

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำขึ้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	5
2.1.1 คุณสมบัติ	5
2.1.2 สาเหตุที่ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	5
2.1.3 ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	6
2.1.4 มาตรฐานคุณภาพของอากาศเกี่ยวข้องกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	6
ในประเทศไทยตามที่กฎหมายกำหนด	
2.2 ขี้น้ตะก้นจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้า	7
2.3 กระบวนการชะละลาย	8
2.4 กระบวนการดูดซึม	10
2.4.1 การถ่ายเทมวลแก๊สสู่ของเหลว	10
2.4.2 ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบหอดูดซึม	15
2.5 ปฏิริยาเคมีที่เกี่ยวข้อง	18
2.6 การออกแบบการทดลอง	19
2.6.1 พื้นผิวผลตอบสนอง	20
	(7)

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.6.2 ประโยชน์ของเทคนิค RSM	26
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	26
2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค CCD ของ RSM	33
2.8 ข้อสรุปข้อมูลที่ได้จากการค้นคว้า	33
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	35
3.1 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลองสำหรับการศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีเมนต์กรีนในถังปฏิกรณ์แบบกะ	35
3.1.1 วัสดุ	35
3.1.2 สารเคมี	36
3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน	36
3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพด่างด้วยวิธีการไทเทรต	36
3.1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	36
3.1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง	38
3.1.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์	38
3.1.8 วิธีการทดลองและการออกแบบการทดลอง	41
3.1.9 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลวในการศึกษาการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายที่ได้จากการสกัดซีเมนต์กรีนของเหล็ก	44
3.2 สารเคมี อุปกรณ์ วิธีการทดลอง สำหรับการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีเมนต์กรีนในหอดูดซึมชนิดคอลัมน์บรรจุในระดับห้องปฏิบัติการ	46
3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	46

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารดูดซึม	46
3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง	47
3.2.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมด้วยเครื่องอะตอมมิก แอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	47
3.2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพด่างด้วยวิธีการไทเทรต	47
3.2.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	47
3.2.7 วิธีการทดลองและการออกแบบการทดลอง	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	60
4.1 กระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรัน	61
4.2 การกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ	71
4.3 ผลการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตะกรันในคอลัมน์บรรจุด้วยเทคนิค Response Surface Methodology (RSM) ในการออกแบบการทดลอง	75
4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต (Economic analysis)	88
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	90
5.1 สรุปผลการทดลอง	90
5.2 ข้อเสนอแนะ	92
บรรณานุกรม	93
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก ข้อมูลสารเคมีเบื้องต้น	99
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์	105
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง	120
ภาคผนวก ง การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน	163

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 องค์ประกอบทั่วไปของจีตะกรันเหล็ก	8
3-1 สภาวะการทดลองสำหรับศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากจีตะกรัน	41
3-2 รหัสตัวแปรและขอบเขตของตัวแปรที่ทำการศึกษด้วยเทคนิค RSM ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร และตัวแปรตาม 1 ตัวแปร	53
3-3 แสดงสภาวะการทดลองสำหรับศึกษาการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายจีตะกรันในคอลัมน์บรรจุ ระดับห้องปฏิบัติการ	54
4-1 ปริมาณองค์ประกอบทั่วไปของจีตะกรันเหล็กก่อนทำการชะละลายวิเคราะห์ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์	61
4-2 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในจีตะกรันที่เหลือจากกระบวนการชะละลายด้วย สารละลายชนิดกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออน	68
4-3 ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายแคลเซียมไอออน ที่ได้จากกระบวนการชะละลายจีตะกรันในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ ที่สภาวะการทดลองต่างๆ ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD	76
4-4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองสำหรับกำจัด แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	78
4-5 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเปรียบเทียบผล ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับผลการทดลอง	84
4-6 อัตราค่าไฟฟ้าประเภทกิจการขนาดเล็ก ซึ่งมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย ในเวลา 15 นาทีสูงสุดต่ำกว่า 30 กิโลวัตต์ โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว	88
4-7 ผลของการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตสารละลายแคลเซียมไอออน (100 ลิตร)	89

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
2-1 ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two Resistance Theory) สำหรับการถ่ายโอนมวลระหว่างแก๊สและของเหลว	12
2-2 การไหลแบบสวนทางกันภายในคอลัมน์บรรจุ	14
2-3 ชนิดของตัวกลางที่ใช้ในคอลัมน์บรรจุ Raschig Ring, Metal Pall Ring, Plastic Pall Ring, Berl Saddle, Ceramic Intalox Saddle, Plastic Supper Intalox Saddle และ Metal Intalox Saddle	14
2-4 แผนภาพแสดงสมดุลสารสำหรับหอดูดซึม	16
2-5 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$	21
3-1 ลักษณะทางกายภาพของซีตะกรันที่ได้จากเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF)	35
3-2 เครื่องบดย่อยแบบจาว (Jaw Crusher) ใช้สำหรับการบดหยาบซีตะกรัน	36
3-3 เครื่องบดย่อยแบบไจราทอรี (Gyratory Crusher)	37
3-4 เครื่องร่อนตะแกรงสำหรับคัดขนาดซีตะกรัน	37
3-5 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD)	39
3-6 เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF)	39
3-7 แสดงเครื่อง Atomic Adsorption Spectrometer (AAS) สำหรับใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของแคลเซียม	40
3-8 ชุดอุปกรณ์การทดลองสำหรับถังปฏิกรณ์แบบกะ	43
3-9 ชุดอุปกรณ์การทดลองสำหรับถังปฏิกรณ์แบบกะในห้องปฏิบัติการ	43
3-10 กราฟมาตรฐานสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นแคลเซียม (Ca^{2+}) โดยใช้เครื่อง AAS	45
3-11 สีของสารละลายก่อนและหลังการไทเทรต	46
3-12 ชุดอุปกรณ์การทดลองของหอดูดซึม ชนิดคอลัมน์บรรจุสำหรับการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	48
3-13 ชุดการทดลองของคอลัมน์บรรจุที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	49
3-14 ชุดอุปกรณ์เก็บแก๊สด้วยวิธีการแทนที่น้ำเกลืออิ่มตัวด้วยแก๊ส	56

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
3-15 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) สำหรับวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	57
3-16 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นแคลเซียม (Ca^{2+}) โดยใช้เครื่อง AAS	59
3-17 สีของสารละลายก่อนและหลังการไทเทรต	59
4-1 ลักษณะทางกายภาพของจีตะกรันที่ผ่านการอบแห้งและคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 44 ไมครอน และค้ำตะแกรงขนาดรูเปิด 37 ไมครอน	60
4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายจีตะกรันกับอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง	62
4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายจีตะกรันกับความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติก	63
4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายจีตะกรันกับอุณหภูมิในการชะละลาย	64
4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายกับเวลาที่ใช้ในการชะละลาย	65
4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายกับเวลาที่ใช้ในการชะละลาย	66
4-7 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบองค์ประกอบตะกอนของจีตะกรันก่อนและหลังการชะละลายวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์	69
4-8 ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับสารดูดซับต่างๆ โดยใช้อัตราการไหลของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร	70
4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน	72
4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราการไหลของของเหลว	73

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราการใช้ของของแก๊ส	74
4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณและจากการทำนาย ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-3)	79
4-13 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการใช้ของแก๊ส (x_2) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตกรัน (x_3) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	81
4-14 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการใช้ของของเหลว (x_1) และอัตราการใช้ของแก๊ส (x_2) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ระดับความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร	82
4-15 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ของแก๊ส (x_2) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตกรัน (x_3) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	83
4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลา	85
4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลา	86
4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงเวลาต่างๆ	87