

การละลายของสังกะสีออกจากตะกอนน้ำเสียอิเล็กทรอนิกส์



นาย วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

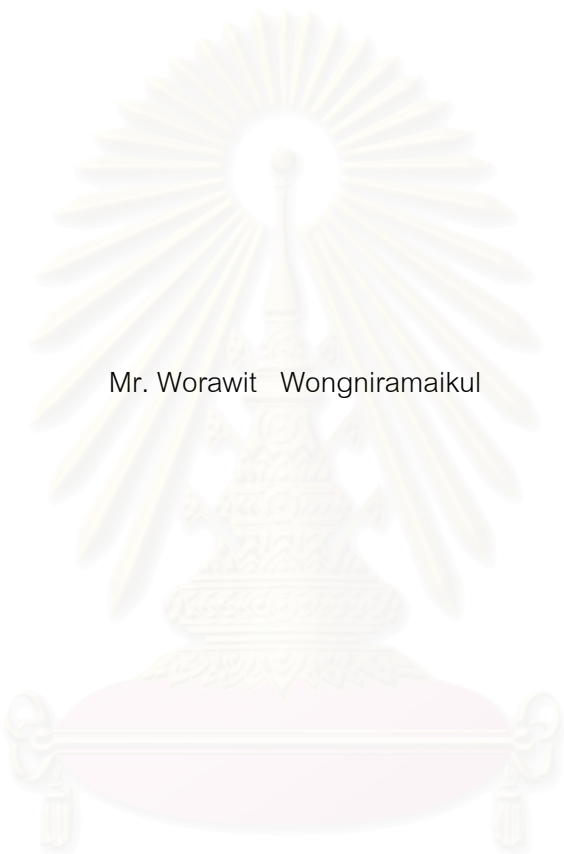
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0123-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DISSOLUTION OF ZINC FROM ELECTRONIC WASTEWATER SLUDGE



Mr. Worawit Wongniramaikul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology  
Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-17-0123-3



ชื่อ นายวรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล : การละลายของสังกะสีออกจากตะกอนน้ำเสียอิเล็กทรอนิกส์  
(Dissolution of Zinc from Electronic Wastewater Sludge) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.เก็จวัลลี  
พฤกษาทรร, จำนวนหน้า 87 หน้า. ISBN 974-17-0123-3.

ตะกอนน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการบำบัดโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) นั้น โดยทั่วไปมักจะถูกนำไปบำบัดต่อด้วยกระบวนการฝังกลบ (Landfill) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย แต่มีข้อจำกัดหลายประการ **อีกทั้งยังเป็นการสูญเสียสารบางชนิดที่อาจนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้** เช่น โลหะหนักต่างๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาการละลายสังกะสีออกจากตะกอนด้วยกรด (Acid Leaching) เพื่อง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการต่างๆต่อไป กรดที่ใช้ คือ กรดซัลฟูริก และตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ **ค่าความเป็นกรด - เบส (pH) ของกรด, ปริมาณตะกอนเริ่มต้นหรือร้อยละของแข็ง (%Solid), อัตราการกวน และอุณหภูมิของระบบ** ในการศึกษาแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองกับ ตะกอนสังเคราะห์ และ ตะกอนจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อ**ค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้น** โลหะสังกะสีจะละลายได้น้อยลง และสังกะสีจะละลายได้ทั้งหมด ถ้า**ค่าความเป็นกรด - เบส** อยู่ในช่วง 1 -2 โดยอันดับของปฏิกิริยาการละลายเป็นแบบ**ปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 1 (Pseudo-first order reaction)** นอกจากนี้พบว่า ถ้าเพิ่มปริมาณตะกอนแห้งของ  $Zn(OH)_2$  เริ่มต้นหรือร้อยละของแข็งให้มากขึ้น สังกะสีจะละลายได้มากขึ้นและมีค่าสูงสุดเมื่อร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร **อุณหภูมิมิผลต่อการละลายของสังกะสีไม่มากนัก** โดยปฏิกิริยาการละลายเป็นแบบดูดความร้อน (Endothermic Reaction) อัตราการกวน**ในช่วงที่ศึกษา**ไม่มีผลต่ออัตราเร็วของการละลาย สำหรับตะกอนน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีโลหะหนักปนเปื้อนในตะกอนอยู่หลายชนิด พบว่า ให้ผลไปในทิศทางเดียวกับตะกอนสังเคราะห์ แต่จะแตกต่างกันที่สังกะสีละลายได้น้อยกว่า โดย**ค่าการละลายจะสูงสุดที่ 25 เปอร์เซ็นต์** จากการศึกษาทางด้านจลนพลศาสตร์ของการละลาย พบว่า สำหรับตะกอนสังเคราะห์ กลไกการเกิดปฏิกิริยาถูกควบคุมด้วยขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเพียง**ขั้นตอนเดียว** ส่วนตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม จะถูกควบคุมด้วยสองขั้นตอน คือ **ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาและขั้นตอนการแพร่**

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา 2544

# # 4272386423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: DISSOLUTION / SOLUBILITY / KINETIC / ZINC / LEACHING

WORAWIT WONGNIRAMAikul : DISSOLUTION OF ZINC FROM ELECTRONIC  
WASTEWATER SLUDGE. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. KEJVALEE  
PRUKSATHORN, Ph.D, 87 pp. ISBN 974-17-0123-3.

In general, the industrial wastewater treatment sludge produced by chemical precipitation process are disposed by landfill because of its easiness. However, this process have many limits and the lost of some substances which can be reused. For this reason, the study about zinc dissolution from sludge by acid leaching, is interested. Sulphuric acid is used in this research. The effect of acid pH, an initial amount of sludge or % solid, a stirring rate and temperature on zinc dissolution is investigated. The experiment is divided into two parts which are a test of the synthetic sludge and the industrial sludge. From a result of the artificial sludge, it shows that zinc solubility varies against with pH and zinc can be completely dissolved when pH is in a range of 1 – 2. In addition, its reaction is pseudo – first order reaction. A maximum solubility is reached when % solid is 1.4 % weight by volume. Furthermore, it reveals that the change in temperature slightly affects to zinc dissolution and this is endothermic reaction. On the stirring rate aspect, it is found that the stirring speed is no effect on zinc dissolution. The test of the authentic sludge shows that the tendency of zinc dissolution is likely to synthetic sludge but an amount of dissolved zinc is less than the other. At the equilibrium, zinc solubility is found 25 % only. The kinetic study indicates that the dissolution mechanism of the synthetic sludge is controlled by the reaction step while the industrial sludge is controlled by 2 steps, the reaction and diffusion step.

Department.....Chemical Technology.....Student's signature.....

Field of study.....Chemical Technology.....Advisor's signature.....

Academic year .....2001.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผศ.ดร. เก็จวดี พุกษาทร อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้สละเวลาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในงานวิจัย ด้วยดีตลอดมาโดยไม่เห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อย และขอขอบพระคุณ ศ.ดร.สมศักดิ์ ดำรงเลิศ ที่ให้กรุณาให้ข้อเสนอแนะ รวมถึงช่วยติดต่อให้ผู้วิจัยได้ไปใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy ที่บริษัท อี บี เอส ฟาร์อีส จำกัด ในการวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสีที่ละลายออกมา

ผู้วิจัยขอขอบคุณประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้ความสนใจพร้อมให้คำแนะนำต่องานวิจัยฉบับนี้ รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้การอบรมสั่งสอนด้านวิชาการตลอดมา

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการเมธีวิจัยอาวุโสของศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ และ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณณรงค์ ชัยพันธ์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการที่ช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยตลอดมา และขอขอบคุณพี่ๆทุกคนที่บริษัท อี บี เอส ฟาร์อีส จำกัด ที่ช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ และที่ขาดไม่ได้ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาคเคมีเทคนิคทุกคน ที่คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือตลอดเวลาที่ทำการทดลอง

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำลังใจแก่ผู้เขียนเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ด
คำอธิบายคำย่อ.....	ธ
บทที่.....	1
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 น้ำเสีย.....	4
2.1.1) ประเภทและแหล่งน้ำเสีย.....	4
2.1.2) ลักษณะสมบัติน้ำเสีย.....	5
2.1.3) การควบคุมมลภาวะทางน้ำและมาตรฐานน้ำทิ้ง.....	6
2.2 หลักการและกระบวนการบำบัดน้ำเสีย.....	7
2.2.1) การกำจัดน้ำเสียอุตสาหกรรม.....	7
2.2.2) การบำบัดน้ำเสีย.....	8
2.3 การตกตะกอนเคมี.....	10
2.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการละลาย.....	17
2.4.1) การละลายของตะกอนในน้ำบริสุทธิ์.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2) การละลายของตะกอนในสารละลายที่มีองค์ประกอบ ของตะกอนละลายอยู่.....	19
2.4.3) อิทธิพลของสมมูลเคมีต่าง ๆ ที่มีผลต่อการละลายของ ตะกอน.....	19
2.4.4) ผลของ pH ต่อการละลายของตะกอน.....	20
2.4.5) ผลกระทบต่อการละลายของตะกอนเนื่องจากตัวถูกละลาย ที่ไม่แตกตัว.....	21
2.4.6) ผลการเกิดสารเชิงซ้อนที่มีต่อการละลายของตะกอน.....	23
2.5 การละลายตะกอนชนิดโลหะไฮดรอกไซด์.....	24
2.6 ประเภทของกระบวนการละลายโลหะหนักออกจากตะกอน.....	25
2.7 ความสัมพันธ์ทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมี.....	28
2.7.1) การจำแนกประเภทของปฏิกิริยา.....	28
2.7.2) อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา.....	28
2.7.3) อันดับของปฏิกิริยา.....	31
2.7.4) ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	31
2.7.5) ปฏิกิริยาวិวิพันธุ์แบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	32
2.7.6) กลไกการเกิดปฏิกิริยา.....	34
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
2.8.1) งานวิจัยในประเทศ.....	39
2.8.2) งานวิจัยต่างประเทศ.....	40
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	44
3.1 รูปแบบการศึกษา.....	44
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	44
3.3 สารเคมี.....	45
3.4 วัสดุดิบ.....	45
3.5 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง.....	47
3.5.1) ศึกษาการละลายของสังกะสีจากตะกอนสังเคราะห์.....	47
3.5.2) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการละลายสังกะสีออกจากตะกอน.....	49



สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.3) ทดสอบกับตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์.....	49
4. ผลและการวิเคราะห์ผลการศึกษา.....	50
4.1 ลักษณะตะกอนที่ศึกษา.....	50
4.2 การละลายตะกอนสังเคราะห์ซึ่งไฮดรอกไซด์ด้วยกรดซัลฟูริก.....	52
4.2.1) ผลของค่าความเป็นกรด - เบส.....	52
4.2.2) ผลของอัตราส่วนระหว่างปริมาณตะกอนกับปริมาณกรด (ร้อยละของแข็ง).....	55
4.2.3) ผลของอุณหภูมิ.....	58
4.2.4) ผลของอัตราการกวน.....	59
4.3 จลนพลศาสตร์ของการละลายสังกะสีออกจากตะกอน.....	60
4.3.1) อันดับของปฏิกิริยา.....	60
4.3.2) ค่าพลังงานการกระตุ้น.....	64
4.3.3) กลไกการเกิดปฏิกิริยา.....	66
4.4 ผลการศึกษาการละลายของตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	68
4.4.1) ผลของค่าความเป็นกรด - เบส.....	68
4.4.2) ผลของอุณหภูมิ.....	74
5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	77
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	77
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
รายการอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก.....	83
ภาคผนวก ข.....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	87

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักโดยการเติมปูนขาว.....13
2.2	ค่าความสามารถในการละลาย (Solubility) ของโลหะคาร์บอเนต ต่าง ๆ ( $pH_s = -\log K_s$ ) .....14
2.3	สารเคมีบางชนิดที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย .....15
2.4	ค่าความเป็นกรด - เบสที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดมลสาร ออกจากน้ำเสียด้วยสารเคมีต่าง ๆ .....16
2.5	ข้อดีและข้อเสียของการตกตะกอนทางเคมี.....17
4.1	ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบในตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.....51
4.2	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีจากตะกอนสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 และอัตราการกวน 200 รอบต่อนาที .....65
4.3	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีจากตะกอนจากโรงงาน อุตสาหกรรมที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 และอัตราการกวน 200 รอบต่อนาที .....75
ก - 1	มาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับโลหะหนักชนิดต่าง ๆ .....84
ข - 1	ค่าคงที่การละลายของสารต่าง ๆ ที่ 25 องศาเซลเซียส .....86

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.1	หลักการจัดการควบคุมมลภาวะทางน้ำ .....6
2.2	วิธีการตกตะกอนทางเคมี .....10
2.3	ความเข้มข้นโลหะหนักที่ละลายในน้ำเสียที่ค่าความเป็นกรด - เบสต่าง ๆ ....11
2.4	ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสียที่ค่าความเป็นกรด - เบสต่าง ๆ โดยมีสารแอมโมเนียมปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียด้วย .....12
2.5	Arrhenius Plot .....32
2.6	การเปลี่ยนแปลงของอนุภาคสารตั้งต้นที่เกิดขึ้นระหว่างเกิดปฏิกิริยา .....33
2.7	อนุภาคเริ่มต้นรัศมี $R_0$ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลาย B .....35
3.1	อุปกรณ์การทดลอง .....45
3.2	ลักษณะตะกอนสังเคราะห์ ..... 46
3.3	ลักษณะตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม .....46
4.1	ลักษณะของตะกอนซิงค์ไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น .....50
4.2	ลักษณะของตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม..... 52
4.3	ผลของค่าความเป็นกรด - เบสต่อการละลายของสังกะสีออกจาก ตะกอนสังเคราะห์ที่ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1, อัตราการกวน 200 รอบ ต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส .....53
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด - เบสกับค่าคงที่ของปฏิกิริยา การละลายของสังกะสีออกจากตะกอนสังเคราะห์.....55
4.5	ผลของร้อยละของแข็งต่อการละลายของสังกะสีออกจากตะกอน สังเคราะห์ ที่ค่าความเป็นกรด - เบส 2.75, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส .....56
4.6	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีจากตะกอนสังเคราะห์ ที่ค่าร้อยละของแข็งต่างๆ.....57
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของแข็งกับค่าร้อยละการละลาย ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, อัตราการกวน 200 รอบ ต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส .....58

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.8	ผลของอุณหภูมิต่อการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนสังเคราะห์ ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, อัตราการกวน 200 รอบต่อ นาที และค่าร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.5 .....59
4.9	ผลของอัตราการกวนต่อการละลายของสังกะสีออกจากตะกอน สังเคราะห์ที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างเท่ากับ 2.75, ร้อยละของแข็ง เท่ากับ 1.4 และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส .....60
4.10	ความสัมพันธ์ของปฏิบัติการการละลายตะกอนสังเคราะห์เป็นอันดับที่ 1 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 1.5, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1 อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส .....62
4.11	ความสัมพันธ์ของปฏิบัติการการละลายตะกอนสังเคราะห์เป็นอันดับที่ 3 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 1.5, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1 อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส .....62
4.12	ความสัมพันธ์ของปฏิบัติการการละลายตะกอนสังเคราะห์เป็นอันดับที่ 1 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1 อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....63
4.13	ความสัมพันธ์ของปฏิบัติการการละลายตะกอนสังเคราะห์เป็นอันดับที่ 3 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1 อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....63
4.14	ความสัมพันธ์ของปฏิบัติการอันดับที่ 1 ของการละลายของสังกะสี ออกออกจากตะกอนสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีค่าความเป็นกรด เป็นด่างเท่ากับ 2.75, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 และอัตราการกวน 200 รอบต่อนาที.....64
4.15	Arrhenius Plot สำหรับปฏิบัติการการละลายสังกะสีออกจากตะกอน สังเคราะห์ ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 .....65
4.16	เมื่อการเกิดปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา การละลายสังกะสีออกจากตะกอนสังเคราะห์ .....67

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
4.17	เมื่อการแพร่เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยาการละลาย สังกะสีออกจากตะกอนสังเคราะห์ .....	67
4.18	ผลของค่าความเป็นกรด - เบสต่อการละลายของสังกะสีออกจาก ตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมที่อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส .....	68
4.19	ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการละลายตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นอันดับที่ 1 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 1.5, ร้อยละของแข็ง เท่ากับ 1.4, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส .....	69
4.20	ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการละลายตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นอันดับที่ 3 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 1.5 ร้อยละของแข็ง เท่ากับ 1.4, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.	70
4.21	ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการละลายตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นอันดับที่ 1 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.5, ร้อยละของแข็ง เท่ากับ 1.4, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส .	70
4.22	ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการละลายตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นอันดับที่ 3 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.5, ร้อยละของแข็ง เท่ากับ 1.4, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส .	71
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด - เบสกับค่าคงที่ของ ปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนอุตสาหกรรม.....	72
4.24	เมื่อการเกิดปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา การละลายสังกะสีจากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม .....	73
4.25	เมื่อการแพร่เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยาการละลาย สังกะสีออกจากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม .....	73
4.26	ผลของอุณหภูมิต่อการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนจากโรง งานอุตสาหกรรม ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, อัตรา การกวน 200 รอบต่อนาที และค่าร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 .....	74

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- 4.27 การหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีออกจากตะกอน  
จากโรงงานอุตสาหกรรมที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีค่าความเป็นกรดเป็น  
ด่างเท่ากับ 2.75, รั้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 และอัตราการทวน 200  
รอบต่อนาที .....75
- 4.28 Arrhenius Plot สำหรับปฏิกิริยาการละลายตะกอนสังกะสีจากโรงงาน  
อุตสาหกรรม ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, อัตราการทวน  
รอบต่อนาที และค่ารั้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 .....76



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย
A	Zinc Hydroxide	ซิงค์ไฮดรอกไซด์
a	Stoichiometric of Zinc Hydroxide	สัมประสิทธิ์โมลสารสัมพันธ์ของซิงค์ไฮดรอกไซด์
B	Proton	โปรตอน
°C	Degree Celcius	องศาเซลเซียส
C <sub>A</sub>	Concentration of A	ความเข้มข้นของสาร A ที่เวลาใด ๆ
C <sub>AO</sub>	Initial Concentration of A	ความเข้มข้นของสาร A เริ่มต้น
C <sub>Bg</sub>	Concentration of B in fluid	ความเข้มข้นของสาร B ในกระแสของไหล
C <sub>B</sub>	Concentration of B at Surface	ความเข้มข้นของสาร B ที่ผิวสัมผัส
D <sub>AB</sub>	Diffusivity of Solute A in Solution B	สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร A ใน B
D <sub>p</sub>	Diameter	เส้นผ่านศูนย์กลางของตะกอน
E <sub>A</sub>	Activation Energy	พลังงานกระตุ้น
k	Rate Constant	ค่าคงที่ของปฏิกิริยา
k <sub>g</sub>	Mass Transfer Coefficient	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลระหว่างของไหลกับอนุภาคของตะกอน
K	Kelvin	เคลวิน
K <sub>SO</sub>	Solubility Constant	ค่าคงที่ของการละลายที่ 25 องศาเซลเซียส
ml.	Millilitre	มิลลิลิตร
M	Heavy Metal	โลหะหนัก
MS	Metal Sulfide	โลหะซัลไฟด์

## คำอธิบายคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย
$N_A$	Mole of A	โมลของสาร A หรือ ซิงค์ไฮดรอกไซด์
$N_B$	Mole of B	โมลของสาร B หรือโปรตอน
$N_{Sc}$	Schmidt Number = $\mu / \rho D_{AB}$	
P	Product	ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจาก ปฏิกิริยาการละลาย
r	Radius	รัศมีของอนุภาคของตะกอน ขณะเกิดปฏิกิริยา
$r_A$	Rate of Reaction of A	อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี
R	Gas Constant	ค่าคงที่ของก๊าซ
$R_i$	Initial Radius	รัศมีของอนุภาคของตะกอน เริ่มต้น
$R^2$	Coefficient of Determination	ดัชนีบ่งบอกความชัดเจนของ สหสัมพันธ์ของตัวแปร
S	Surface	พื้นที่ผิวสัมผัส
SEM	Scanning Electron Microscope	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกวาด
t	Time	เวลา
T	Temperature	อุณหภูมิ
V	Solid Volume	ปริมาตรของตะกอน
$X_A$	Conversion of A	สัดส่วนของสิ่งกะสี้ที่ถูก ละลาย
$\rho_A$	Density of A	ความหนาแน่นของสาร A ใน ตะกอน
$\rho_B$	Density of B	ความหนาแน่นของสาร B
$\Delta\rho$	Difference of density between A and B	ความแตกต่างระหว่างของ หนาแน่นของสาร A และ B



คำอธิบายคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย
τ	Complete Conversion of A	สัดส่วนของสังกะสีที่ละลาย เมื่อเกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์
μl.	Microlitre	ไมโครลิตร
% Solubility	Percent Solubility	ร้อยละการละลาย
% Solid	Percent Solid	ร้อยละของแข็ง
%	Percent	เปอร์เซ็นต์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ในปัจจุบัน ประเทศไทยต้องประสบกับปัญหาทางเศรษฐกิจ ส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมหลายต่อหลายแห่งต้องปิดกิจการไป ส่วนโรงงานอุตสาหกรรมที่ยังสามารถดำเนินกิจการต่อไปได้ก็ต้องปรับตัวขนานใหญ่ ทั้งลดขนาดกิจการ กำลังการผลิต กำลังคน รวมถึงลดค่าใช้จ่ายอื่นๆ เพื่อให้สามารถแข่งขันต่อไปได้ และค่าใช้จ่ายด้านหนึ่งที่สำคัญคือค่าใช้จ่ายทางด้านสิ่งแวดล้อม อันได้แก่กระบวนการบำบัดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานเอง

โดยทั่วไปแล้วการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะปนเปื้อนอยู่ของโรงงานอุตสาหกรรม มักจะบำบัดโดยใช้วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Precipitation) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ จากนั้นจึงค่อยนำกากตะกอนที่เกิดขึ้นหรือกากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานโดยตรงไปฝังกลบ (Landfill) แต่ปัจจุบันกระบวนการฝังกลบมีใช้เป็นกระบวนการที่เหมาะสมอีกต่อไป เพราะต้องเผชิญกับปัญหาราคาที่ดินและค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น รวมถึงความยุ่งยากที่เกิดจากกฎหมายทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวดขึ้น นอกจากนี้ การฝังกลบอาจนำมาซึ่งการสูญเสียสารบางชนิดที่เราอาจนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ เช่น โลหะที่มีอยู่ทั่วไปในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนของโรงงานอุตสาหกรรมและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากกากของเสียจึงได้มีการทำการวิจัยเพื่อศึกษาการนำโลหะหนักจากตะกอนกลับมาใช้ใหม่ วิธีการที่ง่ายที่สุด คือ การละลายด้วยตัวทำละลาย จากนั้น จึงค่อยทำการแยกโลหะหนักชนิดต่างๆออกจากตัวทำละลายด้วยกระบวนการที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ของการที่จะนำโลหะไปใช้ [1]

ในขั้นตอนของการกำจัดน้ำเสียโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี โลหะจะถูกทำให้ตกตะกอนในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์, ซัลไฟด์, ซัลเฟต, ออกไซด์, คาร์บอเนต และฟอสเฟต เป็นต้น หรืออยู่ในรูปของการดูดซับไว้ที่ผิวของตะกอน [2, 3] ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้ จะสามารถละลายได้อีก เมื่ออยู่ในภาวะที่เหมาะสม ดังนั้นการฝังกลบกากตะกอนโลหะที่ไม่ถูกวิธีอาจเกิดการละลายของโลหะออกจากตะกอนและก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อมโดยรอบบริเวณฝังกลบ การคำนึงถึงการนำโลหะจากกากตะกอนนี้มาใช้ใหม่จะสามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ กระบวนการส่วนใหญ่ที่ประยุกต์ใช้ในการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่จะใช้กับโลหะที่อยู่ในรูปของไอออนในสารละลาย ดังนั้นจึงต้องทำการละลายตะกอนโลหะก่อน การละลายโลหะออกจากตะกอนสามารถทำได้โดยใช้

กระบวนการทางเคมี เช่น การละลายด้วยกรด, การแลกเปลี่ยนไอออน, การสกัด, หรือกระบวนการชีวภาพซึ่งใช้จุลินทรีย์ เช่น *Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus ferrooxidans* เป็นตัวย่อยสลาย แต่กระบวนการทางชีวภาพนี้จะใช้เวลานานกว่ากระบวนการทางเคมี ดังนั้นจึงได้รับความสนใจน้อยกว่า ในงานวิจัยนี้ ศึกษาความสัมพันธ์ทางจลนพลศาสตร์ของการละลายของโลหะกับตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการละลายสังกะสีจากตะกอนโดยใช้กระบวนการละลายด้วยกรด เพื่อเป็นแนวทางในการละลายกากตะกอนโลหะสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ และเป็นแนวทางป้องกันการละลายของตะกอนหลังการฝังกลบ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการละลายของสังกะสี เช่น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด - เบส อัตราการกวน อัตราส่วนระหว่างปริมาณตะกอนกับกรดหรือร้อยละของแข็ง เป็นต้น
2. ศึกษาความสัมพันธ์ทางจลนพลศาสตร์ของตัวแปรกับค่าการละลายของสังกะสี

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาแนวทางในการช่วยลดปัญหาด้านมลภาวะสิ่งแวดล้อม อันหนึ่ง โดยเป็นการแก้ปัญหาจากตะกอนสารพิษที่มีโลหะหนักตกค้างอยู่ ซึ่งโดยปกติจะบำบัดด้วยวิธีการฝังกลบ แต่ในปัจจุบันการบำบัดวิธีนี้มีราคาแพงและหาสถานที่ได้ยาก ดังนั้นถ้าสามารถประยุกต์ใช้กระบวนการทางเคมีต่างๆ มาช่วยบำบัดหรือนำสารโลหะเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ จะเป็นการช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย การจะนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่จะทำได้โดยการละลายโลหะออกจากตะกอนและประยุกต์ใช้กระบวนการที่เหมาะสมเพื่อดึงโลหะออกจากสารละลาย เช่น กระบวนการเคมีไฟฟ้า กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น ดังนั้นการละลายโลหะออกจากตะกอนด้วยภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพสูงจะช่วยให้สามารถนำโลหะกลับมาใช้ได้มากขึ้น ผู้วิจัยจึงศึกษาการละลายโลหะออกจากตะกอนด้วยกระบวนการละลายด้วยกรด โดยศึกษาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อค่าการละลายโลหะ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด - เบส, อัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดกับปริมาณตะกอน, อุณหภูมิ และอัตราเร็วรอบในการกวน พร้อมทั้งหาความสัมพันธ์ทางจลนพลศาสตร์ของการละลายกับตัวแปรที่ศึกษา โดยงานวิจัยนี้ใช้ตะกอน 2 ชนิด คือ

1. ตะกอนโลหะสังเคราะห์ โดยการเตรียมตะกอนโลหะจากห้องปฏิบัติการในรูปของสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ โดยโลหะที่ศึกษาคือ สังกะสี

## 2. ภาคตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม

ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะมีส่วนช่วยให้การพัฒนากระบวนการ กรรมวิธี และสภาวะของการละลายให้เหมาะสมสำหรับขั้นตอนต่อไปในการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายยิ่งขึ้น

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าทฤษฎี ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งในเรื่องการละลายตะกอนและกลไกทางจลนพลศาสตร์
2. เตรียมและจัดหาอุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมีที่เกี่ยวข้อง
3. เตรียมตะกอนสังเคราะห์ซึ่งคือไฮดรอกไซด์ ( $Zn(OH)_2$ ) จากซิงค์ซัลเฟต ( $ZnSO_4$ ) 0.5 โมลต่อลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $NaOH$ ) 1 โมลต่อลิตร จากนั้นทำการละลายตะกอนโดยนำตะกอนสังเคราะห์มาละลายโลหะหนักออกด้วยกรดซัลฟูริก โดยตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าความเป็นกรด - เบส, อัตราการกวน, อัตราส่วนของตะกอนกับสารละลายกรดซัลฟูริก, อุณหภูมิ
4. อธิบายและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ในรูปแบบของสมการทางจลนพลศาสตร์ของค่าการละลายกับตัวแปรต่าง ๆ
5. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3. โดยใช้ตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการตกตะกอน
6. อธิบายและวิเคราะห์ผลการทดลองพร้อมทั้งเปรียบเทียบผลที่ได้จากสมการความสัมพันธ์
7. สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรกับค่าการละลายของสังกะสีไปประยุกต์และพัฒนาภาวะของกระบวนการละลายตะกอนโลหะให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น
2. ช่วยส่งเสริมและพัฒนาการบำบัดตะกอนเป็นพิษจากโลหะหนักที่เกินมาตรฐานได้ดียิ่งขึ้น
3. เป็นแนวทางในการนำโลหะหนักหรือสารที่มีประโยชน์ที่คงอยู่ในรูปตะกอนมาใช้ใหม่

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 น้ำเสีย [4]

##### 2.1.1) ประเภทและแหล่งน้ำเสีย

น้ำเป็นสารที่กล่าวได้ว่า มีคุณประโยชน์ต่อมนุษยชาติมากมาย ซึ่งอาจแบ่งตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่ เป็นน้ำอุปโภคบริโภคในครัวเรือน น้ำใช้ในอุตสาหกรรมและน้ำใช้ในภาคเกษตรกรรม ดังนั้นจึงมีน้ำเสียปล่อยทิ้งออกมาจากกิจกรรมต่างๆ ดังกล่าว น้ำเสียแบ่งประเภทตามแหล่งกำเนิดน้ำเสียได้ดังนี้

น้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater) หรืออาจเรียกว่า น้ำโสโครก (Sewage) เป็นน้ำเสียที่ปล่อยออกจากแหล่งชุมชน ซึ่งมาจากกิจกรรมต่างๆ เช่น จากบ้านเรือน ภัตตาคาร อาคารพาณิชย์ โรงพยาบาล เป็นต้น น้ำเสียประเภทนี้มีปริมาณสารอินทรีย์เจือจาง ซึ่งองค์ประกอบในน้ำเสียได้แก่ อุจจาระ ปัสสาวะ สบู่ ผงซักฟอก เศษอาหาร เป็นต้น

น้ำเสียเกษตรกรรม (Agricultural Wastewater) เป็นน้ำเสียที่ปล่อยทิ้งจากพื้นที่เพาะปลูก และพื้นที่เลี้ยงสัตว์ ในส่วนพื้นที่เพาะปลูกจะอยู่กระจัดกระจาย องค์ประกอบสารมลพิษในน้ำทั้งนี้ประกอบด้วย สารเคมีปุ๋ย ยาฆ่าแมลง วัชพืช และดินทราย ส่วนน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์จะมีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง ซึ่งมาจากสิ่งขับถ่ายของสัตว์และอาหารที่เหลือ

น้ำเสียอุตสาหกรรม (Industrial Wastewater) หรืออาจจะเรียกว่า Trade Wastewater องค์ประกอบของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมมีความแปรผันมาก ขึ้นกับประเภทของอุตสาหกรรม เช่น น้ำเสียจากโรงงานสุราจะมีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง น้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ จะมีสารโลหะหนักและมีค่า pH ต่ำ เป็นต้น

ในส่วนของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาจแบ่งเป็นประเภทย่อย โดยแบ่งตามลักษณะน้ำเสียได้ดังนี้

- น้ำเสียจากกระบวนการผลิตอาหาร (Food Processing Wastes) น้ำเสียประเภทนี้มักมาจากโรงงานผลิตอาหาร ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานผลิตอาหารกระป๋อง สัตว์ทะเลแช่แข็ง น้ำตาลอาหารสัตว์ เป็นต้น

- น้ำเสียชีวภาพ (Biological Wastes) เป็นน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนัง โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โรงงานผลิตแอลกอฮอล์ เป็นต้น

- น้ำเสียกสิกรรม (Farm Wastes) ได้แก่ น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ และโรงงานฆ่าสัตว์ เป็นต้น
- น้ำเสียปนเปื้อนสารไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Waste) ได้แก่ น้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเคมี บิมน้ำมันและคู่ออมรถ เป็นต้น
- น้ำเสียปนเปื้อนสารเคมีอินทรีย์ (Organic Chemical Wastes) ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานผลิตอิเล็กทรอนิกส์ ยารักษาโรค โยสังเคราะห์ เป็นต้น
- น้ำเสียปนเปื้อนแร่ (Mineral Wastes) ได้แก่ น้ำเสียจากเหมืองแร่ โรงงานชุบโลหะ เป็นต้น
- น้ำเสียกัมมันตภาพรังสี (Radioactive Wastes) ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์

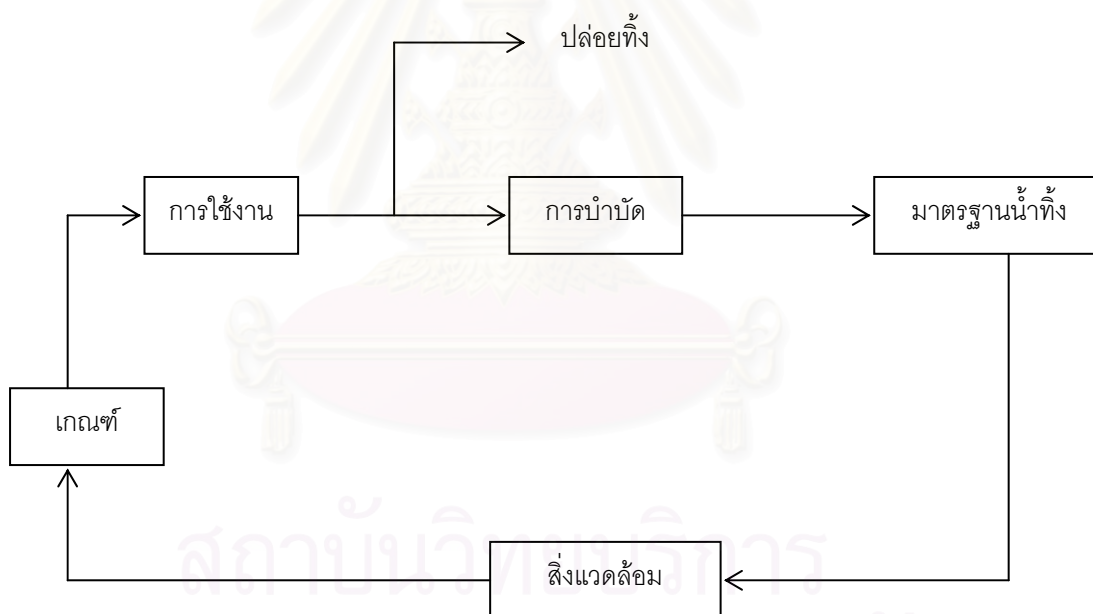
### 2.1.2) ลักษณะสมบัติน้ำเสีย

ลักษณะน้ำเสียจะมีความแตกต่างกันขึ้นกับองค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นรูปแบบระบบบำบัดน้ำเสียตลอดจนวิธีการควบคุมดูแลการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียจะขึ้นกับลักษณะสมบัติของน้ำเสียเป็นสำคัญ ด้รวชนี้สำคัญที่ใช้กำหนดแสดงลักษณะสมบัติน้ำเสียมีดังนี้

- ❖ **ค่าความเป็นกรด - เบส (pH)** เป็นค่าแสดงความเข้มข้นอนุภาคไฮโดรเจน ( $H^+$ ) ในน้ำ ค่า pH นี้มีความสำคัญต่อการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียและมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพของน้ำในแหล่งธรรมชาติ ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารมักมีค่า pH เป็นกลาง ขณะที่น้ำเสียจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และโรงงานชุบโลหะมีค่า pH เป็นกรดต่ำกว่า 7
- ❖ **ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (Organic Content)** สารอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสียอาจอยู่ในรูปสารละลาย (Dissolved) สารแขวนลอย (Suspended) และของแข็ง (Solids) สารอินทรีย์เหล่านี้ อาจแบ่งเป็นสารย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ (Biodegradable) และย่อยสลายไม่ได้ (Nonbiodegradable) การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์ในน้ำเสียมักไม่นิยมวิเคราะห์สารอินทรีย์สารใดสารหนึ่งโดยเฉพาะ เช่น วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล โปรตีน เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียโดยทั่วไปมักประกอบด้วยสารอินทรีย์หลายประเภท ดังนั้นการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณสารอินทรีย์จึงนิยมวัดปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์และปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการสันดาบสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

### 2.1.3) การควบคุมมลภาวะทางน้ำและมาตรฐานน้ำทิ้ง

ในการจัดการควบคุมมลภาวะทางน้ำ มีหลักการดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยพิจารณาว่า แต่ละลุ่มน้ำต้องการใช้ประโยชน์อย่างไร เช่น เพื่อเป็นแหล่งน้ำดิบผลิตน้ำประปา เพื่อใช้ในการเกษตร เพื่อใช้เป็นน้ำอุตสาหกรรม เป็นต้น แล้วจัดทำคุณภาพในแหล่งน้ำนั้น (Criteria) มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำนั้นอาจมีหลายมาตรฐานตามวัตถุประสงค์การใช้น้ำ ในส่วนของน้ำเสียจากกิจการอุตสาหกรรมต่างๆ จำเป็นต้องกำหนดให้มีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ จึงต้องมีกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้ง (Effluent Standards) เพื่อใช้เป็นแนวทางทางในการปฏิบัติ ในการตรวจสอบมาตรฐานน้ำทิ้งจำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณสารมลพิษสูงสุดที่แหล่งน้ำนั้นสามารถรองรับได้ โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำนั้น แต่ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปมักจะกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งประเภทต่างๆ ออกมา ดังแสดงในภาคผนวก ก. ซึ่งเป็นมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.1 หลักการจัดการควบคุมมลภาวะทางน้ำ [4]

## 2.2 หลักการและกระบวนการบำบัดน้ำเสีย [4]

เนื่องจากน้ำเสียส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีลักษณะสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต อาจมีความเข้มข้นสูง เจือจางหรืออาจประกอบด้วยสารอินทรีย์และ/หรืออนินทรีย์ จึงทำให้วิธีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมขึ้นกับลักษณะน้ำเสียนั้น การจัดการน้ำเสียอาจแบ่งเป็น 2 วิธีหลัก คือ การกำจัดน้ำเสียและการบำบัดน้ำเสีย

### 2.2.1) การกำจัดน้ำเสียอุตสาหกรรม

การกำจัดน้ำเสียอุตสาหกรรมตรงกับคำว่า Disposal คือ การกำจัดน้ำเสียให้หมดไป ดังนั้นจึงไม่มีการปล่อยน้ำทิ้งออกมาอีก (Zero Discharge) ซึ่งได้แก่วิธีต่างๆ ดังนี้

- การเผา (Incineration) เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง เช่น การเผากากส่าของโรงงานสุรา ข้อดีคือ จะได้รับพลังงาน แต่มีข้อเสียหลายประการ เช่น ราคาอุปกรณ์สูงมาก ค่าใช้จ่ายสูงมากด้วย นอกจากนี้ ยังมีปัญหามลภาวะทางอากาศ ซึ่งเกิดจากเถ้าจากเตาเผา

- การทำปุ๋ยหมัก (Composting) เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง มีข้อเสีย คือ ต้องมีมาตรการป้องกันน้ำเสียที่ไหลออกจากพื้นที่ทำปุ๋ยหมัก วัสดุที่ได้มีคุณค่าทางปุ๋ยต่ำ และมีค่าใช้จ่ายสูง ในประเทศไทยมีการใช้กากส่าผสมกับขาน้อยในการทำปุ๋ยหมัก

- การตากแห้ง (Land Drying) เป็นการกักน้ำเสียในพื้นที่กว้างเพียงพอจนทำให้อัตราการระเหยและอัตราการซึมของน้ำเสียลงดิน สูงกว่าอัตราการสูบเข้าของน้ำเสีย ซึ่งจะทำให้ น้ำเสียแห้งในพื้นที่ตากแห้ง มีการประยุกต์ใช้กับกากส่า และน้ำเสียจากโรงงานผลิตแอมโมเนียเหลวบางแห่ง ข้อดีคือ เป็นวิธีที่ง่าย แต่มีข้อเสียหลายประการ เช่น ต้องการพื้นที่มาก ไม่สามารถปฏิบัติได้ในช่วงฤดูฝน อาจมีผลกระทบต่อพื้นดิน และเสี่ยงต่อการล้นของน้ำเสีย

- การปล่อยทิ้งลงทะเล (Sea Disposal) เป็นวิธีการที่กล่าวได้ว่าไม่ยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่มีผลกระทบต่อระบบนิเวศน์อย่างมาก โดยเฉพาะในทะเลปิดและไม่ลึกมากนัก นอกจากนี้ ยังผิดกฎหมายสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นจึงไม่เป็นที่นิยมปฏิบัติในปัจจุบัน

- การสูบลบปล่อยบาดาล (Deep-well Injection) เป็นการสูบน้ำเสียลงใต้ดิน เป็นวิธีที่ไม่นิยมปฏิบัติ เพราะก่อปัญหาต่อคุณภาพน้ำใต้ดินได้และผิดกฎหมายสิ่งแวดล้อม

- การใช้โดยตรงกับพื้นดิน (Land Application) เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีแร่ธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อพืช และต้องไม่มีสารที่ก่อให้เกิดอันตรายด้วย รวมทั้งสีและกลิ่นจะต้องไม่มีและไม่ก่อให้เกิดปัญหา ซึ่งทำให้วิธีการนี้โดยทั่วไปไม่สามารถปฏิบัติได้



- การใช้เป็นน้ำชลประทาน (Irrigation) เป็นการนำน้ำเสียไปใช้เป็นน้ำเพื่อการชลประทาน น้ำเสียที่เหมาะสมจะต้องมีความเข้มข้นสารอินทรีย์ไม่สูง และไม่มีสารพิษ อาจเป็นน้ำเสียที่ผ่านบำบัดเบื้องต้นมาแล้ว เป็นวิธีการที่เหมาะสมวิธีการหนึ่ง ที่ควรนำมาพิจารณาในการคัดเลือกรูปแบบระบบบำบัดน้ำเสีย

## 2.2.2) การบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment) หมายถึง การทำให้น้ำเสียมีคุณภาพดีขึ้นและดีเพียงพอที่จะปล่อยทิ้งลงแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยไม่ก่อผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ การบำบัดนี้เป็นการลดสารมลพิษ (Pollutants) ในน้ำเสียให้ต่ำลง โดยผ่านกระบวนการบำบัดต่างๆ ที่จะกล่าวต่อไป ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปจะต่ำกว่าวิธีการกำจัดน้ำเสีย ระบบบำบัดน้ำเสียจะประกอบด้วยหลายขั้นตอนรวมกันเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดให้ต่ำสุด วิธีการบำบัดน้ำเสียอาจแบ่งตามลักษณะขั้นตอนลำดับการบำบัดได้ดังนี้

- การบำบัดเบื้องต้น (Pretreatment) เป็นการปรับสภาพน้ำเสียให้เหมาะสม ก่อนผ่านเข้าสู่ขั้นตอนอื่นเพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียสูงและไม่ก่อปัญหาต่อระบบ การบำบัดเบื้องต้น ได้แก่ การแยกกากของแข็ง (Screening) การแยกตะกอนเม็ดทราย (grit Removal) การแยกน้ำมัน (Oil & Grease Removal) การเติมอากาศเบื้องต้น (Preaeration) การปรับน้ำเสียให้คงที่ (Equalization) การเติมสารอาหาร (Nutrient Addition) และการปรับค่าความเป็นกรด - เบสให้เป็นกลาง (Neutralization) เป็นต้น
- การบำบัดขั้นต้น (Primary Treatment) เป็นการลดมลสารให้ต่ำลงโดยวิธีประหยัด เช่น การตกตะกอน (Primary Sedimentation) การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) การกรอง (Filtration) การแยกโดยลอย (Flotation) และการย่อยสลายไร้ออกซิเจน (Anaerobic Fermentation) เป็นต้น
- การบำบัดขั้นสอง (Secondary Treatment) ถ้าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว ยังมีปริมาณสารอินทรีย์สูงอยู่ จำเป็นต้องผ่านการบำบัดขั้นสอง (Secondary Treatment) ซึ่งได้แก่ระบบบำบัดแบบชีวภาพ โดยทั่วไปเป็นแบบใช้ออกซิเจน (หรืออากาศ) เป็นต้น
- การบำบัดขั้นสาม (Tertiary Treatment) น้ำเสียบางประเภทเมื่อผ่านการบำบัดขั้นที่สองแล้วยังมีสี มีสารอาหารสูง มีความขุ่นสูง หรือมีโลหะอยู่สูง จำเป็นต้องมีการบำบัดขั้นที่สาม ซึ่งได้แก่ Coagulation, Activated Carbon, Ion Exchange, Membrane

Filtration เป็นต้น นอกจากนี้ ยังต้องคำนึงการกำจัดตะกอนและการฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วอีกด้วย

การบำบัดน้ำเสีย อาจแบ่งตามวิธีการที่ใช้ได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

- *การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Treatment)* คือ การกำจัดมลสารออกจากน้ำเสียโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีระหว่างมลสารในน้ำเสียกับสารเคมีที่เติม ภายหลังปฏิกิริยาจะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของน้ำเสีย เช่น pH, COD, BOD, ความขุ่น, สี, ปริมาณโลหะหนักหรือมลสารที่ต้องการกำจัด การบำบัดโดยวิธีเคมีจะเหมาะสมสำหรับน้ำเสียบางประเภท เพื่อวัตถุประสงค์ เช่น การขจัดสี ลดปริมาณโลหะหนัก เป็นต้น แต่ในกรณีที่ต้องการลดปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์ จะมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการบำบัดแบบชีววิทยา การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีมีหลายแบบที่ประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ เช่น การปรับ pH ให้เป็นกลาง (Neutralization), การทำให้สารแขวนลอยรวมตัว (Chemical Coagulation), กระบวนการออกซิเดชัน - รีดักชัน (Oxidation – Reduction), กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)
- *การบำบัดน้ำเสียวิธีฟิสิกส์ (Physical Treatment)* เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยหลักการทางฟิสิกส์ เช่น ตะแกรงดักของแข็ง (Screening), การกรอง (Filtration), การตกตะกอน (Sedimentation), การทำให้ลอย (Floatation), การเหวี่ยง (Centrifugation), การดูดซับ (Adsorption), การระเหย (Evaporation), การอบแห้ง (Drying), การจับตัวเป็นก้อน (Flocculation), อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis), รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เป็นต้น การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีฟิสิกส์ดังกล่าวมาแล้ว บางวิธีง่ายและมีค่าใช้จ่ายต่ำ เช่น ตะแกรงดักของแข็ง, การตกตะกอน เป็นต้น บางวิธีประสิทธิภาพสูง แต่ค่าใช้จ่ายสูงมาก เช่น รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis), การระเหย (Evaporation) เป็นต้น
- *การบำบัดน้ำเสียแบบชีววิทยา (Biological treatment)* อาจแบ่งได้เป็น 2 วิธีหลัก คือ Anaerobic Treatment ซึ่งเป็นแบบไม่ใช้ออกซิเจน และแบบ Aerobic Treatment ซึ่งต้องการออกซิเจน วิธีการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเคมีหรือวิธีฟิสิกส์

ในระบบบำบัดน้ำเสียจำเป็นต้องมีการนำวิธีการต่าง ๆ มาใช้ร่วมกัน เพื่อให้ระบบบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพสูงและมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำที่สุด

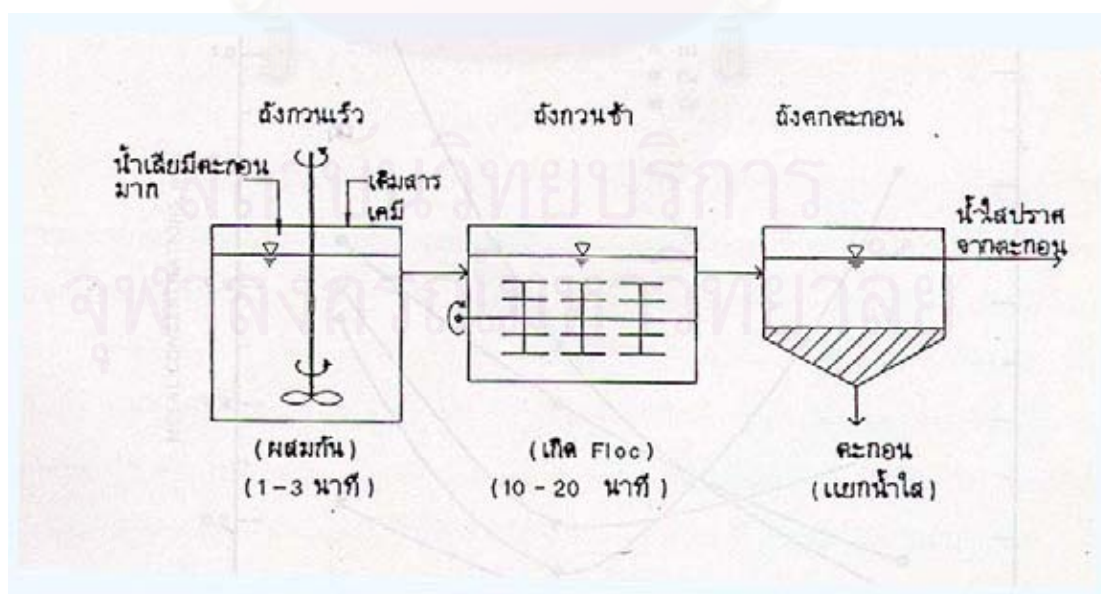
เนื่องจากในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาจากตกตะกอนที่ได้จากการบำบัดโดยวิธีตกตะกอนด้วยสารเคมี ดังนั้นจึงขอกล่าวเฉพาะทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดข้างต้นเท่านั้น

### 2.3 การตกตะกอนเคมี (Chemical Precipitation) [4]

การตกตะกอนเคมี เป็นกระบวนการที่ทำให้มลสารซึ่งอยู่ในรูปแตกตัว (Ionized Form) ซึ่งละลายน้ำ (Soluble) และไม่สามารถแยกออกได้ ทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่เติมลงไป เปลี่ยนแปลงไปเป็นสารใหม่ซึ่งไม่ละลายน้ำ หรือมีความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility) ลดน้อยลงอย่างมาก จึงทำให้สารดังกล่าวตกเป็นผลึก ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำเสียได้ง่ายโดยใช้ถังตกตะกอน หรือการใช้ระบบลอย (DAF) เป็นต้น ในรูปที่ 2.2 แสดงวิธีการตกตะกอนทางเคมีในระบบบำบัดน้ำเสีย

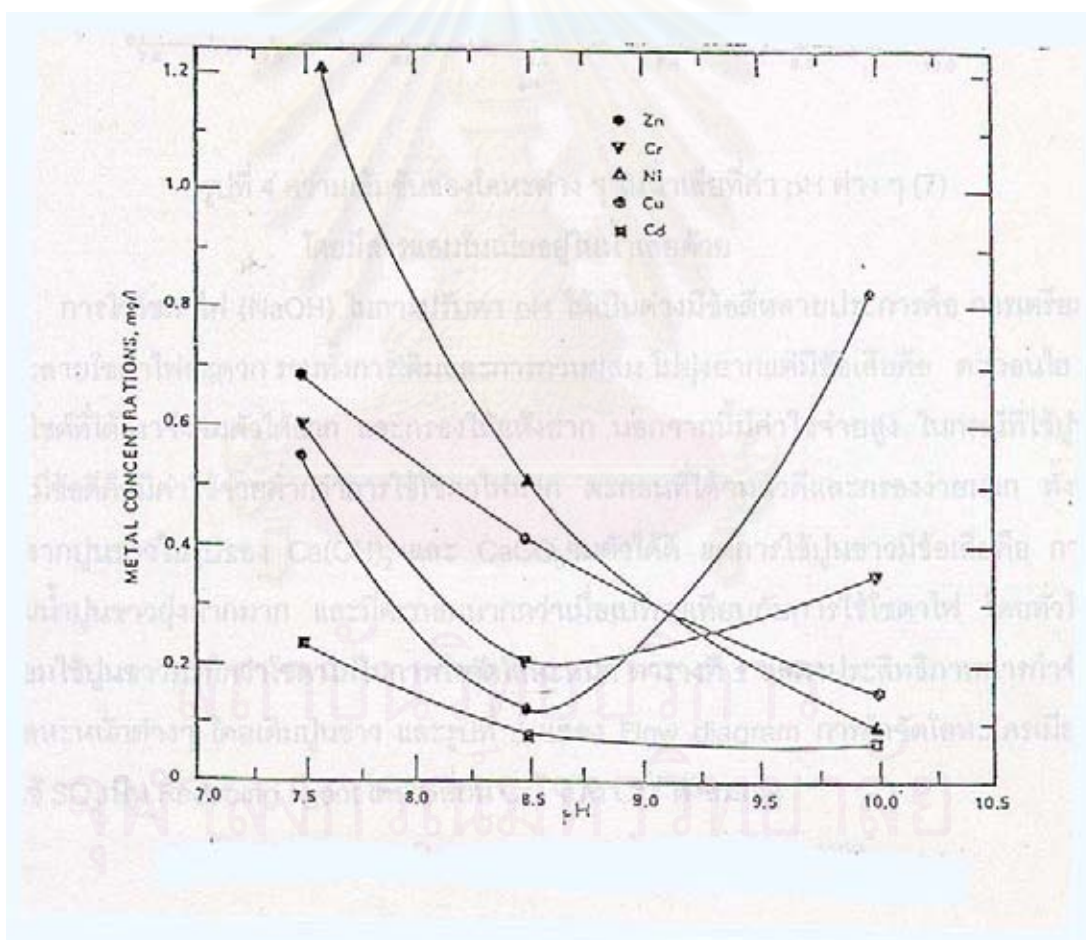
วิธีการตกตะกอนเคมีแบ่งตามชนิดของสารเคมีหรือตะกอนที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

- ❖ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation) คือ การทำให้อนุภาคบวก (Cation) ตกออกมาในรูปไฮดรอกไซด์ (Hydroxide) โดยการปรับสภาพให้สารละลายเป็นด่าง (ค่าความเป็นกรด - เบสสูงกว่า 7) สารที่นิยมใช้ได้แก่ โซดาไฟ (NaOH) และปูนขาว (CaO) สมการเคมีการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ เขียนในรูปทั่วไปได้ ดังนี้



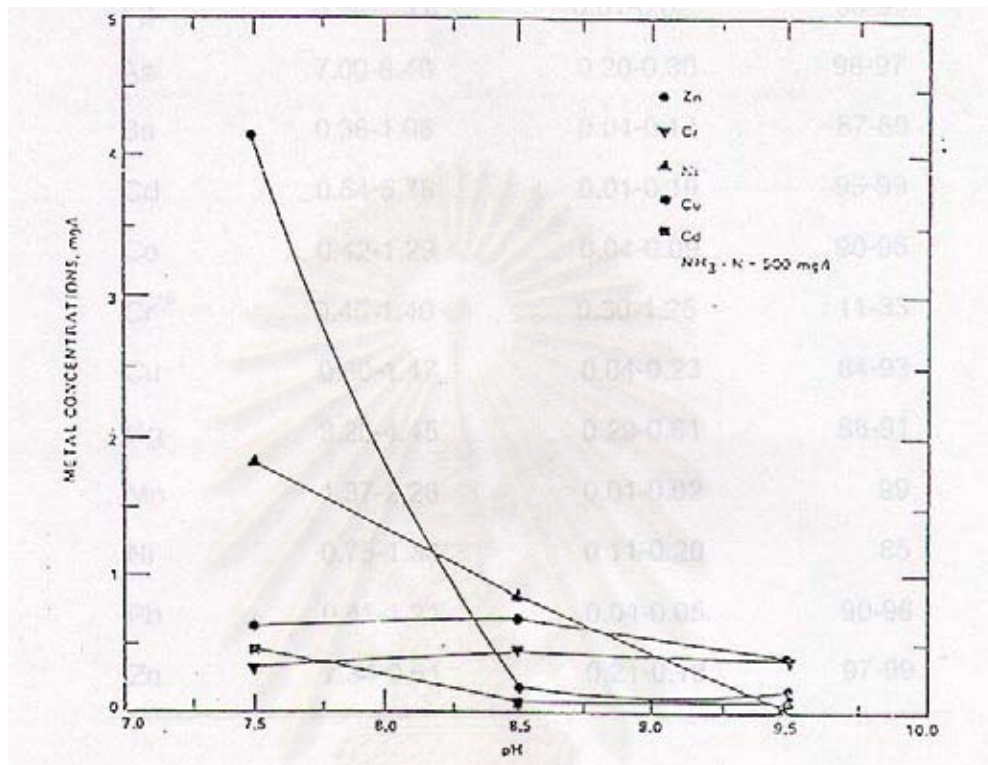
รูปที่ 2.2 วิธีการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) [4]

ในกรณีที่มีไอออนบวก (Cation) หลายชนิดอยู่ในน้ำเสีย การควบคุมค่าความเป็นกรด - เบส (pH) มีความสำคัญมากในการกำจัดไอออนบวกนั้น รูปที่ 2.3 แสดงความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักได้แก่ สังกะสี, โครเมียม, นิกเกิล, ทองแดง และแคดเมียม ที่ค่าความเป็นกรด - เบสต่างๆ จะเห็นว่า โลหะสังกะสีและโครเมียมในสารละลายจะลดลง เมื่อค่าความเป็นกรด - เบสสูงขึ้น มีจุดต่ำสุดอยู่ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 8.5 ถ้าค่าความเป็นกรด - เบสสูงกว่า 8.5 ความเข้มข้นของไอออนสังกะสีและโครเมียมจะเพิ่มขึ้น ซึ่งต่างจากโลหะอีก 3 ชนิด ซึ่งมีความเข้มข้นลดลง เมื่อค่าความเป็นกรด - เบสสูงอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นในการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ จึงจำเป็นต้องควบคุมค่าความเป็นกรด - เบส 2 ค่า คือ ปรับค่าความเป็นกรด - เบสให้เท่ากับ 8.5 เพื่อให้โลหะออกไซด์ของสังกะสีและโครเมียมตกตะกอนแยกออกจากนั้นนำมาปรับค่าความเป็นกรด - เบสให้เท่ากับ 10 เพื่อตกโลหะนิกเกิล, ทองแดงและแคดเมียม



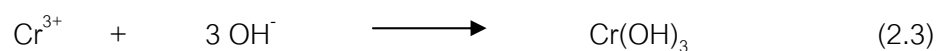
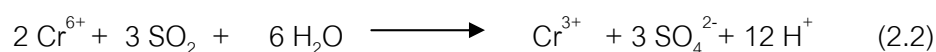
รูปที่ 2.3 ความเข้มข้นโลหะที่ละลายในน้ำเสียที่ค่าความเป็นกรด - เบสต่างๆ [4]

สารเคมีต่างๆที่อยู่ในน้ำเสียอาจมีผลต่อการตกตะกอนเคมี เช่น สารแอมโมเนีย ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะทำให้กราฟเปลี่ยนรูปร่างไป ซึ่งจะเห็นว่าการกำจัดโลหะหนักในกรณีนี้เป็นขั้นตอนเดียว คือ ควบคุมค่าความเป็นกรด - เบสให้เท่ากับ 9.5 จะสามารถแยกโลหะหนักทุกตัวได้สูงสุด



รูปที่ 2.4 ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสียที่ค่าความเป็นกรด - เบสต่างๆ โดยมีสารแอมโมเนียปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียด้วย [4]

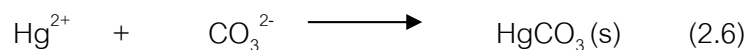
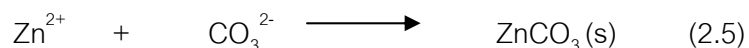
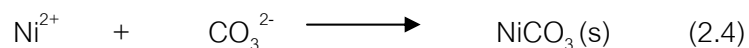
การใช้โซดาไฟ (NaOH) ในการปรับภวะน้ำเสียให้เป็นด่างมีข้อดีหลายประการ คือ การเตรียมสารละลายโซดาไฟทำได้สะดวก รวมทั้งการเติมและการกวนผสมไม่ยุ่งยาก แต่มีข้อเสียคือ ตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ได้จะเบาจึงจมตัวได้ยาก และกรองให้แห้งยาก นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายสูง ในกรณีที่ใช้ปูนขาว มีข้อดี คือ มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าโซดาไฟมาก ตะกอนที่ได้จมตัวได้ดีและกรองง่าย ทั้งนี้ เนื่องจากปูนขาวในรูปของ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  และ  $\text{CaCO}_3$  จมตัวได้ดี ข้อเสียของการใช้ปูนขาวคือ การเตรียมน้ำปูนขาวยุ่งยากมาก และเกิดตะกอนมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้โซดาไฟ ดังนั้นโดยทั่วไปจึงนิยมใช้ปูนขาวมากกว่าโซดาไฟในการกำจัดโลหะหนัก ตารางที่ 2.1 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสารโลหะหนักต่างๆ โดยเติมปูนขาว นอกจากนี้ ถ้าน้ำเสียมีโครเมียมปนเปื้อนอยู่ จำเป็นต้องมีการเติม ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ลงไปเพื่อเปลี่ยน  $\text{Cr}^{6+}$  เป็น  $\text{Cr}^{3+}$  ก่อนแล้วจึงค่อยทำการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการ



ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักโดยการเติมปูนขาว [4]

Metal	Concentration Range (mg/l)		
	Influent	Effluent	Removed (%)
Ag	0.24-1.51	0.01-0.02	96-99
As	7.00-8.40	0.20-0.30	96-97
Ba	0.36-1.08	0.04-0.14	87-89
Cd	0.54-5.78	0.01-0.19	95-99
Co	0.42-1.29	0.04-0.09	90-96
Cr <sup>+6</sup>	0.45-1.40	0.30-1.25	11-33
Cu	0.60-1.47	0.04-0.23	84-93
Hg	3.26-4.45	0.29-0.61	86-91
Mn	1.37-2.26	0.01-0.02	99
Ni	0.75-1.36	0.11-0.20	85
Pb	0.41-1.21	0.04-0.05	90-96
Zn	7.34-9.61	0.21-0.18	97-99

- ❖ การตกตะกอนคาร์บอเนต (Carbonate Precipitation) เป็นการแยกแคะไอออนด้วยการตกตะกอนในรูปผลึกคาร์บอเนต โดยใช้โซดาแอตเผา ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) หลังจากนั้นจึงปรับค่าความเป็นกรด - เบสให้เหมาะสมโดยการเติมโซดาไฟ ( $\text{NaOH}$ ) ดังสมการที่ 2.4 – 2.6 ซึ่งโลหะส่วนใหญ่สามารถเกิดเป็นผลึกคาร์บอเนตได้ และโลหะคาร์บอเนตเกือบทุกตัวมีค่าความสามารถในการละลายต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.2



ตารางที่ 2.2 ค่าความสามารถในการละลาย (Solubility) ของโลหะคาร์บอเนต  
ต่างๆ ( $\text{pK}_s = -\log K_s$ ) [4]

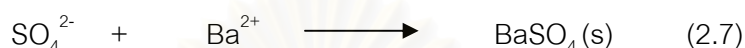
Compound	pks	Compound	pks
CaCO <sub>3</sub>	8.3	CrPO <sub>4</sub>	17.0
NiCO <sub>3</sub>	8.2	SnS <sub>2</sub>	18.3
BaCO <sub>3</sub>	8.3	FeS	21.2
SrCO <sub>3</sub>	9.0	ZnS	24.7
ZnCO <sub>3</sub>	9.1	SnS	25.9
CuCO <sub>3</sub>	9.9	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	26.0
MnCO <sub>3</sub>	9.3	NiS	26.6
CoCO <sub>3</sub>	10.0	CdS	27.0
Ag <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	11.1	PbS	27.5
FeCO <sub>3</sub>	10.5	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	27.4
PbCO <sub>3</sub>	13.5	CuS	36.1
CdCO <sub>3</sub>	13.7	Ag <sub>2</sub> S	50.1
HgCO <sub>3</sub>	16.0	HgS	53.3

ข้อดีของการตกตะกอนในรูปตะกอนคาร์บอเนต เมื่อเปรียบเทียบกับ การตกตะกอนในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ คือ มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่า และตะกอนที่ตกอยู่ในรูปผลึกที่เป็นเม็ดได้ จึงทำให้แยกออกได้สะดวก

- ❖ การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulphide Precipitation) เป็นการตกตะกอนโลหะหนักในรูปซัลไฟด์ (Sulphide) โดยเติมสาร Na<sub>2</sub>S หรือ Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> มักนิยมใช้ตกตะกอนโลหะหนัก เช่น สารหนู (As), แคดเมียม (Cd), เหล็ก (Fe), อะลูมิเนียม (Al) และปรอท (Hg)

เนื่องจากโลหะซัลไฟด์ส่วนใหญ่มีค่าการละลาย (Solubility) ต่ำมาก ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจึงสูงกว่าการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนต แต่การตกตะกอนในรูปซัลไฟด์มีข้อเสีย คือ สารซัลไฟด์ที่เติมก่อปัญหาในเรื่องกลิ่น มีความเป็นพิษรุนแรง ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมที่ดี

- ❖ การตกตะกอนซัลเฟต (Sulphate Precipitation) เป็นการตกตะกอนสารซัลเฟตในรูปแบเรียมซัลเฟต ( $\text{BaSO}_4$ ) โดยเติมสารแบเรียมคลอไรด์ ดังสมการปฏิกิริยาข้างล่างนี้



ในตารางที่ 2.3 จะแสดงถึงสารเคมีบางชนิดที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

ตารางที่ 2.3 สารเคมีบางชนิดที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย [5]

สารเคมี	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (กก.)					
	มลสารต่าง ๆ (1 กก. ของแต่ละมลสาร)					
	Cr <sup>+3</sup>	Cu <sup>+2</sup>	Fe <sup>+2</sup>	Fe <sup>+3</sup>	Ni <sup>+2</sup>	Zn <sup>+2</sup>
Calcium Oxide (CaO)	1.62	0.86	1.00	1.50	0.96	0.86
Lime (Ca(OH) <sub>2</sub> )	2.13	1.16	1.34	2.01	1.26	1.14
Sodium Hydroxide (NaOH)	2.31	1.26	1.44	2.16	1.36	1.22
Sodium Carbonate (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	3.07	1.68	1.90	2.85	1.81	1.62
Magnesium Oxide (MgO)	1.17	0.63	0.73	1.10	0.69	0.62
Magnesium Hydroxide (Mg(OH) <sub>2</sub> )	1.69	0.92	1.05	1.58	1.00	0.90

ในการเกิดการตกตะกอนผลึกต่างๆ ให้ได้ดีต้องพิจารณาค่า pH หลังจากเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้ว โดยทั่วไปต้องมี pH สูงกว่า 7 จึงจะได้ผลดี ตารางที่ 2.4 ได้แสดงค่า pH ที่เหมาะสม และชนิดสารเคมีที่เติมผสมลงไปเพื่อกำจัด หรือแยกมลสารออกจากน้ำเสีย



ตารางที่ 2.4 ค่าความเป็นกรด - เบสที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดมลสารออกจากน้ำเสียด้วยสารเคมีต่างๆ [5]

มลสารที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย	สารเคมีที่เติมผสมลงไป	ค่า pH ที่เหมาะสม	สารเคมีที่ตกตะกอนได้
Aluminum	Lime	5	$Al(OH)_3$
Arsenic	Ferric chloride	8	$AsCl_2$
Barium	Sodium sulfate	10	$BaSO_4$
Cadmium	Lime	9.5-12	$Cd(OH)_2$
Chromic	Lime	8.0-9.5	$Cr(OH)_2$
Cupric	Lime	9-10	$Cu(OH)_2$
Ferric	Lime	7	$Fe(OH)_3$
Fluoride	Lime	12	$CaF_2$
Manganese	Lime	10	$Mn(OH)_2$
Mercury	Sodium sulfide	8.5	$HgS$
Nickel	Lime	10	$Ni(OH)_2$
Phosphorus	Ferric chloride	7	$FePO_4$
Plumbic	Lime	6-10	$Pb(OH)_2$
Selenium	Sodium sulfide	6.5	$SeS_2$
Silver	Sodium chloride	8	$AgCl$
Stannic	Lime	4-4.5	$Sn(OH)_2$
Zinc	Lime	5-6	$Zn(OH)_2$

นอกจากนี้ ในตารางที่ 2.5 จะแสดงการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการตกตะกอนทางเคมีแบบต่างๆ

อนึ่ง หลังจากที่น้ำเสียผ่านการบำบัดโลหะหนักโดยการตกตะกอนเคมีแล้ว จะเกิดตะกอนขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งตะกอนเหล่านี้จะถูกนำไปบำบัดโดยวิธีต่างๆ ต่อไป เป็นต้นว่า การเผา (Incineration) หรือ การฝังกลบ (Landfill) เป็นต้น ซึ่งจะเป็นการสูญเสียโลหะในตะกอนไปโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้น เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตของโรงงานจึงควรนำโลหะหนักในตะกอนเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ ขั้นตอนหนึ่งที่จะนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ คือ การละลายโลหะออกจากตะกอน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาดัวแปรที่มีผลต่อการละลายสังกะสีออกจากตะกอนไฮดรอกไซด์ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการแยกโลหะหนักออกจากตะกอนต่อไป

ตาราง 2.5 ข้อดีและข้อเสียของการตกตะกอนทางเคมี [6]

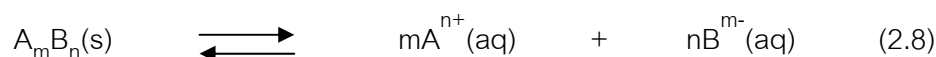
เทคนิคการตกตะกอน	ข้อดี	ข้อเสีย
ไฮดรอกไซด์	- เกิดโลหะออกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำสามารถแยกออกได้	- ปริมาณตะกอนมาก
คาร์บอเนต	- เกิดผลึกที่ละลายน้ำได้น้อยสามารถแยกโดยการกรองได้ง่าย	- แยกโลหะออกจากรีเอเจนต์ได้ยาก
ซัลเฟต	- เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้บ้าง	- เป็นพิษเนื่องจากซัลเฟต
ออกไซด์ของเหล็ก	- ตกตะกอนและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย	
สารประกอบโพลิเมอร์	- ความเข้มข้นของตะกอนโลหะหนักน้อย	- ต้องเผาตะกอนเพื่อแยกโลหะหนักออก

## 2.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการละลาย [7]

ตะกอนที่เป็นสารไอออนิกเมื่อละลายเป็นสารละลายแล้ว พบว่า ส่วนใหญ่จะแตกตัวเป็นแคตไอออนและแอนไอออนหมด ไม่อยู่ในรูปของโมเลกุล ตะกอนของสารไอออนิกน้อยชนิดที่ไม่เป็นไปตามนี้ แคตไอออนและแอนไอออนที่เกิดจากการละลายตะกอนในสารละลายจันอิมตัวจะอยู่ในสมดุลกับตะกอนที่เป็นของแข็งซึ่งสัมพันธ์กับสารละลายอยู่ตลอดเวลา

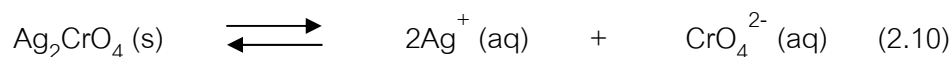
การละลายของตะกอนนั้นขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของการละลาย ( $K_{sp}$ ) ของตะกอน ค่านี้เป็นค่าผลคูณของความเข้มข้นเป็น โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ( $\text{mole}/\text{dm}^3$ ) ของไอออนทั้งสองที่เป็นองค์ประกอบของตะกอนที่สารละลายอยู่ในสภาวะจันอิมตัวด้วยตะกอนนั้นๆ ค่านี้จะผันแปรไปตามอุณหภูมิ

สำหรับตะกอนที่มีสูตร  $A_mB_n$  เมื่อละลายเป็นสารละลายจันอิมตัว สมดุลที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายและของแข็งจะเป็น



$$K_{sp} = [A^{n+}]^m [B^{m-}]^n \quad (2.9)$$

$[A^{n+}]$ ,  $[B^{m-}]$  เป็นความเข้มข้นที่อิ่มตัวของ  $A^{n+}$  และ  $B^{m-}$  ในสารละลายตามลำดับ เช่นในกรณีของ  $Ag_2CrO_4$  ละลายในน้ำจนเป็นสารละลายอิ่มตัวจะได้



$$K_{sp} = [Ag^+]^2 [CrO_4^{2-}] \quad (2.11)$$

ที่อุณหภูมิคงที่ ถ้าสารละลายอยู่ในสถานะอิ่มตัว คือ ในสารละลายที่ไอออนทั้งสองชนิดนี้ละลายอยู่ในภาวะสมดุลกับตะกอนของ  $Ag_2CrO_4$  โดยไม่คำนึงว่าในสารละลายนั้นจะมีไอออนอื่นๆละลายร่วมอยู่ด้วยหรือไม่ก็ตาม จะได้ว่า ค่าคงที่ของการละลาย ( $K_{sp}$ ) มีค่าคงที่เสมอ

#### 2.4.1) การละลายของตะกอนในน้ำบริสุทธิ์

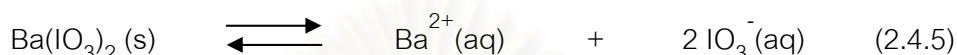
การละลายของสารในตัวทำละลาย จะแสดงในเทอมของความเข้มข้นของสารนั้นในสารละลายที่ภาวะสมดุล การละลายของสารถ้าไม่ระบุตัวทำละลายเป็นสารใดจะหมายถึง ตัวทำละลายเป็นน้ำบริสุทธิ์ ในการคำนวณโดยทั่วไป การละลายของสารจะแสดงในหน่วยของจำนวนโมลของตัวถูกละลายในสารละลาย 1 ลูกบาศก์เดซิเมตร ( $mol/dm^3$ )

การแบ่งชนิดของสารไอออนิกตามเกณฑ์การละลายในน้ำเป็น 3 แบบ ได้แก่

- สารที่ละลายน้ำได้ดี (Soluble) ความเข้มข้นของสารเหล่านี้ในสารละลายอิ่มตัวมีค่าสูง  $K_{sp}$  มีค่าสูง เช่น สารไอออนิกของโลหะหมู่ 1 ในตารางธาตุ เช่น  $NaCl$ ,  $K_2SO_4$  เป็นต้น
- สารไอออนิกที่ละลายได้เล็กน้อย (Slightly Soluble) ตัวอย่างเช่น  $CaSO_4$ ,  $Ag_2SO_4$ ,  $PbCl_2$  เป็นต้น
- สารที่ไม่ละลาย (Insoluble) แต่ในความเป็นจริง ยังมีส่วนที่ละลายในน้ำได้ แต่น้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นที่อิ่มตัวของสารเหล่านี้ นับว่าห่างไกลไปจากของสารไอออนิกที่ละลายได้น้อยมาก สารสองแบบสุดท้ายจะเป็นสารที่เรียกว่า “ตะกอน” ซึ่งมีค่า  $K_{sp}$  ค่อนข้างต่ำ

### 2.4.2) การละลายของตะกอนในสารละลายที่มีองค์ประกอบของตะกอนละลายอยู่ (ผลของไอออน, Common Ion Effect)

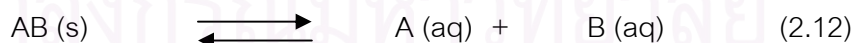
ในสารละลายที่ปราศจากสารอื่นรบกวน การละลายของ  $\text{Ba}(\text{IO}_3)_2$  จะไม่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากสมดุลเคมีข้างล่างนี้ไม่ถูกรบกวน



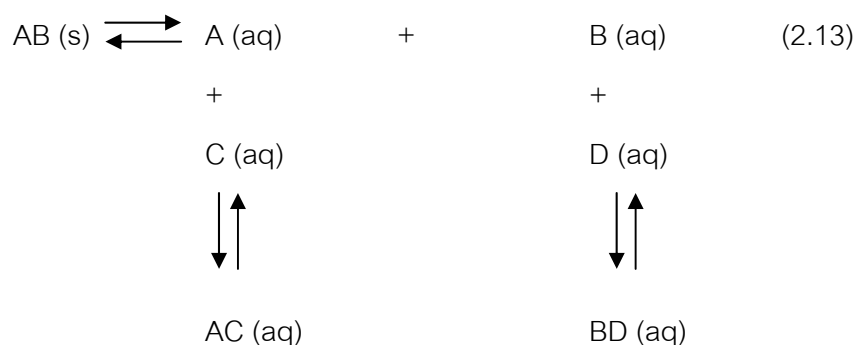
แต่ถ้านำตะกอน  $\text{Ba}(\text{IO}_3)_2$  ไปละลายในสารละลายที่มี  $\text{Ba}^{2+}$  หรือ  $\text{IO}_3^-$  หรือไอออนทั้งสองละลายอยู่เช่น ใช้สารละลาย  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  หรือ  $\text{KIO}_3$  เป็นตัวทำละลาย  $\text{Ba}^{2+}$  หรือ  $\text{IO}_3^-$  ในสารละลายจะมีผลทำให้การละลายของ  $\text{Ba}(\text{IO}_3)_2$  ลดน้อยลง ตามหลักของเลอชาเตอลิเยร์ (Lechaterlier)  $\text{Ba}^{2+}$  หรือ  $\text{IO}_3^-$  จะไปผลักดันทำให้สมดุลเปลี่ยนแปลงไปจากขวาไปซ้าย ซึ่งมีผลทำให้การละลายของ  $\text{Ba}(\text{IO}_3)_2$  มีค่าน้อยกว่าที่ละลายได้ในน้ำ

### 2.4.3) อิทธิพลของสมดุลเคมีต่างๆ ที่มีผลต่อการละลายของตะกอน

การละลายของตะกอนจะเพิ่มขึ้น ในสารละลายที่มีไอออนหรือโมเลกุลของสารอื่นละลายอยู่ สารเหล่านี้อาจทำปฏิกิริยากับไอออนใดไอออนหนึ่งซึ่งเป็นองค์ประกอบของตะกอนหรืออาจทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของตะกอน ยกตัวอย่างเช่น ตะกอนที่ละลายได้ยากในน้ำมีสูตรเป็น  $\text{AB}$  โมเลกุลบางโมเลกุลจะละลายลงในสารละลายและแตกตัวเป็นไอออน A และ B เพื่อความสะดวกจะไม่ระบุไอออนทั้งสอง

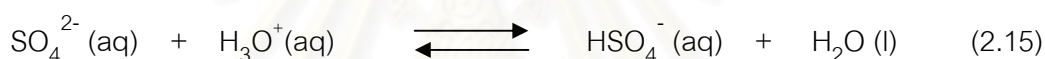
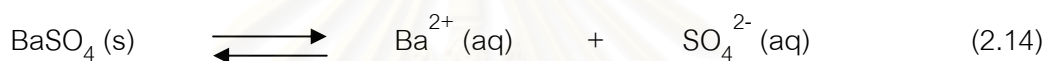


ในสารละลายที่มี C และ D ละลายอยู่ซึ่งทำปฏิกิริยากับไอออน A และ B ได้เกิดสาร AC และ BD ดังนี้

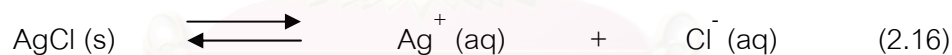


การเกิดปฏิกิริยาแบบนี้มีผลทำให้สมดุลเคมีเปลี่ยนแปลงไปตามหลักของเลอชาเตอลิเยร์ มีผลทำให้การละลายของ AB ในสารละลายเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น

ตะกอน  $\text{BaSO}_4$  จะละลายได้ดีขึ้น เมื่อละลายในสารละลายที่มีกรดแก่ละลายอยู่ด้วย



ตะกอน  $\text{AgCl}$  ละลายได้ดีขึ้นในน้ำแอมโมเนีย



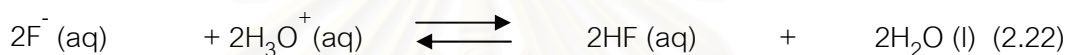
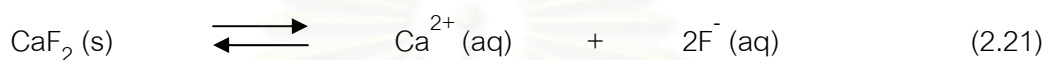
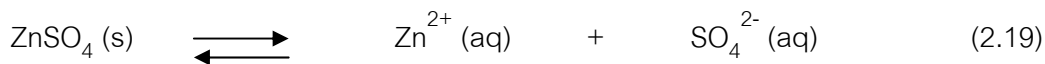
ตะกอน  $\text{AgCl}$  ละลายได้ดีขึ้นในสารละลายที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) สูง



#### 2.4.4) ผลของ pH ต่อการละลายของตะกอน

การละลายของตะกอนส่วนใหญ่จะขึ้นกับความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนในสารละลาย เนื่องจากแคตไอออนและแอนไอออนซึ่งเป็นองค์ประกอบของตะกอนจะแสดงความเป็นกรดอ่อน

และเบสอ่อนตามลำดับในสารละลาย ตัวอย่างเช่น ตะกอนของ  $ZnSO_4$  และ  $CaF_2$  จะละลายในสารละลายที่เป็นกรดได้ดีกว่าในน้ำ เนื่องจากแคตไอออนของตะกอนทั้งสองนี้เมื่อละลายอยู่ในสารละลายจะแสดงสมบัติเป็นเบส ดังนี้



**ข้อสังเกต** แอนไอออนที่แสดงสมบัติเป็นเบสได้นั้น จะเป็นองค์ประกอบของกรดอ่อน การละลายของตะกอนแบบนี้ จะละลายในสารละลายที่เป็นกรด ในทางตรงกันข้ามแคตไอออนบางชนิดที่เป็นองค์ประกอบของตะกอน จะแสดงสมบัติกรดเมื่อละลายอยู่ในสารละลาย เช่น บิสมัทไฮไดรด์ละลายในน้ำได้ดีกว่าในสารละลายกรด

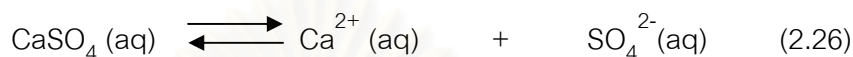
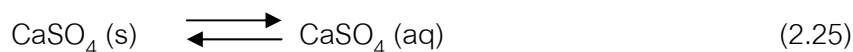


เมื่อเติมกรดลงไปในสารละลายจะทำให้  $BiOH^{2+}$  กลายเป็น  $Bi^{3+}$  มากขึ้น และมีผลทำให้สมดุลแรกถูกผลักดันไปทางซ้ายมือมากขึ้น จึงทำให้การละลายของ  $BiI_3$  ลดน้อยลง

#### 2.4.5) ผลกระทบต่อการละลายของตะกอนเนื่องจากตัวถูกละลายที่ไม่แตกตัว

โดยทั่วไปแล้ว การคำนวณการละลายของตะกอนจากค่าผลคูณการละลายนั้นถือว่าโมเลกุลของตัวถูกละลายส่วนที่ละลายในสารละลายจะแตกตัวเป็นไอออนหมด ไม่มีโมเลกุลที่ไม่แตกตัวเหลืออยู่ในสารละลายเลย สำหรับตะกอนของสารบางชนิดมิได้เป็นไปตามนั้นเนื่องจาก

โมเลกุลของตะกอนที่ละลายอยู่ในสารละลายแตกตัวเป็นไอออนไม่หมด ตัวอย่างเช่น มีการพบว่า สารละลายอิ่มตัวของแคลเซียมซัลเฟต ประกอบด้วยโมเลกุลของแคลเซียมซัลเฟตปนกับ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{SO}_4^{2-}$  สมดุลเคมีในสารละลายเป็นดังนี้



ค่าคงที่สมดุลอันแรกได้มาจาก

$$K = \frac{[\text{CaSO}_4 (\text{aq})]}{[\text{CaSO}_4 (\text{s})]} \quad (2.27)$$

$$[\text{CaSO}_4 (\text{aq})] = K [\text{CaSO}_4 (\text{s})] = K_s \quad (2.28)$$

$[\text{CaSO}_4 (\text{aq})]$  หมายถึง ความเข้มข้นของโมเลกุลที่ไม่แตกตัวในสารละลายอิ่มตัว

$[\text{CaSO}_4 (\text{s})]$  หมายถึง ความเข้มข้นของสารที่อยู่ในวัฏภาคของแข็ง ซึ่งมีค่าคงที่

ค่า  $K_s$  นี้จะผันแปรไปตามอุณหภูมิและไม่ขึ้นอยู่กั  $[\text{Ca}^{2+}]$  หรือ  $[\text{SO}_4^{2-}]$  ส่วนค่าคงที่การแตกตัวของโมเลกุลของตะกอนในสารละลายแสดงได้ดังนี้

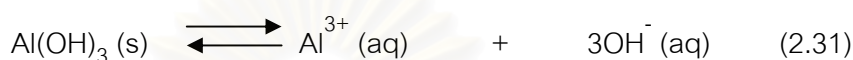
$$K_d = \frac{[\text{Ca}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}]}{[\text{CaSO}_4 (\text{aq})]} \quad (2.29)$$

ค่าคงที่ของผลคูณของการละลายหาได้ดังนี้

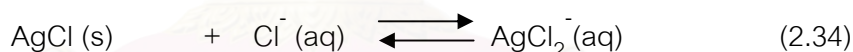
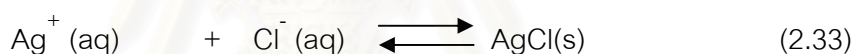
$$[\text{Ca}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}] = K_s \cdot K_d = K_{sp} \quad (2.30)$$

### 2.4.6 ) ผลการเกิดสารเชิงซ้อนที่มีต่อการละลายของตะกอน

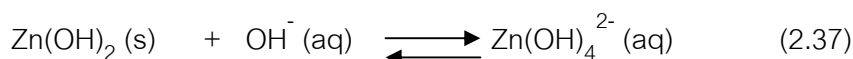
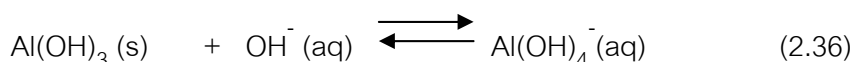
การละลายของตะกอนอาจถูกทำให้มีค่ามากขึ้น ถ้าในสารละลายนั้นมีไฮดรอกไซด์หรือโมเลกุลที่สามารถเกิดสารเชิงซ้อนที่ละลายได้กับแคตไอออนหรือแอนไอออนซึ่งเป็นองค์ประกอบของตะกอน ตัวอย่างเช่น ตะกอนของ  $\text{Al(OH)}_3$  ในสารละลายที่มี  $\text{F}^-$  ละลายอยู่  $\text{Al}^{3+}$  จะรวมกับ  $\text{F}^-$  ทำให้เกิด  $\text{AlF}_6^{3-}$  ซึ่งละลายได้ในน้ำ และทำให้การละลายของ  $\text{Al(OH)}_3$  ในสารละลายมีค่ามากขึ้น



ตะกอนบางชนิดมีแนวโน้มที่จะรวมกับไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบร่วมของตะกอน แล้วกลายเป็นไฮดรอกไซด์เชิงซ้อนที่มีขนาดใหญ่กว่าและละลายได้ เช่น เกลือคลอไรด์ของเงิน และตะกั่ว



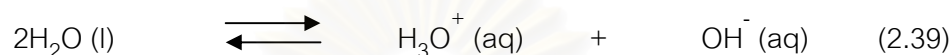
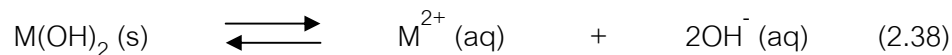
ตะกอนคลอไรด์ของตะกั่ว จะทำให้เกิด  $\text{PbCl}_3^-$  และ  $\text{PbCl}_4^{2-}$  นอกจากนี้ยังมีตะกอนพวกไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมและสังกะสี ไฮดรอกไซด์ของโลหะสองตัวนี้จะละลายได้มากขึ้นในสารละลายที่เป็นเบสแก่ เนื่องจากเกิดไฮดรอกไซด์เชิงซ้อนที่ละลายได้ของโลหะทั้งสอง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้





## 2.5 การละลายของตะกอนชนิดไฮดรอกไซด์ของโลหะ [7]

ไฮดรอกไซด์ของโลหะไดวาเลนต์ (Divalent Metal Ion,  $M^{2+}$ ) เมื่อละลายในน้ำสมดุลเคมีที่เกิดขึ้น คือ



สมการพีชคณิตจากค่าคงที่ของสมดุล

$$[M^{2+}][OH^-]^2 = K_{sp} \quad (2.40)$$

$$[H_3O^+][OH^-] = K_w \quad (2.41)$$

การละลายของตะกอน  $M(OH)_2 = [M^{2+}]$

สมการดุลโดยประจุ

$$2[M^{2+}] + [H_3O^+] = [OH^-] \quad (2.42)$$

การคำนวณหาการละลายของตะกอน  $M(OH)_2$  แบ่งออกเป็น 2 กรณี

- ❖ สำหรับ  $M(OH)_2$  ที่ละลายได้พอสมควรจนทำให้  $OH^-$  ในสารละลายมีค่าแตกต่างไปจาก  $H_3O^+$  มาก คือ  $[OH^-] \gg [H_3O^+]$  จากสมการ (2.42) จะได้

$$2[M^{2+}] = [OH^-] \quad (2.43)$$

แทนค่านี้ในสมการ (2.40) จะได้

$$[M^{2+}] = (K_{sp}/4)^{1/3} \quad (2.44)$$

❖ สำหรับ  $M(OH)_2$  ที่ละลายได้น้อยมาก จน  $OH^-$  ที่มาจากการแตกตัวของตะกอนไม่สามารถทำให้  $OH^-$  ที่มาจากการแตกตัวของน้ำเปลี่ยนแปลงเลยจะได้

$$[H_3O^+] = [OH^-] = 1.00 \times 10^{-7}$$

การละลายของตะกอน  $M(OH)_2$  คำนวณได้จากสมการ (2.40) จะได้

$$\begin{aligned} \text{การละลายของตะกอน } M(OH)_2 &= [M^{2+}] = \frac{K_{sp}}{[OH^-]^2} \\ &= \frac{K_{sp}}{(1.0 \times 10^{-7})^2} \end{aligned}$$

ถ้าการละลายของ  $M(OH)_2$  ไม่เป็นไปตามทั้งสองแบบ คือ  $OH^-$  ที่มาจากตะกอนมีค่าไม่แตกต่างไปมาจากค่า  $OH^-$  ที่มาจากการแตกตัวของน้ำ การคำนวณการละลายของตะกอนจะต้องคำนวณโดยใช้สมการ (2.40), (2.41) และ (2.42)

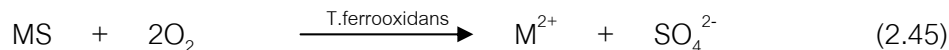
## 2.6 ประเภทของกระบวนการละลายโลหะหนักออกจากตะกอน

กระบวนการละลายโลหะหนักออกจากตะกอนที่ใช้นั้น มีอยู่ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ กระบวนการทางชีวภาพและกระบวนการทางเคมี [8]

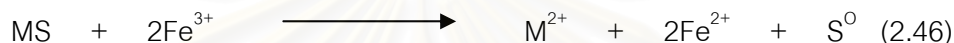
กระบวนการทางชีวภาพ เป็นกระบวนการละลายโลหะหนักโดยอาศัยประโยชน์จากกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ของจุลินทรีย์ (Micro-organism) ซึ่งจะก่อให้เกิดกรดขึ้น แล้วกรดที่เกิดขึ้นนี้จะไปละลายโลหะหนักออกจากตะกอนอีกทีหนึ่ง โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ได้แก่ จุลินทรีย์ในตระกูล (Genus) *Thiobacillus* เช่น *Thiobacillus thiooxidans* , *Thiobacillus*

*ferrooxidans* ซึ่งจัดอยู่ในจุลินทรีย์ที่สร้างอาหารได้เอง โดยใช้พลังงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของสาร [8, 9, 10] กระบวนการสร้างและสลายพลังงานเป็น 2 แบบ คือ

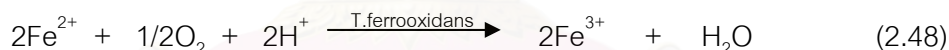
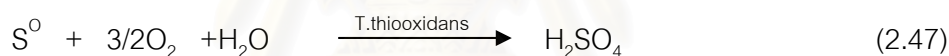
- 1) แบบทางตรง (Direct Process) เป็นการเปลี่ยนโลหะซัลไฟด์ที่ไม่ละลายให้อยู่ในรูปโลหะซัลเฟตที่ละลาย ดังสมการปฏิกิริยาที่ (2.45)



- 2) แบบทางอ้อม (Indirect Process) ในขั้นแรกโลหะซัลไฟด์จะถูกออกซิไดซ์ด้วย  $\text{Fe}^{3+}$  ดังสมการ ที่ (2.46)



จากนั้นแบคทีเรียจะออกซิไดซ์ซัลเฟอร์และไอรอนทู (Fe(II)) ดังสมการปฏิกิริยาที่ (2.47) และ (2.48) จากนั้นปฏิกิริยาจะเริ่มต้นใหม่ในปฏิกิริยาที่ (2.46) เป็นวงจรต่อเนื่อง



วิธีการนี้ จะเกิดกรดซัลฟูริกในปฏิกิริยาที่ (2.47) ที่ทำให้ค่าความเป็นกรด - เบสลดลงช่วยในการละลายของโลหะอีกทางหนึ่ง

กระบวนการทางเคมี เป็นกระบวนการละลายตะกอนด้วยสารเคมี ตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนการเคมี คือ กรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ), กรดไฮโดรคลอริก (HCl), และสารละลายไฮดรอกไซด์ เช่น แอมโมเนียไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), เป็นต้น การเลือกใช้ตัวทำละลายขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์ของตะกอนโลหะ สารละลายกรดเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้ และสามารถละลายโลหะได้เป็นจำนวนมาก ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายโลหะ [8, 11, 12] คือ

- 1) ชนิดของกรด กรดเกลือ เช่น กรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ), กรดไฮโดรคลอริก (HCl) สามารถละลายโลหะได้ดีกว่ากรดอินทรีย์ มีงานวิจัยที่บ่งบอกว่าความสามารถในการละลายโลหะสังกะสีของกรดซัลฟูริก, กรดไฮโดรคลอริกและกรดไนตริก มีความแตกต่างกันเล็กน้อยแต่กรดที่นิยมใช้ คือ กรดซัลฟูริก เนื่องจากเป็นกรดที่มีราคาถูกและง่ายในการกรองแยก [12]

- 2) ปริมาณกรด ปริมาณกรดที่ต้องการขึ้นกับชนิดของตะกอน โดยเฉพาะค่าปริมาณสสารแห้ง (Dry Matter) ของตะกอน ซึ่งถ้าปริมาณสสารแห้งมีค่ามาก ปริมาณกรดที่ใช้ในการละลายก็จะมากขึ้นด้วย
- 3) ค่าความเป็นกรด - เบส (pH) ความสามารถในการละลายจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อค่าความเป็นกรด - เบสลดลง ค่าความเป็นกรด - เบสที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 1 – 2 โดยถ้าค่าความเป็นกรด - เบสสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงประมาณ 9 – 10 โลหะสังกะสีจะละลายได้น้อยที่สุด
- 4) ปริมาณของตะกอน ค่าการละลายของโลหะจะน้อยลงเมื่อปริมาณของตะกอนในกระบวนการเพิ่มขึ้น
- 5) เวลาในการสัมผัส เวลาที่ใช้ในการสัมผัสจะขึ้นกับตัวแปรหลายชนิด เช่น ค่าความเป็นกรด - เบส, ชนิดของกรดและโลหะในตะกอน สำหรับตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดตะกอนแบบไร้ออกซิเจน โดยทำการละลายด้วยกรดที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2 พบว่า 70 % ของแคดเมียม, นิกเกิล, แมงกานีส และสังกะสี จะถูกละลายเมื่อเวลาผ่านไป 18 ชั่วโมง แต่มีแค่ 26 % ของทองแดง และ 4% ของตะกั่วกับโครเมียมเท่านั้นที่ละลาย [10]
- 6) ชนิดและความเข้มข้นของโลหะ โลหะจะละลายได้ง่ายขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโลหะในตะกอนมากขึ้น โลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายไม่เท่ากัน ขึ้นกับสภาพของโลหะที่อยู่ในตะกอน ถ้าโลหะอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ จะมีพันธะในการยึดเกาะน้อย จึงสามารถละลายได้ง่ายและรวดเร็วกว่าสารประกอบเชิงซ้อน
- 7) ความชื้นในตะกอน ตะกอนที่ผ่านการตกตะกอนเป็นระยะเวลายาวนาน ความชื้นภายในตะกอนจะระเหยออกไป ทำให้อนุภาคภายในตะกอนอยู่ใกล้ชิดกันมากยิ่งขึ้น ทำให้ตะกอนมีความเสถียรขึ้น ค่าการละลายจึงลดลง
- 8) ขนาดอนุภาคของตะกอน ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ จะมีพื้นผิวสัมผัสกับกรดน้อย ทำให้การละลายต่ำกว่าตะกอนที่มีขนาดเล็ก
- 9) อุณหภูมิ การละลายโดยส่วนใหญ่ จะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการละลายจะเพิ่มขึ้น

เนื่องจากตัวแปรเหล่านี้ มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการละลายไม่เท่ากัน ดังนั้นความสัมพันธ์ของสมการทางจลนพลศาสตร์ของตัวแปรในการละลายของโลหะหนักออกจากตะกอนจะสามารถบอกผลกระทบที่มีต่อการละลายได้ดียิ่งขึ้น

## 2.7 ความสัมพันธ์ทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมี

จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีเป็นการแสดงความสัมพันธ์ในรูปของอัตราการเกิดและกลไกของปฏิกิริยาเคมี อัตราการเกิดปฏิกิริยาบอกให้ทราบว่า สารตั้งต้นของปฏิกิริยาถูกใช้ไปและสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยานั้นเกิดขึ้นได้เร็วเพียงใด การวัดอัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยมากวัดเป็นความเข้มข้นของสารใดสารหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปในช่วงระยะเวลาใดเวลาหนึ่ง แต่ถ้าสารที่ทำปฏิกิริยาเป็นก๊าซอาจวัดเป็นความดันย่อยที่เปลี่ยนแปลงต่อหน่วยเวลาได้ ความสัมพันธ์ทางจลนพลศาสตร์ยังแสดงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาซึ่งได้แก่ สมบัติของสารตั้งต้น ความเข้มข้นของสารตั้งต้น อุณหภูมิและความดันของระบบ ตัวเร่งปฏิกิริยา และจำนวนวัฏภาคในระบบ เป็นต้น

### 2.7.1) การจำแนกประเภทของปฏิกิริยา [13]

ปฏิกิริยาเคมีอาจจำแนกออกได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่นิยมใช้ คือ การจำแนกโดยพิจารณาจากจำนวนและชนิดของวัฏภาค (Phase) ได้แก่ ปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous Reaction) และปฏิกิริยาวិวิพันธ์ (Heterogeneous Reaction)

ปฏิกิริยาเอกพันธ์ คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในวัฏภาคเดียวหรือที่เป็นเนื้อเดียวกัน ปฏิกิริยาวิวิพันธ์ คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในหลายวัฏภาคหรือที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

ในระบบเอกพันธ์ อุณหภูมิ ความดัน และองค์ประกอบ (Composition) มีผลโดยตรงต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ในระบบวิวิพันธ์ ซึ่งมีมากกว่าหนึ่งวัฏภาคจะมีเรื่องการถ่ายเทมวลและความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยายุ่งยากและซับซ้อนมากขึ้น เช่น การเผาไหม้ถ่านหินอัดก้อน ออกซิเจนต้องแพร่ผ่านชั้นก๊าซที่อยู่รอบๆ ของอนุภาคถ่านหิน และผ่านชั้นเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ผิวของอนุภาคถ่านหินเข้าไป ปฏิกิริยาการดังกล่าว จะมีผลอย่างมากต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ในกรณีของการเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนภายในอนุภาค ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุน ถ้าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไม่สามารถถ่ายเทออกมาได้อย่างรวดเร็วพอ ก็จะเป็นผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่จุดต่างๆ ภายในอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกันไปได้ เป็นต้น

### 2.7.2) อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (Rate of Reaction) [13]

อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาแสดงได้ในเทอมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นหรือสารผลิตภัณฑ์ ถ้าให้สาร A เป็นสารที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยา สามารถเขียนเป็นสมการอัตราเร็ว

จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนโมลของสาร A ในการเกิดปฏิกิริยาได้หลายแบบขึ้นอยู่กับว่า จะเทียบกับอะไรเป็นหลัก เช่น เทียบกับปริมาตรของของไหลที่เข้าทำปฏิกิริยา

$$r_A = (1/V) dN_A/dt = \frac{\text{โมลของสาร A ที่เกิดขึ้น}}{\text{(ปริมาตรของของไหล) (เวลา)}} \quad (2.49)$$

เมื่อ	$r_A$	คือ	อัตราเร็วของปฏิกิริยาสำหรับสาร A (กิโลกรัมโมลต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
	$N_A$	คือ	จำนวนโมลของสาร A (กิโลกรัมโมล)
	$t$	คือ	เวลา (วินาที)
	$dN_A/dt$	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงของสาร A เทียบกับเวลา (กิโลกรัมโมลต่อวินาที)
	$V$	คือ	ปริมาตรของของไหล (ลูกบาศก์เมตร)

หรือโดยการเทียบกับมวลของของแข็งในระบบของของไหล – ของแข็ง

$$r'_A = (1/W) dN_A/dt = \frac{\text{โมลของสาร A ที่เกิดขึ้น}}{\text{(มวลของของแข็ง) (เวลา)}} \quad (2.50)$$

เมื่อ  $W$  คือ มวลของของแข็ง (กิโลกรัม)

นอกจากนี้ อาจจะใช้เทียบกับพื้นที่ผิวสัมผัสในระบบของของไหลสองชนิดหรือกับพื้นที่ผิวของของแข็งในระบบก๊าซ – ของแข็ง, ปริมาตรของของแข็งในระบบก๊าซ – ของแข็งหรือเทียบกับปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ ก็ได้

ในระบบวิวิธพันธุ์ การเลือกใช้สมการใดนั้นขึ้นกับความเหมาะสมในแต่ละกรณี หรือบางครั้งอาจจะใช้สมการนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วก็มี

สำหรับระบบเอกพันธุ์ ถ้าเลือกใช้สมการ (2.49) อาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$r_A = (1/V) dN_A/dt = (1/V) d(C_A V) / dt \quad (2.51)$$

เมื่อ  $C_A$  คือ ความเข้มข้นของสาร A (กิโลกรัมโมลต่อลูกบาศก์เมตร)

ถ้า  $V$  มีค่าคงที่ จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$r_A = dC_A / dt \quad (2.52)$$

โดย ถ้า A เป็นสารผลิตภัณฑ์  $r_A$  คือ อัตราการเกิดของสาร A

A เป็นสารตั้งต้น  $r_A$  คือ อัตราการหายไปของสาร A

สำหรับระบบเอกพันธ์ อัตราการเกิดขึ้นหรือหายไปของสาร A ขึ้นกับสถานะของระบบ ได้แก่ องค์ประกอบของสาร รวมถึงอุณหภูมิและความดันของระบบ โดยอาจเขียนได้ว่า

$$r_A = f(\text{อุณหภูมิ, ความดันและองค์ประกอบ}) \quad (2.53)$$

ถ้าอุณหภูมิและความดันคงที่ จะได้ว่า

$$r_A = f(\text{องค์ประกอบ}) \quad (2.54)$$

นั่นคือ สมการจะอยู่ในรูปที่ง่ายที่สุด อัตราการเกิดขึ้นหรือหายไปของสาร A ขึ้นกับองค์ประกอบของสารที่ทำปฏิกิริยาเท่านั้น

ถ้าพิจารณาปฏิกิริยาที่มีสมการปริมาณสัมพันธ์ ดังนี้



สมมติว่า กลไกควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาข้างบนเกี่ยวข้องกับการชนระหว่างโมเลกุลของสาร A และ B ได้เป็นสารใหม่ D ขึ้นมา จำนวนการชนกันของโมเลกุล A และ B จะเป็นปฏิกาดโดยตรงกับอัตราเร็วของปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิตั้งที่ จำนวนการชนกันจะเป็นปฏิกาดโดยตรงกับความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาในของผสม ดังนั้น สามารถเขียนอัตราการหายไปของสาร A ได้คือ

$$-r_A = kC_A C_B \quad (2.56)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา (Rate Constant)  
(ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมโมลต่อวินาที)

$C_A$  และ  $C_B$  คือ ความเข้มข้นของสาร A และสาร B ตามลำดับ (กิโลกรัมโมล)

### 2.7.3) อันดับของปฏิกิริยา (Order) [13]

ถ้ามีปฏิกิริยาหนึ่งเกิดขึ้น โดยมีสารที่เข้าทำปฏิกิริยา คือ A, B,..., D สมการอัตราเร็วของปฏิกิริยาเขียนได้เป็น

$$r_A = -kC_A^a C_B^b \dots C_D^d \quad (2.57)$$

โดยที่ a, b,..., d ไม่จำเป็นต้องมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัมประสิทธิ์ปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric Coefficient) จะเรียก a, b,..., d ว่า อันดับของปฏิกิริยา โดย

มีปฏิกิริยาอันดับ a เมื่อคิดสาร A เป็นหลัก

มีปฏิกิริยาอันดับ b เมื่อคิดสาร B เป็นหลัก

มีปฏิกิริยาอันดับ n เมื่อคิดเทียบกับทั้งหมด โดยที่  $n = a + b + \dots + d$

### 2.7.4) ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา [14]

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิ หาได้จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius' Equation) ดังนี้

$$k = A e^{-E_A / RT} \quad (2.58)$$

โดยที่ A = ค่าคงที่สำหรับปฏิกิริยาหนึ่งๆ เรียกว่า แฟกเตอร์ความถี่ (Frequency Factor หรือ Pre - exponential Factor) โดยค่า A นี้จะมีหน่วยเดียวกับค่าคงที่ของปฏิกิริยา

$E_A$  = พลังงานการกระตุ้น (Activation Energy) มีหน่วยเป็น จูล์นต่อโมล

R = ค่าคงที่ของก๊าซมีค่า 8.314 จูล์นต่อโมลต่อเคลวิน

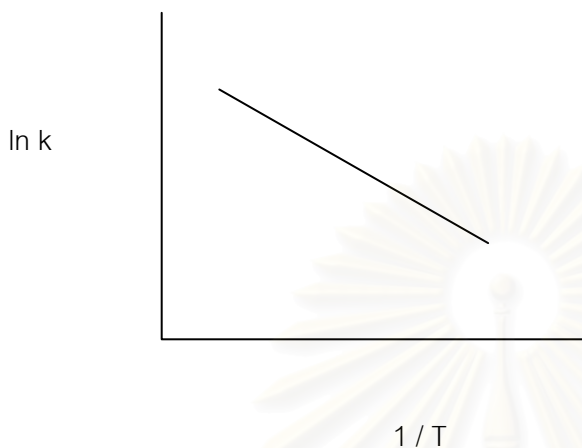
T = อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

เมื่อเขียนสมการ (2.58) ในรูปของลอการิทึม จะได้

$$\ln k = \ln A - E_A / RT \quad (2.59)$$



เมื่อนำสมการ (2.59) มาเขียนกราฟระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  จะได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 2.5 และกราฟที่ได้ เรียกว่า Arrhenius plot ซึ่งค่าความชันที่ได้ สามารถนำไปคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นได้



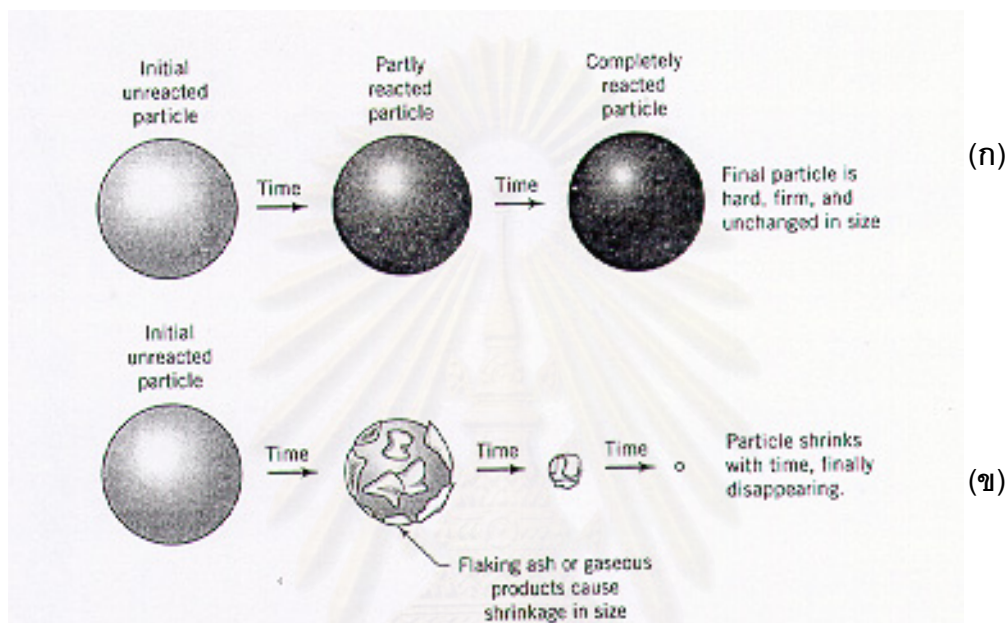
รูปที่ 2.5 Arrhenius Plot

### 2.7.5) ปฏิกิริยารีดอกซ์แบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา [14 - 17] (Uncatalyzed Heterogeneous Reaction)

ในการเกิดปฏิกิริยาบางครั้ง สารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาอาจมีมากกว่าหนึ่งวัฏภาค ทำให้กลไกของปฏิกิริยามีความซับซ้อนยิ่งขึ้น เนื่องจากเราต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆอย่าง que เพิ่มมากขึ้น ทั้งทางด้านเคมีและกายภาพด้วยว่ามีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยารวมมาน้อยเพียงใด โดยปัจจัยที่ว่านี้ ได้แก่

- ปริมาณพื้นผิวสัมผัสระหว่างสารที่เข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งถ้าพื้นผิวสัมผัสมากก็ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี โดยเราสามารถเพิ่มพื้นผิวสัมผัสได้โดยวิธีการต่างๆ เป็นต้นว่า การบดอนุภาคของแข็ง, การใช้หัวฉีดในการพ่นของเหลวให้สัมผัสกับอนุภาคของแข็งได้มากขึ้นหรือใช้การกวนสารก็ได้
- อัตราการแพร่ของสารตั้งต้นที่เป็นของไหลเข้าไปที่พื้นผิวสัมผัส ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นกับปัจจัยหลาย ๆ อย่างเช่น ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่าง 2 วัฏภาค ที่เข้าทำปฏิกิริยา, ความดันของก๊าซ, คุณสมบัติของระบบและปัจจัยด้านกายภาพของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยา เป็นต้น
- อัตราการแพร่ของผลิตภัณฑ์ออกจากบริเวณพื้นผิวสัมผัส ซึ่งถ้าแพร่ได้ช้าก็ จะทำให้สารตั้งต้นแพร่เข้ามาทำปฏิกิริยาได้ยาก

นอกจากปัจจัยเหล่านี้แล้ว ในการศึกษาปฏิกิริยารีดอกซ์ ยังต้องคำนึงถึงรูปแบบในการเกิดปฏิกิริยาดังว่าเป็นอย่างไร เช่น เมื่อเกิดปฏิกิริยาไปแล้ว อนุภาคมีขนาดเล็กหรือไม่ รูปที่ 2.6 แสดง กลไกการเกิดปฏิกิริยา 2 กรณี คือ เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้ว ขนาดอนุภาคไม่เล็กลง เนื่องจากเกิดเถ้าหรือผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งขึ้นมาแทน ส่วนอีกแบบ อนุภาคจะเล็กลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เป็นของไหล ทำให้เกิดการแพร่ออกไปจากอนุภาคสารตั้งต้นได้ ขนาดจึงค่อยๆ เล็กลง



รูป 2.6 การเปลี่ยนแปลงของอนุภาคสารตั้งต้นที่เกิดขึ้นระหว่างเกิดปฏิกิริยา  
(ก) ขนาดของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลง (ข) ขนาดของอนุภาคเล็กลง

รูปแบบปฏิกิริยาที่แตกต่างกันไปทั้งสองกรณีนี้ จะส่งผลให้กลไกการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันไปด้วย ดังนี้

กรณีที่ 1 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นของแข็งที่ไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา (Inert Solid) หรือ เถ้า (Ash)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



ขั้นตอนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน คือ

1. การแพร่ของสารตั้งต้นที่เป็นของไหล B ผ่านชั้นฟิล์มไปยังพื้นผิวของของแข็ง A
2. การแพร่ของสารตั้งต้น B ผ่านชั้นเถ้าเข้าไปยังพื้นผิวส่วนนอกของของแข็ง A
3. การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของไหล B กับของแข็ง A

4. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นของไหลผ่านชั้นถ้ากลับสู่พื้นผิวส่วนนอกของของแข็ง A
5. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นของไหลผ่านชั้นฟิล์มรอบๆอนุภาคออกไปภายนอก

กรณีที่ 2 ไม่มีเถ้าหรือของแข็งเกิดขึ้น

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



เมื่อไม่มีเถ้าเกิดขึ้น ดังนั้นขั้นตอนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเหลือเพียง 3 ขั้นตอน คือ

1. การแพร่ของสารตั้งต้นที่เป็นของไหล B ผ่านชั้นฟิล์มไปยังพื้นผิวของของแข็ง A
  2. การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของไหล B กับของแข็ง A
  3. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นของไหลผ่านชั้นฟิล์มรอบๆอนุภาคออกไปภายนอก
- เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะศึกษาปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีออกจากตะกอน ซึ่งรูปแบบของการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นดังกรณีที่ 2 ดังนั้น ในที่นี้จึงจะกล่าวถึงเฉพาะกลไกการเกิดปฏิกิริยาของกรณีที่ 2 เท่านั้น

### 2.7.6) กลไกการเกิดปฏิกิริยา [16,18]

การหากลไกการเกิดปฏิกิริยาโดยทั่วไปจะหาโดยการเปรียบเทียบว่า ระหว่างขั้นตอนการแพร่ของโปรตอนผ่านชั้นฟิล์มบางๆ ของสารละลายกรดกับขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีว่า ขั้นตอนใดช้าที่สุด ขั้นตอนนั้นจะเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate Determining Step)

สมมติฐาน : อนุภาคของตะกอนเป็นทรงกลมและขนาดเล็กมาก

#### 1) แบบจำลองการแพร่

รูปทั่วไปของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามสมการที่ 2.61

จากกฎของฟิคส์ (Fick's Law)

$$-\frac{1}{S} \frac{dN_A}{dt} = -\frac{1}{4\pi r^2} \frac{dN_A}{dt} = -\frac{a}{4\pi r^2} \frac{dN_B}{dt} = a k_g (C_{Bg} - C_B) = a k_g C_{Bg} \quad (2.62)$$

โดยที่

$N_A$  = โมลของของสาร A หรือ  $Zn(OH)_2$  (กิโลกรัมโมล)

$N_B$  = โมลของสาร B หรือ กรดซัลฟูริก (กิโลกรัมโมล)

- $S$  = พื้นที่ผิวสัมผัสที่เกิดปฏิกิริยาเคมี (ตารางเมตร)  
 $r$  = รัศมีของอนุภาคของตะกอน (เมตร)  
 $t$  = เวลา (วินาที)  
 $k_g$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลระหว่างของไหลกับอนุภาค (กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตรต่อปาสคาลต่อวินาที)  
 $C_{Bg}$  = ความเข้มข้นของสาร B ในกระแสของไหล (กิโลกรัมโมลต่อลูกบาศก์เมตร)  
 $C_B$  = ความเข้มข้นของสาร B ที่ผิวสัมผัส (กิโลกรัมโมลต่อลูกบาศก์เมตร)

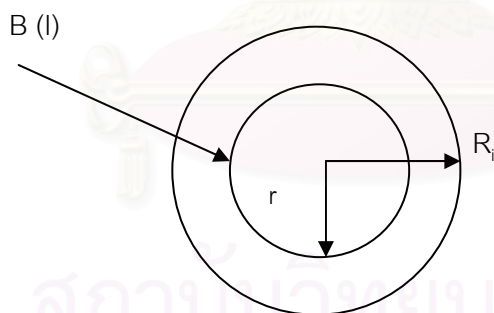
ถ้าให้  $\rho_A$  เป็นความหนาแน่นโดยโมลของสาร A (โมลต่อปริมาตร)

$V$  เป็นปริมาตรของอนุภาค

ดังนั้น

$$N_A = \rho_A V = (\text{โมลของสาร A / ปริมาตรของแข็ง}) \cdot (\text{ปริมาตรของแข็ง}) \quad (2.63)$$

ในขณะที่เกิดปฏิกิริยา ขนาดของอนุภาคจะลดลงเรื่อยๆ โดยที่รัศมีจะลดลงจาก  $R_i$  เป็น  $r$  ที่เวลาใดๆ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 อนุภาคเริ่มต้นรัศมี  $R_i$  เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลาย B

จากสมการที่ (2.63) การลดลงของปริมาตรหรือรัศมีของแกนในเนื่องจากการหายไปของสาร B หรือ A เขียนได้เป็น

$$\begin{aligned}
 -dN_A &= -adN_B = -\rho_A dV \\
 &= -\rho_A d\left[\frac{4\pi r^3}{3}\right] \\
 &= -4\pi\rho_A r^2 dr \quad (2.64)
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $r$  คือ รัศมีของอนุภาคที่เวลาใดๆ  
 แทนสมการที่ (2.64) ในสมการที่ (2.62) จะได้

$$-\frac{1}{S} \frac{dN_A}{dt} = -\rho_A \frac{dr}{dt} = ak_g C_{Bg} \quad (2.65)$$

เนื่องจากขนาดของตะกอนสังกะสีมีขนาดเล็กกว่า 0.6 มิลลิเมตร ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลระหว่างของไหลกับอนุภาค ( $k_g$ ) จึงเป็นดังสมการที่ (2.66) [18]

$$k_g = \frac{2D_{AB}}{D_p} + 0.31N_{Sc}^{-2/3} \left( \frac{\Delta\rho\mu_B g}{\rho_B^2} \right)^{1/3} \quad (2.66)$$

โดยที่

$D_{AB}$	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร A ในสาร B (ตารางเมตรต่อวินาที)
$D_p$	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของสาร A (เมตร)
$\rho_B$	คือ	ความหนาแน่นของสาร B (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
$\Delta\rho$	คือ	$ \rho_B - \rho_A $ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
$\mu_B$	คือ	ความหนืดของสาร B (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)
$N_{Sc}$	คือ	Schmidt Number ซึ่งเท่ากับ $\mu_B / \rho_B D_{AB}$
$g$	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Standard Acceleration of Gravity) ซึ่งเท่ากับ 9.80665 เมตรต่อวินาที <sup>2</sup>

เนื่องจากเทอมหลังของสมการที่ (2.66) มีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.66) จึงประมาณได้ว่า

$$k_g \approx \frac{2D_{AB}}{D_p} \quad (2.67)$$

แทนค่าสมการที่ (2.67) ลงในสมการที่ (2.65) ได้ว่า

$$\begin{aligned} -\rho_A \frac{dr}{dt} &= \frac{2aD_{AB}C_{Bg}}{D_p} \\ &= \frac{2aD_{AB}C_{Bg}}{2r} \\ &= \frac{aD_{AB}C_{Bg}}{r} \end{aligned} \quad (2.68)$$

อินทิเกรตสมการที่ (2.68)

$$\int_{R_i}^r r dr = -\frac{aD_{AB}C_{Bg}}{\rho_A} \int_0^t dt \quad (2.69)$$

$$t = \frac{\rho_A R_i^2}{2bC_{Bg}D_{AB}} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_i} \right)^2 \right] \quad (2.70)$$

จาก

$$1 - x_A = \frac{\text{(ปริมาตรของอนุภาคที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา)}}{\text{(ปริมาตรทั้งหมดของอนุภาค)}} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{\frac{4}{3}\pi R_i^3} = \left( \frac{r}{R_i} \right)^3 \quad (2.71)$$

แทนค่า (2.71) ลงในสมการ (2.70) ได้ว่า

$$\frac{t}{\tau} = 1 - \left( \frac{r}{R_i} \right)^2 = 1 - (1 - X_A)^{2/3} \quad (2.72)$$

โดยที่

$$\tau = \frac{\rho_A R_i^2}{2bC_{Bg}D_{AB}} \quad (2.73)$$

2) แบบจำลองปฏิกิริยาเคมี

เมื่อปฏิกิริยาการละลายเป็นอันดับที่ 1

$$-\frac{1}{4\pi r^2} \frac{dN_A}{dt} = -\frac{a}{4\pi r^2} \frac{dN_B}{dt} = akC_{Bg} \quad (2.74)$$

เมื่อ

$k$  คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (วินาที<sup>-1</sup>)  
แทนค่าสมการที่ (2.64) ลงในสมการที่ (2.74) ได้ว่า

$$-\rho_A \frac{dr}{dt} = akC_{Bg} \quad (2.75)$$

อินทิเกรตสมการที่ (2.75) จะได้

$$-\rho_A \int_R^r dr = akC_{Bg} \int_0^t dt \quad (2.76)$$

$$t = \frac{\rho_A}{akC_{Bg}} (R - r) \quad (2.77)$$

ถ้าเกิดการละลายของตะกอนหมด แล้ว  $r = 0$

$$\tau = \frac{\rho_A R}{akC_{Bg}} \quad (2.78)$$

แทนค่า (2.71) และ (2.78) ลง (2.77) แล้วจัดรูปได้ว่า

$$\frac{t}{\tau} = 1 - \frac{r}{R} = 1 - (1 - x_A)^{1/3} \quad (2.79)$$

กล่าวโดยสรุปคือ

1. ถ้าการแพร่เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา

$$\frac{t}{\tau} = 1 - \left( \frac{r}{R_i} \right)^2 = 1 - (1 - X_A)^{2/3} \quad (2.72)$$

$$\text{โดยที่} \quad \tau = \frac{\rho_A R_i^2}{2bC_{Bg} D_{AB}} \quad (2.73)$$

2. ถ้าการเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นขั้นตอนการควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา

$$\frac{t}{\tau} = 1 - \frac{r}{R} = 1 - (1 - x_A)^{1/3} \quad (2.79)$$

โดยที่ 
$$\tau = \frac{\rho_A R}{akC_{B_0}} \quad (2.78)$$

ถ้าขั้นตอนใดเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็ว เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างเวลากับเทอมทางขวามือของสมการจะได้รับความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1) งานวิจัยในประเทศ

**ธีรพันธุ์ พิมพทอง (2542) [19]** ศึกษาเกี่ยวกับ จลนพลศาสตร์ของการละลายสังกะสี จากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อัตราการกวน, ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ตั้งแต่ 1.0 ถึง 4.0 โมลต่อลิตร, อุณหภูมิตั้งแต่ 32 องศาเซลเซียสจนถึง 95 องศาเซลเซียส และเปอร์เซ็นต์ของแข็งเท่ากับ 0.2, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า อัตราเร็วของการละลายสังกะสีจากฝุ่นเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 1 โมลต่อลิตร จนถึง 3 โมลต่อลิตร และจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อไปอีก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของความหนืดที่เพิ่มขึ้น ทำให้การแพร่ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับสังกะสีทำได้ยากขึ้น ทำให้การละลายลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงๆ อันดับปฏิกิริยาซึ่งหาโดยใช้อัตราเร็วเริ่มต้นมีค่า 0.76 ที่ 60 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงขึ้นอัตราเร็วของการละลายสังกะสีจะเพิ่มขึ้น และกลไกการเกิดปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมี โดยมีค่าพลังงานการกระตุ้นปรากฏ (Apparent Activation Energy) ประมาณ 10.78 กิโลแคลอรีต่อโมล (45.28 กิโลจูลต่อโมล) ส่วนอัตราเร็วในการกวนไม่มีผลต่ออัตราการละลายของสังกะสี นอกจากนี้เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของแข็งในสารละลายอัตราเร็วของการละลายสังกะสีจะลดลง



**เก็จวลี พุกษาทร และคณะ (2542) [20]** ได้ศึกษาเกี่ยวกับ ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อ ความเสถียรของตะกอนแคดเมียมไฮดรอกไซด์ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบตะกอน, ร้อยละความชื้น, เวลาที่ใช้ในการตกตะกอนและชนิดของกากตะกอน โดยกาก ตะกอนที่ทำการศึกษาเป็นกากตะกอนที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นและตะกอนจากโรงงาน อุตสาหกรรมที่มีโลหะแคดเมียมผสมอยู่ จากการศึกษ พบว่า เมื่อภาวะอื่นๆ คงที่ ถ้าร้อยละ ความชื้นลดลง ค่าการละลายของโลหะแคดเมียมจะลดลงด้วย และถ้าอบตะกอนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการละลายของแคดเมียมจะลดลง นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าการละลายของตะกอนในแต่ละวัน จะพบว่า ตะกอนที่มีระยะเวลาการตกตะกอน 1 วัน ค่าการละลายของโลหะแคดเมียมสูงกว่าตะกอนที่มีระยะเวลาการตกตะกอน 6 วัน และ 12 วัน ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ ตกตะกอนเป็นระยะเวลานาน จะทำให้ความชื้นในตัวตะกอนระเหยออกไป ส่งผลให้ตะกอน จัดเรียงตัวกันแน่นขึ้น การละลายจึงมีค่าลดลง ซึ่งเหตุผลนี้สามารถใช้อธิบายผลของอุณหภูมิในการอบและร้อยละความชื้นได้อีกด้วย กล่าวคือ เมื่อทำการอบตะกอนที่อุณหภูมิสูงขึ้น น้ำจะระเหย ออกไปมากขึ้นและเร็วขึ้น ทำให้ตะกอนยึดตัวกันได้ดีขึ้น การละลายจึงมีค่าลดลง และจาก ผลการวิจัยสำหรับตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมก็ให้ผลในแนวโน้มเดียวกับตะกอนสังเคราะห์

### 2.8.2) งานวิจัยต่างประเทศ

**Ried (1988) [11]** ได้ทำการศึกษาการละลายของโลหะหนักออกจากตะกอนน้ำเสียที่ได้ จากการบำบัดทางชีวภาพ (Activated Sludge) โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ชนิดของกรด, pH และปริมาณกรดที่ใช้ จากการศึกษาพบว่า กรดอินทรีย์ (Organic Acid) จะละลายโลหะหนักได้น้อยกว่ากรดเกลือ (Mineral Acid) และกรดเกลือชนิดต่างๆ ซึ่งได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก (HCl), กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) และกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) ให้ผลในการละลายสังกะสีไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ ยังพบว่า การละลายจะไม่เกิดขึ้น ถ้า pH สูงกว่า 4 โดยนิกเกิล, สังกะสีและแคดเมียม จะละลายได้มากถึง 80 – 95% ที่ pH เท่ากับ 1 และปริมาณกรดที่ใช้จะขึ้นกับปริมาณของแข็งใน ตะกอน โดยถ้าตะกอนมีส่วนที่เป็นของแข็งมากหรือมีส่วนที่เป็นน้ำอยู่น้อย ปริมาณกรดที่ต้องใช้ต่อ หนึ่งหน่วยปริมาตรของตะกอนแห้งจะมีค่าน้อย

**Sreekrishnan and Tyagi (1994) [9]** ได้ทำการศึกษาการละลายของโลหะหนักชนิด ต่าง ๆ จากตะกอนน้ำเสีย ในด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ โดยทำการศึกษาทั้งการละลาย 3 วิธี เปรียบเทียบกัน ได้แก่ วิธีการละลายโดยการเติมกรด, การใช้จุลินทรีย์ชนิดที่สามารถออกซิไดซ์ เหล็กได้ (Iron Oxidizing Bacteria) และจุลินทรีย์ชนิดที่สามารถออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ได้ (Sulphur

Oxidizing Bacteria) จากการศึกษพบว่า วิธีการเติมกรด ใช้เวลาน้อย แต่ต้องใช้ปริมาณกรดที่  
ต้องเติมมาก โดยปริมาณกรดที่ใช้จะเป็นไปตามสมการ

$$W = a C^b \quad (2.78)$$

โดย  $W$  = ปริมาณกรดที่ต้องการในหน่วย กรัมของกรดซัลฟูริกต่อกรัมของตะกอนแห้ง

$C$  = ความเข้มข้นของของแข็งในตะกอน ในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

$a, b$  = ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของตะกอนและ pH ของการละลาย

ส่วนกระบวนการใช้จุลินทรีย์ชนิดออกซิไดซ์เหล็ก เป็นกระบวนการที่ช้าและจำเป็นต้องมีการปรับค่าความเป็นกรด - เบส (pH) เริ่มต้นเพื่อให้แบคทีเรียมีชีวิตอยู่ได้ แต่กระบวนการปรับ pH ของตะกอนให้เป็นกลาง (Neutralization) หลังจากผ่านกระบวนการละลายแล้ว จะใช้ปริมาณโลหะอัลคาไล (Alkali) ในการปรับค่าความเป็นกรด - เบสน้อย เนื่องจากค่าความเป็นกรด - เบสหลังจากเกิดการละลายแล้วจะมีค่าใกล้เคียง 7 ส่วนกระบวนการใช้แบคทีเรียชนิดออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ จะเกิดการละลายได้เร็วกว่า แต่จะไม่เร็วเท่ากระบวนการเติมกรด และไม่ต้องมีการปรับค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้น นอกจากนี้ การละลายของโลหะแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน ขึ้นกับชนิดของโลหะและชนิดของตะกอน ในด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่ากระบวนการใช้แบคทีเรียชนิดออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ จะเหมาะสมกับโรงงานที่มีกำลังการผลิตต่ำๆ และมีความเข้มข้นของของแข็งในตะกอนสูง ส่วนกระบวนการละลายด้วยกรดเหมาะสมสำหรับโรงงานที่มีกำลังการผลิตสูงๆ นอกจากนี้ ถ้าตะกอนมีความเข้มข้นของของแข็งต่ำกว่า 20 กรัมต่อลิตร จะทำให้ค่าใช้จ่ายในบำบัดตะกอนสูงขึ้นทั้ง 3 กระบวนการ และอัตราการเติมอากาศ (Aeration Rate) มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการละลายแบบชีวภาพทั้งสองแบบ

Wozniak and Huang (1982) [21] ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการละลายโลหะชนิดต่างๆ จากตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยการวิจัยพบว่า ความสามารถในการละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH และอัตราส่วนของตะกอนกับสารละลายลดลง และเวลาเพิ่มขึ้น โลหะส่วนมากจะละลายได้ทันทีที่เติมกรดลงไป ซึ่งแสดงว่าโลหะเหล่านี้จะอยู่ในตะกอนในรูปของสารประกอบอินทรีย์ที่มีแรงยึดเหนี่ยวของพันธะน้อยกว่าสารประกอบอินทรีย์หรือสารประกอบเชิงซ้อน ดังนั้นจึงสามารถละลายได้ง่ายกว่า อัตราการละลายของโลหะยังขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะของโลหะนั้นๆ โดยพบว่าสังกะสีจะมีอัตราการละลายเร็วกว่าโลหะชนิดอื่นๆ (ซึ่งได้แก่ ทองแดง, แคดเมียม, นิกเกิล, ตะกั่ว และโครเมียม) ที่ทุกๆ pH นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้สรุปว่า สภาวะของการละลายที่เหมาะสมอยู่ที่ pH ระหว่าง 1.5 – 2, ความเข้มข้นของของแข็งในตะกอนน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ และระยะเวลาในการละลาย 12 ชั่วโมง

Tyagi et al. (1987) [9] ได้ทำการศึกษากำจัดโลหะหนักออกจากตะกอนที่ผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยวิธีทางเคมีและทางชีวภาพ จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของการละลายโลหะหนักขึ้นอยู่กับค่า pH, ความเข้มข้นของของแข็งในตะกอนและช่วงเวลาในการละลายด้วยกรด โดยในกระบวนการทางเคมี ทองแดงจะถูกละลายจนความเข้มข้นลดลงจนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ที่ pH เท่ากับ 1.5 หรือต่ำกว่า และความเข้มข้นของของแข็งเท่ากับ 35 กรัมต่อลิตร ขณะที่กระบวนการทางชีวภาพ จะสามารถใช้ pH ได้สูงกว่า คือประมาณ 3-4 ส่วนสังกะสี การละลายจะได้ค่าสูงสุด เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง ที่ pH เท่ากับ 2.5 หรือต่ำกว่า แต่ถ้าเพิ่ม pH ไปถึง 3.5 หรือ 4 จะต้องใช้เวลาดัง 30 ชั่วโมง เพื่อให้การละลายถึงค่าสูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบการละลายของโลหะชนิดต่างๆ จะพบว่า โลหะสังกะสีจะให้ค่าการละลายที่สูงกว่าตะกั่วและทองแดงในทุกๆ pH นอกจากนี้ ยังพบว่ากระบวนการทางชีวภาพมีค่าใช้จ่ายทางด้านสารเคมีที่ต้องใช้น้อยกว่ากระบวนการทางเคมี เนื่องจากกระบวนการทางชีวภาพเติมกรดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Legiec et al.(1989) [22] ได้ศึกษาการนำโลหะหนักออกจากถ้ำชนิดต่างๆ ที่ได้จากการเผาไหม้ของเสีย (Municipal Solid Waste) โดยสกัดโลหะออกจากถ้ำด้วยกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นจึงกำจัดโลหะออกจากสารละลายด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Method) โดยขั้นตอนการสกัดพบว่า อัตราการละลายโลหะจะขึ้นกับค่าความเป็นกรด - เบส, เวลาและชนิดของถ้ำ โดยค่าความเป็นกรด - เบสของการละลายที่ดีจะอยู่ในช่วง 1 - 3

Cruells et al. (1992) [23] ได้ทำการศึกษาอัตราเร็วในการละลายสังกะสีจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 0.1 ถึง 2 โมลต่อลิตรที่อุณหภูมิ 18 ถึง 51 องศาเซลเซียส พบว่า สังกะสีประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์อยู่ในรูปที่ทำปฏิกิริยาได้ดี ในขณะที่สังกะสีที่เหลือจะอยู่ในรูปของซิงค์เฟอร์ไรต์ โดยอัตราเร็วของสังกะสีที่ไวต่อปฏิกิริยาจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ แต่อัตราเร็วของการละลายเหล็กจะขึ้นกับอุณหภูมิ นอกจากนี้ ผู้ทำการวิจัยยังสรุปว่า สภาพที่เหมาะสมในการละลาย คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและเปอร์เซ็นต์ของแข็งเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยจะได้เปอร์เซ็นต์การละลายสังกะสีเฉลี่ย 80 เปอร์เซ็นต์ และเหล็ก 40 เปอร์เซ็นต์

Neale et al. (1997) [24] ศึกษาการกำจัดโลหะหนัก (Cr, Cd และ Pb) ออกจากดินโดยใช้กรดและสารละลายเชิงซ้อน จากผลการทดลองพบว่า การสกัดโลหะออกจากดินขึ้นอยู่กับชนิดของดิน, ความเข้มข้นของโลหะ และค่าความเป็นกรด - เบสของตัวทำละลาย นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังพบว่า แคลเซียมละลายได้ง่ายกว่าตะกั่วและโครเมียม โดยโครเมียมเป็นโลหะที่ละลายได้น้อยที่สุด ซึ่งอาจเนื่องมาจากโครเมียมอยู่ในรูปออกซิเดชันของโครเมียมไตรวาเลนต์ (Cr(III)) ที่ละลาย

ได้น้อย ดังนั้นอาจจำเป็นต้องมีสารช่วยออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปออกซิเดชันของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr(IV)) ที่สามารถละลายได้มากกว่า

Dryer et al. (1998) [25] ได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ในน้ำ นอกจากจะขึ้นกับค่าความเป็นกรด - เบส และอุณหภูมิตามงานวิจัยอื่นๆ แล้ว ยังขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะ, ขนาดของอนุภาค, ลักษณะการทดลองและเวลาของการตกตะกอนในรูปของตะกอนเชิงซ้อนกับสารพอลิโนวเคลียร์ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาในการตกตะกอนนี้จะช้า ทำให้ยากในการละลายโลหะ

Abdel – Aal (1999) [26] ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการละลายลิแวนด์ที่ประกอบไปด้วยซิงค์ซิลิเกตด้วยกรดซัลฟูริก โดยกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างปริมาณหางแร่กับกรดมีค่าคงที่ในอัตราส่วน 1 : 20 กรัมต่อมิลลิลิตร จากการศึกษาพบว่าอนุภาคขนาดเล็กจะละลายได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่, อุณหภูมิสูงการละลายจะเร็วกว่าอุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นกรดยิ่งสูงการละลายจะยิ่งเร็ว นอกจากนี้ ยังพบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการละลาย คือ ขนาดของอนุภาคเท่ากับ -200 + 270 mesh, อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสและความเข้มข้นกรดซัลฟูริกเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งที่ภาวะนี้การละลายจะเกิดขึ้นถึง 94 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 180 นาที นอกจากนี้ผู้ทำการวิจัย ยังพบว่า ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นของผลิตภัณฑ์เป็นขั้นตอนที่ควบคุมปฏิกิริยา โดยค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 3.2 กิโลแคลอรีต่อโมล

## บทที่ 3

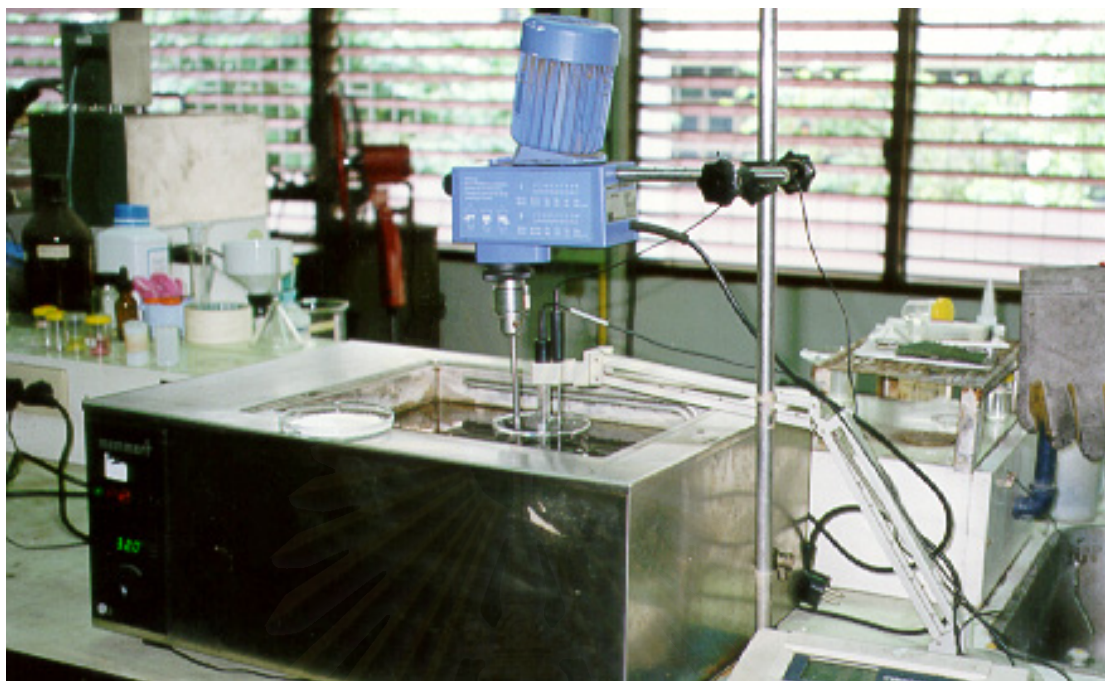
### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 รูปแบบการศึกษา

งานวิจัยนี้ เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการละลายโลหะสังกะสีออกจากตะกอนน้ำเสีย และหาความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้ในรูปของสมการทางจลนพลศาสตร์ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากตะกอนที่สังเคราะห์ขึ้นกับตะกอนที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมจริงว่ามีความคล้ายคลึงหรือแตกต่างกันเพียงใด เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาการละลายตะกอนหรือเป็นข้อมูลในระดับขยายสเกลต่อไป

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องกวนแบบก้านใบพัดกวน
2. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด - เบส (pH Meter)
3. เตาอบ (Oven) ของ WT bider
4. เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAs) รุ่น AVANTA E
5. เครื่องชั่งละเอียด
6. นาฬิกาจับเวลา
7. กระดาษกรอง
8. ขวดเก็บตัวอย่าง
9. ปีกเกอร์ 500 และ 1000 มิลลิลิตร
10. ถาดสำหรับอบตะกอน
11. ถังตกตะกอน
12. Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM – 6400
13. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Waterbath)
14. ปิเปตชนิดปรับปริมาตรได้ ขนาด 100 – 1000  $\mu$  l. และ 1 – 5 ml.
15. กระจกนาฬิกาและข้อต่อทึบ
16. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 200 และ 1000 มิลลิลิตร
17. เดซิเคเตอร์



รูป 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

### 3.3 สารเคมี

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
2. กรดไนตริกเข้มข้น ( $\text{H}_3\text{NO}_3$ )
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ )
4. ซิงค์ซัลเฟต ( $\text{ZnSO}_4$ )
5. สารละลายมาตรฐานของสังกะสี

### 3.4 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่

1. ตะกอนซิงค์ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Zn(OH)}_2$ ) ที่สังเคราะห์ขึ้น มีลักษณะเป็นตะกอนละเอียด สีขาว ดังรูป 3.2
2. ตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจริง มีสีน้ำตาล มีกลิ่นเหม็น ดังรูปที่ 3.3 ตะกอนนี้ได้มาจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นตะกอนผสมระหว่างตะกอนที่เกิดจาก

กระบวนการผลิตและตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน โดยตะกอนนี้มีองค์ประกอบของโลหะหนักต่าง ๆ ผสมกันอยู่ โดยจะมีองค์ประกอบของอะลูมิเนียม, สังกะสีและตะกั่วมากที่สุด



รูปที่ 3.2 ลักษณะของตะกอนสังเคราะห์



รูปที่ 3.3 ลักษณะของตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

### 3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

#### 3.5.1) ศึกษาการละลายของสังกะสีจากตะกอนสังเคราะห์

##### การเตรียมตะกอนสังเคราะห์

1. เตรียมสารละลายของสังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) 0.5 โมลต่อลิตร จากซิงค์ซัลเฟต ( $Zn(SO_4)$  (s)) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1.0 โมลต่อลิตร
  - 1.1) การเตรียมสารละลายของสังกะสี 0.5 โมลต่อลิตร โดยซิงค์  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  ประมาณ 143.77 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น และเตรียมให้ได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
  - 1.2) การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลต่อลิตร โดยซิงค์ NaOH(s) ประมาณ 40 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น และเตรียมให้ได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายสังกะสีมาทำการตกตะกอนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลต่อลิตร จนได้ตะกอนซิงค์ไฮดรอกไซด์ ( $Zn(OH)_2$ ) ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 8.5 ซึ่งเป็นภาวะที่เกิดการตกตะกอนของสังกะสีได้มากที่สุด [4]
3. นำตะกอนสังกะสีที่ได้มาตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ตกตะกอน (Setting Sedimentation) เป็นเวลา 1 วัน
4. อบตะกอนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่น้ำในตะกอนซิงค์ไฮดรอกไซด์ระเหยออกทั้งหมด [27] จนน้ำหนักคงที่ ซึ่งตะกอนที่ได้จะเป็นตะกอนแห้ง (Dry Sludge)

##### การละลายตะกอนสังเคราะห์

ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่

1. pH ของกรด ทำการทดลองได้ดังนี้
  - 1.1) ชั่งตะกอนแห้งมา 5 กรัมใส่บีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร
  - 1.2) เตรียมสารละลายกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) ที่ค่าความเป็นด่างเท่ากับ 1 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร
  - 1.3) ทำการละลายตะกอนด้วยกรดซัลฟูริก โดยกวนสารละลายตลอดการทดลองด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 30 องศาเซลเซียสด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Waterbath) ขณะทำการทดลอง



- ต้องมีการควบคุมค่าความเป็นกรด - เบสให้คงที่ตลอดการทดลอง โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.05
- 1.4) เก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ และทำการหยุดปฏิกิริยาของสารละลายตัวอย่างด้วยการเจือจาง (dilute) ทันที
  - 1.5) นำตัวอย่างที่เก็บได้ ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer, AAs) เพื่อหาปริมาณสังกะสีที่ละลายออกมาได้ที่เวลาต่างๆ
  - 1.6) ทำซ้ำข้อ 1.1 – 1.5 โดยการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด - เบสเป็น 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5, 2.75 และ 3
2. อัตราส่วนระหว่างปริมาณตะกอนต่อปริมาณกรด หรือ ร้อยละของแข็ง (น้ำหนักต่อปริมาตร) ทำการทดลองเหมือนข้อ 1.1 – 1.5 แต่เปลี่ยนปริมาณตะกอนแห้งให้อยู่ในช่วง 1 – 50 กรัม (ร้อยละของแข็งเท่ากับ 0.2 – 10 )
  3. อุณหภูมิ ทำการทดลองเหมือนข้อ 1.1 – 1.5 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิ เป็น 50 และ 70 องศาเซลเซียส
  4. อัตราการกวน ทำการทดลองเหมือนข้อ 1.1 – 1.5 แต่เปลี่ยนอัตราการกวนเป็น 300, 400 และ 500 รอบต่อนาที

การวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสีที่สามารถละลายได้จากตะกอน

ดำเนินการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM No. D 5198 –92 (Standard Practice for Nitric Acid Digestion of Solid Waste) ดังนี้

1. ชั่งตะกอนแห้งมา 5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask)
2. ตวงกรดไนตริก 1:1 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เขย่าให้ตะกอนเปียกอย่างทั่วถึง
3. ทำ Blank Test ของกรดไนตริก ทำเช่นเดียวกับตัวอย่าง
4. นำขวดรูปชมพู่มาให้ความร้อนโดยใช้กระจกนาฬิกาปิดด้านบน ต้มให้เดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง รักษาอุณหภูมิไว้ที่ 90 – 95 องศาเซลเซียส
5. หลังจากนั้น 2 ชั่วโมงนำขวดรูปชมพู่มาตั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร ลงไปในขวดรูปชมพู่ ล้างผนังขวดระหว่างที่เติมน้ำกลั่นลงไป เขย่าให้องค์ประกอบผสมกันเป็นอย่างดี

6. กรองสารละลายใส่ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 200 มิลลิลิตร ล้างกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่นปริมาณน้อย ๆ หลาย ๆ ครั้ง
7. เติมน้ำกลั่นให้ครบปริมาตร 200 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสีด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

### 3.5.2) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการละลายของสังกะสีออกจากตะกอน

นำผลการทดลองที่ได้จากตะกอนสังเคราะห์มาหาความสัมพันธ์ทางจลนพลศาสตร์ในการละลายของสังกะสีจากตะกอน

### 3.5.3) ทดสอบกับตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

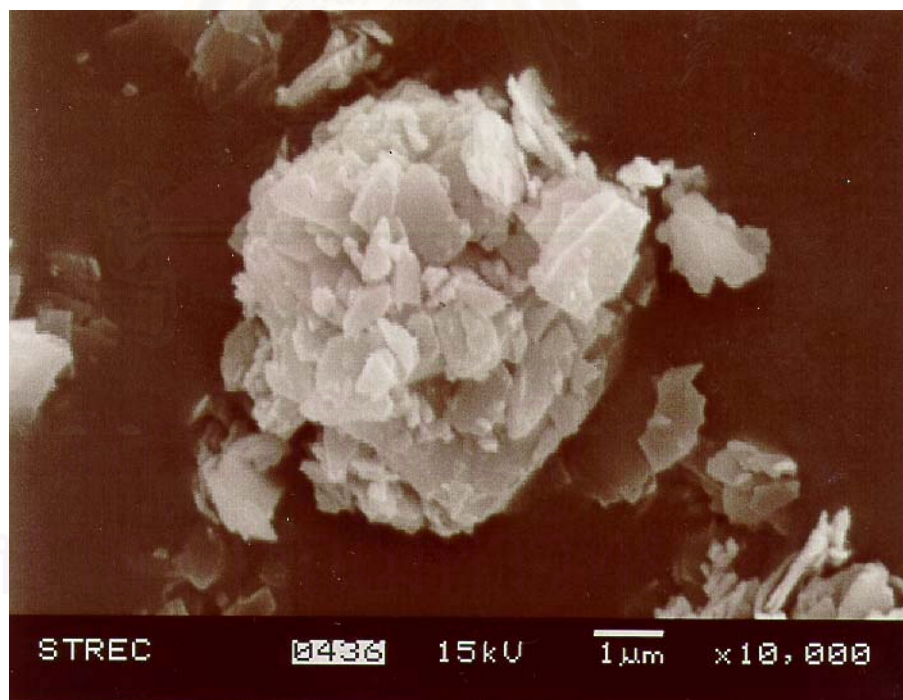
1. อบตะกอนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักตะกอนคงที่
2. ทดลองเหมือนตะกอนสังเคราะห์ โดยเปลี่ยนอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 30 - 70 องศาเซลเซียส และ pH ของกรดให้อยู่ในช่วง 1 - 3
3. เนื่องจากความเข้มข้นของสังกะสีในตะกอนน้ำเสียมีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นการหยุดปฏิกิริยาด้วยการเจือจางทันทีที่เก็บตัวอย่าง จึงทำไม่ได้ ต้องเปลี่ยนไปเป็นการกรองแยกตะกอนออกจากตัวอย่างแทน

## บทที่ 4

### ผลและการวิเคราะห์ผลการศึกษา

#### 4.1 ลักษณะตะกอนที่ศึกษา

4.1.1) ตะกอนจากการสังเคราะห์ : ลักษณะเป็นตะกอนละเอียด สีขาว ซึ่งตะกอนซิงค์ไฮดรอกไซด์ ( $Zn(OH)_2$ ) จะมีได้ 6 รูปแบบ ได้แก่ แอลฟา ( $\alpha$ ), เบตา 1 ( $\beta_1$ ), เบตา 2 ( $\beta_2$ ), แกมมา ( $\gamma$ ), เดลตา ( $\delta$ ), อีตา ( $\epsilon$ ) ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยรูปแบบที่เสถียรที่สุดคือ  $\epsilon$ - $Zn(OH)_2$  ซึ่งผลึกจะเป็นแบบออร์โธรมบิก (Orthorhombic) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 39 องศาเซลเซียส แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้ มันจะสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นซิงค์ออกไซด์ได้ แต่การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นค่อนข้างช้ามาก [27] จากการตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) พบว่า ตะกอนซิงค์ไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นโครงร่างผลึก (Crystalline Form) ดังรูปที่ 4.1



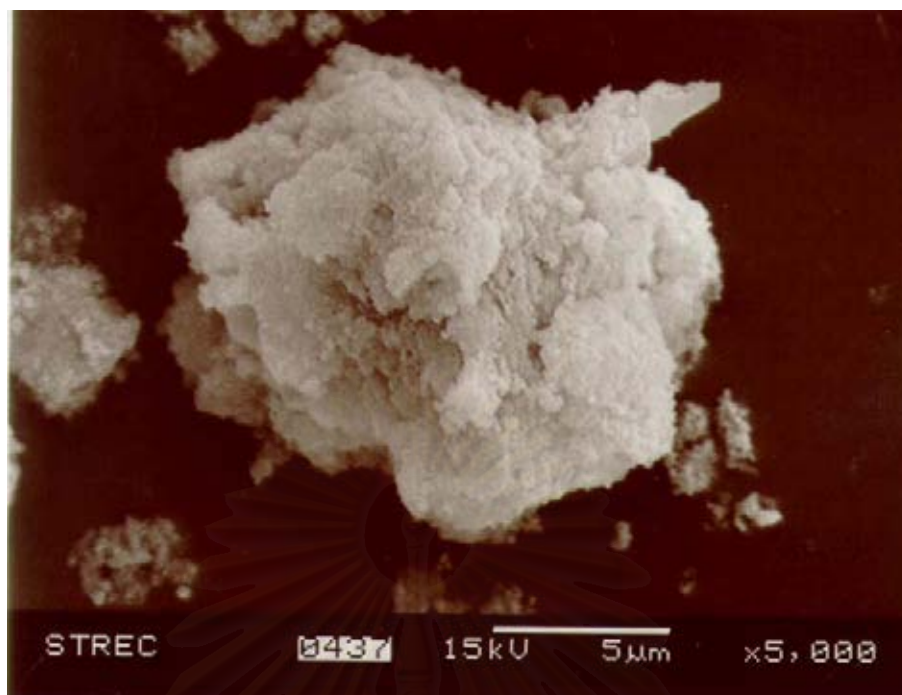
รูป 4.1 ลักษณะของตะกอนซิงค์ไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น

4.1.2) ตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม : ลักษณะเป็นสีน้ำตาล และมีกลิ่นเหม็น เป็นตะกอนผสมระหว่างตะกอนที่เกิดจากกระบวนการผลิตและตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี โดยตะกอนมีส่วนผสมของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีอะลูมิเนียมปริมาณมากที่สุด และสังกะสีกับตะกั่ว รองลงมา นอกนั้นเป็นโลหะชนิดอื่นๆ ในปริมาณที่น้อยมาก ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในตะกอนแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

องค์ประกอบของตะกอน	ปริมาณ (mg/g dry matter)
สังกะสี	3.53600
โครเมียมเฮกซะวาเลนต์	0.00001
โครเมียมไตรวาเลนต์	0.03267
ตะกั่ว	2.44933
ฟลูออไรด์	0.01401
อะลูมิเนียม	7.09667
ทองแดง	0.03233
แคดเมียม	0.00101
แมงกานีส	0.08533
สารหนู	0.00008
ค่าความเป็นกรด - เบส	8.46
**ความชื้นในตะกอนประมาณ 65 - 70 %	

จากรูปที่ 4.2 จะสังเกตเห็นว่า ตะกอนที่ใช้ส่วนใหญ่มีรูปร่างค่อนข้างกลม มีการกระจายตัวไม่เกาะติดกัน



รูปที่ 4.2 ลักษณะของตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม

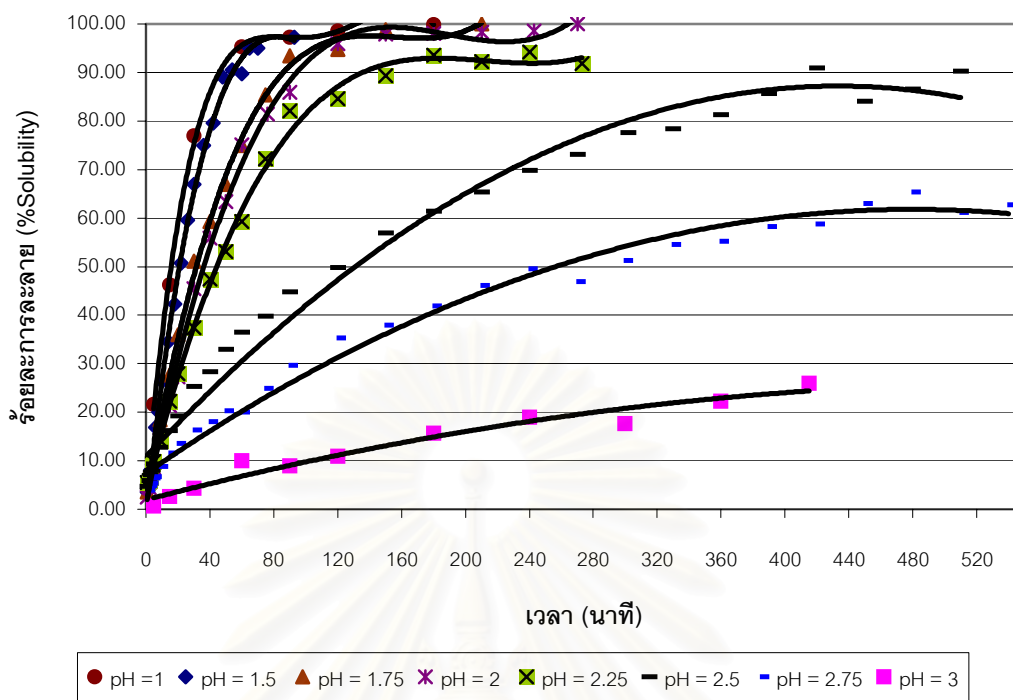
#### 4.2 การละลายตะกอนสังเคราะห์ซึ่งค้ำไฮดรอกไซด์ด้วยกรดซัลฟูริก

ในการศึกษาการละลายของตะกอนสังเคราะห์ซึ่งค้ำไฮดรอกไซด์ด้วยกรดซัลฟูริก จะทำการศึกษาผลของตัวแปร 4 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่

- ค่าความเป็นกรด - เบส (pH)
- อัตราส่วนระหว่างปริมาณตะกอนกับปริมาณกรดหรือร้อยละของแข็ง (%Solid)
- อุณหภูมิ
- อัตราการกวน

##### 4.2.1) ผลของค่าความเป็นกรด - เบส (pH)

ในการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด - เบส จะทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 200 รอบต่อนาทีและร้อยละของแข็งเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยเปลี่ยนค่าความเป็นกรด - เบส (pH) เป็น 1, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5, 2.75, 3 ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.3



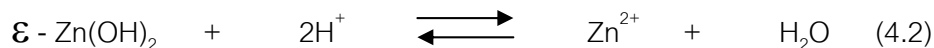
รูปที่ 4.3 ผลของการค่าความเป็นกรด - เบสต่อการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนสังเคราะห์ที่ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

โดยกำหนดให้

$$\text{ร้อยละการละลาย (\%Solubility)} = \frac{\text{น้ำหนักของสังกะสีที่ละลายได้ต่อกรัมของตะกอนแห้ง} \times 100}{\text{น้ำหนักของสังกะสีที่ละลายได้ตามวิธี ASTM ต่อกรัมของตะกอนแห้ง}} \quad (4.1)$$

จากรูปที่ 4.3 จะพบว่า ค่าความเป็นกรด - เบส (pH) มีผลต่อการละลายของสังกะสีเป็นอย่างมาก โดยถ้าค่าความเป็นกรด - เบสสูง การละลายของสังกะสีจะเกิดขึ้นได้ช้า เนื่องจากถ้าค่าความเป็นกรด - เบสสูง ปริมาณโปรตอน ( $H^+$ ) ที่จะเข้ามาทำปฏิกิริยากับสังกะสีในตะกอนมีน้อย ทำให้การละลายเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จากรูปจะเห็นว่า ที่ค่าความเป็นกรด - เบสน้อยกว่า 2 สังกะสีจะสามารถละลายได้หมดถึง 100 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 150 นาที แต่เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด - เบสให้สูงไปถึง 3 สังกะสีจะละลายได้ลดลงอย่างมาก กล่าวคือ เมื่อเวลาผ่านไป 7 ชั่วโมง ค่าการละลายของสังกะสีจะมีค่าเพียง 25 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งผลการทดลองนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วดังกล่าวในวารสารปริทัศน์ [11] นอกจากนี้ เมื่อค่าความเป็นกรด - เบสมากขึ้น เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลก็จะนานขึ้น ตัวอย่างเช่น ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 1.5 การละลายจะเข้าสู่

สมดุคที่เวลาประมาณ 60 นาที ในขณะที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.5 จะใช้เวลาถึง 380 นาที จึงจะเข้าสู่สมดุค ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ค่าความเป็นกรด - เบสน้อย ปริมาณโปรตอนทีเข้าทำปฏิกิริยามีมาก ปฏิกิริยาการละลายสังกะสี (สมการที่ 4.2) [27] จะเกิดไปทางขวามากขึ้น และอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาจึงเพิ่มขึ้น ทำให้เวลาที่ใช้สั้นลง



เมื่อนำข้อมูลการทดลองในรูปที่ 4.3 มาหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการละลายของสังกะสี (โดยคิดว่า ปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ดังแสดงไว้ในส่วนถัดไป) จากนั้น นำมาเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของปฏิกิริยาการละลายกับค่าความเป็นกรด - เบส ดังรูปที่ 4.4 พบว่า ความสัมพันธ์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ

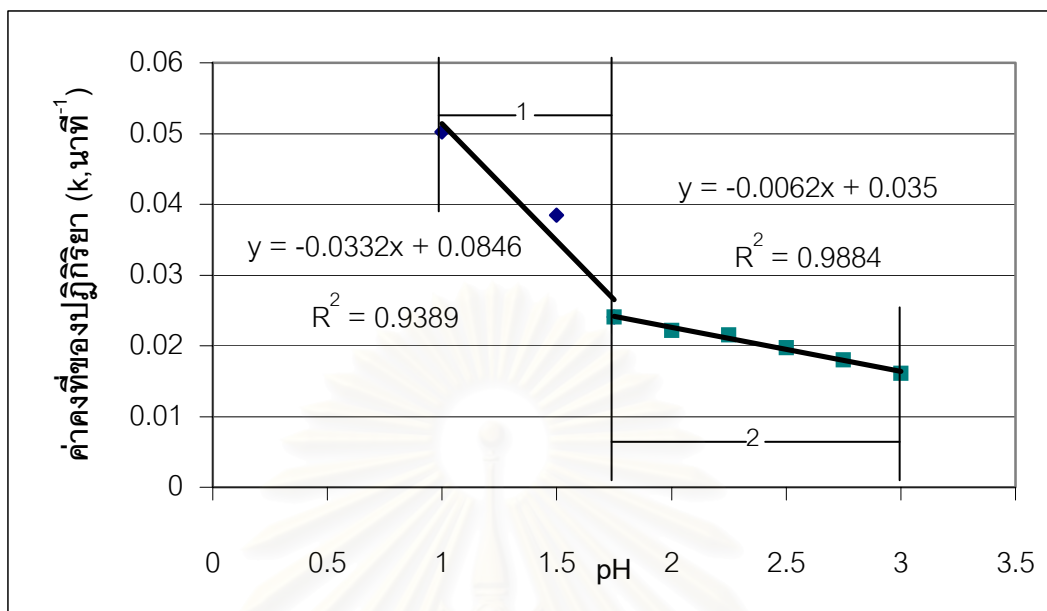
- 1) ที่ค่าความเป็นกรด - เบสต่ำ (ค่าความเป็นกรด - เบสอยู่ระหว่าง 1 ถึง 1.75) ความสัมพันธ์ที่ได้คือ

$$k = -0.0332 \text{ pH} + 0.0846 : R^2 = 0.9389 \quad (4.3)$$

- 2) ที่ค่าความเป็นกรด - เบสสูง (ค่าความเป็นกรด - เบสอยู่ระหว่าง 1.75 ถึง 3) ความสัมพันธ์ที่ได้คือ

$$k = -0.0062 \text{ pH} + 0.035 : R^2 = 0.9884 \quad (4.4)$$

จะเห็นว่า ค่าความชันในช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าต่างกันมาก โดยในช่วงที่ 1 จะมีค่าความชันมากกว่า ดังนั้นปฏิกิริยาการละลายจึงเกิดได้เร็วกว่าในช่วงที่ 2 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การละลายจะเกิดได้เร็ว เมื่อค่าความเป็นกรด - เบสน้อยกว่า 1.75



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด - เบสกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนสังเคราะห์

#### 4.2.2) ผลของอัตราส่วนระหว่างปริมาณตะกอนกับปริมาณกรด (ร้อยละของแข็ง)

ร้อยละของแข็ง จะนิยามดังสมการที่ (4.3)

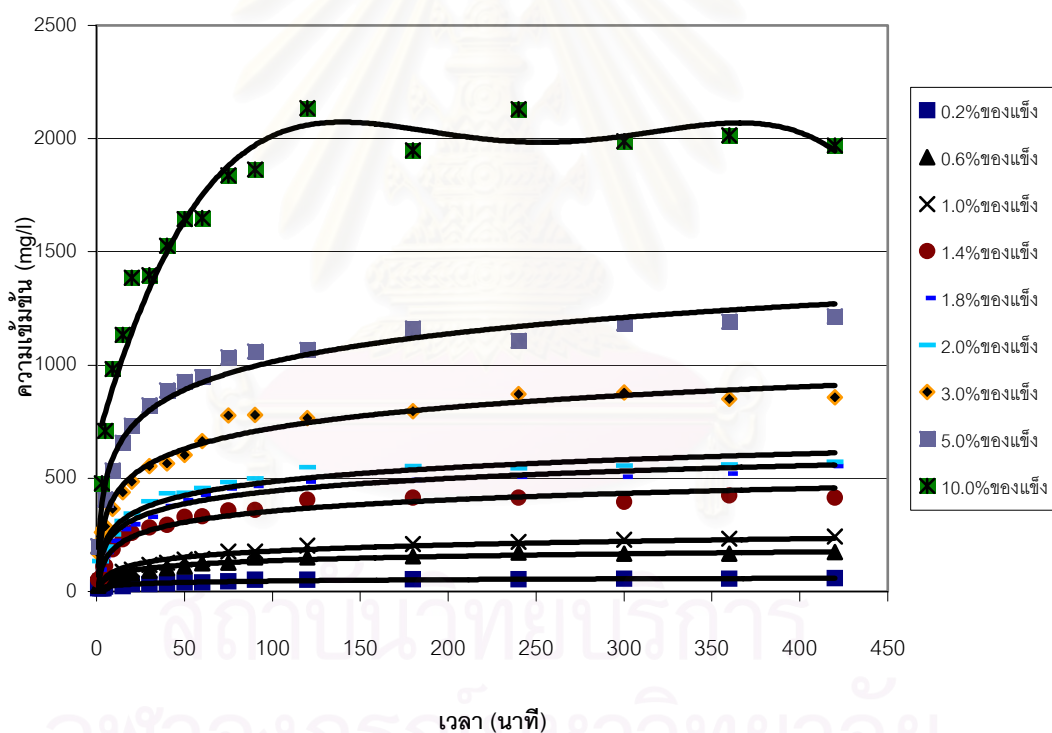
$$\text{ร้อยละของแข็ง (\%Solid)} = \frac{\text{น้ำหนักของตะกอน (กรัม)}}{\text{ปริมาตรกรด (มิลลิลิตร)}} \times 100 \quad (4.5)$$

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษามลของปริมาณตะกอนต่อการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนที่ร้อยละของแข็งเท่ากับ 0.2, 0.6, 1, 1.4, 1.8, 2, 3, 5 และ 10 โดยทำการละลายที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และเลือกใช้ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75 เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75 ปฏิกิริยาการละลายเกิดได้ไม่เร็วเกินไป จึงสามารถสังเกตปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดี นอกจากนี้ ยังพบว่า อันดับของปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับค่าความเป็นกรด - เบส (ดังจะแสดงให้เห็นในส่วนต่อไป) ผลการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 ถึง 4.7

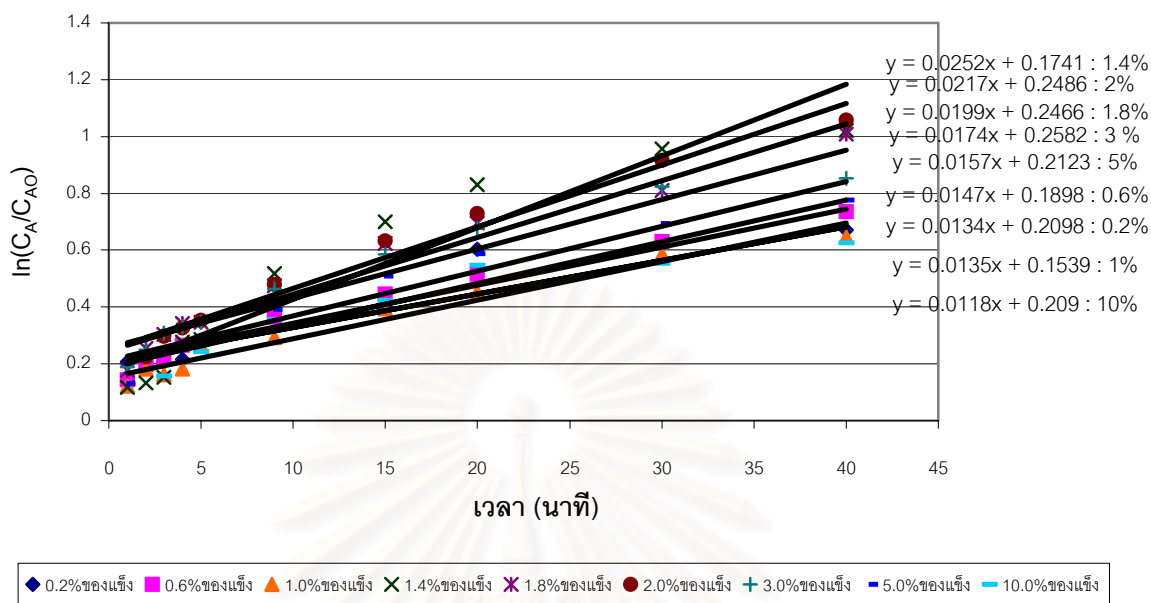


จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มร้อยละของแข็งให้มากขึ้น ความเข้มข้นของสังกะสีที่ละลายออกมาได้จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณสารตั้งต้นหรือตะกอนมีมากขึ้น ดังนั้นผลิตภัณฑ์หรือสังกะสีไอออนที่ละลายออกมาจึงมากตามไปด้วย

เนื่องจากปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีจากตะกอนเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ดังจะแสดงให้เห็นในส่วนต่อไป) เราจึงทำการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้โดยการนำข้อมูลผลการทดลองในรูปที่ 4.5 มาเขียนกราฟระหว่าง  $-\ln C_A/C_{AO}$  กับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 ซึ่งจากรูปที่ 4.7 นี้ จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มค่าร้อยละของแข็งขึ้นเรื่อยๆ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีจะเพิ่มขึ้นตามและสูงสุดที่ 1.4 %ของแข็ง จากนั้นก็จะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณตะกอนเริ่มต้นมีมากขึ้นจนทำให้การแพร่ของโปรตอนเข้าไปทำปฏิกิริยาเกิดได้ยากขึ้น ดังนั้นทำให้ปฏิกิริยาจึงเกิดช้าลง ค่าคงที่ของปฏิกิริยาจึงมีค่าลดลง



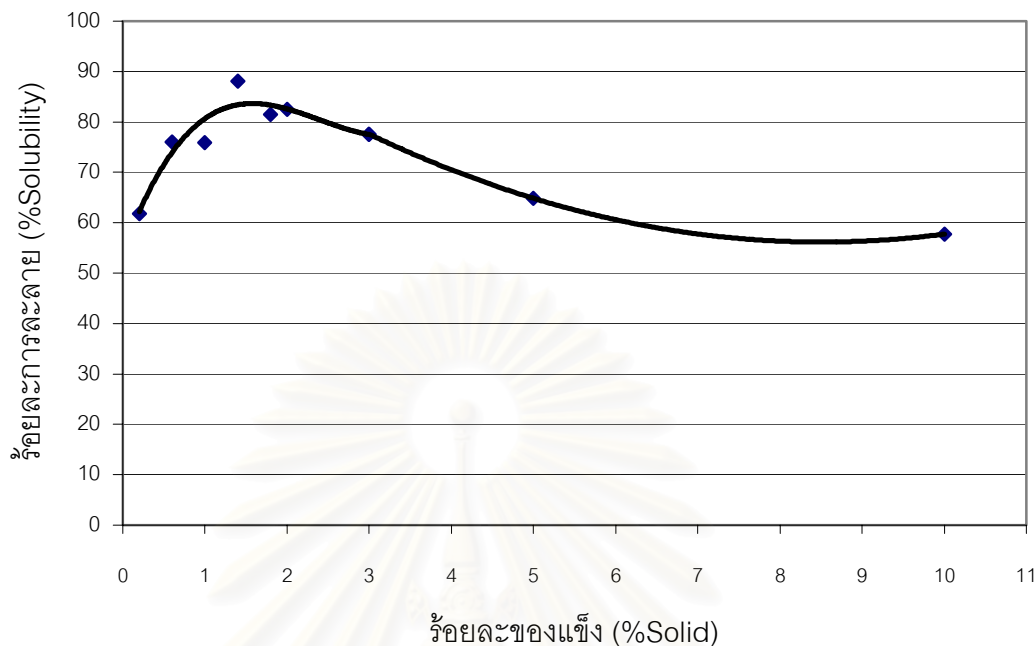
รูปที่ 4.5 ผลของร้อยละของแข็งต่อการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนสังเคราะห์ ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีจากตะกอนสังเคราะห์ที่ค่าร้อยละของแข็งต่างๆ

เมื่อนำผลการทดลองในรูปที่ 4.5 มาเขียนกราฟระหว่างค่าร้อยละของแข็งกับร้อยละการละลายที่เวลาเริ่มเข้าสู่สมดุล ดังรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อเพิ่มร้อยละของแข็งให้มากขึ้น การละลายของตะกอนจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และจะสูงสุดที่ค่าร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 จากนั้นเมื่อเพิ่มค่าร้อยละของแข็งต่อไป การละลายของตะกอนจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากระบบเข้าสู่ภาวะอิ่มตัว (Saturated) ที่ร้อยละของแข็งประมาณ 1.4 นั่นเอง ดังนั้นเมื่อเพิ่มค่าร้อยละของแข็งหรือเพิ่มปริมาณตะกอนต่อไป ระบบจะปรับเข้าสู่สมดุลใหม่ แต่ปริมาณสังกะสีที่ละลายเทียบกับปริมาณเริ่มต้นจะลดลง เนื่องจากปริมาณกรดที่ใช้คงที่

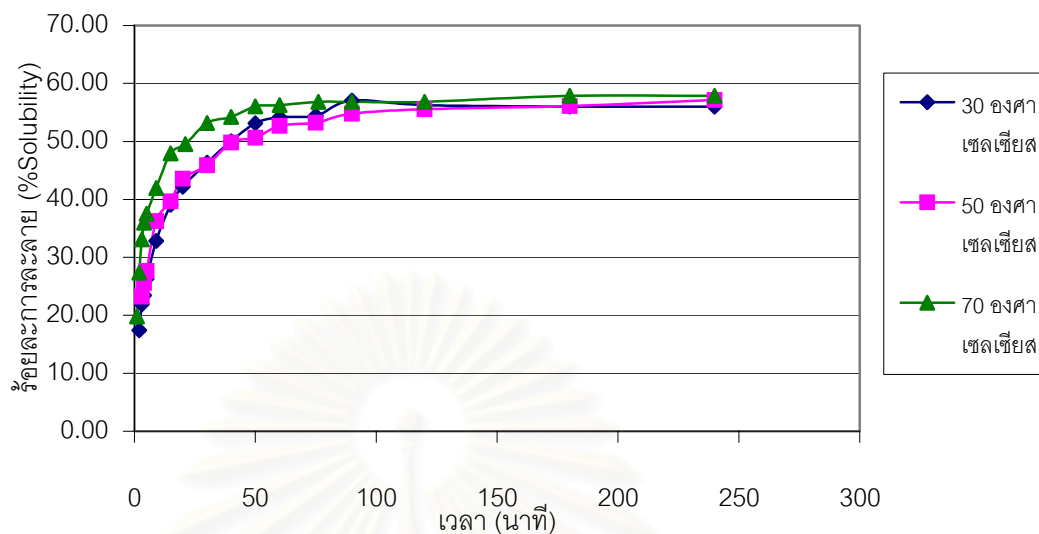
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของแข็งกับค่าร้อยละการละลายที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

#### 4.2.3) ผลของอุณหภูมิ

ในการศึกษานี้ได้ทดลองปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ 30, 50 และ 70 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส การระเหยน้ำจากสารละลายมีมาก จึงต้องมีการเติมน้ำกลั่นเป็นระยะเพื่อทดแทนการระเหยของน้ำ ดังนั้นการระเหยของน้ำจึงไม่มีผลทำให้ค่าร้อยละของแข็งเปลี่ยนไป โดยค่าร้อยละของแข็งที่เลือกใช้คือ 1.4 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่เกิดการละลายได้สูงสุดดังแสดงในรูป 4.7 ส่วนค่าความเป็นกรด - เบสเลือกที่ 2.75 และอัตราการกวน 200 รอบต่อนาที ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.8

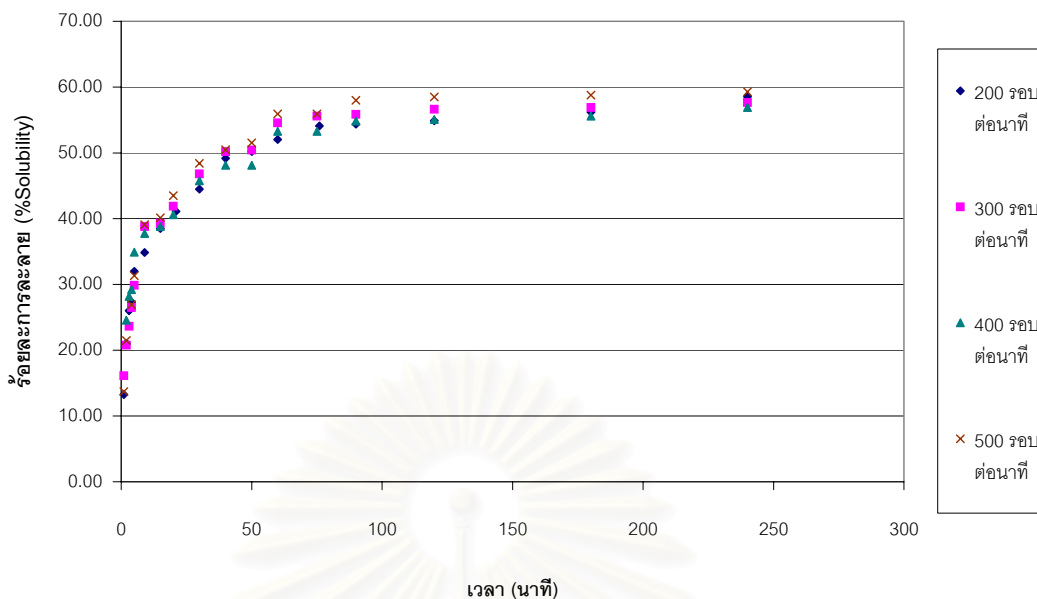


รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิต่อการละลายของสียออกจากตะกอนสังเคราะห์ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4

จากรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การละลายของสียออกจากตะกอนเพิ่มขึ้นในระยะเวลา 50 นาทีแรก แต่เพิ่มขึ้นไม่มากนัก โดยที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสการละลายมีค่าสูงสุดประมาณ 57 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าการละลายสูงสุดที่ 55 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 240 นาที จะเห็นว่า มีความแตกต่างกันเพียง 2 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น นอกจากนี้ การเข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมิ 70 และ 30 องศาเซลเซียส จะเข้าสู่สมดุลที่เวลาใกล้เคียงกันคือประมาณ 1 ชั่วโมง ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิจึงมีผลต่อการละลายน้อยกว่าค่าความเป็นกรด - เบสและร้อยละของแข็ง นอกจากนี้ อาจกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาการละลายที่เกิดขึ้นเป็นแบบดูดความร้อน (Endothermic Reaction)

#### 4.2.4) ผลของอัตราการกวน

ในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาผลของการกวนที่ความเร็วรอบ 200, 300, 400 และ 500 รอบต่อนาที ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9



**รูปที่ 4.9** ผลของอัตราการกวนต่อการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนสังเคราะห์ที่ความเป็นกรดเป็นด่างเท่ากับ 2.75, รั้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการกวนให้มากขึ้น ค่าร้อยละการละลายที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะในช่วงเวลาแรกๆ การละลายจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเร็วเดียวกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า อัตราการกวนไม่มีผลต่อการละลาย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากช่วงของอัตราการกวนที่เลือกใช้ (200 – 500 รอบต่อนาที) อยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ทั้งหมด และขณะทำการทดลองจะสังเกตเห็น Free Vortex เกิดขึ้นทุกอัตราการกวน ดังนั้นไม่ว่าจะกวนด้วยอัตราเร็วเท่าไร การละลายก็เกิดขึ้นอย่างสูงสุดอยู่แล้ว ด้วยเหตุนี้เองจึงสรุปได้ว่า อัตราการกวนในช่วงที่ทำการศึกษาไม่มีผลต่อการละลายของสังกะสีออกจากตะกอน การเพิ่มอัตราการกวนเข้าไปในระบบจึงเป็นการใส่พลังงานเข้าไปโดยเปล่าประโยชน์ จึงตัดผลของอัตราการกวนออกไปได้

#### 4.3 จลนพลศาสตร์ของการละลายของสังกะสีออกจากตะกอน

##### 4.3.1) อันดับของปฏิกิริยาการละลาย

จากสมการปฏิกิริยาการละลายของสังกะสี (สมการที่ (4.2)) อันดับของปฏิกิริยาที่เป็นไปได้มี 2 แบบ คือ

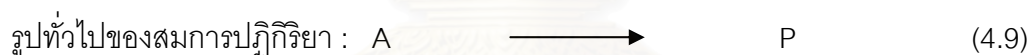
1) อันดับที่ 3

$$\text{สมการอัตราเร็วของ A : } r_A = \frac{dC_A}{dt} = -kC_A C_B^2 \quad (4.7)$$

$$\text{อินทิเกรตสมการที่ 4.7 จะได้ : } (1/C_A) - (1/C_{A0}) = 8kt \quad (4.8)$$

เมื่อ

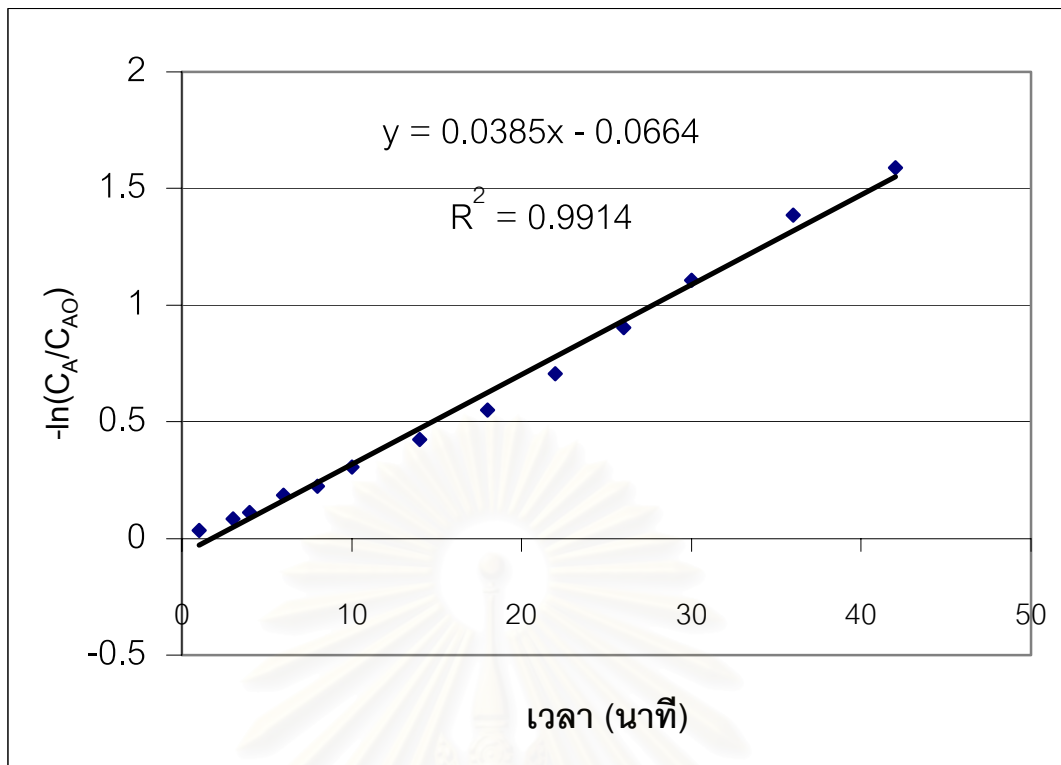
$r_A$	คือ	อัตราเร็วของปฏิกิริยา
$C_A$	คือ	ความเข้มข้นของตะกอน $Zn(OH)_2$
$C_B$	คือ	ความเข้มข้นของ $H^+$
$k$	คือ	ค่าคงที่ของปฏิกิริยา
$t$	คือ	เวลา

2) อันดับที่ 1

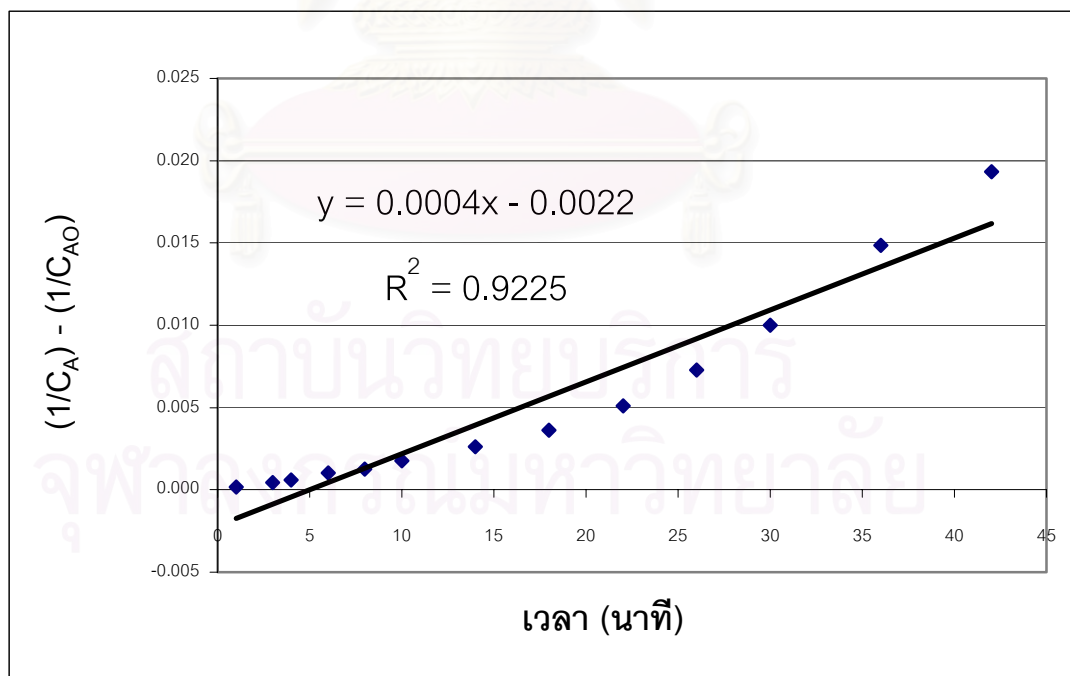
$$\text{สมการอัตราเร็วของ A : } r_A = \frac{dC_A}{dt} = -kC_A \quad (4.10)$$

$$\text{สมการที่อินทิเกรตได้ : } \ln(C_A/C_{A0}) = -kt \quad (4.11)$$

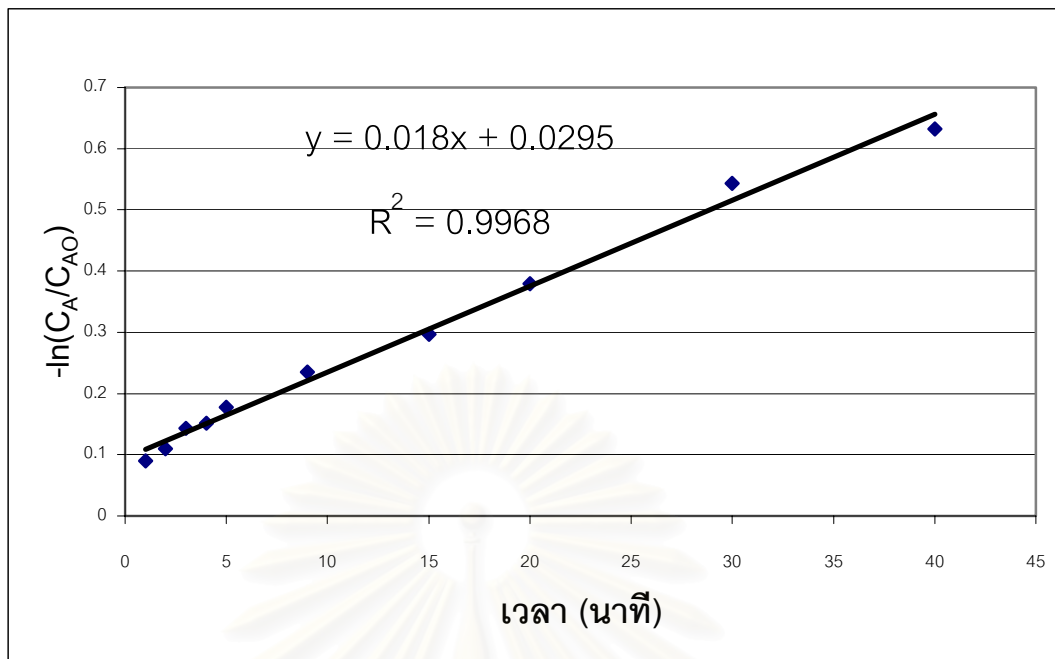
เราสามารถทำการหาอันดับของปฏิกิริยาได้โดยการนำข้อมูลจากผลของค่าความเป็นกรด - เบสในหัวข้อที่ 4.2.1 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเทอมทางซ้ายมือของสมการ (4.8) และ (4.11) เปรียบเทียบกัน ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.10 – 4.13



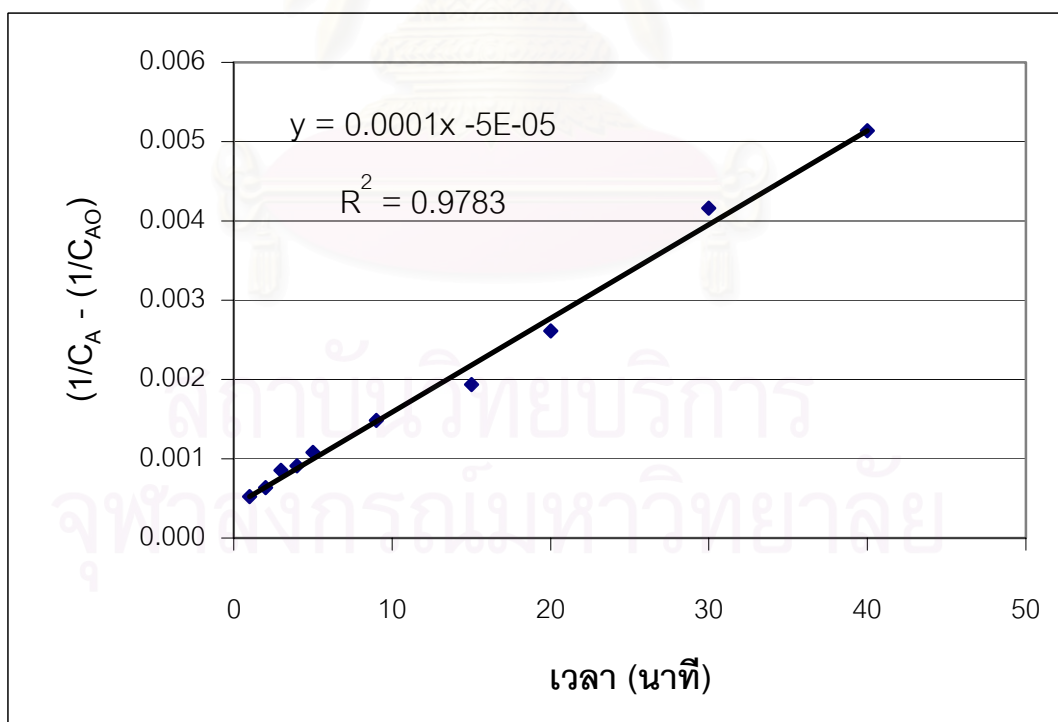
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการละลายตะกอนสังเคราะห์เป็นอันดับที่ 1 ที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างเท่ากับ 1.5, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการละลายตะกอนสังเคราะห์เป็นอันดับที่ 3 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 1.5, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการละลายตะกอนสังเคราะห์เป็นอันดับที่ 1 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



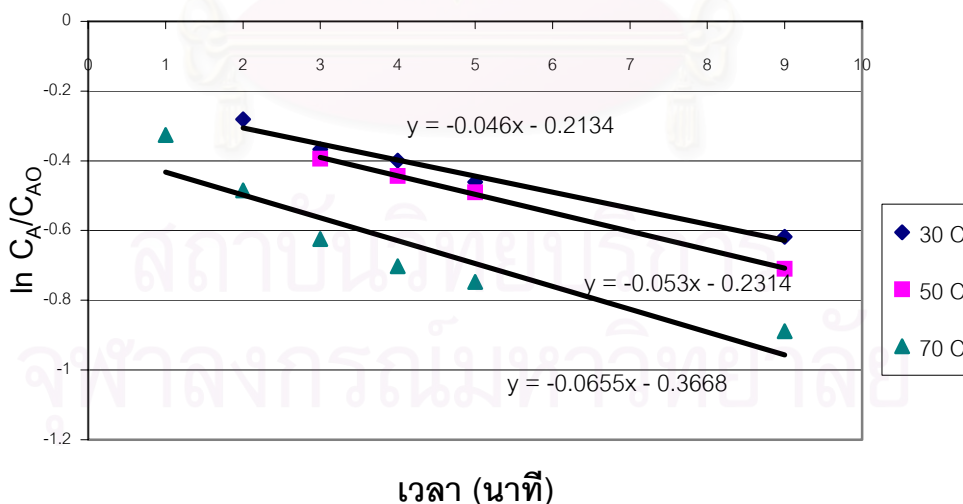
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการละลายตะกอนสังเคราะห์เป็นอันดับที่ 3 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



จากรูปที่ 4.10 - 4.13 จะเห็นว่า ความสัมพันธ์ในรูปของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 จะให้ค่า Coefficient of Determination ( $R^2$ ) สูงที่สุด หรือค่าการเบี่ยงเบนไปจากความสัมพันธ์น้อย ทั้งที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 1.5 และ 2.75 จึงสรุปได้ว่า ปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนไม่ว่าที่ ค่าความเป็นกรด - เบสเท่าใดก็ตามจะเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 โดยเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo - first Order Reaction) ซึ่งความเข้มข้นของกรดไม่มีผลต่ออันดับของปฏิกิริยาเนื่องจากถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ ดังนั้นอันดับของปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกอนซึ่งคือไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของกรดมีค่าคงที่ตลอดการทดลองและมากกว่าความเข้มข้นของสังกะสีอย่างมาก

#### 4.3.2) ค่าพลังงานการกระตุ้น (Activation Energy)

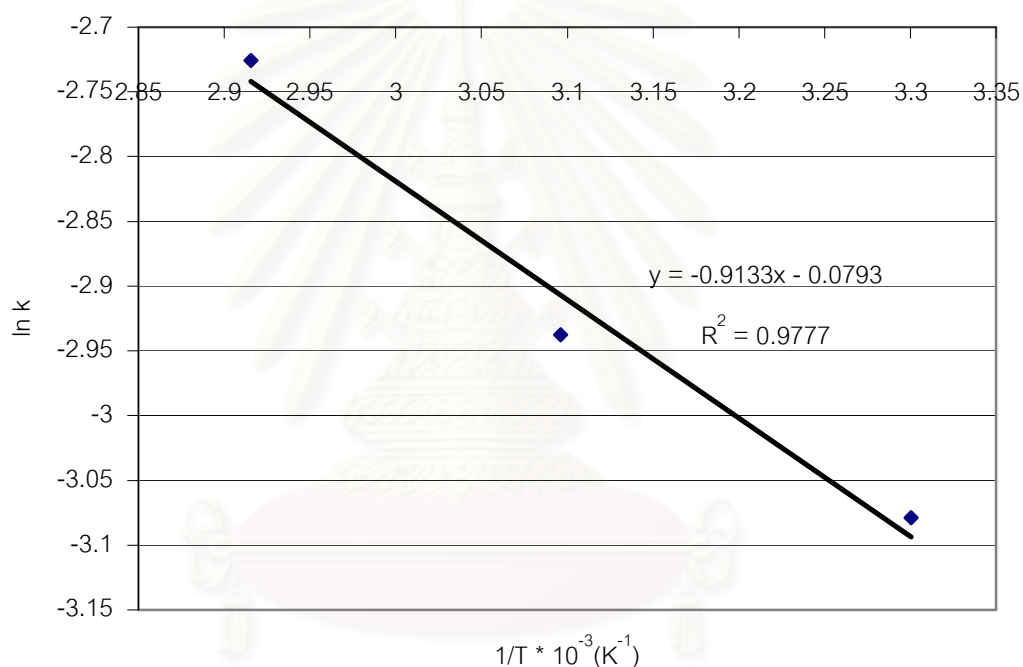
พลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีหาได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียส (สมการที่ (2.59)) โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln C_A/C_{AO}$  กับ เวลาของข้อมูลจากผลของอุณหภูมิที่มีต่อการละลายในหัวข้อที่ 4.2.3 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากนั้นจึงนำค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ดังรูปที่ 4.15 เพื่อหาค่าพลังงานการกระตุ้น



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีค่าความเป็นกรด - เบส เท่ากับ 2.75, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 และอัตราการกวน 200 รอบ ต่อนาที

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีจากตะกอนสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, รั้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 และอัตราการกวน 200 รอบต่อนาที

T (°C)	T (K)	k (min. <sup>-1</sup> )	1/T (K <sup>-1</sup> )	ln k
30	303	0.046	0.0033	-3.079114
50	323	0.053	0.003096	-2.937463
70	343	0.0655	0.002915	-2.725705



รูปที่ 4.15 Arrhenius Plot สำหรับปฏิกิริยาการละลายสังกะสีออกจากตะกอนสังเคราะห์ด้วยกรดซัลฟูริกที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และค่ารั้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4

จากรูปที่ 4.15 และสมการที่ (2.59) ค่าความชันที่ได้ คือ ค่า  $-E_A / R$  ซึ่งเท่ากับ  $-913.31$  เมื่อนำมาคำนวณหาค่าพลังงานการกระตุ้น ( $E_A$ ) แล้วจะได้เท่ากับ 1.85 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมล

### 4.3.3) กลไกการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Mechanism)

กลไกการเกิดปฏิกิริยาสามารถควบคุมได้ด้วยอัตราการถ่ายโอนมวลสาร (การแพร่) หรือกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.7.6 ซึ่งสรุปได้ว่า

1. ถ้าการแพร่เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา

$$\frac{t}{\tau} = 1 - \left( \frac{r}{R_i} \right)^2 = 1 - (1 - X_A)^{2/3} \quad (2.72)$$

โดยที่

$$\tau = \frac{\rho_A R_i^2}{2bC_{Bg} D_{AB}} \quad (2.73)$$

2. ถ้าการเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นขั้นตอนการควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา

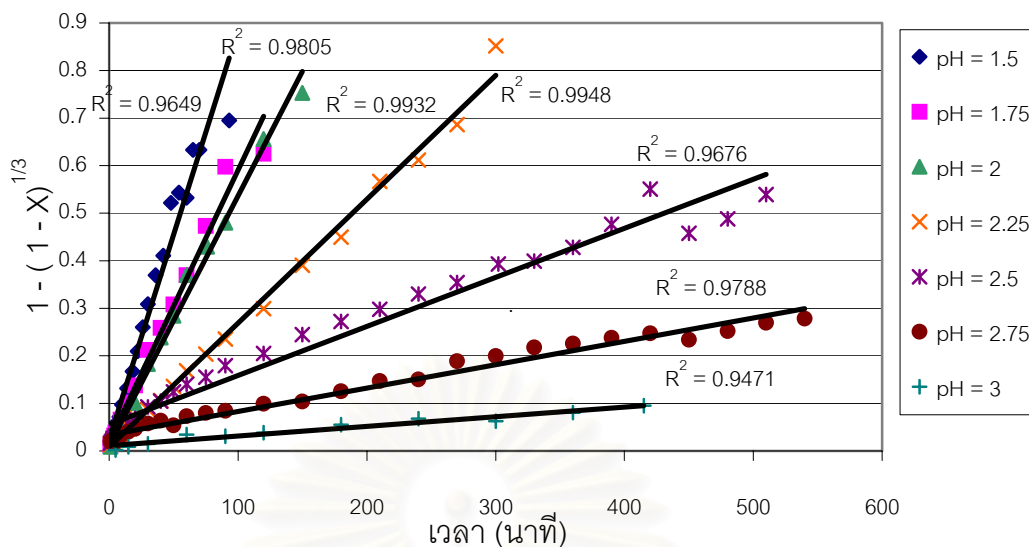
$$\frac{t}{\tau} = 1 - \frac{r}{R} = 1 - (1 - x_A)^{1/3} \quad (2.79)$$

โดยที่

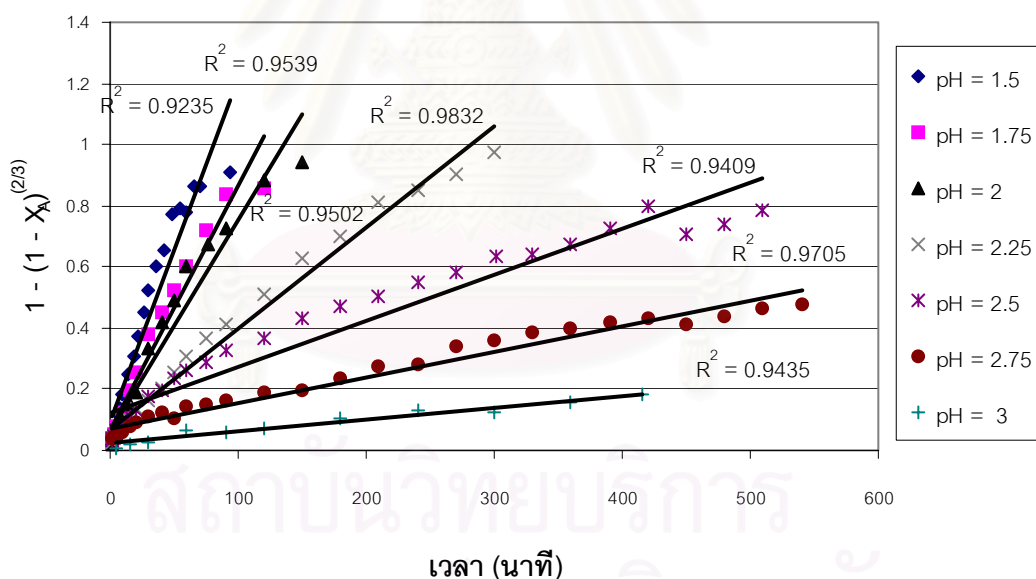
$$\tau = \frac{\rho_A R}{akC_{Bg}} \quad (2.78)$$

ถ้าขั้นตอนใดเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็ว เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างเวลา กับ เทอมทางขวามือของสมการจะได้รับความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง

จากข้อมูลผลของค่าความเป็นกรด - เบสในหัวข้อที่ 4.2.1 เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ เทอมทางขวามือของสมการที่ (2.72) และ (2.79) ได้ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 เมื่อการเกิดปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยาการละลายสังกะสีออกจากตะกอนสังเคราะห์



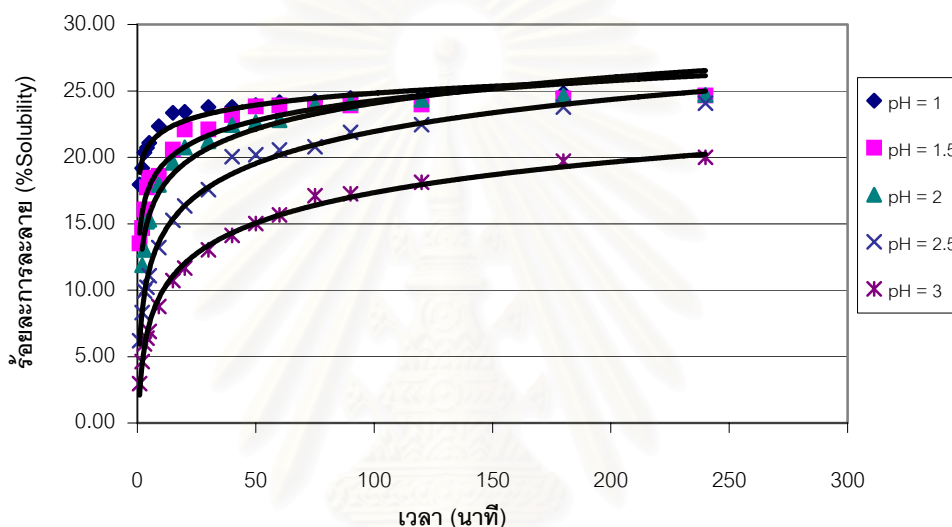
รูปที่ 4.17 เมื่อการแพร่เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยาการละลายสังกะสีออกจากตะกอนสังเคราะห์

เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 จะพบว่า ค่า Coefficient of Determination ( $R^2$ ) ของรูปที่ 4.16 มีค่ามากกว่ารูปที่ 4.17 ซึ่งหมายถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการที่ (2.79) มีความสัมพันธ์กันมากกว่าสมการที่ (2.72) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราเร็ว (Rate Determining Step)

#### 4.4 ผลการศึกษาการละลายของตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม

##### 4.4.1) ผลของค่าความเป็นกรด - เบส

ได้ทำการศึกษาโดยเปลี่ยนค่าความเป็นกรด - เบสจาก 1 จนถึง 3 ที่อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ได้ผลดังรูปที่ 4.18



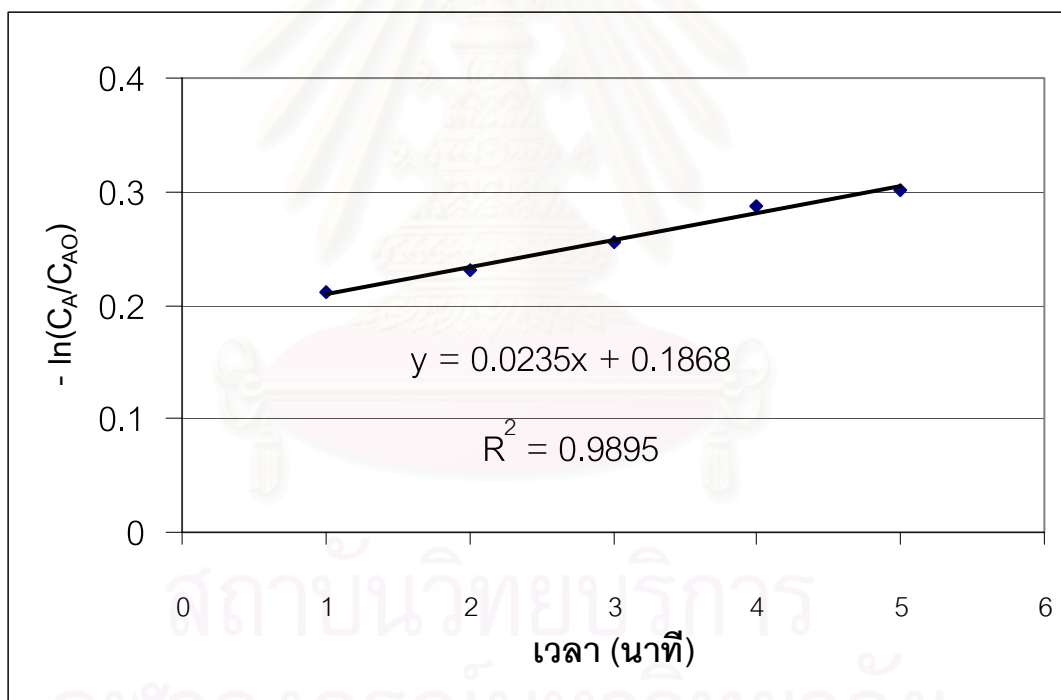
รูปที่ 4.18 ผลของค่าความเป็นกรด - เบสต่อการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด - เบสจาก 1 จนถึง 2 จะได้ร้อยละการละลายที่เวลาสุดท้ายใกล้เคียงกันคือ ประมาณร้อยละ 25 แต่เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด - เบสต่อไปอีกจะพบว่า การละลายจะลดลงเหลือประมาณร้อยละ 20 เท่านั้น ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 3 นอกจากนี้ เวลาที่เข้าสู่สมดุลของการละลายจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดลองของตะกอนสังเคราะห์

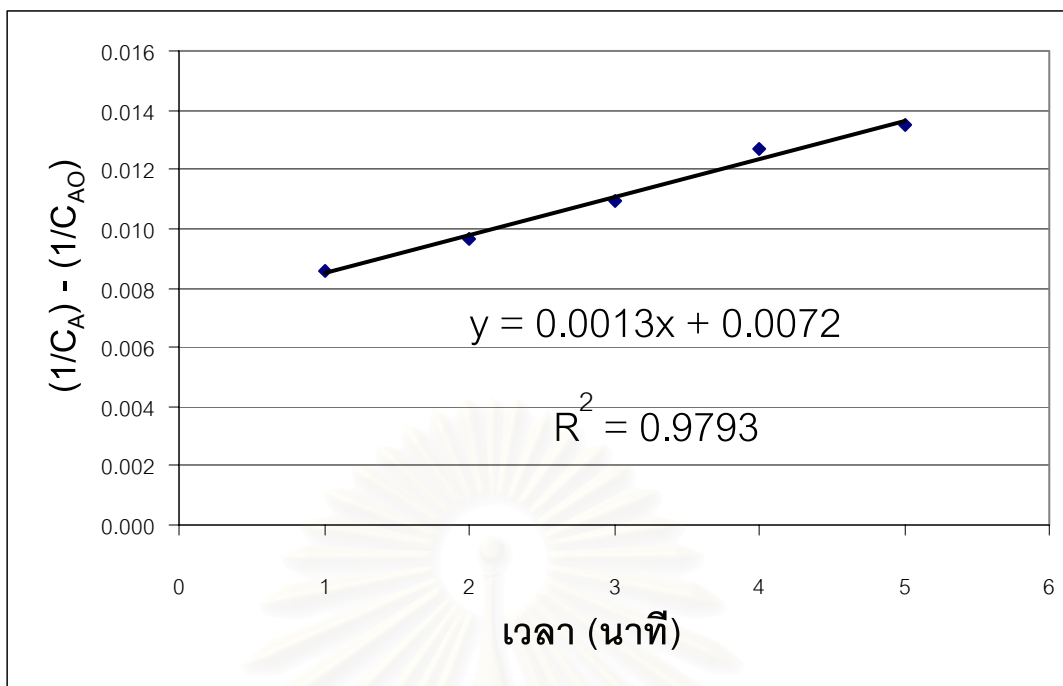
สำหรับการละลายสังกะสีออกจากตะกอนอุตสาหกรรมจะให้ค่าร้อยละการละลายของตะกอนสูงที่สุดแค่เพียงร้อยละ 25 เท่านั้นที่ค่าความเป็นกรด - เบสต่ำๆ ในขณะที่ตะกอนสังเคราะห์จะให้ค่าสูงที่สุดถึง 100 เปอร์เซ็นต์หรือละลายตะกอนได้ทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ตะกอนจริงมีองค์ประกอบของโลหะต่าง ๆ ปนเปื้อนหลายชนิดดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งโลหะแต่ละชนิดล้วนแต่ละลายได้ในสารละลายกรดทั้งสิ้น ดังนั้นเมื่อมีกรดมาละลาย โลหะต่างๆ จะแย่ง

โปรตอนของกรดไป ทำให้สังกะสีละลายได้น้อยลง การละลายจึงไม่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์เหมือน ตะกอนสังเคราะห์ ซึ่งมีแต่โลหะสังกะสีเท่านั้นในตะกอน อีกทั้งตะกอนอุตสาหกรรม มีการพัวตัวของตะกอนมากกว่า ซึ่งอาจทำให้โครงสร้างของตะกอนเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียรสูง จึงละลายได้น้อยลง นอกจากนี้ ปริมาณสังกะสีในตะกอนก็น้อยกว่าอะลูมิเนียมและใกล้เคียงกับ ตะกั่ว ทำให้ถูกโลหะทั้งสองแย่งโปรตอนไป โดยเฉพาะตะกั่ว ซึ่งมีค่าคงที่การละลายสูงกว่าสังกะสี (Solubility Constant) [28] แต่ปริมาณใกล้เคียงกัน (ดูภาคผนวก ข ) นอกจากเหตุผลดังกล่าวแล้ว โลหะในตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม อาจจะอยู่ในรูปของตะกอนโลหะอื่นๆที่ไม่ใช่ตะกอนไฮดรอกไซด์ เช่น โลหะออกไซด์, ซัลไฟด์และคาร์บอเนต เป็นต้น ซึ่งตะกอนเหล่านี้มีค่าการละลายต่ำกว่าตะกอนไฮดรอกไซด์ จึงทำให้ค่าการละลายของตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมต่ำกว่าตะกอนสังเคราะห์

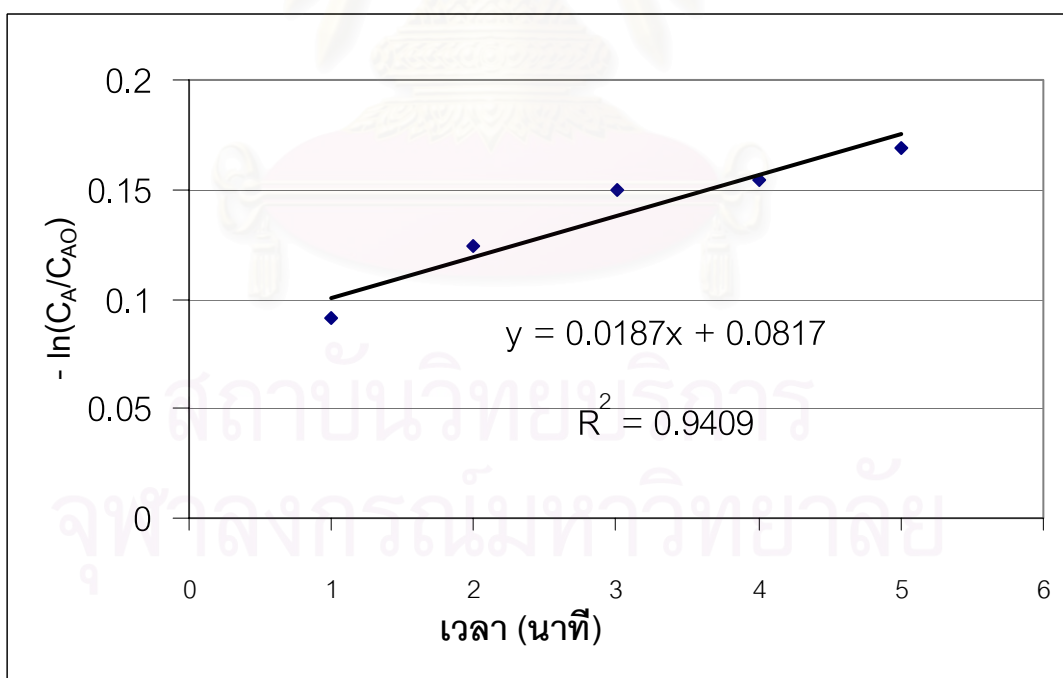
เมื่อนำข้อมูลการทดลองจากรูปที่ 4.18 มาหาอันดับของปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.19 ถึง 4.22



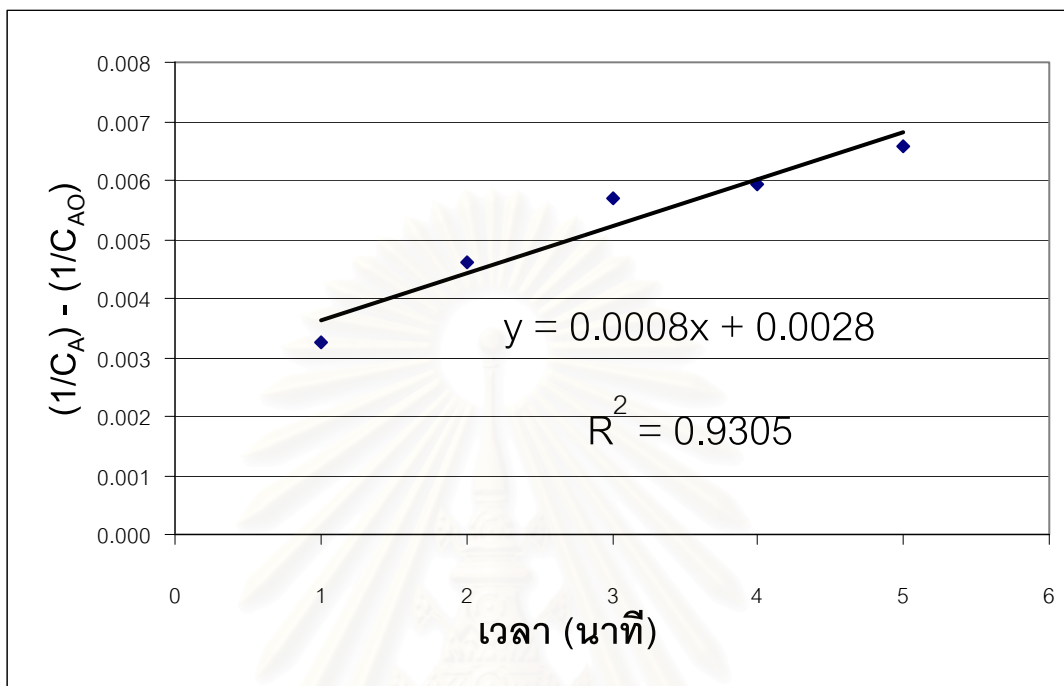
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการละลายตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นอันดับที่ 1 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 1.5, รั้อยละของแข็ง เท่ากับ 1.4, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการละลายตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นอันดับที่ 3 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 1.5, รั้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการละลายตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นอันดับที่ 1 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.5, รั้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

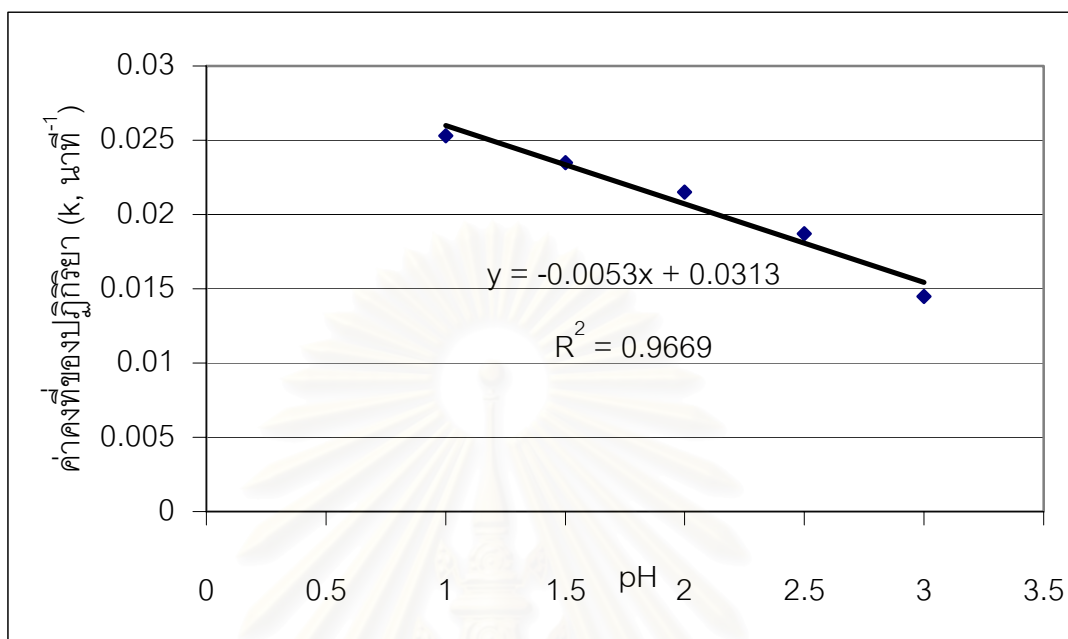


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการละลายตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นอันดับที่ 3 ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.5, รั้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.19 ถึง 4.22 จะพบว่า ไม่ว่าค่าความเป็นกรด - เบสจะสูงหรือต่ำ อันดับของปฏิกิริยาจะเป็น 1 เสมอ เช่นเดียวกับตะกอนสังเคราะห์ โดยเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo – first Order Reaction)

เมื่อนำข้อมูลการทดลองจากรูปที่ 4.18 มาหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา แล้วนำมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด - เบสกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้ดังรูปที่ 4.23





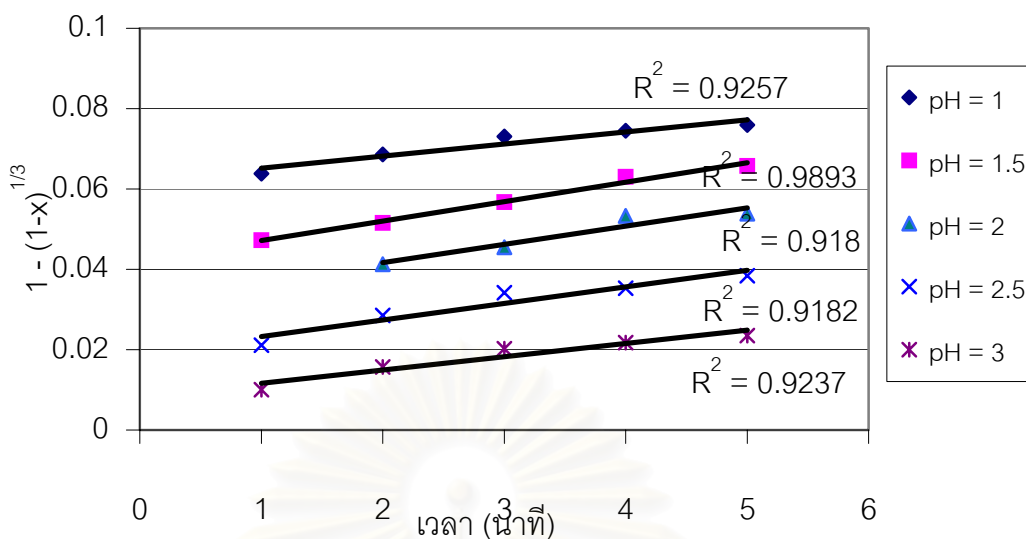
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด - เบสกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม

จากรูปที่ 4.23 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด - เบสกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาการละลายสังกะสีจากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม คือ

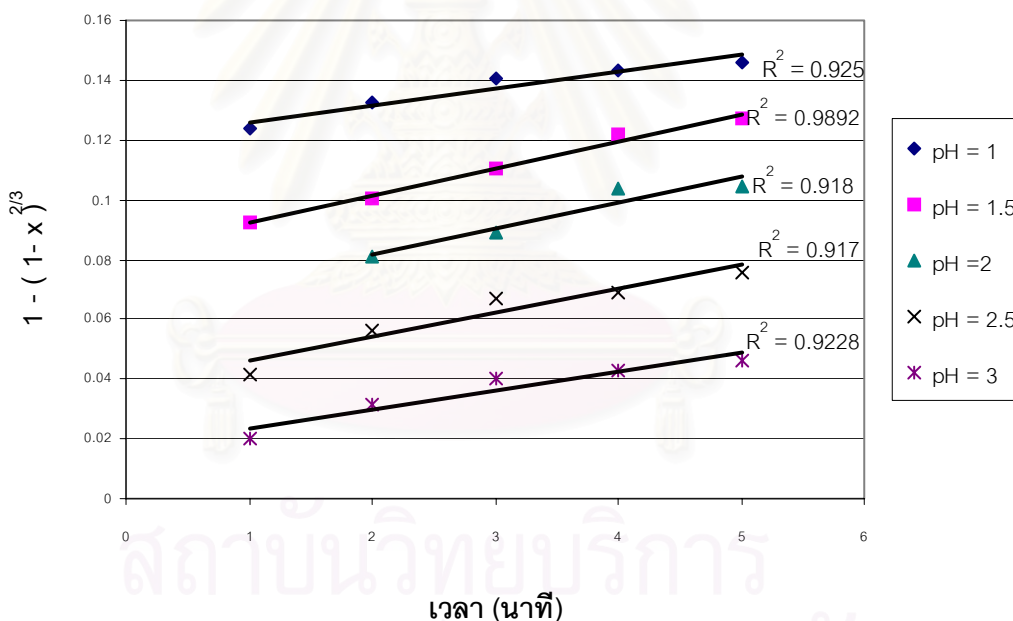
$$k = -0.0053 \text{ pH} + 0.0313 : R^2 = 0.9669 \quad (4.12)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับตะกอนสังเคราะห์ จะพบว่า ความชันของสมการที่ (4.12) มีค่าน้อยกว่าความชันที่ได้จากสมการที่ (4.3) และ (4.4) กล่าวคือ การละลายของตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมเกิดได้ช้ากว่าตะกอนสังเคราะห์ ซึ่งสอดคล้องกับที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

เมื่อพิจารณากลไกการเกิดปฏิกิริยา โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.72) และ (2.79) จะได้ผลดังรูปที่ 4.24 และ 4.25



รูปที่ 4.24 เมื่อการเกิดปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยาการละลายสังกะสีออกจากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม



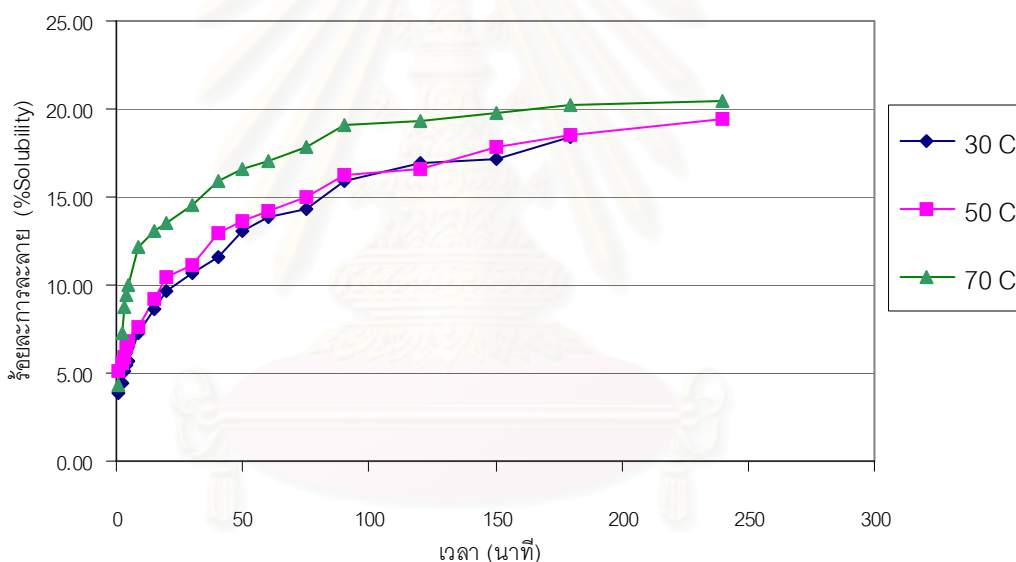
รูปที่ 4.25 เมื่อการแพร่เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยาการละลายสังกะสีออกจากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม

จากรูปที่ 4.24 และ 4.25 จะเห็นว่า ค่า Coefficient of Determination ( $R^2$ ) ของทั้งสองรูปมีค่าใกล้เคียงกันทุกค่าความเป็นกรด - เบส แสดงว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาถูกควบคุมด้วยทั้งสองขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาและขั้นตอนการแพร่ ซึ่งจะแตกต่างจากตะกอนสังเคราะห์ที่ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็ว ทั้งนี้เป็นเพราะว่า ตะกอนจากอุตสาหกรรม

มีโลหะหลายชนิดปนเปื้อนอยู่ ดังนั้นปริมาณโปรตอนที่จะเข้ามาทำปฏิกิริยากับสังกะสีในตะกอนจึงมีน้อย เพราะถูกโลหะตัวอื่นแย่งไป อีกทั้งตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมยังประกอบด้วยสารที่ไม่ละลายปนเปื้อนอยู่ ทำให้โปรตอนไม่สามารถเข้ามาทำปฏิกิริยาได้ทันที ต้องมีขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นสารที่ไม่ละลาย ทำให้การแพร่เข้ามาทำปฏิกิริยาช้ากว่าในตะกอนสังเคราะห์ ดังนั้นการแพร่จึงมีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาการละลายด้วย

#### 4.4.2) ผลของอุณหภูมิ

ในการศึกษานี้ จะทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 30, 50 และ 70 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 และอัตราการกวน 200 รอบต่อนาที เช่นเดียวกับตะกอนสังเคราะห์ ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.26

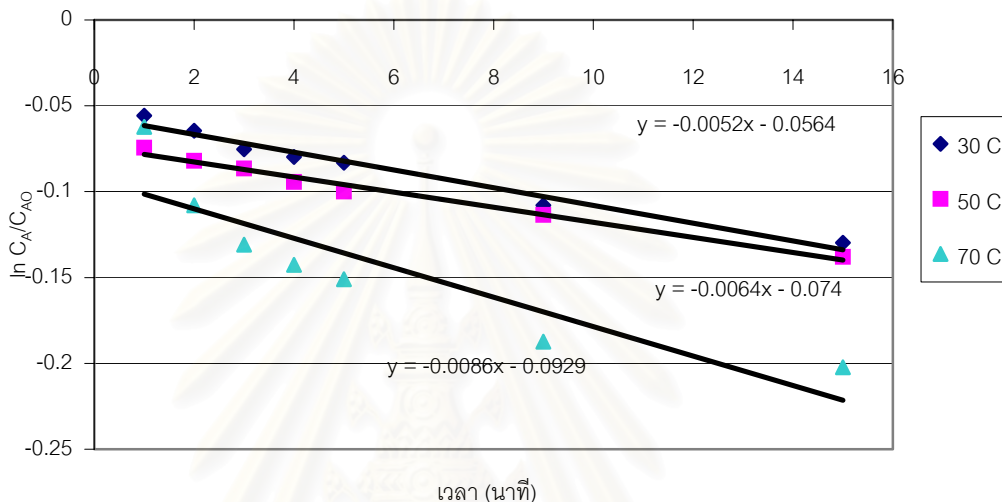


รูปที่ 4.26 ผลของอุณหภูมิต่อการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที และร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4

จากรูปที่ 4.26 จะเห็นว่า ตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมให้ผลเช่นเดียวกับตะกอนสังเคราะห์ คือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การละลายของสังกะสีก็จะสูงขึ้นด้วย ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction) แต่อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าการละลายเพิ่มขึ้นไม่มากนัก โดยที่ค่าการละลายสูงสุดที่ 70 องศาเซลเซียสจะสูงสุดประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ 30 องศาเซลเซียสจะสูงสุดประมาณ 19

เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าแตกต่างกันเพียง 1 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิมีผลน้อยมากต่อการละลายของตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่นเดียวกับตะกอนสังเคราะห์ที่แตกต่างกันเพียง 2 เปอร์เซ็นต์

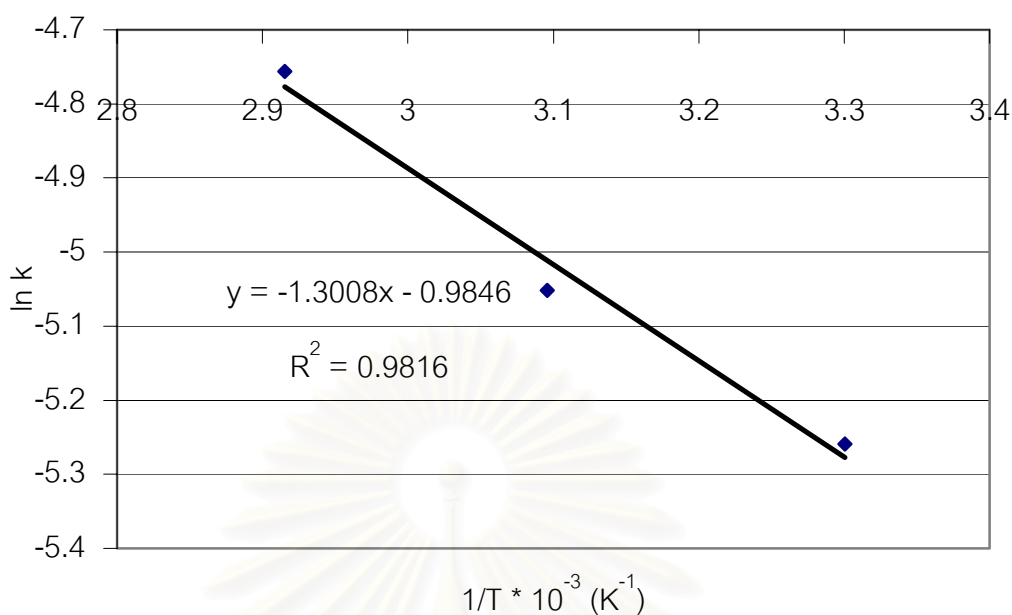
เมื่อหาค่าพลังงานการกระตุ้น จากความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius' Equation) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.27 - 4.28 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.27 การหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการละลายสังกะสีออกจากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 และอัตราการกวน 200 รอบต่อนาที

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีจากตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4, อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที

T (องศาเซลเซียส)	T (เคลวิน)	k (นาที <sup>-1</sup> )	1/T (เคลวิน <sup>-1</sup> )	ln k
30	303	0.0052	0.00330033	-5.2591
50	323	0.0064	0.00309598	-5.05146
70	343	0.0086	0.00291545	-4.75599



รูปที่ 4.28 Arrhenius Plot สำหรับปฏิกิริยาการละลายตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 2.75, อัตราการทวน 200 รอบต่อนาที, ร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4

จากรูปที่ 4.28 และสมการที่ (2.59) ค่าความชันที่ได้ คือ ค่า  $-E_A / R$  ซึ่งเท่ากับ  $-1300.8$  เมื่อนำมาคำนวณหาค่าพลังงานการกระตุ้น ( $E_A$ ) แล้วจะได้เท่ากับ 2.58 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมล ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าพลังงานการกระตุ้นของการละลายจากตะกอนสังเคราะห์ ที่มีค่าเพียง 1.85 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมล นั่นคือ ปฏิกิริยาการละลายของตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมเกิดได้ยากกว่าตะกอนสังเคราะห์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละการละลายที่ได้จากรูปที่ 4.7 และ 4.26 โดยที่ค่าร้อยละการละลายของตะกอนสังเคราะห์ในรูปที่ 4.8 จะได้สูงสุดประมาณ 57 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ค่าร้อยละการละลายของตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมในรูปที่ 4.26 จะสูงสุดเพียงแค่ 20 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ ศึกษาการละลายของสังกะสีจากตะกอนน้ำเสียด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. อัตราการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนน้ำเสียจะลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด - เบส เพิ่มขึ้น โดยค่าร้อยละการละลาย (%Solubility) ที่ภาวะสมดุลจะลดลงอย่างมาก เมื่อค่าความเป็นกรด - เบสมากกว่า 2
  2. ค่าร้อยละของแข็ง (%Solid) มีผลต่ออัตราเร็วของการละลายสังกะสี โดยการละลายของสังกะสีจะสูงสุด ที่ค่าร้อยละของแข็งเท่ากับ 1.4 เนื่องจากเป็นจุดอิ่มตัวของสารละลาย
  3. ปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนน้ำเสียเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic Reaction) กล่าวคือ การละลายของสังกะสีจะสูงขึ้นตามอุณหภูมิของระบบ อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิมีผลต่อการละลายตะกอนน้อยมาก
  4. ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียม (Pseudo – first Order Reaction) สำหรับค่าความเป็นกรด - เบสในช่วง 1 ถึง 3
  5. ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา (Rate Determining Step) สำหรับตะกอนสังเคราะห์ ส่วนตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาถูกควบคุมด้วยทั้งขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาและขั้นตอนการแพร่ เนื่องจากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมมีสารอื่นเจือปนมาก การที่กรดจะเข้าทำปฏิกิริยากับสังกะสีได้นั้น โปรตอนต้องแพร่ผ่านชั้นสารอื่นๆ ดังนั้นการแพร่จึงมีส่วนในการควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยาด้วย โดยสมการความสัมพันธ์ดังนี้
- 5.1) ถ้าการแพร่เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา

$$\frac{t}{\tau} = 1 - \left( \frac{r}{R_i} \right)^2 = 1 - (1 - X_A)^{2/3} \quad (2.72)$$

$$\text{โดยที่} \quad \tau = \frac{\rho_A R_i^2}{2bC_{Bg} D_{AB}} \quad (2.73)$$

5.2) ถ้าการเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นขั้นตอนการควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยา

$$\frac{t}{\tau} = 1 - \frac{r}{R} = 1 - (1 - x_A)^{1/3} \quad (2.79)$$

โดยที่ 
$$\tau = \frac{\rho_A R}{akC_{Bg}} \quad (2.78)$$

6. จากผลการศึกษาตะกอนน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีโลหะหลายชนิดปนเปื้อนอยู่ในตะกอน การละลายของสังกะสีจะมีค่าลดลง
7. ผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการละลายของสังกะสีออกจากตะกอนอุตสาหกรรมนั้น สอดคล้องกับผลการทดลองในส่วนของตะกอนสังเคราะห์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการทดลองที่น่าสนใจในการพัฒนากระบวนการละลายสังกะสีออกจากตะกอนน้ำเสียด้วยกรดซัลฟูริก มีดังนี้

1. ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของตะกอนต่อการละลายของสังกะสี
2. ศึกษาผลของความเข้มข้นในตะกอนต่อการละลายของสังกะสี
3. ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด - เบส (pH) ของกรด, อัตราการกวน, อุณหภูมิ และร้อยละของแข็งที่มีต่ออัตราการละลายของโลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว และอะลูมิเนียม เป็นต้น ว่าให้ผลสอดคล้องกันหรือไม่
4. ศึกษากรรมวิธีในการดึงสังกะสีในสารละลายที่ได้จากกระบวนการละลายตะกอนด้วยกรดซัลฟูริกให้อยู่ในรูปโลหะบริสุทธิ์ เป็นต้นว่า วิธีทางไฟฟ้าเคมี
5. ศึกษาตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทอื่น ๆ เพื่อดูผลการละลายของสังกะสีว่า ให้ผลสอดคล้องกันหรือไม่

## รายการอ้างอิง

1. Rajcevik H.P. A Hydrometallurgical Process for the Treatment of Industrial Wastes. Plating and Surface Finishing (July 1990) : 22 – 25.
2. Goldstone M.E., Kirk P.W.W. and Lester J.N. The Behaviour of Heavy Metals during Wastewater Treatment : I Cadmium, Chromium and Copper. The Surface of the Total Environment 95 (1990) : 233 – 252.
3. Goldstone M.E.,Kirk P.W.W. and Lester J.N. The Behaviour of Heavy Metals during Wastewater Treatment: II Lead, Nickel and Zinc. The Surface of the Total Environment 95 (1990) : 253 – 270.
4. สุเมธ ชวเดช. การบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
5. เกียรติศักดิ์ อุดมสิน โรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : มิตรนราการพิมพ์, 2539.
6. Skoog and Douglas A. Fundamental of Analytical Chemistry. 5<sup>th</sup> Edition. USA : Saunder Colleg., 1988.
7. ศุภชัย ไข่เทียมวงศ์. เคมีวิเคราะห์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
8. Wong L. and Henry J.G. Biological Removal and Chemical Recovery of Metals from Sludges. Biological Degradable Wastes (1991) : 309 – 322.
9. Tyagi R.D. and Couillard D.. An Innovative Biological Process for Heavy Metals Removal from Municipal Sludge. Biological Degradable Wastes (1991) : 309 – 322.
10. Sreekrishnan T.R. and Tyagi R.D.. Heavy Metal Leaching from Sewage Sludges : A Techno – economic Evaluation of the Process Options. Environmental Technology 15 (1994) : 531 – 543.



11. Ried M.. Heavy Metal Removal from Sewage Sludge : Practical Experiences with Acid treatment. Pretreatment in Chemical Water and Wastewater Treatment (1988) : 327 – 334.
12. Feltz R.E. and Logan T.J.. Residual Cadmium Forms in Acid – Extracted Anaerobically Digested Sewage Sludge. J. Environ. Qual. 14 (1985) : 483 – 488.
13. สมชาย โอสุวรรณ. จลนพลศาสตร์ วิศวกรรมเคมี. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ไจทอง, 2532.
14. บุญพุกภัย จากุระมะระ และคณะ. เคมี 1. กรุงเทพฯ : อักษรเจริญทัศน์, 2538.
15. Stanley M. Reaction Kinetics for Chemical Engineers. New York : McGraw – Hill, 1959.
16. Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering. 3<sup>rd</sup> Edition. New York : John Wiley & Sons, 1999.
17. Warren G. and Henein H., Ferric Chloride Leaching of Galena, Extractive Metallurgy Laboratory Exercises. 113 – 117. Pennsylvania : TMS – AIME. 1992.
18. Christi J. Transport Processes and Unit Operations. Singapore : Simon & Schuster (Asia), 1995.
19. ชีรพันธุ์ พิมพ์ทอง. ศึกษาค้นคว้าเรื่องการละลายสังกะสีจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรม โลหการ คณะวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
20. เกื้อจวลี พุกษาทร, จริญญา พลายนแก้ว และสุกัญญา มากมี. ผลของตัวแปรที่มีต่อความคงสภาพของกากตะกอน วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
21. Wozniak D.J. and Huang J.Y.C. Variables Affecting Metal Removal from Sludge. Jour. Water Poll. Control Fed 54 (1982) : 1574 – 1580.

22. Legiec I.A., Hayes C.A. and Kosson D.S. Continuous Recovery of Heavy Metals from MSW Incinerator Ashes. Environmental Progress 8 (1989) : 212 - 216.
23. Cruells M., Roca A. and Nunez C. Electric Arc Furnace Flue Dusts : Characterization and Leaching with Sulfuric Acid. Hydrometallurgy 31 (1992) : 213 – 231.
24. Neale C.N., Bricka R.M. and Chao A.C. Evaluating Acids and Chelating Agents for Removing Heavy Metals from Contaminated Soils. Environmental Progress 16 (1997) : 274 – 280.
25. Dryer J.A., Scrivner N.C. and Dentel S.K. A Practical Guide for Determining the Solubility of Metal Hydroxides and Oxides in Water. Environmental Progress 17 (1998) : 1 – 8.
26. Abdel – Aal E.A. Kinetics of Sulfuric Acid Leaching of Low – grade Zinc Silicate Ore. Hydrometallurgy 55 (2000) : 247 – 254.
27. Aylett B.J. The Chemistry of Zinc, Cadmium, Mercury. New York : Pergamon, 1975.
28. Vernon L. et. al. Water Chemistry. New York : John Wiley & Sons, 1980.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก – 1. มาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับโลหะหนักชนิดต่างๆ [19]

ชนิดของโลหะหนัก	ค่ามาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
สังกะสี (Zn)	< 5.0
โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	< 0.25
โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	< 0.75
ทองแดง (Cu)	< 2.0
แคดเมียม (Cd)	< 0.03
แบเรียม (Ba)	< 1.0
ตะกั่ว (Pb)	< 0.2
นิกเกิล (Ni)	< 1.0
แมงกานีส (Mn)	< 5.0
อาร์เซนิก (As)	< 0.25
เซลีนียม (Se)	< 0.02
ปรอท (Hg)	< 0.005

ภาคผนวก ข.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข – 1 ค่าคงที่การละลายของสารต่าง ๆ ที่ 25 องศาเซลเซียส [27]

Solid	$pK_{so}$	Solid	$pK_{so}$
Fe(OH) <sub>3</sub> (amorph)	36	BaSO <sub>4</sub>	10
FePO <sub>4</sub>	17.9	Cu(OH) <sub>2</sub>	19.3
Fe <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	33	PbCl <sub>2</sub>	4.8
Fe(OH) <sub>2</sub>	14.5	Pb(OH) <sub>2</sub>	14.3
FeS	17.3	PbSO <sub>4</sub>	7.8
Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	88	PbS	27.0
Al(OH) <sub>3</sub> (amorph)	33	MgNH <sub>4</sub> PO <sub>4</sub>	12.6
AlPO <sub>4</sub>	21.0	MgCO <sub>3</sub>	5.0
CaCO <sub>3</sub> (calcite)	8.34	Mg(OH) <sub>2</sub>	10.7
CaCO <sub>3</sub> (aragonite)	8.22	Mn(OH) <sub>2</sub>	12.8
CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (dolomite)	16.7	AgCl	10.0
CaF <sub>2</sub>	10.3	Ag <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	11.6
Ca(OH) <sub>2</sub>	5.3	Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.8
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	26.0	Zn(OH) <sub>2</sub>	17.2
CaSO <sub>4</sub>	4.59	ZnS	21.5
SiO <sub>2</sub> (amorph)	2.7		

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล เกิดเมื่อวันที่ 21 เมษายน พ.ศ.2522 จบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2538 ต่อจากนั้นเข้าศึกษาในระดับปริญญาตรีที่ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จบการศึกษาเมื่อ พ.ศ. 2542 จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่ภาควิชาเคมีเทคนิค ตั้งแต่เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2542 จนกระทั่งปัจจุบัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย