได้มีรูปร่าง และ ขนาดที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4- 27 ผลึกจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงดัง

รูปที่ 4- 27(ก) พบว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่น และ ผลักรูปร่างเป็นเข็ม (needle) เมื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางมีความยาวอยู่ในช่วง 13 – 22 ไมโครเมตร และ ความกว้างอยู่ในช่วง 10 - 20 ไมโครเมตร โดยมีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 1:1 และผลักรูปเข็มมีความยาวอยู่ในช่วง 10 – 15 ไมโครเมตร ผลึกจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4- 27(ข) พบว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่น และ เป็นเข็ม โดยขนาดของผลักรูปแผ่น เมื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางมีความยาวอยู่ในช่วง 20 – 40 ไมโครเมตร และ ความกว้างอยู่ในช่วง 10 - 40 ไมโครเมตร โดยมีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 2:1 และผลักรูปแท่ง มีความยาวอยู่ในช่วง 15 – 17 ไมโครเมตร ผลึกจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4- 27(ค) พบว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่น และ เป็นแท่ง ขนาดของผลักรูปแผ่น เมื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางมีความยาวอยู่ในช่วง 20 – 30 ไมโครเมตร และ ความกว้างอยู่ในช่วง 10 - 25 ไมโครเมตร โดยมีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 1.8:1 และ ผลักรูปแท่ง มีความยาวอยู่ในช่วง 10 – 20 ไมโครเมตร

ที่การใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ผลึกที่ได้มีรูปร่าง และ ขนาดที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4- 28 ผลึกจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4- 28(ก) พบว่าส่วนใหญ่มีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่น เมื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางมีความยาวอยู่ในช่วง 15 – 25 ไมโครเมตร และ ความกว้างอยู่ในช่วง 10 - 20 ไมโครเมตร โดยมีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 1.5:1 ผลึกจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4- 28(ข) พบว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่น และ ผลักรูปร่างเป็นแท่ง (rod) ปะปนอยู่บ้าง โดยขนาดของผลักรูปแผ่น เมื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางมีความยาวอยู่ในช่วง 10 - 18 ไมโครเมตร และ ความกว้างอยู่ในช่วง 6 – 10 ไมโครเมตร โดยมีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 2:1 และ ผลักรูปแท่ง มีความยาวอยู่ในช่วง 8 – 15 ไมโครเมตร ผลึกจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4- 28(ค) พบว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่น และ เป็นแท่ง ขนาดของผลักรูปแผ่น เมื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางมีความยาวอยู่ในช่วง 10 – 18 ไมโครเมตร และ ความกว้างอยู่ในช่วง 5 - 10 ไมโครเมตร โดยมีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 1.5:1 และ ผลักรูปแท่ง มีความยาวอยู่ในช่วง 11 – 15 ไมโครเมตร



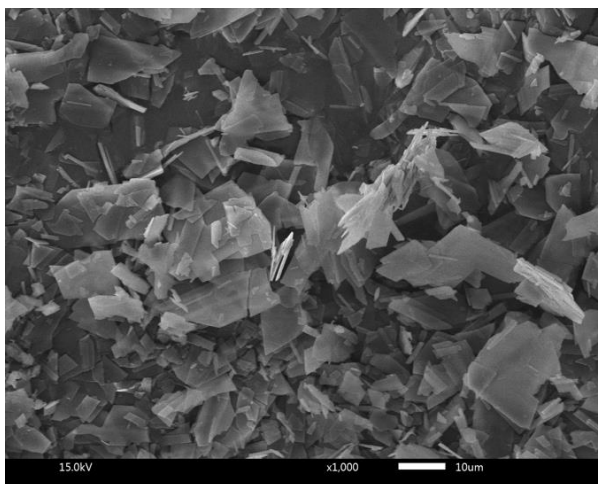
(ก) รูปผลึกแคลเซียมซัลเฟตมาตรฐาน



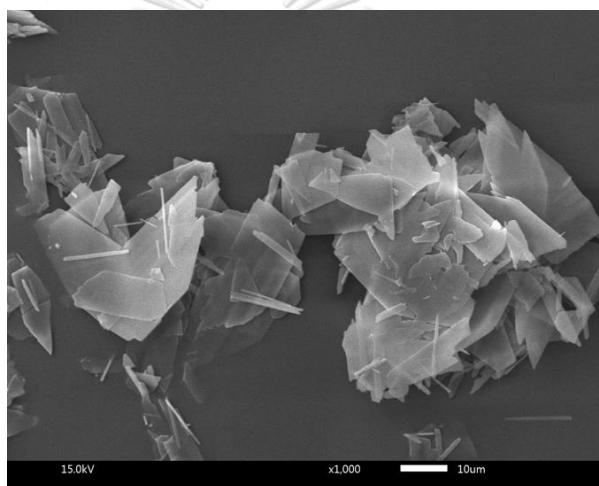
(ข) สเปกตรัม EDS ของผลึกแคลเซียมซัลเฟตมาตรฐาน

รูปที่ 4- 26 ผลึกแคลเซียมซัลเฟตมาตรฐาน

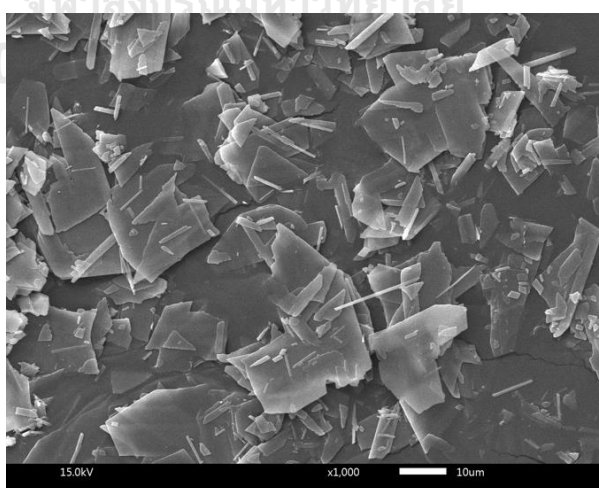
(ก) รูปผลึกแคลเซียมซัลเฟตมาตรฐาน และ (ข) สเปกตรัม EDS ของผลึกแคลเซียมซัลเฟตมาตรฐาน



ก) 1% Ca(OH)_2



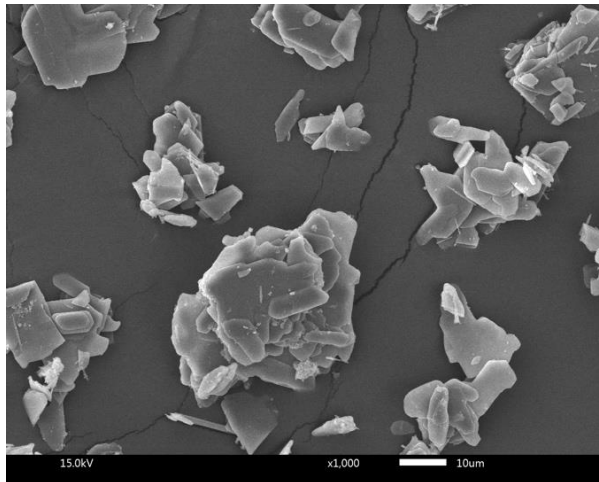
ข) 5% Ca(OH)_2



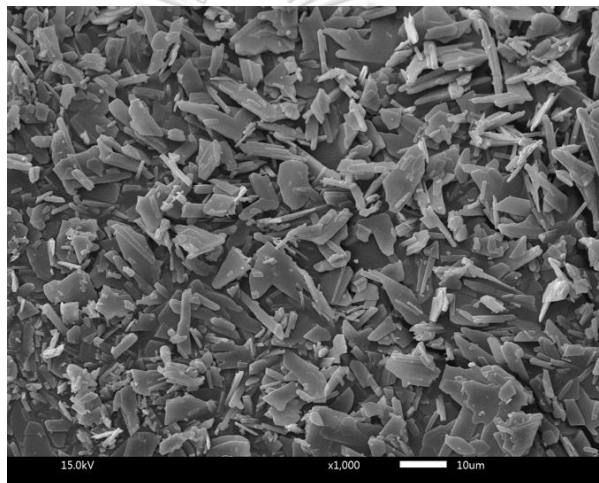
ค) 10% Ca(OH)_2

รูปที่ 4- 27 ผลึกที่ได้จากกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ กับ Ca(OH)_2 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

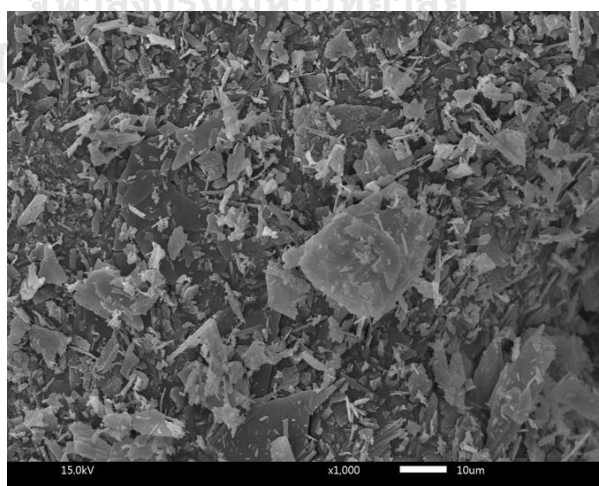
ก) 1% Ca(OH)_2 ข) 5% Ca(OH)_2 และ ค) 10% Ca(OH)_2



ก) 1% Ca(OH)_2



ข) 5% Ca(OH)_2

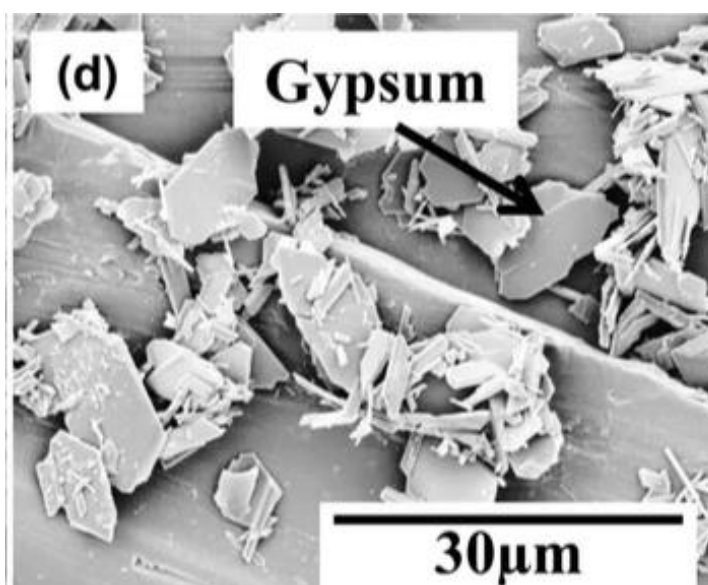


ค) 10% Ca(OH)_2

รูปที่ 4- 28 ผลึกที่ได้จากกรดซัลฟิวริก 1 โมลาร์ กับ Ca(OH)_2 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ก) 1% Ca(OH)_2 ข) 5% Ca(OH)_2 และ ค) 10% Ca(OH)_2

ลักษณะผลึกโดยรวมที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลึกรูปร่างแผ่น ปะปนอยู่กับผลึกรูปแท่งหรือเข็ม โดยเมื่อนำผลึกยิปซัมที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลึกยิปซัมจากการศึกษาของ Rabizadeh Peacock และ Benning (2014) ที่ตกผลึกยิปซัมโดยใช้กรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 200 หนึ่งส่วนในล้านส่วน ได้ผลึกรูปแผ่น ดังรูปที่ 4- 29 ผลึกที่ได้มีขนาดประมาณ 12 – 15 ไมโครเมตรซึ่งใกล้เคียงกับผลึกที่ได้จากการทดลอง

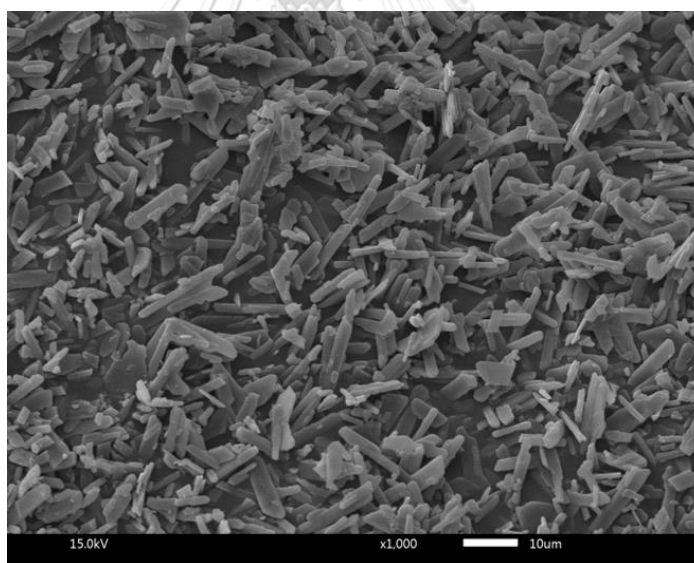


รูปที่ 4- 29 ผลึกที่ได้จากการตกผลึก
(อ้างอิงจาก Rabizadeh Peacock และ Benning, 2014)

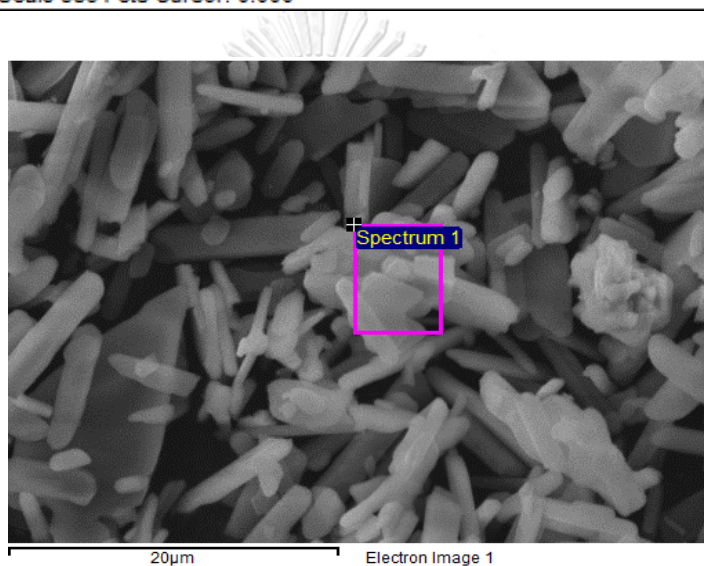
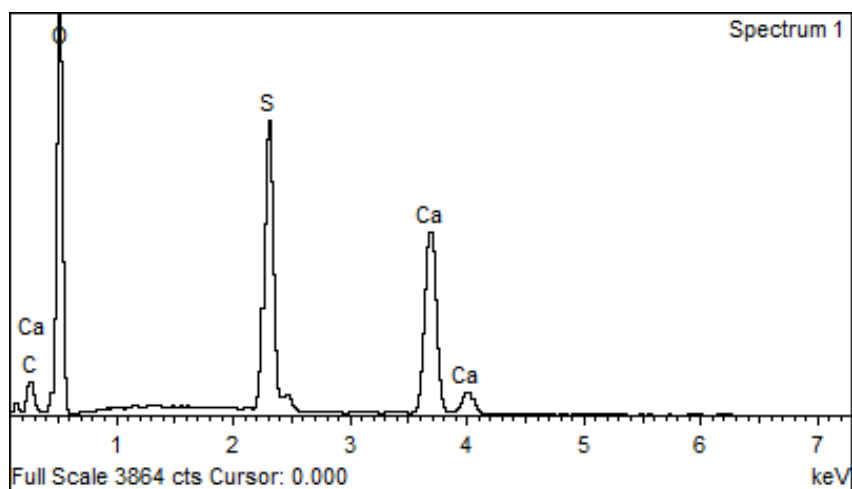
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการเปรียบเทียบขนาดของผลึกที่ได้จากการทดลองกับผลึกยิปซัมมาตรฐานและผลึกยิปซัมที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากกรดซัลฟิวริกพบว่า ผลึกยิปซัมมาตรฐานมีขนาดใหญ่กว่าผลึกยิปซัมที่สังเคราะห์ขึ้น เนื่องจากผลึกยิปซัมที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกรดยังไม่เกิดกระบวนการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) คือ กระบวนการสร้างผลึกซ้ำจากแร่ที่มีองค์ประกอบเดียวกัน หรือ การเกิดผลึกแร่ใหม่จากปฏิกิริยาการสลายตัวและการตกตะกอน ในช่วงระยะเวลาหนึ่งภายใต้อุณหภูมิและความดัน โดยกระบวนการเกิดผลึกใหม่จะช่วยให้ผลึกที่ได้มีความแข็งแรงและความบริสุทธิ์มากขึ้น รวมถึงมีผลต่อขนาดและรูปร่างของผลึกด้วย (Gorski และ Fantle, 2016) ดังนั้น ผลึกที่มาจากกรดซัลฟิวริกจึงไม่ขนาดเล็กกว่าผลึกยิปซัมมาตรฐาน

เมื่อนำกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าซึ่ง โดยสารตัวอย่างมีความเข้มข้น 3.27 โมลาร์ มาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 ได้ผลึกดังรูป 4- 30(ก) พบว่าผลึกมีลักษณะเป็นแท่ง มีความยาว 9 – 18 ไมโครเมตร ซึ่งมีความยาวของค่าเฉลี่ย (12 ไมโครเมตร) น้อยกว่าค่าเฉลี่ยของผลึกที่ได้จากการใช้กรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ (16 ไมโครเมตร) เพียงเล็กน้อย โดยในสารตัวอย่างนี้มีปริมาณของโลหะเจือปนอยู่ ดังนี้ แมกนีเซียม 14.82 มิลลิกรัม/ลิตร เหล็ก 11.84 มิลลิกรัม/ลิตร อลูมิเนียม 8.24 มิลลิกรัม/ลิตร ตะกั่ว 1.34 มิลลิกรัม/ลิตร สังกะสี 1.11 มิลลิกรัม/ลิตร และ ทองแดง 0.07 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีผลต่อรูปร่างผลึกอย่างเห็นได้ชัด จากงานวิจัยของ Deng และคณะ (2013) พบว่าแมกนีเซียมทำให้ผลึกมีรูปร่างจาง และ เหล็กทำให้ผลึกมีรูปร่างแท่ง และจากการวิเคราะห์เชิงปริมาณของผลึกนี้ด้วยเทคนิค EDS แสดงผลดังภาพ 4- 30(ข) พบว่ามีร้อยละ โดยน้ำหนักของแต่ละธาตุ ดังนี้ ออกซิเจนร้อยละ 59.82 แคลเซียมร้อยละ 16.94 ซัลเฟอร์ร้อยละ 14.56 และ คาร์บอนร้อยละ 8.67



(ก) รูปผลึกที่ได้จากกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 (ข) สเปกตรัม EDS ของผลึกจากกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4- 30 ผลึกที่ได้จากกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว

(ก) รูปผลึกที่ได้จากกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว และ (ข) สเปกตรัม EDS ของผลึกจากกรดซัลฟิวริกใช้แล้ว

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การประเมินจำนวนแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทย

ในภาพรวมแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดใหม่มีการส่งออกมากกว่าการนำเข้า และมีแนวโน้มการส่งออกที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ นอกจากนี้ยังมีการนำเข้าและส่งออกแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดใช้แล้วเพิ่มขึ้นอีกด้วย แบตเตอรี่ที่ถูกสะสมไว้ในระบบโดยเฉลี่ยมีมากถึงร้อยละ 98 ของปริมาณแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดที่นำเข้าและผลิตขึ้น เนื่องจากได้รวมถึงแบตเตอรี่ที่อยู่ระหว่างการใช้งาน โดยแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดซึ่งมีอายุการใช้งานเฉลี่ยอยู่ที่ 2-3 ปี แบตเตอรี่ที่เป็นสินค้าคงคลัง (Stock) ตามโรงงานหรือผู้ประกอบการร้านค้า ตัวอย่างเช่น ผู้ประกอบการให้เช่ารถยกไฟฟ้าที่มีการคงคลังสินค้าแทรกชั้นแบตเตอรี่ไว้มากถึง 2,500 เซลล์ จากจำนวนผู้ประกอบการทั่วประเทศที่ส่งรายงานขออนุญาตนำวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกนอกบริเวณโรงงานรายปีมีเพียง 739 แห่งเท่านั้น ทำให้ปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้วที่จัดเก็บได้ไม่ครอบคลุมปริมาณจริงที่เกิดขึ้นทั้งหมด

ในช่วง 3 ปีที่ผ่านมา ค่าร้อยละของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดใช้แล้วส่วนใหญ่ถูกจัดการอย่างถูกต้องเพิ่มขึ้น (ร้อยละ 1.68 ร้อยละ 1.75 และ ร้อยละ 1.78 ตามลำดับปี) โดยมีปริมาณเฉลี่ยอยู่ที่ปีละ 10,134 ตันต่อปี เนื่องจากมีการรณรงค์โดยใช้แรงจูงใจทางภาษีตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2543 โดยกรมควบคุมมลพิษ เช่น การเก็บภาษีจากแบตเตอรี่ที่ใช้ตะกั่วรีไซเคิลในอัตราต่ำกว่าแบตเตอรี่ที่ใช้ตะกั่วจากแหล่งธรรมชาติ อีกทั้งองค์ประกอบหลักของแบตเตอรี่ชนิดนี้มีวัสดุที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจอย่างตะกั่ว และ พลาสติก

2. การประเมินปริมาณกรดซัลฟิวริกใช้แล้วในประเทศไทย

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดโดยเฉลี่ย ประกอบด้วย ตะกั่วและตะกั่วเพอร์ออกไซด์ 63 กรดซัลฟิวริกร้อยละ 22 และ พลาสติกร้อยละ 15 ซึ่งแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดใช้แล้วกว่าร้อยละ 80 ถูกส่งไปยังโรงงานหลอมเพื่อแยกชิ้นส่วนแบตเตอรี่ และ ผลิตแผ่นตะกั่วใหม่จากแผ่นตะกั่วใช้แล้ว จากการศึกษาโรงงานประเภทนี้ 1 โรงงาน พบว่ามีกรดจากขั้นตอนการล้างกล่อง

แบตเตอรี่ 6,570 ตันต่อปี และ มีปริมาณน้ำกรดจากแทรคชั่นแบตเตอรี่เฉลี่ยที่เข้าสู่โรงงานประเภทนี้ คือ 869 ตันต่อปี ดังนั้นโรงงานประเภทนี้มีภาระน้ำเสียปนเปื้อนกรดซัลฟิวริก 7,439 ตันต่อปี

3. การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

จากการเปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจำนวน 1 ตัน พบว่าวิธีที่ได้ผลลัพธ์โดยรวมแบบเทียบหน่วยที่ดีที่สุด คือ การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นกรดซัลฟิวริกและไอน้ำ รองลงมา คือ การผลิตเป็นยิปซัมที่มีสาเหตุหลักของผลกระทบมาจากน้ำเสีย และ อันดับสุดท้าย คือ การปรับสภาพให้เป็นกลาง โดยสาเหตุที่วิธีการนี้มีค่าผลกระทบสูงกว่าวิธีอื่น ๆ เนื่องจาก ตะกอนแคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นจากการบำบัดถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบ ซึ่งถ้ามีการควบคุมชนิด และ คุณภาพของตะกอนแคลเซียมซัลเฟตจะสามารถช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการจัดการกรดซัลฟิวริกในปริมาณมาก (7,439 ตัน) พบว่าค่าของผลกระทบด้านการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์และแหล่งน้ำจืด ด้วยวิธีการผลิตเป็นยิปซัม มีค่าสูงกว่าวิธีการปรับสภาพเป็นกลาง เนื่องจากปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากวิธีการผลิตเป็นยิปซัมมีปริมาณมากกว่าวิธีการปรับสภาพเป็นกลาง หากสามารถลดปริมาณน้ำเสีย หรือ เลือกรูปแบบการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพและก่อผลเสียที่น้อยกว่า จะช่วยให้ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของวิธีการผลิตเป็นยิปซัมมีความเหมาะสมที่จะใช้ยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการจัดการกรดซัลฟิวริกใช้แล้วด้วยวิธีการผลิตเป็นยิปซัมควรใช้เมื่อมีปริมาณกรดซัลฟิวริกใช้แล้วไม่มากนัก แต่หากว่ามีปริมาณกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจำนวนมากก็ควรพิจารณาหาทางเลือกในการจัดการน้ำเสียให้ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด

4. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดของรถยนต์ไฟฟ้า พบว่าในกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ใหม่พบความเข้มข้นของโลหะเพียง 2 ชนิด ได้แก่ แมกนีเซียมและอลูมิเนียม และ พบซัลเฟตไอออนและฟลูออไรด์ไอออน ส่วนกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ใช้แล้วมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.07 - 3.27 โมลาร์ พบโลหะที่เจือปนหลายชนิด ดังนี้ แมกนีเซียม อลูมิเนียม เหล็ก สังกะสี ตะกั่วและทองแดง โดยโลหะที่พบมีปริมาณเฉลี่ยไม่เกิน 14 มิลลิกรัมต่อลิตร และ พบซัลเฟตไอออน ฟลูออไรด์ไอออน คลอไรด์ไอออนและไนเตรตไอออน โดยที่ไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกกับความเข้มข้นของโลหะ และ ไอออนลบที่พบในกรดซัลฟิวริก

5. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณและสมบัติยิปซัมจากการเติมปูนขาวในกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์

ในการทดลองตกตะกอนแคลเซียมซัลเฟตที่กรดซัลฟิวริกและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ การใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10 เหมาะสมที่จะนำไปใช้มากที่สุด เนื่องจากสามารถเพิ่มค่าพีเอชได้เร็วขึ้น ได้ตะกอนปริมาณมากที่สุดเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกเดียวกัน และตะกอนที่ได้เป็นยิปซัมทั้งหมด นอกจากนี้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกมีผลต่อปริมาณแคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นโดยการตกตะกอนแคลเซียมซัลเฟตจากกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นมากกว่า 1 โมลาร์ มีแนวโน้มให้ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตมากกว่าปริมาณที่คำนวณได้ และปริมาณแคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นแปรผันตามค่าพีเอชสุดท้ายของสารละลาย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลึกของตะกอนแคลเซียมซัลเฟตที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เป็นยิปซัมในระบบผลึกเป็นโมโนคลินิก ยกเว้นตะกอนแคลเซียมซัลเฟตที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลาร์ และ 5% แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่พบยิปซัมปนอยู่กับแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต

รูปร่างของผลึกที่เกิดขึ้นพบผลึกรูปแผ่นเป็นส่วนใหญ่ ปะปนอยู่กับผลึกรูปแท่ง และ รูปเข็ม โดยที่ผลึกรูปแผ่นมีขนาดลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ส่วนผลึกรูปแท่ง และ รูปเข็มมีความยาวและปริมาณเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก โดยผลึกที่ได้มีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับผลึกในงานวิจัยศึกษาผลึกยิปซัมที่ได้จากกรดซัลฟิวริก

ผลึกที่ได้จากการตกตะกอนด้วยสารตัวอย่างกรดซัลฟิวริกใช้แล้วจากแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าพบว่าโลหะที่เจือปนในสารตัวอย่างมีผลทำให้ขนาดของผลึกเล็กลง และ รูปร่างผลึกที่เกิดขึ้นเป็นรูปแท่งเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากโลหะที่เจือปนอยู่ในสารตัวอย่าง

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

จากการสร้างผังการไหลแบบเตอรีชนิดตะกั่ว-กรดของประเทศไทย ในช่วงปี พ.ศ. 2558 – 2560 พบว่าข้อมูลของปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้วชนิดตะกั่ว-กรดที่ได้รับการจัดการไม่ครบถ้วน และครอบคลุมทั้งหมด เนื่องจากมีการส่งรายงานขออนุญาตนำของเสียออกนอกโรงงานเพียง 739 โรงงาน จากทั้งหมด 139,446 โรงงานในกลุ่มอุตสาหกรรมสำคัญที่ยังคงประกอบกิจการ ณ สิ้นปี 2560 แสดงให้เห็นดังปริมาณของแบตเตอรี่ที่ถูกสะสมในระบบปริมาณมาก จึงทำให้ผังการไหลที่จัดทำขึ้นไม่ได้เป็นตัวแทนที่แท้จริงของปริมาณแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดในประเทศไทย แต่แสดงให้เห็นได้ว่าประเทศไทยมีปัญหาในด้านการจัดการข้อมูลของเสีย

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

6.1 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

1. การประเมินปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้วชนิดตะกั่ว-กรดในประเทศไทยมีข้อจำกัดทางข้อมูล เนื่องจากรายงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเพียงปริมาณที่คาดว่าจะนำส่งของเสียออกนอกโรงงาน ซึ่งปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้วที่เกิดขึ้นจริงอาจมีน้อยกว่าหรือมากกว่าปริมาณที่คาดการณ์ไว้ ดังนั้นหากได้ข้อมูลปริมาณแบตเตอรี่ที่ถูกจัดการจริงจะสามารถช่วยให้การประเมินปริมาณแบตเตอรี่ใช้แล้วชนิดตะกั่ว-กรดใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น

2. การทดลองตกผลึกยิปซัมควรมีการตกตะกอนโลหะที่ปนเปื้อนอยู่ในกรดซัลฟิวริกจากแบตเตอรี่ เช่น ตะกั่ว ออกไปก่อนนำมาใช้ในกระบวนการผลิตเป็นยิปซัม เพื่อให้ผลึกยิปซัมที่ได้มีคุณภาพ และ มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น

3. ฐานข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อม Ecoinvent ในโปรแกรม SimaPro ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ส่วนใหญ่เป็นค่าเฉลี่ยของกิจกรรมที่สามารถใช้เป็นตัวแทนทางภูมิศาสตร์ได้ทุกประเทศ ซึ่งผลการประเมินที่ได้ อาจจะไม่สอดคล้องกับกิจกรรมและภูมิศาสตร์ของประเทศไทย ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปหากมีการเก็บฐานข้อมูลสำหรับประเทศไทยอาจช่วยให้ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่ได้ สอดคล้องกับปัญหาที่เกิดขึ้นจริง และ ช่วยให้การวางแผนด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมได้ตรงตามสาเหตุของปัญหา

6.2 ประโยชน์ในการประยุกต์ใช้เชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

1. การศึกษานี้เป็นแนวทางในการรีไซเคิลของเสียจากอุตสาหกรรม เพื่อลดปริมาณของเสียไปยังพื้นที่หลุมฝังกลบ ลดการปนเปื้อนสิ่งแวดล้อม และ เพื่อให้เกิดการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทน

2. การออกแบบระบบบำบัดกรดซัลฟิวริกใช้แล้วที่เพิ่มการควบคุมอัตราการเติมแคลเซียม-ไฮดรอกไซด์ ความเร็วรอบกวนผสม และ การกำจัดโลหะก่อนการตกตะกอนเป็นยิปซัม จะทำให้ได้ยิปซัมที่มีสมบัติสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก.1

ประเมินค่าความไม่แน่นอนของข้อมูล (Uncertainty)

ขั้นตอนการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของข้อมูล

1. ประเมินข้อมูลที่มีแล้วให้คะแนนตามข้อบ่งชี้ให้ครบทั้ง 4 ด้าน ดังตารางที่ ก.1. 1 จากนั้นให้แปลงคะแนนที่ได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Coefficients of variation; CV) ตามตารางที่ ก.1. 2

2. เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของแต่ละตัวชี้วัดแล้วให้นำมาแทนค่าในสูตร

$$cv_{tot} = \sqrt{cv_{reliability}^2 + cv_{completeness}^2 + cv_{geogr.corr.}^2 + cv_{temp.corr.}^2 + cv_{other.corr.}^2}$$

ตารางที่ ก.1. 1 ความหมายของการบ่งชี้คุณภาพข้อมูลโดยการให้คะแนน 1 ถึง 4

Indicator	Definition	Score: 1	Score: 2	Score: 3	Score: 4
Reliability	Focus on the data source: documentation of data generation, e.g., assessment of sampling method, verification methods, reviewing processes.	Methodology of data generation well documented and consistent, peer-reviewed data.	Methodology of data generation is described, but not fully transparent; no verification.	Methodology not comprehensively described, but principle of data generation is clear, no verification.	Methodology of data generation unknown, no documentation available.
Completeness	Composition of the data of all relevant mass flows. Possible over or underestimation is assessed.	Value includes all relevant processes/flows in question.	Value includes quantities main processes/flows in question.	Value includes partial important processes/flows certainly of data gaps.	Only fragmented data available; important processes/flows are missing.
Temporal correlation	Congruence of the available data and the ideal date with respect to time reference.	Value relates to the right time period	Deviation of value 1 to 5 years.	Deviation of value 5 to 10 years.	Deviation of value more than 10 years.
Geographical correlation	Congruence of the available data and the ideal date with respect to geographical reference.	Value relates to studied region.	Value related to similar socioeconomic region (GDP, consumption, pattern)	Socioeconomically slightly different region.	Socioeconomically very different region.

ตารางที่ ก.1. 2 การแปลงค่าคะแนนเป็นค่า CV

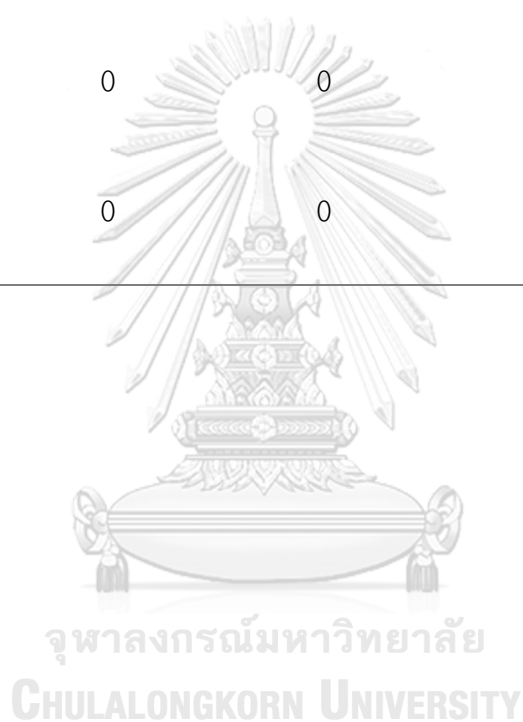
Reliability				
CV (%)	Score 1	Score 2	Score 3	Score 4
	2.3	6.8	20.6	62.3
Completeness/ Temporal correlation/ Geographical correlation				
Highly sensitivity	0.0	4.5	13.7	41.3
Medium sensitivity	0.0	2.3	6.8	20.6
Not sensitivity	0.0	1.1	3.4	10.3

ตารางที่ ก.1. 3 คะแนนที่ได้จากการประเมินคุณภาพข้อมูล

Score				
	ปริมาณแบตเตอรี่ ใช้แล้ว	ปริมาณนำเข้า- ส่งออก	ปริมาณที่ผลิตได้ ในประเทศ	ร้อยละรีไซเคิล แบตเตอรี่ตะกั่ว- กรด ในประเทศ
Reliability	2	2	2	3
Completeness	2	1	2	2
Temporal correlation	1	1	1	2
Geographical correlation	1	1	1	1

ตารางที่ ก.1. 4 ค่า CV ที่ได้จากการประเมินคุณภาพข้อมูล

	Score			
	ปริมาณแบตเตอรี่ ใช้แล้ว	ปริมาณนำเข้า- ส่งออก	ปริมาณที่ผลิตได้ ในประเทศ	ร้อยละรีไซเคิล แบตเตอรี่ตะกั่ว- กรด ในประเทศ
Reliability	6.8	6.8	6.8	20.6
Completeness	4.5	0	4.5	4.5
Temporal correlation	0	0	0	4.5
Geographical correlation	0	0	0	0





ภาคผนวก ก.2

ข้อมูลปริมาณแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.2.1 ข้อมูลปริมาณแบบเตอร์ชนิดตะกั่ว-กรดจากกรมศุลกากร (ชิ้น)

ข้อมูลจากกรมศุลกากร						
นำเข้า (ชิ้น)						
	แบบเตอร์ใหม่		แบบเตอร์ใช้แล้ว			
	เครื่องยนต์แบบลูกสูบ	อื่น ๆ	เครื่องยนต์แบบลูกสูบ	อื่น ๆ	รวม	รวม
พิกัดศุลกากร	8507.10	8507.20	8507.10	8507.20	-	-
2558	2,947,349	2,649,014	1	2	3	3
2559	3,471,176	3,274,327	12	290	302	302
2560	5,620,584	3,176,932	10,211	4,465	14,676	14,676
ส่งออก (ชิ้น)						
	แบบเตอร์ใหม่		แบบเตอร์ใช้แล้ว			
	เครื่องยนต์แบบลูกสูบ	อื่น ๆ	เครื่องยนต์แบบลูกสูบ	อื่น ๆ	รวม	รวม
พิกัดศุลกากร	8507.10	8507.20	8507.10	8507.20	-	-
2558	6,592,488	1,068,498	4	0	4	4
2559	7,716,356	1,026,339	68	2	70	70
2560	8,444,294	1,862,824	1	385	386	386

ตารางที่ ก.2. 2 ข้อมูลปริมาณการผลิตแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดในประเทศไทย (ชิ้น)

รหัส ISIC	ข้อมูลจากสถิติอุตสาหกรรม		
	เครื่องยนต์แบบลูกสูบ		
	27200g	อื่น ๆ	รวม
2558	2,947,349	8507.20	-
2559	3,471,176	2,649,014	5,596,363
2560	5,620,584	3,274,327	6,745,503
ส่งออก (ชิ้น)		3,176,932	8,797,516





ภาคผนวก ข

การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข

การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ ข. 1 รายการฐานข้อมูลที่ใช้

กระบวนการ	รายละเอียดฐานข้อมูล	แหล่งที่มา
การฟื้นฟูสภาพ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่	<ul style="list-style-type: none"> - Water, deionised, from tap water, at user {RoW} market for water, deionised, from tap water, at user Alloc Def, S - Electricity, high voltage {TH} production mix Alloc Def, S - Process steam, sulfuric acid production/RER Mass - Sulfuric acid {RoW} production Alloc Def, S - Lime, packed {RoW} market for lime, packed Alloc Def, S - Waste gypsum {RoW} treatment of waste gypsum, sanitary landfill Alloc Def, S - Waste water treatment, chemical reduction/oxidation process, municipal waste water, at waste water treatment plant RER 	Ecoinvent
การปรับสภาพให้เป็นกลาง	<ul style="list-style-type: none"> - Lime, packed {RoW} market for lime, packed Alloc Def, S - Gypsum, mineral {RoW} gypsum quarry operation Alloc Def, S - Waste water treatment, chemical reduction/oxidation process, municipal waste water, at waste water treatment plant RER 	Ecoinvent
การผลิตเป็นยิปซัม	<ul style="list-style-type: none"> - Lime, packed {RoW} market for lime, packed Alloc Def, S - Gypsum, mineral {RoW} gypsum quarry operation Alloc Def, S - Waste water treatment, chemical reduction/oxidation process, municipal waste water, at waste water treatment plant RER 	Ecoinvent

ตารางที่ ข. 2 ค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

กลุ่มผลกระทบ	หน่วย	ค่าผลกระทบ
การทำลายทรัพยากร	kg Sb eq	-0.0042
การทำลายเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์	MJ	-13,089.92
การเกิดภาวะโลกร้อน	kg CO ₂ eq	-192.62
การทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ	kg CFC-11 eq	-9.98 x10 ⁻⁵
การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์	kg 1,4-DB eq	-263.86
การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด	kg 1,4-DB eq	-103.20
การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำเค็ม	kg 1,4-DB eq	-368,603.61
การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อดิน	kg 1,4-DB eq	-0.62
การออกซิเดชันจากปฏิกิริยาแสง-เคมี	kg C ₂ H ₄ eq	-0.43
การเกิดสภาวะความเป็นกรด	kg SO ₂ eq	-10.17
การเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหาร	kg PO ₄ ⁻ eq	-0.50

ตารางที่ ข. 3 ค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการปรับสภาพให้เป็นกลาง

กลุ่มผลกระทบ	หน่วย	ค่าผลกระทบ
การทำลายทรัพยากร	kg Sb eq	7.49×10^{-5}
การทำลายเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์	MJ	866.98
การเกิดภาวะโลกร้อน	kg CO ₂ eq	60.57
การทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ	kg CFC-11 eq	6.67×10^{-6}
การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์	kg 1,4-DB eq	1,135.78
การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด	kg 1,4-DB eq	93.22
การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำเค็ม	kg 1,4-DB eq	11,476,208.21
การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อดิน	kg 1,4-DB eq	1.10
การออกซิเดชันจากปฏิกิริยาแสง-เคมี	kg C ₂ H ₄ eq	1.65
การเกิดสภาวะความเป็นกรด	kg SO ₂ eq	41.16
การเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหาร	kg PO ₄ ⁻⁻ eq	0.17

ตารางที่ ข. 4 ค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการผลิตเป็นยิปซัม

กลุ่มผลกระทบ	หน่วย	ค่าผลกระทบ
การทำลายทรัพยากร	kg Sb eq	4.11×10^{-5}
การทำลายเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์	MJ	346.35
การเกิดภาวะโลกร้อน	kg CO ₂ eq	32.48
การทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ	kg CFC-11 eq	1.78×10^{-6}
การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์	kg 1,4-DB eq	442.24
การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด	kg 1,4-DB eq	49.08
การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำเค็ม	kg 1,4-DB eq	92,228.39
การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อดิน	kg 1,4-DB eq	1.08
การออกซิเดชันจากปฏิกิริยาแสง-เคมี	kg C ₂ H ₄ eq	0.009
การเกิดสภาวะความเป็นกรด	kg SO ₂ eq	0.13
การเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหาร	kg PO ₄ ⁻⁻ eq	0.15



ภาคผนวก ค

การคาดการณ์ค่าใช้จ่ายจากการบำบัดน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค. 1 การคาดการณ์ค่าใช้จ่ายจากการบำบัดน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรด

แหล่งกำเนิด	วิธีการบำบัด	ค่าใช้จ่ายการบำบัด ต่อ 1,000 แกลลอน	
		ดอลลาร์สหรัฐ	บาท (1 usd = 30.24 THB)
Argo Tunnel (Denver, CO)	การตกตะกอนด้วยโซเดียม-ไฮดรอกไซด์ (NaOH)	23.96	724.43
Eagle Mine (Eagle County, CO)	การตกตะกอนด้วยแคลเซียม-ไฮดรอกไซด์ (Ca(OH) ₂)	3.39	102.51
Leadville Mine Drainage Tunnel (Leadville, CO)	CO ₂ stripping และ การตกตะกอนด้วยโซเดียม-ไฮดรอกไซด์ (NaOH)	5.19	156.87
Golden Sunlight Mine (Whitehall, MT)	การตกตะกอนด้วยแคลเซียม-ไฮดรอกไซด์ (Ca(OH) ₂)	5.01	151.56
Tyrone Mine (Tyrone, NM)	การตกตะกอนด้วยแคลเซียม-ไฮดรอกไซด์ (Ca(OH) ₂)	15.27	461.79

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กนกพร อินแดง
วัน เดือน ปี เกิด	2 กรกฎาคม 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2558 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2560 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	19/49 ซอยคูบัว 28 ถนนคูบัว แขวงรามอินทรา เขตคันนายาว กรุงเทพมหานคร 10230
ผลงานตีพิมพ์	Intang K., Khaodhjar S., and Attaphong C., “Life Cycle Assessment of Spent Sulfuric Acid from Lead-acid Traction Battery in Thailand”, International Journal of Environmental Science and Development. 2019, 10 (9), 270-274.
รางวัลที่ได้รับ	Best Presentation award from 2019 Second Asia Conference on Energy and Environment Engineering