

คิเนติกส์ของการละลายสังกะสีจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

นายธีรพันธุ์ พิมพ์ทอง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-332-706-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**KINETICS OF ZINC LEACHING FROM ELECTRIC ARC FURNACE DUST
BY SODIUM HYDROXIDE**

Mr. Teerapun Pimtong

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

Department of Metallurgical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

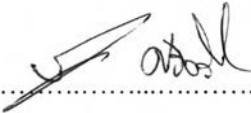
ISBN 974-332-706-1

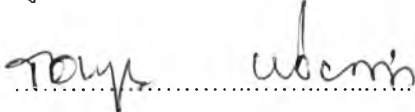
หัวข้อวิทยานิพนธ์ คือนวัตกรรมของการละลายสังกะสีจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์
โดย นายธีรพันธุ์ พิมพ์ทอง
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาคร จารุพิสิฐธร

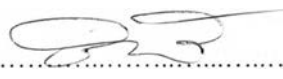
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

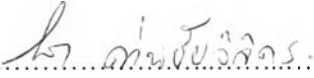

..... ศึกษาราชการแทน
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนันต์ชัย คงจันทร์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาคร จารุพิสิฐธร)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ไสว ค่านชัยวิจิตร)

ธีรพันธุ์ พิมพ์ทอง : คีเนติกส์ของการละลายสังกะสีจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์
(KINETICS OF ZINC LEACHING FROM ELECTRIC ARC FURNACE DUST BY SODIUM
HYDROXIDE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ , อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ชากร พิสิษฐ,
116 หน้า. ISBN 974-332-706-1.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคีเนติกส์ของการละลายสังกะสีจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์
โดยใช้ฝุ่นที่ได้จากบริษัทนครไทยสตริปมิลล์ จำกัด (มหาชน) ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยอัตราการกวน ความ
เข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ตั้งแต่ 1.0 ถึง 4.0 M อุณหภูมิตั้งแต่ 32 องศาเซลเซียสถึง 95 องศาเซลเซียส
และเปอร์เซ็นต์ของแข็งเท่ากับ 0.2, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองชี้ว่าอัตราเร็วของการละลายสังกะสีจากฝุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ
โซเดียมไฮดรอกไซด์ อันดับของปฏิกิริยาซึ่งหาโดยใช้อัตราเร็วเริ่มต้นมีค่า 0.76 ที่ 60 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ
สูงขึ้นอัตราเร็วของการละลายสังกะสีจะเพิ่มขึ้น จากการพล็อตระหว่าง $\ln(1-F)^{1/3}$ กับเวลาปรากฏว่ามีความ
สัมพันธ์เป็นเส้นตรงซึ่งชี้ให้เห็นว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมี โดยมีค่าพลังงานกระตุ้น
ปรากฏ (Apparent activation energy) ประมาณ 10.78 Kcal/mol (45.28 KJ/mol) เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของแข็งใน
สารละลายอัตราเร็วของการละลายสังกะสีจะลดลง ที่เปอร์เซ็นต์ของแข็งสูงๆ สัดส่วนของสังกะสีที่ละลายได้
สูงสุดจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของสังกะสีในสารละลาย (Solubility) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าถ้าในสาร
ละลายมีความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำกว่า

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

3970707221 METALLURGICAL ENGINEERING
: MAJOR
KEY WORD: KINETICS / ZINC / LEACHING / ELECTRIC ARC FURNACE DUST /
SODIUM HYDROXIDE

TEERAPUN PIMTONG : KINETICS OF ZINC LEACHING FROM ELECTRIC ARC
FURNACE DUST BY SODIUM HYDROXIDE. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. GOBBOON
LOTHONGKUM, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : ASSIST. PROF. CHARKORN JARUPISITTHORN, M.E.
116 pp. ISBN 974-332-706-1.

Kinetics of zinc leaching from electric arc furnace dust obtained from Nakhon Thai Strip Mill
Public Company was investigated. The variables studied include stirring speed, sodium hydroxide
concentrations of 1.0 to 4.0 M, reaction temperature of 32 degree celcius to 95 degree celcius and percent solid
equals 0.2, 10 and 20 percent.

The experimental results indicate that the rate of zinc leaching from the dust increases with
increased NaOH concentration. The order of reaction with respect to sodium hydroxide concentration was
determined by applying initial rate' method and found to be 0.76 at 60 degree celcius. At higher temperature,
the rate of zinc dissolution increases. Plots of $1-(1-F)^{1/3}$ versus reaction time giving linear relationship
indicating that a chemical reaction is the rate-determining step. The apparent activation energy was measured
to be 10.78 Kcal/mol (45.28 KJ/mol). With increased percent solid in the leaching solution, rate of zinc
extraction decreased. At high percent solid, the maximum zinc fraction reacted obtained will depend on the
zinc solubility in NaOH solution which is lower at lower concentration of sodium hydroxide.

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ
ปีการศึกษา.....2542

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาคร จารุพิสิฐธร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีตลอดมา ผู้เขียนขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ขนาดและชักตัวอย่างฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าซึ่งใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและบริษัทเอ็นทีเอสตีลกรุ๊ป จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโลหการและท่านประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และท่านอาจารย์ ดร. ไสว คำนชัยจิตร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความสนใจพร้อมคำแนะนำต่องานวิจัยฉบับนี้ รวมทั้งท่านคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน ที่ได้ช่วยอบรมสั่งสอนวิชาการสาขาโลหการ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการที่ให้ความสะดวกในการปฏิบัติงานวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ สำหรับค่าใช้จ่ายในการทำวิจัยผ่านโครงการสร้างขีดความสามารถของสถาบันในการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโทและปริญญาเอก และบริษัทนครไทยสตรีปมิลล์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท

ท้ายนี้ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้กำลังใจแก่ผู้เขียนเสมอมา

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ด
คำอธิบายคำย่อ.....	ธ
บทที่.....	1
1. บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์.....	2
1.2 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ปรัชญานวัตกรรม.....	4
2.1 ลักษณะทั่วไปของฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....	4
2.2 กระบวนการในการจัดการฝุ่น.....	5
2.3 การเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการจัดการฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....	27
2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับคิเนติกส์ของการละลายฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยสารละลาย.....	29
2.5 สรุป.....	30
3. การละลายฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	32
4. วิธีการทดลอง.....	40
5. ผลการทดลองและอภิปราย.....	46
5.1 ฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....	46
5.2 การละลายฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	49
5.3 การตรวจสอบฝุ่นเตาอาร์กหลังผ่านการละลายหรือกาก.....	61
6. สรุปผลการทดลอง.....	65
7. ข้อเสนอแนะ.....	66

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รายการอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก.	72
ภาคผนวก ข.	74
ภาคผนวก ค.	108
ภาคผนวก ง.	111
ประวัติผู้วิจัย.....	116

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....	5
2.2	องค์ประกอบทางเคมีของโรงงานผลิตเหล็กกล้าคาร์บอนและ..... เหล็กกล้าไร้สนิมในสหรัฐอเมริกา	6
4.1	สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบจากอัตราการกววน.....	42
4.2	สภาวะที่ทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	43
4.3	แสดงสภาวะการทดลองศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิ.....	44
4.4	แสดงสภาวะที่ใช้ศึกษาผลกระทบจากเปอร์เซ็นต์ของแข็ง.....	45
5.1	การกระจายขนาดของ ฝุ่นเตาอาร์กของ..... บริษัทนครไทยสตรีปมิล จำกัด (มหาชน)	47
5.2	แสดงผลวิเคราะห์ทางเคมีของฝุ่นเตาอาร์กที่ใช้ในการทดลอง.....	49
5.3	อัตราเร็วของการละลายเริ่มต้นที่ความเข้มข้นของ NaOH ต่างๆ ที่ 60 องศา..... เซลเซียส , เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 และอัตราการกววน 850 รอบต่อนาที	53
5.4	อัตราเร็วของการละลายเริ่มต้นที่อุณหภูมิต่าง , ความเข้มข้น NaOH 2.5M, ... เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 และอัตราการกววน 850 รอบต่อนาที	56
5.5	องค์ประกอบทางเคมีของกากที่ได้จากการละลายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	62
5.6	ผลวิเคราะห์สารละลายที่ได้จากการละลายฝุ่นเตาอาร์กที่ 95 องศา..... เซลเซียส, สารละลาย NaOH 2.5 M, เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	64
ข-1-1	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า..... ที่อัตราการกววน 500 รอบต่อนาที	76
ข-1-2	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า..... ที่อัตราการกววน 750 รอบต่อนาที	77
ข-1-3	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า..... ที่อัตราการกววน 850 รอบต่อนาที	78

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-2-1	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....80 ที่โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
ข-2-2	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....81 ที่โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.5 โมลต่อลิตร และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
ข-2-3	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....82 ที่โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
ข-2-4	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....83 ที่โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2.5 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
ข-2-5	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....84 ที่โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
ข-2-6	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....85 ที่โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 4 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
ข-3-1	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....87 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส
ข-3-2	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....88 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.5 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-3-3	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....89 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส
ข-3-4	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....90 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส
ข-3-5	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....91 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส
ข-3-6	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....92 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส
ข-4-1	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....94 ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง)
ข-4-2	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....95 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส
ข-4-3	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....96 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
ข-4-4	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....97 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
ข-4-5	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....98 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-4-6	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....99 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	
ข-4-7	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....100 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส	
ข-5-1	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....102 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลต่อลิตร เมื่อเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 เปอร์เซ็นต์	
ข-5-2	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....103 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลต่อลิตร เมื่อเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์	
ข-5-3	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....104 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลต่อลิตร เมื่อเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 20 เปอร์เซ็นต์	
ข-5-4	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....105 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลต่อลิตร เมื่อเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 เปอร์เซ็นต์	
ข-5-5	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....106 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลต่อลิตร เมื่อเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์	
ข-5-6	ผลการละลายสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า.....107 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลต่อลิตร เมื่อเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 20 เปอร์เซ็นต์	

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค-1	ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของสังกะสีที่ละลายกับ.....109 reduced time ($t/t_{0.5}$) สำหรับการทดลองที่ความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส
ค-2	ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของสังกะสีที่ละลายกับ.....110 reduced time ($t/t_{0.5}$) สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความ เข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 M

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะ Rotary Hearth furnace ⁽¹⁴⁾	9
2.2	กระบวนการ Inmetco ⁽¹⁴⁾	10
2.3	ลักษณะเตาที่ใช้ในกระบวนการ Ausmelt ⁽¹⁵⁾	11
2.4	แผนผังกระบวนการ Elkem ⁽¹⁶⁾	14
2.5	แผนผังกระบวนการ Plasmadust ⁽¹⁸⁾	15
2.6	แผนผังกระบวนการ Tetromics ⁽⁸⁾	17
2.7	ลักษณะเตาที่ใช้ในกระบวนการ Tetronics ⁽⁸⁾	17
2.8	ลักษณะพื้นฐานของเตาอาร์คไฟฟ้าแบบพลาสมาของ..... Davy McKee ⁽²¹⁾	18
2.9	เตาอาร์คไฟฟ้าแบบพลาสมาในกระบวนการ..... Tibur Howden Extended Arc Reactor ⁽²²⁾	19
2.10	แผนภาพกระบวนการผลิตแบบ UBC-Chaparral ⁽²³⁾	21
2.11	ความเข้มข้นของแคลเซียมและสังกะสีกับ..... อัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลวโดย ใช้สารละลายกรดอะซิติกที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ⁽²³⁾	22
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของสารละลายกับ..... ปริมาณผงสังกะสี ⁽²⁴⁾	23
2.13	แผนภูมิของกระบวนการ Modified Zincex ⁽²⁵⁾	25
2.14	แผนภูมิกระบวนการละลายด้วยกรดอะซิติก ⁽⁷⁾	26
2.15	ความสามารถในการละลายของสารประกอบสังกะสีใน..... สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ⁽²⁶⁾	31
3.1	อนุภาคสารตั้งต้นทรงกลมที่มีขนาดรัศมีเริ่มต้น r_0 ที่ทำปฏิกิริยา..... กับสารละลาย ⁽²⁷⁾	36
3.2	ค่าพลังงานกระตุ้นปรากฏ (Apparent activation energy)	39
	ที่หาจากค่าคงที่ของอัตราเร็ว ⁽²⁷⁾	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง.....41
5.1	ลักษณะรูปร่างของฝุ่นเตาอาร์กของบริษัทนครไทยสตรีปมิต46 จำกัด (มหาชน)
5.2	X-Ray Pattern ของฝุ่นเตาอาร์กของบริษัทนครไทยสตรีปมิต48 จำกัด(มหาชน)
5.3	สัดส่วนของสังกะสีที่ละลายจากฝุ่นเตาอาร์กเป็นฟังก์ชัน50 ของเวลาที่อัตราการกวนต่างๆ, อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส, ความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.5 โมลต่อลิตร และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 เปอร์เซ็นต์
5.4	สัดส่วนของสังกะสีที่ละลายจากฝุ่นเตาอาร์กเป็นฟังก์ชัน51 ของเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ , อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส, อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 เปอร์เซ็นต์
5.5	สัดส่วนของสังกะสีที่ละลายเป็นฟังก์ชันของเวลา.....52 ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ, อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส, อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 เปอร์เซ็นต์
5.6	ความสัมพันธ์ van't hoff สำหรับผลของความเข้มข้น.....54 ของ NaOH เริ่มต้นต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาเริ่มต้น
5.7	สัดส่วนของสังกะสีที่ละลายเป็นฟังก์ชันกับเวลาที่อุณหภูมิ55 32 ถึง 95 องศาเซลเซียสสถานะอื่น ได้แก่ ความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 โมลต่อลิตร, อัตราการกวน 850 รอบต่อนาทีและเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 เปอร์เซ็นต์

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8	Arrhenius plot สำหรับปฏิกิริยาการละลายสังกะสี.....56 ด้วย NaOH ความเข้มข้น 2.5M, เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 และอัตราการกวน 850 รอบต่อนาที
5.9	กราฟของ $1 - (1-F)^{1/3}$ กับเวลาสำหรับการละลายสังกะสี.....58 ที่ความเข้มข้น NaOH ต่างๆ, อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส, อัตราการกวน 850 รอบต่อนาทีและเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 เปอร์เซ็นต์
5.10	กราฟของ $1 - (1-F)^{1/3}$ กับเวลาสำหรับการละลายสังกะสีที่ความ.....58 เข้มข้น NaOH ต่างๆ, อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส, อัตราการกวน 850 รอบต่อนาทีและเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 เปอร์เซ็นต์
5.11	กราฟของ $1 - (1-F)^{1/3}$ กับเวลาสำหรับการละลายสังกะสีที่.....59 อุณหภูมิตั้งแต่ 32 ถึง 95 องศาเซลเซียส, ความเข้มข้น NaOH 2.5 M, อัตราการกวน 850 รอบต่อนาทีและเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 เปอร์เซ็นต์
5.12	Affine plot ระหว่างสัดส่วนของสังกะสีที่ละลายกับ.....59 Reduced time สำหรับการละลายสังกะสีที่ความเข้มข้น NaOH ต่างๆ, อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส, อัตราการกวน 850 รอบต่อนาทีและเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 เปอร์เซ็นต์
5.13	Affine plot ระหว่างสัดส่วนของสังกะสีที่ละลายกับ.....60 Reduced time สำหรับการละลายสังกะสีที่อุณหภูมิตั้งแต่ 32 ถึง 95 องศาเซลเซียส, ความเข้มข้น NaOH 2.5 M, อัตรา การกวน 850 รอบต่อนาทีและเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 เปอร์เซ็นต์
5.14	ผลของเปอร์เซ็นต์ของแข็งต่อสัดส่วนของสังกะสี.....61 ที่ละลายที่ความเข้มข้น NaOH 3.0 และ 4.0 M, อัตราการกวน 850 รอบต่อนาทีและอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส
5.15	กากที่ได้จากการละลายที่สารละลาย NaOH 2.5 M,62 อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส, อัตราการกวน 850 รอบต่อนาที และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.16	ผล XR-D ของกากที่ได้จากการละลายที่สารละลาย NaOH.....63 2.5 M, อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส, อัตราการกวน 850 รอบต่อนาทีและเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 0.2 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	
ง-1	วิธีการเตรียมตัวอย่างสารละลายด้วยวิธี Homogenous Suspension....113	
ง-2	รายละเอียดของเครื่อง SA-CP2.....114	

คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย
M	molar	โมลต่อลิตร
F	zinc fraction reacted	สัดส่วนของสังกะสีที่ถูก ละลาย
Kcal/mol	kilocalorie per mole	กิโลคาลอรีต่อโมล
KJ/mol	kilojoule per mole	กิโลจูลต่อโมล
NaOH	Sodium hydroxide	โซเดียมไฮดรอกไซด์
ppm.	part per million	ส่วนในล้านส่วน
%	percent	เปอร์เซ็นต์
n	mole of unreacted reactant, order	จำนวนโมลของสารตั้งต้น ที่เหลืออยู่ในแกนกลางของ อนุภาคที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา ที่เวลา t ใดๆ, อันดับของ ปฏิกิริยา
t	time	เวลา
D	diffusion coefficient	สัมประสิทธิ์การแพร่
r	radius	รัศมี
r_0	original radius	รัศมีเริ่มต้น
v	volume per mole	ปริมาตรต่อโมล
V_0	original volume	ปริมาตรของอนุภาคเริ่มต้น
k	rate constant	ค่าคงที่ของอัตราเร็วของ การเกิดปฏิกิริยา
f	shape factor	แฟกเตอร์รูปร่าง
A	Area	พื้นที่ผิว
C	concentration	ความเข้มข้น
E_a	activation energy	พลังงานกระตุ้น
A_0	constant	ค่าคงที่

คำอธิบายคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย
R	gas constant. correlation coefficient	ค่าคงที่ของก๊าซ, ค่าสัมประสิทธิ์ ความชัดเจนของสหสัมพันธ์ ของตัวแปร
T	temperature	อุณหภูมิสัมบูรณ์
gpl or g/l	gram per liter	กรัมต่อลิตร
$t/t_{0.5}$	reduced time	อัตราส่วนระหว่างเวลาที่ใช้ ในการละลายสังกะสี ณ เวลา ใดๆ ต่อเวลาที่ใช้ในการ ละลายสังกะสีออกจากฝุ่นได้ 50 เปอร์เซ็นต์
XRD	X-ray diffraction	เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน