

การปรับปรุงกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกจากน้ำกรดกำจัดสนิมเหล็กด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน



นายอาทร วุฒิสัตย์วงศ์กุล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2109-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF HYDROCHLORIC ACID RECOVERY FROM STEEL PICKLING LIQUOR  
USING ION EXCHANGE METHOD

Mr. Atorn Wutisatwongkul

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
For the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2109-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกจากน้ำกรดกำจัดสนิมเหล็ก  
ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน  
โดย นายอาทร วุฒิสัตย์วงศ์กุล  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติสุขุมกร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติสุขุมกร)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. มนต์วี วงศ์ศรี)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อาทรร วุฒิสต์ย้งวงศ์กุล: การปรับปรุงกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกจากน้ำกรดกำจัดสนิมเหล็กด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (IMPROVEMENT OF HYDROCHLORIC ACID RECOVERY FROM STEEL PICKLING LIQUOR USING ION EXCHANGE METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร: 177 หน้า. ISBN 974-17-2109-9

ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก กรดเสียที่เกิดจากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งเป็นวิธีการที่ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ในหน่วยปฏิบัติการนำกลับกรดด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งประกอบด้วย หอเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก และหอเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ ถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการนำกลับโดยคำนึงถึงกรดเสียที่ประกอบไปด้วยกรดและไอออนของเหล็ก โดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกใช้สำหรับดึงเหล็ก (Fe II) ออกจากกรดเสีย ในขณะที่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบใช้สำหรับดึงเหล็ก (Fe III) ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนไอออนลบของคลอไรด์ ( $FeCl_4^-$ ) ออกจากกรดเสีย

ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการศึกษาหาอัตราการไหลของกรดเสียที่เหมาะสม ทั้งในสภาวะการปฏิบัติงานปกติและการรีเจเนอเรตของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกและไอออนลบ รวมทั้งศึกษาโครงสร้างของหอแลกเปลี่ยนไอออนบวกและหอแลกเปลี่ยนไอออนลบเพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการให้มีประสิทธิภาพในการนำกลับกรดจากกรดเสียได้ดีที่สุด และกระบวนการนี้จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการนำกลับกรดและการศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์ กับกระบวนการแบบดั้งเดิม

จากการทดลอง พบว่าที่อัตราการไหลของกรดเสียต่ำๆ จะสามารถนำกลับกรดได้ดีกว่าใช้อัตราการไหลสูงๆ ในขณะที่เดียวกันความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมที่ใช้ในการรีเจเนอเรตเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกคือ 1.5 โมลต่อลิตร และจากการปรับปรุงกระบวนการโดยการนำหอเรซินสองหอมาต่อกันแบบอนุกรมจะสามารถนำกลับกรดได้ดีที่สุด โดยที่หอแรกจะบรรจุเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก และหอที่สองบรรจุเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ จากการทดลองพบว่ากระบวนการที่ปรับปรุงนี้มีประสิทธิภาพในการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกดีกว่า และให้ระยะเวลาคืนทุนเร็วกว่ากระบวนการนำกลับกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กในปัจจุบัน

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา	2545	

# # 4270661621: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: ACID RECOVERY / PICKLE LIQUOR / ION EXCHANGE / RESIN  
 ATORN WUTISATWONGKUL: IMPROVEMENT OF HYDROCHLORIC  
 ACID RECOVERY FROM STEEL PICKLING LIQUOR USING ION  
 EXCHANGE METHOD. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. PAISAN  
 KITTISUPAKORN, Ph.D., 177 pp. ISBN 974-17-2109-9

In steel industry, steel pickle liquor can be recovered by an ion exchange method leading to energy and operating cost saving. An ion exchange recovery unit consisting of both cationic and anionic resin columns has been devised to study recovery behavior regarding to the waste acid containing acid and iron ions. Cationic resins are used to remove Fe (II) whereas anionic resins are used to remove Fe (III) in the waste acid.

This research is aimed at studying an appropriate flow rate of waste acid flowing to either cationic or anionic resin column with respect to operating and regenerating modes. In addition, this work studies the configuration of the cationic and anionic resin columns to provide the best acid recovery from the waste acid. Finally this process was compared with two conventional processes both acid recovery efficiency and economic study.

Experimental results have shown that the low flow rate of the waste acid can provide better recovery of the acid than the high flow rate. Furthermore, the most appropriate concentration of HCl used in cationic resin regeneration is 1.5 mole/liter. The best hydrochloric acid recovery configuration can be obtained by 2 resin columns in series: the first column containing the cationic resins and the second columns containing anionic resins. This configuration provides gives more effectiveness in acid recovery and shorter break even point than one presently used in steel process industry.

Department Chemical Engineering

Student's signature .....

Field of Study Chemical Engineering

Advisor's signature .....

Academic Year 2002

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้โดยได้รับความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร ที่ได้ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำ ให้แนวคิด ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และยังแก้ไขและตรวจทานวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งให้กำลังใจในการฟันฝ่าอุปสรรคต่างๆ จนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล ประธานกรรมการ, อาจารย์ ดร. มนต์รี วงศ์ศรี ที่กรุณาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้ความสนใจและให้ข้อคิดเห็น ตลอดจนแนะแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยฉบับนี้เป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ บริษัท เบนเนอเมเยอร์ จำกัด ที่ได้กรุณาบริจาค เรซินมา 2 ชนิด คือแบบแลกเปลี่ยน อีออนแบบกรดแก่ (C-100) และแบบแลกเปลี่ยนอีออนลบแบบต่างแก่ (A-400) ซึ่งเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัยฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มอบโอกาสให้ข้าพเจ้าได้เข้ามาศึกษาจนสำเร็จการศึกษา เพื่อที่จะได้นำความรู้ที่ได้รับนี้ไปพัฒนาประเทศต่อไป

ขอขอบพระคุณ หอสมุดกลาง ตลอดจนหอสมุดคณะทุกคณะ ที่เป็นแหล่งความรู้ให้ข้าพเจ้าได้เข้าไปศึกษาหาความรู้ และค้นคว้าหาข้อมูลที่จำเป็นต่องานวิจัยฉบับนี้เป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และน้องๆ ทุกคนที่ศึกษาอยู่ในกลุ่มงานวิจัยการควบคุมกระบวนการ และขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และน้องๆ ทุกคนที่ข้าพเจ้ารู้จัก ที่ได้ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย ตลอดจนคอยเป็นกำลังใจ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ นายเอกพจน์ วุฒิสัตย์วงศ์กุล และนายอาทิตย์ วุฒิสัตย์วงศ์กุล พี่ชายของข้าพเจ้า ที่ได้คอยเป็นกำลังใจ ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาด้วยดีเสมอมา

ท้ายนี้ข้าพเจ้าต้องขอกราบขอบพระคุณ นายชิมเสง วุฒิสัตย์วงศ์กุล, นางรำเพย วุฒิสัตย์วงศ์กุล บิดา และมารดาของข้าพเจ้า ที่ได้ให้กำเนิด ให้ความรัก คอยเป็นกำลังใจตลอดจนให้การสนับสนุนด้านการศึกษาต่อข้าพเจ้า จนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษาและสามารถดำเนินชีวิตได้ด้วยดียิ่ง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในงานวิจัย.....	5
1.7 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	5
2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	7
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนมาใช้ในกระบวนการนำกลับกรด.....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนมาใช้ในระบบนำกลับ.....	9
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนำกลับกรดด้วยวิธีการต่างๆ.....	12
3 ทฤษฎี.....	16
3.1 กระบวนการแปรรูปเหล็กและกระบวนการกำจัดสนิม.....	16
3.1.1 กระบวนการแปรรูปเหล็ก.....	16
3.1.2 กระบวนการกำจัดสนิม.....	16
3.2 กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก.....	21
3.2.1 การระเหย (Evaporation).....	21
3.2.2 ไพโรไฮโดรไลซิส (Pyrohydrolysis).....	23
3.2.3 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange).....	24
3.2.4 การใช้เยื่อเมมเบรน (Membrane).....	28

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 ทฤษฎีการแยกโลหะด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน.....	29
3.3.1 การจำแนกประเภทของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	32
3.3.2 คุณสมบัติของเรซิน.....	34
3.3.3 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน.....	37
3.3.4 เทคนิคการรีเจนเนอเรต.....	38
4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	39
4.1 ศึกษาวิธีการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก และรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องต่องานวิจัย.....	40
4.2 ศึกษาและสร้างแบบจำลองกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน.....	40
4.2.1 กระบวนการตั้งเหล็กแบบใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	40
4.2.2 กระบวนการตั้งเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ.....	41
4.3 ทำการศึกษาหาอัตราการไหลของกรดเสีย และความเข้มข้นกรดในการรีเจนเนอเรตเรซิน.....	43
4.3.1 ศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	43
4.3.2 ศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ.....	43
4.3.3 ศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการรีเจนเนอเรตเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	43
4.3.4 ศึกษาหาความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสมในการรีเจนเนอเรตเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	43
4.3.5 ศึกษาหาอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมในการรีเจนเนอเรตเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ.....	43
4.4 ออกแบบและสร้างกระบวนการนำกลับด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในโครงการวิจัย.....	44
4.5 หาประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของแบบจำลอง.....	44
4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์.....	45
4.7 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด.....	47
5 ผลการทดลอง.....	48
5.1 สร้างแบบจำลองกระบวนการด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน.....	48
5.2 ผลการศึกษาหาอัตราการไหลของกรดเสีย และความเข้มข้นกรดในการรีเจนเนอเรตเรซิน.....	50
5.2.1 ผลการศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	50
5.2.2 ผลการศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ.....	55
5.2.3 ผลการศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการรีเจนเนอเรตเรซินประจุบวก.....	60
5.2.4 ผลการศึกษาหาความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสมในการรีเจนเนอเรตเรซินประจุบวก.....	62
5.2.5 ผลการศึกษาหาอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมในการรีเจนเนอเรตเรซินประจุลบ.....	64



**สารบัญ (ต่อ)**

บทที่	หน้า
5.3 การออกแบบและสร้างกระบวนการนำกลับด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในโรงงานวิจัย.....	66
5.4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของแบบจำลองต่างๆ.....	68
5.4.1 เปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่าง 1 ที่อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง.....	68
5.4.2 เปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่าง 2 ที่อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง.....	71
5.4.3 เปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่าง 3 ที่อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง.....	74
5.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์.....	77
5.5.1 เปรียบเทียบกระบวนการกำจัดสนิมขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร.....	77
5.5.2 เปรียบเทียบกระบวนการกำจัดสนิมขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร.....	78
5.5.3 เปรียบเทียบกระบวนการกำจัดสนิมขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร.....	79
6 สรุปผลการวิจัย.....	80
6.1 สรุปผลการศึกษาหาอัตราการไหลของกรดเสีย และความเข้มข้นกรดในการรีเจนเนอเรชั่น.....	80
6.1.1 สรุปผลการหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวกและประจุลบ.....	80
6.1.2 สรุปผลการหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการรีเจนเนอเรชั่นประจุบวก.....	80
6.1.3 สรุปผลการหาความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสมในการรีเจนเนอเรชั่นประจุบวก.....	81
6.1.4 สรุปผลการหาอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมในการรีเจนเนอเรชั่นประจุลบ.....	81
6.2 สรุปการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของแบบจำลองต่างๆ.....	81
6.3 สรุปการเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์.....	81
รายการอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก	
ก. ข้อมูลสำรวจโรงงาน.....	89
ข. มาตรฐานน้ำทิ้งและอากาศทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	94
ค. คุณสมบัติของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	100
ง. แสดงผลการทดลอง.....	105
จ. ผลการทดลองเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพ.....	134
ฉ. ตารางข้อมูลใช้ในการอ้างอิงการคำนวณระยะเวลาคืนทุน.....	149
ช. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการเชิงเศรษฐศาสตร์.....	154
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	177

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.1 สรุปรูปอุตสาหกรรมเหล็ก.....	18
รูปที่ 3.2 แผนผังกระบวนการกำจัดสนิม.....	19
รูปที่ 3.3 แสดงระบบการจัดการสารละลายกรดในกระบวนการกำจัดสนิมเหล็ก.....	20
รูปที่ 3.4 แสดงกระบวนการระเหย.....	22
รูปที่ 3.5 แสดงการนำกลับกรดด้วยกระบวนการไพโรไฮโดรไลซิส.....	24
รูปที่ 3.6 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของกรด.....	26
รูปที่ 3.7 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของเหล็ก.....	27
รูปที่ 3.8 แสดงกระบวนการนำกลับกรดโดยการใช้เยื่อเมมเบรน.....	28
รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างสารที่ได้จากการโพลีเมอไรซ์ระหว่างสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน.....	31
รูปที่ 3.10 แสดงปฏิกิริยาซัลโฟเนชันของสารโพลีเมอร์.....	31
รูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดอ่อน.....	33
รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบต่างแก่.....	33
รูปที่ 3.13 แสดงตัวอย่างเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบต่างอ่อน.....	34
รูปที่ 4.1 แสดงกระบวนการกำจัดสนิมที่ทำให้เกิดกรดเสียที่นำมาใช้ในงานวิจัย.....	39
รูปที่ 4.2 กระบวนการดั่งเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	41
รูปที่ 4.3 กระบวนการดั่งเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ.....	42
รูปที่ 4.4 แบบจำลองกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในงานวิจัย.....	45
รูปที่ 5.1 แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองหาอัตราการไหลที่เหมาะสม.....	49
รูปที่ 5.2 แสดงแบบจำลองที่สร้างขึ้นสำหรับการทดลอง.....	49
รูปที่ 5.3 แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 1 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	50
รูปที่ 5.4 แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 2 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	51
รูปที่ 5.5 แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 3 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	52
รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลาของกรดเสียตัวอย่างที่ 1.....	53
รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลาของกรดเสียตัวอย่างที่ 2.....	54
รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลาของกรดเสียตัวอย่างที่ 3.....	54
รูปที่ 5.9 แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 1 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ.....	55
รูปที่ 5.10 แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 2 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ.....	56

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.11 แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 3 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ.....	57
รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลาของกรดเสียตัวอย่างที่ 1.....	58
รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลาของกรดเสียตัวอย่างที่ 2.....	59
รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลาของกรดเสียตัวอย่างที่ 3.....	59
รูปที่ 5.15 แสดงการรีเจนเนอเรตแลกเปลี่ยนประจุบวกด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่อัตราการไหลต่างๆ.....	60
รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ออกมาในการรีเจนเนอเรตแลกเปลี่ยน ประจุบวกเทียบกับเวลา ที่อัตราการไหลต่างๆ.....	61
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงการรีเจนเนอเรตแลกเปลี่ยนประจุบวกด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	62
รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ออกมาในการรีเจนเนอเรตแลกเปลี่ยน ประจุบวกเทียบกับเวลา ที่ความเข้มข้นของกรดต่างๆ.....	63
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงการรีเจนเนอเรตเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบด้วยน้ำที่อัตราการไหลต่างๆ.....	64
รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ออกมาในการรีเจนเนอเรตแลกเปลี่ยน ประจุลบเทียบกับเวลา ที่อัตราการไหลต่างๆ.....	65
รูปที่ 5.21 แบบจำลองกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในงานวิจัย.....	66
รูปที่ 5.22 แสดงแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดลอง.....	67
รูปที่ 5.23 แสดงลักษณะของหอคอลัมน์ที่สร้างขึ้นในการทดลอง.....	67
รูปที่ 5.24 แสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบกระบวนการ สำหรับกรดเสียตัวอย่าง 1.....	68
รูปที่ 5.25 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลา ของกรดเสียตัวอย่าง 1 ของกระบวนการต่างๆ.....	69
รูปที่ 5.26 แสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบกระบวนการ สำหรับกรดเสียตัวอย่าง 2.....	71
รูปที่ 5.27 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลา ของกรดเสียตัวอย่าง 2 ของกระบวนการต่างๆ.....	72
รูปที่ 5.28 แสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบกระบวนการ สำหรับกรดเสียตัวอย่าง 3.....	74
รูปที่ 5.29 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลา ของกรดเสียตัวอย่าง 3 ของกระบวนการต่างๆ.....	75
รูปที่ 5.30 แสดงระยะเวลาคืนทุนในแต่ละกระบวนการที่มีขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร.....	77
รูปที่ 5.31 แสดงระยะเวลาคืนทุนในแต่ละกระบวนการที่มีขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร.....	78
รูปที่ 5.32 แสดงระยะเวลาคืนทุนในแต่ละกระบวนการที่มีขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร.....	79

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.1 แสดงไดอะแกรมการทำงานโดยนำกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกมาใช้ร่วมกับ กระบวนการกำจัดสนิมเหล็ก.....	83
รูปที่ 6.2 แสดงกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่สามารถนำไปใช้ร่วมกับกระบวนการกำจัด สนิมเหล็กในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก.....	84



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	แสดงการเปรียบเทียบระบบการดองกรดกลับ.....6
5.1	แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 1 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก.....51
5.2	แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 2 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก.....52
5.3	แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 3 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก.....53
5.4	แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 1 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ.....56
5.5	แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 2 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ.....57
5.6	แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 3 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ.....58
5.7	แสดงผลการทดลองการรีเจนเนอเรตเรซินประจุบวกด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่อัตราการไหลต่างๆ...60
5.8	แสดงการรีเจนเนอเรตเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างๆ.....62
5.9	แสดงการรีเจนเนอเรตเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบด้วยน้ำที่อัตราการไหลต่างๆ.....64
5.10	ตารางเปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 1 เมื่อปฏิบัติงานจนเรซินอิ่มตัว.....69
5.11	ตารางเปรียบเทียบกระบวนการ โดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 1 เมื่อปฏิบัติงาน จนปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 0.5 กรัมต่อลิตร.....70
5.12	ตารางเปรียบเทียบกระบวนการ โดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 1 เมื่อปฏิบัติงาน จนปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 1 กรัมต่อลิตร.....70
5.13	ตารางเปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 2 เมื่อปฏิบัติงานจนเรซินอิ่มตัว.....72
5.14	ตารางเปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 2 เมื่อปฏิบัติงานจน ปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 0.5 กรัมต่อลิตร.....73
5.15	ตารางเปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 2 เมื่อปฏิบัติงาน จนปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 1 กรัมต่อลิตร.....73
5.16	ตารางเปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 3 เมื่อปฏิบัติงานจนเรซินอิ่มตัว.....75
5.17	ตารางเปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 3 เมื่อปฏิบัติงานจน ปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 0.5 กรัมต่อลิตร.....76
5.18	ตารางเปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 3 เมื่อปฏิบัติงานจน ปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 1 กรัมต่อลิตร.....76
6.1	แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ ของกระบวนการขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร.....82
6.2	แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ ของกระบวนการขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร.....82
6.3	แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ ของกระบวนการขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร.....82
ก.1	แสดงปริมาณการใช้ลวดเหล็กและกรดไฮโดรคลอริก.....90
ก.2	แสดงสภาวะของ Pickling solution.....91

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.3 แสดงปริมาณการสูญเสียกรดไฮโดรคลอริก.....	92
ค.1 แสดงคุณสมบัติของเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดแก่ (C - 100).....	101
ค.2 แสดงข้อมูลการทำงานของเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดแก่ (C - 100).....	102
ค.3 แสดงคุณสมบัติของเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบต่างแก่ (A - 400).....	103
ค.4 แสดงข้อมูลการทำงานของเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบต่างแก่ (A - 400).....	104
ง.1 แสดงข้อมูลการทดลองของการดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง.....	107
ง.2 แสดงข้อมูลการทดลองของการดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง.....	108
ง.3 แสดงข้อมูลการทดลองของการดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง.....	109
ง.4 แสดงข้อมูลการทดลองของการดเสียตัวอย่าง 2 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง.....	110
ง.5 แสดงข้อมูลการทดลองของการดเสียตัวอย่าง 2 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง.....	111
ง.6 แสดงข้อมูลการทดลองของการดเสียตัวอย่าง 2 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง.....	112
ง.7 แสดงข้อมูลการทดลองของการดเสียตัวอย่าง 3 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง.....	113
ง.8 แสดงข้อมูลการทดลองของการดเสียตัวอย่าง 3 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง.....	114
ง.9 แสดงข้อมูลการทดลองของการดเสียตัวอย่าง 3 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง.....	115
ง.10 แสดงข้อมูลการทดลองของการดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง.....	116
ง.11 แสดงข้อมูลการทดลองของการดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง.....	117
ง.12 แสดงข้อมูลการทดลองของการดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง.....	118



สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.1 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	135
จ.2 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ.....	136
จ.3 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ ออกแบบในโรงงานวิจัย.....	137
จ.4 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนเรซินอิ่มตัว.....	138
จ.5 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนเหลือที่ออกจากกระบวนการ มีความเข้มข้นสะสม 0.5 กรัมต่อลิตร.....	138
จ.6 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนเหลือที่ออกจากกระบวนการ มีความเข้มข้นสะสม 1 กรัมต่อลิตร.....	138
จ.7 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 2 ไหลผ่านกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดย ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	139
จ.8 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 2 ไหลผ่านกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดย ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ.....	140
จ.9 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 2 ไหลผ่านกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ออกแบบ ในโรงงานวิจัย.....	141
จ.10 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนเรซินอิ่มตัว.....	142
จ.11 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนปริมาณเหลือที่ออกจาก กระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 0.5 กรัมต่อลิตร.....	142
จ.12 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนปริมาณเหลือที่ออกจาก กระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 1 กรัมต่อลิตร.....	142
จ.13 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 3 ไหลผ่านกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้ เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	144
จ.14 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 3 ไหลผ่านกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้ เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ.....	145
จ.15 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 3 ไหลผ่านกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ออกแบบ ในโรงงานวิจัย.....	146
จ.16 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนเรซินอิ่มตัว.....	147
จ.17 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนปริมาณเหลือที่ออกจาก กระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 0.5 กรัมต่อลิตร.....	147



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.18 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนปริมาณเหล็กที่ออกจาก กระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 1 กรัมต่อลิตร.....	147
ฉ.1 Typical factors for estimation of project fixed capital cost.....	150
ฉ.2 Purchase cost of miscellaneous equipment cost factors.....	151
ฉ.3 Summary of production costs.....	153
ช.1 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาต้นทุนของกระบวนการที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร.....	157
ช.2 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาต้นทุนของกระบวนการที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร.....	159
ช.3 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาต้นทุนของกระบวนการที่ออกแบบในงานวิจัย สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร.....	161
ช.4 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาต้นทุนของกระบวนการที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร.....	164
ช.5 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาต้นทุนของกระบวนการที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร.....	166
ช.6 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาต้นทุนของกระบวนการที่ออกแบบในงานวิจัย สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร.....	168
ช.7 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาต้นทุนของกระบวนการที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร.....	171
ช.8 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาต้นทุนของกระบวนการที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร.....	173
ช.9 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาต้นทุนของกระบวนการที่ออกแบบในงานวิจัย สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร.....	175

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมาช้านานแล้ว และจะทวีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ สาเหตุที่สำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษนี้ส่วนใหญ่เกิดจากมนุษย์ไม่เอาใจใส่ในปัญหาสิ่งแวดล้อม เป็นที่ทราบกันดีว่าปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษส่วนใหญ่เกิดจากแหล่งชุมชน และโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ แต่ที่สำคัญของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมต่างๆ เหล่านี้มีความเป็นพิษมากกว่าและบำบัดได้ยากกว่าของเสียที่เกิดจากแหล่งชุมชนอีกด้วย อุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการถลุง ผสม ทำให้บริสุทธิ์ หลอม หล่อ หรือผลิตโลหะเหล็ก ซึ่งในที่นี้จะเรียกโดยรวมว่า อุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก จัดเป็นอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ ซึ่งในกระบวนการแปรรูปเหล็กพบว่าของเสียที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของโลหะหนัก ที่เกิดจากไอออนของเหล็กผสมอยู่

เนื่องจากเหล็กจัดเป็นโลหะที่แข็ง มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี และที่สำคัญคือราคาถูกกว่าโลหะชนิดอื่น ทำให้อุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กมีความสำคัญต่อการพัฒนาของประเทศที่กำลังพัฒนาเป็นอย่างมาก รัฐบาลจึงได้กำหนดให้อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าเป็นหนึ่งในหกอุตสาหกรรมที่บรรจุไว้ในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 7 (พ.ศ. 2535 - 2539) ทั้งนี้เพราะเหล็กและเหล็กกล้าต่างก็เป็นวัตถุดิบที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาอุตสาหกรรมทุกแขนง ซึ่งรวมถึงการก่อสร้างต่างๆ ทำให้ความต้องการใช้เหล็กมีปริมาณสูงขึ้นทุกปี แต่สาเหตุที่เหล็กเป็นโลหะที่แข็งจึงเป็นสาเหตุทำให้กระบวนการแปรรูปเหล็กต้องมีขั้นตอนมากกว่าจะได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการ และผิวของเหล็กยังมีความสกปรกมากเนื่องจากไอออนของเหล็กไวต่อการทำปฏิกิริยากับอากาศทำให้เกิดสนิมหรือเหล็กออกไซด์ขึ้น ทำให้ต้องมีกระบวนการในการกำจัดสนิมขึ้นเพื่อทำความสะอาดผิวของเหล็กก่อนที่จะมีการแปรรูปหรือชุบผิวต่อไป ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการแปรรูปเหล็กจะมีของเสียที่ถูกปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมมากมาย ของเสียเหล่านี้ที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กจะทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมขึ้น ไม่ว่าจะเป็นปัญหาด้านน้ำเสียหรืออากาศเสีย

ของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมเหล็กส่วนใหญ่แบ่งได้เป็น

- มลพิษทางอากาศ ฝุ่นควันต่างๆ จากกระบวนการที่ใช้ความร้อน
- มลพิษทางน้ำ
  - สารแขวนลอย ซึ่งมักเป็นพวกเศษเหล็กในสารหล่อเย็น และคราบน้ำมัน
  - กรดเสีย จากกระบวนการกำจัดสนิม
  - อุตสาหกรรมที่ชุบเหล็ก จะมีน้ำทิ้งที่มี สังกะสี โครเมียม นิกเกิล เจือปน
- มลพิษทางดิน ซึ่ได้จากเตาหลอม ฝุ่นจากระบบกำจัดฝุ่น

หน่วยงานของรัฐได้สังเกตเห็นปัญหาที่เกิดขึ้น จึงได้มีการคิดหาแนวทางที่จะสามารถลดปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็น การจัดประชุมอบรมเกี่ยวกับการจัดการสิ่งแวดล้อมในโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก เพื่อที่จะจัดมาตรฐานทางด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กในประเทศไทย อีกทั้งยังให้ความรู้ด้านการลดมลพิษที่เกิดจากอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กโดยที่ไม่มีผลในทางเศรษฐศาสตร์มากนัก หรือได้มีการวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการในการผลิตเพื่อหาแนวทางใหม่ หรือวิธีการใหม่ๆ ที่สามารถช่วยลดปัญหาต่างๆ เหล่านี้ อย่างเช่นกรมโรงงานได้ร่วมกับโครงการความร่วมมือไทย - เยอรมัน ภายใต้การสนับสนุนจาก Deutsche - Gessells Charft Technische Zusammenarbeit (GTZ) ได้มีการค้นคว้าหาเทคโนโลยีใหม่หรือแนวทางที่เป็นไปได้ในการจัดการมลพิษที่เกิดจากอุตสาหกรรมประเภทนี้

เนื่องจากอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กมีความแตกต่างกันทั้งในแง่ของกระบวนการผลิต การดำเนินการผลิต ชนิดของวัตถุดิบ และ/หรือรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น อุตสาหกรรมเหล็กแผ่น อุตสาหกรรมเหล็กเส้น อุตสาหกรรมชุบและตกแต่งโลหะ เป็นต้น ทำให้ยากที่จะวิเคราะห์ได้ว่าของเสียที่เกิดจากส่วนการผลิตที่ใดบ้าง แต่หากพิจารณาแล้วต้นกำเนิดของของเสียส่วนใหญ่มาจากกระบวนการกำจัดสนิม โดยของเสียที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปของกรดเสีย

ในกระบวนการกำจัดสนิมจะต้องใช้กรดในปริมาณที่มาก (ส่วนใหญ่จะใช้กรดไฮโดรคลอริก เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสนิมดีและราคาถูกกว่ากรดชนิดอื่น) เพื่อต้องการกำจัดสนิมได้หมด ดังนั้นจะมีกรดบางส่วนที่ไม่ได้กัดสนิมเหล็ก กรดที่กัดสนิมเหล็กจะกลายเป็นเฟอร์รัสคลอไรด์ (Ferrous Chloride) ผสมกับกรดในส่วนที่ไม่ได้กัดสนิมเหล็ก จะกลายเป็นของเสียในกระบวนการกำจัดสนิมนี้ ของเสียนี้เรียกว่าพิกเกิลลิควอร์ (Pickle Liquor) ดังนั้นถ้าเราสามารถนำกรดส่วนที่ไม่ได้กัดสนิมเหล็กเหล่านี้กลับนำมาใช้ใหม่ได้จะมีประโยชน์อย่างมาก ทั้งในแง่ของการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ และยังสามารถช่วยลดต้นทุนในการใช้สารละลายกรดในกระบวนการกำจัดสนิมได้อีกด้วย

อุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กในประเทศไทย ส่วนใหญ่เป็นโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก หรืออุตสาหกรรมขนาดกลาง ซึ่งกว่าร้อยละ 70 ของอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กทั่วประเทศ มีกำลังการผลิตต่ำกว่า 20,000 ตันต่อปี และส่วนใหญ่จะมีกำลังการผลิตอยู่ในช่วง 1,000 - 10,000 ตันต่อปี ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าวไม่สนใจที่จะนำกระบวนการนำกลับกรดมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก เนื่องจากกระบวนการนำกลับกรดส่วนใหญ่จะมีต้นทุนการผลิตที่สูง และในขณะทำการผลิตจะต้องใช้พลังงานที่สูงอีกด้วย เมื่อคิดผลกำไรที่ได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์แล้วไม่เหมาะสมที่จะลงทุน ซึ่งปัญหาเหล่านี้ทำให้มีนักวิจัยหลายท่านพยายามที่จะหาวิธีการต่างๆ มาใช้ เพื่อต้องการลดพลังงานที่สูญเสียไปได้มากที่สุด สำหรับในกระบวนการนำกลับกรดในปัจจุบันมีหลายกระบวนการ อาทิเช่น การตกผลึก, การระเหย, ไพโรไฮโดรไลซิส (Pyrohydrolysis), การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) ดังได้แสดงการเปรียบเทียบในตารางที่ 1.1 ซึ่งจากตารางจะเห็นว่ามีการลงทุนการผลิตที่ต่ำ และสิ้นเปลืองพลังงานน้อย เช่นวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน แต่ปัญหาที่สำคัญของการแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้กันอยู่ในโรงงานคือประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนยังไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้ยังนำกลับกรดกับไปใช้ได้ไม่เต็มที่ ถ้าหากมีการออกแบบกระบวนการที่ดี จะทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนดีขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการออกแบบกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยน ไอออน เพื่อที่จะหาประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ดีกว่าแบบเดิม

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะวิจัยกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โดยทำการออกแบบกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก เพื่อหาประสิทธิภาพในการนำกลับกรดที่ดีกว่ากระบวนการที่มีใช้กันอยู่ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม และมีต้นทุนการผลิตที่โรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก และขนาดกลางสามารถยอมรับได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการลดปริมาณการสูญเสียกรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการผลิต
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการ ทั้งการปฏิบัติงานปกติและการรีเจนเนอเรต และหาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมสำหรับการรีเจนเนอเรตแลกเปลี่ยนไอออนบวก
- 1.2.3 เพื่อออกแบบและทดสอบกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก จากน้ำกรดกำจัดสนิมเหล็กด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อให้มีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนแบบเดิม
- 1.2.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ ระหว่างแบบจำลองที่ออกแบบในงานวิจัยกับแบบจำลองที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 กรดที่ใช้ทำการวิเคราะห์ในโครงการวิจัยเป็นกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งเป็นกรดที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก เนื่องจากเป็นกรดที่มีราคาถูกและมีอำนาจในการกัดกร่อนสูง
- 1.3.2 กรดเสียที่ได้จากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กมีปริมาณกรดไฮโดรคลอริกอยู่ในช่วง 50 – 100 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณเหล็กในช่วง 1 – 7 กรัมต่อลิตร
- 1.3.3 กรดเสียที่นำมาใช้ในการทดลองในโครงการวิจัยนี้ เป็นกรดเสียที่ได้จากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กที่ได้จำลองกระบวนการจากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก
- 1.3.4 ในโครงการวิจัยนี้ใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อนำมาใช้ในการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก เนื่องจากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นกระบวนการที่ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ และใช้พลังงานในการดำเนินงานต่ำ ดังนั้นจึงเป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับนำมาพัฒนาในการเพิ่มประสิทธิภาพการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก
- 1.3.5 การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของไอออนเหล็ก ใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาวิธีการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก และรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องต่องานวิจัย โดยเฉพาะข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน
- 1.4.2 ศึกษาและสร้างแบบจำลองกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก
- 1.4.3 ทำการศึกษาหาอัตราการไหลของกรดเสียที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการ ทั้งการปฏิบัติงานปกติและการรีเจนเนอเรต และหาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมสำหรับการรีเจนเนอเรตแลกเปลี่ยนไอออนบวก
- 1.4.4 ออกแบบและสร้างกระบวนการนำกลับด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในโรงงานวิจัยนี้
- 1.4.5 หาประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน ของแบบจำลองกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้อัตราการไหลในข้อ 1.4.3 ซึ่งในการหาประสิทธิภาพในการนำกลับกรดนี้จะดูจากปริมาณของกรดไฮโดรคลอริกและไอออนเหล็กที่ออกจากกระบวนการ
- 1.4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกระหว่างแบบจำลองที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก กับแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้หลักทางเศรษฐศาสตร์คือการหาระยะเวลาคืนทุนว่ากระบวนการไหนจะใช้ระยะเวลาคืนทุนที่สั้นที่สุดในการเปรียบเทียบ
- 1.4.7 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด

## 1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 หมวด คือ

หมวดที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง เช่น ชุดคอลัมน์, มอเตอร์, เรซิน, ท่อ, อุปกรณ์ประกอบท่อ และชุดโครมียัดคอลัมน์ เป็นต้น

หมวดที่ 2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล โดยในโรงงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์หาปริมาณของไอออนเหล็ก โดยใช้เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในงานวิจัย

- 1.6.1 สามารถนำกระบวนการนำกลับกรดที่ออกแบบไว้ในงานวิจัย ไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิตในส่วนของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ต้องใช้ในกระบวนการกำจัดสนิม และปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย
- 1.6.2 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด หรือเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับกระบวนการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการงานวิจัยนี้ต่อไป

## 1.7 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

ในรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ทั้งหมด 7 บท ซึ่งแต่ละบทสามารถสรุปได้ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย, วัตถุประสงค์ของงานวิจัย, ขอบเขตงานวิจัย, ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย, ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย และโครงสร้างวิทยานิพนธ์, บทที่ 2 กล่าวถึง ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนำกลับกรด, บทที่ 3 กล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยอาทิเช่น ประเภทของกระบวนการนำกลับกรด, ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น, บทที่ 4 กล่าวถึง ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยอย่างละเอียด, บทที่ 5 กล่าวถึง ผลการทดลอง และการคำนวณผล ,บทที่ 6 กล่าวถึง สรุปผลการวิจัยที่ทำมาทั้งหมด และรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ และผลการทดลองอย่างละเอียดได้แนบไว้ในภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบระบบการดั่งกรดกลับ

วิธีการ	ใช้สำหรับ	หลักการทํางาน	ผลิตภัณฑ์สุดท้าย	การใช้พลังงาน (ต่อตันของสารละลายกรดที่ใช้แล้ว)	การใช้สารเคมี (ต่อตันของกรดที่ใช้แล้ว)	จุดเด่น	จุดด้อย
การตกผลึก	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	ลดอุณหภูมิของสารละลายกรดที่ใช้แล้วเหลือ 5 °C, แยกเอาผลึกเกลือของ FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O ออกโดยการเหวี่ยง (screen centrifuge)	กรดที่นำมาใช้ใหม่ได้, เกลือเขียว (FeSO <sub>4</sub> )	28 kW (ความแตกต่างของอุณหภูมิคือ 70 °C)	ไม่มี	นำกรดอิสระมาได้ 80 %, การสะเหินต้องการต่างน้อยกว่า, ลดตะกอนยับยั้ง	เงินลงทุนสูง, สารตกค้างเช่นเกลือของเหล็กซัลเฟต, ต้องใช้งานที่ความเข้มข้นของ Fe มากกว่า 60 g/l และ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> มากกว่า 150 g/l
การระเหย	HCl	ระเหย HCl และ H <sub>2</sub> O ออกจากอ่างสารละลายกรดที่ใช้แล้ว (อุณหภูมิถึง 125 °C)	กรดที่นำมาใช้ใหม่ได้, ตะกอนของเสียของ FeCl <sub>2</sub>	375 kW (ความแตกต่างของอุณหภูมิ คือ 90 °C)	ไม่มี	นำกรดอิสระมาได้ 90 %, การสะเหินต้องการต่างน้อยกว่า	ใช้พลังงานมาก, สารตกค้าง: เหล็กคลอไรด์
การแลกเปลี่ยนไอออนกรด (H <sup>+</sup> )	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HCl	ดูดซับไอออนอิสระของกรดโดยใช้เรซิน, โดยการผ่าน FeCl <sub>2</sub> และ FeSO <sub>4</sub> , ไอออนของกรดอิสระกลับมาโดยการใช้น้ำ	กรดที่นำมาใช้ใหม่ได้, ของเสียในรูปของ FeCl <sub>2</sub> และ FeCl <sub>4</sub>	8 kW	3.5 ตันของน้ำ	เงินลงทุนต่ำ ขนาดปานกลาง ค่าซ่อมบำรุงต่ำ ประหยัดพื้นที่ นำกรดอิสระกลับมาได้ 80 %	สารตกค้าง: เหล็กคลอไรด์, ใช้ไปแต่ละครั้ง ประสิทธิภาพในการนำกรดกลับต่ำลง
การแลกเปลี่ยนไอออนเหล็ก (Fe <sup>3+</sup> )	HCl	ออกซิเดชันของ Fe(II) กับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> หรือ Cl <sub>2</sub> ได้ Fe(III), การดูดซับของ FeCl <sub>4</sub> ด้วยเรซิน, โดยการผ่านไอออนของกรดอิสระ, Fe(III) กลับมาโดยการใช้น้ำชะ	กรดที่นำมาใช้ใหม่ได้, ของเสียในรูปของ FeCl <sub>3</sub>	8 kW	20 ตันของน้ำปราศจากไอออน, 90 ล. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 35 %, 0.19 ตัน HCl 35 %	เงินลงทุนต่ำ ขนาดปานกลาง ค่าซ่อมบำรุงต่ำ ประหยัดพื้นที่ นำกรดอิสระกลับมาได้ 80 %	ใช้ไปแต่ละครั้ง ประสิทธิภาพในการนำกรดกลับต่ำลง
ไพโรไฮโดรไลซิส	HCl	ให้ความร้อน อบ ออกซิเดชันของ Fe(II) ได้ Fe(III), ทำคลอไรด์ให้เข้มข้นขึ้นในรูปของกรดอิสระ และกรดจำเพาะทางเคมี	กรดจำเพาะทางเคมีและกรด, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ที่ไม่เป็นอันตราย	ประมาณ 1400 kWh	อากาศ	นำกรดกลับมาได้ทั้งหมด 99 % สารตกค้างไม่เป็นอันตราย	เงินลงทุนสูง ต้องใช้พื้นที่มาก ปัญหาด้านสาธารณสุขโลก ใช้พลังงานมาก

## บทที่ 2

### ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการนำกลับกรด ได้มีการวิจัยอย่างต่อเนื่อง แต่ทั้งนี้ยังไม่ม้งานวิจัยไหนที่มุ่งประเด็นไปที่การพัฒนากระบวนการนำกลับกรดด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน ผลงานวิจัยที่นำมาเสนอนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งที่ยอมรับและมีการจดสิทธิบัตร โดยจุดประสงค์โดยรวมของผลงานวิจัยต่างๆ ก็คือต้องการลดต้นทุนในการผลิต ลดการสูญเสียพลังงานที่ต้องใช้ไป และเพิ่มประสิทธิภาพในการนำกลับกรดให้ได้ที่สุด อีกทั้งยังมีการวิจัยที่จะพยายามลดปัญหาการสึกกร่อนของวัสดุที่ใช้ทำกระบวนการ เพื่อที่จะให้กระบวนการนี้สามารถนำไปใช้ได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลโดยแบ่งข้อมูลที่ได้ศึกษาค้นคว้าเป็น 3 ประเภท คือ

- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนมาใช้ในกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกจากกรดเสียที่มีไอออนเหล็กผสมอยู่
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนมาใช้ในระบบน้ำกลับ หรือระบบบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมเหล็ก
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกจากกรดเสียที่มีไอออนเหล็กผสมอยู่ด้วยวิธีการต่างๆ

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนมาใช้ในกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกจากกรดเสียที่มีไอออนเหล็กผสมอยู่

E. Maranon และ คณะ (1999) ได้ศึกษาการแยกกรดไฮโดรคลอริกออกจากกรดเสียที่มีความเข้มข้นของกรดสูงด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โดยกรดเสียที่มีไอออนของเหล็กผสมอยู่มาก โดยมีจุดประสงค์คือ ลดปริมาณการสูญเสียกรด และลดค่าใช้จ่ายที่จะต้องใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งเรซินที่ใช้ในการทดลองมีทั้งแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก และแลกเปลี่ยนประจุลบ เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกจะอยู่ในรูปของกรดแก่ ( $H^+$ ) เพื่อดึงเหล็ก ( $Fe^{II}$ ) แต่เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบจะอยู่ในรูปของคลอไรด์ ( $Cl^-$ ) เพื่อดึงเหล็ก ( $Fe^{III}$ ) ที่อยู่ในรูปของสารประกอบคลอไรด์ โดยในการทดลองนี้ได้ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของเหล็กในช่วงที่เหมาะสมกับในอุตสาหกรรม และปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่จะต้องนำมาฟื้นฟู (Regenerate) จากการทดลองพบว่าเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบจะสามารถดึงไอออนเหล็กได้ดีกว่าเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยเรซินที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ Lewatit MP-500 และความจุที่เรซินสามารถดูดซับเหล็กได้จะแปรผันตามปริมาณเหล็กที่เข้ามา



ต่อมา E. Maranon และ คณะ (2000) ชูดเดิมได้ทำการศึกษาการใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบในการดองกรดไฮโดรคลอริกออกจากเหล็ก และสังกะสี ซึ่งเป็นกรดเสียที่เกิดจากกระบวนการชุบสังกะสี โดยใช้เรซิน 2 ชนิด คือ Lewatit MP-500 และ Lewatit M-504 โดยการแลกเปลี่ยนไอออนนี้ต้องดึงเหล็ก (Fe III) และสังกะสี (Zn II) ออกจากกรดไฮโดรคลอริก หลังจากที่มีการออกซิเดชัน (Oxidation) เหล็ก (Fe II) ให้เป็นเหล็ก (Fe III) ด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบของคลอไรด์ โดยจากการทดลองพบว่า เรซินทั้งสองชนิดนี้สามารถดึงสังกะสีได้ดีกว่าเหล็ก ในการศึกษาที่พิจารณา 2 แบบ คือ การใช้คอลัมน์ 1 หอ ในการดึงทั้งเหล็ก และสังกะสีพร้อมกัน และแบบที่สอง คือใช้คอลัมน์ 2 หอ ต่อแบบอนุกรม โดยออกแบบตามความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน แต่ก่อนที่จะมีการสร้างแบบจำลองขึ้นนั้นจะต้องมีการทดลองผลในห้องทดลองก่อน หลังจากเรซินหมดอำนาจแล้วจะต้องนำไปฟื้นฟูอำนาจ (Regenerate) โดยใช้น้ำในการฟื้นฟูอำนาจ โดยน้ำจะไปดึง สารประกอบคลอไรด์ ในรูปของ  $ZnCl_2$  และ  $FeCl_3$  ออกจากเรซินทำให้เรซินอยู่ในรูปของคลอไรด์ (Cl) ทำให้พร้อมที่จะใช้งานครั้งต่อไป สำหรับคอลัมน์ของเหล็กจะต้องใช้น้ำประมาณ 3 เท่าของปริมาตรเรซิน (BV) หรือมากกว่านั้น และ คอลัมน์ของสังกะสีจะต้องใช้น้ำประมาณ 6 เท่าของปริมาตรเรซิน อย่างไรก็ตามถ้าใช้สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $NH_4OH$ ) ในการฟื้นฟูอำนาจคอลัมน์ของสังกะสีจะลดเหลือเพียง 2 เท่าของปริมาตรเรซินเท่านั้น

สำหรับผลงานวิจัยในประเทศไทย ประไพรัตน์ (1998) ได้ออกแบบระบบการนำน้ำกรดทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมรีดเหล็ก ซึ่งเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง โดยการแลกเปลี่ยนประจุ ทำการฟื้นฟูคุณภาพน้ำกรดที่ผ่านการใช้งานจากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็ก (Spent pickling acid) ให้สามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่แทนที่จะปล่อยเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการบำบัด ซึ่งต้องประเมินความคุ้มค่าของการลงทุน ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ ในการออกแบบดังกล่าว มีหน่วยปฏิบัติการ ประกอบด้วยถังปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการกำจัดสนิมเหล็ก ถังรวบรวมน้ำกรดทิ้งที่ปล่อยออกจากถังปฏิกิริยา นำหน่วยแลกเปลี่ยนประจุเข้าทำการติดตั้งเพื่อรับน้ำกรดจากถังรวบรวมมาทำการฟื้นฟูคุณภาพให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในการออกแบบใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ ในการกำจัดสนิม เมื่อผ่านการใช้งานแล้วจะมีปริมาณความเข้มข้นเกลือของเหล็กสูงจนไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ จึงนำเข้าหน่วยแลกเปลี่ยนประจุเพื่อฟื้นฟูคุณภาพกรด ซึ่งระบบแลกเปลี่ยนประจุสามารถฟื้นฟูคุณภาพน้ำกรดได้ถึง 88.83 เปอร์เซ็นต์ และสามารถกำจัดเหล็กได้ 41.89 เปอร์เซ็นต์

จากการประเมินความคุ้มค่าของการลงทุน พบว่าผู้ประกอบการสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีได้ถึง 1,536,450 บาทต่อปี และเมื่อนำระบบดังกล่าวมาใช้จะสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 3 ปี จากการออกแบบระบบดังกล่าวนี้ เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมรีดเหล็กประเภทเดียวกัน เนื่องจากมีความคล่องตัวและสะดวกรวดเร็วต่อกระบวนการผลิต และจากการนำหน่วยแลกเปลี่ยนประจุมาใช้ในการฟื้นฟูคุณภาพน้ำกรดที่ผ่านการใช้งานแล้ว สามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่ ผู้ประกอบการสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้อย่างมาก ตลอดจนเป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนมาใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมเหล็ก

Socrates Ioannidis และ Andrzej Anderko (2001) ได้เสนอแบบจำลองที่อธิบายทั้งปรากฏการณ์การแลกเปลี่ยนไอออนและปรากฏการณ์การดูดซับโมเลกุลระหว่างของแข็งกับของเหลว ไอออน และโมเลกุลชนิดต่างๆ จะถูกแยกที่ผิวของของแข็งโดยจะเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออน (Exchange reaction) สำหรับแบบจำลองการดูดซับนี้ได้นำเอาแบบจำลองพิเศษทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic speciation model) ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้มีการพัฒนากันอย่างกว้างขวางมาใช้ร่วมกับแบบจำลองนี้ โดยที่กระบวนการ Parameter regression ได้นำมาแยกการคำนวณสถานะคงที่สมดุล (Equilibrium constant) ออกจากการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระตุ้น (Activity coefficients) แบบจำลองนี้ ถูกประยุกต์ขึ้นเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของระบบแอนิลีน (Aniline) เหลว ซึ่งผสมอยู่กับวัสดุคล้ายดินเหนียวที่มีแคลเซียมผสมอยู่ และในระบบนี้ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนของแอนิลีนเนียม (Anilinium) กับไอออนของแคลเซียม (Calcium) จะเกิดขึ้นพร้อมกับการดูดซับโมเลกุลของแอนิลีน ดังที่กล่าวมาแล้วว่าในแบบจำลองนี้ ได้รวมเอาแบบจำลองการดูดซับกับแบบจำลองพิเศษทางอุณหพลศาสตร์ ทำให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมได้ทั้งสองอย่างคือคุณสมบัติการละลายได้ของของแข็งและการแลกเปลี่ยนไอออนในระบบที่ประกอบด้วยหินฟอสเฟสและแร่คลินอปติโลไลต์ (Clinoptilolite) กับการผสมระหว่างไอออนของโปแตสเซียม (Potassium) และไอออนของแอมโมเนียม (Ammonium) จากการทดลองพบว่าข้อมูลที่ได้ตรงกับข้อมูลจากการทดลอง

สำหรับผลงานวิจัยในประเทศไทยได้มีการวิจัยอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียในประเทศไทยมีประสิทธิภาพในการบำบัดยังไม่ดีเท่าที่ควรหรือมีต้นทุนในการผลิตที่สูง เริ่มจาก พิระพงศ์ (1990) ได้ศึกษาผลของ pH ที่มีต่อค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกโลหะทรานสิชันของดินขาว เนื่องจากดินขาวเป็นวัตถุชนิดหนึ่งในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การทำเซรามิกส์ จึงทำให้มีผู้สนใจพยายามศึกษาถึงองค์ประกอบและคุณสมบัติต่างๆ ของดินขาวอย่างมากมาย โดยเฉพาะค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Capacity, C.E.C.) แต่เนื่องจากดินขาวในแต่ละแห่งมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไป ทำให้คุณสมบัติข้อนี้ต่างกันออกไปด้วย งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของ pH ที่มีต่อค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะทรานสิชันคือ โครเมียม, เหล็ก, โคบอลต์, นิกเกิล, ทองแดง, สังกะสี และรวมถึงแคลเซียม โดยใช้ตัวอย่างอินชัวจากจังหวัดลำปาง ผลการวิจัยพบว่าค่า C.E.C. ของโลหะทรานสิชันที่ศึกษาขึ้นอยู่กับค่า pH โดยตรง กล่าวคือเมื่อ pH สูงขึ้นค่า C.E.C. จะเพิ่มมากขึ้น ยกเว้นโครเมียม ซึ่งหมายถึงการดูดซับของดินขาวต่อไอออนบวกของโลหะเหล่านี้มากขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้ยังพบว่าไอออนของเหล็กถูกดูดซับได้มากที่สุด ส่วนนิกเกิลน้อยที่สุดที่ pH เดียวกัน

หลังจากนั้น เรืองศักดิ์ และศิริวัฒน์ (1992) ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบเครื่องผลิตน้ำปราศจากอออนขนาดเล็กที่เป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous) ประกอบจากวัสดุที่เป็นพีวีซีทั้งหมด โดยระบบประกอบไปด้วยถัง 3 ถังคือถังกัมมันต์ (Activated carbon), ถังแลกเปลี่ยนอออนบวก (Cation exchange resin) และถังแลกเปลี่ยนอออนลบ (Anion exchange resin) ระบบการไหลเวียนของน้ำเข้าสู่ถังเป็นแบบไหลเวียนจากบนลงล่าง (Down flow) ซึ่งเป็นระบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตน้ำปราศจากอออน เครื่องผลิตน้ำปราศจากอออนนี้มีความสามารถผลิตน้ำได้ 5,000 - 6,000 ลิตร ในแต่ละวัฏจักร ด้วยอัตราเร็ว 360 ลิตรต่อหน้าที่ โดยน้ำที่ผ่านกระบวนการผลิตนี้จะสามารถนำไปใช้ในงานล้างเคราะห และงานล้างเคราะหที่ต้องการความละเอียดปานกลางได้เป็นอย่างดี คุณภาพน้ำที่ผ่านจากกระบวนการผลิตเป็นดังนี้ ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) 3 - 13 ไมโครซีเมนต์ ค่า pH 6.0 - 6.5 และปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid) 4.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

ต่อมา พุทธิสาร (1995) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียโครเมียมจากโรงงานชุบโลหะด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนอออน โดยโลหะโครเมียมที่อยู่ในสารละลายในรูปของอออนโครเมต ปล่อยออกมาจากโรงงานชุบโลหะขนาดเล็ก ถูกนำมาผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนอออนโดยใช้เรซิน QUARON AU-808 และ DOWEX MSA-1 สำหรับแลกเปลี่ยนอออนกับโครเมียม (VI) และใช้เรซิน QUARON JU-707 และ DOWEX MSC-1 สำหรับแลกเปลี่ยนอออนประจุบวก พบว่าสามารถลดความเข้มข้นของโครเมียม (VI) ในน้ำเสียล้างเคราะหที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ลดลงเหลือต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีอัตราการไหลที่เหมาะสมระหว่าง 10-40 เท่าของปริมาตรเรซินที่ใช้ต่อชั่วโมงและทำการสกัดกลับโครเมียมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าเรซิน QUARON AU-808 มีประสิทธิภาพพื้นอำนาจเรซินต่ำ เนื่องจากเรซินถูกออกซิไดซ์โดยกรดโครมิก ส่วนเรซิน DOWEX MSA-1 สามารถพื้นอำนาจเรซินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 5-7 ที่อัตราการไหล 2 เท่าของปริมาตรเรซินที่ใช้ต่อชั่วโมง เมื่อนำเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นไปใช้แยกอออนโครเมตในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะขนาดเล็ก พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย โดยความเข้มข้นของโครเมตและโครเมียมที่เล็ดลอดออกมา อยู่ในข้อกำหนดของมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมเครื่องต้นแบบชนิดแลกเปลี่ยนอออน ที่ใช้จับโครเมตนี้ มีต้นทุนดำเนินการต่ำเปลี่ยนน้ำทิ้งให้เป็นน้ำดี และสามารถนำโครเมตและน้ำดีกลับมาใช้ใหม่ได้ และเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อม

ปีต่อมา เทอดพงศ์, พูลสุข และเสกสรร (1996) ได้ศึกษาพฤติกรรมการกำจัดสังกะสีของเรซินแลกเปลี่ยนประจุชนิดมีโซเดียมเป็นอออนอิสระ โดยในงานวิจัยได้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นแรกได้การศึกษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนอออนของสังกะสี โดยใช้สารละลายสังกะสีเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำปราศจากอออน ขั้นที่สอง ทำการหาค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนอออนสูงสุด การทดลองนี้ใช้สังกะสีเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตรผสมในน้ำประปา และทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหล 10, 30 และ 40 เท่าของปริมาตรเรซินต่อชั่วโมง และขั้นสุดท้ายได้ทดลองกับน้ำเสียล้างเคราะห

โดยใช้อัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของสังกะสีระหว่างสารละลายสังกะสีที่มีเฉพาะความกระด้างในขั้นตอนที่สองกับน้ำเสียสังเคราะห์

จากการทดลองครั้งแรกพบว่า เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกชนิดที่มีโซเดียมเป็นไอออนอิสระมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสังกะสีได้ 1.56 eq/l ส่วนการทดลองครั้งที่สองพบว่าใช้อัตราการไหล 10, 30 และ 40 เท่าของปริมาตรเรซินต่อชั่วโมง มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสังกะสี 1.68, 1.57 และ 1.58 eq/l ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าอัตราการไหลในช่วงที่ทำการทดลองมีผลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนประจุสังกะสีไม่มากนัก และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของสารละลายสังกะสีในน้ำปราศจากไอออน และสารละลายสังกะสีในน้ำประปาไม่ต่างกันมาก ในการทดลองขั้นสุดท้ายจึงใช้อัตราการไหล 40 เท่าของปริมาตรเรซินต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่เร็วที่สุดเพื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสังกะสีเป็น 0.66 eq/l แสดงว่าในน้ำเสียที่มีประจุชนิดอื่นมากในสภาพที่เหมือนน้ำเสียจริงทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนประจุสังกะสีต่ำ

และเพื่อต้องการลดต้นทุนในการผลิต เครื่องวัลย์ (2000) ได้ทำการศึกษานำกรดซัลฟูริกกลับมาใช้จากน้ำทิ้งโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่จะสามารถช่วยแก้ปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีให้ประหยัดลงได้ และยังเป็นการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนไอออนที่ไม่ได้ใช้งานแล้วนำมาทำให้เกิดประโยชน์ที่สุด โดยนำมาใช้งานร่วมกับกระบวนการบำบัดน้ำทิ้ง ซึ่งในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจะยังคงมีปริมาณซัลเฟตไอออนละลายอยู่มาก และสามารถนำมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของกรดซัลฟูริกโดยให้น้ำไหลผ่านชั้นเรซินประจุบวก อึ่งในน้ำทิ้งยังมีปริมาณของไอออนประจุบวกอื่นๆ อีก เมื่อให้น้ำไหลผ่านชั้นเรซินประจุบวก เรซินจะดูดซับเอาไอออนประจุบวกไว้และปล่อยประจุไฮโดรเจนบวกออกมาจับกับซัลเฟตไอออนลบ ได้เป็นกรดซัลฟูริกซึ่งยังมีความเข้มข้นต่ำ และเนื่องจากในกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งมีการใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สูงไม่เหมาะสมที่จะใช้เติมลงในน้ำทิ้งเพื่อปรับค่า pH อย่างทันทีทันใด เพราะจะเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมีโดยใช่เหตุ ดังนั้นจึงต้องทำการเจือจางกรดซัลฟูริก 50 เปอร์เซ็นต์ ให้มีความเข้มข้นลดลง โดยการนำกรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่ำที่ได้จากการแลกเปลี่ยนไอออนนำมาผสมกับกรดซัลฟูริก 50 เปอร์เซ็นต์ แล้วจึงนำไปใช้ปรับค่า pH ในการเดินเครื่องแลกเปลี่ยนไอออนในแต่ละครั้ง เมื่อเครื่องแลกเปลี่ยนไอออนไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้อีก ต้องทำการฟื้นฟูสภาพเรซินแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปไฮโดรเจนไอออนโดยการนำกรดเกลือไหลผ่านและสัมผัสเม็ดเรซิน สำหรับน้ำทิ้งที่ผ่านเรซินออกมาแล้วนั้นก็ส่งเข้าระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกจากกรดเสียที่มีไอออนเหล็กผสมอยู่ ด้วยวิธีการต่างๆ อาทิเช่น การกลั่น, การตกผลึก, การใช้เมมเบรน เป็นต้น

Yasuo Mormoto (1970) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Regeneration of hydrochloric acid pickling waste by  $H_2SO_4$  addition, distillation and  $FeSO_4$  precipitation เป็นการนำกรดไฮโดรคลอริกกลับมาจากกรดเสียที่มีเหล็กผสมอยู่ (Pickle Liquor) โดยการเติมกรดซัลฟูริกในกรดเสียเพื่อเปลี่ยน Ferrous Chloride ( $FeCl_2$ ) ในของเสียให้เป็น กรดไฮโดรคลอริก และ Ferrous Sulfate (และนำมากลั่นแยกเอาไอน้ำและไอกรดไฮโดรคลอริกแยกออกจาก Ferrous Sulfate ไอน้ำและไอกรดไฮโดรคลอริกจะถูกควบแน่นกลับลงมา และทำการตกตะกอน Ferrous Sulfate ออกมา

Carl A. Grulke (1973) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Process for recovering HCl and  $Fe_3O_4$  from pickle liquor เป็นการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกจากกรดเสียที่มีเหล็กผสมอยู่ (Spent Pickle Liquor) ประกอบด้วยการออกซิไดส์สารละลายของ Ferrous Chloride กับกรดไฮโดรคลอริก ในถ่านกัมมัน (Activated Carbon) ได้ Ferric Chloride และนำมาทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydrolyzation) ที่อุณหภูมิ 232 องศาเซลเซียส โดยที่เตาทำจากกราฟไฟต์ จะได้ไอกรดไฮโดรคลอริก และเหล็กออกไซด์

Stephen F. Melzer (1974) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Treatment of acid waste waters to produce ferromagnetic sludges เป็นการบำบัดกรดไฮโดรคลอริก หรือกรดซัลฟูริก หรือมีการผสมกันทั้งสองชนิด และอาจมีหรือไม่มีไฮโดรฟลูออริกปริมาณน้อยๆ ผสมอยู่ด้วยก็ได้ ซึ่งสามารถบำบัดได้โดยการเติมปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ และใช้วิธีการออกซิไดซ์เป็นบางส่วน (Partially Oxidized) จะได้ Hydrate Ferroso - Ferric Oxide หรือ Hydrate Magnetite และจะตกตะกอนลงมา โดยกระบวนการนี้จะทำงานแบบต่อเนื่องหรือแบบกะก็ได้

Norman B. Hjersted (1978) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Process for the reclamation of acid from spent pickle liquor เป็นการนำกรดเสีย (Spent Pickle Liquor) กลับมาใช้ใหม่ โดยป้อนกรดเสียจากกระบวนการกำจัดสนิมโลหะ (Metal Picking Process) เข้าไปในส่วนของคอลัมน์ด้านบน ในขณะที่ส่วนของของเหลวที่อยู่ด้านล่างจะถูกให้ความร้อน กรดเสียที่ด้านล่างนี้จะกลายเป็นไอและกลับเข้าสู่กระบวนการกำจัดสนิม (Picking Process) ในสถานะไอโดยที่ไม่ต้องทำให้เย็นลง

Zane L. Burke (1978) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Recovery of spent pickle liquor and iron metal เป็นการนำกลับกรดซัลฟูริกจากกรดซัลฟูริกที่มีไอออนของเหล็กผสมอยู่ (Spent Sulfuric Acid Pickle Liquor) โดยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) ในเซลล์ที่ประกอบไปด้วยห้องแอโนด และห้องแคโทด โดยที่กรดซัลฟูริกที่มีไอออนของเหล็กผสมอยู่จะอยู่ในห้องแคโทด และสารละลายแอมโมเนียมซัล

เฟตจะอยู่ในห้องอาโนด เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในแผ่นเซลล์ที่เป็นเหล็กที่อยู่ในแต่ละห้อง แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์จะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเมมเบรนที่กั้นในแต่ละห้องไว้ไปทำปฏิกิริยาเป็นสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟตในห้องแคโทด ส่วนกรดซัลฟูริกก็จะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเมมเบรนเข้าไปในห้องอาโนดซึ่งเราจะนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป สำหรับสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟตที่ได้ในห้องแคโทดจะถูกบ่อนกลับไปห้องอาโนดเพื่อนำไปใช้ในครั้งต่อไป

Brazier K. Beceher (1979) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Method of recovering hydrochloric acid from spent hydrochloric acid pickle waste เป็นการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการนำกรดไฮโดรคลอริกกลับมาใช้ใหม่จากกรดเสีย โดยศึกษาให้ได้ปริมาณของกรดไฮโดรคลอริกที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่มีมากกว่าวิธีอื่นและปรับปรุงรูปแบบของเสียเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปบำบัด อีกทั้งยังลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน โดยนำกรดเสียมาทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกใน Double Exchange Process หลังจากทำปฏิกิริยาสารจะแยกเป็นสองเฟส เฟสแรกเป็นไอน้ำและไอกรดไฮโดรคลอริก จะแยกไปที่สาย Overhead Vapor เฟสที่สองเป็นของเหลวที่อยู่ในรูปกรดเสียที่มีความเข้มข้นของเหล็กสูง (Strong Pickle Liquor) จะแยกไปที่สาย Under Flow ไอน้ำและไอกรดไฮโดรคลอริกจะถูกควบแน่นกลับลงมาเป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก สำหรับกรดเสียที่มีความเข้มข้นของเหล็กสูง จะถูกบ่อนไปผสมกับกรดซัลฟูริกจะอยู่ในรูปของ Ferrous Sulphate monohydrate crystals

Baug M. Kim (1986) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Process for acid recovery from waste water อีออนบวกจะถูกดึงออกมาจากสายการไหลของน้ำเสีย ผ่านทางเยื่อเมมเบรนที่เลือกดูดเฉพาะประจุบวก (Anion Selective Membrane) จะรวมตัวกับอีออนของไฮโดรเจน (Hydrogen Ion) ผ่านไปยังเยื่อเมมเบรนที่เลือกดูดเฉพาะประจุลบ (Cation Selective Membrane) ในสองเฟสของกระบวนการนำกลับกรดของ Donnan Dialysis กรดที่นำกลับมาใช้ใหม่จะนำมาใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรเพลตติ้ง (Electroplating Process)

Boeteng; Daniel A. D. (1990) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Membrane process for acid recovery เป็นวิธีการในการนำกลับกรดกลับมาใช้ใหม่จากสารละลายกรดเจือจางที่มีโลหะอย่างน้อย 1 ตัวอยู่ เช่น Zn, Ca, Mg, Na, K, Mn, Al, Fe, Ni และ Co อยู่นอยู่ โดยประกอบไปด้วย 2 หน่วยด้วยกันคือ หน่วย Dialysis และหน่วย Electrodialysis สารละลายกรดที่มีโลหะผสมอยู่จะถูกผ่านเข้าไปยังห้อง Dialyzate ในหน่วยของ Dialysis ที่มีเยื่อเมมเบรนกั้นระหว่างห้อง Dialyzate กับห้อง Diffusate เยื่อเมมเบรนนี้จะดูดซับกรดไว้ ทำให้ทางออกของ Dialyzate จะประกอบไปด้วยน้ำกับโลหะ ส่วนทางออกของ Diffusate จะเป็นสารละลายกรดที่ไม่มีโลหะอยู่ สารละลาย Diffusate นี้จะถูกทำให้เจือจางและไหลวนอยู่ในห้อง Diffusate นี้ และ Diffusate ส่วนหนึ่งจะเข้าไปยังหน่วยของ Electrodialysis เพื่อเพิ่มความเข้มข้นต่อไป อัตราการบ่อนสารละลายที่มีโลหะผสมอยู่อย่างน้อยที่สุดต้องประมาณสองเท่าของกระบวนการที่มีเฉพาะ

Dialysis อย่างเดียว อุณหภูมิในหน่วยของ Dialysis จะอยู่ในช่วง 45 องศาเซลเซียสขึ้นไป และอุณหภูมิในหน่วยของ Electrodialysis จะอยู่ในช่วง 0 - 60 องศาเซลเซียส ในรายงานระบุว่าเราสามารถควบคุมความเข้มข้นได้โดยการปรับอัตราการไหลของ Diffusate ใน Dialysis

Joseph C. Peterson (1990) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Process and apparatus for the low temperature recovery of ferrous chloride from spent hydrochloric acid pickle liquors เป็นการนำกลับกรดเสียที่มี อีออนของเหล็กผสมอยู่ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ แต่ในกระบวนการนี้ต้องมีความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกและอีออนของเหล็กในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อช่วยป้องกันของเหลวแข็งตัวเนื่องจากความเย็นเมื่อถูกทำให้เย็นลงถึงอุณหภูมิ 20 ถึง -10 องศาฟาเรนไฮต์ ผลึกของ Ferrous Chloride จะฟอร์มตัวที่อุณหภูมิต่ำๆ จากนั้นจะถูกดึงออกมาจากกรดเสีย

Naganuma Tsutomu, Iwamoto Junjiro, Okuta Tamao, Tanaka Hisanori (1995) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Acid recovering process เป็นงานวิจัยที่ใช้หลักการของเยื่อเมมเบรน (Membrane) โดยการผ่านกรดไฮโดรคลอริกเสียผ่านเข้าไปในช่องของเยื่อเมมเบรน โดยที่เยื่อเมมเบรนจะทำหน้าที่เป็นตัวแลกเปลี่ยนอีออนประจุบวก (Anion Exchange) เยื่อเมมเบรนจะดูดซับกรดไว้ในเยื่อเมมเบรน ดังนั้นทางออกจึงมีแต่ของเสียที่ต้องนำไปบำบัดต่อไป ในขณะที่เดียวกัน บ่อน้ำสะอาดเข้าไปภายนอกของเยื่อเมมเบรนเพื่อทำการดูดซับกรดไฮโดรคลอริกที่ถูกเยื่อเมมเบรนดูดซับจากกรดเสีย เราสามารถเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดได้โดยการเพิ่มความดันของน้ำสะอาดที่สูงกว่าความดันในการบ่อนกรดเสีย

Ray H. Crist และคณะ (1996) ได้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการแลกเปลี่ยนอีออนโดยใช้ Peat moss ดึงโลหะหนักที่อันตราย สาเหตุที่ใช้ Peat moss เพราะว่ามีข้อดีหลายประการ เช่น ราคาถูก สามารถดึงโลหะหนักได้มาก เป็นต้น ใน Peat moss จะมีแคลเซียม (Ca) เป็นตัวแลกเปลี่ยนอีออนกับอีออนของโลหะหนัก โดยที่โลหะหนักจะติดอยู่ในรูปของประจุลบ ซึ่งโดยปกติโลหะหนักจะอยู่ในรูปของประจุบวกแต่สามารถทำได้โดยการใช้กรด ( $K_{ex}^H$ ) หรือการทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปของประจุลบที่ค่า pH ( $K_{ex}$ ) สูง สำหรับในการทดลองกราฟสมดุลคงที่ของการแลกเปลี่ยนอีออนสามารถคำนวณได้จากการทำลองแบบกะโดยการวัดค่าความเข้มข้นได้โดยตรง การวัดค่าความเข้มข้นของโลหะหนักนี้จะวัดที่สารละลายและที่ตัวดูดซับซึ่งเป็นของแข็ง สำหรับค่า  $K_{ex}$  ของ แมกนีเซียม (Mg) คือ 0.342, แมงกานีส (Mn) คือ 0.862, แคลเซียม (Ca) คือ 1.00, นิกเกิล (Ni) คือ 1.42, สังกะสี (Zn) คือ 1.88, แคดเมียม (Cd) คือ 2.82, ทองแดง (Cu) คือ 9.97, และ ตะกั่ว (Pb) คือ 26.7 ที่สัมพันธ์กับแคลเซียมในรูปของโลหะเดี่ยวหรือโลหะผสม ซึ่งจะพบว่าค่า  $K_{ex}$  ของโลหะต่างๆ เหล่านี้เป็นฟังก์ชันอิสระต่อกัน และจากการทดลองใช้สารละลายที่มีแมกนีเซียมและแมงกานีสผสมอยู่พบว่าค่าสมดุลการแลกเปลี่ยนอีออน (Ion-exchange equilibria) จะขึ้นอยู่กับอัตราการแลกเปลี่ยนมาก และความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log K_{ex}^H$  กับ pH เป็นแบบเชิงเส้น

Rosa M. Quinta Ferreira และ Cristina A. Almeida-Costa (1996) ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของ Fix-bed reactors ที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในการทดลองนี้ใช้แบบจำลองแบบการเกิดปฏิกิริยาแบบต่างเฟส 2 มิติ (Bidimensional heterogeneous) ซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานภายในอนุภาคของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งจะวางซ้อนกันในลักษณะโครงร่างแห ซึ่งประสิทธิภาพโดยรวมของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบต่างเฟส (Heterogeneous) จะกำหนดจากตัวแปรประสิทธิภาพแบบ Macro (Macroeffectiveness factor) และ ตัวแปรประสิทธิภาพแบบ Micro (Microeffectiveness factor) โดยจะหาได้จากพฤติกรรมของกระบวนการที่เกิดบนผนังของช่องว่างภายในเรซิน (Macropores) และภายในทรงกลมขนาดเล็ก (Microspheres) การทดลองนี้อ้างอิงจากกระบวนการสังเคราะห์ MTBE (Methyl tert-butyl ether) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับแบบคายความร้อนในของเหลวระหว่างเมทานอล (Methanol) และไอโซบิวทีน (Isobutene) ที่ช่วงอุณหภูมิ 313 - 338 องศาเซลเซียส และจะพิจารณาผลกระทบจากสภาวะสมดุลทางความร้อน (Thermodynamic equilibrium conditions) โดยผลที่ได้ทำนายโดยใช้แบบจำลองที่เกิดปฏิกิริยาแบบต่างเฟส (Heterogeneous) และนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากการใช้แบบจำลองที่เกิดปฏิกิริยาแบบเฟสเดียวเทียม (Pseudohomogeneous) ยิ่งกว่านั้นยังได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแบบจำลองระหว่าง Bidimensional กับ Unidimensional

Sea Cheon Oh, Young Se Oh และ Yeong-Koo Yeo (1997) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจำลอง และการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของหอกลับแยก สำหรับกระบวนการนำกรดไนตริกเสียกลับมาใช้ใหม่ หอกลับแยกประกอบไปด้วย หอกลับสูญญากาศหลายชั้น (Multistage vacuum column) และหอกลับความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure column) ซึ่งครั้งหนึ่งจะมี pack bed บรรจุอยู่ การสร้างแบบจำลองโดยใช้กระบวนการสภาวะสมดุล (Equilibrium state method) และกระบวนการสภาวะไม่สมดุล (Nonequilibrium state method) โดยที่คุณสมบัติทางกายภาพที่ใช้สำหรับการจำลองจะได้มาจากการสร้างความสัมพันธ์โดยอ้างอิงข้อมูลจากผลการทดลองในห้องทดลอง ผลการจำลองที่ได้พบว่าแบบจำลองแบบสภาวะไม่สมดุลจะให้ผลที่สอดคล้องกับกระบวนการจริงมากกว่าแบบจำลองแบบสภาวะสมดุล และได้ทำการศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งอ้างอิงจากผลการจำลองโดยจะได้ว่า อัตราส่วนย้อนกลับ (Reflux ratio) เป็นตัวแปรสำคัญที่จะทำให้ได้กำไรจากการดำเนินงานมากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 3

### ทฤษฎี

#### 3.1 กระบวนการแปรรูปเหล็กและกระบวนการกำจัดสนิม

##### 3.1.1 กระบวนการแปรรูปเหล็ก

อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กสามารถแบ่งขั้นตอนในการผลิตได้ 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ ด้วยกัน ได้แก่ การผลิตเหล็กขั้นต้น ขั้นกลาง และขั้นปลาย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในการผลิตเหล็กขั้นต้นจะเป็นการนำเอาสินแร่เหล็กมาเข้าเตาหลอมและทำการถลุงเหล็กหรือการขจัดออกซิเจนโดยใช้อากาศ (Direct Reduction) จะได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของเหล็กถลุง (Pig Iron) และเหล็กพูน (Sponge Iron) ตามลำดับ สำหรับการผลิตในขั้นกลาง จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น เหล็กแท่งเล็ก (Billet) เหล็กแท่งใหญ่ (Bloom) และเหล็กแท่งแบน (Slab) โดยที่เหล็กแต่ละชนิดที่ได้เกิดจากการนำไปผ่านกระบวนการรีดขึ้นรูป และสำหรับการผลิตในขั้นปลายจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่พร้อมจะนำไปใช้ประโยชน์เช่น ท่อ, สกรู, แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี เป็นต้น

การผลิตเหล็กในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นการผลิตในขั้นกลางและขั้นปลาย วัตถุดิบเกือบทั้งหมดถูกนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้เกิดปัญหาในการขนส่งและการเก็บรักษาคือเกิดการเสื่อมสภาพของผิวเหล็ก เช่นการเกิดของสนิม การสะสมของน้ำมัน และฝุ่นที่ผิวโลหะ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการล้างและการกำจัดสนิมก่อนที่จะผ่านวัตถุดิบไปยังกระบวนการอื่นต่อไป แต่เนื่องจากกระบวนการกำจัดสนิมมีการใช้น้ำและสารเคมีในปริมาณที่มากจึงก่อให้เกิดของเสียในปริมาณที่มากเช่นเดียวกัน ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

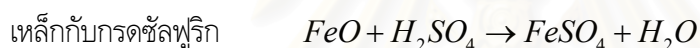
##### 3.1.2 กระบวนการกำจัดสนิม

กระบวนการกำจัดสนิม เป็นการกำจัดคราบออกไซด์ออกก่อนที่จะมีการแปรรูปหรือการดำเนินการในขั้นตอนต่อไป เช่น การชุบสังกะสี, การเคลือบ, การทาสี, หรือการชุบด้วยไฟฟ้า เป็นต้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสนิมขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น เวลาในการกำจัดสนิม ความเข้มข้นของสารละลายกรดที่ใช้ และอุณหภูมิของสารละลายกรด เวลาที่ใช้ในการกำจัดสนิมควรจะสั้นในกรณีที่มีปริมาณของสนิมมีน้อย และการผลิตมีจำนวนมาก ความเข้มข้นของสารละลายกรดต้องเหมาะสมกับเวลา ถ้าความเข้มข้นของสารละลายกรดมีสูงไม่ควรใช้เวลาในการกำจัดสนิมนานเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงการกำจัดสนิมที่มากเกินไปจนถึงเนื้อเหล็ก สำหรับอุณหภูมิของสารละลายกรดไม่ควรสูงเกินไปเพื่อป้องกันการเกิดไอกรดในปริมาณที่สูง

ขั้นตอนในการกำจัดสนิมแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ ขั้นตอนการทำความสะอาดเบื้องต้น และขั้นตอนการกำจัดสนิม ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ขั้นตอนการทำความสะอาดเบื้องต้น เป็นการล้างวัตถุดิบด้วยน้ำสะอาด แต่ในบางกรณีจะมีการใช้สารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ อัลคาไลน์ซิลิเกต และฟอสเฟต ในน้ำล้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความสะอาด การทำความสะอาดเบื้องต้นที่นิยมจะกระทำโดยการจุ่มวัตถุดิบลงในอ่าง หรือพ่นด้วยสารละลายน้ำล้างลงบนวัตถุดิบ เมื่อฝุ่นและน้ำมันถูกกำจัดออกจากผิวโลหะแล้ว วัตถุดิบจะถูกส่งไปยังขั้นตอนการกำจัดสนิม ซึ่งถ้าหากมีน้ำมันติดอยู่บนผิวโลหะ การกำจัดสนิมด้วยกรดจะทำได้ไม่ดี ดังนั้นขั้นตอนการทำความสะอาดเบื้องต้นจะต้องแน่ใจว่ากำจัดฝุ่นและน้ำมันออกจากผิวโลหะหมดแล้ว

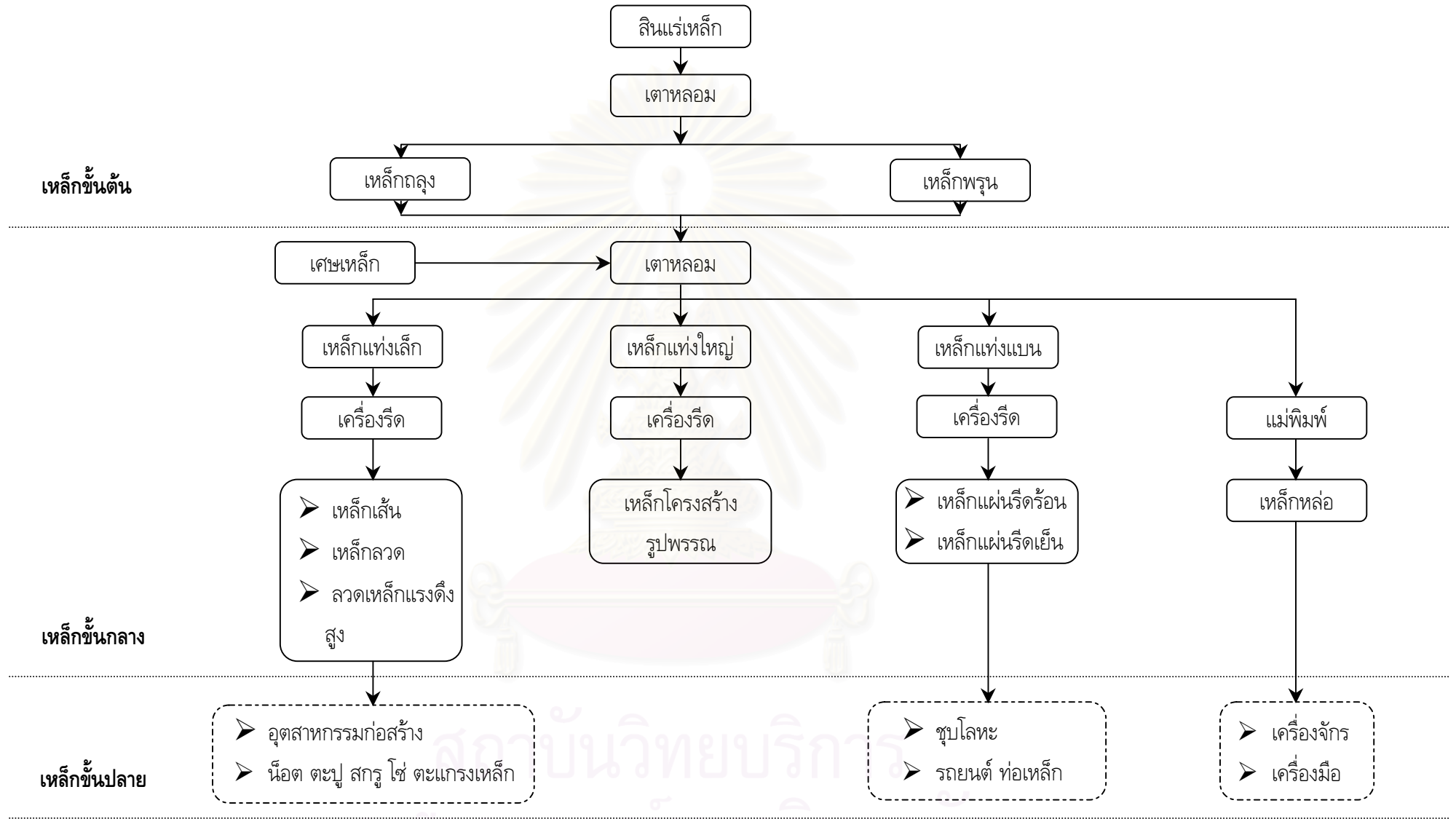
ขั้นตอนการกำจัดสนิม ชิ้นงานจะถูกกำจัดสนิมโดยการนำไปจุ่มในอ่างที่มีสารละลายกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟูริกอยู่ในระยะเวลาหนึ่งทีเพียงพอที่จะกำจัดคราบออกไซด์ออกหมด ซึ่งกรดทั้งสองจะมีข้อดีข้อเสียต่างกัน เช่น กรดไฮโดรคลอริกเป็นกรดที่มีความสามารถในการกัดกร่อนสูง แต่มีปัญหาเกี่ยวกับปริมาณไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิสูง สำหรับกรดซัลฟูริกนั้นจะมีการกัดกร่อนไม่ดีเท่ากับกรดไฮโดรคลอริก แต่ปัญหาเรื่องไฮดรอกไซด์มีน้อยตามไปด้วย อย่างไรก็ตามในประเทศไทยพบว่ากรดไฮโดรคลอริกเป็นที่นิยมมากกว่า ปฏิกริยาระหว่างออกไซด์ของเหล็กและกรดสามารถแสดงได้ดังนี้



ขั้นตอนการกำจัดสนิมประกอบด้วยขั้นตอนการกำจัดสนิมและขั้นตอนการล้าง ขั้นตอนการกำจัดสนิมคือ ขั้นตอนการกำจัดสนิมบนผิวโลหะด้วยสารละลายกรดเพื่อทำให้ผิวเหล็กสะอาด จากนั้นสารละลายกรดที่ติดไปกับชิ้นงานจะถูกกำจัดออกจากผิวเหล็กโดยการล้างด้วยน้ำในขั้นตอนการล้างก่อนที่เหล็กจะถูกส่งไปยังกระบวนการอื่นต่อไป เป็นที่สังเกตว่าอ่างกำจัดสนิมและอ่างล้างที่ใช้โดยทั่วไปในขั้นตอนการกำจัดสนิมและขั้นตอนการล้างตามลำดับ อาจจะประกอบด้วยชุดของอ่างต่อแบบอนุกรมกันในแต่ละขั้นตอน นอกจากนี้ยังมีการเติมน้ำเข้าไปในอ่างล้างนี้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายกรดและน้ำล้าง ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการกำจัดสนิมและการทำความสะอาดด้วย

สำหรับกระบวนการกำจัดสนิมสามารถแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการดังนี้

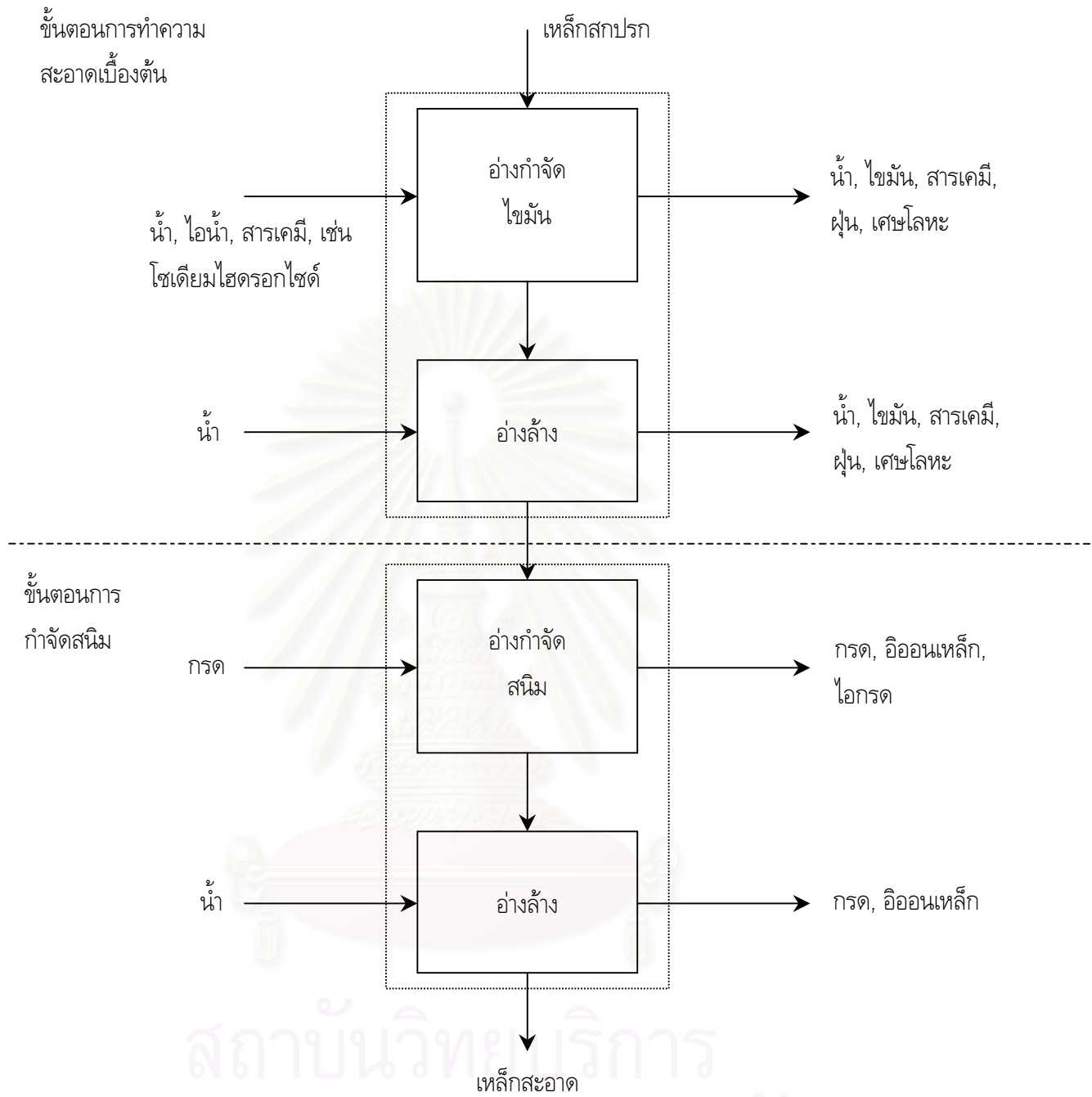
1. Death Pickling เป็นการใส่สารละลายกรดชะล้างชิ้นงานซึ่งเป็นเนื้อโลหะเหล็ก เมื่อเวลาผ่านไปเกลือโลหะในสารละลายจะมีความเข้มข้นสูงขึ้นจนถึงจุดค่าวิกฤต (Critical Value) ทำให้สารละลายกรดไม่สามารถชะล้างชิ้นงานต่อไปได้ จำเป็นต้องทิ้งสารละลายกรดเสีย (Pickling Solution) ที่เกิดขึ้นทั้งหมด อธิบายในรูปที่ 3.3 ก.
2. Draining and Topping Up เป็นวิธีการปล่อยสารละลายกรดเสียทิ้งเป็นระยะๆ แต่ก็ต้องเติมสารละลายกรดเป็นระยะๆ เช่นกัน เพื่อจะได้เกิดความสมดุล อธิบายในรูปที่ 3.3 ข.
3. Regeneration or Treatment of Pickling Liquor เป็นวิธีการจัดการที่ได้ผลดีที่สุด มีลักษณะเช่นเดียวกับวิธีที่ 2 แต่เพิ่มการนำกลับน้ำล้างกรดเข้าไป และมีการถ่ายเทกรดเสียแบบต่อเนื่อง การนำกลับน้ำล้างกรดนี้จะสามารถควบคุมปริมาณกรดที่ต้องใช้ในกระบวนการกำจัดสนิมได้ดี อธิบายในรูปที่ 3.3 ค.



แหล่งข้อมูล : ธนาคารแห่งประเทศไทย

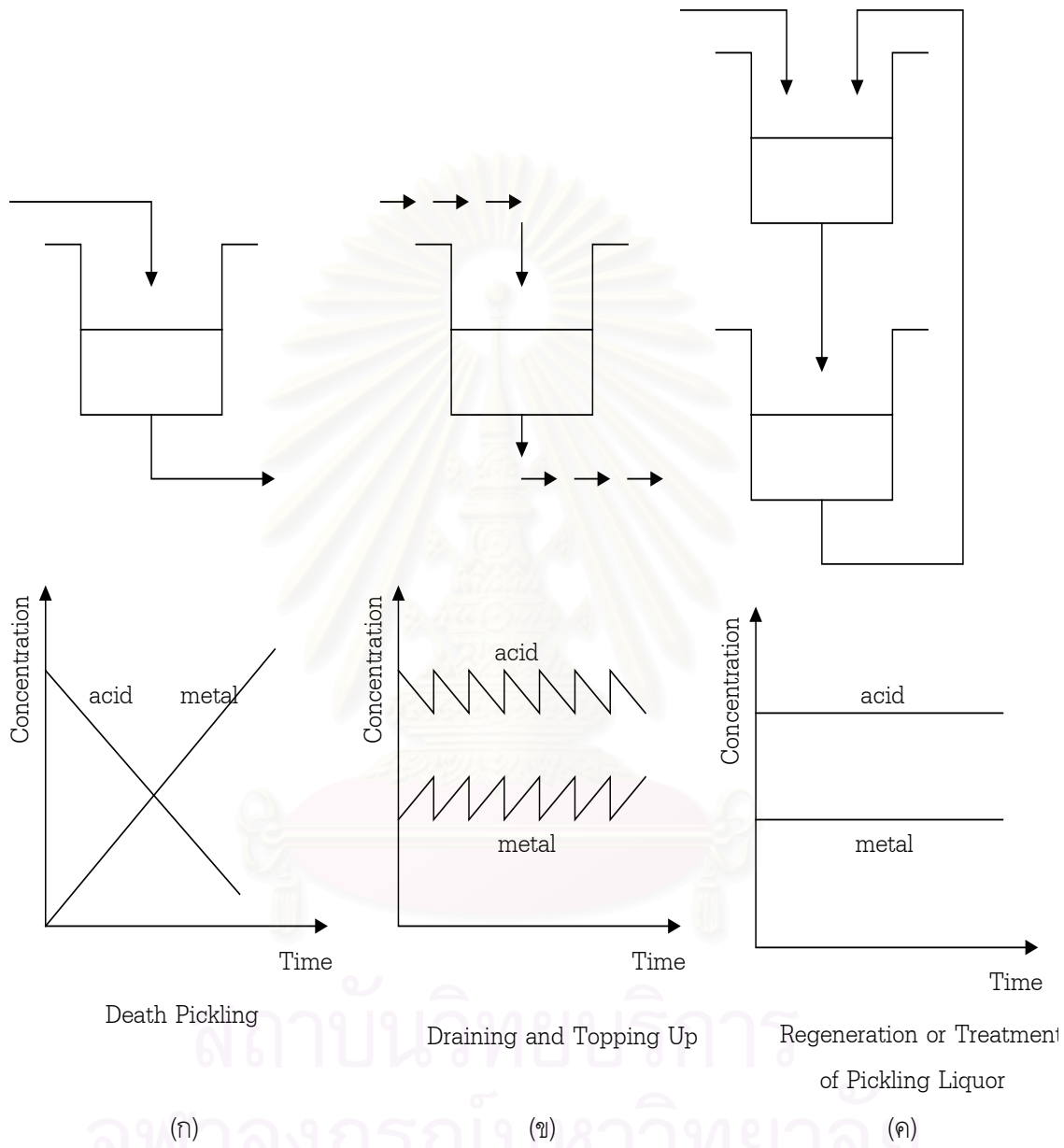
รูปที่ 3.1 สรุปอุตสาหกรรมเหล็ก

☐ = กลุ่มอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกำจัดสนิม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.2 แผนผังกระบวนการกำจัดสนิม



รูปที่ 3.3 แสดงระบบการจัดการสารละลายกรดในกระบวนการกำจัดสนิมเหล็ก

### 3.2 กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า กระบวนการในการนำกลับกรดมีหลายวิธี แต่ละวิธีก็มีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่ากระบวนการในการนำกลับกรดเหล่านี้เหมาะสมที่จะลงทุนหรือไม่ แต่โดยทั่วไปแต่ละกระบวนการมีหลักการเหมือนกันคือ ต้องการแยกไอออนของกรด และไอออนของเหล็กออกจากกัน โดยที่กรดจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการที่ต้องการใช้กรด ในขณะที่ไอออนของเหล็กจะถูกกำจัดทิ้งไปหรือขายเพื่อประโยชน์ในทางอื่นๆ จากข้อมูลในปัจจุบันเราสามารถจำแนกวิธีในการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก ได้คือ การระเหย (Evaporation), ไพโรไฮโดรไลซิส (Pyrohydrolysis), การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และการใช้เยื่อเมมเบรน (Membrane) เป็นต้น

#### 3.2.1 การระเหย (Evaporation)

หลักในการทำงานของการระเหยคือ เราให้ความร้อนแก่กรดเสีย (Pickle Liquor) ในหอระเหย (Evaporator) จนทำให้กรดและน้ำ (ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารละลายกรด) กลายเป็นไอกรดและไอน้ำ หลังจากนั้นทำการควบแน่นให้กรดและน้ำกลายเป็นสารละลายกรด ในหอควบแน่น (Condenser) สำหรับไอออนของเหล็ก (Ferrous Chloride) จะเป็นสารตกค้างที่มีความเข้มข้นสูงซึ่งจะถูกนำไปสะเทินต่อไป

ข้อได้เปรียบของเทคนิคนี้คือ ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีอื่นใดที่นำมาใช้ในการแยกไอออนของกรดและไอออนของเหล็กออกจากกัน และกรดไฮโดรคลอริกสามารถนำกลับได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามในการระเหยต้องใช้พลังงานสูงมากในการที่จะทำให้กรดกลายเป็นไอกรด โดยได้มีการประมาณการใช้พลังงานไว้ที่ 375 กิโลวัตต์ต่อตันน้ำกรด และนอกจากนี้ยังต้องใช้พลังงานความร้อนในการควบแน่นให้ไอกรดและน้ำกลายเป็นสารละลายกรด ประมาณ 150 กิโลวัตต์ต่อตันของสารละลายกรด เมื่อนำค่าใช้จ่ายเหล่านี้มาประกอบการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ จะพบว่าค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานจะสูงมากจนทำให้ผลประโยชน์ที่ได้ในแต่ละปีมีค่าน้อย ระยะเวลาในการคืนทุนจึงนาน ยกตัวอย่างข้อมูลที่ได้มาจากการมโรงแรงงานอุตสาหกรรม ดังนี้

กระบวนการนำกลับกรดด้วยการระเหยที่มีขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร (แหล่งพลังงานคือ ก๊าซธรรมชาติ)

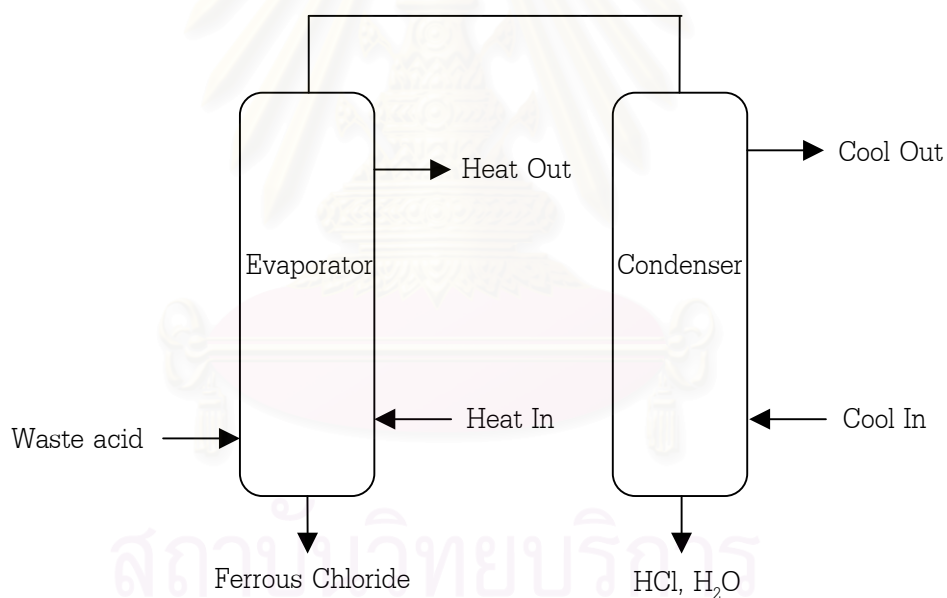
เงินลงทุน	4,669,000	บาท
ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน	326,630	บาทต่อปี
รายได้ทั้งหมด	501,598	บาทต่อปี
ระยะเวลาในการคืนทุน (ดอกเบี้ย 0 %)	27	ปี

กระบวนการนำกลับกรดด้วยการระเหยที่มีขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร (แหล่งพลังงานคือ ก๊าซธรรมชาติ)

เงินลงทุน	6,670,000	บาท
ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน	689,525	บาทต่อปี
รายได้ทั้งหมด	1,128,596	บาทต่อปี
ระยะเวลาในการคืนทุน (ดอกเบี้ย 0 %)	16	ปี

กระบวนการนำกลับกรดด้วยการระเหยที่มีขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร (แหล่งพลังงานคือ ก๊าซธรรมชาติ)

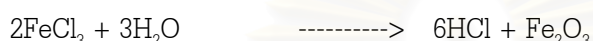
เงินลงทุน	13,340,000	บาท
ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน	1,899,175	บาทต่อปี
รายได้ทั้งหมด	3,385,788	บาทต่อปี
ระยะเวลาในการคืนทุน (ดอกเบี้ย 0 %)	9	ปี



รูปที่ 3.4 แสดงกระบวนการระเหย

### 3.2.2 ไพโรไฮโดรไลซิส (Pyrohydrolysis)

หลักในการทำงานของกระบวนการไพโรไฮโดรไลซิสคือ ใช้เทคนิคในการแยกสลายด้วยความร้อน เพื่อที่จะแยกองค์ประกอบของสารละลายกรดออกจากกัน เมื่อป้อนกรดเคี้ยว (Pickle Liquor) เข้าไปในเตาเผา ซึ่งถูกออกแบบในลักษณะที่เป็นถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed reactor) ความร้อนจะทำให้เกิดการแตกตัวของสารละลายกรดทำให้ได้ Ferric Oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), ไฮดรอกไซด์คลอริก และไอน้ำ โดยที่ Ferric Oxide เกิดจากการทำปฏิกิริยาคือ



โดยที่ก๊าซออกซิเจนได้จากอากาศจากภายนอกที่ป้อนเข้าไปทางเตาเผา

เป็นที่น่าสังเกตว่าในกระบวนการนี้ Ferrous ion ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ที่เป็นอันตรายได้ถูกเปลี่ยนให้เป็นสารประกอบของ Ferric ion ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ดังนั้นจึงไม่จำเป็นที่จะต้องนำ Ferric Oxide ไปผ่านกระบวนการบำบัดใดๆ ต่อไป สำหรับไฮดรอกไซด์คลอริกและไอน้ำจะผ่านเข้าไปยังหอดูดซับ และนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป กระบวนการไพโรไฮโดรไลซิสนี้มีประสิทธิภาพในการนำกลับกรดได้สูงถึง 99 เปอร์เซ็นต์ แต่ทั้งนี้ต้องใช้พลังงานในการปฏิบัติการที่สูงมาก อีกทั้งยังต้องใช้ต้นทุนในการผลิตที่สูงอีกด้วย จึงเหมาะสมกับโรงงานที่มีขนาดใหญ่ที่ต้องการปริมาณการใช้สารละลายกรดไฮดรอกไซด์คลอริกที่สูงยกตัวอย่างข้อมูลที่ได้มาจากการมโรงงานอุตสาหกรรม ดังนี้

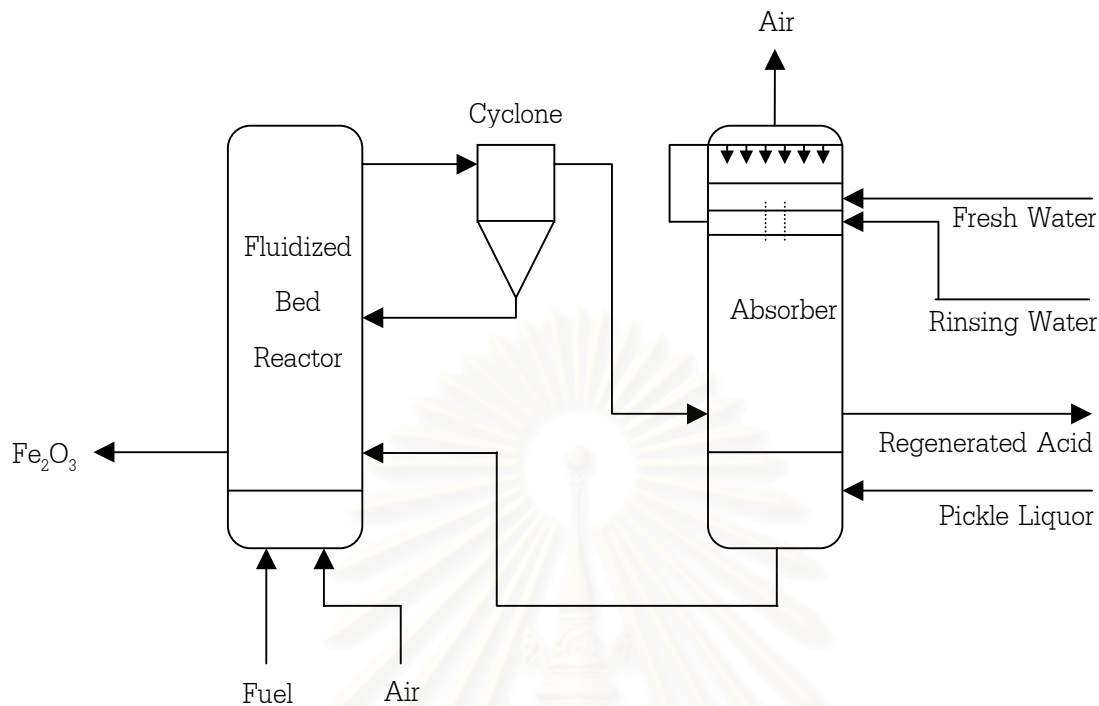
กระบวนการนำกลับกรดด้วยกระบวนการไพโรไฮโดรไลซิสที่มีขนาด 32 ลูกบาศก์เมตร (แหล่งพลังงานคือ ก๊าซธรรมชาติ)

เงินลงทุน	56,627,350	บาท
ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน	8,162,000	บาทต่อปี
รายได้ทั้งหมด	16,968,171	บาทต่อปี
ระยะเวลาในการคืนทุน (ดอกเบี้ย 0 %)	7	ปี

กระบวนการนำกลับกรดด้วยกระบวนการไพโรไฮโดรไลซิสที่มีขนาด 38 ลูกบาศก์เมตร (แหล่งพลังงานคือ ก๊าซธรรมชาติ)

เงินลงทุน	61,607,500	บาท
ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน	9,539,125	บาทต่อปี
รายได้ทั้งหมด	20,150,000	บาทต่อปี
ระยะเวลาในการคืนทุน (ดอกเบี้ย 0 %)	6	ปี





รูปที่ 3.5 แสดงการนำกลับกรดด้วยกระบวนการไพโรไฮโดรไลซิส

### 3.2.3 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กโดยทั่วๆ ไปนิยมใช้กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ 2 กระบวนการ คือ การแลกเปลี่ยนไอออนของกรด กับ การแลกเปลี่ยนไอออนของเหล็ก

#### 3.2.3.1 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของกรด (Retardation Acid Adsorption)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของกรด ดังในรูปที่ 3.6 มีหลักการทำงาน คือ เมื่อกรดเสียผ่านเข้าไปยังหอเรซิน กรดจะถูกดูดซับด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งจะทำให้สายทางออกมีปริมาณของกรดต่ำและความเข้มข้นของสารละลายที่มีเกลือโลหะมากขึ้น กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจะดำเนินการต่อไปจนกระทั่งความเข้มข้นของกรดในเรซินถึงจุดอิ่มตัว หลังจากนั้นหอเรซินจะถูกรีเจนเนอเรต (Regenerate) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งจะทำให้ได้สารละลายกรดที่มีเกลือของโลหะปนอยู่ในปริมาณที่น้อย ความเข้มข้นของกรดในสารละลายที่นำกลับมาจะขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำที่ใช้ในการรีเจนเนอเรต โดยทั่วไปแล้วปริมาณของน้ำที่ใช้จะเท่ากับปริมาณของกรดเสียที่ผ่านเข้าไปยังหอเรซินก่อนหน้านั้น ซึ่งจะทำให้ได้สารละลายกรดที่มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับความเข้มข้นของกรดเสีย จากการศึกษพบว่ากระบวนการนี้ไม่เหมาะสมกับกระบวนการกำจัดสนิมแบบต่อเนื่อง เนื่องจากสารละลายกรดที่ใช้แล้วมีความเข้มข้นของกรดและไอออน

เหล็กต่ำ สำหรับกรณีที่เป็นกระบวนการแบบกะพบว่าระยะเวลาคืนทุนขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของอ็อกซอนเหล็กและกรด เช่นในกรณีที่มีความเข้มข้นของกรดในสารละลายมีค่าเท่ากับ 30 กรัมต่อลิตรและปริมาณความเข้มข้นของอ็อกซอนเหล็กในสารละลายเท่ากับ 90 กรัมต่อลิตร พบว่าระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 5.5 ปี ในขณะที่ความเข้มข้นของกรดในสารละลายมีค่าเพิ่มเป็น 50 กรัมต่อลิตรและปริมาณความเข้มข้นของอ็อกซอนเหล็กในสารละลายคงที่ที่ 90 กรัมต่อลิตร พบว่าระยะเวลาคืนทุนเพิ่มเป็น 9.5 ปี

สำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ชี้ให้เห็นว่าเทคนิคนี้เหมาะสำหรับใช้ในการนำกลับกรดได้ทุกขนาด ไม่ว่าจะเป็นโรงงานขนาดกลาง หรือขนาดเล็กก็ตาม แต่ขีดความสามารถสูงสุดในการจัดการกับสารละลายกรดที่ 15 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จึงทำให้โรงงานขนาดกลางได้เปรียบกว่าโรงงานขนาดเล็กในด้านต้นทุนต่อหน่วยที่ต่ำกว่า ส่งผลให้มีระยะเวลาในการคืนทุนที่ต่ำกว่า จากข้อมูลที่ได้จากกรมโรงงานดังตัวอย่างต่อไปนี้

กระบวนการนำกลับกรดด้วยการแลกเปลี่ยนอ็อกซอนของกรดที่มีขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร

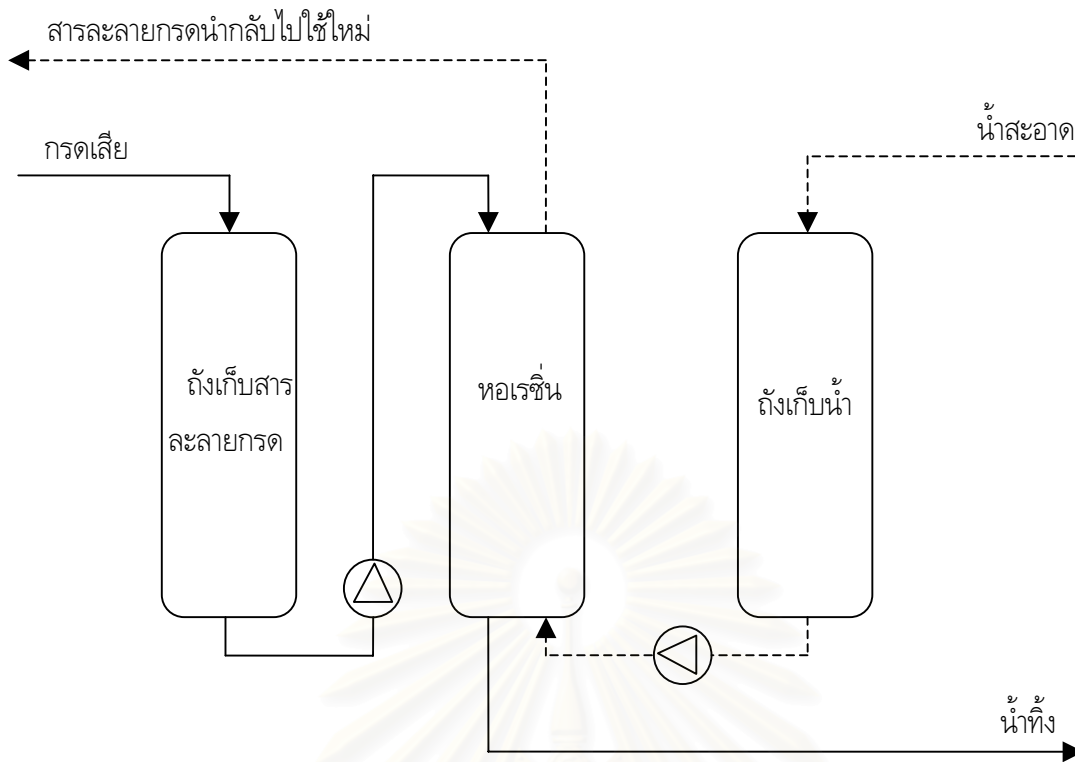
เงินลงทุน	1,260,720	บาท
ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน	87,100	บาทต่อปี
รายได้ทั้งหมด	308,906	บาทต่อปี
ระยะเวลาในการคืนทุน (ดอกเบี้ย 0 %)	6	ปี

กระบวนการนำกลับกรดด้วยการแลกเปลี่ยนอ็อกซอนของกรดที่มีขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร

เงินลงทุน	1,876,800	บาท
ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน	165,250	บาทต่อปี
รายได้ทั้งหมด	824,766	บาทต่อปี
ระยะเวลาในการคืนทุน (ดอกเบี้ย 0 %)	3	ปี

กระบวนการนำกลับกรดด้วยการแลกเปลี่ยนอ็อกซอนของกรดที่มีขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร

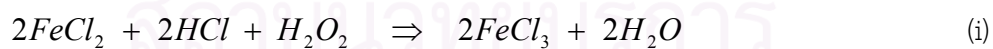
เงินลงทุน	3,930,400	บาท
ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน	425,750	บาทต่อปี
รายได้ทั้งหมด	2,544,300	บาทต่อปี
ระยะเวลาในการคืนทุน (ดอกเบี้ย 0 %)	2	ปี



รูปที่ 3.6 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของกรด

### 3.2.3.2 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของเหล็ก (Retardation Iron Adsorption)

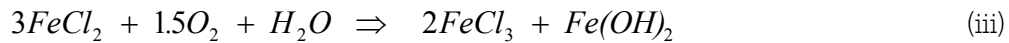
กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.7 มีหลักการทำงานที่คล้ายกับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของกรด แต่แทนที่จะแลกเปลี่ยนไอออนของกรด กลับแลกเปลี่ยนไอออนของเหล็กในขณะที่กรดเสียผ่านหอเรซิน โดยมีหลักการคือ กรดเสียจะต้องถูกออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) เพื่อที่จะเปลี่ยนเหล็กประจุสอง ( $Fe^{2+}$ ) หรือ Ferrous Chloride ( $FeCl_2$ ) ให้เป็นเหล็กประจุสาม ( $Fe^{3+}$ ) หรือ Ferric Chloride ( $FeCl_3$ ) ดังสมการทางเคมีดังนี้



และมีการเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นเพื่อที่จะทำให้มีความเข้มข้นรวมสูงถึง 200 กรัมของกรดไฮโดรคลอริกต่อลิตรของสารละลาย เพื่อที่จะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนประจุลบของคลอไรด์ ( $FeCl_4^-$ ) ดังปฏิกิริยานี้



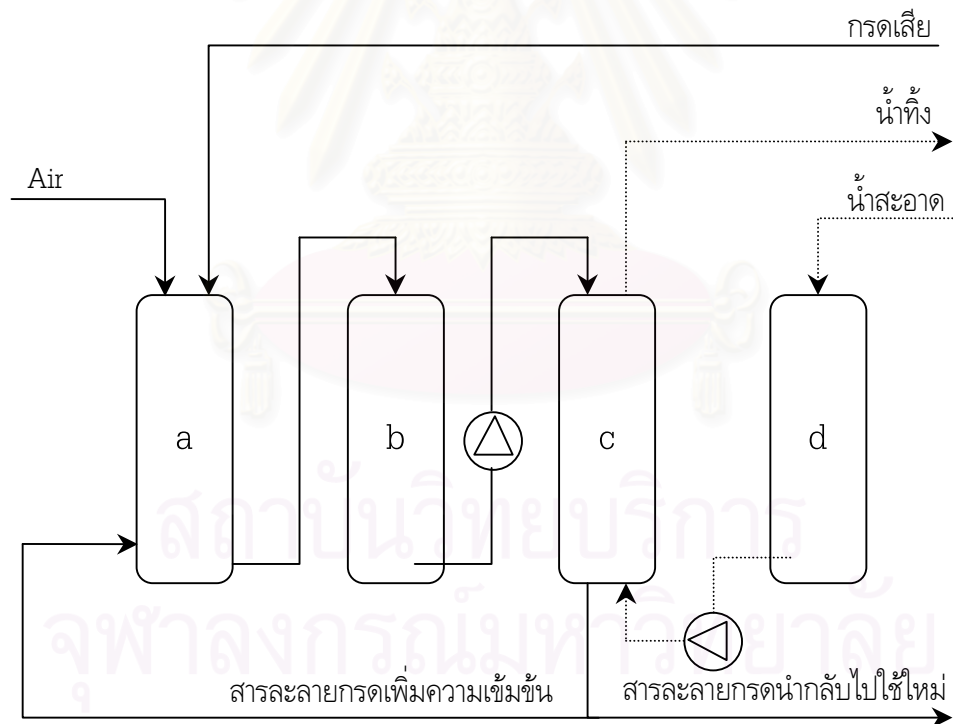
ถ้าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกไม่มากพอ จะทำให้เกิด Ferric chloride ( $FeCl_3$ ) ได้ไม่ดีพอ เนื่องจากยังมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอีกปฏิกิริยาหนึ่งที่เราไม่ต้องการคือ



จะสังเกตว่าสมการนี้ไม่มีกรดไฮโดรคลอริกเป็นสารตั้งต้น ดังนั้นถ้าเราเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น จะทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยา (i) มากกว่าปฏิกิริยา (iii)

หลังจากนั้นสารละลายจะถูกป้อนเข้าสู่หอเรซิน เรซินก็จะทำการแลกเปลี่ยนไอออนของสารประกอบเชิงซ้อนประจุลบของคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_4^-$ ) ดังนั้นสารละลายที่ออกมาจะมีเฉพาะกรดไฮโดรคลอริกที่สามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้ สำหรับไอออนของสารประกอบเชิงซ้อนประจุลบของคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_4^-$ ) จะถูกนำกลับไปบำบัดโดยการรีเจนเนอเรต(Regeneration) ต่อไป

ข้อเสียของกระบวนการนี้ก็คือจะต้องมีการเติมสารเคมีเข้าสู่ระบบ และเมื่อพิจารณาว่าถ้าความเข้มข้นของกรดเสียมีค่าต่ำ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้กรดไฮโดรคลอริกเพิ่มเติมอีกเป็นจำนวนมาก ยิ่งไปกว่านั้นเรซินจะต้องถูกรีเจนเนอเรตด้วยน้ำที่ปราศจากแร่ธาตุซึ่งจะเป็นการเพิ่มการทำงานของโรงงานบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นเทคนิคนี้จึงไม่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมขึ้นรูปเหล็กในประเทศไทยในปัจจุบัน เว้นเสียแต่ว่ากรดเสียในโรงงานมีความเข้มข้นของกรดและไอออนของเหล็กที่สูงมาก



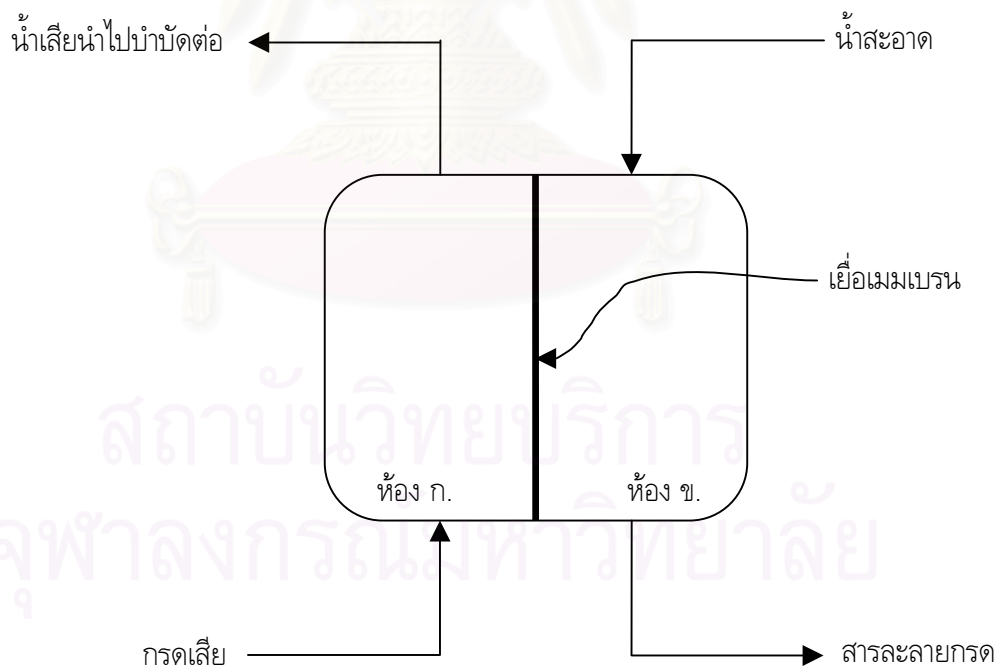
รูปที่ 3.7 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของเหล็ก a) ถังออกซิไดซ์ b) ถังเก็บสารละลายกรด c) หอเรซิน และ d) ถังเก็บน้ำ

### 3.2.4 การใช้เยื่อเมมเบรน (Membrane)

การใช้เยื่อเมมเบรน ยังเป็นวิธีการที่ยังไม่นิยมกันมากนักโดยเฉพาะในประเทศไทย เนื่องจากเป็นวิธีการที่เริ่มเกิดขึ้นได้ไม่นานนัก และยังไม่มียางายในรายละเอียดข้อมูลด้านเศรษฐศาสตร์ แต่หลักการใช้เยื่อเมมเบรนเป็นที่น่าสนใจในหมู่นักวิจัย สาเหตุเนื่องมาจากกระบวนการนี้ไม่ต้องสูญเสียพลังงานมาก และมีประสิทธิภาพในการนำกลับกรดที่ดี

หลักการใช้เยื่อเมมเบรนกล่าวโดยทั่วไปมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.8 คือ เมื่อผ่านกรดเสียเข้าไปในห้อง ก. เยื่อเมมเบรนจะทำการดูดซับกรดไว้ ดังนั้นทางออกในห้อง ก. จะมีเฉพาะน้ำและของเสียที่จะต้องนำไปบำบัดต่อไป ในขณะที่เดียวกันห้อง ข. จะมีน้ำไหลเข้ามาเพื่อทำการดูดซับกรดในเยื่อเมมเบรน ดังนั้นทางออกของห้อง ข. จะเป็นสารละลายกรดเท่านั้น

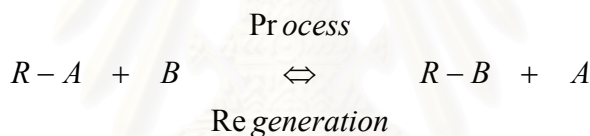
หลักการที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเพียงพื้นฐานของหลักการใช้เยื่อเมมเบรนเท่านั้น ถ้าจะกล่าวในรายละเอียดนั้นก็มีหลายวิธีที่จะนำมาประยุกต์ใช้ แต่เราจะไม่กล่าวถึงในรายละเอียดนี้



รูปที่ 3.8 แสดงกระบวนการนำกลับกรดโดยการใช้เยื่อเมมเบรน

### 3.3 ทฤษฎีการแยกโลหะด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน

การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เป็นการแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนที่อยู่ในภาคของแข็งกับภาคของเหลวที่ไม่สามารถละลายซึ่งกันและกันได้ และทั้งสองส่วนนี้ต้องอยู่ติดกัน ไอออนที่อยู่ในภาคของแข็งเป็นประจุที่ไม่ติดแน่นหรือมีโครงสร้างแบบเปิด กล่าวคือสามารถยอมให้อิออนและโมเลกุลของตัวทำละลายสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั้งเข้าและออก ซึ่งเกิดจากแรงอิเล็คโตรสแตติก (Electrostatic force) บนผิวของเรซิน (Resin) และเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุเหมือนกันในสารละลายที่ไหลผ่านเรซิน โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซินไม่เท่ากัน หรือเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างของแข็งกับของเหลว โดยไม่เกี่ยวข้องกับอนุโมลในโครงสร้างทางกายภาพของของแข็งแต่อย่างใด ไอออนที่อยู่ในภาคของแข็งจะต้องมีปริมาณที่มากพอเพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนไอออนได้อย่างรวดเร็ว การแลกเปลี่ยนไอออนมีทั้งการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบ และไอออนที่มีประจุบวก เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนแล้วสามารถเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปของไอออนเดิม โดยการผ่านสารละลายที่มีไอออนเช่นเดียวกับไอออนเริ่มต้น เรียกขั้นตอนนี้ว่า การรีเจนเนอเรต (Regeneration) และสารที่ใช้เรียกว่า รีเจนเนอเรนท์ (Regenerant) การแลกเปลี่ยนไอออนแสดงดังสมการ



อัตราการแลกเปลี่ยนไอออน ระหว่างไอออนบนผิวของเรซินกับไอออนในสารละลายถูกควบคุมด้วยอัตราการไหลของสารละลาย ที่อัตราการไหลช้าจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีกว่าอัตราการไหลเร็ว

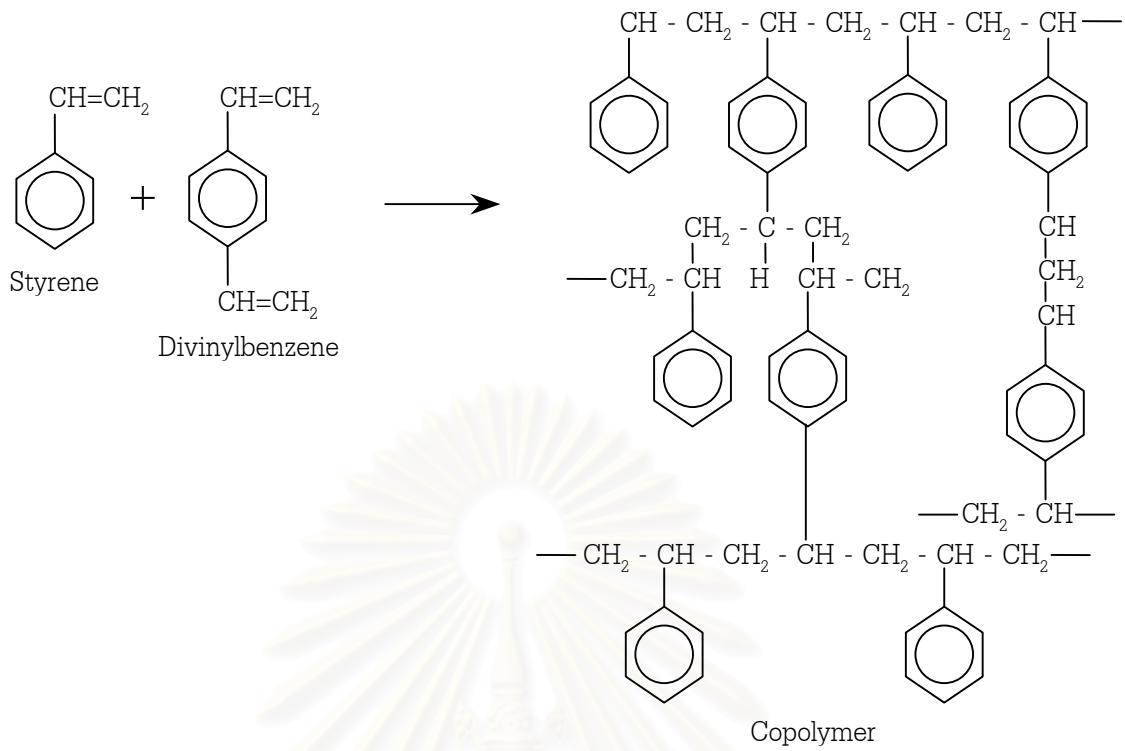
การแลกเปลี่ยนไอออนถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานสำหรับปรับปรุงคุณภาพของน้ำ เช่นกำจัดความกระด้างของน้ำ (Softening) ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนของแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ที่ทำให้น้ำกระด้างกับไอออนของโซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) ของเรซิน และการกำจัดไอออนต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ (Deionization) เพื่อให้ได้น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าวิธีอื่นมาก อีกทั้งยังสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าวิธีอื่นๆ อีกด้วย

ของแข็งในการแลกเปลี่ยนไอออนทำจากโพลิเมอร์ (Polymer) ที่เรียกว่า เรซิน (Resin) โดยธรรมชาติมีโครงสร้างที่ซับซ้อน สามารถทำได้จากธรรมชาติ และสังเคราะห์ขึ้นมา โพลิเมอร์จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่ และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงข้ามนี้ เป็นไอออนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่อยู่ในสารละลาย ดังนั้นการเรียกชนิดของสารแลกเปลี่ยนไอออน จะเรียกตามชนิดของประจุที่เกิดการแลกเปลี่ยน การแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า แคทไอออนเอกเซนเจอร์ (Cation

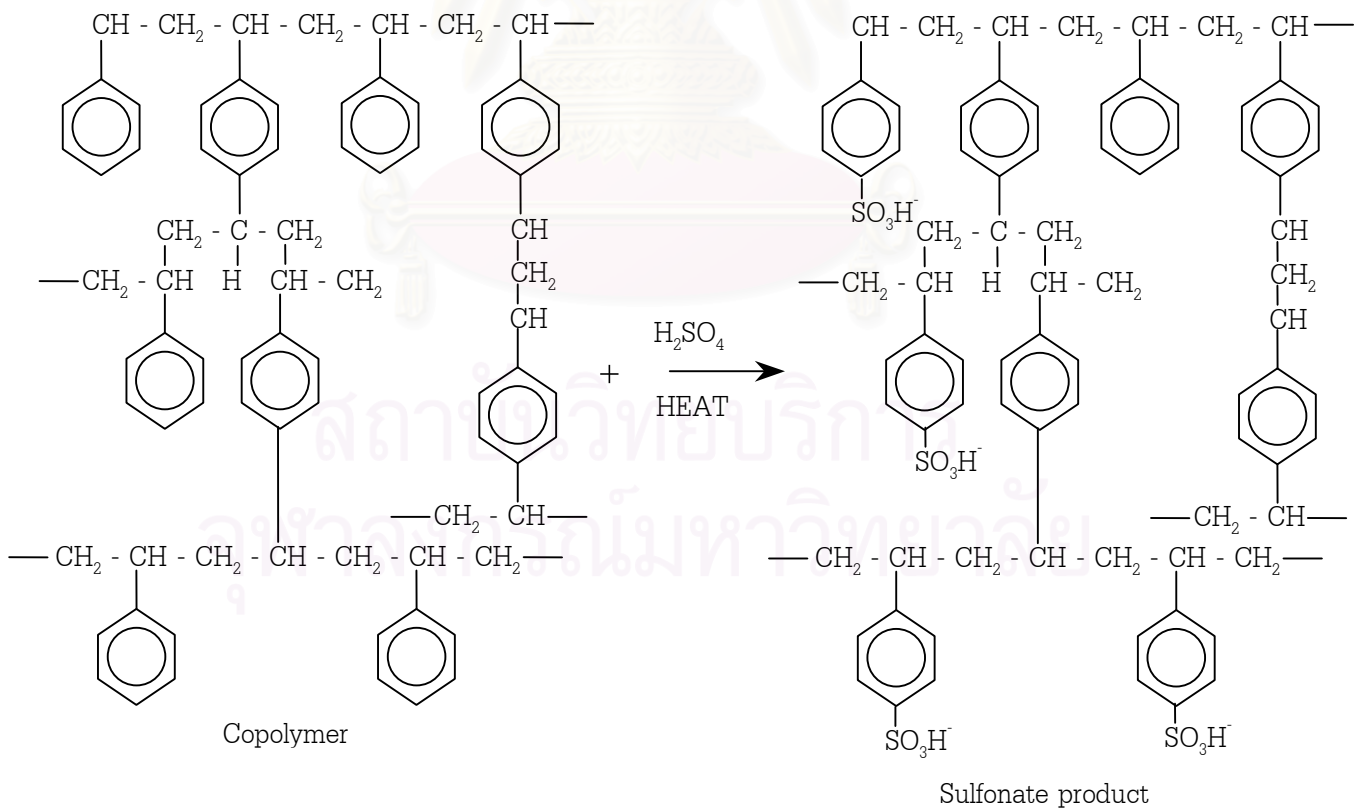
exchanger) หรือ แคทไอออนเรซิน (Cation resin) และการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบจะเรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (Anion exchanger) หรือ แอนไอออนเรซิน (Anion resin)

ปี ค.ศ. 1945 D'Alelio ได้จดสิทธิบัตรการสังเคราะห์สารอินทรีย์ ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน (Polymerization) ระหว่างสไตรีน (Styrene) กับไดไวนิลเบนซีน (Divinylbenzene, DVB) มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.9 โดยมีลักษณะเป็นของแข็งที่มีการเชื่อมต่อบริเวณโมเลกุล โดยโมเลกุลของสไตรีนเป็นโครงสร้างพื้นฐานและมีไดไวนิลเบนซีน เชื่อมต่อแบบไขว้สามมิติ (Three dimensions cross linking) ทำให้สารโพลีเมอร์ที่ได้ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ และมีความเหนียว อัตราส่วนระหว่างสไตรีนต่อไดไวนิลเบนซีนอยู่ระหว่าง ร้อยละ 1-20 โดยน้ำหนัก มีผลต่อโครงสร้างของเรซิน อัตราการเชื่อมโยงแบบสามมิติ (Degree of cross linking) ความพรุนของเรซิน และคุณสมบัติเฉพาะตัวของเรซิน ทำให้เรซินแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางด้านเคมีแตกต่างกัน เช่น ความหนาแน่น (Density) การดูดซับน้ำ (Hydration) การพองตัว (Swelling) การซึมผ่าน (Diffusion) และรูพรุนของเรซิน (Relative porosity) โดยทั่วไปจะใช้อัตราส่วนของสไตรีนต่อไดไวนิลเบนซีนประมาณ ร้อยละ 8 เรซินที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเจล (Gel) การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดจากการที่ไอออนซึมผ่านช่องของโครงสร้างเรซิน และเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่เกาะอยู่บนเรซิน เรซินชนิดนี้ไม่สามารถใช้ได้กับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า 40 อังสตรอม ( $\text{\AA}$ ) ต่อมาในปี 1959 ได้มีการสังเคราะห์เรซินที่เรียกว่า แมคโคพอร์ัส (Macroporous) ลดขนาดของช่องว่างภายในแล็กอง แต่มีขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้นประมาณ 1300 อังสตรอม โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน นอกจากนี้ยังทำให้เรซินมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทนต่อการเกิดออกซิเดชันได้มากขึ้น และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงไอออนเร็วขึ้น

สารโพลีเมอร์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์เรซินสำหรับแลกเปลี่ยนไอออนทั้งชนิด แคทไอออนเรซิน และแอนไอออนเรซิน โดยนำสารโพลีเมอร์มาทำปฏิกิริยากับสารเคมีกรดหรือด่าง เพื่อให้ได้หมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนโครงสร้างของเรซินตามต้องการ เช่น การทำปฏิกิริยาซัลโฟเนชัน (Sulfonation) ดังในรูปที่ 3.10 จะได้เรซินที่มีคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดแก่ (Strong acid cation exchanger) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันของซัลโฟนิก ( $\text{HSO}_3^-$ ) เกาะติดกับโครงสร้างของเรซิน ไอออนของไฮโดรเจน ( $\text{H}^+$ ) ในหมู่ฟังก์ชันของซัลโฟนิก จะเป็นไอออนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกับแคทไอออนที่อยู่ในสารละลาย



รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างสารที่ได้จากการโพลิเมอร์ระหว่างสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน



รูปที่ 3.10 แสดงปฏิกิริยาซัลโฟเนชันของสารโพลิเมอร์



### 3.3.1 การจำแนกประเภทของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

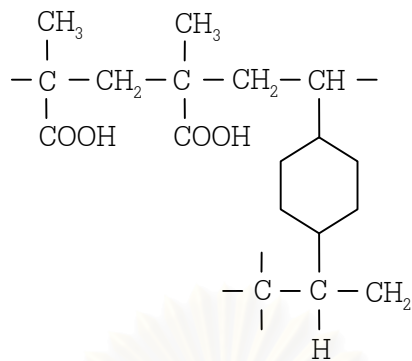
ความสามารถของเรซินในการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายขึ้นอยู่กับชนิดของประจุ และจำนวนของหมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนเรซินนั้น ชนิดของไอออนที่เกาะบนเรซินที่มีผลต่อความสมดุล (Equilibrium) และความเฉพาะเจาะจง (Selectivity) ต่อเรซินมี 2 ชนิด คือชนิดแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchanger) และชนิดแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion Exchanger) และเมื่อแบ่งตามหมู่ฟังก์ชัน สามารถแบ่งได้ 4 ชนิด คือ

- เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดแก่ (Strong Acid Cation Exchanger, SAC) ได้แก่เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันซัลโฟนิก ( $\text{SO}_3\text{H}$ ) ฟอสโฟนิก ( $\text{H}_2\text{PO}_4$ ) และฟีนอลิก ( $\text{OH}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 สามารถรีเจนเนอเรตได้ด้วยเกลือแกง หรือกรดกำมะถัน

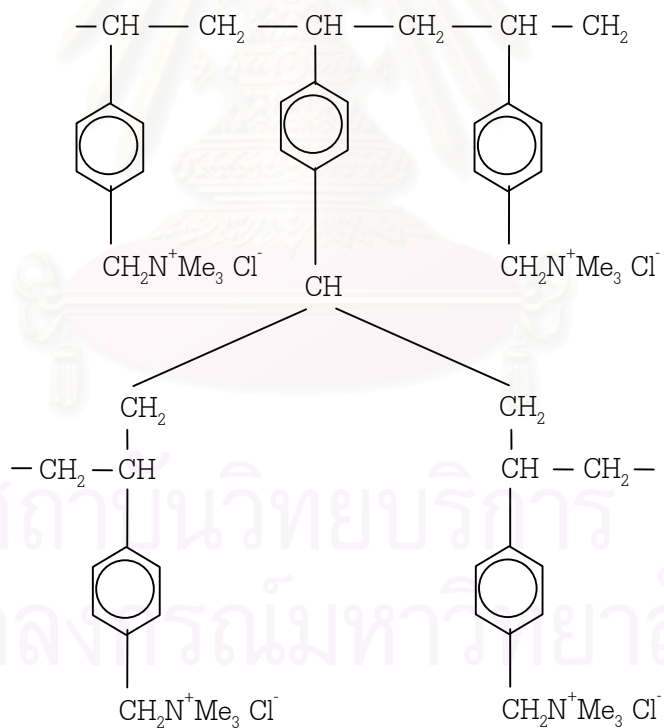
- เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดอ่อน (Weak Acid Cation Exchanger, WAC) ได้แก่เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (Carboxyl,  $\text{COO}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารโพลิเมอร์ของสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน กับกรดคาร์บอนิก ( $\text{R-COOH}$ ) เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุแบบกรดอ่อนนี้แตกตัวได้น้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่เป็นกรด ทำให้ไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ในสภาวะที่เป็นกรด ทำให้ความสามารถของการแลกเปลี่ยนไอออนของไฮโดรเจนต่ำกว่าเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดแก่ แต่มีข้อดีคือสามารถรีเจนเนอเรตได้ง่ายกว่าเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดแก่

- เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบต่างแก่ (Strong Basic Anion Exchanger, SBA) ได้แก่ เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันของเอมีน (Amine) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาเมทิลเลชัน (Methylation) ของโพลิเมอร์กับสารไตรเมทิลลามีน (Trimethylamine) หรือไดเมทิลเอทานอลามีน (Dimethyl ethanolamine)

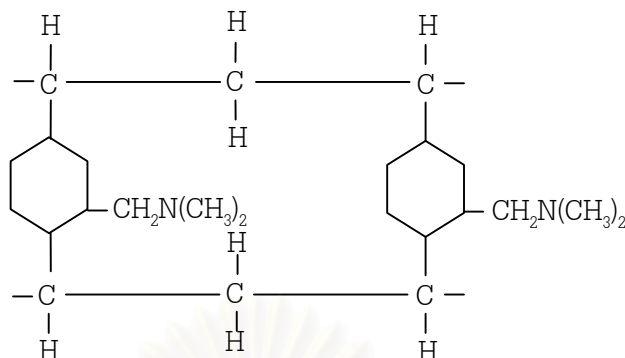
- เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบต่างอ่อน (Weak Basic Anion Exchanger, WBA) ได้แก่เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันของเอมีนแบบเซคันดารีเอมีน (Secondary Amine,  $\text{CH}_2\text{NH}_2(\text{CH}_3)^+$ ) หรือเทอร์ติเอารีเอมีน (Tertiary Amine,  $\text{CH}_2\text{NH}(\text{CH}_3)_2^+$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบต่างอ่อนมีคุณสมบัติแบบตรงข้ามกับเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดอ่อน เรซินชนิดนี้ทำหน้าที่ในการกำจัดกรดแก่ เช่น เกลือแกง กรดกำมะถัน และกรดไนตริกออกจากน้ำ และไม่ต้องมีไอออนอิสระ สามารถรีเจนเนอเรตได้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมคาร์บอเนต ข้อดีของเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบต่างอ่อนคือ มีประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรตสูงเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เปลืองสารเคมีน้อย



รูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดอ่อน



รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบต่างแก่



รูปที่ 3.13 แสดงตัวอย่างเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบต่างอ่อน

### 3.3.2 คุณสมบัติของเรซิน

3.3.2.1 ขนาดของเรซิน (Particle Size) เรซินมีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.04 - 1.0 มิลลิเมตร (18 - 325 เมส) ในทางการค้าจะใช้เรซินขนาด 20 - 50 เมส และ 50 - 100 เมส ขนาดของเรซินมีผลต่อความเร็วของการแลกเปลี่ยนไอออน โดยเรซินที่มีขนาดเล็กต้องใช้แรงดันสูงกว่าขนาดใหญ่

3.3.2.2 ความจุไอออนของเรซิน (Ion Exchange Capacity) แบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

- ความจุไอออนรวมของเรซิน (Total Capacity) หมายถึง จำนวนไอออนทั้งหมดที่มีอยู่บนเรซิน ได้จากการคำนวณปริมาณของไอออนทั้งหมดที่อยู่บนเรซิน

- ความจุไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนได้จริง (Operating Capacity หรือ Effective Capacity) หมายถึง จำนวนไอออนที่แลกเปลี่ยนได้เมื่ออยู่ในสภาวะการใช้งานจริง ขึ้นอยู่กับสภาวะของการใช้งาน เช่น อัตราการไหลของน้ำที่ต้องการบำบัด (Service Flowrate) ระดับความเข้มข้นของการรีเจนเนอเรต (Regeneration Level) อัตราการไหลของการรีเจนเนอเรต (Regeneration Flowrate) เป็นต้น

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนทั้งหมดของเรซินขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันทั้งหมดที่เกาะอยู่บนโครงสร้างโพลีเมอร์ การบอกค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนทั้งหมด เช่น เรซินแบบกรดแก่ หมู่ฟังก์ชันซัลโฟเนต จะแสดงอยู่ในรูปของ มิลลิอิควิวาเลนต์ ต่อกรัมของเรซินแห้ง (Milliequivalent/gram, meq/g) หมายถึง จำนวนมิลลิกรัมสมมูลของไอออนที่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนได้ต่อน้ำหนักของเรซินแห้ง 1 กรัม (Dry-weight capacity) กรณีของเรซินแบบต่างแก่ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนมีเปลี่ยนแปลงมากกว่าเรซินแบบกรดแก่ เมื่อเรซินมีความชื้นจะรายงานความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนในรูป

ของปริมาตรเปียก (Wet - Volume Capacity) โดยทั่วไปจะแสดงค่าเป็น อีควิวาเลนต์ต่อลิตรของเรซิน (Equivalent/liter, eq/L) หรือ ในทางอุตสาหกรรมจะแสดงในหน่วยของ กิโลเกรน ของ  $\text{CaCO}_3$  ต่อ ลบ.ฟุต (Kilograins of  $\text{CaCO}_3$ , kgr/ft<sup>3</sup>) ซึ่ง 1 kgr/ft<sup>3</sup> จะเท่ากับ 21.8 eq/L โดยทั่วไป SAC ในรูปของโซเดียมมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประมาณ 2 eq/L และ SBA ในรูปของคลอไรด์จะมีค่าระหว่าง 1.0 - 1.4 eq/L ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้จริง จะใช้เมื่อเรซินกำลังใช้งาน ซึ่งจะมีปริมาตรแตกต่างกันตามลักษณะของไอออน โดยทั่วไปจะรายงานความสามารถในการแลกเปลี่ยนเชิงปริมาตร เมื่อมีการเติมน้ำเข้าไปในระบบแล้ว ซึ่งจะเป็นปริมาตรของเรซิน ที่มีน้ำอยู่ระหว่างโครงสร้าง เรียกปริมาตรของเรซินนี้ว่า Bed Volume

เทอมที่ใช้แสดงคุณลักษณะของเรซินอีกเทอมหนึ่งเรียกว่า Loading (L) ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนของไอออนของสารตัวอย่างที่มีอยู่ในเรซินต่อความจุของเรซิน

$$L = \frac{n[MR_n]}{C}$$

เมื่อ  $n$  คือ ประจุของไอออน  $M^{n+}$   
 $[MR_n]$  คือ ความเข้มข้นของ  $M^{n+}$  ในเรซิน  
 $C$  คือ ความจุของเรซิน ซึ่งหมายถึงจำนวนมิลลิกรัมสมมูลของไอออนต่อเรซินที่แห้ง 1 กรัม

3.3.2.3 ความเสถียร (Stability) ความเสถียรของเรซินมีผลต่อลักษณะการใช้งาน และอายุของเรซิน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความเสถียรของเรซินทางกายภาพ ได้แก่ แรงเค้น ซึ่งทำให้โครงสร้างของเรซินเปลี่ยนรูป และอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของเรซิน

3.3.2.4 ความเฉพาะเจาะจงต่อไอออน (Ion Selectivity) ความเฉพาะเจาะจงของการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นอยู่กับความแรงของประจุและขนาดของประจุ โดยความแรงของประจุมีผลต่อการแลกเปลี่ยนมากที่สุด ความเฉพาะเจาะจงต่อไอออนสามารถแบ่งความเฉพาะเจาะจงได้ 3 ประการ คือ

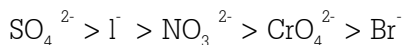
ประการที่ 1 ที่ความเข้มข้นต่ำและอุณหภูมิปรกติ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนจะเพิ่มขึ้น เมื่อวาเลนซ์อิเล็กตรอนของไอออนที่แลกเปลี่ยนเพิ่มขึ้น เช่น



ประการที่ 2 ที่ความเข้มข้นต่ำ อุณหภูมิปรกติและวาเลนซ์อิเล็กตรอนคงที่ ความสามารถของการแลกเปลี่ยน จะเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอม เช่น



ประการที่ 3 ที่ความเข้มข้นของไอออนสูง ความแตกต่างขึ้นอยู่กับศักยภาพของวาเลนซ์อิเล็กตรอน เช่น  $\text{Na}^+$  กับ  $\text{Ca}^{2+}$  หรือ  $\text{NO}_3^-$  กับ  $\text{SO}_4^{2-}$  ในบางกรณี ไอออนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนน้อยกว่า อาจจะมีศักยภาพในการแลกเปลี่ยนต่ำกว่า  $\text{I}^-$  และ  $\text{NO}_3^-$  ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเดียว เช่น



3.3.2.5 คุณสมบัติการเก็บน้ำไว้ในตัว มีความสำคัญมากต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน ถ้าเรซินมีความชื้นสูง คือเรซินนั้นเก็บกักน้ำไว้มาก อาจจะทำให้เห็นจากการบวมหรือพองน้ำของเรซิน เมื่อเรซินถูกแช่ไว้ในน้ำ ซึ่งการที่น้ำเข้าไปในช่องว่างนี้จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีขึ้น ซึ่งระดับการบวมน้ำขึ้นอยู่กับค่าความเหนียวแน่นของการประสาน ถ้าเรซินมีการบวมน้ำมากเกินไปจะทำให้เรซินมีความชื้นภายในสูง ความสามารถ (คิดต่อปริมาตร) ในการแลกเปลี่ยนไอออนจึงต่ำลง ดังนั้นในการออกแบบคอลัมน์บรรจุเรซิน จึงต้องเผื่อพื้นที่ในการบวมตัวของเรซินในน้ำ รวมทั้งในสารที่เป็นรีเจนเนอเรนต์ให้เพียงพอ เพื่อป้องกันเรซินแน่นเกินไป แต่ส่วนใหญ่นิยมให้ช่องว่างในเรซินเหลือค่อนข้างมาก มิฉะนั้นอาจทำให้ช่องว่างมีเนื้อที่น้อยเกินไป แรงยึดเหนี่ยวสูง เรซินไม่มีความยืดหยุ่นจะทำให้เรซินแตกง่าย

3.3.2.6 ความหนาแน่นปรากฏ (Bulk Density) เป็นความหนาแน่นซึ่งเกิดขึ้นหลังจากการตกตะกอน ล้างย้อนรวมทั้งหมดทิ้งให้สะเด็ดน้ำแล้ว หมายถึง น้ำหนักทั้งหมดของเรซินหารด้วยปริมาตรทั้งหมด (รวมความพรุนของเรซินด้วย) อาจเรียกความหนาแน่นชนิดนี้อีกอย่างหนึ่งว่า Shipping Weight มีประโยชน์ในการขนส่งจะบอกว่าเรซินหนึ่งหน่วยปริมาตรหนักเท่าใด

3.3.2.7 คุณสมบัติในการใช้เรซินเป็นตัวกรอง บอกด้วยขนาดของเรซินโดยสามารถบอกด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size) และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient) ซึ่งมีความหมายเหมือนกับการใช้ทรายกรอง นอกจากนี้ขนาดของเรซินยังใกล้เคียงกับทรายกรองอีกด้วย อาจบอกด้วยขนาดของตะแกรงร่อนเบอร์ต่างๆ

3.3.2.8 อัตราการแลกเปลี่ยน (Exchange Rate) อัตราการแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนในสารละลาย กับไอออนที่เกาะอยู่บนผิวของเรซินจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

- ขนาดของเรซิน เรซินที่มีขนาดเล็กจะแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีกว่าเรซินที่มีขนาดใหญ่
- อัตราการไหล อัตราการไหลช้าการแลกเปลี่ยนจะมีประสิทธิภาพดีกว่าอัตราการไหลเร็ว แต่จะต้องไม่ต่ำกว่า 1 - 2 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุต ( $\text{gpm}/\text{ft}^3$ ) แต่สำหรับขั้นตอนการรีเจนเนอเรตจะอยู่ระหว่าง 0.5 - 5 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าเวลาของการเริ่มต้นทำงานรอบใหม่

- ความเข้มข้นของสารละลาย เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ต้องลดอัตราการไหลลง เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

### 3.3.3 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนไอออน

3.3.3.1 การเริ่มต้นทำงาน (Service cycle) หรือ Exhaustion เป็นการนำน้ำเสียผ่านเรซิน เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน น้ำที่ผ่านออกมาจะเป็นน้ำที่ปราศจากไอออน สำหรับสิ่งที่มีอิทธิพลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนมีดังนี้

- อิทธิพลของความลึกของเรซิน มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนค่อนข้างมาก เนื่องจากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนค่อนข้างมาก และรวดเร็ว ซึ่งทางปฏิบัติความลึกของชั้นเรซินควรมีไม่น้อยกว่า 24 - 30 นิ้ว
- อิทธิพลของแร่ธาตุที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะความกระด้าง ยกตัวอย่างเช่น ถ้าน้ำดิบมีอัตราส่วนระหว่างโซเดียมต่อความกระด้าง  $[Na^+ / (Ca^{+2} + Mg^{+2})]$  สูงกว่า 2 : 1 อำนาจในการกำจัดความกระด้างของเรซินจะลดลง
- อิทธิพลของอัตราการไหลของน้ำในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออน ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ดังเช่นในกรณีของเรซินแบบกรดแก่ที่กำจัดความกระด้าง อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านชั้นเรซินมีอิทธิพลน้อยมากต่ออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน อัตราการไหลของน้ำมีได้สูงถึง 10 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุต โดยสูญเสียอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเรซินบางชนิดมีอัตราแลกเปลี่ยนไอออนต่ำ เป็นผลให้ต้องใช้อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านชั้น เรซินในช่วง 2 - 5 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุต รวมทั้งเพื่อมิให้ Head Loss สูงเกินไป
- อิทธิพลของความบริสุทธิ์ของน้ำสะอาด ถ้าน้ำที่ผ่านเข้าไปในตัวเรซินปราศจากตะกอนแขวนลอยและน้ำใส จะทำให้เรซินมีอายุการใช้งานนานขึ้น เช่น ถ้าน้ำบาดาลที่มีเหล็กสูง อาจจะต้องทำการตกตะกอนก่อน หรือถ้ามีคลอรีนอิสระจำนวนมาก อาจจะทำให้การผ่านกระบวนการดูดซับคลอรีนด้วยถ่านกัมมันต์เสียก่อน

3.3.3.2 การล้างย้อนกลับ (Backwash) เป็นการปล่อยน้ำให้ไหลสวนทางกับการผ่านน้ำเสีย เพื่อป้องกันเรซินอัดตัวแน่น และขจัดสิ่งเจือปนที่อาจติดอยู่ด้านบนของคอลัมน์ โดยมีอัตราการไหลของเรซินประมาณ 3 - 6 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุต ใช้เวลาในช่วง 5 - 15 นาที การล้างย้อนทำให้ชั้นเรซินแบบกรดขยายตัว 50 - 75 เปอร์เซ็นต์ และเรซินแบบด่างขยายตัว 75 - 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นต้องออกแบบให้ถังมีช่องว่างเหนือชั้นเรซินมากกว่าเรซินแบบกรดเสมอ

3.3.3.3 การรีเจนเนอเรต (Regeneration) เป็นการชะ (Elute) อีออนที่เรซินจับไว้ออกมาด้วยสารละลายรีเจนเนอเรนต์ และทำให้เรซินกลับสู่สภาพเดิมเพื่อการใช้งานในรอบต่อไป สำหรับอัตราการไหลในการรีเจนเนอเรตมีค่าอยู่ระหว่าง 0.25 - 1 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุต ในทางปฏิบัติการรีเจนเนอเรตจะทำให้เรซินกลับคืนมาเพียงบางส่วนเท่านั้น เพราะการรีเจนเนอเรตให้เรซินกลับมาทั้งหมดต้องเปลืองสารที่ใช้รีเจนเนอเรตมาก

3.3.3.4 การล้างด้วยน้ำแบบช้า (Slow displacement rinse) เป็นขั้นตอนการล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดสารที่ใช้รีเจนเนอเรตที่ตกค้างอยู่ออกให้หมด โดยใช้อัตราการไหลเดียวกับอัตราการไหลในการรีเจนเนอเรต และจะทำการผ่านน้ำปริมาณเท่ากับ 1 เท่าของปริมาตรของชั้นเรซิน

3.3.3.5 การล้างด้วยน้ำแบบเร็ว (Fast rinse) เป็นการล้างเพื่อเตรียมเรซินให้อยู่ในสภาพการใช้งานในรอบต่อไป โดยล้างด้วยอัตราการไหลเดียวกับอัตราการไหลของการผ่านน้ำเสียนานประมาณ 10 - 30 นาที หรือประมาณ 1.5 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุต

3.3.3.6 สิ้นสุดการทำงาน (End of Service Run)

### 3.3.4 เทคนิคการรีเจนเนอเรต

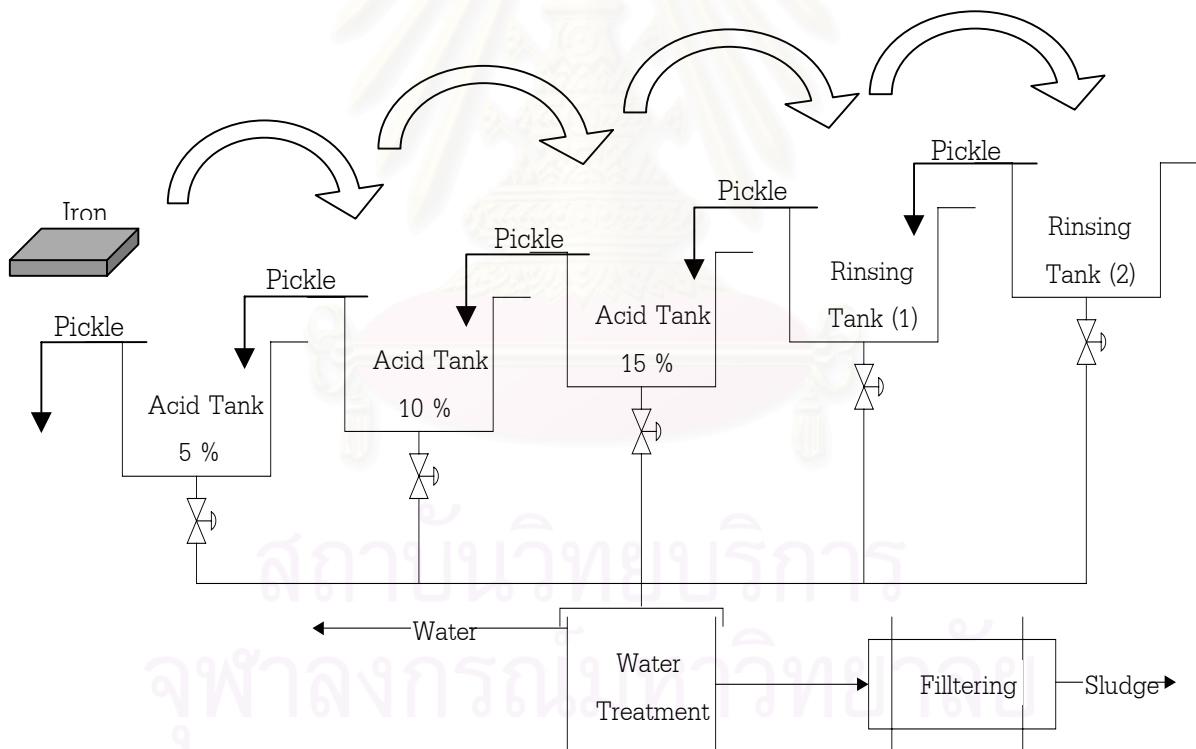
วิธีการรีเจนเนอเรตแบ่งตามทิศทางการไหลได้ 2 วิธี คือ

3.3.4.1 สารที่ใช้รีเจนเนอเรตไหลในทิศทางเดียวกับน้ำเสียน้ำ (Cocurrent Operation) โดยผ่านเข้าทางด้านบนและไหลออกด้านล่างของคอลัมน์ เป็นวิธีที่ง่ายและสามารถรีเจนเนอเรตได้ง่าย แต่วิธีนี้ต้องใช้สารเคมีมาก ความเข้มข้นสูง และใช้เวลานาน รวมทั้งเกิดปัญหาการรั่วไหลของอีออน ซึ่งเกิดจากอีออนที่รีเจนเนอเรตไม่หมด เคลื่อนลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์ และหลุดออกมาเมื่อทำการผ่านน้ำเสียน้ำในการทำงานรอบต่อไป

3.3.4.2 สารที่ใช้รีเจนเนอเรตไหลสวนทางกับน้ำเสียน้ำ (Counter-current Operation) วิธีนี้ทำให้เกิดการรีเจนเนอเรต อย่างสมบูรณ์ มีการรั่วไหลของอีออนที่ไม่ต้องการน้อย ใช้สารเคมีอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าและประหยัดสารที่ใช้รีเจนเนอเรตได้กว่าแบบไหลในทิศทางเดียวกันถึงร้อยละ 50 เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการความบริสุทธิ์ของน้ำสูง

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การทำงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษากระบวนการในการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่มีอยู่มากในกรดเสียที่เกิดจากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็ก (Pickling Liquor Process) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 สำหรับกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งกรดเสียจะมีปริมาณกรดไฮโดรคลอริกอยู่ในช่วง 50 - 100 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณเหล็กในช่วง 1 - 7 กรัมต่อลิตร และในงานวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกทั้งวิธีแลกเปลี่ยนไอออนบวกและวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนลบ โดยที่การวิเคราะห์หาปริมาณกรดใช้วิธีการไตเตรต และการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปซอร์ปชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) สำหรับขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 แสดงกระบวนการกำจัดสนิมที่ทำให้เกิดกรดเสียที่นำมาใช้ในงานวิจัย



4.1 ศึกษาวิธีการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก และรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องต่องานวิจัย โดยเฉพาะข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน รวมถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการนำกลับสารละลายต่างๆ ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน อีกทั้งยังรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปริมาณกรดเสียที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กในประเทศไทย เพื่อให้งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กในประเทศไทย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ (โดยการหาระยะเวลาคืนทุนในกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก) ระหว่างแบบจำลองกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กกับกระบวนการที่ออกแบบขึ้นมา

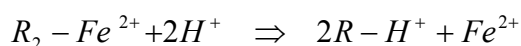
4.2 ศึกษาและสร้างแบบจำลองกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก ซึ่งมีอยู่ 2 กระบวนการคือ กระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก และกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ

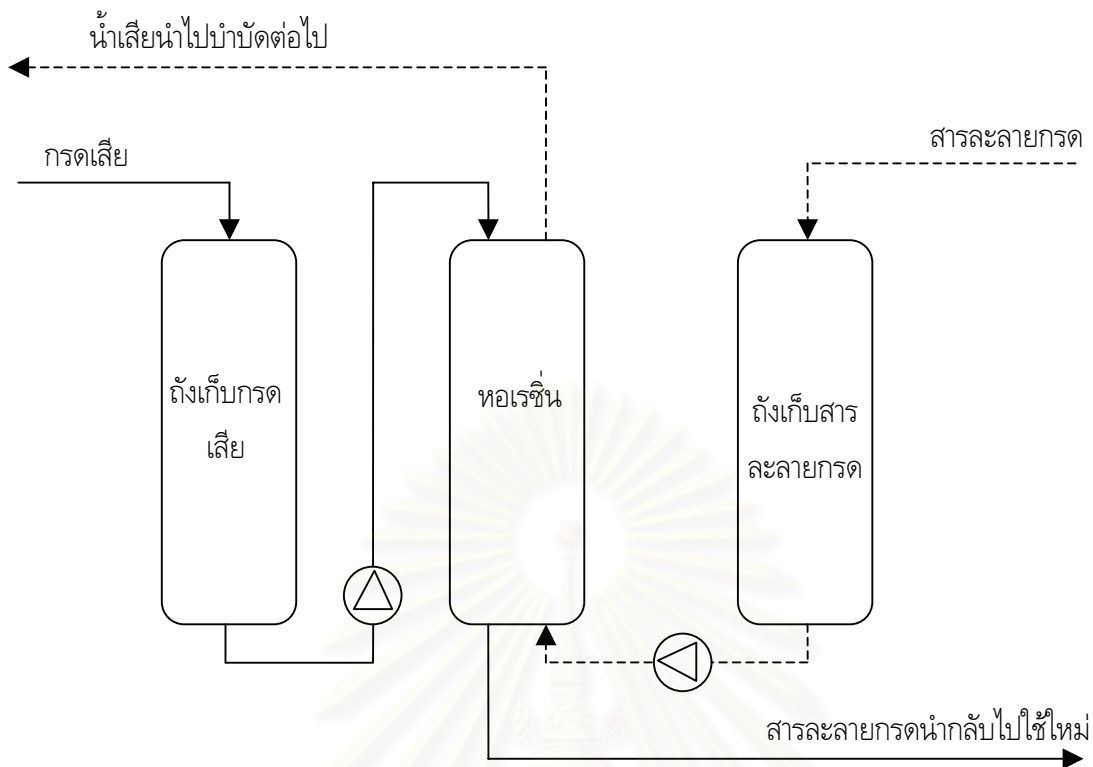
#### 4.2.1 กระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก

กระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวกดังในรูปที่ 4.2 มีหลักการทำงาน คือ เมื่อกรดเสียที่มีไอออนเหล็กผสมอยู่ผ่านเข้าไปยังหอเรซิน เหล็กจะถูกดูดซับด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบประจุบวก ซึ่งจะทำให้สายทางออกมีปริมาณไอออนของเหล็กต่ำและความเข้มข้นของกรดมากขึ้น กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจะดำเนินการต่อไปจนกระทั่งความเข้มข้นของไอออนเหล็กในเรซินถึงจุดอิ่มตัว หลังจากนั้นหอเรซินจะถูกรีเจนเนอเรต (Regenerate) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งจะช่วยให้ได้สารละลายกรดที่มีไอออนเหล็กปนอยู่ในปริมาณที่มาก ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการรีเจนเนอเรตจะใช้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกและอัตราการไหลที่ใช้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการปฏิบัติงานคือ



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการรีเจนเนอเรต คือ





รูปที่ 4.2 กระบวนการดัดเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก

#### 4.2.2 กระบวนการดัดเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ

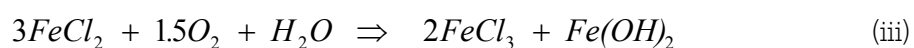
กระบวนการดัดเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบดังแสดงในรูปที่ 4.3 มีหลักการคือ กรดเสียจะต้องถูกออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) เพื่อที่จะเปลี่ยนเหล็กประจุสอง ( $Fe^{2+}$ ) หรือ Ferrous Chloride ( $FeCl_2$ ) ให้เป็นเหล็กประจุสาม ( $Fe^{3+}$ ) หรือ Ferric Chloride ( $FeCl_3$ ) ดังสมการทางเคมีดังนี้



และมีการเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นเพื่อที่จะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนประจุลบของคลอไรด์ ( $FeCl_4^-$ ) ดังปฏิกิริยานี้



ถ้าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกไม่มากพอ จะทำให้เกิด Ferric chloride ( $FeCl_3$ ) ได้ไม่ดีพอ เนื่องจากยังมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอีกปฏิกิริยาหนึ่งที่เราไม่ต้องการคือ



จะสังเกตว่าสมการนี้ไม่มีกรดไฮโดรคลอริกเป็นสารตั้งต้น ดังนั้นถ้าเราเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นสูง จะทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยา (i) มากกว่าปฏิกิริยา (iii)

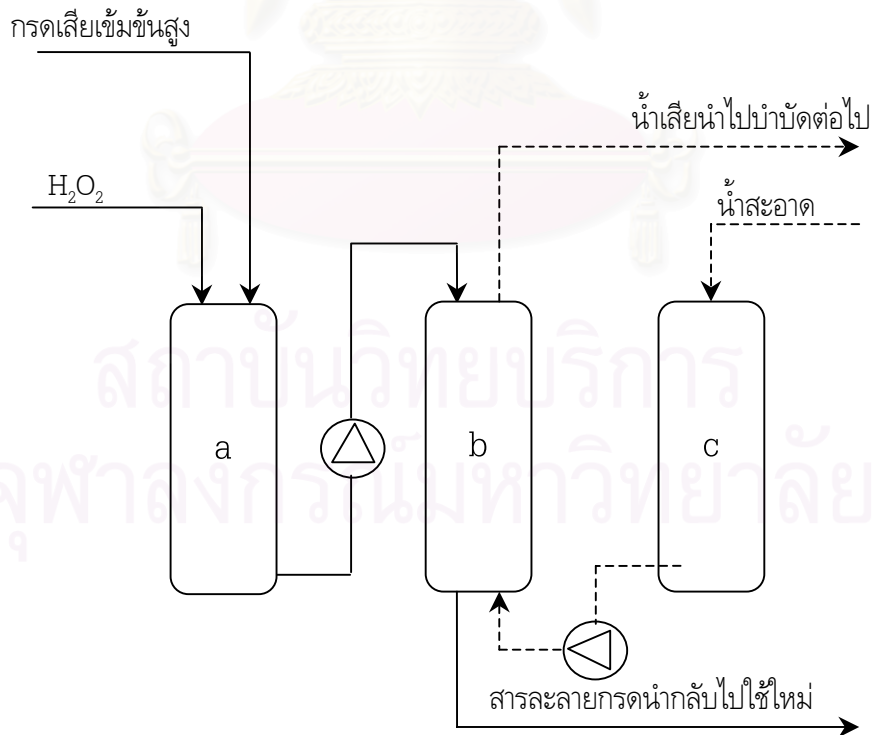
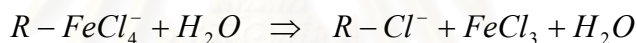
หลังจากนั้นสารละลายจะถูกปั๊มเข้าสู่หอเรซิน ซึ่งใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ เรซินก็จะทำการแลกเปลี่ยนไอออนของสารประกอบเชิงซ้อนประจุลบของคลอไรด์ ( $FeCl_4^-$ ) ดังนั้นสารละลายที่ออกมาจะมีเฉพาะกรดไฮโดรคลอริกที่สามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้ สำหรับไอออนของสารประกอบเชิงซ้อนประจุลบของคลอไรด์ ( $FeCl_4^-$ ) จะถูกนำกลับไปบำบัดโดยการรีเจนเนอเรต (Regeneration) ด้วยน้ำต่อไป

ข้อดีของกระบวนการนี้คือใช้น้ำในการรีเจนเนอเรต ไม่ต้องใช้กรดไฮโดรคลอริก ทำให้ไม่ต้องสูญเสียกรดในการรีเจนเนอเรต แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้ก็คือจะต้องมีการเติมสารเคมีเข้าสู่ระบบ และเมื่อพิจารณาว่าถ้าความเข้มข้นของกรดเสียมีค่าต่ำ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้กรดไฮโดรคลอริกเพิ่มเติมอีกเป็นจำนวนมาก

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในหอเรซินในระหว่างการปฏิบัติงาน คือ



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการรีเจนเนอเรต คือ



รูปที่ 4.3 กระบวนการดั่งเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ

a) ถังออกซิไดซ์ b) หอเรซิน และ c) ถังเก็บน้ำ

4.3 ทำการศึกษาหาอัตราการไหลของกรดเสียที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการ ทั้งการปฏิบัติงานปกติและการรีเจนเนอเรต และหาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมสำหรับการรีเจนเนอเรต แลกเปลี่ยนไอออนบวก โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

4.3.1 ศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยใช้อัตราการไหลในช่วง 0.8 - 2.5 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน (gpm / ft<sup>3</sup> resin) โดยการทดลองใช้กรดเสีย 3 ตัวอย่าง โดยมีคุณสมบัติดังนี้

กรดเสียตัวอย่าง	ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณกรด (กรัมต่อลิตร)
1	1.2	56
2	2.0	75
3	3.5	92

4.3.2 ศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ โดยใช้อัตราการไหลในช่วง 0.8 - 2.5 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน (gpm / ft<sup>3</sup> resin) โดยการทดลองใช้กรดเสีย 3 ตัวอย่าง โดยมีคุณสมบัติดังนี้

กรดเสียตัวอย่าง	ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณกรด (กรัมต่อลิตร)
1	1.3	56
2	2.5	71
3	3.5	93

4.3.3 ศึกษาหาอัตราการไหลของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมในการรีเจนเนอเรตในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยใช้อัตราการไหลในช่วง 0.4 - 1.25 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน (gpm / ft<sup>3</sup> resin) ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ช้ากว่าการปฏิบัติงานปกติเท่าหนึ่ง และใช้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 54.75 กรัมต่อลิตร (1.5 โมลต่อลิตร)

4.3.4 ศึกษาหาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมในการรีเจนเนอเรตในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมในข้อ 4.3.3 และใช้ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก คือ 36.50, 54.75 และ 73 กรัมต่อลิตร (1, 1.5 และ 2 โมลต่อลิตร)

4.3.5 ศึกษาหาอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมในการรีเจนเนอเรตในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ โดยใช้อัตราการไหลในช่วง 0.4 - 1.25 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน (gpm / ft<sup>3</sup> resin) ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ช้ากว่าการปฏิบัติงานปกติเท่าหนึ่ง

4.4 ออกแบบและสร้างกระบวนการนำกลับด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ ซึ่งเป็นกระบวนการที่นำเอากระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก และเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบมา รวมกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4

โดยเหตุผลที่นำเอาเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก และเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบมาต่ออนุกรมกัน โดยให้กรดเสียผ่านเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกก่อน มีอยู่ 2 ประการคือ

4.4.1 ในการออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) เพื่อที่จะเปลี่ยนเหล็กประจุสอง ( $Fe^{2+}$ ) ให้เป็นเหล็กประจุสาม ( $Fe^{3+}$ ) ดังสมการทางเคมีดังนี้

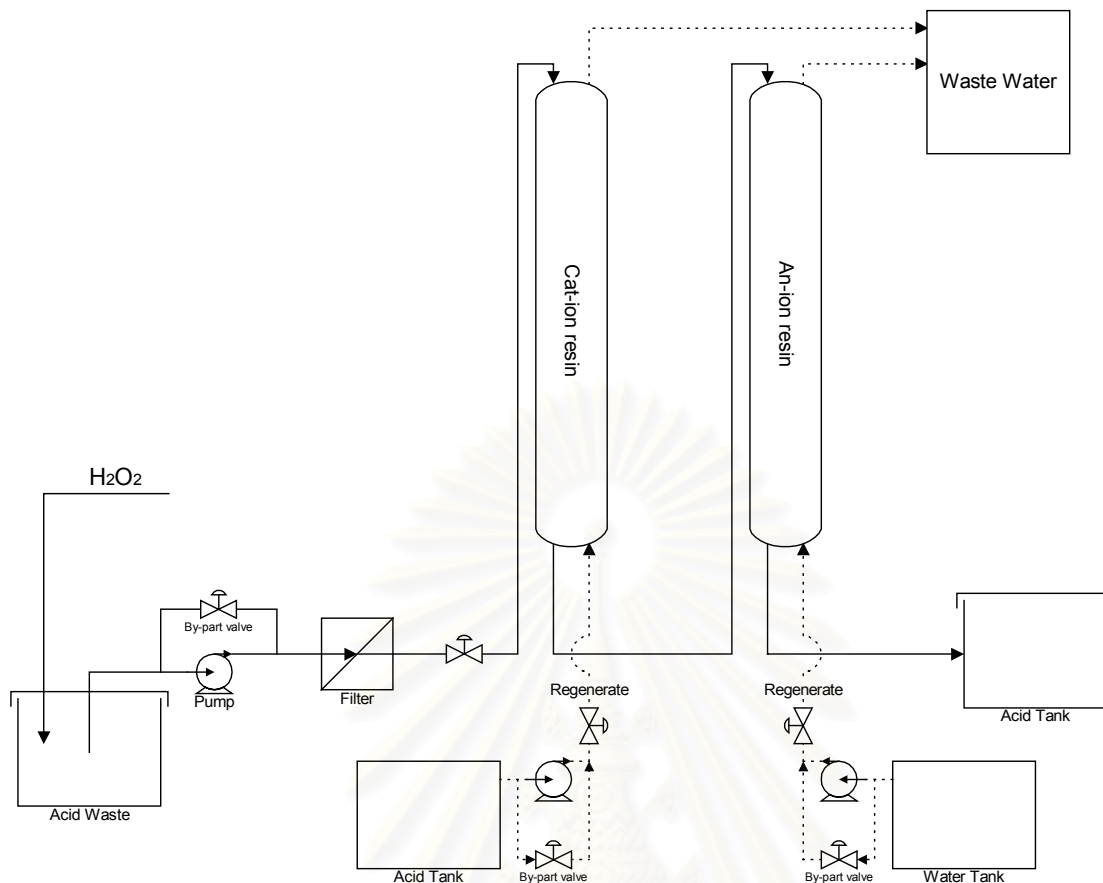


จะมีผลทำให้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก สามารถดึงเหล็กประจุสามบวก ( $Fe^{3+}$ ) ได้ดีกว่าเหล็กประจุสองบวก ( $Fe^{2+}$ )

4.4.2 เมื่อเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกดูดซับเหล็กบางส่วนไว้ จะทำให้เหล็กที่ออกมากับกรดเสียก่อนที่จะเข้าเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบมีปริมาณน้อย ดังนั้นในเหตุผลที่ว่าเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบจะต้องเปลี่ยน Ferric chloride ( $FeCl_3$ ) ให้อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนประจุลบของคลอไรด์ ( $FeCl_4^-$ ) ดังปฏิกิริยา  $FeCl_3 + Cl \Rightarrow FeCl_4^-$  จึงสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้าไป เพื่อเพิ่มความเข้มข้น (ซึ่งเป็นข้อเสียของกระบวนการนำกลับกรดแบบใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ) เนื่องจาก สัดส่วนของปริมาณเหล็กน้อยกว่าปริมาณกรดไฮโดรคลอริกมาก

4.5 หาประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของแบบจำลองกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และหาประสิทธิภาพของกระบวนการที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก (ซึ่งมี 2 กระบวนการดังที่กล่าวมาข้างต้น) โดยใช้แบบจำลองรูปที่ 4.4 มาปรับเปลี่ยนตัวเรซิน กล่าวคือกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก จะใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกทั้งสองหอ และกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ จะใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบทั้งสองหอ โดยในการหาประสิทธิภาพในการนำกลับกรดนี้จะดูจากปริมาณของกรดไฮโดรคลอริกและไอออนเหล็กที่ออกจากกระบวนการ สำหรับในการทดลองนี้ใช้กรดเสียตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง โดยมีคุณสมบัติดังนี้

กรดเสียตัวอย่าง	ปริมาณเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณกรด (กรัมต่อลิตร)
1	6.5	91.25
2	4.5	91.25
3	3.7	54.75



รูปที่ 4.4 แบบจำลองกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในงานวิจัย

4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกระหว่างแบบจำลองที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก กับแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้หลักทางเศรษฐศาสตร์คือการหาระยะเวลาคืนทุนว่ากระบวนการไหนจะใช้ระยะเวลาคืนทุนที่สั้นที่สุดในการเปรียบเทียบ โดยมีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

4.6.1 กำหนดข้อมูลต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- กรดเสียที่นำมาใช้ในการคำนวณ มีความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 51.21 กรัมต่อลิตร (5% โดยน้ำหนัก) และมีปริมาณเหล็กโดยเฉลี่ย 3.7 กรัมต่อลิตร
- กำลังการผลิตกรดไฮโดรคลอริกจากกรดเสีย ซึ่งมีอยู่ 3 ขนาดด้วยกันคือ ขนาด 2, 5 และ 15 ลูกบาศก์เมตร
- ในกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กแบบกะ มีการสูญเสียกรด 56 %
- การทำงานของกระบวนการใน 1 ปี คิดเป็น 250 วัน
- กรดไฮโดรคลอริก 35 % ราคา 3 บาทต่อกิโลกรัม

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 % ราคา 8 บาทต่อกิโลกรัม
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35 % ราคา 12 บาทต่อกิโลกรัม
- ค่าซ่อมบำรุง คิดเป็น 2 % ของราคาค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง
- ค่าพลังงาน คิดเป็น 3 บาทต่อ kWh
- ค่าน้ำ คิดเป็น 17 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

4.6.2 คำนวณหาการสูญเสียรายได้จากปริมาณกรดที่ใช้ในการกำจัดสนิม โดยพิจารณาจากกระบวนการกำจัดสนิมแบบกะ ที่ไม่มีกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก มีรายละเอียดดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของกรดเสีย} &= (\text{ความเข้มข้นกรด } 5\%) * 0.56 \\ \text{การสูญเสียกรดไฮโดรไฮโดรคลอริก} &= (\text{ความเข้มข้นกรดเสีย}) * (\text{ปริมาณกรดเสีย}) * (250 \text{ วัน/ปี}) \\ \text{กรดไฮโดรคลอริก } 35\% &= (\text{การสูญเสียกรดไฮโดรคลอริก}) * (100/35) \\ \text{การสูญเสียโซเดียมไฮดรอกไซด์} &= (\text{การสูญเสียกรดไฮโดรไฮโดรคลอริก}) * (40/36.5) * (1.1) \\ \text{โซเดียมไฮดรอกไซด์ } 50\% &= (\text{การสูญเสียโซเดียมไฮดรอกไซด์}) * (100/50) \end{aligned}$$

4.6.3 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.5 มาคำนวณหาขนาดของกระบวนการทั้ง 3 กระบวนการที่จะทำการเปรียบเทียบ และคำนวณหาค่าอุปกรณ์และการติดตั้งโดยอ้างอิงจาก “คู่มือการตรวจสอบสิ่งแวดล้อมโรงงาน (การตรวจสอบสิ่งแวดล้อม โรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก) กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม”

4.6.4 คำนวณหารายรับและรายจ่ายต่อปีของกระบวนการทั้ง 3 กระบวนการ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- รายรับ คำนวณจากปริมาณกรดที่สามารถประหยัดได้โดยใช้ข้อมูลผลการทดลองในหัวข้อ 4.5 ซึ่งจะบอกว่าแต่ละกระบวนการสามารถนำกลับกรดได้กี่เปอร์เซ็นต์ และนำมาคำนวณดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{เวลาในการปฏิบัติงาน } 3 \text{ ชั่วโมง} & \text{ หมายถึง การทำงาน } 1 \text{ ครั้ง ใช้เวลาในการบำบัดกรด } 3 \text{ ชั่วโมง} \\ \text{อัตราการไหลในกระบวนการ} & = (\text{ปริมาณกรดเสียใน } 1 \text{ วัน}) / (\text{เวลาในการปฏิบัติงาน}) \\ \text{ปริมาตรเรซิน} & = (\text{ปริมาณกรดเสีย}) * 1.2 / (21 \text{ BV}) \\ \text{กรดที่ดึงกลับมาได้ (35\%HCl)} & = (\text{เปอร์เซ็นต์การนำกลับกรด}) * (\text{ปริมาณกรดที่สูญเสีย}) \\ \text{โซเดียมไฮดรอกไซด์ (50\%NaOH)} & = (\text{กรดที่ดึงกลับมาได้}) * (40 \text{ MW}/36.5 \text{ MW}) * (35\%/50\%) \end{aligned}$$

- รายจ่าย ประกอบด้วย ค่าซ่อมบำรุง, ค่าแรงงาน, ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และ ค่าใช้จ่ายด้านการใช้น้ำ ซึ่งข้อมูลต่างๆ เหล่านี้อ้างอิงจาก “คู่มือการตรวจสอบ สิ่งแวดล้อมโรงงาน (การตรวจสอบสิ่งแวดล้อม โรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก) กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม”

4.6.5 กำหนดหารายรับสุทธิในแต่ละปี และหาระยะเวลาคืนทุน โดยใช้ดัชนีราคา 103 % โดยคิดปีที่ 0 (ปีที่มีการติดตั้ง) เป็นปีฐาน มีรายละเอียดในการคำนวณดังนี้

$$\text{รายจ่ายในปีที่ } n = \text{รายจ่ายปีปัจจุบัน} / (1.03^n)$$

$$\text{รายรับในปีที่ } n = \text{รายรับปีปัจจุบัน} / (1.03^n)$$

$$\text{รายรับสุทธิในปีที่ } n = \text{รายรับในปีที่ } n - \text{รายจ่ายในปีที่ } n$$

$$\text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n = \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n-1 + \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n$$

4.7 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายในงานวิจัยนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองที่ได้ทดลองในทุกขั้นตอน รวมถึงการออกแบบกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 4 ดังนี้

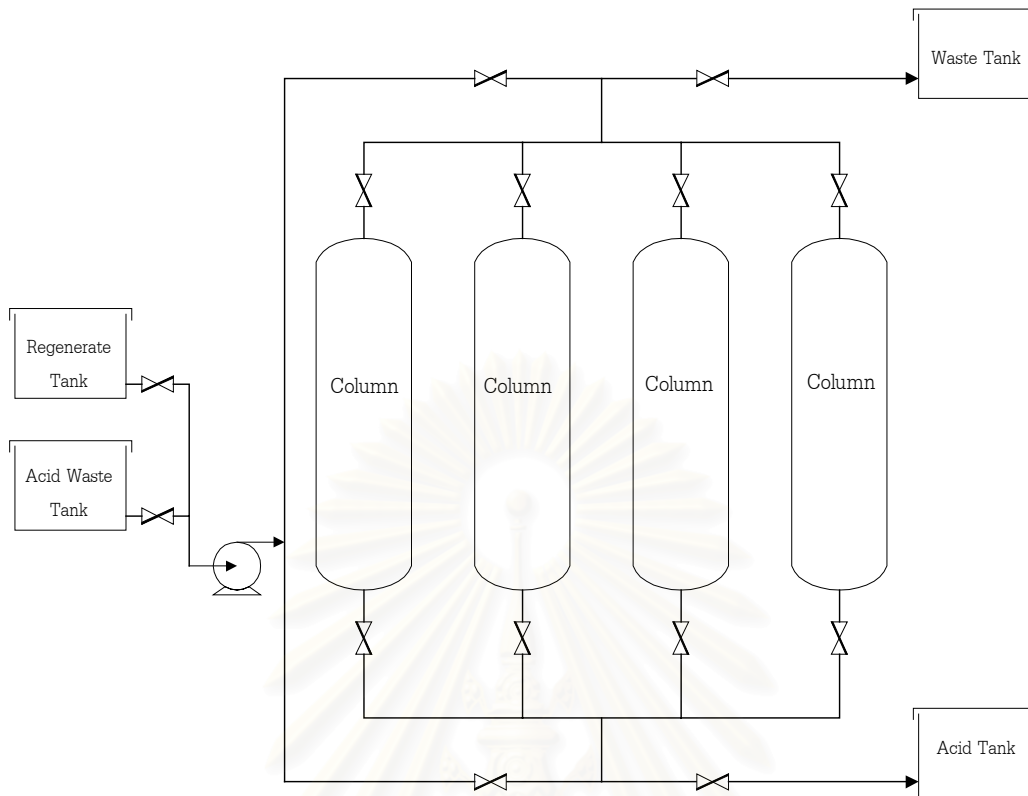
5.1 สร้างแบบจำลองกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก ซึ่งมีอยู่ 2 กระบวนการคือ กระบวนการดั่งเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก และกระบวนการดั่งเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยสาเหตุที่ใช้หลายคอลัมน์เนื่องจากช่วยลดเวลาในการเปลี่ยนเรซินบ่อยๆ และใช้ปั๊ม 1 ตัว ในการรักษาอัตราการไหลของกรดเสียทั้งขั้นตอนขณะปฏิบัติงานปกติและฟื้นฟูเรซิน ซึ่งแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานี้จะใช้ในการทดลองหาอัตราการไหลที่เหมาะสมตามหัวข้อที่ 4.3 เมื่อสร้างมาแล้วจะได้แบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยที่คอลัมน์มีปริมาตร 0.75 ลิตร แต่ในการทดลองคอลัมน์นี้บรรจุเรซินปริมาตร 0.4 ลิตร

สำหรับเรซินที่ใช้ในการทดลองได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เบรินเมเยอร์ จำกัด ทั้งเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก (C - 100) และเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ (A - 400) โดยรายละเอียดคุณสมบัติของเรซินได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ค.

และปั๊มที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นปั๊มของ บริษัท โพรมิเนนท์ ฟลูอิด คอนโทรลส์ (ประเทศไทย) จำกัด เป็นปั๊มชนิด NH 10 PX-H ตัวปั๊มใช้ PPG เป็นวัสดุซึ่งสามารถทนกรดได้ และมีอัตราการไหลสูงสุด 5 ลิตร ต่อนาที

ท่อและอุปกรณ์ประกอบท่อทั้งหมดใช้ท่อพีวีซี (PVC) จากบริษัท ท่อน้ำไทย ทั้งหมด

สำหรับกรดเสียที่ใช้ในการทดลองนำมาจากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะทำให้มีปริมาณกรดไฮโดรคลอริกอยู่ในช่วง 50 - 100 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณเหล็กอยู่ในช่วง 1 - 7 กรัมต่อลิตร และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้สำหรับกระบวนการดั่งเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบนั้นจะใช้ 1 ส่วนในกรดเสีย 100 ส่วน หรือ 1 : 100 (E. Maranon, 1999)



รูปที่ 5.1 แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองหาอัตราการไหลที่เหมาะสม

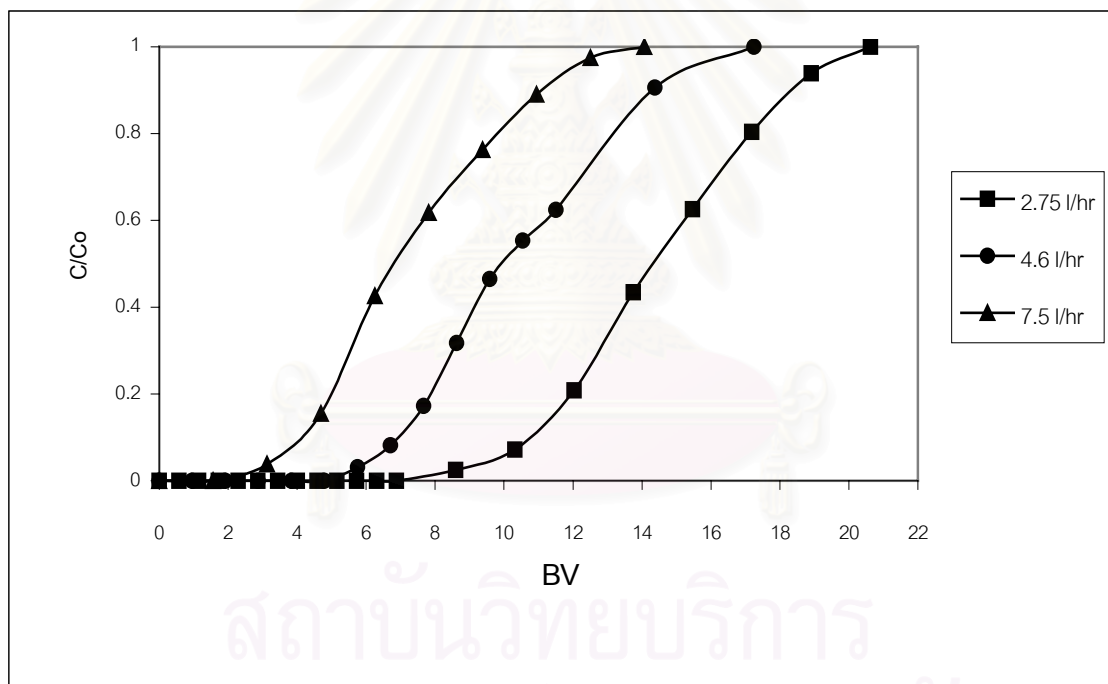


รูปที่ 5.2 แสดงแบบจำลองที่สร้างขึ้นสำหรับการทดลอง

5.2 ผลการทดลองศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน 2 ตัว คือ อัตราการไหลของกรดเสีย และค่าความเข้มข้นของกรดและเหล็กในกรดเสียจากแบบจำลองกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก โดยผลที่ได้มีดังนี้

5.2.1 ผลการศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยใช้อัตราการไหล 3 ช่วงคือ 2.75, 4.6 และ 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง (ที่อัตราการไหล 0.86, 1.43 และ 2.34 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยมีปริมาตรเรซิน 0.4 ลิตร) มีผลการทดลองดังนี้

- กรดเสียตัวอย่าง 1 มีปริมาณเหล็ก 1.2 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 56 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหลต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 1 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก

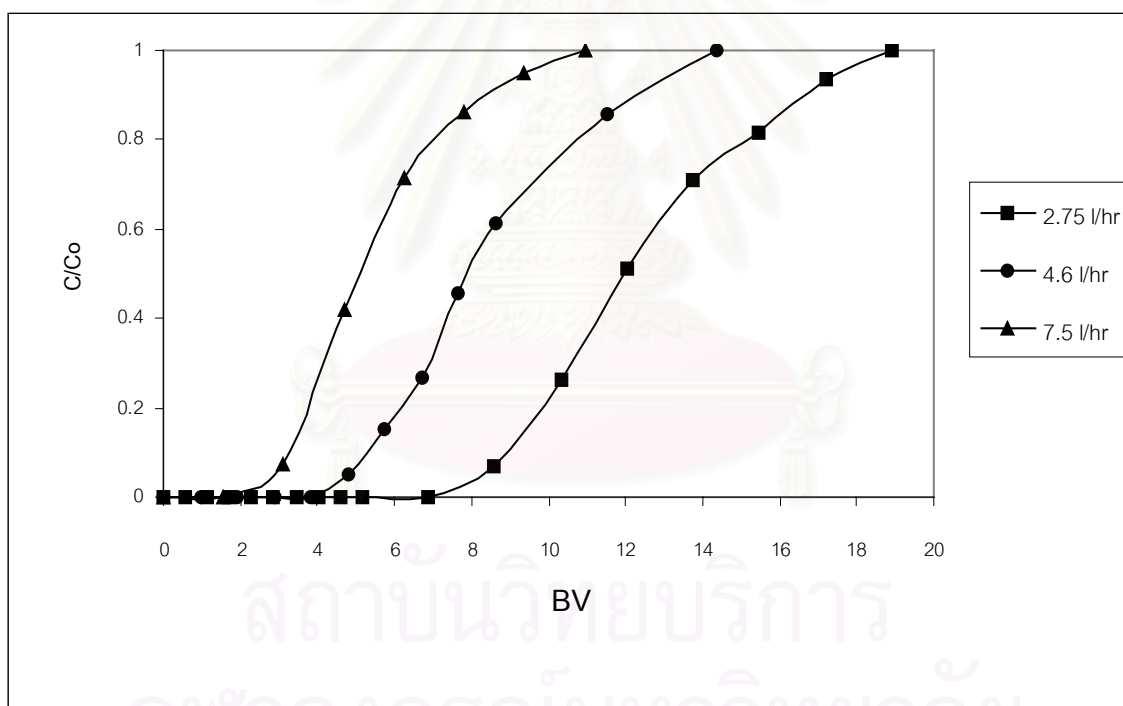
โดยที่  $C_0$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางเข้า คือ 1.2 กรัมต่อลิตร  
 $C$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางออก (กรัมต่อลิตร)  
 $BV$  คือ ปริมาตรของกรดเสียที่ไหลผ่านเรซินต่อปริมาตรเรซิน (ลิตร/ลิตรของเรซิน)

จะได้ตารางเปรียบเทียบผลดังนี้

ตาราง 5.1 ตารางแสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 1 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	กรดที่นำกลับได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูดซับได้
2.75	452	66
4.6	378	56
7.5	308	46

- กรดเสียตัวอย่าง 2 มีปริมาณเหล็ก 2 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 75 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหลต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 2 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก

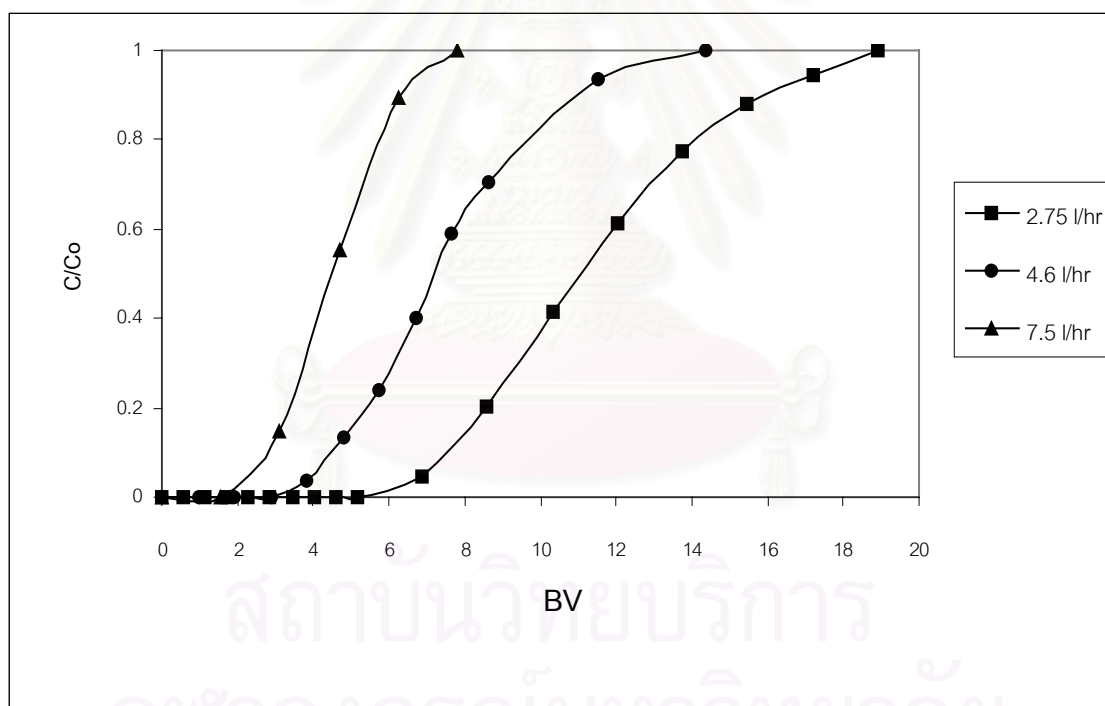
โดยที่  $C_0$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางเข้า คือ 2 กรัมต่อลิตร  
 $C$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางออก (กรัมต่อลิตร)  
 BV คือ ปริมาตรของกรดเสียที่ไหลผ่านเรซินต่อปริมาตรเรซิน (ลิตร/ลิตรของเรซิน)

จะได้ตารางเปรียบเทียบผลดังนี้

ตาราง 5.2 ตารางแสดงผลการทดลองการดลยตัวอย่าง 2 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	กรดที่นำกลับได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูดซับได้
2.75	552	61
4.6	420	53
7.5	320	46

- กรดลยตัวอย่าง 3 มีปริมาณเหล็ก 3.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 92 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหลต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงผลการทดลองการดลยตัวอย่าง 3 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก

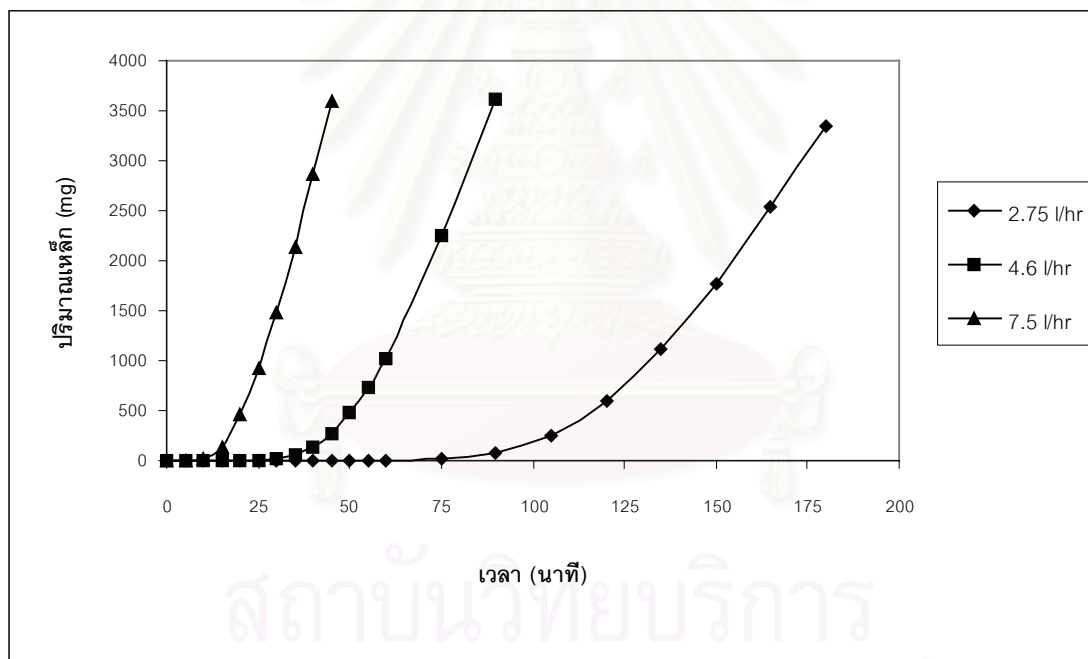
โดยที่  $C_0$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางเข้า คือ 3.5 กรัมต่อลิตร  
 $C$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางออก (กรัมต่อลิตร)  
 $BV$  คือ ปริมาตรของกรดลยที่ไหลผ่านเรซินต่อปริมาตรเรซิน (ลิตร/ลิตรของเรซิน)

จะได้ตารางเปรียบเทียบผลดังนี้

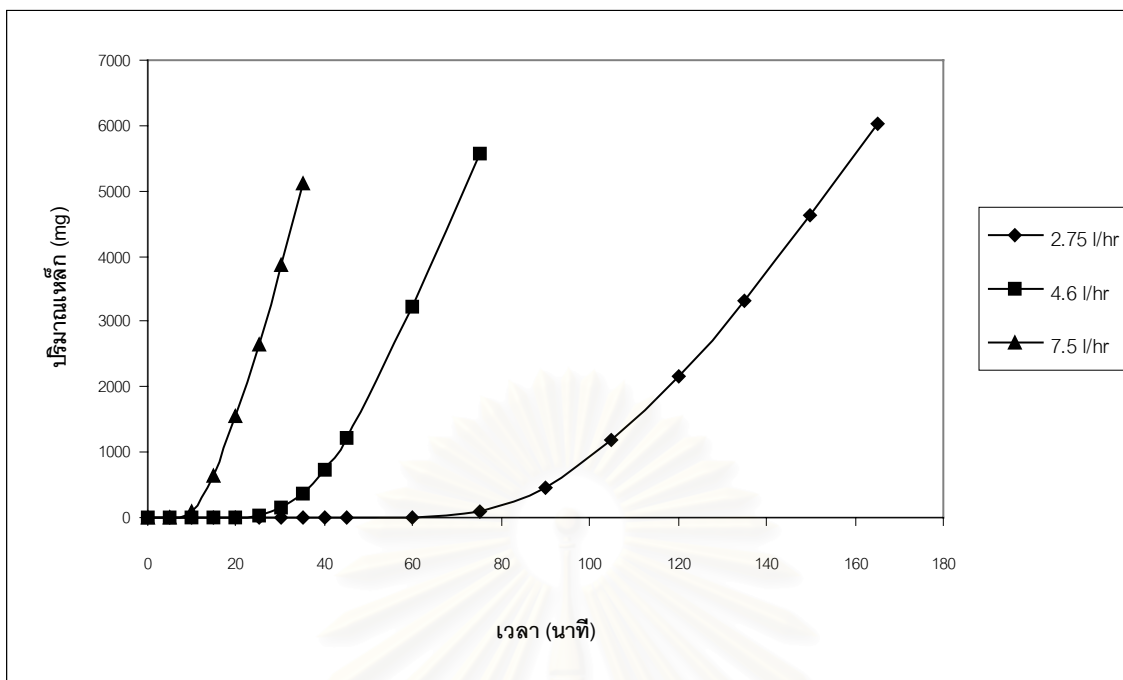
ตาราง 5.3 ตารางแสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 3 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	กรดที่นำกลับได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูดซับได้
2.75	690	56
4.6	525	47
7.5	342	48

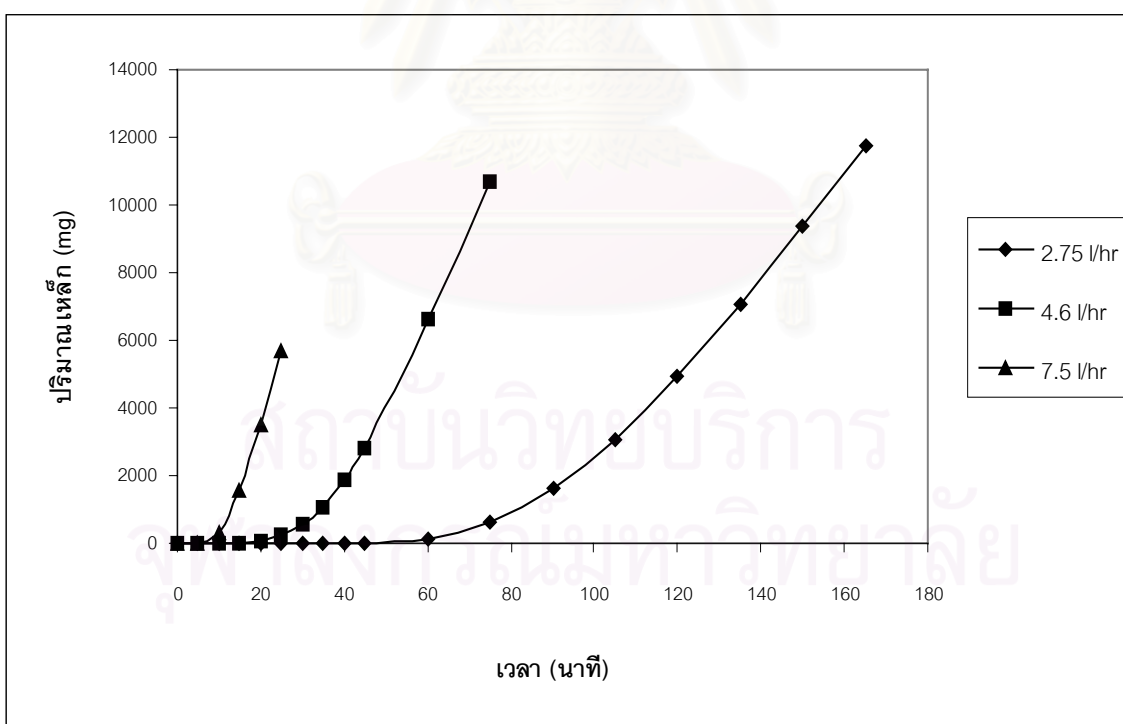
เมื่อนำผลที่ได้มาพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลาจะ  
ดังนี้



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลา  
ของกรดเสียตัวอย่างที่ 1



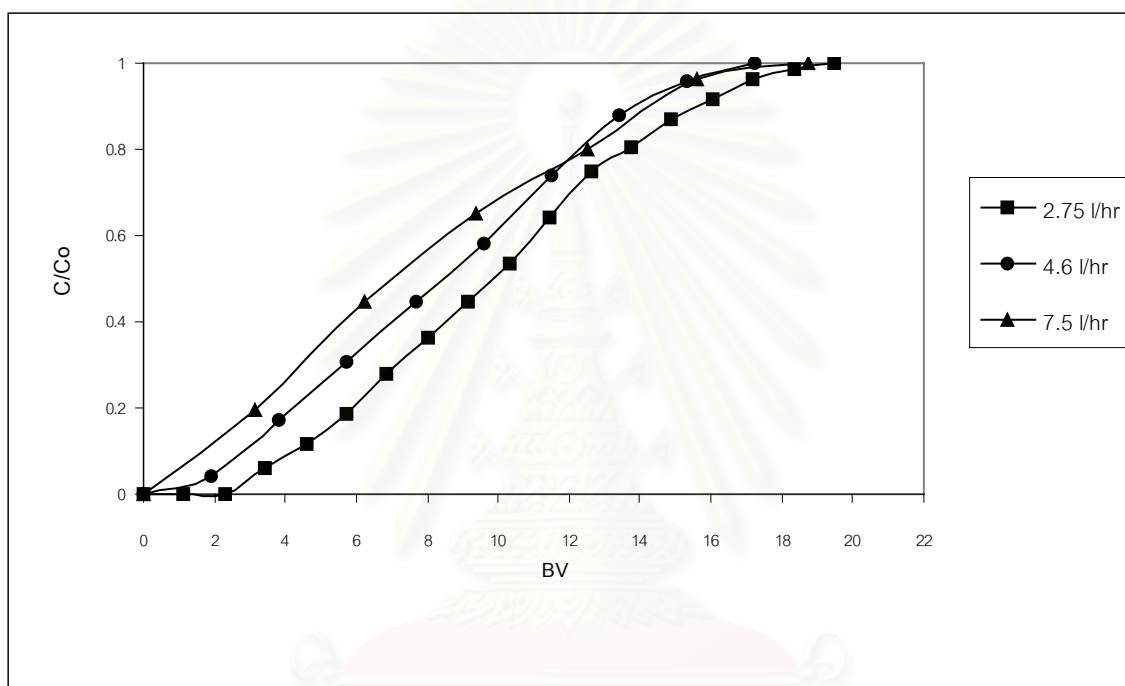
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลา  
ของกรดเสียตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลา  
ของกรดเสียตัวอย่างที่ 3

5.2.2 ผลการศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ โดยใช้อัตราการไหล 3 ช่วงคือ 2.75, 4.6 และ 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง (ที่อัตราการไหล 0.86, 1.43 และ 2.34 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยมีปริมาตรเรซิน 0.4 ลิตร) มีผลการทดลองดังนี้

- กรดเสียตัวอย่าง 1 มีปริมาณเหล็ก 1.3 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 56 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหลต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 1 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ

โดยที่  $C_0$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางเข้า คือ 1.3 กรัมต่อลิตร  
 $C$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางออก (กรัมต่อลิตร)  
 $BV$  คือ ปริมาตรของกรดเสียที่ไหลผ่านเรซินต่อปริมาตรเรซิน (ลิตร/ลิตรของเรซิน)

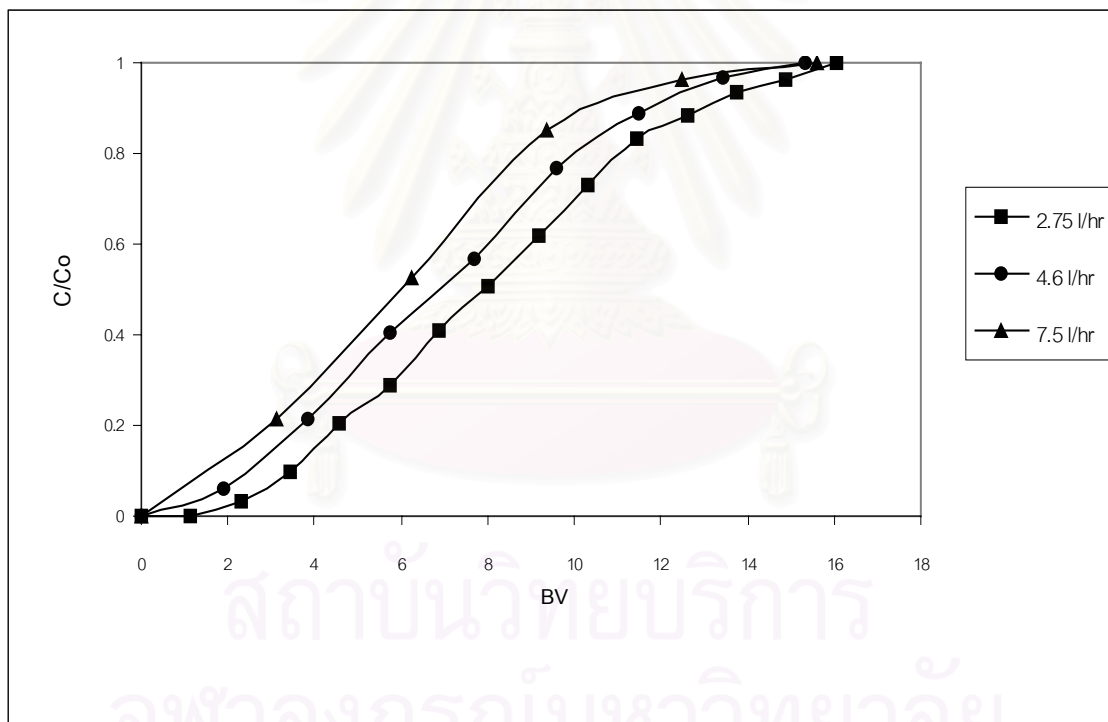


จะได้ตารางเปรียบเทียบผลดังนี้

ตาราง 5.4 ตารางแสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 1 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	กรดที่นำกลับได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูดซับได้
2.75	427	47
4.6	378	43
7.5	411	32

- กรดเสียตัวอย่าง 2 มีปริมาณเหล็ก 2.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 71 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหลต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 2 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ

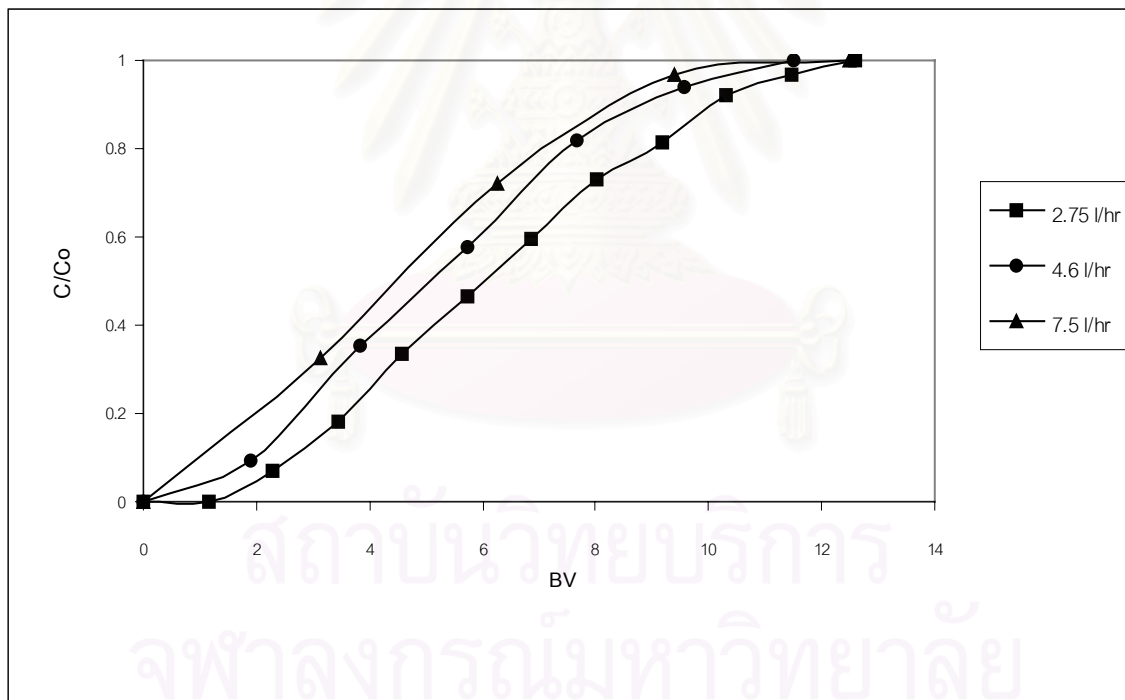
โดยที่  $C_0$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางเข้า คือ 2.5 กรัมต่อลิตร  
 $C$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางออก (กรัมต่อลิตร)  
 $BV$  คือ ปริมาตรของกรดเสียที่ไหลผ่านเรซินต่อปริมาตรเรซิน (ลิตร/ลิตรของเรซิน)

จะได้ตารางเปรียบเทียบผลดังนี้

ตาราง 5.5 ตารางแสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 2 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	กรดที่นำกลับได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูดซับได้
2.75	468	46
4.6	448	39
7.5	456	29

- กรดเสียตัวอย่าง 3 มีปริมาณเหล็ก 3.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 93 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหลต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แสดงผลการทดลองกรดเสียตัวอย่าง 3 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ

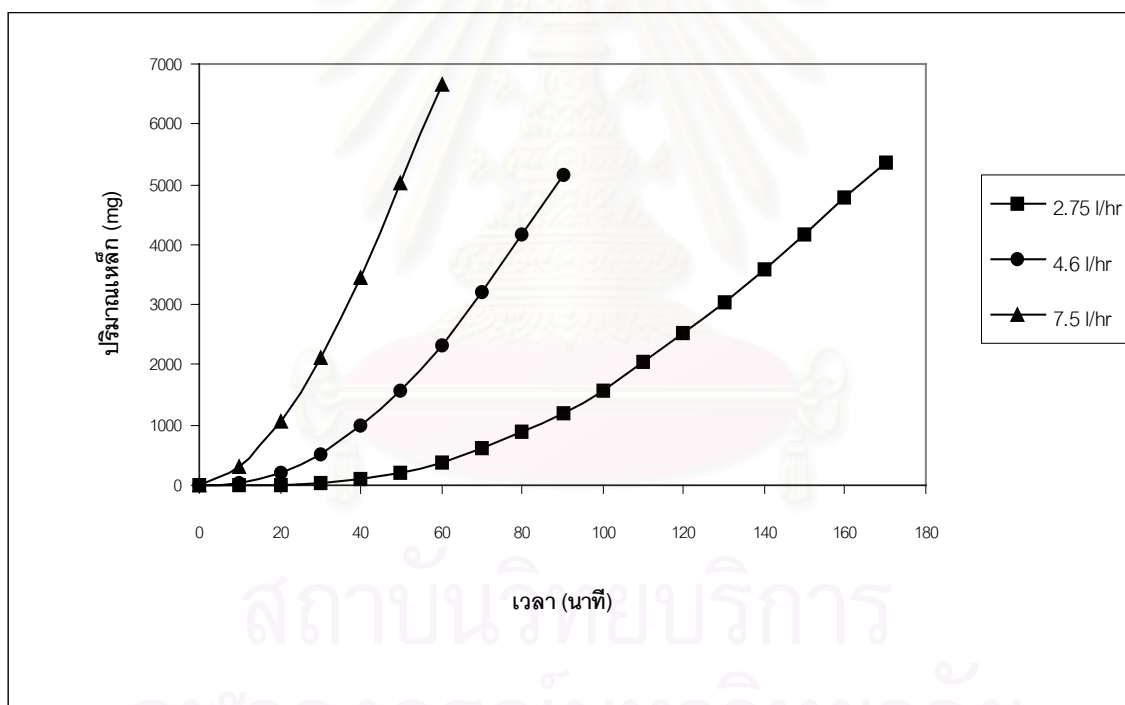
โดยที่  $C_0$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางเข้า คือ 3.5 กรัมต่อลิตร  
 $C$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางออก (กรัมต่อลิตร)  
 $BV$  คือ ปริมาตรของกรดเสียที่ไหลผ่านเรซินต่อปริมาตรเรซิน (ลิตร/ลิตรของเรซิน)

จะได้ตารางเปรียบเทียบผลดังนี้

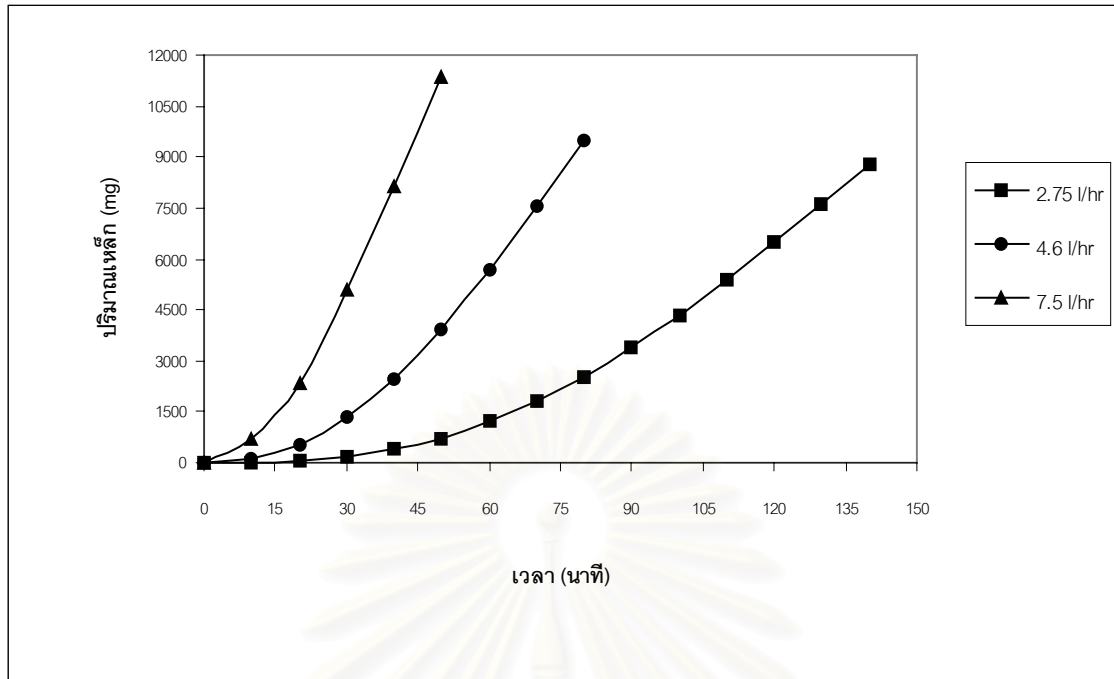
ตาราง 5.6 ตารางแสดงผลการทดลองการดองกรดเสียตัวอย่าง 3 ใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	กรดที่นำกลับได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูดซับได้
2.75	460	45
4.6	420	37
7.5	456	25

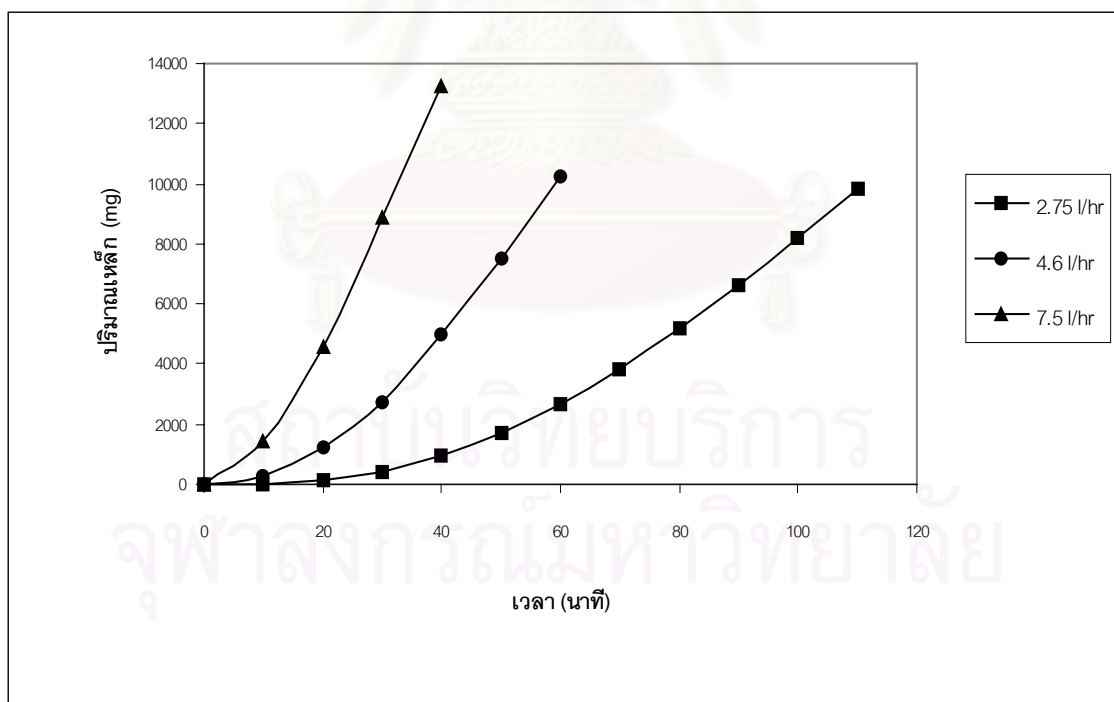
เมื่อนำผลที่ได้มาพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลาจะ  
ดังนี้



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลา  
ของกรดเสียตัวอย่างที่ 1

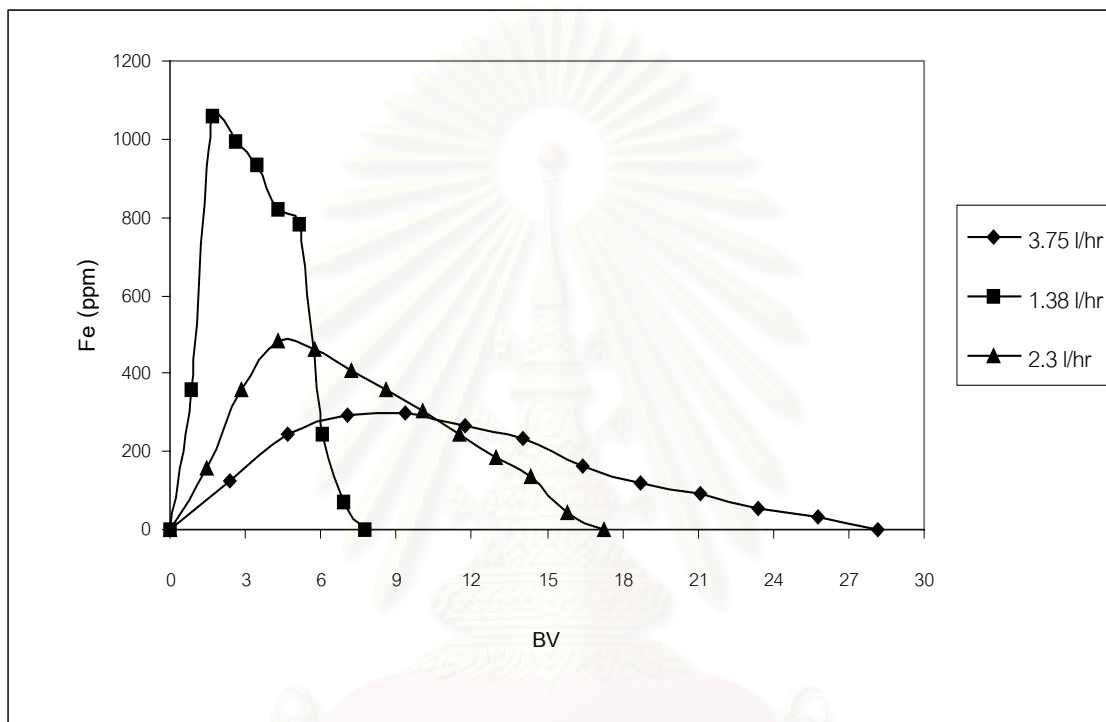


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลาของกรดเสียตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลาของกรดเสียตัวอย่างที่ 3

5.2.3 ผลการทดลองหาอัตราการไหลของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมในการฟื้นอำนาจเรซินในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยใช้อัตราการไหล 3 ช่วงคือ 1.38, 2.30 และ 3.75 ลิตรต่อชั่วโมง (ที่อัตราการไหล 0.43, 0.72 และ 1.17 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยมีปริมาตรเรซิน 0.4 ลิตร) ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ช้ากว่าการปฏิบัติงานปกติเท่าหนึ่ง และใช้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 54.75 กรัมต่อลิตร (1.5 โมลต่อลิตร) ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.15 ดังนี้

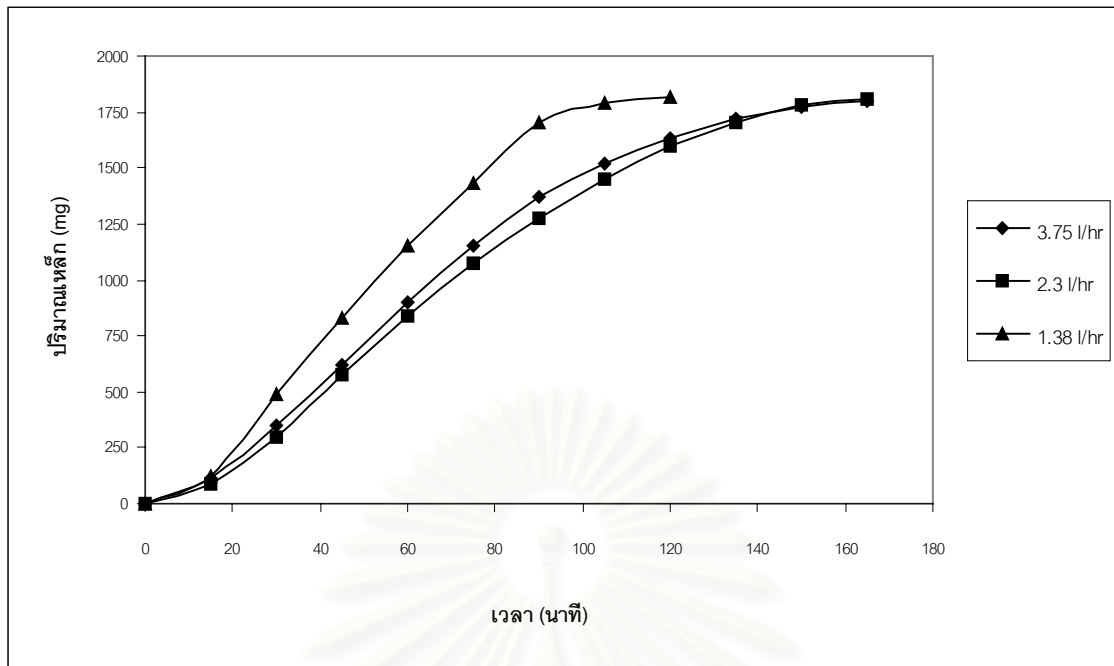


รูปที่ 5.15 กราฟแสดงการฟื้นอำนาจเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่อัตราการไหลต่างๆ

จะได้ตารางเปรียบเทียบดังนี้

ตาราง 5.7 ตารางแสดงผลการทดลองการรีเจนเนอเรตเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกโดยกรดไฮโดรคลอริกที่อัตราการไหลต่างๆ

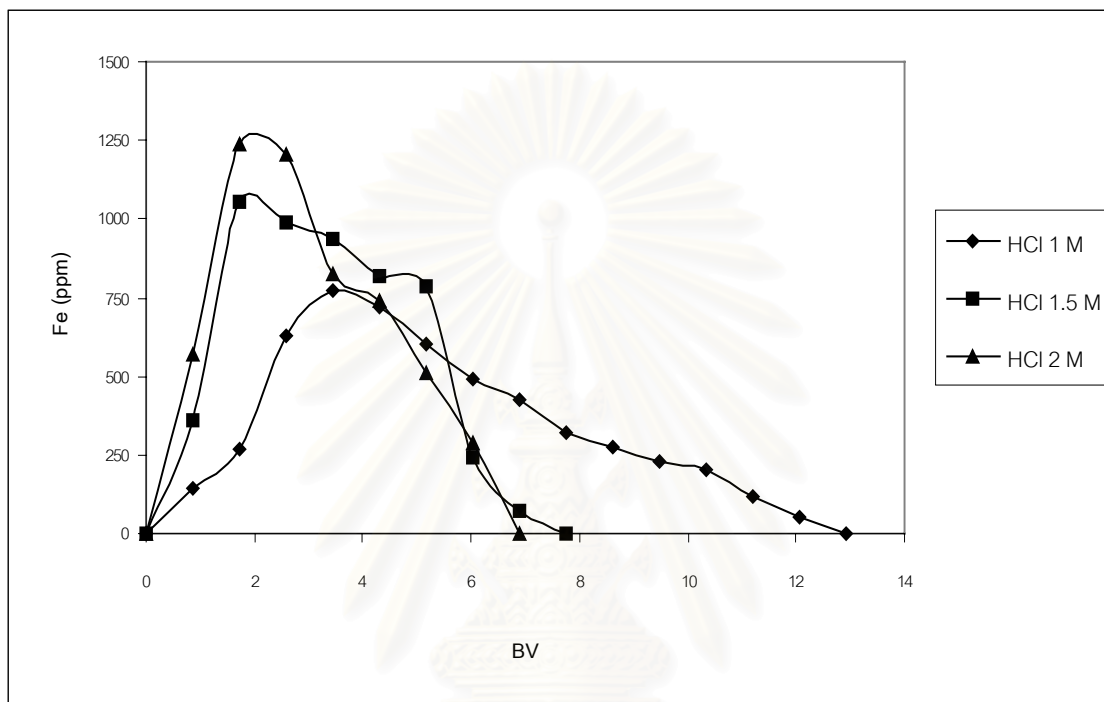
อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ปริมาณกรดที่ใช้ (กรัม)	ปริมาณเหล็กที่ออกมา (กรัม)
1.38	170	1.815
2.30	378	1.805
3.75	616	1.455



รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ออกมาในการพ่นอำนาจเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก  
เทียบกับเวลา ที่อัตราการไหลต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.4 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมในการฟื้นฟ้อำนาจเรซินในกระบวนการดั่งเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมคือ 1.38 ลิตรต่อชั่วโมง และใช้ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก คือ 36.50, 54.75 และ 73 กรัมต่อลิตร (1, 1.5 และ 2 โมลต่อลิตร ตามลำดับ) ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.17 ดังนี้

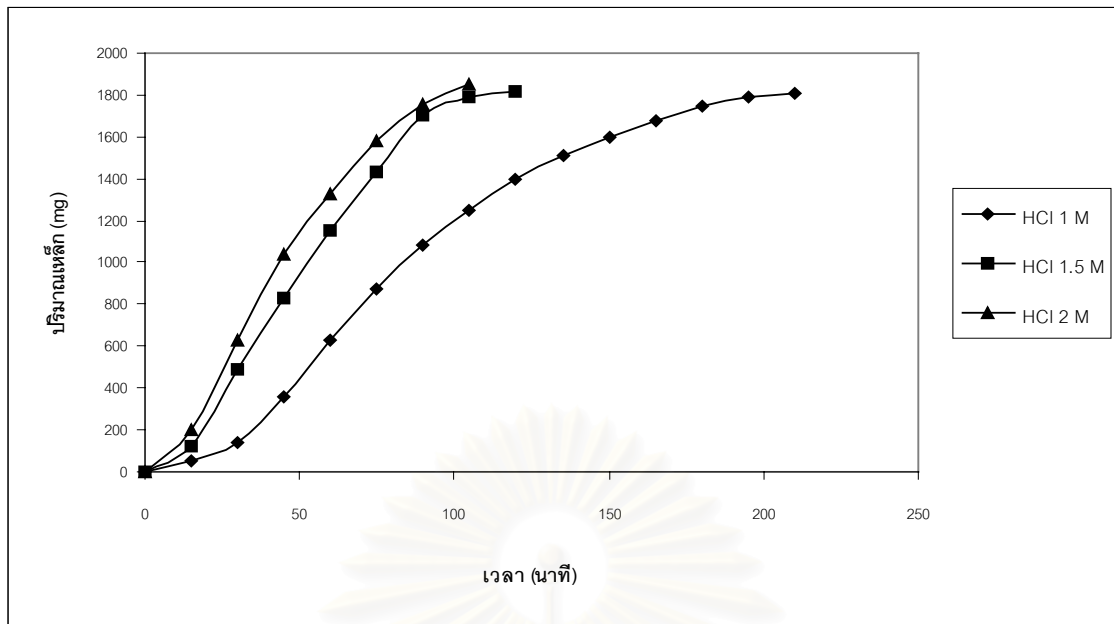


รูปที่ 5.17 กราฟแสดงการฟื้นฟ้อำนาจเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างๆ

จะได้ตารางเปรียบเทียบดังนี้

ตาราง 5.8 ตารางแสดงผลการทดลองการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกโดยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นกรด (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณกรดที่ใช้ (กรัม)	ปริมาณเหล็กที่ออกมา (กรัม)
36.5	190	1.811
54.7	170	1.815
73.0	201	1.855

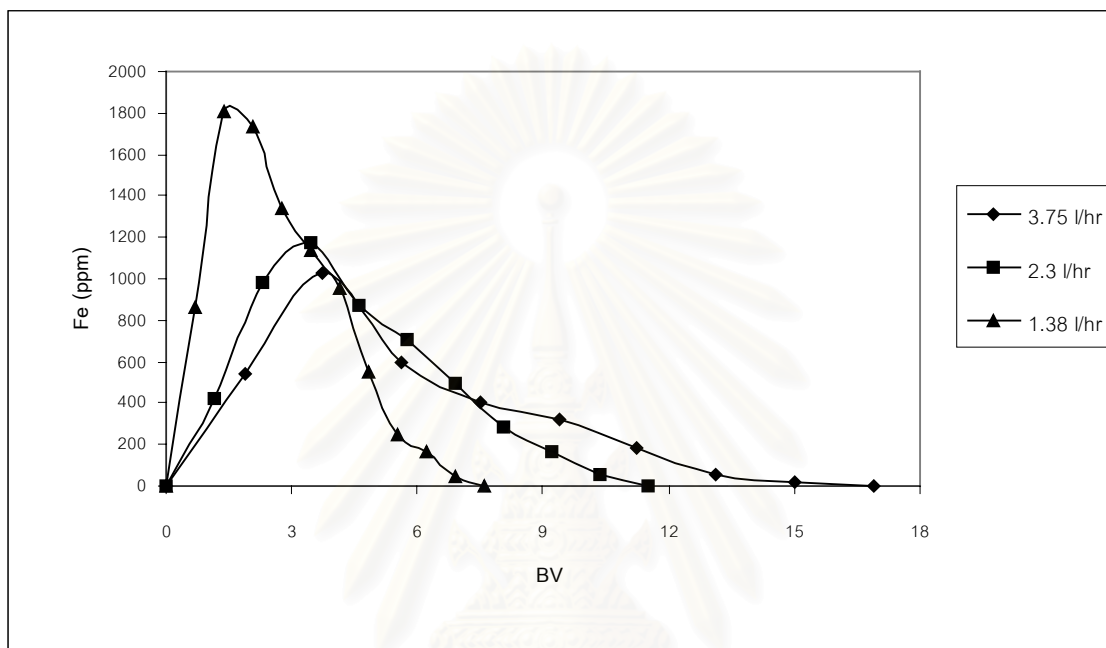


รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ออกมาในการพ่นอำนาจเรซินแล็กเปลี่ยนประจุบวก  
เทียบกับเวลา ที่ความเข้มข้นของกรดต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5.2.5 ผลการทดลองหาอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมในการฟื้นอำนาจเรซินในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ โดยใช้อัตราการไหล 3 ช่วงคือ 1.38, 2.30 และ 3.75 ลิตรต่อชั่วโมง (ที่อัตราการไหล 0.43, 0.72 และ 1.17 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยมีปริมาตรเรซิน 0.4 ลิตร) ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ช้ากว่าการปฏิบัติงานปกติเท่าหนึ่ง ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.19 ดังนี้

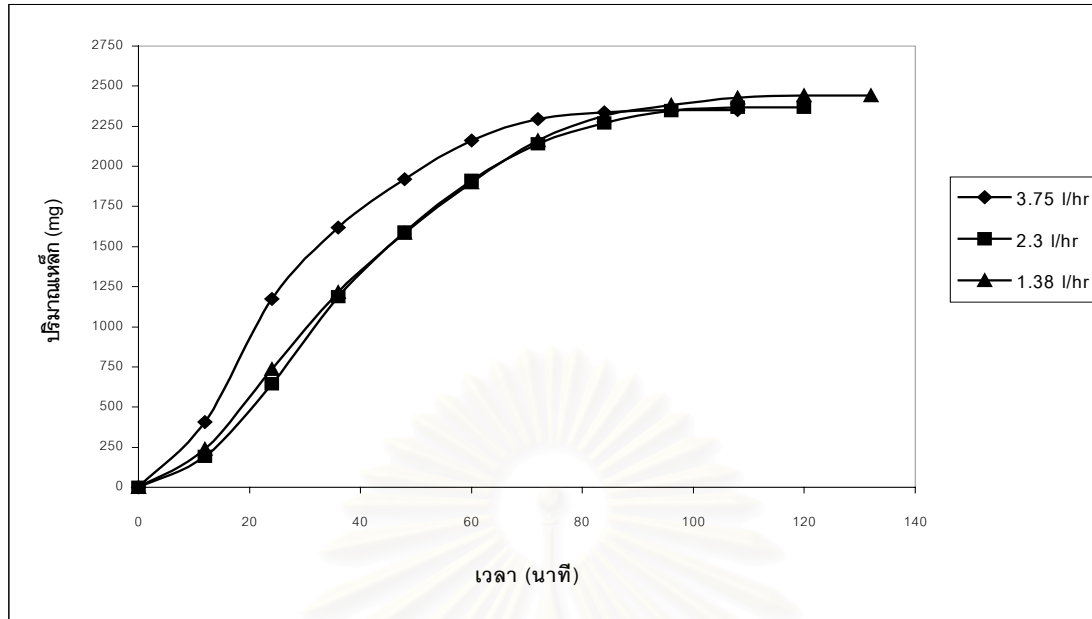


รูปที่ 5.19 กราฟแสดงการฟื้นอำนาจเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบด้วยน้ำที่อัตราการไหลต่างๆ

ได้ตารางเปรียบเทียบผลดังนี้

ตาราง 5.9 ตารางแสดงผลการทดลองการรีเจนเนอเรชันแลกเปลี่ยนประจุลบด้วยน้ำที่อัตราการไหลต่างๆ

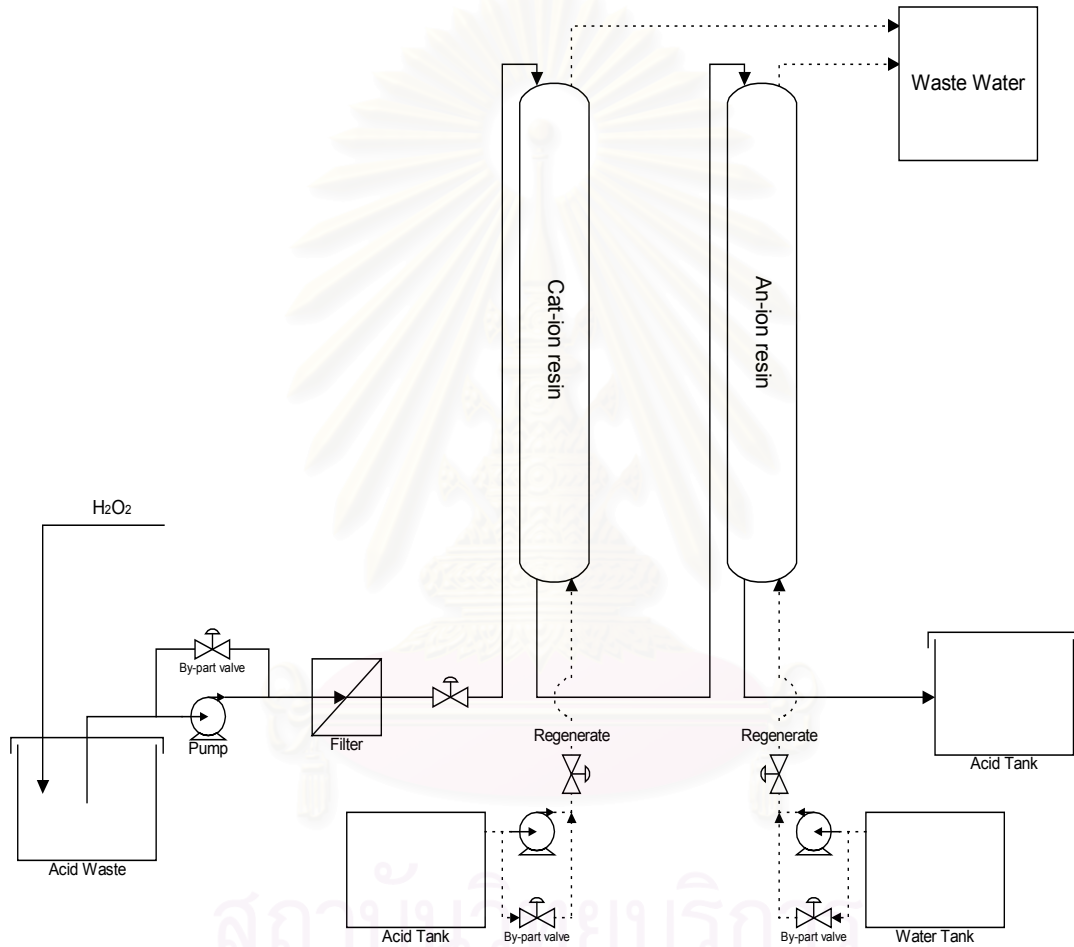
อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	ปริมาณเหล็กที่ออกมา (กรัม)
1.38	3.00	2.441
2.30	4.60	2.370
3.75	6.75	2.351



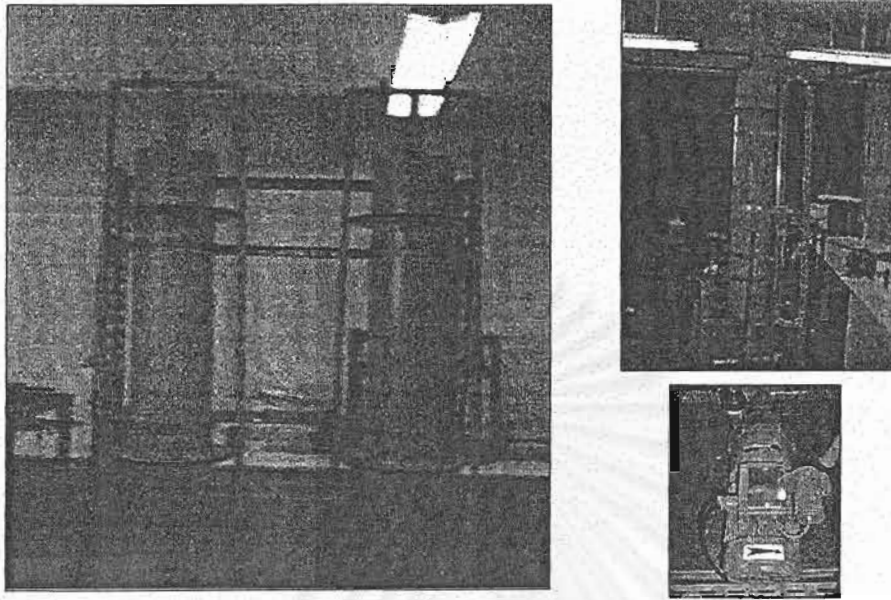
รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ออกมาในการพ่นอำนาจเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ  
เทียบกับเวลา ที่อัตราการไหลต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

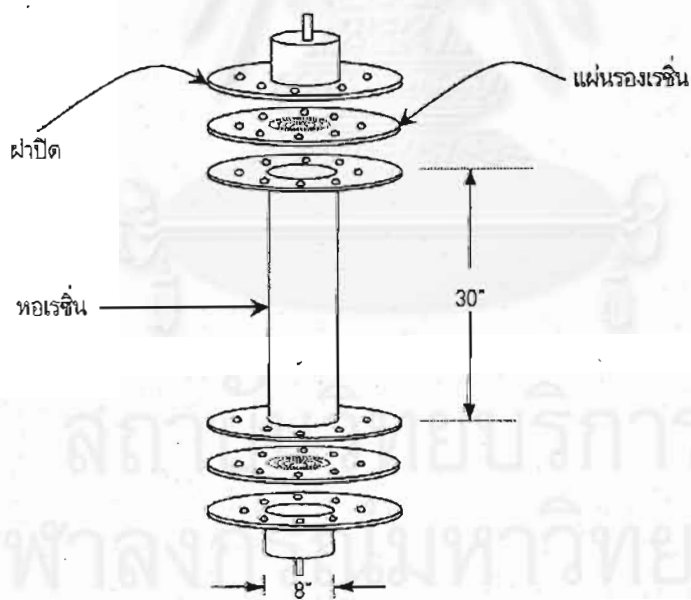
5.3 การออกแบบและสร้างกระบวนการนำกลับด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ ซึ่งเป็นกระบวนการที่นำเอากระบวนการดั้งเดิมแบบใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก และเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบมารวมกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.21 ซึ่งแบบจำลองตามรูปที่ 5.21 นี้จะนำมาใช้ทดลองหาประสิทธิภาพเพื่อเปรียบเทียบผลตามหัวข้อที่ 4.5 เมื่อสร้างมาแล้วจะได้แบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 5.22 โดยที่แต่ละคอลัมน์มีปริมาตร 16 ลิตร แต่ในการทดลองคอลัมน์นี้จะบรรจุเรซินปริมาตร 8 ลิตร ทั้งสองคอลัมน์ ลักษณะของคอลัมน์แสดงในรูปที่ 5.23 ซึ่งทำจากท่อพีวีซี (PVC) ขนาด 8 นิ้ว



รูปที่ 5.21 แบบจำลองกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในงานวิจัย



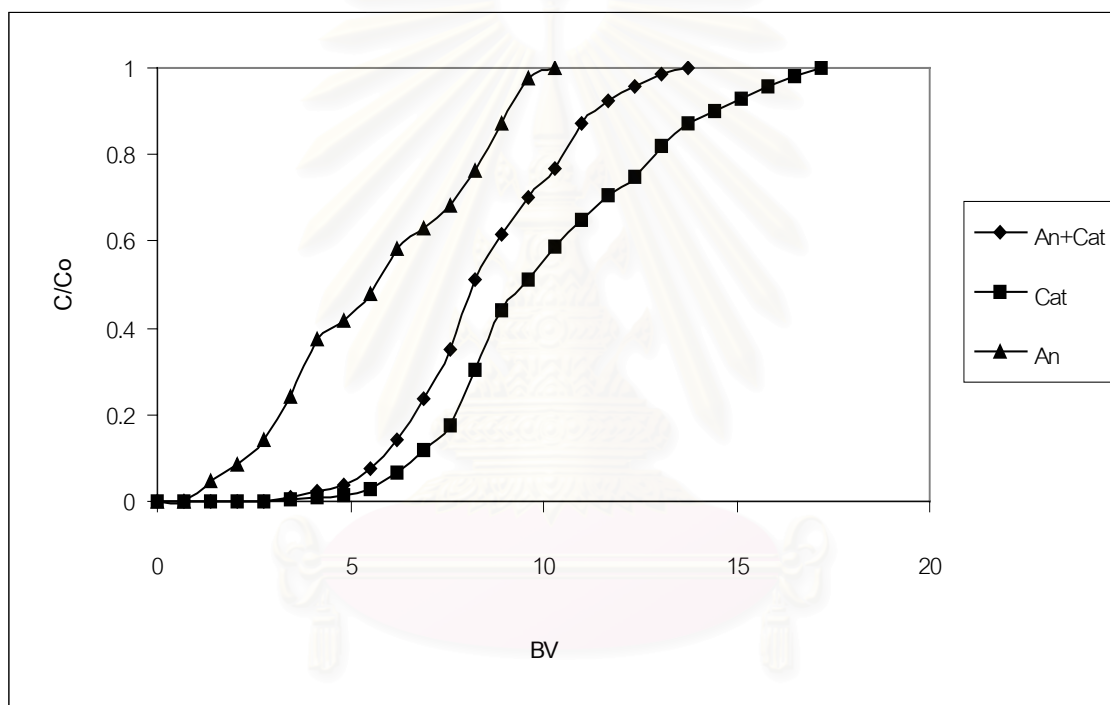
รูปที่ 5.22 แสดงแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดลอง



รูปที่ 5.23 แสดงลักษณะของหอคอกลิ้นที่สร้างขึ้นในการทดลอง

5.4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของแบบจำลองกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 5.22 และหาประสิทธิภาพของกระบวนการที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก (ซึ่งมี 2 กระบวนการดังที่กล่าวมาข้างต้น) โดยใช้แบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 โดยในการหาประสิทธิภาพในการนำกลับกรดนี้จะดูจากปริมาณของกรดไฮโดรคลอริกและไอออนเหล็กที่ออกจากกระบวนการ ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

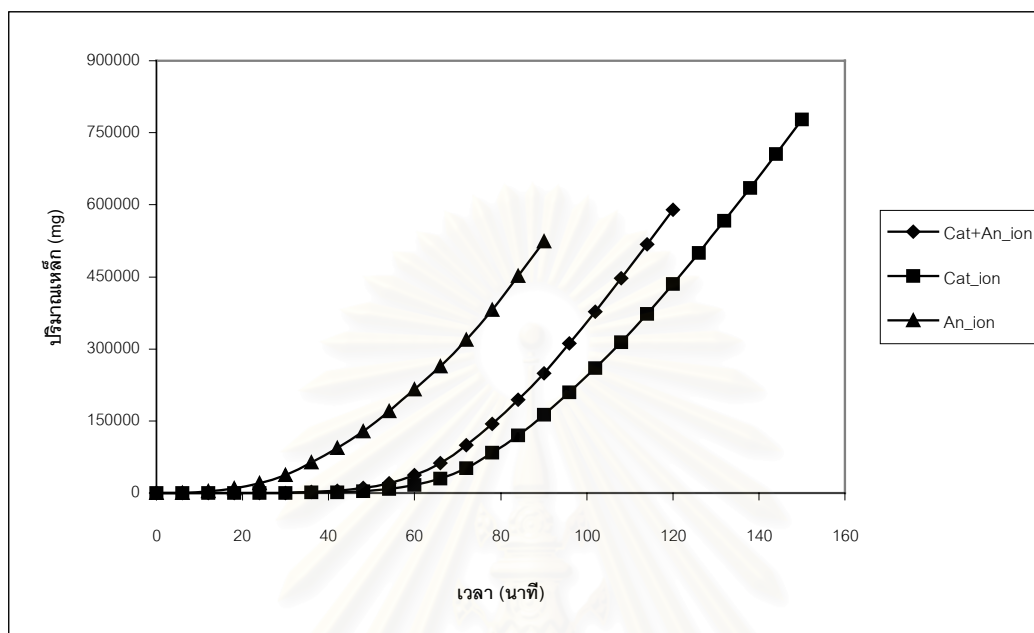
5.4.1 เปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่าง 1 มีปริมาณเหล็ก 6.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 91.25 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง (อัตราการไหล 0.86 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยที่เรซินมีปริมาตร 16 ลิตร) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 แสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบกระบวนการ สำหรับกรดเสียตัวอย่าง 1

โดยที่	$C_0$	คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางเข้า คือ 6.5 กรัมต่อลิตร
	$C$	คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางออก (กรัมต่อลิตร)
	BV	คือ ปริมาตรของกรดเสียที่ไหลผ่านเรซินต่อปริมาตรเรซิน (ลิตร/ลิตรของเรซิน)
	Cat + An	คือ กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ได้ออกแบบในโครงการวิจัย
	Cat	คือ กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก
	An	คือ กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ

เมื่อนำข้อมูลที่ทดลองได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับ หรือ ปริมาณไอออนเหล็กที่ติดออกมาทางออก เทียบกับเวลาจะแสดงผลดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 5.25 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลา ของกรดเสียตัวอย่าง 1 ของกระบวนการต่างๆ

จะได้ตารางเปรียบเทียบผลดังนี้

ตาราง 5.10 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 1 เมื่อปฏิบัติงานจนเรซินอิ่มตัว

กระบวนการ	ปริมาณกรดที่บำบัดได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การนำกลับกรด	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูดซับได้
Cat + An	220	86	59
Cat	275	78	57
An	165	100	51

ตาราง 5.11 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการ โดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 1 เมื่อปฏิบัติงานจนปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 0.5 กรัมต่อลิตร

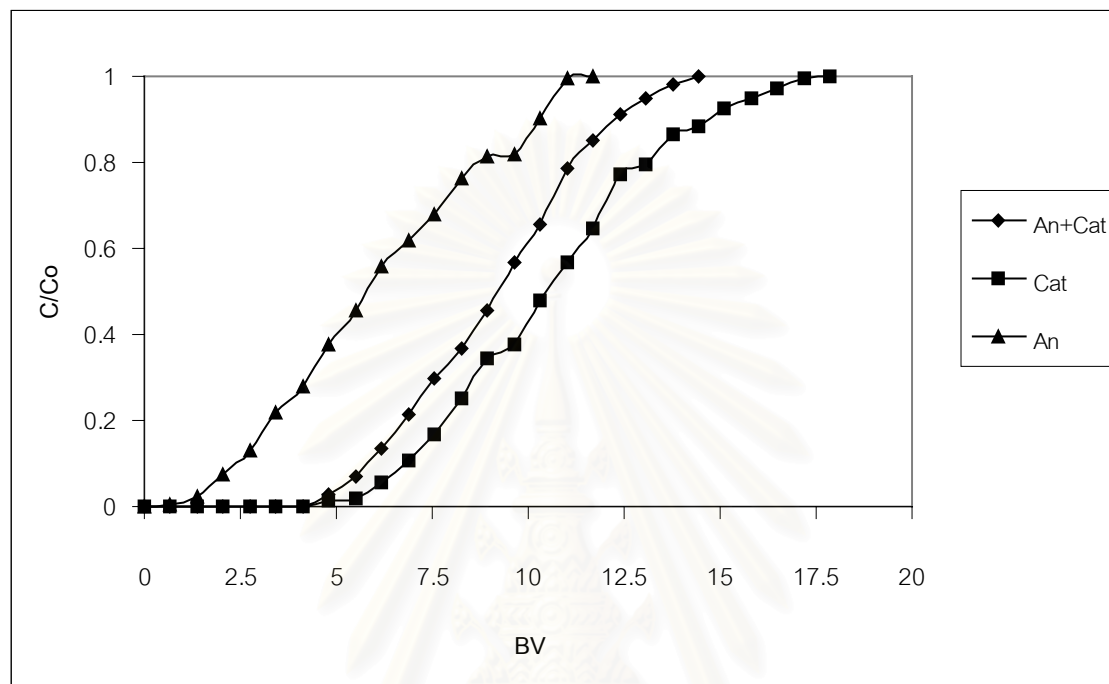
กระบวนการ	ปริมาณกรดที่บำบัดได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การนำ กลับกรด	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูด ซับได้
Cat + An	120	75	92
Cat	138	57	92
An	47	100	92

ตาราง 5.12 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการ โดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 1 เมื่อปฏิบัติงานจนปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 1 กรัมต่อลิตร

กระบวนการ	ปริมาณกรดที่บำบัดได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การนำ กลับกรด	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูด ซับได้
Cat + An	143	79	85
Cat	166	64	85
An	67	100	85

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4.2 เปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่าง 2 มีปริมาณเหล็ก 4.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 91.25 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง (อัตราการไหล 0.86 แกลลอนต่อ นาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยที่เรซินมีปริมาตร 16 ลิตร) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.26

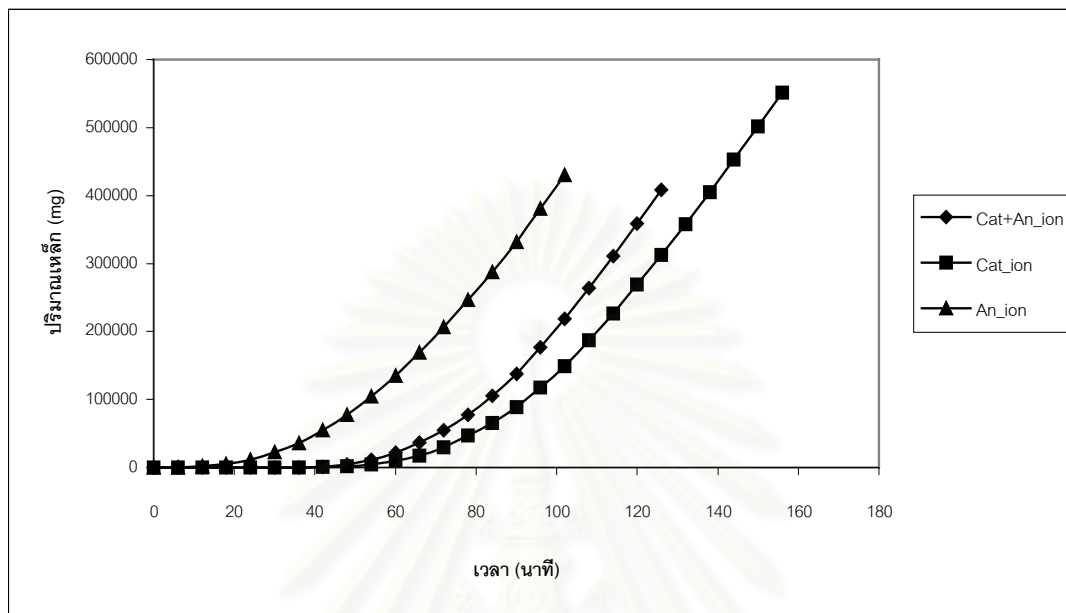


รูปที่ 5.26 แสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบกระบวนการ สำหรับกรดเสียตัวอย่าง 2

- โดยที่  $C_0$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางเข้า คือ 4.5 กรัมต่อลิตร  
 $C$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางออก (กรัมต่อลิตร)  
 $BV$  คือ ปริมาตรของกรดเสียที่ไหลผ่านเรซินต่อปริมาตรเรซิน (ลิตร/ลิตรของเรซิน)  
 $Cat + An$  คือ กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ได้ออกแบบในโครงการวิจัย  
 $Cat$  คือ กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก  
 $An$  คือ กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ



เมื่อนำข้อมูลที่ทดลองได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับ หรือ ปริมาณไอออนเหล็กที่ติดออกมาทางออก เทียบกับเวลาจะแสดงผลดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 5.27 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลา ของกรดเสียตัวอย่าง 2 ของกระบวนการต่างๆ

จะได้ตารางเปรียบเทียบผลดังนี้

ตาราง 5.13 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 2 เมื่อปฏิบัติงานจนเรซินอิ่มตัว

กระบวนการ	ปริมาณกรดที่บำบัดได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การนำกลับกรด	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูดซับได้
Cat + An	231	87	61
Cat	286	79	57
An	187	100	49

ตาราง 5.14 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการ โดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 2 เมื่อปฏิบัติงานจนปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 0.5 กรัมต่อลิตร

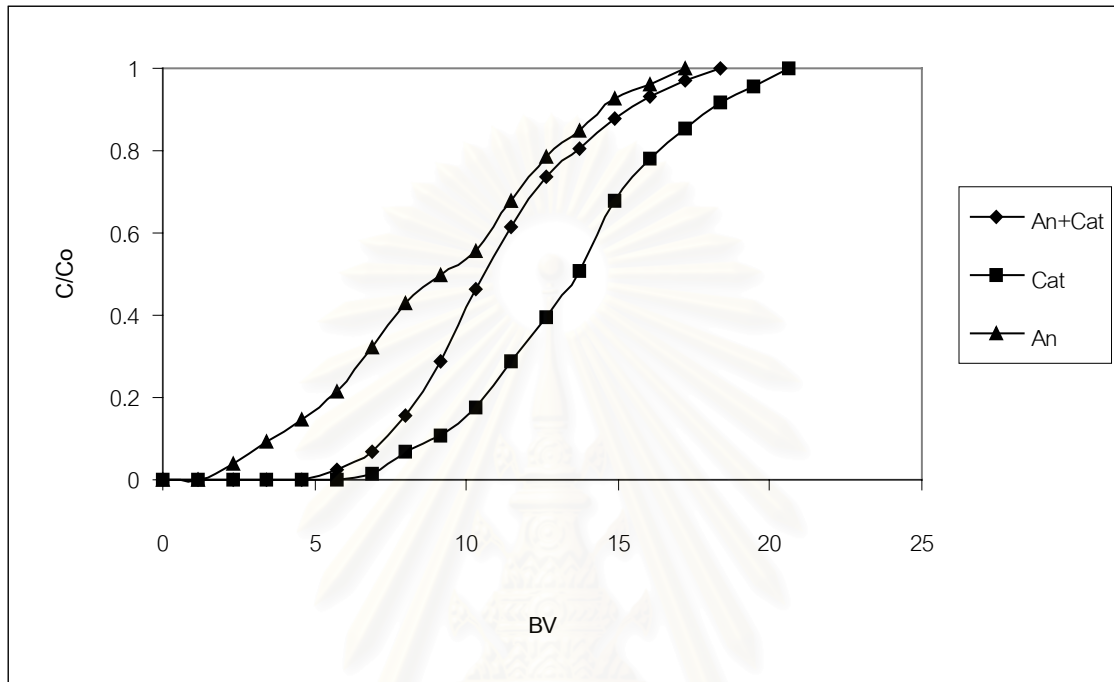
กระบวนการ	ปริมาณกรดที่บำบัดได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การนำ กลับกรด	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูด ซับได้
Cat + An	139	84	89
Cat	161	63	89
An	62	100	89

ตาราง 5.15 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการ โดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 2 เมื่อปฏิบัติงานจนปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 1 กรัมต่อลิตร

กระบวนการ	ปริมาณกรดที่บำบัดได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การนำ กลับกรด	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูด ซับได้
Cat + An	176	83	78
Cat	202	70	78
An	95	100	78

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

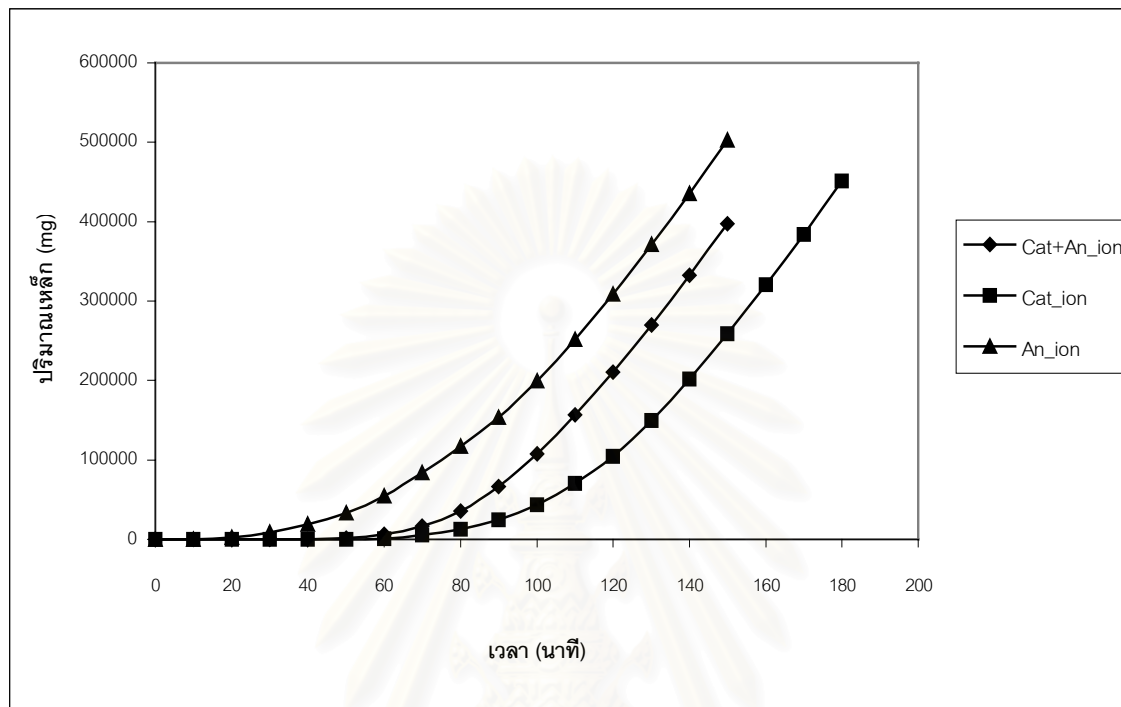
5.4.3 เปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่าง 3 มีปริมาณเหล็ก 3.7 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 54.75 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง (อัตราการไหล 0.86 แกลลอนต่อ นาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยที่เรซินมีปริมาตร 16 ลิตร) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.28 แสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบกระบวนการ สำหรับกรดเสียตัวอย่าง 3

- โดยที่  $C_0$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางเข้า คือ 3.7 กรัมต่อลิตร  
 $C$  คือ ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กทางออก (กรัมต่อลิตร)  
 $BV$  คือ ปริมาตรของกรดเสียที่ไหลผ่านเรซินต่อปริมาตรเรซิน (ลิตร/ลิตรของเรซิน)  
 $Cat + An$  คือ กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ได้ออกแบบในโครงการวิจัย  
 $Cat$  คือ กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก  
 $An$  คือ กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ

เมื่อนำข้อมูลที่ทดลองได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับ หรือ ปริมาณไอออนเหล็กที่ติดออกมาทางออก เทียบกับเวลาจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 5.29 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่ไม่ถูกดูดซับเทียบกับเวลา ของกรดเสียตัวอย่าง 3 ของกระบวนการต่างๆ

จะได้ตารางเปรียบเทียบผลดังนี้

ตาราง 5.16 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 3 เมื่อปฏิบัติงานจนเรซินอิ่มตัว

กระบวนการ	ปริมาณกรดที่บำบัดได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การนำกลับกรด	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูดซับได้
Cat + An	293	90	63
Cat	330	82	63
An	275	100	50

ตาราง 5.17 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการ โดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 3 เมื่อปฏิบัติงานจนปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 0.5 กรัมต่อลิตร

กระบวนการ	ปริมาณกรดที่บำบัดได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การนำ กลับกรด	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูด ซับได้
Cat + An	175	83	86
Cat	223	73	86
An	110	100	86

ตาราง 5.18 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการ โดยใช้กรดเสียตัวอย่างที่ 3 เมื่อปฏิบัติงานจนปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 1 กรัมต่อลิตร

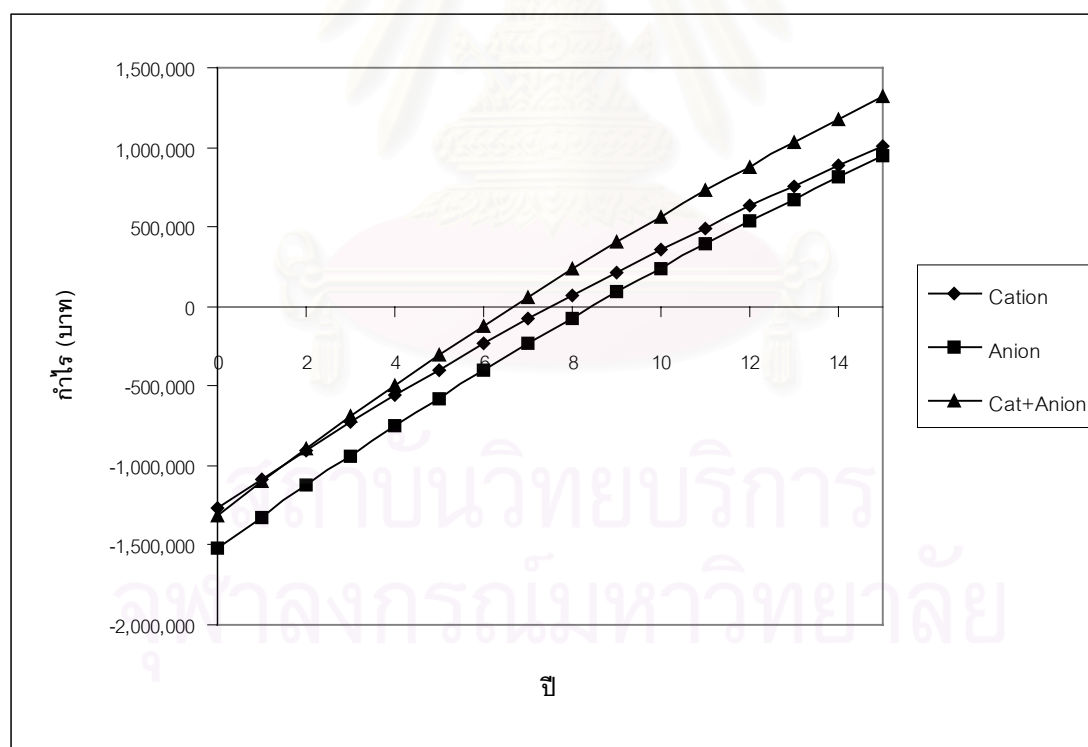
กระบวนการ	ปริมาณกรดที่บำบัดได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การนำ กลับกรด	เปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูด ซับได้
Cat + An	224	87	73
Cat	282	79	73
An	173	100	73

หมายเหตุ รายละเอียดของข้อมูลในหัวข้อ 5.4 แสดงในภาคผนวก จ.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.5 เมื่อนำผลที่ได้จากหัวข้อ 5.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกระหว่างแบบจำลองที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กกับแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้เชิงเศรษฐศาสตร์ โดยจะพิจารณากรดเสียที่มีปริมาณเหล็กโดยเฉลี่ย คือ 3.7 กรัมต่อลิตร ในกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 51.21 กรัมต่อลิตร (5 % โดยน้ำหนัก) ซึ่งเป็นกรดเสียที่เกิดจากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และยังเป็นกรดเสียตัวอย่างที่ 3 ในหัวข้อ 5.4.3 ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลในหัวข้อที่ 5.4.3 มาใช้ในการคำนวณหาจุดคุ้มทุน และในการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนนี้จะแบ่งเป็น 3 ขนาดคือ กระบวนการกำจัดสนิมเหล็กที่มีกรดเสียวันละ 2 ลูกบาศก์เมตร , 5 ลูกบาศก์เมตร และ 15 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยรายละเอียดในการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ข. และได้ผลการคำนวณดังนี้

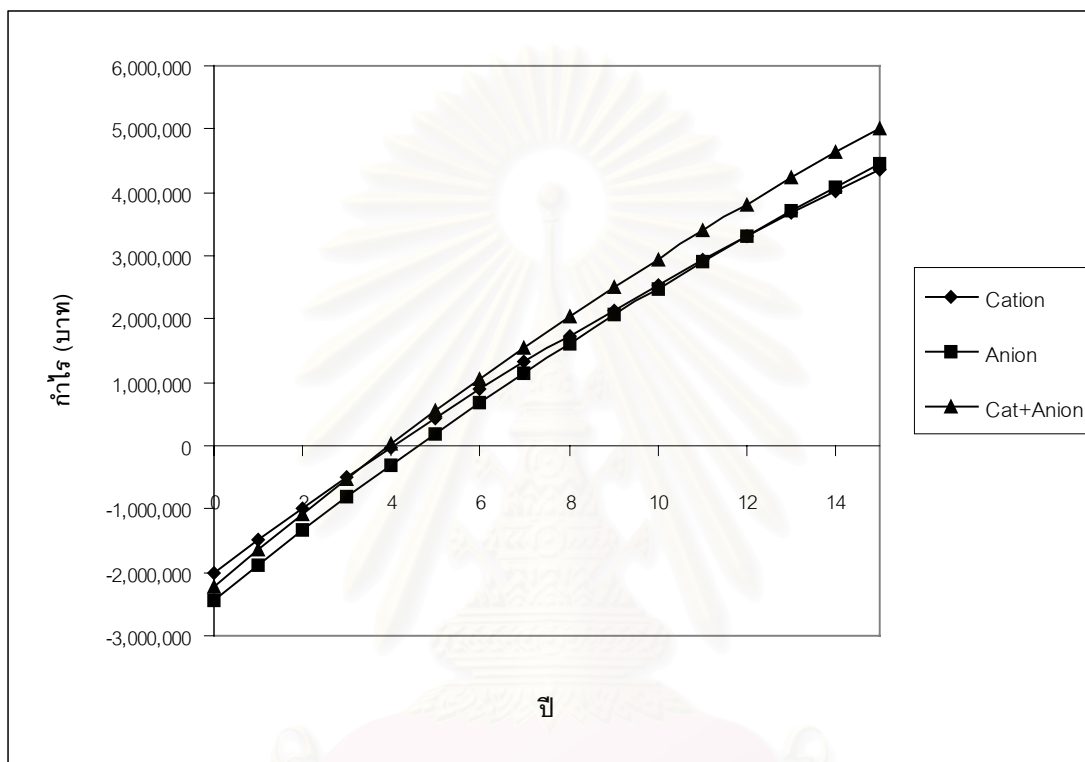
5.5.1 กระบวนการกำจัดสนิมขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งถ้าไม่มีกระบวนการนำกลับกรดจะมีการสูญเสียรายได้ประมาณปีละ 400,000 บาท (คิดจากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กแบบกะ) แต่ถ้าติดตั้งกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กเข้าไป (คิดจากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กแบบต่อเนื่อง) จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ประมาณปีละ 200,000 บาท และถ้าพิจารณากระบวนการกำจัดสนิมแต่ละกระบวนการจะได้กราฟแสดงจุดคุ้มทุนดังรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 แสดงระยะเวลาคืนทุนในแต่ละกระบวนการที่มีขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร

หมายเหตุ รายละเอียดในการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ข.

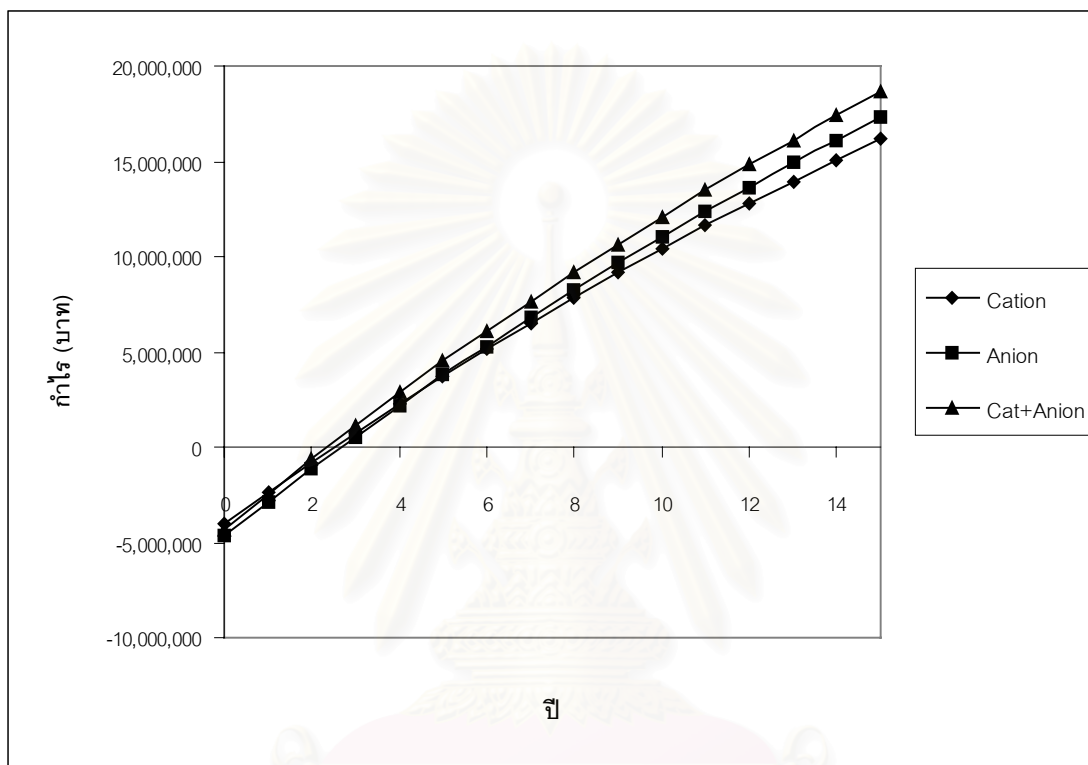
5.5.2 กระบวนการกำจัดสนิมขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งถ้าไม่มีกระบวนการนำกลับกรดจะมีการสูญเสียรายได้ประมาณปีละ 1,000,000 บาท (คิดจากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กแบบกะ) แต่ถ้าติดตั้งกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กเข้าไป (คิดจากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กแบบต่อเนื่อง) จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ประมาณปีละ 600,000 บาท และถ้าพิจารณากระบวนการกำจัดสนิมแต่ละกระบวนการจะได้กราฟแสดงจุดคุ้มทุนดังรูปที่ 5.31



รูปที่ 5.31 แสดงระยะเวลาคืนทุนในแต่ละกระบวนการที่มีขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร

หมายเหตุ รายละเอียดในการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ซ.

5.5.3 กระบวนการกำจัดสนิมขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งถ้าไม่มีกระบวนการนำกลับกรด จะมีการสูญเสียรายได้ประมาณปีละ 3,000,000 บาท (คิดจากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กแบบกะ) แต่ถ้าติดตั้งกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กเข้าไป (คิดจากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กแบบต่อเนื่อง) จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ประมาณปีละ 2,000,000 บาท และถ้าพิจารณากระบวนการกำจัดสนิมแต่ละกระบวนการจะได้กราฟแสดงจุดคุ้มทุนดังรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.32 แสดงระยะเวลาคืนทุนในแต่ละกระบวนการที่มีขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร

หมายเหตุ รายละเอียดในการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ซ.

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย

ในโครงการวิจัยที่ได้ทำการทดลองและคำนวณนี้ ได้สรุปเนื้อหาเป็น 3 ส่วนคือ

- การหาอัตราการไหลที่เหมาะสมทั้งสภาวะการปฏิบัติงานปกติ และสภาวะการฟื้นฟูน้ำประปาและน้ำดื่ม และการหาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมในการฟื้นฟูน้ำประปาและน้ำดื่ม
- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กกับแบบจำลองที่ออกแบบในโครงการวิจัย โดยวิเคราะห์จากปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่สามารถนำกลับได้และปริมาณไอออนเหล็กที่สามารถดึงไว้ได้
- การเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยการหาจุดคุ้มทุนของกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กกับแบบจำลองที่ออกแบบในโครงการวิจัย

6.1 การสรุปในส่วนของการหาอัตราการไหลที่เหมาะสมทั้งสภาวะการปฏิบัติงานปกติ และสภาวะการฟื้นฟูน้ำประปาและน้ำดื่ม และการหาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมในการฟื้นฟูน้ำประปาและน้ำดื่ม

6.1.1 อัตราการไหลที่เหมาะสมในการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cat-ion Resin) และเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ (An-ion Resin) โดยพิจารณาอัตราการไหล 3 ช่วงคือ 2.75, 4.6 และ 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง (ที่อัตราการไหล 0.86, 1.43 และ 2.34 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยมีปริมาตรเรซิน 0.4 ลิตร) โดยการทดลอง 3 จะพบว่ากรดเสียทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง (คือ 0.86 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน) ให้ปริมาณการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่มากที่สุด และสามารถดูดซับเหล็กได้ดีที่สุด ซึ่งสังเกตว่าเป็นอัตราการไหลที่ต่ำที่สุด ดังนั้นถ้าพิจารณาอัตราการไหลในช่วง 0.8 - 2.5 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน จะพบว่า 0.8 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน เป็นอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการดึงเหล็กที่ดีที่สุด

6.1.2 อัตราการไหลของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมในการฟื้นฟูน้ำประปาและน้ำดื่มในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cat-ion Resin) โดยใช้อัตราการไหล 3 ช่วงคือ 1.38, 2.30 และ 3.75 ลิตรต่อชั่วโมง (ที่อัตราการไหล 0.43, 0.72 และ 1.17 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยมีปริมาตรเรซิน 0.4 ลิตร) และใช้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 54.75 กรัมต่อลิตร (1.5 โมลต่อลิตร) จะพบว่าที่อัตราการไหล 1.38 ลิตรต่อชั่วโมง (คือ 0.43 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน) ใช้ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่น้อยที่สุด และสามารถล้างเหล็กได้มากที่สุด ซึ่งสังเกตว่าเป็นอัตราการไหลที่ต่ำที่สุด ดังนั้นถ้า

พิจารณาอัตราการไหลในช่วง 0.4 - 1.25 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน จะพบว่า 0.4 แกลลอนต่อ นาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน เป็นอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการฟื้นอำนาจดีที่สุด

6.1.3 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมในการฟื้นอำนาจเรซินในกระบวนการ ดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cat-ion Resin) โดยใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมคือ 1.38 ลิตรต่อชั่วโมง และใช้ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก คือ 36.50, 54.75 และ 73 กรัมต่อลิตร (1, 1.5 และ 2 โมลต่อลิตร ตามลำดับ) จะพบว่าที่ความเข้มข้น 54.7 กรัมต่อลิตร (1 โมลต่อลิตร) ใช้ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่น้อยที่สุด ดังนั้นจึงเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการฟื้นอำนาจเรซิน

6.1.4 อัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมในการฟื้นอำนาจเรซินในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้ เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ (An-ion Resin) โดยใช้อัตราการไหล 3 ช่วงคือ 1.38, 2.30 และ 3.75 ลิตร ต่อชั่วโมง (ที่อัตราการไหล 0.43, 0.72 และ 1.17 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยมีปริมาตรเรซิน 0.4 ลิตร) จะพบว่าที่อัตราการไหล 1.38 ลิตรต่อชั่วโมง (คือ 0.43 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน) ใช้ ปริมาณน้ำที่น้อยที่สุด และสามารถล้างเหล็กได้มากที่สุด ซึ่งสังเกตว่าเป็นอัตราการไหลที่ต่ำที่สุด ดังนั้นถ้า พิจารณาอัตราการไหลในช่วง 0.4 - 1.25 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน จะพบว่า 0.4 แกลลอนต่อ นาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน เป็นอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการฟื้นอำนาจดีที่สุด

6.2 สรุปการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในอุตสาหกรรม แปรรูปเหล็กกับแบบจำลองที่ออกแบบในโครงการวิจัย โดยวิเคราะห์จากปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่ สามารถนำกลับได้และปริมาณไอออนเหล็กที่สามารถดึงไว้ได้ จะทำการเปรียบเทียบ 3 ครั้ง โดยใช้กรดเสียตัว อย่าง 3 ตัวอย่าง ที่อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง (อัตราการไหล 0.86 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเร ซิน โดยที่เรซินมีปริมาตร 16 ลิตร) จะพบว่ากระบวนการ Cat + An (เป็นกระบวนการที่ออกแบบทดลองใน งามวิจัย) สามารถดูดซับเหล็กได้มากที่สุด โดยสังเกตได้จากเปอร์เซ็นต์เหล็กที่เรซินดูดซับได้ โดยที่สามารถ บำบัดได้มากกว่า An (กระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ) และให้เปอร์เซ็นต์การนำกลับ กรดที่สูงกว่า Cat (กระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก)

6.3 การเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยการหาจุดคุ้มทุนของกระบวนการนำกลับกรด ไฮโดรคลอริกที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กกับแบบจำลองที่ออกแบบในโครงการวิจัย โดยจะพิจารณากรด เสียที่มีปริมาณเหล็กโดยเฉลี่ย คือ 3.7 กรัมต่อลิตร ในกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 51.21 กรัมต่อลิตร (5 % โดยน้ำหนัก) ซึ่งเป็นกรดเสียที่เกิดจากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กแบบต่อเนื่อง ในการวิเคราะห์หาจุดคุ้ม ทุนนี้จะแบ่งเป็น 3 ขนาดคือ ขนาด 2, 5 และ 15 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ สรุปผลการคำนวณดังนี้

ตาราง 6.1 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ ของกระบวนการขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร

กระบวนการ	เงินลงทุน (บาท)	รายจ่ายต่อปี (บาท)	รายรับต่อปี (บาท)	ปีที่คืนทุน
Cat + An	1,320,000	126,000	346,000	6.67
Cat	1,200,000	93,400	285,000	7.54
An	1,520,000	160,000	366,000	8.45

ตาราง 6.2 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ ของกระบวนการขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร

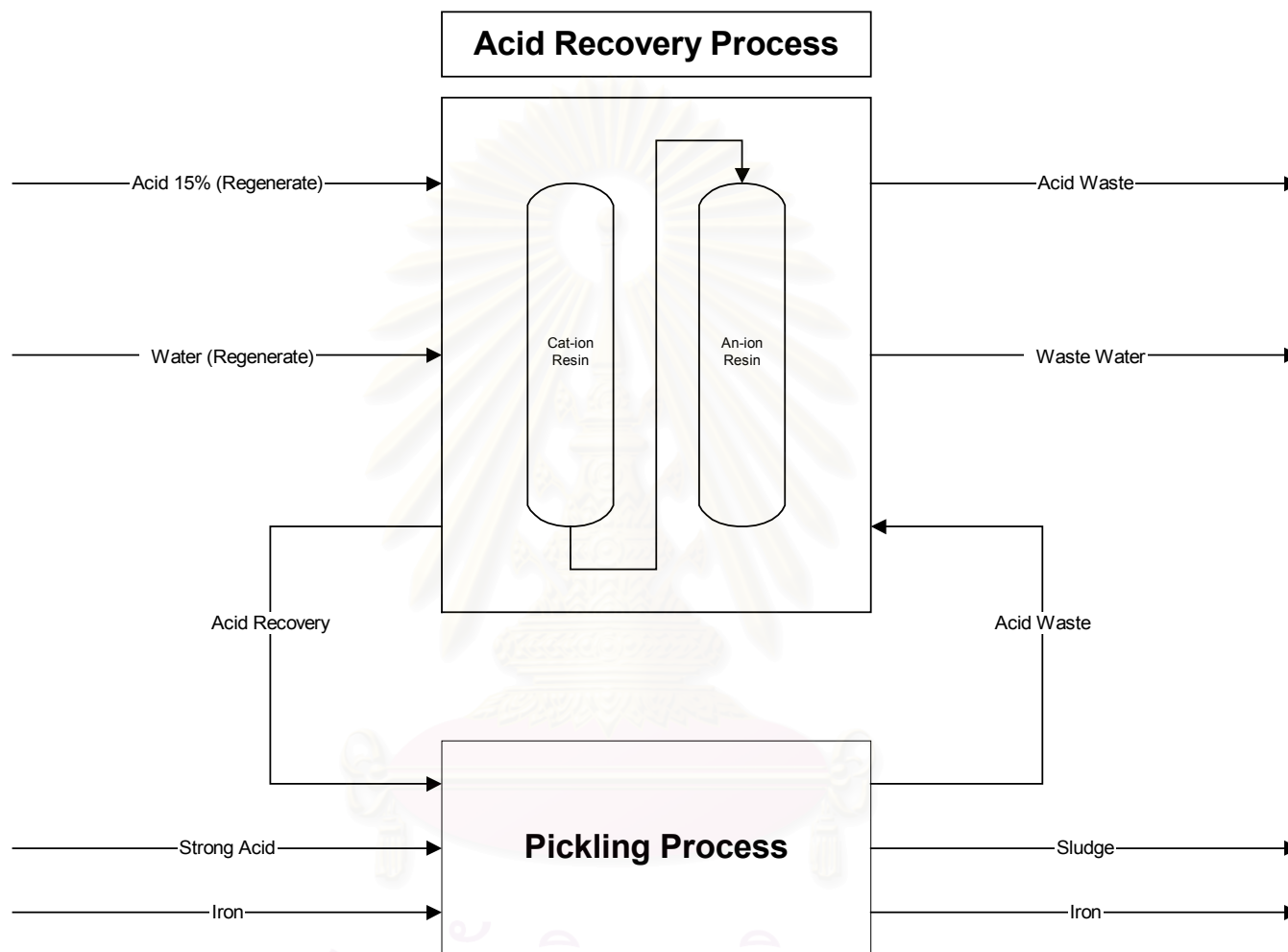
กระบวนการ	เงินลงทุน (บาท)	รายจ่ายต่อปี (บาท)	รายรับต่อปี (บาท)	ปีที่คืนทุน
Cat + An	2,230,000	257,000	865,000	3.95
Cat	2,020,000	178,000	712,000	4.06
An	2,450,000	336,000	916,000	4.60

ตาราง 6.3 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ ของกระบวนการขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร

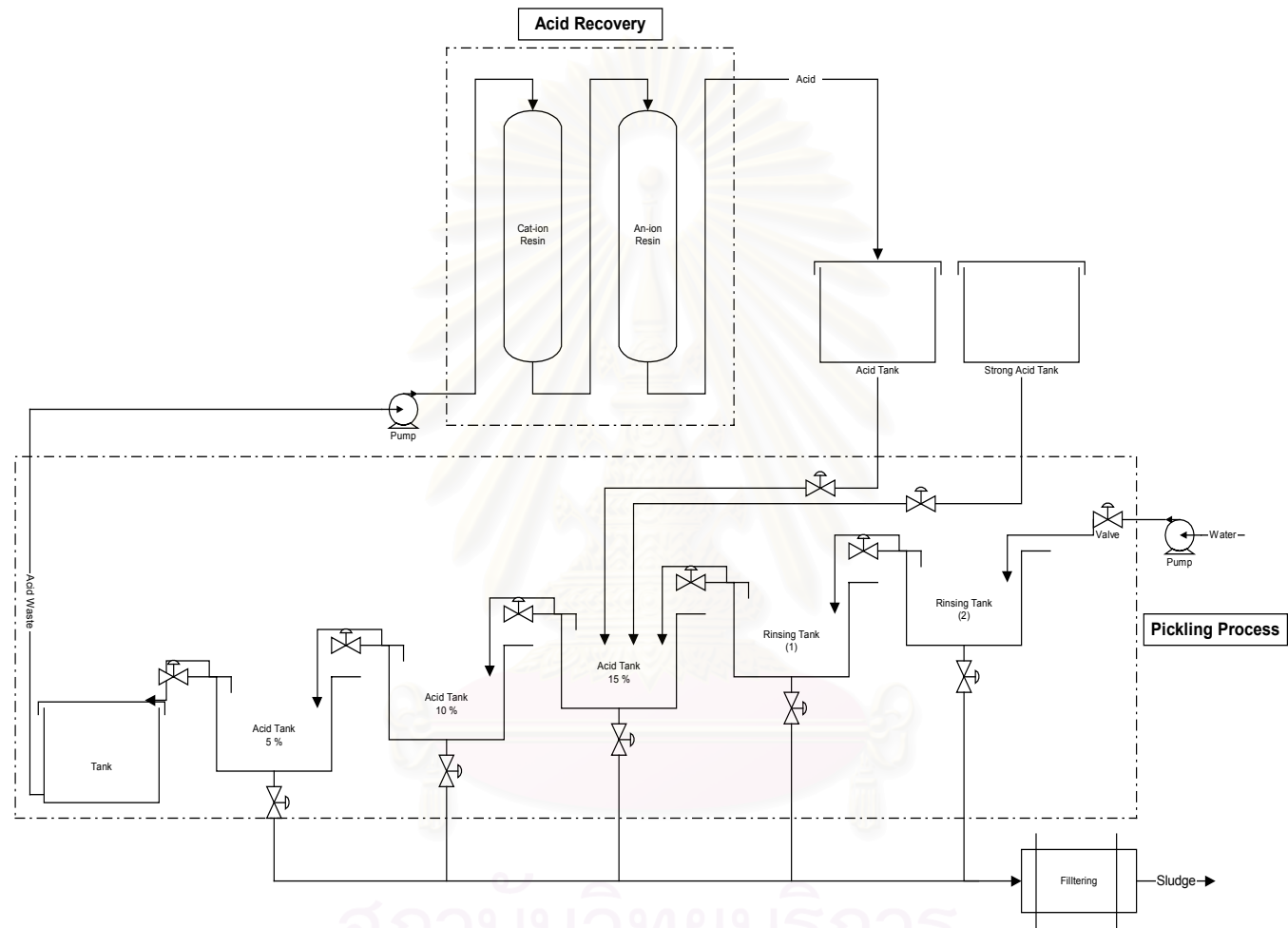
กระบวนการ	เงินลงทุน (บาท)	รายจ่ายต่อปี (บาท)	รายรับต่อปี (บาท)	ปีที่คืนทุน
Cat + An	4,300,000	675,000	2,600,000	2.36
Cat	4,050,000	445,000	2,140,000	2.52
An	4,660,000	907,000	2,750,000	2.68

จากตารางทั้ง 3 ตาราง พบว่า Cat + An (กระบวนการที่ออกแบบในโครงการวิจัย) ให้ระยะเวลาคืนทุนที่เร็วกว่ากระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกอีก 2 กระบวนการ ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก และมีรายรับสุทธิต่อปี (รายรับต่อปี - รายจ่ายต่อปี) มากที่สุด

ซึ่งจากผลการวิจัยที่ได้นี้ เราสามารถนำกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนที่ได้ี้ มาประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.1 และ 6.2



รูปที่ 6.1 แสดงไดอะแกรมการทำงานโดยนำกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกมาใช้รวมกับกระบวนการกำจัดสนิมเหล็ก



รูปที่ 6.2 แสดงกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่สามารถนำไปใช้รวมกับกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กในอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็ก

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- เกียรติก้อง อุดมสินโรจน์. วิศวกรรมการบำบัดน้ำเสีย (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร : มิตรเจริญการพิมพ์, 2535.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. คู่มือการตรวจสอบสิ่งแวดล้อมโรงงาน (การตรวจสอบสิ่งแวดล้อม โรงงานอุตสาหกรรมหลัก). กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กุมภาพันธ์ 2539.
- เดีววัลย์ มงคลพาณิชย์. การนำกรดซัลฟิวริกกลับมาใช้น้ำทิ้งโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, สำนัก. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมการแปรรูปเหล็กและกระบวนการกำจัดสนิม. สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, เมษายน 2542.
- เทอดพงศ์ ศรีสุขพันธุ์, พูลสุข ศรีเจริญ, เสกสรร ไพบุลย์วรชาติ. พฤติกรรมการกำจัดสิ่งของเรซินแลกเปลี่ยนประจุชนิดมีโซเดียมเป็นไอออนอิสระ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต แผนกวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2539.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. คู่มือการวิเคราะห์น้ำทิ้ง. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
- ประไพรัตน์ เอนกนันท์. การออกแบบระบบการนำกรดทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมรีดเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- พุทธิสาร ชัยพันธ์. การบำบัดน้ำเสียโครเมียมจากโรงงานชุบโลหะด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กรดไฮโดรคลอริก (กรดเกลือ) สำหรับใช้ในทางอุตสาหกรรม. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2520.
- เรื่องศักดิ์ หาญวงศ์, ศิริวัฒน์ ทศพรพิพัฒน์. การสร้างและออกแบบระบบเครื่องผลิตน้ำปราศจาก อีออนขนาดเล็ก วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2535.
- อุสาหะ ตันอุสิน. การนำกรดโครมิกจากน้ำทิ้งที่มาจากการชุบโครเมียมกลับมาใช้อีกด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต แผนกวิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2522.

## ภาษาอังกฤษ

- A. M. Fradkin, and E. B. Tooper. Treatment of Spent Sulfuric Acid Pickling Liquors. Industrial and Engineering Chemistry 1955: 85 – 90.
- American Society of Civil Engineering. American Water Works Association and Conference of State Sanitary Engineers. Waste Treatment Plant Design. American Water Works Association. N.Y., 1969.
- Arden, T.V. Water Purification by Ion Exchange. Butleworth & Co., 1968.
- Bang M. Kim. Process for Acid Recovery from Waste Water. United States Patent: 4306946, 1986.
- Brazier K. Beecher. Method of Recovering Hydrochloric Acid from Spent Hydrochloric Acid Pickle Waste. United State Patent: 4222997, 1979.
- Brazier K. Beecher. Method Preparing Hydrochloric Acid and High Purity Ferrous Sulfate Hydrate Crystals from Hydrochloric Acid Waste Pickle Liquor. United State Patent: 4382916, 1981.
- Boeteng Daniel A. D. Membrane Process for Acid Recovery. Comin Co Ltd. Delphion: US5064538, 1991.
- Calman Calvin and Gold Haris. Ion Exchange for Pollution Control, CRCP Press, 1979.
- Corbitt R. A. Standard Handbook of Environmental Engineering. McGraw-Hill, 1989.
- Doi Eiichi; Funai Mitsuharu. Treatment of Waste Hydrochloric Acid and Treatment Device. Nisshin Steel Co Ltd. Delphion: JP5033173A2, 1993.
- E. Maranon, F. Suarez, F. Alonso, Y. Fernandez, and H. Sastre. Preliminary Study of Iron Removal from Hydrochloric Pickling Liquor by Ion Exchange. Industrial and Engineering Chemical Research 1999, Vol. 38: 2782 – 2786.
- E. Maranon, Y. Fernandez, F. J. Suarez, F. J. Alonso, and H. Sastre. Treatment of Acid Pickling Baths by Means of Anionic Resins. Industrial and Engineering Chemical Research 2000, Vol. 39: 3370 – 3376.
- Frikkie L. D. Cloete and Arno P. Marais. Recovery of Very Dilute Acetic Acid Using Ion Exchange. Industrial and Engineering Chemical Research. 1995, Vol. 34: 2464 – 2467.
- Grulke deceased; Carl A. Process for Recovering HCl and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> from Pickle Liquor. Union Carbide Corporation. Delphion: US3928529, 1975.
- Ito Yukio; Toki Yoji. Method for Pickling Metal. Daido Steel Co Ltd. Delphion: JP3028386A2, 1991.
- James M. Douglas. Conceptual design of chemical processes. McGraw-Hill, 1998.
- J. Michael Robinson, Paul T. Herndon, Preston L. Holland, and Laura D. Marrufo. Regeneration and Recovery of Hydriodic Acid after Reduction of Polyols to Fuels. Organic Process Research & Development 1999, 3: 352 – 356.

- Joseph C. Peterson. Process and Apparatus for the Low Temperature Recovery of Ferrous Chloride from Spent Hydrochloric Acid Pickle Liquors. United State Patent: 5057290, 1991.
- Kashiwabara Kazuhito. Method for Recovering Spent Hydrochloric Acid. Sumitomo Metal IND Ltd. Delphion: JP3012305A2, 1991.
- Kuroda Noriko; Kohanawa Osamu; Nishihara Yukio. Processor for Used Ion Exchange Resin. Mitsubishi Heavy IND Ltd. Delphion: JP6300895A2, 1994.
- Lang H.J. Chemical Engineer, Simplified approach to preliminary cost Estimates. (n.p.), 1948.
- Lee G, Carlson. Ion Exchange Treatment for Removing Toxic Metals and Cyanide Values from Waste Waters. United States Patent: 4321145, 1980.
- M. Regel, A.M. Sastre, and J. Szymanowski. Recovery of Zinc (II) from HCl Spent Pickling Solution by Solvent Extraction. Environmental Science & Technology Vol. 35, No. 3, 2001: 630 - 635.
- Ma, Y. H., ed. Advances in Adsorption and Ion Exchange, American Institute Chemical Engineering. N.Y., 1982.
- Mantell, C. L. Chemical Engineering Series (Adsorption). Second Edition. McGraw-Hill, 1951.
- Marshall, S.T. Treatment of spent hydrochloric acid pickling liquor for recovery of hydrochloric acid. Pollutant Removal Handbook. United States, 1973.
- Melzer Stephen F. Treatment of Acid Waste Waters to Produce Ferromagnetic Sludges. Armco Steel Corporation. Delphion; US3927173, 1974.
- Merl J. Bell. Ion Exchange Resin Regeneration Apparatus. United State Patent: 5451309, 1995.
- Michael John Hollitt. Regeneration of Hydrochloric Acid. United State Patent: 5846, 1997.
- Morimoto Yasuo. Regeneration of Hydrochloric Acid Pickling Waste by H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Addition, Distillation and FeSO<sub>4</sub> Precipitation. Daido Chemical Engineering Corporation. Delphion: US3635664, 1972.
- Naganuma Tsutomu, Iwamoto Junjiro, Okuya Tamao, Tanaka Hisanori. Acid Recovering Process. Asahi Glass Co Ltd. Delphion: JP9047638A2, 1997.
- Norman B. Hjersted. Process for the Reclamation Pickling Liquor Acid from Spent Pickle Liquor. Delphion: 4197139, 1978.
- Oswald, E. Identification and Evaluation of Technical Measures for Minimization and Treatment of Wastewin the Metal Pickling Industry. IP Institut Fur Projektplanung GMGH on behalf of the Deutsche Gessellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmmmbH, 1996.
- Robert B. Abolt. Separation of Metal Ions on an Anion Exchange Resin by Chromatographic Elution. PACT, Incorporated. Delphion: 5372717, 1993.



Walpole Ernest A. Acid Regeneration. Austpac Gold N. L. Delphion: US5635152, 1994.

William G. Kozak, Hatfield, Pa. Method for Recovery of Acids. Henkel Corporation, Plymouth.  
Delphion: 5434301, 1993.

Zane L. Burke. Recovery of Spent Pickle Liquor and Iron Metal. United State Patent: 4149946, 1979.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**ภาคผนวก ก.**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

## ข้อมูลการสำรวจโรงงาน

ตารางที่ ก.1 แสดงปริมาณการใช้ลวดเหล็กและกรดไฮโดรคลอริก

บริษัท	นน.ของเหล็ก (ตัน/ปี)	35% HCl (ตัน/ปี)	กก. 35% HCl ตันของเหล็ก
บริษัท แผ่นเหล็กวิลาสไทย จำกัด	150,000 tin plated	192	1.28
	120,000 chromated	156 98% $H_2SO_4$	1.3
บริษัท สังกะสีไทย จำกัด	23,000	80	3.48
บริษัท ไทยแลนด์ไอออนเวียร์ จำกัด	60,000	72	1.2
บริษัท ไทยสะเปเซียลไวร์ จำกัด	90,000	420	4.7
บริษัท กรุงเทพสลักภัณฑ์ จำกัด	24,000	1200	50.0
บริษัท ปิตัสตีล จำกัด	7,200	204	28.3
บริษัท สยามสตีลไพพ์ จำกัด	36,000	960	26.7
บริษัท ไทยไวร์โปรดัก จำกัด	12,000	48	4
รวม	552,000	3175t 35%HCl	

ตารางที่ ก.2 แสดงสถานะของ Pickling solution

บริษัท	สารละลายกรดที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน				สารละลายกรดที่ผ่านการใช้งานแล้ว			
	HCl g/l	Fe <sup>2+</sup> g/l	อุณหภูมิ °C	เวลาที่ใช้	HCl g/l	Fe <sup>2+</sup> g/l	อุณหภูมิ °C	เวลาที่ใช้
บริษัท แผ่นเหล็กวิลาสไทย จำกัด	25	7.5	50	5 sec	n.a.	n.a.	50	5 sec
บริษัท สังกะสีไทย จำกัด	30	n.a.	50	2 sec	n.a.	n.a.	50	2 sec
บริษัท ไทยแลนด์ไอออนเวียร์ จำกัด	70	n.a.	60	n.a.	n.a.	n.a.	60	n.a.
บริษัท ไทยสะเปเซียลไวร์ จำกัด	143	n.a.	60	25 min	50	83.3	60	25 min
บริษัท กรุงเทพสลักภัณฑ์ จำกัด	175	<1	30	30 min	50	n.a.	30	50 min
บริษัท ปิติสตีล จำกัด	90	<1	30	20 min	30	n.a.	30	40 min
บริษัท สยามสตีลไพพ์ จำกัด	200	<1	30	15 min	80	n.a.	30	30 min
บริษัท ไทยไวร์โปรดัก จำกัด	200	<1	30	15 min	40	n.a.	30	40 min

ตารางที่ ก.3 แสดงปริมาณการสูญเสียกรดไฮโดรคลอริก

บริษัท	35%HCl ที่เติม ตัน/เดือน (1)	HCl เริ่มต้น กรัม/ลิตร (2)	ปริมาตร Pickling ลบ./เดือน (3)	HCl ที่ใช้งานแล้ว กรัม/ลิตร (4)	การสูญเสีย 100%HCl กก./เดือน (5)	การสูญเสีย 35%HCl ตัน/เดือน (6)	การสูญเสียกรดอิสระ % (7)
บริษัท แผ่นเหล็กวิลาสไทย จำกัด	16	25	224	15	3360	10	62.5
บริษัท สังกะสีไทย จำกัด	6.7	30	78	20	1560	4.5	67.2
บริษัท ไทยแลนด์ไอออน เวิร์ค จำกัด	6	70	30	50	1500	4.3	71.1
บริษัท ไทยสะเปเซียลไวร์ จำกัด	35	190	64	50	3200	9	25.7
บริษัท กรุงเทพสลักภัณฑ์ จำกัด	100	175	200	50	10000	29	29.0
บริษัท ปิติสตีล จำกัด	17	90	66	30	1980	6	35.3
บริษัท สยามสตีลไพพ์ จำกัด	80	200	140	80	11200	32	40.0
บริษัท ไทยไวร์โปรดัก จำกัด	4	200	7	40	280	0.8	20.0

หมายเหตุ	1) ปริมาตร Pickling เริ่มต้น	=	$\frac{(1)*350}{(2)}$
	2) การสูญเสีย 100%HCl	=	$(3)*(4)$
	3) การสูญเสีย 35%HCl	=	$\frac{(5)}{350}$
	4) การสูญเสียกรดอิสระ	=	$\frac{(6)*100}{(1)}$

ซึ่ง  $350 = [350 \text{ กก.ของ } 100\% \text{HCl}] / [1\text{ตันของ } 35\% \text{HCl}]$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ข.

## มาตรฐานน้ำทิ้งและอากาศทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม

## 1. มาตรฐานน้ำทิ้งของประเทศไทย มีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 14 มิถุนายน 2539

- (1) ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0
- (2) ทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่าดังนี้
- 2.1 ค่าทีดีเอส ไม่มากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดแต่ต้องไม่มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 2.2 น้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีค่าความเค็ม (Salinity) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (3) สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร
- (4) โลหะหนักมีค่าดังนี้
- |                           |                                   |
|---------------------------|-----------------------------------|
| 4.1 ปรอท (Mercury)        | ไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| 4.2 ซีเลเนียม (Selenium)  | ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร  |
| 4.3 แคดเมียม (Cadmium)    | ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร  |
| 4.4 ตะกั่ว (Lead)         | ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร   |
| 4.5 อาร์เซนิก (Arsenic)   | ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร  |
| 4.6 โครเมียม (Chromium)   |                                   |
| 4.6.1 Hexavalent Chromium | ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร  |
| 4.6.2 Trivalent Chromium  | ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร  |
| 4.7 บาเรียม (Barium)      | ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร   |
| 4.8 นิกเกิล (Nickel)      | ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร   |
| 4.9 ทองแดง (Copper)       | ไม่มากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร   |
| 4.10 สังกะสี (Zinc)       | ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร   |
| 4.11 แมงกานีส (Manganese) | ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร   |
- (5) ซัลไฟด์ (Sulphide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(6) ไซยาไนด์ (Cyanide)	คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
(7) ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
(8) สารประกอบฟีนอล (Phenols Compound)	ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
(9) คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
(10) เพลดีไฮด์	0 (ไม่มีเลย)
(11) อุณหภูมิ	ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส
(12) ลี	ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
(13) กลิ่น	ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
(14) (Oil & Grease)	ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร
(15)* ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand)	ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เวลา 5 วัน ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร
(16)** ค่าที่เคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

(17)\*\*\* ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)

ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

**หมายเหตุ :** \* อุตสาหกรรม 10 ประเภทซึ่งเป็นที่ยอมรับจาก PCC ในการปล่อยน้ำเสียที่มีค่า BOD ไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้แก่

- |                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1) อุตสาหกรรมอาหารสัตว์        | 2) อุตสาหกรรมทำแป้ง               |
| 3) อุตสาหกรรมอาหารที่ทำจากแป้ง | 4) อุตสาหกรรมกระดาษและเยื่อกระดาษ |
| 5) อุตสาหกรรมฟอกหนัง           | 6) อุตสาหกรรมห้องเย็น             |
| 7) อุตสาหกรรมผลิตสารเคมี       | 8) อุตสาหกรรมสิ่งทอ               |
| 9) อุตสาหกรรมผลิตยา            | 10) อุตสาหกรรมของใช้ในบ้าน        |

\*\* มีผลบังคับใช้หลังจาก 1 ปี ของการประกาศใช้สำหรับอุตสาหกรรมอื่น ยกเว้นหลังการประกาศ 2 ปี สำหรับอุตสาหกรรมอาหารสำเร็จรูปและอาหารสัตว์สำเร็จรูป

\*\*\* 5 ประเภทของที่ได้รับการพิจารณาและยอมรับโดย PCC ในการระบายน้ำเสียที่มีค่า COD ไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้แก่

- 1) อุตสาหกรรมกระดาษและเยื่อกระดาษ
- 2) อุตสาหกรรมสิ่งทอ
- 3) อุตสาหกรรมฟอกหนัง
- 4) อุตสาหกรรมอาหารสำเร็จรูป
- 5) อุตสาหกรรมอาหารสัตว์สำเร็จรูป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2. มาตรฐานสารเจือปนในอากาศ

ลำดับ	ชนิดของสารเจือปน	แหล่งที่มา	ปริมาณสารเจือปนในอากาศ
(1)	ฝุ่นละออง	หม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงดังนี้ - น้ำมันเตา - ถ่านหิน - เชื้อเพลิงอื่นๆ การถลุง หล่อหลอม รีดตีง สำหรับการผลิตเหล็กกล้า และอลูมิเนียม การผลิตทั่วไป	300 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร 400 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร 400 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร 300 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร 400 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร
(2)	พลวง	การผลิตทั่วไป	20 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร
(3)	สารหนู	การผลิตทั่วไป	20 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร
(4)	ทองแดง	การหลอมหรือการถลุง	30 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร
(5)	ตะกั่ว	การผลิตทั่วไป	30 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร
(6)	คลอรีน	การผลิตทั่วไป	30 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร
(7)	ไฮโดรเจนคลอไรด์	การผลิตทั่วไป	200 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร
(8)	ปรอท	การผลิตทั่วไป	3 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร
(9)	คาร์บอนมอนนอกไซด์	การผลิตทั่วไป	1,000 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร หรือ 870 ส่วนในล้านส่วน
(10)	กรดกำมะถัน	การผลิตทั่วไป	100 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร หรือ 25 ส่วนในล้านส่วน
(11)	ไฮโดรเจนซัลไฟด์	การผลิตทั่วไป	140 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร หรือ 100 ส่วนในล้านส่วน
(12)	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	การผลิตกรดซัลฟูริก	1,300 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร หรือ 500 ส่วนในล้านส่วน
(13)	ออกไซด์ของไนโตรเจน (เช่น ไนโตรเจนไดออกไซด์)	หม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงดังนี้ - ถ่านหิน - เชื้อเพลิงอื่นๆ	940 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร หรือ 500 ส่วนในล้านส่วน 470 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร หรือ 250 ส่วนในล้านส่วน
(14)	โซลีน	การผลิตทั่วไป	870 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร หรือ 200 ส่วนในล้านส่วน

ลำดับ	ชนิดของสารเจือปน	แหล่งที่มา	ปริมาณสารเจือปนในอากาศ
(15)	ครีซอล	การผลิตทั่วไป	22 มิลลิกรัม/ลบ.เมตร
(16)	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	น้ำมันเตา	หรือ 5 ส่วนในล้านส่วน 1,250 ส่วนในล้านส่วน

- แหล่งข้อมูล:** 1-14: ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 พ.ศ. 2536 ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 พิมพ์ใน the Royal Government Gazette, vol.109, Part 108, วันที่ 19 ตุลาคม พ.ศ. 2536
- 15: ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 9 พ.ศ. 2538 ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 วันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2538
- 16: ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 3 พ.ศ. 2539 สำหรับโรงงานในเขตกรุงเทพและสมุทรปราการ วันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2539

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค.

## คุณสมบัติของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

## C-100

เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดแก่ (Strong Acid Cation Exchange Resin)

ตาราง ค.1 แสดงคุณสมบัติของเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดแก่ (C - 100)

Properties	
Polymer Matrix Structure	Cross-linked Polystyrene Divinylbenzene
Physical Form and Appearance	Clear spherical beads
Whole Bead Count	90% min.
Functional Groups	R-SO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Ionic Form, as shipped	Na <sup>+</sup>
Shipping Weight (approx.)	850 g/l (53 lb/ft <sup>3</sup> )
Screen Size Range:	
-British Standard Screen	14-52 mesh, wet
-U.S. Standard Screen	16-50 mesh, wet
Particle Size Range	+1.2 mm <5%, -0.3 mm <1%
Moisture Retention, Na <sup>+</sup> form	44 - 48%
Swelling Na <sup>+</sup> → H <sup>+</sup>	5% max.
Ca <sup>++</sup> → Na <sup>+</sup>	5% max.
Specific Gravity, moist Na <sup>+</sup> Form	1.29
Total Exchange Capacity, Na <sup>+</sup> Form,	
Wet, volumetric	2.0 eq/l min.
Dry, weight	4.5 eq/kg min.
Operating Temperature, Na <sup>+</sup> Form	150°C (300°F) max.
pH Range, Stability	0 - 4
pH Range Operating, Na <sup>+</sup> cycle	6 - 10

ตาราง ค.2 แสดงข้อมูลการทำงานของเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดแก่ (C - 100)

Operating Performance				
Operation	Rate	Solution	Minutes	Amount
Service	8 - 40 BV/h 1.0 - 5.0 gpm/ft <sup>3</sup>	Influent water	- per design	- per design
Backwash	7 - 10 m/h 3.0 - 5.0 gpm/ft <sup>3</sup>	Influent water 5° - 30°C (40° - 80°F)	5 - 20	1.5 - 4 BV 10 - 20 gal/ft <sup>3</sup>
Regeneration	2 - 7 BV/h 0.25 - 0.90 gpm/ft <sup>3</sup>	8 - 20% NaCl	15 - 60	60 - 320 g/l 4 - 10 lb/ft <sup>3</sup>
Rinse, (slow)	2 - 7 BV/h 0.25 - 0.90 gpm/ft <sup>3</sup>	Influent water	30 approx.	2 - 4 BV 15 - 30 gal/ft <sup>3</sup>
Rinse, (fast)	8 - 40 BV/h 1.0 - 5.0 gpm/ft <sup>3</sup>	Influent water	30 approx.	3 - 10 BV 24-45 gal/ft <sup>3</sup>
Backwash Expansion 50% to 75% Design Rising Space 100% "Gallons" refer to U.S. Gallon = 3.785 litres				



**A-400**

เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบต่างแก้ว (Strong-Base Anion Exchange Resin)

ตาราง ค.3 แสดงคุณสมบัติของเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบต่างแก้ว (A - 400)

Properties	
Polymer Matrix Structure	Polystyrene Cross-linked Divinylbenzene
Physical Form and Appearance	Clear goldenspherical beads
Whole Bead Count	90% min.
Functional Groups	Type I Quaternary Ammonium
Ionic Form, as shipped	Cl <sup>-</sup>
Shipping Weight (approx.)	680 695 g/l (42.5 - 43.5 lb/ft <sup>3</sup> )
Screen Size Range: -U.S. Standard Screen	16-50 mesh,wet
Particle Size Range	+1.2 mm <2%, -0.3 mm <1%
Moisture Retention, Cl <sup>-</sup> form	48 - 54%
Reversible Swelling Cl <sup>-</sup> → Oh <sup>-</sup>	20% max.
Specific Gravity, moist Cl <sup>-</sup> Form	1.08
Total Exchange Capacity, Cl <sup>-</sup> Form, Wet, volumetric Dry, weight	1.3 eq/l min. 3.7 eq/kg min.
Operating Temperature, Cl <sup>-</sup> Form	100°C (212°F) max.
Operating Temperature, OH <sup>-</sup> Form	60°C (140°F) max.
pH Range, Stability, OH <sup>-</sup> Form	0 - 13
pH Range, Stability, OH <sup>-</sup> Form	0 - 8

ตาราง ค.4 แสดงข้อมูลการทำงานของเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบต่างแก้ว (A - 400)

Standard Operating Performance (Two-stage Demineralization, Co-flow Regeneration)				
Operation	Rate	Solution	Minutes	Amount
Service	8 - 40 BV/h 1.0 - 5.0 gpm/ft <sup>3</sup>	Decationized water	- per design	- per design
Backwash	5 - 7.5 m/h 2.0 - 3.0 gpm/ft <sup>3</sup>	Decationized water 5° - 30°C (40° - 80°F)	5 - 20	1.5 - 3 BV 10 - 25 gal/ft <sup>3</sup>
Regeneration	2 - 4 BV/h 0.25 - 0.50 gpm/ft <sup>3</sup>	4 - 6% NaCl	30 - 60	64 - 160 g/l 4 - 10 lb/ft <sup>3</sup>
Rinse, (slow)	2 - 7 BV/h 0.25 - 0.50 gpm/ft <sup>3</sup>	Decationized water	30 approx.	2 - 4 BV 15 - 30 gal/ft <sup>3</sup>
Rinse, (fast)	8 - 40 BV/h 1.0 - 5.0 gpm/ft <sup>3</sup>	Decationized water	20 approx.	3 - 6 BV 25-45 gal/ft <sup>3</sup>
Backwash Expansion 50% to 75% Design Rising Space 100% "Gallons" refer to U.S. Gallon = 3.785 litres				

หมายเหตุ เรซินทั้ง 2 ชนิดนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เบรินเมเยอร์ จำกัด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**ภาคผนวก ง.**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง.

### แสดงผลการทดลอง

จากการทดลองได้แบ่งเป็น 5 ส่วนคือ

- การทดลองหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่เหมาะสมในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก
- การทดลองหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่เหมาะสมในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ
- การทดลองหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมในการรีเจเนอเรตเรซินในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก
- การทดลองหาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมในการรีเจเนอเรตเรซินในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก
- การทดลองหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของน้ำที่เหมาะสมในการรีเจเนอเรตเรซินในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.1 ผลการทดลองหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยใช้อัตราการไหล 3 ช่วงคือ 2.75, 4.6 และ 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง (ที่อัตราการไหล 0.86, 1.43 และ 2.34 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยมีปริมาตรเรซิน 0.4 ลิตร) มีผลการทดลองดังนี้

ง.1.1 กรดเสี้ยวตัวอย่าง 1 มีปริมาณเหล็ก 1.2 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 56 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.1 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสี้ยวตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
60.00	6.88	0.00	0.00	2.75	0.00	0.00
75.00	8.59	30.00	0.03	3.44	20.63	20.63
90.00	10.31	85.00	0.07	4.13	58.44	79.06
105.00	12.03	247.00	0.21	4.81	169.81	248.88
120.00	13.75	515.00	0.43	5.50	354.06	602.94
135.00	15.47	742.00	0.63	6.19	510.13	1113.06
150.00	17.19	953.00	0.80	6.88	655.19	1768.25
165.00	18.91	1114.00	0.94	7.56	765.88	2534.13
180.00	20.63	1186.00	1.00	8.25	815.38	3349.50

สรุปผลได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	451.69	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	9.78	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	3.35	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	65.77	%

ง.1.2 กรดเสียตัวอย่าง 1 มีปริมาณเหล็ก 1.2 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 56 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.2 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	0.96	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00
10.00	1.92	0.00	0.00	0.77	0.00	0.00
15.00	2.88	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00
20.00	3.83	0.00	0.00	1.53	0.00	0.00
25.00	4.79	0.00	0.00	1.92	0.00	0.00
30.00	5.75	37.00	0.03	2.30	14.18	14.18
35.00	6.71	97.00	0.08	2.68	37.18	51.37
40.00	7.67	205.00	0.17	3.07	78.58	129.95
45.00	8.63	377.00	0.32	3.45	144.52	274.47
50.00	9.58	551.00	0.46	3.83	211.22	485.68
55.00	10.54	656.00	0.55	4.22	251.47	737.15
60.00	11.50	741.00	0.62	4.60	284.05	1021.20
75.00	14.38	1075.00	0.91	5.75	1236.25	2257.45
90.00	17.25	1186.00	1.00	6.90	1363.90	3621.35

สรุปได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	451.69	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	9.78	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	3.35	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	65.77	%

ง.1.3 กรดเสียตัวอย่าง 1 มีปริมาณเหล็ก 1.2 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 56 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.3 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง

time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	1.56	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00
10.00	3.13	45.00	0.04	1.25	28.13	28.13
15.00	4.69	184.00	0.16	1.88	115.00	143.13
20.00	6.25	505.00	0.43	2.50	315.63	458.75
25.00	7.81	732.00	0.62	3.13	457.50	916.25
30.00	9.38	904.00	0.76	3.75	565.00	1481.25
35.00	10.94	1056.00	0.89	4.38	660.00	2141.25
40.00	12.50	1156.00	0.97	5.00	722.50	2863.75
45.00	14.06	1186.00	1.00	5.63	741.25	3605.00

สรุปได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	307.97	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	6.67	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	3.61	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	45.96	%

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.1.4 กรดเสียตัวอย่าง 2 มีปริมาณเหล็ก 2 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 75 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.4 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสียตัวอย่าง 2 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง

time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	0.57	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00
10.00	1.15	0.00	0.00	0.46	0.00	0.00
15.00	1.72	0.00	0.00	0.69	0.00	0.00
20.00	2.29	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00
25.00	2.86	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00
30.00	3.44	0.00	0.00	1.38	0.00	0.00
35.00	4.01	0.00	0.00	1.60	0.00	0.00
40.00	4.58	0.00	0.00	1.83	0.00	0.00
45.00	5.16	0.00	0.00	2.06	0.00	0.00
60.00	6.88	0.00	0.00	2.75	0.00	0.00
75.00	8.59	141.00	0.07	3.44	96.94	96.94
90.00	10.31	534.00	0.26	4.13	367.13	464.06
105.00	12.03	1042.00	0.51	4.81	716.38	1180.44
120.00	13.75	1444.00	0.71	5.50	992.75	2173.19
135.00	15.47	1662.00	0.81	6.19	1142.63	3315.81
150.00	17.19	1907.00	0.93	6.88	1311.06	4626.88
165.00	18.91	2016.00	1.00	7.56	1386.00	6012.88

สรุปได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	552.06	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	15.43	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	6.01	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	61.02	%



ง.1.5 กรดเสียตัวอย่าง 2 มีปริมาณเหล็ก 2 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 75 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.5 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสียตัวอย่าง 2 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง

time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	0.96	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00
10.00	1.92	0.00	0.00	0.77	0.00	0.00
15.00	2.88	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00
20.00	3.83	0.00	0.00	1.53	0.00	0.00
25.00	4.79	105.00	0.05	1.92	40.25	40.25
30.00	5.75	308.00	0.15	2.30	118.07	158.32
35.00	6.71	547.00	0.27	2.68	209.68	368.00
40.00	7.67	933.00	0.46	3.07	357.65	725.65
45.00	8.63	1254.00	0.61	3.45	480.70	1206.35
60.00	11.50	1752.00	0.86	4.60	2014.80	3221.15
75.00	14.38	2040.00	1.00	5.75	2346.00	5567.15

สรุปได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	419.75	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	11.73	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	5.57	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	52.54	%

สถาบัน  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.1.6 กรดเสียตัวอย่าง 2 มีปริมาณเหล็ก 2 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 75 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.6 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสียตัวอย่าง 2 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง

time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	1.56	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00
10.00	3.13	150.00	0.07	1.25	93.75	93.75
15.00	4.69	854.00	0.42	1.88	533.75	627.50
20.00	6.25	1456.00	0.71	2.50	910.00	1537.50
25.00	7.81	1762.00	0.86	3.13	1101.25	2638.75
30.00	9.38	1940.00	0.95	3.75	1212.50	3851.25
35.00	10.94	2040.00	1.00	4.38	1275.00	5126.25

สรุปได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	319.38	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	8.93	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	5.13	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	42.56	%

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.1.7 กรดเสียตัวอย่าง 3 มีปริมาณเหล็ก 3.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 92 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.7 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสียตัวอย่าง 3 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	0.57	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00
10.00	1.15	0.00	0.00	0.46	0.00	0.00
15.00	1.72	0.00	0.00	0.69	0.00	0.00
20.00	2.29	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00
25.00	2.86	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00
30.00	3.44	0.00	0.00	1.38	0.00	0.00
35.00	4.01	0.00	0.00	1.60	0.00	0.00
40.00	4.58	0.00	0.00	1.83	0.00	0.00
45.00	5.16	0.00	0.00	2.06	0.00	0.00
60.00	6.88	154.00	0.04	2.75	105.88	105.88
75.00	8.59	712.00	0.20	3.44	489.50	595.38
90.00	10.31	1454.00	0.41	4.13	999.63	1595.00
105.00	12.03	2159.00	0.61	4.81	1484.31	3079.31
120.00	13.75	2714.00	0.77	5.50	1865.88	4945.19
135.00	15.47	3091.00	0.88	6.19	2125.06	7070.25
150.00	17.19	3316.00	0.94	6.88	2279.75	9350.00
165.00	18.91	3516.00	1.00	7.56	2417.25	11767.25

สรุปได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	690.08	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	26.59	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	11.77	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	55.75	%

ง.1.8 กรดเสียตัวอย่าง 3 มีปริมาณเหล็ก 3.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 92 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.8 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสียตัวอย่าง 3 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง

time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	0.96	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00
10.00	1.92	0.00	0.00	0.77	0.00	0.00
15.00	2.88	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00
20.00	3.83	125.00	0.04	1.53	47.92	47.92
25.00	4.79	468.00	0.13	1.92	179.40	227.32
30.00	5.75	847.00	0.24	2.30	324.68	552.00
35.00	6.71	1406.00	0.40	2.68	538.97	1090.97
40.00	7.67	2074.00	0.59	3.07	795.03	1886.00
45.00	8.63	2478.00	0.70	3.45	949.90	2835.90
60.00	11.50	3287.00	0.93	4.60	3780.05	6615.95
75.00	14.38	3516.00	1.00	5.75	4043.40	10659.35

สรุปได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	524.69	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	20.22	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	10.66	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	47.28	%

ง.1.9 กรดเสียตัวอย่าง 3 มีปริมาณเหล็ก 3.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 92 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.9 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสียตัวอย่าง 3 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง

time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	1.56	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00
10.00	3.13	512.00	0.15	1.25	320.00	320.00
15.00	4.69	1940.00	0.55	1.88	1212.50	1532.50
20.00	6.25	3145.00	0.89	2.50	1965.63	3498.13
25.00	7.81	3516.00	1.00	3.13	2197.50	5695.63

สรุปได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	342.19	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	10.99	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	5.70	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	48.16	%

หมายเหตุ

BV คือ ปริมาตรของกรดเสียที่บำบัดได้ที่เวลาต่างๆ เทียบกับปริมาตรของเรซิน คำนวณจากอัตราการไหลคูณเวลาแล้วหารด้วยปริมาตรของเรซิน

Fe (ppm) คือ ความเข้มข้นของเหล็กที่ทางออกจากกระบวนการ

C / Co คือ ความเข้มข้นของเหล็กที่ทางออกต่อความเข้มข้นของเหล็กที่ทางเข้า

V คือ ปริมาตรของกรดเสียที่บำบัดที่เวลาต่างๆ

Fe (mg) คือ ปริมาณของเหล็กที่ออกมาที่เวลาต่างๆ

Sum Fe (mg) คือ ปริมาณของเหล็กที่สะสมในถังเก็บที่เวลาต่างๆ

ง.2 ผลการศึกษาหาอัตราการใช้ไฟที่เหมาะสมในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ โดยใช้อัตราการใช้ไฟ 3 ช่วงคือ 2.75, 4.6 และ 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง (ที่อัตราการใช้ไฟ 0.86, 1.43 และ 2.34 แกลลอนต่อนาที่ต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยมีปริมาตรเรซิน 0.4 ลิตร) มีผลการทดลองดังนี้

ง.2.1 การดลี่ยตัวอย่าง 1 มีปริมาณเหล็ก 1.3 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 56 กรัมต่อลิตร ใช้ไฟผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการใช้ไฟ 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.10 แสดงข้อมูลการทดลองของการดลี่ยตัวอย่าง 1 ใช้ไฟผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการใช้ไฟ 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	1.15	0.00	0.00	0.46	0.00	0.00
20.00	2.29	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00
30.00	3.44	82.00	0.06	1.38	37.58	37.58
40.00	4.58	154.00	0.12	1.83	70.58	108.17
50.00	5.73	247.00	0.19	2.29	113.21	221.37
60.00	6.88	366.00	0.28	2.75	167.75	389.12
70.00	8.02	478.00	0.36	3.21	219.08	608.21
80.00	9.17	584.00	0.44	3.67	267.67	875.87
90.00	10.31	704.00	0.54	4.13	322.67	1198.54
100.00	11.46	845.00	0.64	4.58	387.29	1585.83
110.00	12.60	987.00	0.75	5.04	452.37	2038.21
120.00	13.75	1058.00	0.81	5.50	484.92	2523.12
130.00	14.90	1145.00	0.87	5.96	524.79	3047.91
140.00	16.04	1207.00	0.92	6.42	553.21	3601.12
150.00	17.19	1264.00	0.96	6.88	579.33	4180.46
160.00	18.33	1297.00	0.99	7.33	594.46	4774.91
170.00	19.48	1314.00	1.00	7.79	602.25	5377.16

สรุปผลได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	426.59	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	10.24	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	5.38	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	47.48	%

ง.2.2 กรดเสี้ยวตัวอย่าง 1 มีปริมาณเหล็ก 1.3 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 56 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.11 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสี้ยวตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	1.92	52.00	0.04	0.77	39.87	39.87
20.00	3.83	228.00	0.17	1.53	174.80	214.67
30.00	5.75	406.00	0.31	2.30	311.27	525.93
40.00	7.67	587.00	0.45	3.07	450.03	975.97
50.00	9.58	767.00	0.58	3.83	588.03	1564.00
60.00	11.50	972.00	0.74	4.60	745.20	2309.20
70.00	13.42	1158.00	0.88	5.37	887.80	3197.00
80.00	15.33	1262.00	0.96	6.13	967.53	4164.54
90.00	17.25	1314.00	1.00	6.90	1007.40	5171.94

สรุปผลได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	377.78	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	9.07	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	5.17	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	42.96	%

ง.2.3 กรดเสียตัวอย่าง 1 มีปริมาณเหล็ก 1.3 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 56 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.12 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	3.13	254.00	0.19	1.25	317.50	317.50
20.00	6.25	587.00	0.45	2.50	733.75	1051.25
30.00	9.38	854.00	0.65	3.75	1067.50	2118.75
40.00	12.50	1052.00	0.80	5.00	1315.00	3433.75
50.00	15.63	1267.00	0.96	6.25	1583.75	5017.50
60.00	18.75	1314.00	1.00	7.50	1642.50	6660.00

สรุปผลได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	410.63	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	9.86	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	6.66	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	32.42	%

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ง.2.4 กรดเสียตัวอย่าง 2 มีปริมาณเหล็ก 2.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 71 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.13 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสียตัวอย่าง 2 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	1.15	0.00	0.00	0.46	0.00	0.00
20.00	2.29	84.00	0.03	0.92	38.50	38.50
30.00	3.44	245.00	0.10	1.38	112.29	150.79
40.00	4.58	521.00	0.20	1.83	238.79	389.58
50.00	5.73	734.00	0.29	2.29	336.42	726.00
60.00	6.88	1045.00	0.41	2.75	478.96	1204.96
70.00	8.02	1287.00	0.51	3.21	589.87	1794.83
80.00	9.17	1577.00	0.62	3.67	722.79	2517.62
90.00	10.31	1864.00	0.73	4.13	854.33	3371.96
100.00	11.46	2124.00	0.83	4.58	973.50	4345.46
110.00	12.60	2254.00	0.88	5.04	1033.08	5378.54
120.00	13.75	2386.00	0.94	5.50	1093.58	6472.12
130.00	14.90	2457.00	0.96	5.96	1126.12	7598.24
140.00	16.04	2548.00	1.00	6.42	1167.83	8766.08

สรุปผลได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	468.42	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	16.35	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	8.77	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	46.38	%

ง.2.5 กรดเสี้ยวตัวอย่าง 2 มีปริมาณเหล็ก 2.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 71 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.14 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสี้ยวตัวอย่าง 2 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	1.92	156.00	0.06	0.77	119.60	119.60
20.00	3.83	545.00	0.21	1.53	417.83	537.43
30.00	5.75	1035.00	0.41	2.30	793.50	1330.93
40.00	7.67	1441.00	0.57	3.07	1104.77	2435.70
50.00	9.58	1957.00	0.77	3.83	1500.37	3936.07
60.00	11.50	2258.00	0.89	4.60	1731.13	5667.20
70.00	13.42	2464.00	0.97	5.37	1889.07	7556.27
80.00	15.33	2548.00	1.00	6.13	1953.47	9509.74

สรุปผลได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	447.73	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	15.63	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	9.51	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	39.15	%

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.2.6 กรดเสียตัวอย่าง 2 มีปริมาณเหล็ก 2.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 71 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.15 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสียตัวอย่าง 2 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	3.13	547.00	0.21	1.25	683.75	683.75
20.00	6.25	1345.00	0.53	2.50	1681.25	2365.00
30.00	9.38	2174.00	0.85	3.75	2717.50	5082.50
40.00	12.50	2457.00	0.96	5.00	3071.25	8153.75
50.00	15.63	2548.00	1.00	6.25	3185.00	11338.75

สรุปผลได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	456.25	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	15.93	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	11.34	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	28.80	%

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.2.7 กรดเสี้ยวตัวอย่าง 3 มีปริมาณเหล็ก 3.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 93 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.16 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสี้ยวตัวอย่าง 3 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 2.75 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	1.15	0.00	0.00	0.46	0.00	0.00
20.00	2.29	245.00	0.07	0.92	112.29	112.29
30.00	3.44	645.00	0.18	1.38	295.62	407.92
40.00	4.58	1178.00	0.33	1.83	539.92	947.83
50.00	5.73	1642.00	0.47	2.29	752.58	1700.42
60.00	6.88	2094.00	0.59	2.75	959.75	2660.16
70.00	8.02	2584.00	0.73	3.21	1184.33	3844.50
80.00	9.17	2878.00	0.82	3.67	1319.08	5163.58
90.00	10.31	3254.00	0.92	4.13	1491.42	6655.00
100.00	11.46	3407.00	0.97	4.58	1561.54	8216.54
110.00	12.60	3528.00	1.00	5.04	1617.00	9833.53

สรุปผลได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	460.05	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	17.79	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	9.83	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	44.72	%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.2.8 กรดเสี้ยวตัวอย่าง 3 มีปริมาณเหล็ก 3.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 93 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.17 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสี้ยวตัวอย่าง 3 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 4.6 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	1.92	324.00	0.09	0.77	248.40	248.40
20.00	3.83	1247.00	0.35	1.53	956.03	1204.43
30.00	5.75	2028.00	0.57	2.30	1554.80	2759.23
40.00	7.67	2887.00	0.82	3.07	2213.37	4972.60
50.00	9.58	3315.00	0.94	3.83	2541.50	7514.10
60.00	11.50	3528.00	1.00	4.60	2704.80	10218.90

สรุปผลได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	419.75	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	16.23	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	10.22	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	37.03	%

ง.2.9 กรดเสี้ยวตัวอย่าง 3 มีปริมาณเหล็ก 3.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 93 กรัมต่อลิตร ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ง.18 แสดงข้อมูลการทดลองของกรดเสี้ยวตัวอย่าง 3 ไหลผ่านเรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ ที่อัตราการไหล 7.5 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (mg)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	3.13	1142.00	0.32	1.25	1427.50	1427.50
20.00	6.25	2545.00	0.72	2.50	3181.25	4608.75
30.00	9.38	3405.00	0.97	3.75	4256.25	8865.00
40.00	12.50	3528.00	1.00	5.00	4410.00	13275.00

สรุปผลได้ดังนี้

ปริมาณกรดที่นำกลับได้	456.25	กรัม
ปริมาณเหล็กที่เข้ามา	17.64	กรัม
ปริมาณเหล็กที่ออกมา	13.28	กรัม
%เหล็กที่ดูดได้	24.74	%

หมายเหตุ

BV คือ ปริมาตรของกรดเสียที่บำบัดได้ที่เวลาต่างๆ เทียบกับปริมาตรของเรซิน คำนวณจากอัตราการไหลคูณเวลาแล้วหารด้วยปริมาตรของเรซิน

Fe (ppm) คือ ความเข้มข้นของเหล็กที่ทางออกจากกระบวนการ

C / Co คือ ความเข้มข้นของเหล็กที่ทางออกต่อความเข้มข้นของเหล็กที่ทางเข้า

V คือ ปริมาตรของกรดเสียที่บำบัดที่เวลาต่างๆ

Fe (mg) คือ ปริมาณของเหล็กที่ออกมาที่เวลาต่างๆ

Sum Fe (mg) คือ ปริมาณของเหล็กที่สะสมในถังเก็บที่เวลาต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.3 ผลการทดลองหาอัตราการไหลของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมในการรีเจเนอเรชันในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยใช้อัตราการไหล 3 ช่วงคือ 1.38, 2.30 และ 3.75 ลิตรต่อชั่วโมง (ที่อัตราการไหล 0.43, 0.72 และ 1.17 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยมีปริมาตรเรซิน 0.4 ลิตร) ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ช้ากว่าการปฏิบัติงานปกติเท่าหนึ่ง และใช้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 54.75 กรัมต่อลิตร (1.5 โมลต่อลิตร) ได้ผลการทดลองดังนี้

ง.3.1 ใช้อัตราการไหล 1.38 ลิตรต่อชั่วโมง มีผลการทดลองดังนี้

ตาราง ง.19 แสดงข้อมูลการทดลองอัตราการไหลในการรีเจเนอเรชันแลกเปลี่ยนประจุบวกที่อัตราการไหล 1.38 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (g)	Fe in tank (ppm)
0	0	0	0	0	0	0
15	0.86	358	0.35	123.5	123.5	358.0
30	1.73	1057	0.69	364.7	488.2	707.5
45	2.59	991	1.04	342.0	830.1	802.0
60	3.45	936	1.38	322.9	1153.0	835.5
75	4.31	820	1.73	282.9	1435.9	832.4
90	5.18	783	2.07	270.1	1706.0	824.2
105	6.04	245	2.42	84.5	1790.6	741.4
120	6.90	70	2.76	24.2	1814.7	657.5
135	7.76	0	3.11	0	1814.7	584.4

สรุปผลได้ดังนี้

ใช้กรดในการรีเจเนอเรต	170.00	กรัม
เหล็กที่ติดออกมา	1814.70	มิลลิกรัม

ง.3.2 ใช้อัตราการไหล 2.3 ลิตรต่อชั่วโมง มีผลการทดลองดังนี้

ตาราง ง.20 แสดงข้อมูลการทดลองอัตราการไหลในการรีเจนเนอเรชันแลกเปลี่ยนประจุบวกที่อัตราการไหล 2.3 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (g)	Fe in tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15.00	1.44	157.00	0.58	90.28	90.28	157.00
30.00	2.88	358.00	1.15	205.85	296.13	257.50
45.00	4.31	484.00	1.73	278.30	574.43	333.00
60.00	5.75	461.00	2.30	265.08	839.50	365.00
75.00	7.19	405.00	2.88	232.88	1072.38	373.00
90.00	8.63	359.00	3.45	206.43	1278.80	370.67
105.00	10.06	302.00	4.03	173.65	1452.45	360.86
120.00	11.50	247.00	4.60	142.03	1594.48	346.63
135.00	12.94	187.00	5.18	107.53	1702.00	328.89
150.00	14.38	137.00	5.75	78.78	1780.78	309.70
165.00	15.81	42.00	6.33	24.15	1804.93	285.36
180.00	17.25	0.00	6.90	0.00	1804.93	261.58

สรุปผลได้ดังนี้

ใช้กรดในการรีเจนเนอเรต	377.78	กรัม
เหล็กที่ติดออกมา	1804.93	มิลลิกรัม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ง.3.3 ใช้อัตราการไหล 3.75 ลิตรต่อชั่วโมง มีผลการทดลองดังนี้

ตาราง ง.21 แสดงข้อมูลการทดลองอัตราการไหลในการรีเจนเนอเรชั่นแลกเปลี่ยนประจุ  
บวกที่อัตราการไหล 3.75 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (g)	Fe in tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15.00	2.34	125.00	0.94	117.19	117.19	125.00
30.00	4.69	244.00	1.88	228.75	345.94	184.50
45.00	7.03	292.00	2.81	273.75	619.69	220.33
60.00	9.38	301.00	3.75	282.19	901.88	240.50
75.00	11.72	267.00	4.69	250.31	1152.19	245.80
90.00	14.06	234.00	5.63	219.38	1371.56	243.83
105.00	16.41	162.00	6.56	151.88	1523.44	232.14
120.00	18.75	118.00	7.50	110.63	1634.06	217.88
135.00	21.09	92.50	8.44	86.72	1720.78	203.94
150.00	23.44	54.00	9.38	50.63	1771.41	188.95
165.00	25.78	31.00	10.31	29.06	1683.28	163.23
180.00	28.13	0.00	11.25	0.00	1454.53	129.29

สรุปผลได้ดังนี้

ใช้กรดในการรีเจนเนอเรต	615.94	กรัม
เหล็กที่ติดออกมา	1454.53	มิลลิกรัม

ง.4 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมในการรีเจเนอเรชันในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมคือ 1.38 ลิตรต่อชั่วโมง และใช้ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก คือ 36.50, 54.75 และ 73 กรัมต่อลิตร (1, 1.5 และ 2 โมลต่อลิตร ตามลำดับ) ได้ผลการทดลองดังนี้

ง.4.1 ใช้ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 36.50 กรัมต่อลิตร มีผลการทดลองดังนี้

ตาราง ง.22 แสดงข้อมูลการทดลองความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในการรีเจเนอเรชันแบบแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 36.50 กรัมต่อลิตร

Time (min)	BV	Fe (ppm)	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (g)	Fe in tank (ppm)
0	0	0	0	0	0	0
15	0.86	145	0.345	50.03	50.03	145.0
30	1.73	267	0.690	92.12	142.14	206.0
45	2.59	627	1.035	216.32	358.46	346.3
60	3.45	772	1.380	266.34	624.80	452.8
75	4.31	718	1.725	247.71	872.51	505.8
90	5.18	602	2.070	207.69	1080.20	521.8
105	6.04	491	2.415	169.40	1249.59	517.4
120	6.90	427	2.760	147.32	1396.91	506.1
135	7.76	321	3.105	110.75	1507.65	485.6
150	8.63	274	3.450	94.53	1602.18	464.4
165	9.49	227	3.795	78.32	1680.50	442.8
180	10.35	203	4.140	70.04	1750.53	422.8
195	11.21	121	4.485	41.75	1792.28	399.6
210	12.08	54	4.830	18.63	1810.91	374.9
225	12.94	0	5.175	0	1760.88	340.3

สรุปผลได้ดังนี้

ใช้กรดในการรีเจเนอเรต	188.89	กรัม
เหล็กที่ติดออกมา	1810.91	มิลลิกรัม

ง.4.2 ใช้ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 54.75 กรัมต่อลิตร มีผลการทดลองดังนี้

ตาราง ง.23 แสดงข้อมูลการทดลองความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในการรีเจเนอเรตเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 54.75 กรัมต่อลิตร

Time (min)	BV	Fe (ppm)	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (g)	Fe in tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15.00	0.86	358.00	0.35	123.51	123.51	358.00
30.00	1.73	1057.00	0.69	364.67	488.18	707.50
45.00	2.59	991.00	1.04	341.90	830.07	802.00
60.00	3.45	936.00	1.38	322.92	1152.99	835.50
75.00	4.31	820.00	1.73	282.90	1435.89	832.40
90.00	5.18	783.00	2.07	270.14	1706.03	824.17
105.00	6.04	245.00	2.42	84.53	1790.55	741.43
120.00	6.90	70.00	2.76	24.15	1814.70	657.50
135.00	7.76	0.00	3.11	0.00	1814.70	584.44

สรุปผลได้ดังนี้

ใช้กรดในการรีเจเนอเรต	170.00	กรัม
เหล็กที่ติดออกมา	1814.70	มิลลิกรัม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.4.3 ใช้ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 73 กรัมต่อลิตร มีผลการทดลองดังนี้

ตาราง ง.24 แสดงข้อมูลการทดลองความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในการรีเจเนอเรชันแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 73 กรัมต่อลิตร

Time (min)	BV	Fe (ppm)	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (g)	Fe in tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15.00	0.86	572.00	0.35	197.34	197.34	572.00
30.00	1.73	1240.00	0.69	427.80	625.14	906.00
45.00	2.59	1203.00	1.04	415.04	1040.18	1005.00
60.00	3.45	824.00	1.38	284.28	1324.46	959.75
75.00	4.31	741.00	1.73	255.65	1580.10	916.00
90.00	5.18	512.00	2.07	176.64	1756.74	848.67
105.00	6.04	285.00	2.42	98.33	1855.07	768.14
120.00	6.90	0.00	2.76	0.00	1855.07	672.13

สรุปผลได้ดังนี้

ใช้กรดในการรีเจเนอเรต	201.48	กรัม
เหล็กที่ติดออกมา	1855.07	มิลลิกรัม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.5 ผลการทดลองหาอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมในการรีเจนเนอเรชั่นในกระบวนการดึงเหล็กแบบใช้เรซินแบบแลกเปลี่ยนประจุลบ โดยใช้อัตราการไหล 3 ช่วงคือ 1.38, 2.30 และ 3.75 ลิตรต่อชั่วโมง (ที่อัตราการไหล 0.43, 0.72 และ 1.17 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยมีปริมาตรเรซิน 0.4 ลิตร) ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ช้ากว่าการปฏิบัติงานปกติเท่าหนึ่ง ได้ผลการทดลองดังนี้

ง.5.1 ใช้อัตราการไหล 1.38 ลิตรต่อชั่วโมง มีผลการทดลองดังนี้

ตาราง ง.25 แสดงข้อมูลการทดลองอัตราการไหลในการรีเจนเนอเรชั่นแลกเปลี่ยนประจุลบที่อัตราการไหล 1.38 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (g)	Fe in tank (ppm)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.69	862.00	0.28	237.91	237.91	862.00
24	1.38	1804.00	0.55	497.90	735.82	1333.00
36	2.07	1735.00	0.83	478.86	1214.68	1467.00
48	2.76	1342.00	1.10	370.39	1585.07	1435.75
60	3.45	1138.00	1.38	314.09	1899.16	1376.20
72	4.14	954.00	1.66	263.30	2162.46	1305.83
84	4.83	553.00	1.93	152.63	2315.09	1198.29
96	5.52	247.00	2.21	68.17	2383.26	1079.38
108	6.21	165.00	2.48	45.54	2428.80	977.78
120	6.90	45.00	2.76	12.42	2441.22	884.50
132	7.59	0.00	3.04	0.00	2441.22	804.09

สรุปผลได้ดังนี้

ใช้น้ำในการรีเจนเนอเรต	3.04	ลิตร
เหล็กที่ติดออกมา	2441.22	มิลลิกรัม

ง.5.2 ใช้อัตราการไหล 2.3 ลิตรต่อชั่วโมง มีผลการทดลองดังนี้

ตาราง ง.26 แสดงข้อมูลการทดลองอัตราการไหลในการรีเจนเนอเรชันแลกเปลี่ยนประจุ  
ลบที่อัตราการไหล 2.3 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (g)	Fe in tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.00	1.15	419.00	0.46	192.74	192.74	419.00
24.00	2.30	985.00	0.92	453.10	645.84	702.00
36.00	3.45	1178.00	1.38	541.88	1187.72	860.67
48.00	4.60	876.00	1.84	402.96	1590.68	864.50
60.00	5.75	702.00	2.30	322.92	1913.60	832.00
72.00	6.90	494.00	2.76	227.24	2140.84	775.67
84.00	8.05	284.00	3.22	130.64	2271.48	705.43
96.00	9.20	161.00	3.68	74.06	2345.54	637.38
108.00	10.35	52.00	4.14	23.92	2369.46	572.33
120.00	11.50	0.00	4.60	0.00	2369.46	515.10

สรุปผลได้ดังนี้

ใช้น้ำในการรีเจนเนอเรต	4.60	ลิตร
เหล็กที่ติดออกมา	2369.46	มิลลิกรัม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.5.3 ใช้อัตราการไหล 3.75 ลิตรต่อชั่วโมง มีผลการทดลองดังนี้

ตาราง ง.27 แสดงข้อมูลการทดลองอัตราการไหลในการรีเจนเนอเรชันแลกเปลี่ยนประจุลบที่อัตราการไหล 3.75 ลิตรต่อชั่วโมง

Time (min)	BV	Fe (ppm)	V (lit)	Fe (mg)	Sum Fe (g)	Fe in tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.00	1.88	541.00	0.75	405.75	405.75	541.00
24.00	3.75	1024.00	1.50	768.00	1173.75	782.50
36.00	5.63	594.00	2.25	445.50	1619.25	719.67
48.00	7.50	402.00	3.00	301.50	1920.75	640.25
60.00	9.38	320.00	3.75	240.00	2160.75	576.20
72.00	11.25	179.00	4.50	134.25	2295.00	510.00
84.00	13.13	54.00	5.25	40.50	2335.50	444.86
96.00	15.00	21.00	6.00	15.75	2351.25	391.88
108.00	16.88	0.00	6.75	0.00	2351.25	348.33

สรุปผลได้ดังนี้

ใช้น้ำในการรีเจนเนอเรต	6.75	ลิตร
เหล็กที่ติดออกมา	2351.25	มิลลิกรัม

หมายเหตุ

BV คือ ปริมาตรของสารที่ใช้ในการรีเจนเนอเรตที่เวลาต่างๆ เทียบกับปริมาตรของเรซินคำนวณจากอัตราการไหลคูณเวลาแล้วหารด้วยปริมาตรของเรซิน

Fe (ppm) คือ ความเข้มข้นของเหล็กที่ทางออกจากกระบวนการ

V คือ ปริมาตรของสารที่ใช้ในการรีเจนเนอเรตที่เวลาต่างๆ

Fe (mg) คือ ปริมาณของเหล็กที่ออกมาที่เวลาต่างๆ

Sum Fe (mg) คือ ปริมาณของเหล็กที่สะสมในถังเก็บที่เวลาต่างๆ

Fe in tank (ppm) คือความเข้มข้นของเหล็กในถังเก็บที่เวลาต่างๆ



**ภาคผนวก จ.**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก จ.

## ผลการทดลองเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพ

จ.1 เปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่าง 1 มีปริมาณเหล็ก 6.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 91.25 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง (อัตราการไหล 0.86 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยที่เรซินมีปริมาตร 16 ลิตร) ได้ผลดังนี้

จ.1.1 กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cat-ion Resin) ได้ผลการทดลองดังนี้

ตาราง จ.1 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	Fe (mg)	Sum Fe (mg)	Fe in Tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.00	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.00	1.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.00	2.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.00	2.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30.00	3.44	23.00	0.00	253.00	253.00	4.60
36.00	4.13	53.00	0.01	583.00	836.00	12.67
42.00	4.81	78.00	0.01	858.00	1694.00	22.00
48.00	5.50	186.00	0.03	2046.00	3740.00	42.50
54.00	6.19	448.00	0.07	4928.00	8668.00	87.56
60.00	6.88	785.00	0.12	8635.00	17303.00	157.30
66.00	7.56	1158.00	0.18	12738.00	30041.00	248.27
72.00	8.25	1974.00	0.30	21714.00	51755.00	392.08
78.00	8.94	2883.00	0.44	31713.00	83468.00	583.69
84.00	9.63	3341.00	0.51	36751.00	120219.00	780.64
90.00	10.31	3847.00	0.59	42317.00	162536.00	985.07
96.00	11.00	4251.00	0.65	46761.00	209297.00	1189.19
102.00	11.69	4595.00	0.70	50545.00	259842.00	1389.53
108.00	12.38	4895.00	0.75	53845.00	313687.00	1584.28

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	Fe (mg)	Sum Fe (mg)	Fe in Tank (ppm)
114.00	13.06	5345.00	0.82	58795.00	372482.00	1782.21
120.00	13.75	5698.00	0.87	62678.00	435160.00	1978.00
126.00	14.44	5874.00	0.90	64614.00	499774.00	2163.52
132.00	15.13	6056.00	0.93	66616.00	566390.00	2340.45
138.00	15.81	6234.00	0.96	68574.00	634964.00	2509.74
144.00	16.50	6414.00	0.98	70554.00	705518.00	2672.42
150.00	17.19	6524.00	1.00	71764.00	777282.00	2826.48

จ.1.2 กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ (An-ion Resin) ได้ผลการทดลองดังนี้

ตาราง จ.2 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	Fe (mg)	Sum Fe (mg)	Fe in Tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.00	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.00	1.38	315.00	0.05	3465.00	3465.00	157.50
18.00	2.06	542.00	0.08	5962.00	9427.00	285.67
24.00	2.75	941.00	0.14	10351.00	19778.00	449.50
30.00	3.44	1562.00	0.24	17182.00	36960.00	672.00
36.00	4.13	2451.00	0.38	26961.00	63921.00	968.50
42.00	4.81	2710.00	0.42	29810.00	93731.00	1217.29
48.00	5.50	3124.00	0.48	34364.00	128095.00	1455.63
54.00	6.19	3796.00	0.58	41756.00	169851.00	1715.67
60.00	6.88	4127.00	0.63	45397.00	215248.00	1956.80
66.00	7.56	4444.00	0.68	48884.00	264132.00	2182.91
72.00	8.25	4987.00	0.76	54857.00	318989.00	2416.58
78.00	8.94	5695.00	0.87	62645.00	381634.00	2668.77
84.00	9.63	6363.00	0.98	69993.00	451627.00	2932.64
90.00	10.31	6524.00	1.00	71764.00	523391.00	3172.07

จ.1.3 กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ออกแบบในโครงการวิจัย ได้ผลการทดลอง  
ดังนี้

ตาราง จ.3 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 1 ไหลผ่านกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ออกแบบในโครงการวิจัย

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	Fe (mg)	Sum Fe (mg)	Fe in Tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.00	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.00	1.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.00	2.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.00	2.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30.00	3.44	54.00	0.01	594.00	594.00	10.80
36.00	4.13	142.00	0.02	1562.00	2156.00	32.67
42.00	4.81	254.00	0.04	2794.00	4950.00	64.29
48.00	5.50	502.00	0.08	5522.00	10472.00	119.00
54.00	6.19	936.00	0.14	10296.00	20768.00	209.78
60.00	6.88	1538.00	0.24	16918.00	37686.00	342.60
66.00	7.56	2280.00	0.35	25080.00	62766.00	518.73
72.00	8.25	3330.00	0.51	36630.00	99396.00	753.00
78.00	8.94	4024.00	0.62	44264.00	143660.00	1004.62
84.00	9.63	4581.00	0.70	50391.00	194051.00	1260.07
90.00	10.31	5012.00	0.77	55132.00	249183.00	1510.20
96.00	11.00	5674.00	0.87	62414.00	311597.00	1770.44
102.00	11.69	6024.00	0.92	66264.00	377861.00	2020.65
108.00	12.38	6257.00	0.96	68827.00	446688.00	2256.00
114.00	13.06	6417.00	0.98	70587.00	517275.00	2475.00
120.00	13.75	6524.00	1.00	71764.00	589039.00	2677.45

สรุปผลได้ดังนี้

ตาราง จ.4 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนเรซินอิ่มตัว

กระบวนการ	กรดที่บำบัด (ลิตร)	กรดที่สูญเสีย (ลิตร)	กรดที่นำกลับ (ลิตร)	% นำกลับกรด	เหล็กที่เข้ามา (mg)	เหล็กที่ออกมา (mg)	% เหล็กที่ออกมา
Cat	275.00	60.00	215.00	78.18	1794100.00	777282.00	43.32
An	165.00	0.00	165.00	100.00	1076460.00	523391.00	48.62
cat+an	220.00	30.00	190.00	86.36	1435280.00	589039.00	41.04

ตาราง จ.5 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 0.5 กรัมต่อลิตร

กระบวนการ	กรดที่บำบัด (ลิตร)	กรดที่สูญเสีย (ลิตร)	กรดที่นำกลับ (ลิตร)	% นำกลับกรด	เหล็กที่เข้ามา (mg)	เหล็กที่ออกมา (mg)	% เหล็กที่ออกมา
Cat	138.20	60.00	78.20	56.58	901586.42	69097.67	7.66
An	46.50	0.00	46.50	100.00	303344.01	23248.31	7.66
cat+an	119.83	30.00	89.83	74.96	781773.47	59915.20	7.66

ตาราง จ.6 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 1 กรัมต่อลิตร

กระบวนการ	กรดที่บำบัด (ลิตร)	กรดที่สูญเสีย (ลิตร)	กรดที่นำกลับ (ลิตร)	% นำกลับกรด	เหล็กที่เข้ามา (mg)	เหล็กที่ออกมา (mg)	% เหล็กที่ออกมา
Cat	165.80	60.00	105.80	63.81	1081710.20	165804.75	15.33
An	67.39	0.00	67.39	100.00	439670.40	67392.76	15.33
Cat+An	142.80	30.00	112.80	78.99	931615.63	142798.23	15.33

จ.2 เปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่าง 2 มีปริมาณเหล็ก 4.5 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 91.25 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง (อัตราการไหล 0.86 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยที่เรซินมีปริมาตร 16 ลิตร) ได้ผลดังนี้

จ.2.1 กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cat-ion Resin) ได้ผลการทดลองดังนี้

ตาราง จ.7 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 2 ไหลผ่านกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	Fe (mg)	Sum Fe (mg)	Fe in Tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.00	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.00	1.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.00	2.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.00	2.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30.00	3.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36.00	4.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
42.00	4.81	54.00	0.01	594.00	594.00	7.71
48.00	5.50	90.00	0.02	990.00	1584.00	18.00
54.00	6.19	241.00	0.05	2651.00	4235.00	42.78
60.00	6.88	474.00	0.11	5214.00	9449.00	85.90
66.00	7.56	745.00	0.17	8195.00	17644.00	145.82
72.00	8.25	1124.00	0.25	12364.00	30008.00	227.33
78.00	8.94	1547.00	0.34	17017.00	47025.00	328.85
84.00	9.63	1684.00	0.38	18524.00	65549.00	425.64
90.00	10.31	2145.00	0.48	23595.00	89144.00	540.27
96.00	11.00	2548.00	0.57	28028.00	117172.00	665.75
102.00	11.69	2898.00	0.65	31878.00	149050.00	797.06
108.00	12.38	3457.00	0.77	38027.00	187077.00	944.83
114.00	13.06	3564.00	0.79	39204.00	226281.00	1082.68
120.00	13.75	3878.00	0.86	42658.00	268939.00	1222.45

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	Fe (mg)	Sum Fe (mg)	Fe in Tank (ppm)
126.00	14.44	3974.00	0.89	43714.00	312653.00	1353.48
132.00	15.13	4144.00	0.92	45584.00	358237.00	1480.32
138.00	15.81	4257.00	0.95	46827.00	405064.00	1601.04
144.00	16.50	4356.00	0.97	47916.00	452980.00	1715.83
150.00	17.19	4457.00	0.99	49027.00	502007.00	1825.48
156.00	17.88	4487.00	1.00	49357.00	551364.00	1927.85

จ.2.2 กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ (An-ion Resin) ได้ผลการทดลองดังนี้

ตาราง จ.8 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 2 ไหลผ่านกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	Fe (mg)	Sum Fe (mg)	Fe in Tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.00	0.69	27.00	0.01	297.00	297.00	27.00
12.00	1.38	114.00	0.03	1254.00	1551.00	70.50
18.00	2.06	325.00	0.07	3575.00	5126.00	155.33
24.00	2.75	584.00	0.13	6424.00	11550.00	262.50
30.00	3.44	985.00	0.22	10835.00	22385.00	407.00
36.00	4.13	1245.00	0.28	13695.00	36080.00	546.67
42.00	4.81	1684.00	0.38	18524.00	54604.00	709.14
48.00	5.50	2047.00	0.46	22517.00	77121.00	876.38
54.00	6.19	2514.00	0.56	27654.00	104775.00	1058.33
60.00	6.88	2778.00	0.62	30558.00	135333.00	1230.30
66.00	7.56	3045.00	0.68	33495.00	168828.00	1395.27
72.00	8.25	3425.00	0.76	37675.00	206503.00	1564.42
78.00	8.94	3657.00	0.82	40227.00	246730.00	1725.38
84.00	9.63	3664.00	0.82	40304.00	287034.00	1863.86
90.00	10.31	4058.00	0.90	44638.00	331672.00	2010.13
96.00	11.00	4473.00	1.00	49203.00	380875.00	2164.06
102.00	11.69	4487.00	1.00	49357.00	430232.00	2300.71

จ.2.3 กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ออกแบบในโครงการวิจัย ได้ผลการทดลอง  
ดังนี้

ตาราง จ.9 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 2 ไหลผ่านกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ออกแบบในโครงการวิจัย

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	Fe (mg)	Sum Fe (mg)	Fe in Tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.00	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.00	1.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.00	2.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.00	2.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30.00	3.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36.00	4.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
42.00	4.81	115.00	0.03	1265.00	1265.00	16.43
48.00	5.50	305.00	0.07	3355.00	4620.00	52.50
54.00	6.19	607.00	0.14	6677.00	11297.00	114.11
60.00	6.88	966.00	0.22	10626.00	21923.00	199.30
66.00	7.56	1342.00	0.30	14762.00	36685.00	303.18
72.00	8.25	1659.00	0.37	18249.00	54934.00	416.17
78.00	8.94	2043.00	0.46	22473.00	77407.00	541.31
84.00	9.63	2536.00	0.57	27896.00	105303.00	683.79
90.00	10.31	2943.00	0.66	32373.00	137676.00	834.40
96.00	11.00	3532.00	0.79	38852.00	176528.00	1003.00
102.00	11.69	3825.00	0.85	42075.00	218603.00	1169.00
108.00	12.38	4094.00	0.91	45034.00	263637.00	1331.50
114.00	13.06	4257.00	0.95	46827.00	310464.00	1485.47
120.00	13.75	4395.00	0.98	48345.00	358809.00	1630.95
126.00	14.44	4487.00	1.00	49357.00	408166.00	1766.95

สรุปผลได้ดังนี้

ตาราง จ.10 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนเรซินอิ่มตัว

กระบวนการ	กรดที่บำบัด (ลิตร)	กรดที่สูญเสีย (ลิตร)	กรดที่นำกลับ (ลิตร)	% นำกลับกรด	เหล็กที่เข้ามา (mg)	เหล็กที่ออกมา (mg)	% เหล็กที่ออกมา
Cat	286.00	60.00	226.00	79.02	1283282.00	551364.00	42.97
An	187.00	0.00	187.00	100.00	839069.00	430232.00	51.27
Cat+An	231.00	30.00	201.00	87.01	1036497.00	408166.00	39.38

ตาราง จ.11 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 0.5 กรัมต่อลิตร

กระบวนการ	กรดที่บำบัด (ลิตร)	กรดที่สูญเสีย (ลิตร)	กรดที่นำกลับ (ลิตร)	% นำกลับกรด	เหล็กที่เข้ามา (mg)	เหล็กที่ออกมา (mg)	% เหล็กที่ออกมา
Cat	161.14	60.00	101.14	62.76	723016.18	80567.88	11.14
An	62.32	0.00	62.32	100.00	279650.40	31162.29	11.14
Cat+An	139.37	30.00	109.37	78.47	625348.79	69684.51	11.14

ตาราง จ.12 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 1 กรัมต่อลิตร

กระบวนการ	กรดที่บำบัด (ลิตร)	กรดที่สูญเสีย (ลิตร)	กรดที่นำกลับ (ลิตร)	% นำกลับกรด	เหล็กที่เข้ามา (mg)	เหล็กที่ออกมา (mg)	% เหล็กที่ออกมา
Cat	202.40	60.00	142.40	70.36	908178.22	202402.10	22.29
An	95.47	0.00	95.47	100.00	428389.83	95473.55	22.29
cat+an	175.80	30.00	145.80	82.94	788833.76	175804.27	22.29





จ.3 เปรียบเทียบกระบวนการโดยใช้กรดเสียตัวอย่าง 3 มีปริมาณเหล็ก 3.7 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรด 54.75 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง (อัตราการไหล 0.86 แกลลอนต่อนาทีต่อลูกบาศก์ฟุตเรซิน โดยที่เรซินมีปริมาตร 16 ลิตร) ได้ผลดังนี้

จ.3.1 กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cat-ion Resin) ได้ผลการทดลองดังนี้

ตาราง จ.13 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 3 ไหลผ่านกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	Fe (mg)	Sum Fe (mg)	Fe in Tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.00	2.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30.00	3.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40.00	4.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50.00	5.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60.00	6.88	45.00	0.01	825.00	825.00	7.50
70.00	8.02	254.00	0.07	4656.67	5481.67	42.71
80.00	9.17	396.00	0.11	7260.00	12741.67	86.87
90.00	10.31	641.00	0.18	11751.67	24493.33	148.44
100.00	11.46	1058.00	0.29	19396.67	43890.00	239.40
110.00	12.60	1440.00	0.39	26400.00	70290.00	348.55
120.00	13.75	1847.00	0.51	33861.67	104151.67	473.42
130.00	14.90	2473.00	0.68	45338.33	149490.00	627.23
140.00	16.04	2845.00	0.78	52158.33	201648.33	785.64
150.00	17.19	3119.00	0.85	57181.67	258830.00	941.20
160.00	18.33	3347.00	0.92	61361.67	320191.67	1091.56
170.00	19.48	3483.00	0.95	63855.00	384046.67	1232.24
180.00	20.63	3652.00	1.00	66953.33	451000.00	1366.67

จ.3.2 กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ (An-ion Resin) ได้ผลการทดลองดังนี้

ตาราง จ.14 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 3 ไหลผ่านกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	Fe (mg)	Sum Fe (mg)	Fe in Tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.00	2.29	147.00	0.04	2695.00	2695.00	73.50
30.00	3.44	345.00	0.09	6325.00	9020.00	164.00
40.00	4.58	536.00	0.15	9826.67	18846.67	257.00
50.00	5.73	785.00	0.21	14391.67	33238.33	362.60
60.00	6.88	1175.00	0.32	21541.67	54780.00	498.00
70.00	8.02	1568.00	0.43	28746.67	83526.67	650.86
80.00	9.17	1814.00	0.50	33256.67	116783.33	796.25
90.00	10.31	2025.00	0.55	37125.00	153908.33	932.78
100.00	11.46	2481.00	0.68	45485.00	199393.33	1087.60
110.00	12.60	2874.00	0.79	52690.00	252083.33	1250.00
120.00	13.75	3098.00	0.85	56796.67	308880.00	1404.00
130.00	14.90	3387.00	0.93	62095.00	370975.00	1556.54
140.00	16.04	3514.00	0.96	64423.33	435398.33	1696.36
150.00	17.19	3652.00	1.00	66953.33	502351.67	1826.73

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ.3.3 กระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่ออกแบบในโครงการวิจัย ได้ผลการทดลอง  
ดังนี้

ตาราง จ.15 แสดงกรดเสียตัวอย่าง 3 ไหลผ่านกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริกที่  
ออกแบบในโครงการวิจัย

Time (min)	BV	Fe (ppm)	c/co	Fe (mg)	Sum Fe (mg)	Fe in Tank (ppm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.00	2.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30.00	3.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40.00	4.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50.00	5.73	84.00	0.02	1540.00	1540.00	16.80
60.00	6.88	247.00	0.07	4528.33	6068.33	55.17
70.00	8.02	564.00	0.15	10340.00	16408.33	127.86
80.00	9.17	1045.00	0.29	19158.33	35566.67	242.50
90.00	10.31	1693.00	0.46	31038.33	66605.00	403.67
100.00	11.46	2237.00	0.61	41011.67	107616.67	587.00
110.00	12.60	2688.00	0.74	49280.00	156896.67	778.00
120.00	13.75	2945.00	0.81	53991.67	210888.33	958.58
130.00	14.90	3215.00	0.88	58941.67	269830.00	1132.15
140.00	16.04	3407.00	0.93	62461.67	332291.67	1294.64
150.00	17.19	3540.00	0.97	64900.00	397191.67	1444.33
160.00	18.33	3652.00	1.00	66953.33	462605.00	1577.06

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปผลได้ดังนี้

ตาราง จ.16 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนเรซินอิ่มตัว

กระบวนการ	กรดที่บำบัด (ลิตร)	กรดที่สูญเสีย (ลิตร)	กรดที่นำกลับ (ลิตร)	% นำกลับกรด	เหล็กที่เข้ามา (mg)	เหล็กที่ออกมา (mg)	% เหล็กที่ออกมา
Cat	330.00	60.00	270.00	81.82	1205160.00	451000.00	37.42
An	275.00	0.00	275.00	100.00	1004300.00	502351.67	50.02
Cat+An	293.33	30.00	263.33	89.77	1071253.33	399245.00	37.27

ตาราง จ.17 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 0.5 กรัมต่อลิตร

กระบวนการ	กรดที่บำบัด (ลิตร)	กรดที่สูญเสีย (ลิตร)	กรดที่นำกลับ (ลิตร)	% นำกลับกรด	เหล็กที่เข้ามา (mg)	เหล็กที่ออกมา (mg)	% เหล็กที่ออกมา
Cat	223.17	60.00	163.17	73.11	815011.39	111584.25	13.69
An	110.24	0.00	110.24	100.00	402596.02	55119.94	13.69
Cat+An	174.63	30.00	144.63	82.82	637760.93	87316.67	13.69

ตาราง จ.18 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการเมื่อปฏิบัติงานจนปริมาณเหล็กที่ออกจากกระบวนการมีความเข้มข้นสะสม 1 กรัมต่อลิตร

กระบวนการ	กรดที่บำบัด (ลิตร)	กรดที่สูญเสีย (ลิตร)	กรดที่นำกลับ (ลิตร)	% นำกลับกรด	เหล็กที่เข้ามา (mg)	เหล็กที่ออกมา (mg)	% เหล็กที่ออกมา
Cat	282.17	60.00	222.17	78.74	1030482.43	282169.34	27.38
An	172.96	0.00	172.96	100.00	631650.45	172960.15	27.38
Cat+An	224.37	30.00	194.37	86.63	819416.12	224374.62	27.38

หมายเหตุ

กรดที่บ่มกัด หมายถึง ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกเสียที่ใช้บ่มกัดในกระบวนการ หรือปริมาณกรดเสียที่ผ่านหอระเหิน

กรดที่สูญเสีย หมายถึง ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่นำมาใช้ในการรีเจนเนอเรต

กรดที่นำกลับ หมายถึง ปริมาณกรดเสียที่สามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ กรดที่บ่มกัดลบด้วยกรดที่สูญเสีย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ.

## ตารางข้อมูลใช้ในการอ้างอิงการคำนวณระยะเวลาต้นทุน

ตารางที่ จ.1 Typical factors for estimation of project fixed capital cost

Item	Process type		
	Fluids	Fluids-solids	Solids
1. Major equipment, total purchase cost	PCE	PCE	PCE
a. Equipment erection	0.4	0.45	0.50
b. Piping	0.70	0.45	0.20
c. Instrumentation	0.20	0.15	0.10
d. Electrical	0.10	0.10	0.10
e. Building, process	0.15	0.10	0.05
f. Utilities	0.50	0.45	0.25
g. Storage	0.15	0.20	0.25
h. Site development	0.05	0.05	0.05
i. Ancillary buildings	0.15	0.20	0.30
2. Total physical plant cost $PPC = PCE(1+a+\dots+l) = PCE^*$	3.40	3.15	2.80
j. Design and Engineering	0.30	0.25	0.20
k. Contract, fee	0.05	0.05	0.05
l. Contingency	0.10	0.10	0.10
Fixed capital = $PPC(1+j+k+l) = PPC^*$	1.45	1.40	1.35

f, g, h, l : Omitted for minor extension or addition to existing sites



ตารางที่ ๑.2 Purchase cost of miscellaneous equipment cost factors

Equipment	Size, unit, S	Size, range	Constant, C, \$	Index, n	Comment
Agitators Propeller	Driver power kW	5-25kW	400	0.50	Carbon steel
Turbine			820	0.30	
Boiler Packaged Up to 10 bar Up to 60 bar 10 to 60 bar	Kg/h, steam	(20-50)x10 <sup>3</sup>	700 900	0-50 0-50	Oil or gas fired
Centrifuges Horizontal Basket Vertical basket	Dia, m	0.5-1.0	16,000 16,000	1.3	
Compressors Centrifugal	Driver power, kW	20-200	700	0.8	Electric driver, press 50 bar
Conveyers Belt 0.5 m wide 1.0 wide	Length, m	2-40	1000 1500	0.65 0.65	
Crushers Cone Pulverizes	Te/h Kg/h	20-200 -	800 700	0.85 0.35	
Dryer Rotary vacuum Pan	Area, m <sup>2</sup>	5-30 2-10	6000 4000	0.45 0.35	Carbon steel
Evaporators Vertical tube	Area, m <sup>2</sup>	10-1000	4000	0.53	Carbon steel

Equipment	Size, unit, S	Size, range	Constant, C, \$	Index, n	Comment
Filters Plate and Frame	Area, m <sup>2</sup>	5-50	1000	0.60	Cast iron
Vacuum drum		1-10	6000	0.60	Carbon steel
Reactor Jacketed, Agitated	Capacity, m <sup>3</sup>	3-30	6000	0.40	Carbon steel
			12,000	0.45	Glass lined
Tanks Process Vertical Horizontal	Capacity, m <sup>3</sup>	1-50	500	0.59	Atmos.Press
		10-100	600	0.60	Carbon steel *25 for stainless
Tanks Storage Floating roof Fixed cone Roof	Capacity, m <sup>3</sup>	50-8000	650	0.65	Carbon steel
			600	0.65	
Furnaces Process	Heat Absorbed, kW	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	76	0.77	Carbon steel Tube, *25 for stainless
Packing Ceramic Saddles Plastic Pall ring Stainless steel pall ring	Size, mm	25-75	\$/m <sup>3</sup>		
			980	-0.4	
		25-75	8300	-1.0	
		25-100		-1.0	

ตารางที่ ๑.3 Summary of production costs

Variable costs	Typical
1. Raw materials	from flow-sheets
2. Miscellaneous materials	10 per cent of item (5)
3. Utilities	from flow-sheets
4. Shipping and packaging	usually negligible
<hr/>	
Sub-total A .....	
Fixed costs	
5. Maintenance	5-10 per cent of the fixed capital
6. Operating labor	from manning estimates
7. Supervision	20 per cent of item (6)
8. Plant overheads	50 per cent of item (6)
9. Capital charges	15 per cent of the fixed capital
10. Insurance	1 per cent of the fixed capital
11. Rates	2 per cent of the fixed capital
12. Royalties	1 per cent of the fixed capital
<hr/>	
Sub-total B .....	
Direct production costs A+B .....	
13. Sales expense	20-30 per cent of the direct
14. General overheads	production costs
15. Research and development	
<hr/>	
Sub-total C .....	
Annual production costs = A+B+C = .....	
Production costs \$/kg =	$\frac{\text{Annual production costs}}{\text{Annual production rate}}$
<hr/>	



**ภาคผนวก ช.**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ช.

## การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการเชิงเศรษฐศาสตร์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยจะพิจารณาการดเสียที่มีปริมาณเหล็กโดยเฉลี่ย คือ 3.7 กรัมต่อลิตร ในกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 51.21 กรัมต่อลิตร (5 % โดยน้ำหนัก) ซึ่งเป็นกรดเสียที่เกิดจากกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กแบบต่อเนื่อง การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนนี้จะแบ่งเป็น 3 ขนาดคือ ขนาด 2, 5 และ 15 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยมีข้อกำหนดในการคำนวณดังนี้

- ในกระบวนการกำจัดสนิมเหล็กแบบกะ มีการสูญเสียกรด 56 %
- การทำงานของกระบวนการใน 1 ปี คิดเป็น 250 วัน
- กรดไฮโดรคลอริก 35 % ราคา 3 บาทต่อกิโลกรัม
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 % ราคา 8 บาทต่อกิโลกรัม
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35 % ราคา 12 บาทต่อกิโลกรัม
- ค่าซ่อมบำรุง คิดเป็น 2 % ของราคาค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง
- ค่าพลังงาน คิดเป็น 3 บาทต่อ kWh
- ค่าน้ำ คิดเป็น 17 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

## ช.1 การคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของกระบวนการนำกลับกรดขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร

ช.1.1 การคำนวณหาการสูญเสียรายได้จากปริมาณกรดที่ใช้ในการกำจัดสนิม โดยพิจารณาจากกระบวนการกำจัดสนิมแบบกะ ที่ไม่มีกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก มีรายละเอียดดังนี้

ปริมาณกรดเสีย	2	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
กรดเสียมีปริมาณกรดไฮโดรคลอริก	28	กรัมต่อลิตร
<b>กรดไฮโดรคลอริก</b>		
จะสูญเสียกรดไฮโดรคลอริก	14,225	kg/ปี
คิดเป็นกรดไฮโดรคลอริก 35 %	40,643	kg/ปี
คิดเป็นเงินที่จะต้องเสีย	121,929	บาทต่อปี
<b>โซเดียมไฮดรอกไซด์</b>		
จะสูญเสียโซเดียมไฮดรอกไซด์	17,148	kg/ปี
คิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 %	34,296	kg/ปี
คิดเป็นเงินที่จะต้องเสีย	274,367	บาทต่อปี
<b>รวมเป็นเงินที่จะต้องสูญเสีย</b>	<b>396,296</b>	<b>บาทต่อปี</b>

## การคำนวณ

ความเข้มข้นของกรดเสีย	= (ความเข้มข้นกรด 5 %) * 0.56
การสูญเสียกรดไฮโดรไฮโดรคลอริก	= (ความเข้มข้นกรดเสีย) * (ปริมาณกรดเสีย) * (250 วัน/ปี)
กรดไฮโดรคลอริก 35 %	= (การสูญเสียกรดไฮโดรคลอริก) * (100/35)
การสูญเสียโซเดียมไฮดรอกไซด์	= (การสูญเสียกรดไฮโดรไฮโดรคลอริก) * (40/36.5) * (1.1)
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 %	= (การสูญเสียโซเดียมไฮดรอกไซด์) * (100/50)

ข.1.2 การคำนวณสำหรับกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก มีรายละเอียดดังนี้

เรซินบำบัดกรดได้	21	BV
เวลาในการปฏิบัติงาน	3	ชั่วโมง
อัตราการไหล	667	ลิตร/ชั่วโมง
ดังนั้น ใช้ปริมาตรเรซิน	116	ลิตร
ราคาเรซินลิตรละ	51	บาท/ลิตร
รวมเป็นเงินค่าเรซินทั้งหมด	5,917	บาท
<b>ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง</b>	<b>1,265,917</b>	<b>บาท</b>
<b>รายจ่าย</b>		
ค่าซ่อมบำรุง	25,318	บาท/ปี
ค่าแรงงาน	24,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	9,600	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านการใช้น้ำ	35,700	<b>บาท/ปี</b>
<b>รวมค่าใช้จ่ายต่อปี</b>	<b>94,618</b>	<b>บาท/ปี</b>
<b>รายรับ</b>		
กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%)	28,450	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	85,350	บาท/ปี
ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%)	24,942	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	199,540	บาท/ปี
<b>รวมรายรับต่อปี</b>	<b>284,890</b>	<b>บาท/ปี</b>

## การคำนวณ

เรซินบำบัดกรดได้ 21 BV	หมายถึง เรซิน 1 ลิตรสามารถบำบัดกรดได้ 21 ลิตร
เวลาในการปฏิบัติงาน 3 ชั่วโมง	หมายถึง การทำงาน 1 ครั้ง ใช้เวลาในการบำบัดกรด 3 ชั่วโมง
อัตราการไหลในกระบวนการ	= (ปริมาณกรดเสียใน 1 วัน) / (เวลาในการปฏิบัติงาน)
ปริมาตรเรซิน	= (ปริมาณกรดเสีย) * 1.2 / (21 BV)
ค่าซ่อมบำรุง	= (0.02 * ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง)
กรดที่ดึงกลับมาได้ (ต้น HCl 35%)	= (70% ของปริมาณกรดที่สูญเสีย)
ค่าที่สามารถลดได้ (ต้น NaOH 50%)	= (กรดที่ดึงกลับมาได้) * (40 MW/36.5 MW) * (35%/50%)

หมายเหตุ ข้อมูลต่างๆ นำมาจากผลการทดลองที่ได้ในกรดเสียตัวอย่างที่ 3 ในหัวข้อ 5.4.3 ซึ่งเป็นกรดเสียชนิดเดียวกับกรดเสียที่นำมาวิเคราะห์

เมื่อนำมาวิเคราะห์หาปีที่คืนทุนจะได้รายละเอียดดัง ตาราง ช. 1

ตาราง ช.1 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของกระบวนการที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร

ปี	รายจ่าย/ปี	รายรับ/ปี	รายรับสุทธิ/ปี	รายรับรวมสุทธิ
0	0	0	0	-1,265,917
1	91,862	276,592	184,730	-1,081,187
2	89,187	268,536	179,349	-901,838
3	86,589	260,714	174,126	-727,712
4	84,067	253,121	169,054	-558,658
5	81,618	245,748	164,130	-394,528
6	79,241	238,591	159,350	-235,179
7	76,933	231,641	154,708	-80,470
8	74,692	224,895	150,202	69,732
9	72,517	218,344	145,827	215,559
10	70,405	211,985	141,580	357,139
11	68,354	205,810	137,456	494,596
12	66,363	199,816	133,453	628,049
13	64,430	193,996	129,566	757,614
14	62,554	188,346	125,792	883,406
15	60,732	182,860	122,128	1,005,535

หมายเหตุ ดัชนีราคา 1.03 (103 %)

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่} \quad \text{รายจ่ายในปีที่ } n &= \text{รายจ่ายปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับในปีที่ } n &= \text{รายรับปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับในปีที่ } n - \text{รายจ่ายในปีที่ } n \\
 \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n-1 + \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n
 \end{aligned}$$

ข.1.3 การคำนวณสำหรับกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ มีรายละเอียดดังนี้

เรซินบำบัดกรดได้	17	BV
เวลาในการปฏิบัติงาน	3	ชั่วโมง
อัตราการไหล	800	ลิตร/ชั่วโมง
ดังนั้น ใช้ปริมาตรเรซิน	140	ลิตร
ราคาเรซินลิตรละ	153	บาท/ลิตร
รวมเป็นเงินค่าเรซินทั้งหมด	21,300	บาท
<b>ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง</b>	<b>1,521,300</b>	<b>บาท</b>
<b>รายจ่าย</b>		
ค่าซ่อมบำรุง	30,426	บาท/ปี
ค่าแรงงาน	24,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	9,600	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านการใช้ น้ำ	35,700	บาท/ปี
ค่าไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์	60,000	บาท/ปี
<b>รวมค่าใช้จ่ายต่อปี</b>	<b>159,726</b>	<b>บาท/ปี</b>
<b>รายรับ</b>		
กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%)	36,579	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	109,736	บาท/ปี
ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%)	32,069	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	256,551	บาท/ปี
<b>รวมรายรับต่อปี</b>	<b>366,287</b>	<b>บาท/ปี</b>



## การคำนวณ

เรซินบำบัดกรดได้ 17 BV	หมายถึง เรซิน 1 ลิตรสามารถบำบัดกรดได้ 17 ลิตร
เวลาในการปฏิบัติงาน 3 ชั่วโมง	หมายถึง การทำงาน 1 ครั้ง ใช้เวลาในการบำบัดกรด 3 ชั่วโมง
อัตราการไหลในกระบวนการ	= (ปริมาณกรดเสียใน 1 วัน) / (เวลาในการปฏิบัติงาน)
ปริมาตรเรซิน	= (ปริมาณกรดเสีย) * 1.2 / (17 BV)
ค่าซ่อมบำรุง	= (0.02 * ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง)
กรดที่ดึงกลับมาได้ (ต้น HCl 35%)	= (95% ของปริมาณกรดที่สูญเสีย)
ค่าที่สามารถลดได้ (ต้น NaOH 50%)	= (กรดที่ดึงกลับมาได้) * (40 MW/36.5 MW) * (35%/50%)

หมายเหตุ ข้อมูลต่างๆ นำมาจากผลการทดลองที่ได้ในกรณีตัวอย่างที่ 3 ในหัวข้อ 5.4.3 ซึ่งเป็นกรดเสียชนิดเดียวกับกรดเสียที่นำมาวิเคราะห์

เมื่อนำมาวิเคราะห์หาปีที่คืนทุนจะได้รายละเอียดดังตาราง ข.2

ตาราง ข.2 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของกระบวนการที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร

ปี	รายจ่าย/ปี	รายรับ/ปี	รายรับสุทธิ/ปี	รายรับรวมสุทธิ
0	0	0	0	-1,521,300
1	155,074	355,618	200,544	-1,320,756
2	150,557	345,260	194,703	-1,126,052
3	146,172	335,204	189,032	-937,020
4	141,914	325,441	183,527	-753,493
5	137,781	315,962	178,181	-575,312
6	133,768	306,759	172,991	-402,321
7	129,872	297,825	167,953	-234,368
8	126,089	289,150	163,061	-71,307
9	122,417	280,728	158,312	87,005
10	118,851	272,552	153,701	240,705
11	115,389	264,613	149,224	389,929
12	112,029	256,906	144,878	534,807
13	108,766	249,423	140,658	675,465
14	105,598	242,159	136,561	812,026
15	102,522	235,106	132,584	944,609

หมายเหตุ ดัชนีราคา 1.03 (103 %)

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่} \quad \text{รายจ่ายในปีที่ } n &= \text{รายจ่ายปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับในปีที่ } n &= \text{รายรับปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับในปีที่ } n - \text{รายจ่ายในปีที่ } n \\
 \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n-1 + \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n
 \end{aligned}$$

ข.1.4 การคำนวณสำหรับกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้กระบวนการที่ออกแบบในงานวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

เรซินบำบัดกรดได้	18	BV
เวลาในการปฏิบัติงาน	3	ชั่วโมง
อัตราการไหล	750	ลิตร/ชั่วโมง
ดังนั้น ใช้ปริมาตรเรซิน	131	ลิตร
ราคาเรซินลิตรละ	102	บาท/ลิตร
รวมเป็นเงินค่าเรซินทั้งหมด	13,313	บาท
<b>ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง</b>	<b>1,313,313</b>	<b>บาท</b>
<b>รายจ่าย</b>		
ค่าซ่อมบำรุง	26,266	บาท/ปี
ค่าแรงงาน	24,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	9,600	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านการใช้น้ำ	35,700	บาท/ปี
ค่าไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์	30,000	บาท/ปี
<b>รวมค่าใช้จ่ายต่อปี</b>	<b>125,566</b>	<b>บาท/ปี</b>
<b>รายรับ</b>		
กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%)	34,546	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	103,639	บาท/ปี
ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%)	30,287	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	242,298	บาท/ปี
<b>รวมรายรับต่อปี</b>	<b>345,938</b>	<b>บาท/ปี</b>

## การคำนวณ

เรซินบำบัดกรดได้ 18 BV	หมายถึง เรซิน 1 ลิตรสามารถบำบัดกรดได้ 18 ลิตร
เวลาในการปฏิบัติงาน 3 ชั่วโมง	หมายถึง การทำงาน 1 ครั้ง ใช้เวลาในการบำบัดกรด 3 ชั่วโมง
อัตราการไหลในกระบวนการ	= (ปริมาณกรดเสียใน 1 วัน) / (เวลาในการปฏิบัติงาน)
ปริมาตรเรซิน	= (ปริมาณกรดเสีย) * 1.2 / (18 BV)
ค่าซ่อมบำรุง	= (0.02 * ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง)
กรดที่ดึงกลับมาได้ (ต้น HCl 35%)	= (85% ของปริมาณกรดที่สูญเสีย)
ค่าที่สามารถลดได้ (ต้น NaOH 50%)	= (กรดที่ดึงกลับมาได้) * (40 MW/36.5 MW) * (35%/50%)

หมายเหตุ ข้อมูลต่างๆ นำมาจากผลการทดลองที่ได้ในกรณีตัวอย่างที่ 3 ในหัวข้อ 5.4.3 ซึ่งเป็นกรดเสียชนิดเดียวกับกรดเสียที่นำมาวิเคราะห์

เมื่อนำมาวิเคราะห์หาปีที่คืนทุนจะได้รายละเอียดดังตาราง ข.3

ตาราง ข.3 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของกระบวนการที่ออกแบบในงานวิจัย สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 2 ลูกบาศก์เมตร

ปี	รายจ่าย/ปี	รายรับ/ปี	รายรับสุทธิ/ปี	รายรับรวมสุทธิ
0	0	0	0	-1,313,313
1	121,909	335,862	213,953	-1,099,360
2	118,358	326,079	207,721	-891,639
3	114,911	316,582	201,671	-689,968
4	111,564	307,361	195,797	-494,171
5	108,315	298,409	190,094	-304,077
6	105,160	289,717	184,557	-119,519
7	102,097	281,279	179,182	59,663
8	99,123	273,086	173,963	233,626
9	96,236	265,132	168,896	402,522
10	93,433	257,410	163,977	566,499
11	90,712	249,913	159,201	725,700
12	88,070	242,634	154,564	880,264
13	85,505	235,567	150,062	1,030,326
14	83,014	228,705	145,691	1,176,017
15	80,596	222,044	141,448	1,317,465

หมายเหตุ ดัชนีราคา 1.03 (103 %)

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad \text{รายจ่ายในปีที่ } n &= \text{รายจ่ายปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\ \text{รายรับในปีที่ } n &= \text{รายรับปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\ \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับในปีที่ } n - \text{รายจ่ายในปีที่ } n \\ \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n-1 + \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n \end{aligned}$$

ช.2 การคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของกระบวนการนำกลับกรดขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร

ช.2.1 การคำนวณหาการสูญเสียรายได้จากปริมาณกรดที่ใช้ในการกำจัดสนิม โดยพิจารณาจากกระบวนการกำจัดสนิมแบบกะ ที่ไม่มีกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก มีรายละเอียดดังนี้

ปริมาณกรดเสีย	5	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
กรดเสียมีปริมาณกรดไฮโดรคลอริก	28	กรัมต่อลิตร
<b>กรดไฮโดรคลอริก</b>		
จะสูญเสียกรดไฮโดรคลอริก	35,563	kg/ปี
คิดเป็นกรดไฮโดรคลอริก 35 %	101,607	kg/ปี
คิดเป็นเงินที่จะต้องเสีย	304,821	บาทต่อปี
<b>โซเดียมไฮดรอกไซด์</b>		
จะสูญเสียโซเดียมไฮดรอกไซด์	42,870	kg/ปี
คิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 %	85,740	kg/ปี
คิดเป็นเงินที่จะต้องเสีย	685,918	บาทต่อปี
<b>รวมเป็นเงินที่จะต้องสูญเสีย</b>	<b>990,739</b>	<b>บาทต่อปี</b>

การคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของกรดเสีย} &= (\text{ความเข้มข้นกรด } 5 \%) * 0.56 \\ \text{การสูญเสียกรดไฮโดรไฮโดรคลอริก} &= (\text{ความเข้มข้นกรดเสีย}) * (\text{ปริมาณกรดเสีย}) * (250 \text{ วัน/ปี}) \\ \text{กรดไฮโดรคลอริก } 35 \% &= (\text{การสูญเสียกรดไฮโดรคลอริก}) * (100/35) \\ \text{การสูญเสียโซเดียมไฮดรอกไซด์} &= (\text{การสูญเสียกรดไฮโดรไฮโดรคลอริก}) * (40/36.5) * (1.1) \\ \text{โซเดียมไฮดรอกไซด์ } 50 \% &= (\text{การสูญเสียโซเดียมไฮดรอกไซด์}) * (100/50) \end{aligned}$$

ช.2.2 การคำนวณสำหรับกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก มีรายละเอียดดังนี้

เรซินบำบัดกรดได้	21	BV
เวลาในการปฏิบัติงาน	3	ชั่วโมง
อัตราการไหล	1667	ลิตร/ชั่วโมง
ดังนั้น ใช้ปริมาตรเรซิน	291	ลิตร
ราคาเรซินลิตรละ	51	บาท/ลิตร
รวมเป็นเงินค่าเรซินทั้งหมด	14,792	บาท
<b>ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง</b>	<b>2,014,792</b>	<b>บาท</b>
<b>รายจ่าย</b>		
ค่าซ่อมบำรุง	40,296	บาท/ปี
ค่าแรงงาน	24,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	24,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านการใช้น้ำ	89,250	<b>บาท/ปี</b>
<b>รวมค่าใช้จ่ายต่อปี</b>	<b>177,546</b>	<b>บาท/ปี</b>
<b>รายรับ</b>		
กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%)	71,125	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	213,375	บาท/ปี
ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%)	62,356	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	498,849	บาท/ปี
<b>รวมรายรับต่อปี</b>	<b>712,224</b>	<b>บาท/ปี</b>

การคำนวณ

เรซินบำบัดกรดได้ 21 BV หมายถึง เรซิน 1 ลิตรสามารถบำบัดกรดได้ 21 ลิตร  
 เวลาในการปฏิบัติงาน 3 ชั่วโมง หมายถึง การทำงาน 1 ครั้ง ใช้เวลาในการบำบัดกรด 3 ชั่วโมง  
 อัตราการไหลในกระบวนการ = (ปริมาณกรดเสียใน 1 วัน) / (เวลาในการปฏิบัติงาน)  
 ปริมาตรเรซิน = (ปริมาณกรดเสีย) \* 1.2 / (21 BV)  
 ค่าซ่อมบำรุง = (0.02 \* ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง)  
 กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%) = (70% ของปริมาณกรดที่สูญเสีย)  
 ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%) = (กรดที่ดึงกลับมาได้) \* (40 MW/36.5 MW) \* (35%/50%)

หมายเหตุ ข้อมูลต่างๆ นำมาจากผลการทดลองที่ได้ในกรณีตัวอย่างที่ 3 ในหัวข้อ 5.4.3 ซึ่งเป็นกรณีเสียชนิดเดียวกับกรณีที่น่าวิเคราะห์

เมื่อนำมาวิเคราะห์หาปีที่คืนทุนจะได้รายละเอียดดังตาราง ข.4

ตาราง ข.4 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของกระบวนการที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร

ปี	รายจ่าย/ปี	รายรับ/ปี	รายรับสุทธิ/ปี	รายรับรวมสุทธิ
0	0	0	0	-2,014,792
1	172,375	691,480	519,105	-1,495,687
2	167,354	671,340	503,986	-991,701
3	162,480	651,786	489,307	-502,394
4	157,747	632,802	475,055	-27,339
5	153,153	614,371	461,218	433,879
6	148,692	596,477	447,785	881,664
7	144,361	579,104	434,743	1,316,406
8	140,156	562,236	422,080	1,738,486
9	136,074	545,861	409,787	2,148,273
10	132,111	529,962	397,851	2,546,124
11	128,263	514,526	386,263	2,932,387
12	124,527	499,540	375,013	3,307,400
13	120,900	484,990	364,090	3,671,490
14	117,379	470,864	353,485	4,024,975
15	113,960	457,150	343,190	4,368,165

หมายเหตุ ดัชนีราคา 1.03 (103 %)

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่ } \text{รายจ่ายในปีที่ } n &= \text{รายจ่ายปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับในปีที่ } n &= \text{รายรับปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับในปีที่ } n - \text{รายจ่ายในปีที่ } n \\
 \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n-1 + \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n
 \end{aligned}$$

ช.2.3 การคำนวณสำหรับกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยน อีออนลบ มีรายละเอียดดังนี้

เรซินบำบัดกรดได้	17	BV
เวลาในการปฏิบัติงาน	3	ชั่วโมง
อัตราการไหล	2,000	ลิตร/ชั่วโมง
ดังนั้น ใช้ปริมาณเรซิน	349	ลิตร
ราคาเรซินลิตรละ	153	บาท/ลิตร
รวมเป็นเงินค่าเรซินทั้งหมด	53,251	บาท
<b>ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง</b>	<b>2,453,251</b>	<b>บาท</b>
<b>รายจ่าย</b>		
ค่าซ่อมบำรุง	49,065	บาท/ปี
ค่าแรงงาน	24,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	24,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านการใช้น้ำ	89,250	บาท/ปี
ค่าไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์	150,000	บาท/ปี
<b>รวมค่าใช้จ่ายต่อปี</b>	<b>336,315</b>	<b>บาท/ปี</b>
<b>รายรับ</b>		
กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%)	91,446	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	274,339	บาท/ปี
ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%)	80,172	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	641,378	บาท/ปี
<b>รวมรายรับต่อปี</b>	<b>915,717</b>	<b>บาท/ปี</b>

การคำนวณ

เรซินบำบัดกรดได้ 17 BV หมายถึง เรซิน 1 ลิตรสามารถบำบัดกรดได้ 17 ลิตร  
 เวลาในการปฏิบัติงาน 3 ชั่วโมง หมายถึง การทำงาน 1 ครั้ง ใช้เวลาในการบำบัดกรด 3 ชั่วโมง  
 อัตราการไหลในกระบวนการ = (ปริมาณกรดเสียใน 1 วัน) / (เวลาในการปฏิบัติงาน)  
 ปริมาณเรซิน = (ปริมาณกรดเสีย) \* 1.2 / (17 BV)  
 ค่าซ่อมบำรุง = (0.02 \* ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง)  
 กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%) = (95% ของปริมาณกรดที่สูญเสีย)  
 ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%) = (กรดที่ดึงกลับมาได้) \* (40 MW/36.5 MW) \* (35%/50%)

หมายเหตุ ข้อมูลต่างๆ นำมาจากผลการทดลองที่ได้ในกรณีตัวอย่างที่ 3 ในหัวข้อ 5.4.3 ซึ่งเป็นกรณีเสี่ยงชนิดเดียวกับกรณีที่น่าวิเคราะห์

เมื่อนำมาวิเคราะห์หาปีที่คืนทุนจะได้รายละเอียดดังตาราง ข.5

ตาราง ข.5 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของกระบวนการที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร

ปี	รายจ่าย/ปี	รายรับ/ปี	รายรับสุทธิ/ปี	รายรับรวมสุทธิ
0	0	0	0	-2,453,251
1	326,519	889,046	562,526	-1,890,725
2	317,009	863,151	546,142	-1,344,583
3	307,776	838,011	530,235	-814,348
4	298,812	813,603	514,791	-299,557
5	290,108	789,906	499,797	200,240
6	281,659	766,899	485,240	685,480
7	273,455	744,562	471,107	1,156,587
8	265,490	722,875	457,385	1,613,972
9	257,757	701,821	444,063	2,058,036
10	250,250	681,379	431,129	2,489,165
11	242,961	661,533	418,572	2,907,738
12	235,885	642,265	406,381	3,314,118
13	229,014	623,559	394,545	3,708,663
14	222,344	605,397	383,053	4,091,716
15	215,868	587,764	371,896	4,463,612

หมายเหตุ ดัชนีราคา 1.03 (103 %)

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่ } \text{รายจ่ายในปีที่ } n &= \text{รายจ่ายปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับในปีที่ } n &= \text{รายรับปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับในปีที่ } n - \text{รายจ่ายในปีที่ } n \\
 \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n-1 + \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n
 \end{aligned}$$



ข.2.4 การคำนวณสำหรับกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้กระบวนการที่ออกแบบในงานวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

เรซินบำบัดกรดได้	18	BV
เวลาในการปฏิบัติงาน	3	ชั่วโมง
อัตราการไหล	1,875	ลิตร/ชั่วโมง
ดังนั้น ใช้ปริมาตรเรซิน	327	ลิตร
ราคาเรซินลิตรละ	102	บาท/ลิตร
รวมเป็นเงินค่าเรซินทั้งหมด	33,282	บาท
<b>ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง</b>	<b>2,233,282</b>	<b>บาท</b>
<b>รายจ่าย</b>		
ค่าซ่อมบำรุง	44,666	บาท/ปี
ค่าแรงงาน	24,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	24,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านการใช้น้ำ	89,250	บาท/ปี
ค่าไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์	75,000	บาท/ปี
<b>รวมค่าใช้จ่ายต่อปี</b>	<b>256,916</b>	<b>บาท/ปี</b>
<b>รายรับ</b>		
กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%)	86,366	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	259,098	บาท/ปี
ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%)	75,718	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	605,746	บาท/ปี
<b>รวมรายรับต่อปี</b>	<b>864,844</b>	<b>บาท/ปี</b>

การคำนวณ

เรซินบำบัดกรดได้ 18 BV หมายถึง เรซิน 1 ลิตรสามารถบำบัดกรดได้ 18 ลิตร  
 เวลาในการปฏิบัติงาน 3 ชั่วโมง หมายถึง การทำงาน 1 ครั้ง ใช้เวลาในการบำบัดกรด 3 ชั่วโมง  
 อัตราการไหลในกระบวนการ = (ปริมาณกรดเสียใน 1 วัน) / (เวลาในการปฏิบัติงาน)  
 ปริมาตรเรซิน = (ปริมาณกรดเสีย) \* 1.2 / (18 BV)  
 ค่าซ่อมบำรุง = (0.02 \* ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง)  
 กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%) = (85% ของปริมาณกรดที่สูญเสีย)  
 ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%) = (กรดที่ดึงกลับมาได้) \* (40 MW/36.5 MW) \* (35%/50%)

หมายเหตุ ข้อมูลต่างๆ นำมาจากผลการทดลองที่ได้ในกรณีตัวอย่างที่ 3 ในหัวข้อ 5.4.3 ซึ่งเป็นกรณีเสียชนิดเดียวกับกรณีที่น่าวิเคราะห์

เมื่อนำมาวิเคราะห์หาปีที่คืนทุนจะได้รายละเอียดดังตาราง ข. 6

ตาราง ข.6 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของกระบวนการที่ออกแบบในงานวิจัย สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 5 ลูกบาศก์เมตร

ปี	รายจ่าย/ปี	รายรับ/ปี	รายรับสุทธิ/ปี	รายรับรวมสุทธิ
0	0	0	0	-2,233,282
1	249,433	839,654	590,221	-1,643,061
2	242,168	815,198	573,030	-1,070,031
3	235,115	791,455	556,340	-513,690
4	228,267	768,403	540,136	26,446
5	221,618	746,022	524,404	550,849
6	215,163	724,293	509,130	1,059,979
7	208,896	703,197	494,301	1,554,280
8	202,812	682,716	479,904	2,034,184
9	196,905	662,831	465,926	2,500,110
10	191,170	643,525	452,355	2,952,466
11	185,602	624,782	439,180	3,391,646
12	180,196	606,584	426,388	3,818,034
13	174,947	588,917	413,969	4,232,003
14	169,852	571,764	401,912	4,633,915
15	164,905	555,110	390,206	5,024,121

หมายเหตุ ดัชนีราคา 1.03 (103 %)

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่ } \text{รายจ่ายในปีที่ } n &= \text{รายจ่ายปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับในปีที่ } n &= \text{รายรับปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับในปีที่ } n - \text{รายจ่ายในปีที่ } n \\
 \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n-1 + \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n
 \end{aligned}$$

ช.3 การคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของกระบวนการนำกลับกรดขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร

ช.3.1 การคำนวณหาการสูญเสียรายได้จากปริมาณกรดที่ใช้ในการกำจัดสนิม โดยพิจารณาจากกระบวนการกำจัดสนิมแบบกะ ที่ไม่มีกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก มีรายละเอียดดังนี้

ปริมาณกรดเสีย	15	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
กรดเสียมีปริมาณกรดไฮโดรคลอริก	28	กรัมต่อลิตร
<b>กรดไฮโดรคลอริก</b>		
จะสูญเสียกรดไฮโดรคลอริก	106,688	kg/ปี
คิดเป็นกรดไฮโดรคลอริก 35 %	304,821	kg/ปี
คิดเป็นเงินที่จะต้องเสีย	914,464	บาทต่อปี
<b>โซเดียมไฮดรอกไซด์</b>		
จะสูญเสียโซเดียมไฮดรอกไซด์	128,610	kg/ปี
คิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 %	257,219	kg/ปี
คิดเป็นเงินที่จะต้องเสีย	2,057,753	บาทต่อปี
<b>รวมเป็นเงินที่จะต้องสูญเสีย</b>	<b>2,972,218</b>	<b>บาทต่อปี</b>

การคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้นของกรดเสีย} = (\text{ความเข้มข้นกรด } 5\%) * 0.56$$

$$\text{การสูญเสียกรดไฮโดรไฮโดรคลอริก} = (\text{ความเข้มข้นกรดเสีย}) * (\text{ปริมาณกรดเสีย}) * (250 \text{ วัน/ปี})$$

$$\text{กรดไฮโดรคลอริก } 35\% = (\text{การสูญเสียกรดไฮโดรคลอริก}) * (100/35)$$

$$\text{การสูญเสียโซเดียมไฮดรอกไซด์} = (\text{การสูญเสียกรดไฮโดรไฮโดรคลอริก}) * (40/36.5) * (1.1)$$

$$\text{โซเดียมไฮดรอกไซด์ } 50\% = (\text{การสูญเสียโซเดียมไฮดรอกไซด์}) * (100/50)$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ช.3.2 การคำนวณสำหรับกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก มีรายละเอียดดังนี้

เรซินบำบัดกรดได้	21	BV
เวลาในการปฏิบัติงาน	3	3
อัตราการไหล	1667	5,000
ดังนั้น ใช้ปริมาตรเรซิน	873	ลิตร
ราคาเรซินลิตรละ	51	บาท/ลิตร
รวมเป็นเงินค่าเรซินทั้งหมด	44,376	บาท
<b>ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง</b>	<b>4,044,376</b>	<b>บาท</b>
<b>รายจ่าย</b>		
ค่าซ่อมบำรุง	80,888	บาท/ปี
ค่าแรงงาน	24,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	72,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านการใช้น้ำ	267,750	<b>บาท/ปี</b>
<b>รวมค่าใช้จ่ายต่อปี</b>	<b>444,638</b>	<b>บาท/ปี</b>
<b>รายรับ</b>		
กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%)	213,375	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	640,125	บาท/ปี
ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%)	187,068	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	1,496,548	บาท/ปี
<b>รวมรายรับต่อปี</b>	<b>2,136,673</b>	<b>บาท/ปี</b>

การคำนวณ

เรซินบำบัดกรดได้ 21 BV หมายถึง เรซิน 1 ลิตรสามารถบำบัดกรดได้ 21 ลิตร  
 เวลาในการปฏิบัติงาน 3 ชั่วโมง หมายถึง การทำงาน 1 ครั้ง ใช้เวลาในการบำบัดกรด 3 ชั่วโมง  
 อัตราการไหลในกระบวนการ = (ปริมาณกรดเสียใน 1 วัน) / (เวลาในการปฏิบัติงาน)  
 ปริมาตรเรซิน = (ปริมาณกรดเสีย) \* 1.2 / (21 BV)  
 ค่าซ่อมบำรุง = (0.02 \* ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง)  
 กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%) = (70% ของปริมาณกรดที่สูญเสีย)  
 ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%) = (กรดที่ดึงกลับมาได้) \* (40 MW/36.5 MW) \* (35%/50%)

หมายเหตุ ข้อมูลต่างๆ นำมาจากผลการทดลองที่ได้ในกรณีตัวอย่างที่ 3 ในหัวข้อ 5.4.3 ซึ่งเป็นกรณีเสี่ยงชนิดเดียวกับกรณีที่น่าวิเคราะห์

เมื่อนำมาวิเคราะห์หาปีที่คืนทุนจะได้รายละเอียดดังตาราง ข.7

ตาราง ข.7 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของกระบวนการที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร

ปี	รายจ่าย/ปี	รายรับ/ปี	รายรับสุทธิ/ปี	รายรับรวมสุทธิ
0	0	0	0	-4,044,376
1	431,687	2,074,440	1,642,753	-2,401,623
2	419,114	2,014,019	1,594,906	-806,717
3	406,906	1,955,358	1,548,452	741,735
4	395,055	1,898,406	1,503,352	2,245,086
5	383,548	1,843,113	1,459,565	3,704,651
6	372,377	1,789,430	1,417,053	5,121,704
7	361,531	1,737,311	1,375,780	6,497,484
8	351,001	1,686,709	1,335,708	7,833,192
9	340,778	1,637,582	1,296,804	9,129,996
10	330,852	1,589,885	1,259,033	10,389,029
11	321,216	1,543,578	1,222,362	11,611,392
12	311,860	1,498,619	1,186,760	12,798,151
13	302,777	1,454,970	1,152,194	13,950,345
14	293,958	1,412,593	1,118,635	15,068,980
15	285,396	1,371,449	1,086,053	16,155,033

หมายเหตุ ดัชนีราคา 1.03 (103 %)

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่ } \text{รายจ่ายในปีที่ } n &= \text{รายจ่ายปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับในปีที่ } n &= \text{รายรับปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับในปีที่ } n - \text{รายจ่ายในปีที่ } n \\
 \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n-1 + \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n
 \end{aligned}$$

ช.3.3 การคำนวณสำหรับกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยน อีออนลบ มีรายละเอียดดังนี้

เรซินบำบัดกรดได้	17	BV
เวลาในการปฏิบัติงาน	3	ชั่วโมง
อัตราการไหล	6,000	ลิตร/ชั่วโมง
ดังนั้น ใช้ปริมาตรเรซิน	1,047	ลิตร
ราคาเรซินลิตรละ	153	บาท/ลิตร
รวมเป็นเงินค่าเรซินทั้งหมด	159,753	บาท
<b>ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง</b>	<b>4,659,753</b>	<b>บาท</b>
<b>รายจ่าย</b>		
ค่าซ่อมบำรุง	93,195	บาท/ปี
ค่าแรงงาน	24,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	72,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านการใช้น้ำ	267,750	บาท/ปี
ค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	450,000	บาท/ปี
<b>รวมค่าใช้จ่ายต่อปี</b>	<b>906,945</b>	<b>บาท/ปี</b>
<b>รายรับ</b>		
กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%)	274,339	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	823,018	บาท/ปี
ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%)	240,517	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	1,924,133	บาท/ปี
<b>รวมรายรับต่อปี</b>	<b>2,747,151</b>	<b>บาท/ปี</b>

การคำนวณ

เรซินบำบัดกรดได้ 17 BV หมายถึง เรซิน 1 ลิตรสามารถบำบัดกรดได้ 17 ลิตร  
 เวลาในการปฏิบัติงาน 3 ชั่วโมง หมายถึง การทำงาน 1 ครั้ง ใช้เวลาในการบำบัดกรด 3 ชั่วโมง  
 อัตราการไหลในกระบวนการ = (ปริมาณกรดเสียใน 1 วัน) / (เวลาในการปฏิบัติงาน)  
 ปริมาตรเรซิน = (ปริมาณกรดเสีย) \* 1.2 / (17 BV)  
 ค่าซ่อมบำรุง = (0.02 \* ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง)  
 กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%) = (95% ของปริมาณกรดที่สูญเสีย)  
 ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%) = (กรดที่ดึงกลับมาได้) \* (40 MW/36.5 MW) \* (35%/50%)

หมายเหตุ ข้อมูลต่างๆ นำมาจากผลการทดลองที่ได้ในกรณีตัวอย่างที่ 3 ในหัวข้อ 5.4.3 ซึ่งเป็นกรณีเสียชนิดเดียวกับกรณีที่น่าวิเคราะห์

เมื่อนำมาวิเคราะห์หาปีที่คืนทุนจะได้รายละเอียดดังตาราง ข.8

ตาราง ข.8 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของกระบวนการที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร

ปี	รายจ่าย/ปี	รายรับ/ปี	รายรับสุทธิ/ปี	รายรับรวมสุทธิ
0	0	0	0	-4,659,753
1	880,529	2,667,137	1,786,608	-2,873,146
2	854,883	2,589,453	1,734,571	-1,138,575
3	829,983	2,514,032	1,684,049	545,474
4	805,809	2,440,808	1,634,999	2,180,473
5	782,339	2,369,717	1,587,378	3,767,851
6	759,552	2,300,696	1,541,143	5,308,994
7	737,429	2,233,685	1,496,256	6,805,250
8	715,951	2,168,626	1,452,676	8,257,926
9	695,098	2,105,462	1,410,365	9,668,290
10	674,852	2,044,138	1,369,286	11,037,576
11	655,196	1,984,600	1,329,404	12,366,980
12	636,113	1,926,796	1,290,683	13,657,664
13	617,585	1,870,676	1,253,091	14,910,754
14	599,597	1,816,190	1,216,593	16,127,347
15	582,133	1,763,292	1,181,158	17,308,505

หมายเหตุ ดัชนีราคา 1.03 (103 %)

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่ } \text{รายจ่ายในปีที่ } n &= \text{รายจ่ายปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับในปีที่ } n &= \text{รายรับปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับในปีที่ } n - \text{รายจ่ายในปีที่ } n \\
 \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n-1 + \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n
 \end{aligned}$$

ข.3.4 การคำนวณสำหรับกระบวนการนำกลับกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้กระบวนการที่ออกแบบในงานวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

เรซินบำบัดกรดได้	18	BV
เวลาในการปฏิบัติงาน	3	ชั่วโมง
อัตราการไหล	5,625	ลิตร/ชั่วโมง
ดังนั้น ใช้ปริมาตรเรซิน	982	ลิตร
ราคาเรซินลิตรละ	102	บาท/ลิตร
รวมเป็นเงินค่าเรซินทั้งหมด	99,846	บาท
<b>ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง</b>	<b>4,299,846</b>	<b>บาท</b>
<b>รายจ่าย</b>		
ค่าซ่อมบำรุง	85,997	บาท/ปี
ค่าแรงงาน	24,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	72,000	บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายด้านการใช้น้ำ	267,750	บาท/ปี
ค่าไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์	225,000	บาท/ปี
<b>รวมค่าใช้จ่ายต่อปี</b>	<b>674,747</b>	<b>บาท/ปี</b>
<b>รายรับ</b>		
กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%)	259,098	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	777,295	บาท/ปี
ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%)	227,155	kg/ปี
คิดเป็นเงิน	1,817,237	บาท/ปี
<b>รวมรายรับต่อปี</b>	<b>2,594,531</b>	<b>บาท/ปี</b>

การคำนวณ

เรซินบำบัดกรดได้ 18 BV หมายถึง เรซิน 1 ลิตรสามารถบำบัดกรดได้ 18 ลิตร  
 เวลาในการปฏิบัติงาน 3 ชั่วโมง หมายถึง การทำงาน 1 ครั้ง ใช้เวลาในการบำบัดกรด 3 ชั่วโมง  
 อัตราการไหลในกระบวนการ = (ปริมาณกรดเสียใน 1 วัน) / (เวลาในการปฏิบัติงาน)  
 ปริมาตรเรซิน = (ปริมาณกรดเสีย) \* 1.2 / (18 BV)  
 ค่าซ่อมบำรุง = (0.02 \* ค่าอุปกรณ์และการติดตั้ง)  
 กรดที่ดึงกลับมาได้ (ตัน HCl 35%) = (85% ของปริมาณกรดที่สูญเสีย)  
 ต่างที่สามารถลดได้ (ตัน NaOH 50%) = (กรดที่ดึงกลับมาได้) \* (40 MW/36.5 MW) \* (35%/50%)



หมายเหตุ ข้อมูลต่างๆ นำมาจากผลการทดลองที่ได้ในกรณีตัวอย่างที่ 3 ในหัวข้อ 5.4.3 ซึ่งเป็นกรณีเสี่ยงชนิดเดียวกับกรณีที่น่าวิเคราะห์

เมื่อนำมาวิเคราะห์หาปีที่คืนทุนจะได้รายละเอียดดังตาราง ข.9

ตาราง ข.9 ตารางวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของกระบวนการที่ออกแบบในงานวิจัย สำหรับกระบวนการที่มีขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร

ปี	รายจ่าย/ปี	รายรับ/ปี	รายรับสุทธิ/ปี	รายรับรวมสุทธิ
0	0	0	0	-4,299,846
1	655,094	2,518,963	1,863,868	-2,435,978
2	636,014	2,445,595	1,809,581	-626,397
3	617,489	2,374,364	1,756,875	1,130,478
4	599,504	2,305,208	1,705,704	2,836,182
5	582,043	2,238,066	1,656,023	4,492,205
6	565,090	2,172,879	1,607,789	6,099,994
7	548,631	2,109,591	1,560,960	7,660,954
8	532,652	2,048,147	1,515,496	9,176,450
9	517,137	1,988,492	1,471,355	10,647,805
10	502,075	1,930,575	1,428,500	12,076,305
11	487,452	1,874,345	1,386,893	13,463,198
12	473,254	1,819,752	1,346,498	14,809,696
13	459,470	1,766,750	1,307,280	16,116,976
14	446,087	1,715,291	1,269,204	17,386,179
15	433,094	1,665,331	1,232,237	18,618,416

หมายเหตุ ดัชนีราคา 1.03 (103 %)

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่ } \text{รายจ่ายในปีที่ } n &= \text{รายจ่ายปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับในปีที่ } n &= \text{รายรับปีปัจจุบัน} / (1.03^n) \\
 \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับในปีที่ } n - \text{รายจ่ายในปีที่ } n \\
 \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n &= \text{รายรับรวมสุทธิในปีที่ } n-1 + \text{รายรับสุทธิในปีที่ } n
 \end{aligned}$$

หมายเหตุ ข้อมูลต่างๆ อ้างอิงจากหนังสือ “คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมการแปรรูปเหล็กและกระบวนการกำจัดสนิม” ของสำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอาทร วุฒิสัตย์วงศ์กุล เกิดวันที่ 7 มิถุนายน 2519 สำเร็จการศึกษาในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ จากวิทยาลัยเทคนิคประจวบคีรีขันธ์ เมื่อ พ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อ พ.ศ. 2541 ในปีการศึกษา 2542 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย