

## รายงานวิจัย

เรื่อง

การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ซีตะกั่วที่ได้จาก  
กระบวนการผลิตเหล็ก

**Carbon Dioxide Capture using Slag from Steelmaking  
Process**

คณะผู้วิจัย

รศ. ดร. จรัญ บุญกาญจน์

หัวหน้าโครงการ

ผศ. ดร. จันทิมา ชั่งสิริพร

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาว สุดารัตน์ ถิ่นจะนะ

ผู้ร่วมวิจัย

งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

## บทคัดย่อ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เป็นก๊าซเรือนกระจกที่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน การลดการปล่อยก๊าซ  $\text{CO}_2$  สู่บรรยากาศเป็นสิ่งจำเป็นซึ่งต้องมีการวิจัยพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ ที่สามารถกักเก็บ  $\text{CO}_2$  ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ต่ำลง จากการศึกษาองค์ประกอบที่มีอยู่ในซีตะแกรงที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมถลุงเหล็กกล้า พบว่ามีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซึ่งมีความสามารถในการกักเก็บ  $\text{CO}_2$  งานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษากักเก็บ ( $\text{Capture}$ )  $\text{CO}_2$  โดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตะแกรงในคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบ โดยแบ่งการศึกษากักเก็บเป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะแกรงโดยเปรียบเทียบชนิดของสารละลาย 2 ชนิด คือ สารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออน จากการศึกษาพบว่าสารละลายที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการกระบวนการกักเก็บ  $\text{CO}_2$  คือ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะแกรงด้วยน้ำปราศจากไอออน ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัด  $\text{CO}_2$  เบื้องต้นร้อยละ 75.74 ซึ่งสูงกว่าสารละลายกรดอะซิติกซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัด  $\text{CO}_2$  เพียงร้อยละ 39.69 เนื่องจากสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะแกรงด้วยน้ำปราศจากไอออน มีค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมแก่การดูดซึม  $\text{CO}_2$  ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะแกรงด้วยน้ำปราศจากไอออน ที่สภาวะในการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์คือ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (L/S) 10:1 (กรัมต่อกรัม) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นสารดูดซึมสำหรับการกำจัด  $\text{CO}_2$  ในคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบต่อไป

ตอนที่ 2 ศึกษาการนำสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะแกรงด้วยน้ำปราศจากไอออนไปใช้ในการกำจัด  $\text{CO}_2$  จากอากาศเสียจำลองและทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด  $\text{CO}_2$  ในคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย อัตราการไหลของของเหลว (0.3-0.9 ลิตรต่อนาที) อัตราการไหลของก๊าซหรืออัตราการไหลอากาศเสีย (0.25-0.85 ลิตรต่อนาที) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะแกรง (200-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ออกแบบการทดลองและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง Response Surface Methodology (RSM) แบบ Central Composite Design (CCD) ด้วยโปรแกรม Design Expert Software เพื่อประเมินผลและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระอันจะนำไปสู่สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสม ทำให้ได้แบบจำลองสมการกำลังสอง (Quadratic Model) ของประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{CO}_2$  ดังสมการ และได้สภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ คือ

ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.77 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซ 0.25 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 725 มิลลิกรัมต่อลิตร และดำเนินการโดยใช้สารละลายแบบไหลผ่านครั้งเดียวเป็นเวลา 15 นาที ซึ่งค่าจากการคำนวณจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัด CO<sub>2</sub> สูงสุดร้อยละ 100 และมีผลการทดสอบจากการทดลองจริงร้อยละ 97.81 ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลจากการทำนายโดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 5 เป็นตัวบ่งบอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์

$$y = 72.52 + 54.11x_1 - 164.79x_2 + 0.079x_3 + 0.13x_2x_3 - 8.28 \times 10^{-5} x_3^2$$

เมื่อ

$y$  = ประสิทธิภาพการกำจัด CO<sub>2</sub> (ร้อยละ)

$x_1$  = อัตราการไหลของของเหลว (ลิตรต่อนาที)

$x_2$  = อัตราการไหลของก๊าซหรืออัตราการไหลอากาศเสีย (ลิตรต่อนาที)

$x_3$  = ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

โดยสรุปแล้วงานวิจัยนี้ยืนยันได้ว่าสามารถนำซีตะกรันซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานถลุงเหล็กมาเป็นสารตั้งต้นในการกำจัด CO<sub>2</sub> ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้จริงเพื่อลดการปล่อย CO<sub>2</sub> จากภาคอุตสาหกรรมสู่บรรยากาศได้

## ABSTRACT

The global warming associated with an increase of the greenhouse gas emissions particularly carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) represents a worldwide problem. The  $\text{CO}_2$  emissions reduction is necessary. Thus researches on  $\text{CO}_2$  capture technology which is effective and low cost are required. Interest in using industrial residue materials and by-products as sources of calcium for mineral carbonation has arisen because they are readily available and cheap. The slag from steelmaking process is known as a material has the ability to capture and convert  $\text{CO}_2$  to calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ). These researches focuses on method of  $\text{CO}_2$  fixation as environmentally benign carbonate minerals and determine the optimum condition for  $\text{Ca}^{2+}$  leaching process.

The  $\text{Ca}^{2+}$  leaching procedure with two solutions acetic acid and deionized water. The optimum solution to remove  $\text{CO}_2$  was calcium ion solution leachated with deionized water. The removal efficiency was up to 75.74 % where as the removal efficiency of 39.69% was obtained when acetic solution was applied. The lower efficiency was derived from acetic acid solution due to pH and alkalinity that do not suitable for capture  $\text{CO}_2$ . Therefore, this research selected calcium ion solution leachated with deionized water at liquid per solid ratio (L/S) 10:1 (g/g), room temperature. This optimum condition was further examined with  $\text{CO}_2$  absorption process.

The  $\text{CO}_2$  removal was investigated by synthesis gas of  $\text{CO}_2$  and studied the optimum condition for  $\text{CO}_2$  removal in packed column. The parameters studied including liquid flow rate (0.3 – 0.9 L/min), gas flow rate (0.25 – 0.85 L/min) and concentration of calcium ion (200 – 1000 mg/L). Design of experimental and mathematic model by response surface metrology (RSM) and central composite design (CCD) with Design Expert Software Program was used for evaluate and show relation between independent variables. The optimum condition for  $\text{CO}_2$  removal process derived from Equation at liquid flow rate 0.77 L/min, gas flow rate 0.25 L/min and concentration of calcium ion 725 mg/L. The predicted-efficiency in treatment  $\text{CO}_2$  was up to 100 % and the results of experiment that was 97.81 % with less than 5% errors.

$$y = 72.52 + 54.11x_1 - 164.79x_2 + 0.079x_3 + 0.13x_2x_3 - 8.28 \times 10^{-5}x_3^2$$

where  $y$  is removal efficiency of CO<sub>2</sub> (%)

$x_1$  is liquid flow rate (L/min)

$x_2$  is gas flow rate (L/min)

$x_3$  is concentration of calcium ion solution (mg/L)

In conclusion, this research has confirmed that the steel slag can effectively use to capture CO<sub>2</sub>. In addition, this approach can be applied as a guideline for CO<sub>2</sub> emission reduction in industrial sector.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้จัดสรรงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2555 สำหรับการดำเนินการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บริษัทสยามสติลซินดิเกต จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดตั้งกรังเหล็ก ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และสถานที่ และสาธารณูปโภคในการทำวิจัย

คณะผู้วิจัย

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	(2)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(6)
สารบัญ	(7)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	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 ในประเทศไทยตามที่กฎหมายกำหนด	6
2.2 ชีวะกรันจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้า	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

## 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 และวิธีการทดลองสำหรับการศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรันในถังปฏิกรณ์แบบกะ	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 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลวในการศึกษาการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายที่ได้จากการสกัดซีตะกรันของเหล็ก	44
3.2 สารเคมี อุปกรณ์ วิธีการทดลอง สำหรับการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตะกรันในหอดูดซึมชนิดคอลัมน์บรรจุในระดับห้องปฏิบัติการ	46
3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	46



## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารดูดซึม	46
3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง	47
3.2.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมด้วยเครื่องอะตอมมิก แอบซอร์พชันชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	47
3.2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพด่างด้วยวิธีการไทเทรต	47
3.2.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	47
3.2.7 วิธีการการทดลองและการออกแบบการทดลอง	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	60
4.1 กระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตริก	61
4.2 การกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายแคลเซียมไอออน ที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ	71
4.3 ผลการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายแคลเซียมไอออน ที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตริกในคอลัมน์บรรจุด้วยเทคนิค 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	100
ภาคผนวก ก ผลงานวิชาการที่เผยแพร่ในที่ประชุมวิชาการ	100
ภาคผนวก ข นิพนธ์ต้นฉบับเพื่อส่งตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ	112

## รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	องค์ประกอบทั่วไปของจีตะกรันเหล็ก	8
3-1	สภาวะการทดลองสำหรับศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากจีตะกรัน	41
3-2	รหัสตัวแปรและขอบเขตของตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยเทคนิค RSM ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร และตัวแปรตาม 1 ตัวแปร	53
3-3	แสดงสภาวะการทดลองสำหรับศึกษาการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายจีตะกรันในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ	54
4-1	ปริมาณองค์ประกอบทั่วไปของจีตะกรันเหล็กก่อนทำการชะละลายวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์	61
4-2	ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในจีตะกรันที่เหลือจากกระบวนการชะละลายด้วยสารละลายชนิดกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออน	68
4-3	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากกระบวนการชะละลายจีตะกรันในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการที่สภาวะการทดลองต่างๆ ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD	76
4-4	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองสำหรับกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	78
4-5	สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับผลการทดลอง	84
4-6	อัตราค่าไฟฟ้าประเภทกิจการขนาดเล็ก ซึ่งมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยในเวลา 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 แผนภาพแสดงสมมูลสารสำหรับหอดูดซึม	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 ชุดอุปกรณ์เก็บแก๊สด้วยวิธีการแทนที่น้ำเกลืออิมมิดด้วยแก๊ส	56

## รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า	
3-15	เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) สำหรับวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	57
3-16	กราฟมาตรฐานสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นแคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) โดยใช้เครื่อง AAS	59
3-17	สีของสารละลายก่อนและหลังการไทเทรต	59
4-1	ลักษณะทางกายภาพของชีตะกรันที่ผ่านการอบแห้งและคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 44 ไมครอน และค้ำตะแกรงขนาดรูเปิด 37 ไมครอน	60
4-2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายชีตะกรันกับอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง	62
4-3	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายชีตะกรันกับความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติก	63
4-4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายชีตะกรันกับอุณหภูมิในการชะละลาย	64
4-5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายกับเวลาที่ใช้ในการชะละลาย	65
4-6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายกับเวลาที่ใช้ในการชะละลาย	66
4-7	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบของค้ประกอบตะกอนของชีตะกรันก่อนและหลังการชะละลายวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรก โทมิเตอร์	69
4-8	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับสารดูดซึมต่างๆ โดยใช้อัตราการไหลของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร	70
4-9	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายชีตะกรัน	72
4-10	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราการไหลของของเหลว	73

## รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า	
4-11	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราการไหลของของแก๊ส	74
4-12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณและจากการทำนาย ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในสมการที่ (4-3)	79
4-13	กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการไหลของแก๊ส ( $x_2$ ) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตกรัน ( $x_3$ ) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	81
4-14	กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการไหลของของเหลว ( $x_1$ ) และอัตราการไหลของแก๊ส ( $x_2$ ) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ ที่ระดับความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร	82
4-15	กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊ส ( $x_2$ ) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตกรัน ( $x_3$ ) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์	83
4-16	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนต่อเวลา	85
4-17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายแคลเซียมไอออนต่อเวลา	86
4-18	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ ที่ช่วงเวลาต่างๆ	87

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

ปัจจุบันภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาที่ทั่วโลกให้ความตระหนักมาก ซึ่งภาวะโลกร้อน (Global Warming) หรือภาวะภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง (Climate Change) คือ การที่อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการที่มีก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศมากเกินไป โดยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นรังสีความร้อน หรือรังสีอินฟราเรดได้ดี ก๊าซเหล่านี้มีความจำเป็นต่อการรักษาอุณหภูมิในบรรยากาศของโลกให้คงที่ โดยก๊าซเหล่านี้จะดูดซับคลื่นรังสีความร้อนไว้ในเวลากลางวัน แล้วค่อยๆ แผ่รังสีความร้อนออกมาในเวลากลางคืน ทำให้อุณหภูมิในบรรยากาศโลกไม่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน มีก๊าซจำนวนมากที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นรังสีความร้อนและถูกจัดอยู่ในกลุ่มก๊าซเรือนกระจก แต่ในปัจจุบันชั้นบรรยากาศของโลกมีปริมาณก๊าซดังกล่าวมากเกินสมดุลของธรรมชาติอันเป็นผลมาจากฝีมือมนุษย์ ทั้งก๊าซที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ตัวอย่างก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ได้แก่ ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon, CFC<sub>s</sub>) และก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N<sub>2</sub>O) เป็นต้น แต่ก๊าซเรือนกระจกที่ถูกควบคุมโดยพิธีสารเกียวโตมีเพียง 6 ชนิด โดยจะต้องเป็นก๊าซที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic Greenhouse Gas Emission) เท่านั้น ได้แก่ ก๊าซ CO<sub>2</sub> ก๊าซมีเทน ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrofluorocarbon, HFCs) ก๊าซเปอร์ฟลูออโรคาร์บอน (Perfluorocarbon, PFCs) และก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulfurhexafluoride, SF<sub>6</sub>) (Prigione *et al.*, 2009) โดยจะเห็นว่าก๊าซ CO<sub>2</sub> เป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ เนื่องจากก๊าซดังกล่าวมีปริมาณและความเข้มข้นที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศสูงกว่าก๊าซเรือนกระจกชนิดอื่นๆ ซึ่งในปัจจุบันทั่วโลกได้มีการพัฒนาอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ ทำให้มีความต้องการใช้พลังงานมากขึ้น โดยพลังงานส่วนใหญ่ได้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนภายในอากาศเกิดเป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์แล้วจะเกิดเป็นก๊าซ CO<sub>2</sub> อีกทั้งโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ก็มีการปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> ออกมาในปริมาณมากยามมหาศาลซึ่งเร็วเกินกว่าที่กระบวนการตามธรรมชาติจะ

กำจัดออกไปได้โดยก๊าซ  $\text{CO}_2$  ที่เกิดขึ้นจะสะสมในชั้นบรรยากาศเกิดภาวะโลกร้อนขึ้นดังปัจจุบัน (เศรษฐศาสตร์กับสิ่งแวดล้อม, 2551) ดังนั้นจึงควรวางวิธีกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  ที่ออกจากปล่องควัน โรงงานอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพสูงและมีค่าใช้จ่ายต่ำ

การพิจารณาเลือกใช้กระบวนการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{CO}_2$  และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  เป็นต้น โดยกระบวนการพื้นฐานสำหรับการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  ที่นิยมใช้ ได้แก่ กระบวนการดูดซับก๊าซ (Gas Adsorption) ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดสารพิษโดยใช้สารดูดซับ (Adsorbent) ที่เป็นของแข็ง ประสิทธิภาพในการดูดซับของวิธีนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ ซึ่งจะดูดซับโดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและการทำให้สารดูดซับมีความพรุนมากก็จะเป็นการเพิ่มพื้นที่การดูดซับให้มากขึ้นด้วย สารดูดซับที่นิยมใช้ ได้แก่ โมเลกุลาร์ซีฟ ซีโอไลต์ (Molecular Sieve Zeolite) และถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นต้น (Lee *et al.*, 2002) กระบวนการดูดซับนี้เมื่อใช้ไประยะหนึ่งสารที่ทำการดูดซับจะอิ่มตัวจนไม่สามารถดูดซับได้อีกจึงต้องมีการฟื้นฟูสภาพ ส่วนวิธีที่สองคือ การใช้เมมเบรนแยกก๊าซ (Membrane) วิธีนี้มีข้อดีคือใช้พลังงานน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ (Ahmad *et al.*, 2010) แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการใช้เมมเบรนแยกก๊าซจัดเป็นวัสดุที่มีราคาแพงจึงไม่เป็นที่นิยมใช้ (Rubin and Rao, 2002) นอกจากนี้ ยังมีกระบวนการดูดซึมก๊าซซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการกำจัดก๊าซ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้ของเหลวในการดูดซึมสารพิษในอากาศ ทำให้ปริมาณสารพิษที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศภายนอกลดลง มักนิยมใช้ในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็ก หมอก ควัน และก๊าซที่ละลายได้ กระบวนการดูดซึมก๊าซจึงเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการดูดซึมก๊าซ เนื่องจากสามารถใช้สารดูดซึมร่วมทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดได้ ซึ่งชนิดของสารดูดซึมที่ใช้ในกระบวนการขึ้นอยู่กับราคาและชนิดของสารพิษที่ต้องการกำจัด สารดูดซึมทั่วไปที่นิยมใช้ ได้แก่ สารละลายจำพวก Sodium Hydroxide Selexol, Rectisol และ Monoethanolamine (MEA) เป็นต้น (Tinoco and Bouallou, 2010)

อุตสาหกรรมการถลุงเหล็กเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการปล่อยก๊าซ  $\text{CO}_2$  ซึ่งอุตสาหกรรมถลุงเหล็กกล้าจะมีชีตะกรันเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเกิดขึ้นถึงประมาณร้อยละ 10 ของเหล็กที่ผลิตได้ (Bonenfant *et al.*, 2008) แต่เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบที่มีอยู่ในชีตะกรันพบว่า มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซึ่งมีความสามารถในการดักจับก๊าซ  $\text{CO}_2$  แล้วกลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) โดยเมื่อชะละลายสารข้างต้นออกมาจากชีตะกรัน และนำไปใช้ในการดูดซึมก๊าซ  $\text{CO}_2$  พบว่าหลังทำปฏิกิริยาแล้วจะได้องค์ประกอบของก๊าซ  $\text{CO}_2$  อยู่ใน

รูปของของแข็ง จึงเป็นการกักเก็บก๊าซ CO<sub>2</sub> ได้อย่างถาวร (Bonenfant *et al.*, 2009) นอกจากนี้ ยังสามารถนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ สี และกระดาษได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้สนใจที่จะนำซีตะกรันจากกระบวนการถลุงเหล็กมาชะละลายแคลเซียมออกมา เพื่อใช้เป็นสารละลายดูดซับก๊าซ CO<sub>2</sub> จากอากาศเสียจำลองด้วยวิธี Packed Bed Gas Absorption และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> เช่น อัตราการไหลของก๊าซ CO<sub>2</sub> อัตราการไหลของสารดูดซับ ความเข้มข้นของสารดูดซับ โดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> สูงสุด ซึ่งจะเป็นแนวทางสำหรับการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้ซีตะกรันและลดการปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> ออกสู่บรรยากาศและเพื่อเพิ่มมูลค่าแก๊วสคูเหลือใช้จากกระบวนการผลิตเหล็กด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้ซีตะกรันเหล็ก

1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการและสภาวะที่เหมาะสมในการดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้ซีตะกรันเหล็ก

1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำซีตะกรันเหล็กมาใช้ในการดักจับ CO<sub>2</sub>

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้ซีตะกรันที่ได้จากกระบวนการผลิตเหล็ก ทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งมีขอบเขตงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 ศึกษาสภาวะที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการชะละลาย Ca<sup>2+</sup> ออกจากซีตะกรันและหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการ โดยใช้เทคนิค Response Surface Methodology (RSM) ในการออกแบบการทดลอง

1.3.2 ศึกษาสภาวะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ในก๊าซเสียจำลองในการดำเนินการทดลองและหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการ โดยใช้เทคนิค RSM ในการออกแบบการทดลอง



## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้ชีวะตะกอนหลัก

1.4.2 สามารถนำชีวะตะกอนซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการผลิตหลักมาใช้ในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub>

1.4.3 เป็นการเพิ่มมูลค่าแก่วัสดุเหลือใช้จากการอุตสาหกรรมการถลุงเหล็ก

1.4.4 เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาภาวะโลกร้อน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)

##### 2.1.1 คุณสมบัติ

ก๊าซ CO<sub>2</sub> เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ มวลโมเลกุลเท่ากับ 44.01 กรัมต่อโมล จุดเดือด -78.5 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นที่ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 1.799 กรัมต่อลิตร สามารถละลายน้ำได้ โดยปกติแล้วเป็นก๊าซที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่กัดกร่อน แต่สามารถที่จะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของโลหะและไฮดรอกไซด์ได้ผลผลิตเป็นคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต ก๊าซ CO<sub>2</sub> เป็นก๊าซที่มีอยู่ในธรรมชาติประมาณร้อยละ 0.03 โดยปริมาตร ในเขตเมืองมีปริมาณเพิ่มเป็นประมาณร้อยละ 0.06 และลมหายใจออกของมนุษย์มีก๊าซประมาณร้อยละ 5.6 (ไพศาล, 2551)

##### 2.1.2 สาเหตุที่ทำให้เกิดก๊าซ CO<sub>2</sub>

การศึกษาปริมาณก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยหน่วยงาน Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา รายงานว่าปริมาณก๊าซ CO<sub>2</sub> จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ และแหล่งอื่นที่เป็นผลมาจากฝีมือมนุษย์กำลังมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ผลการศึกษาของ IPCC ยังระบุว่าในบรรดาก๊าซเรือนกระจกต่างๆ ก๊าซ CO<sub>2</sub> เป็นก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดพลังงานความร้อนสะสมในบรรยากาศของโลกมากที่สุด ทั้งยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นกว่าก๊าซชนิดอื่นๆ ด้วย นั่นหมายถึงผลกระทบโดยตรงต่ออุณหภูมิของโลกและชั้นบรรยากาศจะยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นต่อไปอีก ล่าสุดนี้หน่วยงาน IPCC ได้รายงานปริมาณก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้นโดยฝีมือมนุษย์ ทำให้พลังงานรังสีความร้อนสะสมบนผิวโลกและชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นประมาณ 1.56 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยปริมาณนี้ยังไม่คิดรวมผลกระทบที่เกิดขึ้นทางอ้อม เช่น จากการเผาไหม้ เป็นต้น (ปานทิพย์, 2554)

### 2.1.3 ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซ CO<sub>2</sub>

การเพิ่มขึ้นของก๊าซ CO<sub>2</sub> ส่งผลทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ซึ่งทำให้ชีวิตมนุษย์สั้นลง โดยมีการทำนายไว้ว่าในอีก 20 ปีข้างหน้า อุณหภูมิของโลกจะเพิ่มสูงขึ้นทุกปี นอกจากนี้ ภาวะโลกร้อนยังส่งผลให้พืชและสัตว์ต้องมีการปรับตัวเปลี่ยนแปลง มิเช่นนั้นแล้วอาจจะต้องถึงขั้นสูญพันธุ์ได้ เมื่อโลกร้อนขึ้นจะก่อให้เกิดสภาพแวดล้อมแบบร้อนชื้นที่เหมาะสมแก่การฟักตัวของเชื้อโรคและศัตรูพืช ส่วนแบคทีเรียในอากาศจะเพิ่มมากขึ้นกว่าปกติและโอกาสในการแพร่ระบาดของสู่มนุษย์ก็จะมีสูงด้วย (เดวิท, 2551) หากทำการรักษาด้วยยาปฏิชีวนะความรุนแรงของโรคจะทุเลาลง แต่ถ้าปล่อยไว้เป็นเวลานานก็มีโอกาสทำให้เสียชีวิตสูงถึงร้อยละ 60 อีกทั้งภาวะโลกร้อนยังส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงภูมิประเทศและภูมิอากาศ โดยเฉพาะแถบขั้วโลกซึ่งมีภูเขาน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ รวมทั้งก้อนน้ำแข็งจะละลายอย่างรวดเร็ว ทำให้ระดับน้ำทะเลทางขั้วโลกเพิ่มขึ้นและไหลลงสู่มหาสมุทรทำให้เกิดน้ำท่วมได้ทุกทวีป และบริเวณที่มีภูมิประเทศอยู่ในระดับต่ำอาจจะถึงขั้นสูญหายไปจากแผนที่โลกก็เป็นได้ นอกจากนี้ ภาวะโลกร้อนยังทำให้สัตว์น้ำเสียชีวิตเพราะระบบนิเวศน์เปลี่ยนไป ในส่วนของทวีปยุโรปและยุโรปใต้ที่มีภูมิประเทศและพื้นที่แบบลาดเอียง จะเกิดความแห้งแล้งในหลายพื้นที่ ทำให้ปัญหาอุทกภัยเพิ่มขึ้นเนื่องจากธารน้ำแข็งบริเวณยอดเขาสูงที่ปกคลุมด้วยหิมะจะละลายจนหมด ส่วนในทวีปเอเชียนั้นอุณหภูมิจะสูงขึ้นในฤดูกาลแล้งอาจมีน้ำท่วม ผลผลิตทางการเกษตรจะลดลง ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น

### 2.1.4 มาตรฐานคุณภาพของอากาศเกี่ยวข้องกับก๊าซ CO<sub>2</sub> ในประเทศไทยตามที่กฎหมายกำหนด

พิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) ตั้งชื่อขึ้นตามสถานที่ในการเจรจาที่เมืองเกียวโต เมืองหลวงเก่าของประเทศญี่ปุ่น เมื่อวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2540 และมีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 พิธีสารดังกล่าวเป็นข้อตกลงฉบับแรกของโลก ว่าด้วยการต่อสู้เพื่อลดก๊าซเรือนกระจก ซึ่งก๊าซ CO<sub>2</sub> ก็หนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่ได้กำหนดไว้ในพิธีสารดังกล่าวด้วย หลังจากการให้สัตยาบันของประเทศรัสเซียซึ่งปล่อยก๊าซร้อยละ 17 ของการปล่อยก๊าซทั่วโลก ทำให้ครบเงื่อนไขที่ว่าพิธีสารมีผลบังคับใช้ต่อเมื่อมีประเทศร่วมให้สัตยาบันไม่น้อยกว่า 55 ประเทศ โดยจะต้องมีประเทศที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมารวมแล้วอย่างน้อยร้อยละ 55 ของปริมาณก๊าซที่มีอยู่ในปัจจุบัน

ปัจจุบันมีประเทศที่ให้สัตยาบันแล้ว 191 ประเทศ ประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งได้ชื่อว่าเป็นประเทศที่สร้างภาวะโลกร้อนเป็นอันดับที่ 1 คิดเป็นร้อยละ 28 อันดับที่ 2 เป็นสาธารณรัฐประชาชนจีน และอันดับที่ 3 ประเทศอินเดีย โดยวัดจากปริมาณก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่คืนกลับมาสู่บรรยากาศ ส่วนประเทศไทยนั้นจัดเป็นประเทศที่สร้างผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนคิดเป็นร้อยละ 0.64 จัดอยู่ในกลุ่มประเทศที่ไม่สร้างผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนแต่สามารถร่วมโครงการลดก๊าซเรือนกระจกได้ตามความสมัครใจ (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553) โดยมีสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สังกัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เป็นหน่วยงานหลักแห่งชาติ (National Focal Point) ของอนุสัญญาและพิธีสารเกียวโต นอกจากนี้ ประเทศไทยได้ออกพระราชกฤษฎีกาจัดตั้งองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) พ.ศ. 2550 มีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 20 มิถุนายน พ.ศ. 2551 ทำให้องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (Thailand Greenhouse Gas Management Organization, TGO) เป็นองค์การที่มีบทบาทสำคัญในเรื่องของการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศ ทั้งนี้ยังมีหลายองค์การที่กำหนดมาตรฐานปริมาณก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่สามารถปล่อยสู่บรรยากาศได้ เช่นมาตรฐาน ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers) ได้กำหนดปริมาณก๊าซ CO<sub>2</sub> จะมีได้ไม่เกิน 1,000 ppm เป็นต้น (ไพศาล, 2551)

## 2.2 ขี้ตะกรันจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้า (Steel Making Slag) (สิริภัทร, 2552)

ขี้ตะกรัน (Slag) เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้าชนิดเตาไฟฟ้า (Electrical Furnace Process) กระบวนการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านับเป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กชั้นกลาง กล่าวคือการนำเศษเหล็ก (Scrap) มาทำการหลอมปรับปรุงคุณสมบัติและส่วนผสมทางเคมีให้ได้เป็นเหล็กกล้า โดยใช้ร่วมกับเครื่องมือหล่อแบบต่อเนื่อง (Continues Casting Machine, CCM) จะได้ผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จได้แก่ เหล็กทรงยาว (Billet) เหล็กทรงแบน (Slab) และเหล็กทรงใหญ่ (Bloom) เหล็กทรงยาวที่ได้จะเป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กเส้นและเหล็กหลอด ซึ่งสำหรับประเทศไทยการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นการผลิตเพื่อให้ได้เหล็กเส้นและเหล็กหลอดเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป ในขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นจะมีการเติมโลหะหินปูน

(Limestone) เหล็กดิบหรือเศษเหล็ก หินปูน และ โดลิม (Dolime) ในกระบวนการหลอมเหล็กเพื่อรวมตัวกับสิ่งเจือปนต่างๆ โดยหินปูนจะหลอมปกคลุมน้ำเหล็กภายใต้การควบคุมและการกำจัดสารมลทินต่างๆ เช่น คาร์บอน ซิลิกอน และแมงกานีส สารดังกล่าวจะถูกกำจัดออกไปเกิดเป็นขี้ตะกรันเหล็กลอยอยู่ด้านบนน้ำเหล็ก จากนั้นจึงถูกคัดแยกออกจากเตาด้วยช่องระบายที่ถูกออกแบบไว้ เมื่ออุณหภูมิเย็นลงก็จะได้ขี้ตะกรันเหล็กที่เป็นก้อนแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเหล็กมีความตึงจำเพาะมากกว่าจะจมลงสู่ก้นเตา ในขณะที่ขี้ตะกรันเตาหลอมจะถูกดันให้ลอยสู่ด้านบน ขี้ตะกรันจะถูกแยกออกจากน้ำเหล็กโดยการเทออกอย่างช้าๆ ลงในถังเหล็ก (Slag Pot) โดยอาจมีน้ำเหล็กปนมากับขี้ตะกรันเตาหลอมอยู่บ้าง (ศิริพงษ์, 2552) ซึ่งองค์ประกอบทั่วไปของขี้ตะกรันเหล็กแสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทั่วไปของขี้ตะกรันเหล็ก

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	40 – 52
SiO <sub>2</sub>	10 – 19
FeO	10 – 40
MnO	5 – 8
MgO	5 – 10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 – 3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.5 – 1
S	< 0.1
Metallic Fe	0.5 – 10

ที่มา: (www.tffrc.gov, สืบค้นเมื่อ 23 พฤศจิกายน 2553)

### 2.3 กระบวนการชะละลาย (ศุภคັນต์, 2548)

กระบวนการชะละลาย (Leaching Process) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวทำละลายชนิดของเหลวซึ่งเรียกว่า ตัวชะ (Leachant) ไปละลายสารที่อยู่ในของแข็ง สารที่ละลายได้ในตัวทำ

ละลายนั้นๆ เรียกว่า ผลชะละลาย (Leachate) การชะละลายมีความแตกต่างกับการล้างของแข็งที่ตัวกรองตรงที่ว่า การล้างของแข็งที่ตัวกรองมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดตัวทำละลายออกจากของแข็งที่จับกัน โดยใช้น้ำหรือบางครั้งอาจใช้ตัวทำละลายในการล้างตัวทำละลายซึ่งเป็นสารเจือปน (Impurity) ที่ไม่ต้องการ ผลผลิตที่ต้องการคือของแข็งที่จับกัน ในขณะที่การชะละลายผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเป็นส่วนที่ถูกล้างออกจากของแข็ง ในการชะละลายปริมาณของสารที่ละลายออกมาส่วนมากมีปริมาณที่มากกว่าการล้างของแข็งที่ตัวกรอง และสมบัติของของแข็งอาจเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างปฏิบัติการชะละลาย โดยในที่นี้จะกล่าวถึงการชะละลายโลหะซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการทางชีวภาพ และกระบวนการทางเคมี

1. กระบวนการทางชีวภาพ เป็นกระบวนการชะละลายโลหะโดยอาศัยประโยชน์จากกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ของจุลินทรีย์ (Micro-organism) ซึ่งจะก่อให้เกิดกรดขึ้น แล้วนำกรดที่ได้ไปชะละลายโลหะอีกครั้งหนึ่ง

2. กระบวนการทางเคมี เป็นกระบวนการชะละลายโลหะด้วยสารเคมี ตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนการนี้คือ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดอะซิติก และสารละลายไฮดรอกไซด์ เช่น แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น การเลือกใช้ตัวทำละลายขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีของโลหะ สารละลายกรดเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้ และสามารถละลายโลหะได้เป็นจำนวนมาก

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการชะละลาย ได้แก่

1. ชนิดของกรด กรดที่ใช้ในการละลาย ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งกรดเหล่านี้เป็นกรดที่สามารถชะละลายโลหะได้ดีกว่ากรดอินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากกรดเหล่านี้เป็นกรดแก่ที่แตกตัวได้ร้อยละ 100

2. ค่าความเป็นกรด-เบส ความสามารถในการชะละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสลดลง ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมอยู่ในช่วง pH 1-2

3. ชนิดของโลหะ โลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการถูกละลายได้แตกต่างกัน ขึ้นกับว่าโลหะนั้นอยู่ในรูปของสารประกอบชนิดใด โดยโลหะส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบไอออนิก เมื่ออยู่ในน้ำแล้วสามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ง่าย

4. ปริมาณโลหะ ค่าการชะละลายของโลหะจะน้อยลงเมื่อปริมาณโลหะเพิ่มขึ้น

5. ปริมาณกรด ปริมาณกรดที่ต้องการขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ

6. ขนาดอนุภาคของตะกอนโลหะ โลหะจะอยู่ในรูปของตะกอน ถ้าตะกอนที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับกรดน้อยทำให้การละลายต่ำกว่าตะกอนที่มีขนาดเล็ก

7. อุณหภูมิการชะละลาย ความสามารถในการชะละลายขึ้นกับอุณหภูมิ หากอุณหภูมิสูงความสามารถในการถูกละลายในตัวทำละลายมีค่าสูง และที่อุณหภูมิสูงความหนืดของของเหลวต่ำทำให้เกิดสภาพแพร่ที่ดีขึ้น ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มอัตราการชะละลาย

## 2.4 กระบวนการดูดซึม (ชาคริต, 2544)

การดูดซึมหรือการดูดกลืนก๊าซ เป็นกระบวนการถ่ายเทมวลของก๊าซโดยให้สัมผัสกับของเหลว การที่โมเลกุลสามารถถ่ายเทจากสภาพก๊าซไปยังสภาพของเหลวได้นี้ เนื่องจากทั้ง 2 วัฏภาคนั้นมีความเข้มข้นต่างกัน (Concentration Difference) ที่บริเวณผิวของเหลวและก๊าซ (Driving Force) ทำให้เกิดการถ่ายเทมวล ประสิทธิภาพของการดูดซึมขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลว ระยะเวลาในการสัมผัส พื้นที่ผิวสัมผัส ความปั่นป่วนภายในหอสัมผัส และประสิทธิภาพการแพร่กระจาย การดูดซึมเป็นวิธีที่มีประโยชน์ในการลดปริมาณสารมลพิษก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ สารมลพิษที่เป็นก๊าซที่ถูกจำกัดโดยการดูดซึมได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ก๊าซคลอรีน ก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลต่ำ การดูดซึมเกิดขึ้นได้ทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งการดูดซึมทางกายภาพเกิดขึ้นเมื่อก๊าซที่ถูกดูดซึมละลายอยู่ในตัวทำละลายโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นและการดูดซึมทางเคมีเป็นการดูดซึมที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นระหว่างก๊าซที่ถูกดูดซึมกับตัวทำละลาย

วิธีการเลือกสารดูดซึม (Absorbent) สามารถแบ่งได้ ดังนี้

1. ก๊าซควรละลายได้ดีในตัวทำละลาย
2. ตัวทำละลายควรมีอัตราการระเหยต่ำ เพื่อลดการสูญเสียสารตัวทำละลาย
3. ตัวทำละลายควรเป็นสารที่ไม่กัดกร่อน เพื่อช่วยลดค่าก่อสร้างเครื่องมือ
4. ตัวทำละลายควรมีราคาไม่แพง และหาง่าย
5. ตัวทำละลายควรมีความหนืดต่ำ เพื่อช่วยเพิ่มการดูดกลืนและลดการท่วม

(Flooding)

6. ตัวทำละลายควรเป็นสารที่ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ ไม่ทำปฏิกิริยาเคมี และมีจุดเยือกแข็งต่ำ

### 2.4.1 การถ่ายเทมวลก๊าซของเหลว

การถ่ายเทมวลโดยการแพร่หรือการพาเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่าง (Gradient) ของความเข้มข้นเฉลี่ยในแต่ละภูมิภาค ซึ่งไม่ได้อยู่ในสภาวะสมดุลกัน ทำให้เกิดการปรับเข้าสู่สภาวะสมดุลของความเข้มข้น โดยจุดนี้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซและของเหลวอุดมคติได้จากกฎของราอูลต์ (Raoult's Law) ดังสมการที่ (2-1) และ (2-2) ตามลำดับ (Welty, 1984) สำหรับของเหลวอุดมคติ

$$P_A = x_A P'_A \quad (2-1)$$

เมื่อ  $P_A$  = ความดันย่อยขององค์ประกอบ A  
 $x_A$  = สัดส่วนโมล A ในภูมิภาคของเหลว  
 $P'_A$  = ความดันไอของ A

และสำหรับก๊าซอุดมคติ

$$P_A = y_A P'_A \quad (2-2)$$

เมื่อ  $P_A$  = ความดันย่อยขององค์ประกอบ A  
 $y_A$  = สัดส่วนโมล A ในภูมิภาคของก๊าซ  
 $P'_A$  = ความดันไอของ A

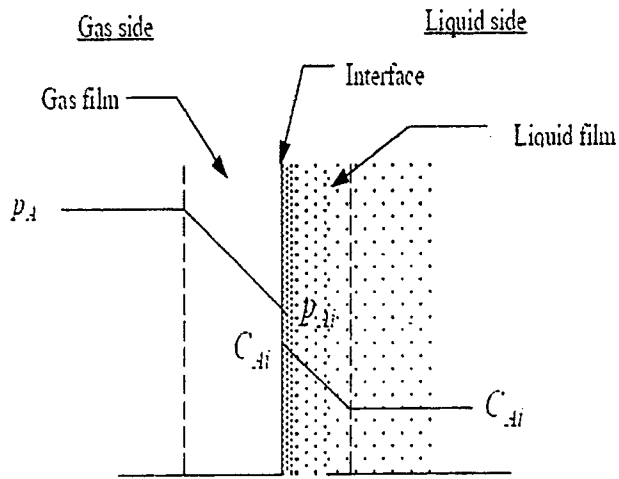
การถ่ายเทมวลของก๊าซไปยังของเหลวสามารถอธิบายโดยใช้ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two Resistance Theory) (Welty, 1984) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ

1. การถ่ายเทมวลจากภูมิภาคก๊าซไปยังผิวสัมผัสของก๊าซ
  2. การถ่ายเทข้ามผิวสัมผัสไปยังฟิล์มของเหลว
  3. การถ่ายเทจากฟิล์มของเหลวเข้าไปยังภูมิภาคของเหลว
- ทฤษฎีนี้ได้อย่างสมมติฐานดังนี้ คือ



1. มีฟิล์มสองชั้นอยู่ที่แต่ละข้างของผิวสัมผัส (ฟิล์มด้านก๊าซและฟิล์มของเหลว) และอัตราการถ่ายเทมวลถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ผ่านฟิล์มของก๊าซและของเหลว
2. ความต้านทานในการถ่ายเทมวลข้ามผิวสัมผัสมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความต้านทานของฟิล์มก๊าซและของเหลว

ขั้นตอนการถ่ายเทมวลจากก๊าซสู่ของเหลว แสดงดังภาพประกอบที่ 2.1



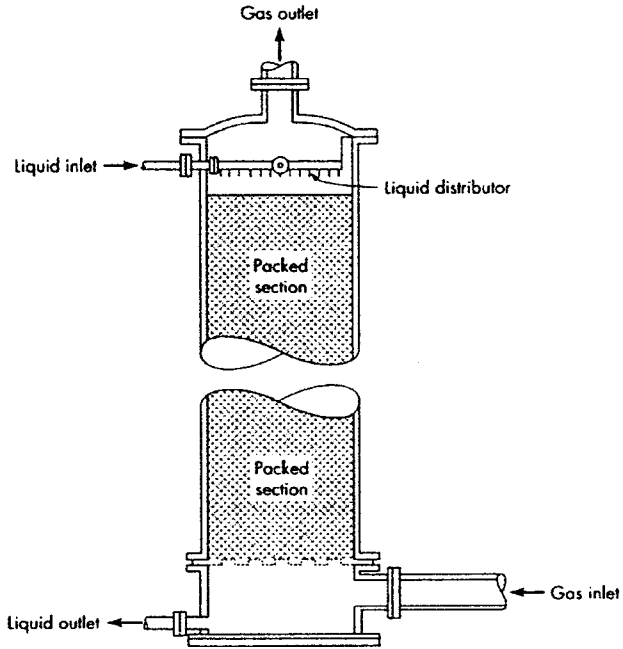
ภาพประกอบ 2-1 ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two Resistance Theory) สำหรับการถ่ายโอนมวลระหว่างก๊าซและของเหลว (Welty, 1984)

### อุปกรณ์การดูดซึม

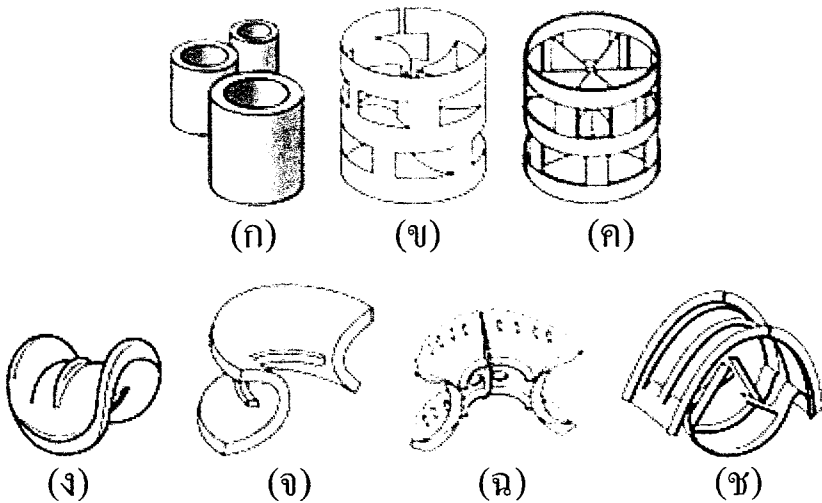
ในการดูดซึมต้องการให้ก๊าซและของเหลวมีการสัมผัสกันมาก และความดันลด (Pressure Drop) มีค่าน้อย โดยปกติจะมีวิธีการทำให้ของเหลวแตกย่อยเป็นหยดหรือฟิล์มบางๆ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวของเหลวมาก สำหรับการถ่ายเทมวลและเพิ่มแรงดัน (Driving Force) ให้ฟิล์มมักใช้เครื่องมือดูดซึมคือ คอลัมน์บรรจุ และคอลัมน์แบบสเปรย์ เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะคอลัมน์บรรจุ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ให้ก๊าซสัมผัสกับของเหลวและมีการถ่ายเทมวลอย่างมี

ประสิทธิภาพ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้คอลัมน์บรรจุ เนื่องจากการออกแบบคอลัมน์ทำได้ง่าย สามารถใช้ได้กับของเหลวที่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนสูง วัสดุหาง่าย และราคาไม่สูง

คอลัมน์แบบบรรจุที่นิยมใช้มี 2 แบบ คือ แบบไหลสวนทาง (Counter Current) และแบบไหลผ่าน (Cross-flow) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการดูดซึมก๊าซโดยใช้คอลัมน์แบบบรรจุชนิดไหลสวนทาง (Counter Current Packed Tower) โดยก๊าซเสียจะไหลเข้าสู่ระบบทางส่วนล่างของคอลัมน์บรรจุและก๊าซที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลออกทางด้านบน ส่วนของเหลวสะอาดจะไหลเข้ามาทางส่วนบนของคอลัมน์บรรจุในขณะที่ของเหลวสกปรกจะไหลออกทางด้านล่าง ลักษณะของคอลัมน์บรรจุแสดงดังภาพประกอบที่ 2.2 ภายในคอลัมน์จะบรรจุด้วยตัวกลาง (Packed Bed Absorber) ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับก๊าซเสียและของเหลวที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ โดยตัวกลางที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์นี้มีผลทำให้ของเหลวที่เป็นสารดูดซึมเกิดการกระจายตัวได้ดี ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวมากขึ้น ตัวกลางที่บรรจุในคอลัมน์มีรูปร่างต่างๆ เช่น Raschig Ring, Pall Ring, Berl Saddle, Intalox Saddle และ Tellerette เป็นต้น โดยทำจากวัสดุที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้งานเช่น เซรามิก พลาสติก (โพลีโพรพิลีน หรือโพลีเอทิลีน) เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นต้น จากภาพประกอบที่ 2.3 ซึ่งแสดงชนิดของตัวกลางที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ แบบ Raschig Ring เป็นชนิดที่พบมากที่สุด แบบ Saddles จะทำให้การสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวดีมาก รวมทั้งมีการสูญเสียความดันน้อยกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ข้อเสียของวัสดุชนิดนี้คือ มีราคาแพง แบบ Pall Ring จะทำให้มีการถ่ายโอนมวลสารดีกว่าแบบ Raschig Ring หรือ Lessing Ring แต่ต้องเคลือบด้วยโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อนทำให้มีราคาแพง วัสดุที่เป็นเซรามิกหรือถ่านจะทนการกัดกร่อนได้ดี วัสดุที่เป็นพลาสติก เช่น ชนิด Tellerette และ Paddles ทำให้การสัมผัสมีประสิทธิภาพและค่าความดันลดต่ำ แต่ราคาค่อนข้างแพงกว่าแบบ Raschig Ring ตัวกลางชนิดนี้ทำจาก Ceramic Pall Rings ให้อัตราการถ่ายเทมวลสูงกว่า Raschig Ring และ Lessing Ring แต่แพงกว่าและต้องทำด้วยโลหะที่ทนต่อการกัดกร่อน Tellerette Packing และ Pall Ring ที่ทำจากพลาสติกนั้นสามารถใช้ได้แต่อุณหภูมิต้องไม่เกิน 355 - 360 เคลวิน ตัวกลางเหล่านี้อาจบรรจุในคอลัมน์ดูดซึมโดยวิธีสุ่ม (Randomly) หรือเรียงเป็นแถว (Stacked Packing) ซึ่งการใส่ตัวกลางแบบ Randomly นี้จะให้พื้นที่ผิวการสัมผัสสูงกว่า และค่าความดันลดสูงกว่า ส่วนแบบเรียงแถวนั้นจะให้ความดันลดต่ำแต่ค่าติดตั้งสูง



ภาพประกอบที่ 2-2 การไหลแบบสวนทางกันภายในคอลัมน์บรรจุ (McCabe *et al.*, 1993)



ภาพประกอบที่ 2-3 ชนิดของตัวกลางที่ใช้ในคอลัมน์บรรจุ Raschig Ring (ก), Metal Pall Ring (ข), Plastic Pall Ring (ค), Berl Saddle (ง), Ceramic Intalox Saddle (จ), Plastic Supper Intalox Saddle (ฉ) และ Metal Intalox Saddle (ช) (ชาคริต, 2544)

นอกจากชนิดของคอลัมน์และตัวกลางบรรจุในคอลัมน์ที่เลือกใช้แล้ว ยังมีพารามิเตอร์ดำเนินการพื้นฐานสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโดยกระบวนการดูดซึม ดังนี้

1. ความเร็วก๊าซ (Gas Velocity) ความเร็วก๊าซทำให้เกิดการผสมและปั่นป่วนระหว่างวัฏภาคได้ดี อย่างไรก็ตาม อัตราการไหลของก๊าซต้องไม่เร็วเกินไปจนเกิดภาวะท่วม (Flooding)

2. อัตราการไหลของของเหลว (Liquid Flow Rate) โดยปกติแล้วการเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีขึ้น แต่เมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นก็จะทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงขึ้นด้วย ดังนั้นในการดำเนินการต้องพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสม

3. ขนาดวัสดุบรรจุ (Packing Size) วัสดุบรรจุขนาดเล็กให้พื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีขึ้น แต่เมื่อช่องว่างระหว่างวัสดุบรรจุลดลงทำให้ความดันลดภายในคอลัมน์บรรจุเพิ่มขึ้น

4. ความสูงของคอลัมน์บรรจุ (Packing Height) คอลัมน์บรรจุที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมด และระยะเวลาในการสัมผัสมากขึ้นเป็นผลทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงแต่ความดันลดและค่าใช้จ่ายสูงขึ้นด้วย ดังนั้นหากต้องการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและระยะเวลาในการสัมผัสส่วนใหญ่พิจารณาจากชนิดและขนาดของวัสดุบรรจุมากกว่า

## 2.4.2 ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบหอดูดซึม

### 2.4.2.1 อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ (L/G Ratio)

สิ่งที่ควรพิจารณาเป็นลำดับแรกในการออกแบบ คือ อัตราการไหลและองค์ประกอบของกระแสก๊าซที่จะไหลเข้าสู่ระบบ คุณสมบัติที่ถูกลำเอียงมาใช้เพื่อพิจารณาอัตราการไหลและองค์ประกอบในแต่ละกระแสน้ำของของไหลที่เข้าและออกจากระบบ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-4 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากปลายด้านหนึ่งของหอไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง การทำสมดุลสารในหอดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

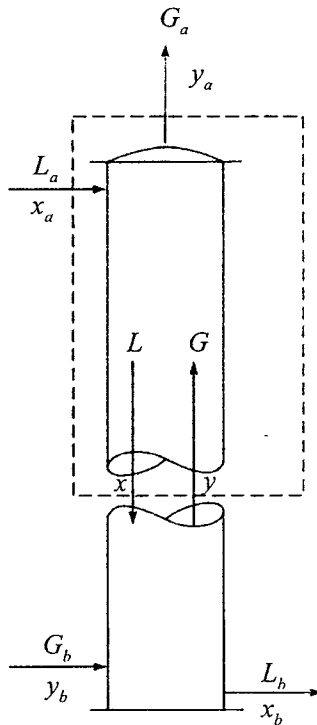
$$\text{ปริมาณสารรวม} \quad L_a + G = L + G_a \quad (2-3)$$

$$\text{สาร A :} \quad L_a x_a + G y = L x + G_a y_a \quad (2-4)$$

โดย  $G$  เป็นอัตราการไหลเชิงมวลของเฟสก๊าซ และ  $L$  เป็นอัตราการไหลเชิงมวลของเฟสของเหลวที่จุดเดียวกันในหอ ซึ่งจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเฟสก๊าซ ( $y$ ) และเฟสของเหลว ( $x$ ) ที่จุดเดียวกัน

สมการสมดุลมวลรวมที่คิดจากจุดปลายของแต่ละสายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{ปริมาณสารรวม} \quad L_a + G_b = L_b + G_a \quad (2-5)$$



ภาพประกอบที่ 2-4 แผนภาพแสดงสมดุลสารสำหรับหอดูดซึม (McCabe *et al.*, 1993)

สาร A :  $L_a x_a + G_b y_b = L_b x_b + G_a y_a \quad (2-6)$

จาก สมการ (2.3)  $L_a x_a + G_y = L x + G_y y_a$

จัดสมการใหม่ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $x$  และ  $y$  ที่จุดใดๆ ในหอ ได้สมการ เส้นปฏิบัติการดังนี้

$$y = \frac{L}{G}x + \frac{G_a y_a - L_a x_a}{G} \quad (2-7)$$

จากสมการ (2-7) จะเห็นว่า ยิ่ง  $L/G$  เพิ่มขึ้น แรงขับจะเพิ่มขึ้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้หอสูงก็สามารถที่จะแยกสารได้ดี อย่างไรก็ตาม ถ้า  $L/G$  มากเกินไป นั่นคือ  $L$  มาก เมื่อทำการดูดซึม ของเหลวที่ได้จะมีความเจือจางมากทำให้สิ้นเปลืองในขั้นตอนสตรipping (Stripping) หรือการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ ดังนั้น มักใช้อัตราการไหลของของเหลวในช่วง 1.1 – 1.5 เท่าของอัตราการไหลของของเหลวต่ำสุด

#### 2.4.2.2 การหาปริมาณของเหลวที่ต้องการ (Liquid Requirement)

ในการออกแบบหอดูดซึมจะต้องทราบอัตราการไหลของก๊าซเสียที่ต้องการบำบัด ( $G_m$ ) ความเข้มข้นก๊าซเสียที่เข้า ( $Y_1$ ) และความเข้มข้นของสารดูดซึมก่อนเข้าระบบ ( $X_2$ ) หรือสามารถประมาณค่าให้เท่ากับศูนย์ถ้าไม่มีการนำของเหลวที่กลับมาใช้ใหม่ และต้องระบุค่าความเข้มข้นของก๊าซเสียหลังการบำบัด ( $Y_2$ ) จากหลักการสมดุลของมวลทำให้สามารถประมาณอัตราการไหลของของเหลวที่ต้องการใช้น้อยที่สุดในการดูดซึมก๊าซเสียได้โดยให้ความเข้มข้นอยู่ในมาตรฐาน ( $Y_2$ ) สำหรับการใช้งานจริงนั้นจะไม่ใช้สัดส่วนอัตราการไหลของสารดูดซึมต่อก๊าซที่ต่ำที่สุด  $(L_m/G_m)_{min}$  แต่จะเพิ่มเผื่ออัตราการไหลของสารดูดซึมให้มากกว่าค่าต่ำสุดดังกล่าวโดยทั่วไปนั้นอัตราการไหลของสารดูดซึมจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 ถึงร้อยละ 100 จากค่าความต้องการต่ำสุด เช่น 1.5 เท่าของอัตราส่วนของอัตราการไหลของเหลวต่อก๊าซต่ำสุด (Joseph and Beachler, 1981)

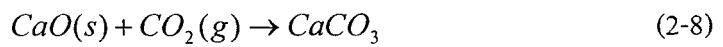
#### 2.4.2.3 เส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึม (Pack tower Diameter)

หลังจากคำนวณหาอัตราการไหลของสารดูดซึมแล้วจะต้องประมาณขนาดของหอดูดซึมที่เหมาะสมกับสภาวะการไหลของของเหลวและก๊าซ โดยปกติจะออกแบบให้มีขนาดเล็กที่สุดแต่ยังสามารถทำงานได้เพื่อลดค่าใช้จ่ายให้ต่ำที่สุด แต่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลงจะมีผลทำให้ความเร็วของก๊าซมีทิศทางจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของหอจะสูงขึ้นและเมื่อถึงความเร็วระดับหนึ่งจะสูงจนกระทั่งสารละลายดูดซึมถูกระแสก๊าซดันไหลย้อนขึ้นทางด้านบนของหอดูดซึม ความเร็วนี้เรียกว่า Flooding Velocity ซึ่งจะไม่สามารถใช้งานหอดูดซึม โดยใช้ความเร็วเท่ากับหรือ

เกินกว่า Flooding Velocity ได้ ดังนั้นโดยหลักการแล้วเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะถูกเลือกเพื่อให้ได้ความเร็วของอากาศในท่อมามีค่าต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการไหลย้อนของของเหลวในหอคูดซิม โดยทั่วไปจะใช้ค่าความเร็วที่ร้อยละ 50-75 ของ Flooding Velocity เป็นเกณฑ์ในการออกแบบและค่า Flooding Velocity ขึ้นกับอัตราส่วนของอัตราการไหลของของเหลวต่อก๊าซ ความหนืดของของเหลว คุณสมบัติของตัวกลาง (Richard, 1981)

## 2.5 ปฏิริยาเคมีที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการดูดซิมก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยสารที่ได้จากการชะละลายของเหลือทิ้งหรือ By-product ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก เป็นปฏิริยาการเกิดคาร์บอเนต ซึ่งในสารชะละลายจะมีสารประกอบออกไซด์ของโลหะ ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) และอะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นต้น ที่รวมกันอยู่ในรูปของสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกต ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่ปฏิริยาระหว่างสารชะละลายจากชีตะกรันและก๊าซ CO<sub>2</sub> สามารถเกิดขึ้นได้ โดยปฏิริยาพื้นฐานที่สามารถเกิดขึ้นได้แสดงได้ดังสมการที่ (2-8) (Hisyamudin *et al.*, 2009)



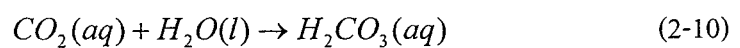
โดยปฏิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิริยาหลายขั้นตอน สามารถเกิดปฏิริยาในแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

การชะละลายชีตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วทำปฏิริยากับก๊าซ CO<sub>2</sub>

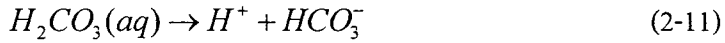
ก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่อยู่ในรูปของโมเลกุลที่ไม่มีการแตกตัวเมื่อละลายน้ำเกิดเป็น CO<sub>2</sub> อิสระอยู่ในรูปสารละลาย



ก๊าซ CO<sub>2</sub> ละลายในน้ำปราศจากไอออนเกิดผลิตภัณฑ์เป็นกรดคาร์บอนิก



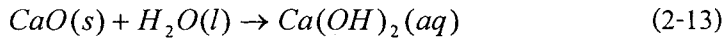
จากสารละลายกรดคาร์บอนิกเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนและไบคาร์บอเนต



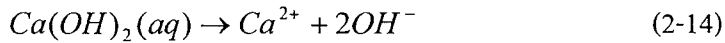
ไบคาร์บอเนตเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนและคาร์บอเนต



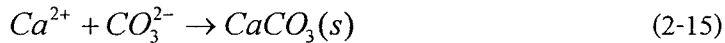
การชะละลายจีตะกรัน (CaO) ด้วยน้ำปราศจากไอออนเกิดผลิตภัณฑ์เป็น Ca(OH)<sub>2</sub>



Ca(OH)<sub>2</sub> แตกตัวเป็นไอออนในสารละลายจีตะกรัน



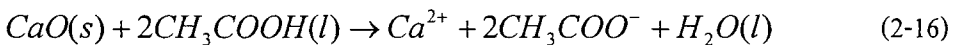
Ca<sup>2+</sup> ผลิตภัณฑ์จากสมการที่ (2-14) ทำปฏิกิริยากับ CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> ผลิตภัณฑ์จากสมการที่ (2-12) เกิดเป็นตะกอนของหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนต CaCO<sub>3</sub>



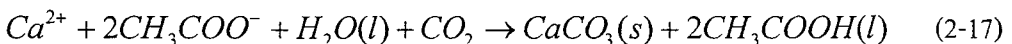
การชะละลายจีตะกรันด้วยกรดอะซิติกแล้วทำปฏิกิริยากับก๊าซ CO<sub>2</sub>

จากงานวิจัยของ Kakizawa และคณะ (2001) ได้ศึกษาการชะละลายแคลเซียมไอออนจากจีตะกรันเหล็กที่มีสารประกอบของแคลเซียมซิติลเกิดด้วยกรดอะซิติก (CH<sub>3</sub>COOH) สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

การชะละลายจีตะกรัน (CaO) ด้วยกรดอะซิติก (CH<sub>3</sub>COOH)



ผลิตภัณฑ์จากสมการที่ (2-16) ทำปฏิกิริยากับก๊าซ CO<sub>2</sub> ดังสมการที่ (2-17) แต่ในกรณีนี้ ปริมาณของ CaCO<sub>3</sub> ที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าที่สภาวะการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน เนื่องจากพีเอชของสารละลายเป็นกรด





## 2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

การออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของ Input (Factor) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ Output (Response) ที่เกิดขึ้นในการออกแบบการทดลองเราต้องทำการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของ Y และ X ต่างๆ โดยที่พยายามใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งกระบวนการต้องมีปัจจัยหรือ Input ( $X_1, X_2, X_3, X_4$ ) ต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่า Y ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพ (Quality Characteristic) ของกระบวนการ โดยความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ได้จะทำให้เกิดพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิค RSM มาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อการศึกษาตัวแปรดำเนินการต่างๆ ตามหลักสถิติ โดยรายละเอียดและประโยชน์ของเทคนิค RSM ดังนี้

### 2.6.1 พื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design RSM) (อิศรพงษ์, 2544)

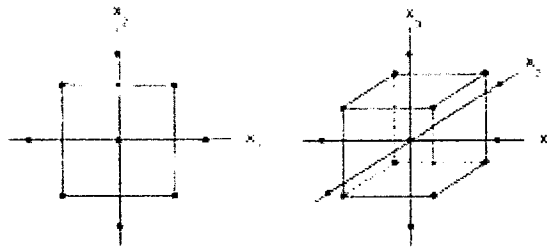
วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง RSM เป็นการรวบรวมข้อมูลทางสถิติและเทคนิคทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหา เพื่อพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพและการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการ RSM ประกอบด้วย กลุ่มของตัวแปรตาม หลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติ โดยจะใช้หลักการเหล่านี้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดย RSM ประกอบขึ้นมาจากผลของตัวแปรอิสระซึ่งอาจมีเพียงตัวเดียวหรือหลายตัว สำหรับการวิเคราะห์ของตัวแปรอิสระที่ได้จากผลการทดลองนั้นจะถูกนำมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของผลตอบสนองในรูปแบบของพื้นผิวผลตอบสนอง โดยความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองที่ได้กับข้อมูลดิบแสดงดังสมการที่ (2-18)

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (2-18)$$

เมื่อ	$y$	คือ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้น
	$f$	คือ ฟังก์ชันการทำงานที่ตัวแปรที่ยังไม่ทราบต่อผลตอบสนอง
	$x_1, x_2, \dots, x_n$	คือ ตัวแปรอิสระ ซึ่งจะถูกรเรียกว่า ตัวแปรธรรมชาติด้วย
	$n$	คือ จำนวนของตัวแปรอิสระ
	$\mathcal{E}$	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

$\mathcal{E}$  เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดมาจากแหล่งต่างๆ ซึ่งไม่สามารถถูกรวบรวมเอาไว้ใน  $f$  ได้ ซึ่งแหล่งที่ว่่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบ เช่น ค่าการวัดผิดพลาด โดยที่จะถูกคาดคะเนด้วยค่า  $\mathcal{E}$  มีการกระจายตัวด้วยค่าเฉลี่ยศูนย์และค่าความแปรปรวน

การออกแบบสำหรับพิดแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และการออกแบบสำหรับพิดแบบจำลองอันดับที่สอง ซึ่งการออกแบบสำหรับพิดแบบจำลองอันดับที่สองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองควอดราติกของผลตอบสนอง วิธีการที่สนใจคือ การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวผลตอบสนอง ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย  $2^k$  แฟกทอเรียลที่มี  $nc$  รัน ซึ่ง  $2^k$  รันในแนวแกนหรือแนวรูปดาว และ  $nc$  รันที่จุดศูนย์กลาง ภาพประกอบที่ 2.5 แสดง CCD สำหรับ  $k = 2$  และ  $k = 3$  บ้าง



ภาพประกอบที่ 2.5 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ  $k = 2$  และ  $k = 3$

(อิศรพงษ์, 2544)

ข้อดีของแผนการทดลอง CCD คือ เหมาะสมที่สุดในการศึกษาสมการโพลิโนเมียลดีกรี 2 (Second-order Model) กรณีการศึกษาเชิงปริมาณ (Quantitative Factors) และมีความยืดหยุ่นในการใช้สูง เนื่องจากมีค่า Resolution ให้เลือกได้ครอบคลุมทุกค่า เนื่องจากสามารถ

เลือกใช้ได้ทั้งส่วนที่เป็นการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ ( $2^k$  Full Factorial) และการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน นอกจากนี้ การออกแบบแบบ CCD สามารถแยกทดลองได้เป็นส่วนๆ ตามลำดับ คือ ทำการทดลองส่วนของ Factorial (Factorial Portion) และจุดศูนย์กลาง (Center Point) ก่อน จากนั้นทำการสร้างสมการแบบเชิงเส้นตรง สำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ และพยากรณ์ส่วนของจุดศูนย์กลาง ถ้าสมการในรูปแบบเส้นตรงไม่เหมาะสมจึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนของจุดแกน (Axial Portion) จะได้สมการโพลีโนเมียลดีกรี 2 หรือ Quadratic Model

ข้อเสียของแผนการทดลอง CCD คือ ไม่เหมาะสำหรับการศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Factors)

### 2.6.1.1 การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM

1. กำหนดตัวแปรที่จะศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม กระบวนการทางเคมีและชีวเคมีสามารถรับผลกระทบจากกระบวนการต่างๆ มากมาย เพราะเป็นไปได้ที่จะระบุผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้จากทุกตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นในการเลือกตัวแปรบางตัวที่สร้างผลกระทบได้โดยตรงออกมา การคัดเลือกโดยการทดลองนั้นมีความสำคัญในการระบุตัวแปรอิสระ โดยหลังจากทำการระบุตัวแปรสำคัญต่างๆ แล้วจะสามารถกำหนดทิศทางในการพัฒนารูปแบบขึ้นซึ่งจะสามารถระบุระดับความสำคัญของตัวแปรต่างๆ ขึ้นมาได้ การระบุความสำคัญของตัวแปรต่างๆ นั้นมีความสำคัญเพราะความสำเร็จของการหาจุดที่เหมาะสมนั้นเกี่ยวข้องกับสิ่งนี้โดยตรง ความผิดพลาดในการระบุระดับความสำคัญอาจส่งผลถึงความผิดพลาดในการระบุจุดที่เหมาะสมได้

2. กำหนดรหัส (Code) ของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการออกแบบสถานะที่ใช้ในการทดลองโดยวิธีการ CCD และทำการแปลงค่ารหัสตัวแปรอิสระ (Coded Variables) ที่ได้ออกแบบไว้เป็นตัวแปรเดิมทำได้โดยใช้สมการที่ (2-19)

$$X = \left[ \frac{x - \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}}{\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}} \right] \quad (2-19)$$

โดยที่  $X$  = Coded Variables

$x$  = ตัวแปรอิสระ

$x_{\max}$  = ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระ

$x_{\min}$  = ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระ

3. ทำการทดลองตามสภาวะการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

4. แสดงผลของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่ได้จากการทดลองในรูปแบบของ Surface

Plot โดยใช้โปรแกรม Regression Analysis แบบจำลองที่ได้จะอยู่ในรูปสมการกำลังสอง (Quadratic Equation) ดังแสดงในสมการที่ (2-20)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \left[ \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \right]_{i(j)} \quad (2-20)$$

โดยที่  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  และ  $\beta_{ij}$  คือ สัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้นและแบบกำลังสอง และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน ตามลำดับ

### 2.6.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

วิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-group Variance) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-group Variance) ความแปรปรวนระหว่างกลุ่มเป็นค่าที่เกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่างๆ ถ้าค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มแตกต่างกันมาก ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มก็จะมากตามไปด้วย สำหรับความแปรปรวนภายในกลุ่มเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่า คะแนนแต่ละตัวที่รวบรวมมาภายในแต่ละกลุ่มนั้นมีการกระจายมากหรือน้อย ค่าที่คำนวณได้เรียกว่าความคลาดเคลื่อน

### 2.6.1.3 แบบจำลองการถดถอย (Regression Model)

แบบจำลองการถดถอย (Regression Model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย เพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง ซึ่งจะทำได้หาผลตอบสนองที่จุดใดๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัยได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการ

ประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองนี้ส่วนใหญ่คือ วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) ซึ่งเป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่มีทราบค่า ( $\beta$ ) เพื่อให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด ( $2E$ ) มีค่าน้อยที่สุด บางครั้งเราเรียก  $\beta$  เหล่านี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย โดยมีขั้นตอนในการประมาณค่าดังนี้

1. สร้างผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด โดยการพิชผลตอบสนอง
2. ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยในเทอมต่างๆ ที่ทำให้ผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด
3. นำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้ไปเขียนสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง

เนื่องจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี CCD มีการทดลองไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิด Cubic Model ได้ ดังนั้น แบบจำลองการถดถอยจึงมีลักษณะทั้งหมด 3 แบบ ดังนี้ (ปารเมศ, 2545)

1) Linear Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^P \beta_i X_i$$

2) 2FI (Two-factor Interaction) Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^P \beta_i X_i + \sum_{i < j}^P \sum \beta_{ij} X_i X_j$$

3) Quadratic Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^P \beta_i X_i + \sum_{i < j}^P \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^P \beta_{ij} X_i^2$$

## วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบแทน

1) ทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบแทนและเซตของตัวแปรถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพิจารณาสมมติฐานที่เหมาะสมของแต่ละแบบ โดยพิจารณาจากค่า P-value

2) การทดสอบ Lack of Fit เป็นการทดสอบว่าฟังก์ชันถดถอยหรือ แบบจำลองการถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพิจารณาจากค่า P-value

3) วิเคราะห์ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง ซึ่งพิจารณาจากค่าดังต่อไปนี้

3.1) Standard Deviation (Std. Dev.) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Y รอบเส้นถดถอย คำนวณได้จากสมการที่ (2-21)

$$\text{Std. Dev.} = \sqrt{\text{MSE}} ; (\text{Mean Squared Error, MSE}) \quad (2.21)$$

3.2) R-squared ( $R^2$ ) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือร้อยละของความแปรผันทั้งหมดใน Y อธิบายโดยความแปรผันใน X หรืออธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่าง X กับ Y ดังนั้นจึงเป็นค่าที่ใช้วัดว่าสมการที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลเพียงไร ถ้า  $R^2$  มีค่ามากขึ้น แสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลมากขึ้น คำนวณได้จากสมการที่ (2-22)

$$R^2 = 1 - \frac{\text{SSE}}{\text{SST}}, 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (2.22)$$

SSE คือ ค่าผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Sum of Square for Error, SSE) ( $\text{SSE} = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$ )

SST คือ ค่าความแปรปรวนทั้งหมด (Sum of Square Total, SST) ( $\text{SST} = \sum (y_i - \bar{y})^2$ )

3.3) Adjusted R-squared ( $\text{Adj-}R^2$ ) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือร้อยละที่ตัวแปรอิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ซึ่งเป็นค่าที่วัดว่ารูปแบบเหมาะสมกับข้อมูลอย่างไร โดยการนำ Degree of Freedom มาพิจารณาด้วย คำนวณได้จากสมการที่ (2-23)

$$Adj - R^2 = 1 - \frac{SSE/(n - k - 1)}{SST/(n - 1)}, 0 \leq Adj - R^2 \leq 1 \quad (2.23)$$

3.4) Predicted R-squared (Pred-R<sup>2</sup>) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือร้อยละที่ตัวแปรอิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ที่ได้จากการทำนาย จำนวนได้จากสมการที่ (2-24)

$$Pred - R^2 = 1 - \frac{PRESS}{SS_{total}} \quad (2.24)$$

3.5) Predicted Residual Error Sum of Square (PRESS) คือ ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนตัดออก เป็นการวัดว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมกับจุดที่ทำการออกแบบไว้หรือไม่ แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมจะเป็นแบบจำลองที่มีค่า PRESS ต่ำ จำนวนได้จากสมการที่ (2.25)

$$PRESS = \sum \left( \frac{e_i}{1 - h_{ii}} \right)^2 \quad (2.25)$$

## 2.6.2 ประโยชน์ของเทคนิค RSM

เทคนิค RSM มีประโยชน์มากกว่าหากเปรียบเทียบกันระหว่างการทำค่าที่เหมาะสมในการทดลองด้วยวิธีดั้งเดิม โดยข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบโดยใช้ RSM นั้นมีจำนวนที่น้อยกว่า เพราะ RSM จะนำเสนอข้อมูลจำนวนมากจากการทดลองเพียงไม่กี่ครั้ง ซึ่งต่างจากการทดลองในแบบดั้งเดิมที่จะใช้จำนวนการทดลองที่มากกว่าเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของระบบ และ RSM มีความเป็นไปได้ที่จะเจอผลกระทบที่มีลักษณะเป็นผลกระทบภายใน (Interactive Effect) จากตัวแปรอิสระ โดยเฉพาะกระบวนการทางชีวเคมี นอกจากนี้ โมเดลสมการอย่างง่ายของ RSM จะเพิ่มความเข้าใจต่อผลที่เกิดจากการผสมกันของตัวแปรอิสระต่างๆ เมื่อสังเกตสมการนั้นผ่านการทดลองต่างๆ จะพบว่า ข้อมูลของตัวแปรอิสระที่ได้กับผลตอบสนองมีความสอดคล้องกัน จึงกล่าวได้ว่า RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวเคมี

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการกำจัด CO<sub>2</sub> โดยการดูดซับด้วยสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันในคอลัมน์บรรจุ (Packed Column) ได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางในการทดลอง การเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

### 2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดก๊าซ CO<sub>2</sub>

Aroonwilas *et al.* (1999) ศึกษาการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยการดูดซับในหอดูดซับ 3 ขนาด ได้แก่ ระดับห้องทดลอง ระดับ Pilot และระดับอุตสาหกรรม ซึ่งใช้ตัวกลางในการดูดซับประเภท Sulzer EX, Gempak 4A และ Sulzer BX โดยใช้สารดูดซับคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ โมโนเอทานอลเอมีน และทออะมิโนทูเมทิลโพรพานอล (2-amino-2-methylpropanol, AMP) ประสิทธิภาพในการกำจัดถูกอธิบายในเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลของก๊าซ ความดันส่วนของก๊าซ CO<sub>2</sub> อัตราการไหลของของเหลว อุณหภูมิของของเหลว ความเข้มข้นของสารดูดซับ ชนิดของสารดูดซับ และชนิดของตัวกลาง ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า อัตราการไหลของก๊าซไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด คือ ความดันส่วนของก๊าซ CO<sub>2</sub> อัตราการไหลของของเหลว อุณหภูมิของของเหลว ความเข้มข้นของสารดูดซับ ชนิดของสารดูดซับ และชนิดของตัวกลาง จากการทดลองพบว่า ระบบ CO<sub>2</sub>-NaOH จะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรสูงกว่าระบบ CO<sub>2</sub>-AMP แต่ระบบ CO<sub>2</sub>-NaOH จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรต่ำกว่าระบบ CO<sub>2</sub>-MEA เนื่องจาก NaOH มีค่าแรงดึงผิวที่ต่ำกว่า MEA ทำให้ในระบบ CO<sub>2</sub>-NaOH จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรสูง

Bonenfant *et al.* (2008) ศึกษาประสิทธิภาพในการแยกก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้ซีตะกรันที่ได้จากโรงถลุงเหล็กเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF) และจากเตาปรุบน้ำเหล็ก (LF) ทำการทดลองในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และใช้เครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ โดยนำซีตะกรันผสมกับน้ำในอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม ซีตะกรันขนาดประมาณ 38-106 ไมโครเมตร ปริมาณซีตะกรัน 20 ± 1 กรัมกับน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> ร้อยละ 15 โดยปริมาตร และ N<sub>2</sub> ร้อยละ 85 โดย



ปริมาตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที จากการทดลองพบว่า การแยก CO<sub>2</sub> โดยใช้สารละลาย LF มีค่า 24.7 กรัม<sub>CO<sub>2</sub></sub> /100 กรัม<sub>slag</sub> และสามารถทำซ้ำได้ถึง 14 ครั้ง มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้สารละลาย EAF ยิ่งไปกว่านั้น ประสิทธิภาพในการแยกก๊าซ CO<sub>2</sub> จากสารประกอบของ CaO และ MgO ที่อยู่ในขี้ตะกรันแบบ LF มีสูงกว่าขี้ตะกรันแบบ EAF แต่สามารถสรุปได้ว่าทั้งขี้ตะกรันแบบ LF และ EAF สามารถใช้แยก CO<sub>2</sub> ได้และจะได้ผลิตภัณฑ์ที่สูงเมื่ออยู่ในรูปสารละลาย

Chen *et al.* (2003) ศึกษาการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้เครื่อง Spay Dryer ในระดับห้องปฏิบัติการ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร สูง 70 เซนติเมตร โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดของสารดูดซึ่มที่ผสมกับ Ca(OH)<sub>2</sub> อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ความเข้มข้นของสารดูดซึ่ม ความเข้มข้นของก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ทางเข้า และอัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซึ่มต่ออัตราการไหลของก๊าซ จากการทดลองที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสพบว่า ความเข้มข้นของก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ทางเข้าเท่ากับร้อยละ 10 โดยปริมาตร สารดูดซึ่มที่ผสมระหว่างร้อยละ 10 ของ NaOH + ร้อยละ 5 ของ (Ca(OH)<sub>2</sub>) โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซึ่มต่ออัตราการไหลของก๊าซที่ค่า 2.82 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> สูงสุดเท่ากับร้อยละ 48

Eloneva *et al.* (2008) ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำขี้ตะกรันจากโรงถลุงเหล็กมาทำการตกตะกอนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความบริสุทธิ์ โดยนำขี้ตะกรันมาละลายด้วยกรดอะซิติกที่ความเข้มข้น 0 0.1 0.5 2 4 6 และ 8 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 30 50 และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับ เก็บตัวอย่างสารละลายหลังจากใส่ขี้ตะกรันที่เวลาต่างๆ แล้วนำมากรองด้วย Syringe Membrane Filter (0.45 ไมครอน) และนำไปวิเคราะห์หา Ca Fe Si Mg Mn Al และ V โดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปตกตะกอนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตโดยการป้อนก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 25 50 หรือ 100 โดยปริมาตร อัตราการไหล 0.5 1 หรือ 2 ลิตรต่อนาที และใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก) 5 10 15 และ 20 มิลลิลิตร พบว่า ทันทีหลังจากเติมขี้ตะกรันลงในสารละลายกรดอะซิติกอุณหภูมิของสารละลายจะเพิ่มขึ้นประมาณ 1-3 องศาเซลเซียสแล้วค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งคงที่ ค่า pH ลดต่ำลง 1-2 ค่าแล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ สำหรับผลจากการวิเคราะห์ด้วย ICP-AES พบว่า แคลเซียมสามารถละลายได้อย่างรวดเร็วภายใน 2-10 นาที

ในขณะที่เดียวกันประสิทธิภาพในการละลายของแคลเซียมจะละลายได้ดีที่ความเข้มข้นของกรดอะซิดิก 2-8 โมลาร์ ซึ่งละลายได้ถึงร้อยละ 86-90 สำหรับการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อทำการป้อนก๊าซ CO<sub>2</sub> ค่า pH ของสารละลายมีค่าลดลงทันทีจากค่า pH 11 เป็น pH 6 และหลังจากที่ป้อนก๊าซ CO<sub>2</sub> เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และให้ความร้อนแก่สารละลาย 58 องศาเซลเซียส สีของสารละลายเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นสีขาวขุ่น แสดงให้เห็นว่า มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นและพบว่ามีตะกอน 1 กรัม ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 3 ของการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนต ดังนั้นจึงทำการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายของกรดอะซิดิกกับขี้ตะกรัน พบว่ามีค่า pH เพิ่มขึ้น 1-3 จากเดิมมีค่า pH 10 แต่เมื่อป้อนก๊าซ CO<sub>2</sub> พบว่า pH ลดลงอย่างช้าๆ และจะคงที่ที่เวลา 24 และ 62 นาที ขึ้นกับปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมคือ 15 และ 61 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเวลาที่ทำให้ค่า pH คงที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งพบว่าความเข้มข้นของก๊าซ CO<sub>2</sub> ไม่ส่งผลต่อผลได้ของการตกตะกอน แต่อัตราการไหลของก๊าซ CO<sub>2</sub> มีผลต่อเวลาที่ทำให้ pH มีค่าคงที่ ซึ่งผลของการตกตะกอนพบว่า เมื่อใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 46 กรัม<sub>NaOH</sub>/ลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มจะไม่มีผลต่อการตกตะกอน และผลของอุณหภูมิไม่มีผลต่อปริมาณการตกตะกอน โดยค่าแคลเซียมจากสารละลายสามารถเกิดเป็นตะกอนได้สูงสุดร้อยละ 86 และตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตมีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99

Georgiou *et al.* (2007) ศึกษาการดูดซับก๊าซ CO<sub>2</sub> จากน้ำเสียของกระบวนการย้อมผ้า โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารประกอบ Aromatic Amines ในหอดูดซับแบบคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร และใช้ตัวกลางบรรจุชนิด Glass Raschig Ring (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร) ในการทดลองนี้ก๊าซที่ใช้เป็นก๊าซจำลองจากก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการย้อมผ้า ซึ่งทำการผสมระหว่าง CO<sub>2</sub> ร้อยละ 10 โดยปริมาตร และ N<sub>2</sub> ร้อยละ 90 โดยปริมาตร ที่อัตราการไหลก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที จากการทดลองพบว่า สารละลายที่เหมาะสมที่ใช้เป็นสารดูดซับ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ พบว่าสามารถดูดซับก๊าซ CO<sub>2</sub> ได้ถึง 7 กรัม<sub>CO<sub>2</sub></sub>/กรัม<sub>NaOH</sub>

Hisyamudin *et al.* (2009) ศึกษาการดูดซับก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้ขี้ตะกรันที่ได้จากโรงถลุงเหล็กเตาอาร์คไฟฟ้า ทำการทดลองใน Vibrating Ball Mill ที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการ

หมุนเครื่อง Vibrating ball mill 1200 รอบต่อนาที โดยปัจจัยที่ศึกษามีดังนี้คือ ความดันเริ่มต้น 1 และ 2 atm ปริมาณน้ำที่ป้อนเข้า 0 100 200 300 400 มิลลิลิตร ปริมาณซีตะกรัน 0 100 200 300 และ 400 กรัม และขนาดลูกบอลที่ใช้ในการบด 0 (ไม่มีลูกบอล) 2 10 และ 20 มิลลิเมตร ในการทดลองนี้ มีการเติมน้ำเพื่อป้องกันการจับกันเป็นก้อนของซีตะกรันตอนทำการบด และปฏิกิริยาที่เกิดในการทดลองนี้ มีความสนใจก๊าซ  $\text{CO}_2$  ที่ทำปฏิกิริยากับ  $\text{CaO}$  (เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่อยู่ในซีตะกรัน) เกิดเป็น  $\text{CaCO}_3$  ผลจากการดูดซึมก๊าซ  $\text{CO}_2$  ด้วยซีตะกรันแบบเปียก พบว่าค่าการดูดซึมก๊าซ  $\text{CO}_2$  จะสูงขึ้นที่ความดันเริ่มต้น ปริมาณน้ำ ปริมาณซีตะกรัน และขนาดลูกบอลที่ใช้ในการบดเพิ่มขึ้น แต่ขนาดลูกบอลที่ใช้ในการบดจะมีผลต่อการดูดซึมก๊าซ  $\text{CO}_2$  ในตอนเริ่มต้นเท่านั้น และเมื่อใช้ความดันเริ่มต้น 2 atm ปริมาณน้ำ 5 และ 400 กรัม ปริมาณซีตะกรัน 200 กรัม และขนาดลูกบอลที่ใช้ในการบด 20 มิลลิเมตร จะทำให้ปริมาณการดูดซึมก๊าซ  $\text{CO}_2$  สูงสุดเท่ากับ 74.8 กรัม  $\text{CO}_2$

Huijgen *et al.* (2006) ศึกษากระบวนการเกิดคาร์บอนเนชันของสารละลายแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{CaSiO}_3$ ) กับ  $\text{CO}_2$  โดยทำการทดลองในหม้ออัดความดัน ใช้ใบพัดกวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด  $32 \times 10^{-3}$  เมตร โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังนี้คือ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ 25-225 องศาเซลเซียส ความดันส่วนของ  $\text{CO}_2$  1-40 บาร์ ขนาดอนุภาค 38-700 ไมโครเมตร เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 5-60 นาที อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 2-10 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม และความเร็วในการกวนผสม 100-2,000 รอบต่อนาที โดยปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนเนชันจะเกิดขึ้น 2 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรก เป็นการชะละลาย  $\text{Ca}^{2+}$  ออกจากแคลเซียมซิลิเกต ขั้นตอนที่ 2 การเกิดตะกอน  $\text{CaCO}_3$  และทั้ง 2 ขั้นตอนนี้เกิดที่อุณหภูมิต่างกัน โดยอุณหภูมิที่ต่ำจะเหมาะกับขั้นตอนแรก และอุณหภูมิที่สูงกว่าจะเหมาะกับขั้นตอนที่ 2 จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา 200 องศาเซลเซียส ความดันส่วนของ  $\text{CO}_2$  20 บาร์ ขนาดอนุภาค < 38 ไมโครเมตร อัตราส่วนของของเหลวต่อของแข็ง 10 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม ความเร็วในการกวนผสม 500 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันสูงสุดถึงร้อยละ 70

Lekakh *et al.* (2008) ศึกษาการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  โดยใช้ซีตะกรันที่ได้จากโรงถลุงเหล็ก ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ 2 ถัง ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ โดยถังปฏิกรณ์ 1 ประกอบด้วยซีตะกรันขนาด < 3.2 มิลลิเมตร ปริมาณ 200 กรัม และน้ำ 20 ลิตร และถังปฏิกรณ์ที่ 2

มีขนาด 2 ลิตร ซึ่งประกอบด้วยสารละลายที่ได้จากถังที่ 1 กับฟองของก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่อัตรา 1.5 กรัมต่อนาที ซึ่งเป็นการทดลองแบบกะกับแบบต่อเนื่องโดยการศึกษาจะใช้โปรแกรม METSIM Process Model ร่วมกับการทดลองจริง เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง ผลที่ได้พบว่า น้ำที่ใช้ครั้งแรกจะมีประสิทธิภาพการสกัดดีที่สุดในถังที่ 1 ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันในถังที่ 2 ดีที่สุดเช่นกัน แต่กระบวนการแบบต่อเนื่องในถังที่ 2 ต้องใช้น้ำเป็นจำนวนมากจึงมีการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่และมีการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ดังนี้คือ ขนาดอนุภาคของซีตะกรัน และเวลาที่ใช้ในถังปฏิกรณ์ที่ 1 (กรณีที่ใช้อัตราการป้อนเข้าคงที่) จากการทดลองพบว่า เมื่อขนาดอนุภาคของซีตะกรันเล็กลง และเวลาที่ใช้ในถังปฏิกรณ์ที่ 1 นานขึ้น ส่งผลให้ร้อยละการเกิดแคลเซียมคาร์บอนเนตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าสามารถกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ได้มากขึ้น และพบว่าขนาดอนุภาคของซีตะกรัน 20 ไมโครเมตร เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองนี้

Lin and Shyu (1999) ศึกษาการดูดซึมก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้สารละลายเอมีน 2 ชนิด ได้แก่ Monoethanolamine (MEA) และ N-methyldiethanolamine (MDEA) เป็นสารดูดซึมในหอดูดซึมแบบคอลัมน์บรรจุทำจากแก้ว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.7 เซนติเมตร และสูง 100 เซนติเมตร ใช้ตัวกลางชนิด Ceramic Raschig Ring (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร และสูง 70 เซนติเมตร) จากการทดลองพบว่า สารละลายเอมีนทั้งสองชนิดที่ใช้เป็นสารดูดซึมก๊าซ CO<sub>2</sub> ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อวิเคราะห์สารละลายทั้งสองจากปฏิกิริยาพบว่า สารละลาย MDEA สามารถนำมาปรับสภาพสารละลายได้ง่ายกว่าสารละลาย MEA

Yang *et al.* (2008) ศึกษาทบทวนกระบวนการแยกและการดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคและวิธีการต่างๆ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทบทวนกระบวนการดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> ของกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยแบ่งกระบวนการแยกได้คือ กระบวนการแยกก๊าซ CO<sub>2</sub> ออกจากการเผาไหม้โดยใช้ถ่านหิน กระบวนการแยกก๊าซ CO<sub>2</sub> ออกจากกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน การแยกก๊าซ CO<sub>2</sub> ออกจากการเผาไหม้ออกไซด์ และการใช้สารเคมีช่วย เช่น Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO และ CaO เป็นต้น ส่วนที่สองเป็นกระบวนการดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยธรรมชาติ เช่น การปลูกต้นไม้เพื่อดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การละลายก๊าซ CO<sub>2</sub> ในน้ำทะเลเพื่อให้แพลงตอนพืชในน้ำใช้งาน และการเกิดน้ำแร่ที่มีสารประกอบคาร์บอนเนต ส่วนสุดท้ายเป็นเทคนิคในการดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยวิธีการต่างๆ

เช่น การใช้สารละลายในการดูดซึม เช่น การใช้สารประกอบเอมีน แอมโมเนีย อัลคาไลน์ เป็นต้น และการใช้เยื่อแผ่นบางในการดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยกระบวนการทั้งหมดนี้ได้ทำการสรุปและเสนอแนะเทคนิคต่างๆ ที่เป็นตัวเลือกในการบำบัดก๊าซ CO<sub>2</sub>

Yong *et al.* (2002) ทำการศึกษาทบทวนกระบวนการดูดซับก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยวัสดุดูดซับที่อุณหภูมิสูง ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลของวัสดุดูดซับ การดูดซับด้วย Carbon-based การดูดซับด้วยวัสดุจำพวกสารประกอบออกไซด์ โดยปกติแล้วนิยมใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซีโอไลต์ (Zeolites) และสารประกอบ Hydrotalcite-like (HTLcs) ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง โดยพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง แต่ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับ และผลของพื้นที่ผิวต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซ CO<sub>2</sub> มีผลน้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิในการดูดซับ นอกจากนี้ยังพบว่าสารประกอบชนิดออกไซด์ของโลหะ (CaO และ MgO) มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูง

ธีรภัทร์ (2553) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ในลมร้อนจากปล่องควันของเตาอบยางก๊าซเสียที่ปล่อยจากปล่องควันของเตาอบยาง โดยดูดซับด้วยสารดูดซึม 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโมโนเอทานอลเอมีน (MEA) ในหอดูดซึมแบบคอลัมน์บรรจุ ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง 4 ตัวแปร ได้แก่ ความเข้มข้นของสารดูดซึม (C) อัตราการไหลของสารดูดซึม (L) อัตราการไหลของก๊าซร้อน (G) และอัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซึมต่ออัตราการไหลของก๊าซ (L/G) ผลจากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ในหอดูดซึมแบบบรรจุ คือ อัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซึม (L) 4.5 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซร้อน (G) 0.15 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที อัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซึมต่ออัตราการไหลของก๊าซ (L/G) คือ 30 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร และความเข้มข้นของสารดูดซึม (NaOH และ MEA) 0.7 โมลาร์ โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซ CO<sub>2</sub> จากสารละลาย NaOH เท่ากับร้อยละ 58.98 และสารละลาย MEA ร้อยละ 73.05 ตามลำดับ

มฤดี (2542) ทำการวิเคราะห์หาสารดูดซึมที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ในหอดูดซึมแบบถาด โดยศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง 3 ตัวแปร ได้แก่ ชนิดสารดูดซึม โดยพิจารณาสารละลาย 5 ชนิด ได้แก่ สารละลายโมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine, MEA) ไดเอทานอลา

มีน (Diethanolamine, DEA) ไดโกลโคลามีน (Diglycolamine, DGA) ไดไอโซโพรพานอลามีน (Diisopropanolamine, DIPA) และเมทิลไดเอทานอลามีน (Methyldiethanolamine, MDEA) ความเข้มข้นของสารละลาย และอัตราส่วน โมลของก๊าซ CO<sub>2</sub> ต่อโมลของสารละลายเอมีน ผลจากการศึกษาพบว่า สารละลายที่เหมาะสมเพื่อใช้ในกระบวนการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> คือ สารละลายเมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA) เนื่องจากเป็นสารละลายที่ใช้พลังงานในกระบวนการน้อยที่สุด ความเข้มข้นที่เหมาะสมคือร้อยละ 20 และอัตราส่วน โมลของก๊าซ CO<sub>2</sub> ต่อโมลสารละลายเอมีนเท่ากับ 0.3

### 2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค CCD ของ RSM

Garcia *et al.* (2011) ศึกษาการดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยถ่านกัมมันต์ในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ทำการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> (Y<sub>1</sub>) และความสามารถในการดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> (Y<sub>2</sub>) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษามี 2 ปัจจัย ได้แก่ ความดันส่วนก๊าซ CO<sub>2</sub> (1-3 บาร์) และอุณหภูมิ (25-65 องศาเซลเซียส). ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และยังพบว่าความดันส่วนก๊าซ CO<sub>2</sub> เป็นปัจจัยมีผลมากที่สุด เมื่อค่าความดันส่วนก๊าซ CO<sub>2</sub> มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการดักจับและความสามารถในการดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> สูงขึ้นเช่นกัน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกลับส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการดักจับและความสามารถในการดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> ลดลง จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ได้สมการความสัมพันธ์คือ

$$Y_1 = 3.1210 - 0.0779 T + 0.8067 P_{CO_2} + 0.0006 T^2$$

$$\text{และ } Y_2 = 8.0421 - 0.2394 T + 2.4067 P_{CO_2} + 0.0020 T^2$$

ซึ่งจะได้สภาวะเหมาะสมที่สุด คือที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดันส่วนก๊าซ CO<sub>2</sub> 3 บาร์ เวลาที่ใช้ในการดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> เป็น 10.50 นาที และความสามารถในการดักจับก๊าซ CO<sub>2</sub> เป็น 3.96 โมล/กิโลกรัม<sub>Adsorbent</sub>

Seyeded *et al.* (2007) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเอนไซม์ที่ใช้เป็นสารอาหารให้กับ *Bacillus Clausii* และสภาวะที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มการผลิตเอนไซม์ โดยปัจจัยที่ศึกษามี 3 ปัจจัยได้แก่ ความเข้มข้นของซูโครส ความเข้มข้นของยีสต์สกัด และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต ปัจจัยเหล่านี้ถูกนำไปใช้ทดลองเบื้องต้น โดยใช้แผนการทดลองออกแบบด้วยวิธี CCD พื้นผิวตอบสนองทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ คือ

$$Y = 928.37 + 132.33x_1 - 348.16x_2 - 104.28x_3 - 110.12x_1^2 - 189.29x_2^2$$

จะได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการผลิตเอนไซม์คือ ความเข้มข้นซูโครส คือ 11 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของยีสต์สกัด 5 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต 5.2 กรัมต่อลิตร

Tan *et al.* (2007) ศึกษาวิธีการออกแบบการทดลองด้วย CCD เพื่อทำการศึกษปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียม Activated Carbon ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิสำหรับการกระตุ้น ระยะเวลาการกระตุ้น และอัตราส่วน KOH: char ต่อการดูดซับ Methyl Blue แต่ผู้ทำการวิจัยต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียม Activated Carbon จึงนำไปสู่การวิเคราะห์การทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method of Process Optimization) พบว่าสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ คือ สภาวะอุณหภูมิประมาณ 816 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการกระตุ้นประมาณ 1 ชั่วโมง และต้องใช้อัตราส่วน KOH: char เท่ากับ 3.9

## 2.8 ข้อสรุปข้อมูลที่ได้จากการค้นคว้า

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าพบว่า ก๊าซเสียจากปล่องควันที่ได้โรงงานอุตสาหกรรมมีค่าความเข้มข้นก๊าซ CO<sub>2</sub> เป็นร้อยละ 15 โดยปริมาตร และจากการศึกษางานวิจัยพบว่าสารประกอบ CaO สามารถนำไปกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกซีตะกรันซึ่งมี CaO เป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อต้องการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้มาทดแทนสารเคมีในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ซึ่งเลือกใช้หอดูดซึมแบบคอลัมน์บรรจุมาทำการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยเริ่มจากการศึกษาระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรันเพื่อนำสารละลายที่ได้มาใช้เป็นสารดูดซึมก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายอะซิติก อัตราส่วนเชิง

มวลงของเหลวต่อของแข็ง และอุณหภูมิ พร้อมทั้งทำการออกแบบการทดลองและสร้างแบบจำลองที่ได้จากกระบวนการชะละลายและหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง โดยใช้เทคนิค Response Surface Methodology (RSM) เพื่อนำสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากกระบวนการชะละลายนี้ไปใช้ผลิตสารดูดซึมสำหรับกระบวนการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ต่อไป สำหรับการศึกษากำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ร้อยละ 15 โดยปริมาตร ด้วยสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายในคอลัมน์บรรจุ มีปัจจัยที่ทำการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหลของสารดูดซึม อัตราการไหลของก๊าซ และความเข้มข้นของสารดูดซึม และทำการออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM เช่นเดียวกัน แล้วนำสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> มาทำการเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ทั้งนี้เพื่อเป็นทางเลือกในการนำวิธีการบำบัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้สารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายนี้ตระกรันไปใช้ประโยชน์ต่อไป



## บทที่ 3

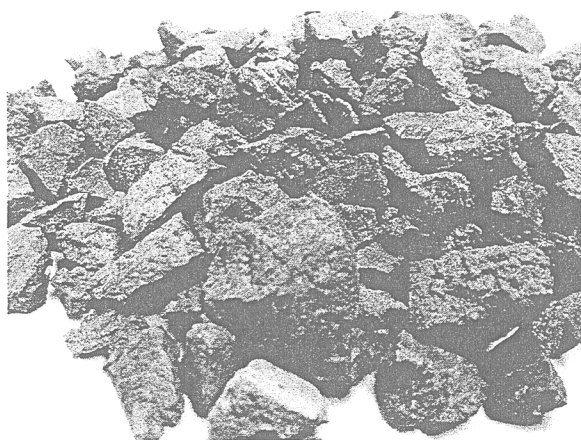
### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

สารเคมี อุปกรณ์ วิธีการทดลอง วิธีการออกแบบการทดลอง วิธีการเก็บตัวอย่าง วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง และแผนการดำเนินการทดลอง ในการศึกษากระบวนการชะละลาย แคลเซียมออกจากซีตะกรันในถังปฏิกรณ์แบบกะ และขั้นตอนการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ในคอลัมน์บรรจุ ซึ่งเป็นขั้นตอนหลักในงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลองสำหรับการศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรันในถังปฏิกรณ์แบบกะ

##### 3.1.1 วัสดุ

ซีตะกรัน (Slag) จากเตาอาร์คไฟฟ้า มีลักษณะเป็นของแข็งสีเทา ไม่มีกลิ่นเหม็น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.1 ของบริษัทสยามสตีลซินดิเกท จำกัด ตั้งอยู่บนถนนท้ายบ้าน ตำบลท้ายบ้าน อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ



ภาพประกอบที่ 3-1 ลักษณะทางกายภาพของซีตะกรันที่ได้จากเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF)

### 3.1.2 สารเคมี

- กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$  ร้อยละ 99 โดยปริมาตร) จากบริษัท Merck เกรดการวิเคราะห์
- น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

### 3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Adsorption Spectrometer, AAS)

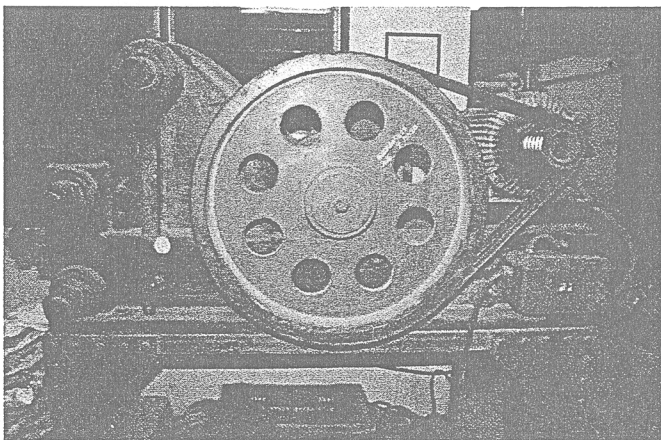
- แลนทานัม ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) จากบริษัท Lab scan เกรดการวิเคราะห์
- น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

### 3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพต่างด้วยวิธีการไทเทรต

- กรดซัลฟิวริก จากบริษัท Lab scan เกรดการวิเคราะห์
- สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์
- สารละลายเมทิลออเรนจ์ อินดิเคเตอร์

### 3.1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องบดย่อยแบบจอร์วี่ (Jaw Crusher) ใช้สำหรับการบดหยาบจีตะแกรงลักษณะดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-2

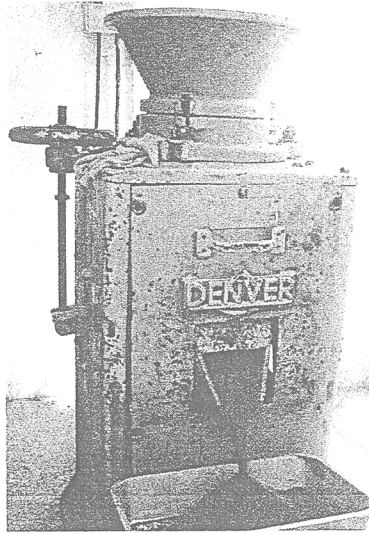


ภาพประกอบที่ 3-2 เครื่องบดย่อยแบบจอร์วี่ (Jaw Crusher) ใช้สำหรับการบดหยาบจีตะแกรง

- เครื่องบดย่อยแบบไจราทอรี (Gyratory Crusher) สำหรับบดละเอียดหิน  
ลักษณะดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-3

- เครื่องชั่ง

- เครื่องร่อนตะแกรงสำหรับคัดขนาดหิน ลักษณะดังแสดงใน  
ภาพประกอบที่ 3-3



ภาพประกอบที่ 3-3 เครื่องบดย่อยแบบไจราทอรี (Gyratory Crusher)



ภาพประกอบที่ 3-4 เครื่องร่อนตะแกรงสำหรับคัดขนาดหิน

- ตู้อบ
- ชุดเครื่องกวน
- ถังปฏิกรณ์ทำจากแก้ว (บีกเกอร์) ขนาด 2 ลิตร
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Thermocouple)
- นาฬิกาจับเวลา
- โถดูดความชื้น (Desiccator)

### 3.1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

- ปิเปตขนาด 5 และ 10 มิลลิลิตร
- ขวดเก็บตัวอย่างขนาด 20 มิลลิลิตร
- เครื่องหมุนเหวี่ยง
- Syringe ขนาด 10 มิลลิลิตร
- Syringe Filter (ใช้เมมเบรนชนิด Polytetrafluoroethylene (PTFE) ขนาดรู

พรุน 0.45 ไมโครเมตร)

- เครื่องกรองสุญญากาศ
- กระดาษกรอง
- นาฬิกาจับเวลา

### 3.1.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

- pH meter
- บิวเรตขนาด 25 มิลลิลิตรและแท่นจับ 1 ชุด
- ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- หลอดหยด
- เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของซี

ตะกั่ว ลักษณะดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-5

- เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRFS) ใช้สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณและแร่ธาตุประกอบในซีตะกั่ว ลักษณะดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-6

- Micropipette ขนาด 10-100 ไมโครเมตร

- เครื่อง Atomic Adsorption Spectrometer (AAS) รุ่น Perkin Elmer model AA Analyst ใช้สำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้นแคลเซียม แสดงดังภาพประกอบที่ 3-7



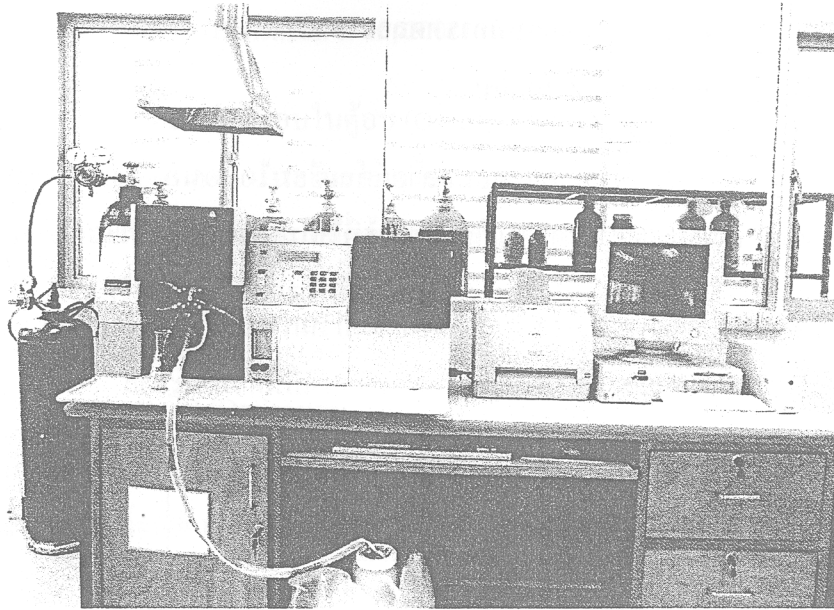
ภาพประกอบที่ 3-5 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD)

ที่มา: ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ภาพประกอบที่ 3-6 เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRFS)

ที่มา: ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ภาพประกอบที่ 3-7 แสดงเครื่อง Atomic Adsorption Spectrometer (AAS) สำหรับใช้วิเคราะห์  
ความเข้มข้นของแคลเซียม

### 3.1.8 วิธีการทดลองและการออกแบบการทดลอง

#### 3.1.8.1 การชะละลายแคลเซียมไอออน

การศึกษาการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีเมนต์ด้วยสารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออน โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สภาวะการทดลองสำหรับศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีเมนต์โดยใช้ น้ำปราศจากไอออนและสารละลายกรดอะซิติกมาเป็นตัวทำละลาย

การทดลอง	ความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลต่อลิตร)	อัตราส่วน S:L (กรัมต่อกรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Response
1	2	8	40	ความ เข้มข้นของ แคลเซียม
2	2	8	60	
3	2	15	40	
4	2	15	60	
5	6	8	40	
6	6	8	60	
7	6	15	40	
8	6	15	60	
9	5	10	50	
10	5	10	50	
11	5	10	50	
12	8	10	50	
13	0	10	50	
14	5	20	50	
15	5	5	50	
16	5	10	70	
17	5	10	30	

### 3.1.8.2 วิธีการเตรียมวัสดุคิบ (Bonenfant *et al.*, 2008)

นำซีตะกรันไปอบในตู้อบ (Oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปบดลดขนาดโดยใช้เครื่องบดย่อยแบบจอร์ (Jaw Crusher) ซึ่งเป็นการบดแบบหยาบ หลังจากนั้นทำการบดละเอียดด้วยเครื่องบดย่อยแบบไจราทอรี (Gyratory Crusher) นำไปคัดขนาดด้วยเครื่องร่อนตะแกรงให้ผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 44 ไมครอน และค้ำตะแกรงขนาดรูเปิด 37 ไมครอนและอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเก็บซีตะกรันไว้ในโถดูดความชื้น (Desiccator)

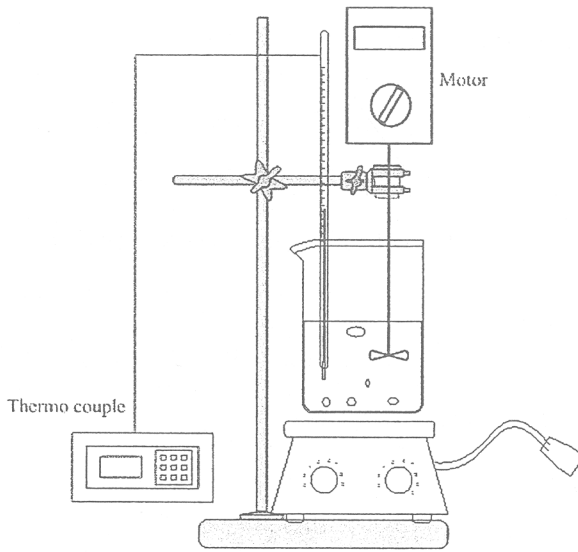
### 3.1.8.2 วิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะของซีตะกรัน

นำซีตะกรันที่เตรียมตามข้อ 3.1.8.1 มาทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของซีตะกรันด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD) และวิเคราะห์หาปริมาณและแร่องค์ประกอบอื่นๆ ในซีตะกรันด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRFS)

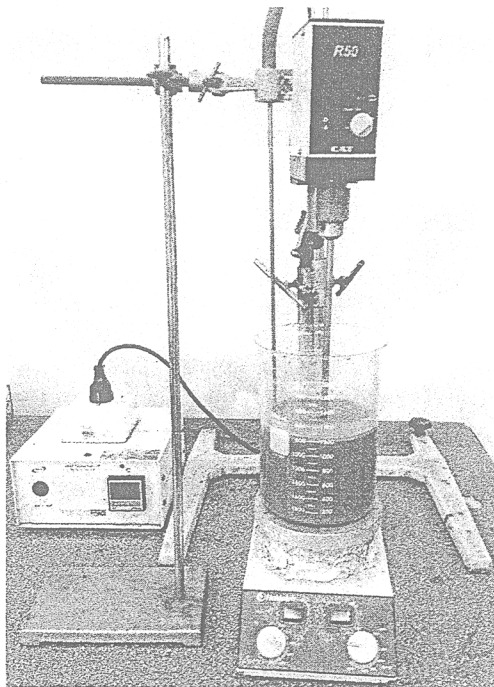
### 3.1.8.3 วิธีการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรันในถังปฏิกรณ์แบบกะ

การศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรันซึ่งดำเนินการในห้องปฏิบัติการโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกะ ประกอบด้วย บีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร ที่ติดตั้งใบพัดควบคุมความเร็วใบกวนและชุดควบคุมอุณหภูมิ ไดอะแกรมแสดงปฏิกรณ์และอุปกรณ์ประกอบแสดงในภาพประกอบที่ 3-8 และลักษณะของปฏิกรณ์แบบกะที่ใช้ในการศึกษาจริงดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-9





ภาพประกอบที่ 3-8 ชุดอุปกรณ์การทดลองถึงปฏิกิริยาแบบกะสำหรับการชะละลาย



ภาพประกอบที่ 3-9 ชุดอุปกรณ์การทดลองสำหรับถึงปฏิกิริยาแบบกะในห้องปฏิบัติการ

การศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรันมีวิธีดำเนินการในแต่ละการทดลองดังต่อไปนี้

1. เตรียมสารละลายของกรดอะซิติก โดยทำการเจือจางกรดอะซิติกร้อยละ 99.7 โดยน้ำหนัก ด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) ให้มีความเข้มข้น 0 (น้ำปราศจากไอออนเพียงอย่างเดียว) 2 5 6 และ 8 โมลาร์ ตามลำดับ จากนั้นนำสารละลายกรดอะซิติกปริมาตร 1 ลิตร เติมลงในถังปฏิกรณ์พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่เวลา  $t = 0$  หลังจากนั้นเปิดเครื่องกวน โดยควบคุมความเร็วรอบที่ 300 รอบต่อนาที (Huijgen *et al.*, 2006) และเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Thermocouple) โดยควบคุมอุณหภูมิสารละลายที่ 30 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

2. นำซีตะกรันที่เตรียมตามข้อ 3.1.9.1 ขนาด 45 ไมโครเมตรเติมลงในสารละลายกรดอะซิติกที่อัตราส่วนเชิงมวลระหว่างของแข็งต่อของเหลวเป็น 1:5 1:8 1:10 1:15 และ 1:20 กรัมของซีตะกรันต่อกรัมของสารละลาย ตามลำดับ กวนผสมตามเวลาที่กำหนด

3. ทำการเก็บตัวอย่างสารละลาย 10 มิลลิลิตร ที่เวลา 0 1 2 5 10 20 40 60 90 และ 120 นาที (Eloneva *et al.* 2008) หลังจากนั้นนำสารละลายมากรองเพื่อแยกตะกอน โดยตะกอนที่ผ่านการแยกจะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วทำการวิเคราะห์ห่อหุ้มและวิเคราะห์หาปริมาณของซีตะกรันด้วยเครื่อง XRD และ XRFS ตามลำดับ ส่วนสารละลายที่ผ่านการกรองจะนำไปวัดค่าความเป็นกรดด้วยเครื่องวัด pH วิเคราะห์หาสภาพด่าง (Alkalinity) ด้วยวิธีการไทเทรตและวิเคราะห์หาปริมาณ  $\text{Ca}^{2+}$  ด้วยเครื่อง AAS ตามลำดับ

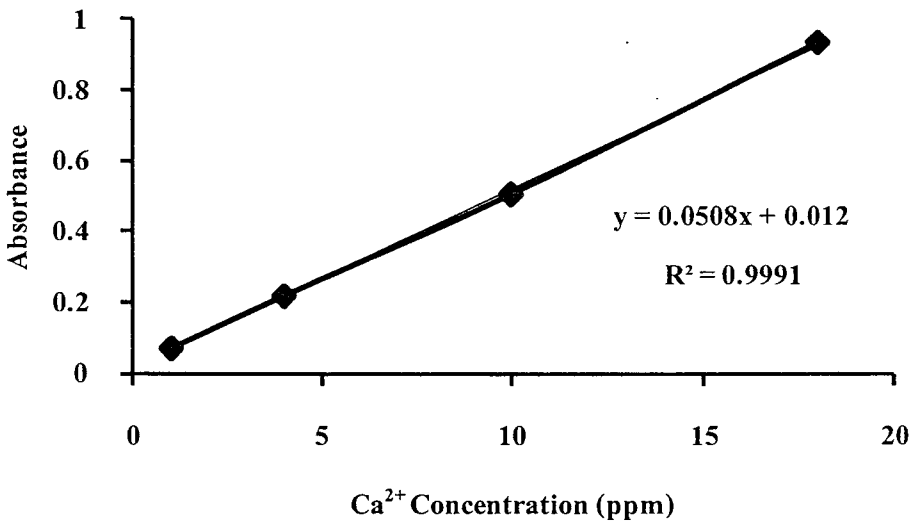
**3.1.9 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลวในการศึกษาการดูดซึม  $\text{CO}_2$  ด้วยสารละลายที่ได้จากการสกัดซีตะกรันของเหล็ก**

**3.1.9.1 วิธีการการเก็บตัวอย่างของเหลว**

เก็บตัวอย่างสารละลาย 50 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของแคลเซียมและค่าความเป็นด่างที่เวลาต่างๆ โดยเก็บตัวอย่างสารละลายก่อนป้อนเข้าสู่คอลัมน์ดูดซึมที่  $t = 0$  และที่ออกจากคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ

### 3.1.9.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายดูดซึม (สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2540)

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคลเซียมในตัวอย่างของสารละลายดูดซึมที่เวลาต่างๆ โดยมีการดึงตัวอย่างของสารละลายดูดซึมที่เวลาต่างๆเป็นปริมาตร 100 ไมโครลิตร โดยใช้ไมโครปิเปต บรรจุตัวอย่างลงขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิตร เติมสารละลายแลนทานัม 5 มิลลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนได้ปริมาตรเท่ากับ 50 มิลลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าความเข้มข้นของแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Adsorption Spectrometer, AAS) ซึ่งมีกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) ดังภาพประกอบที่ 3-10



ภาพประกอบที่ 3-10 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) โดยใช้เครื่อง AAS

### 3.1.9.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ในสารละลายดูดซึม

การวิเคราะห์หาค่าความเป็นด่างของตัวอย่างของสารละลายดูดซึมที่เวลาต่างๆ โดยทำการดึงตัวอย่างของสารละลายดูดซึมที่เวลาต่างๆ ปริมาตร 10 มิลลิตร แล้วปรับปริมาตรตัวอย่างโดยการเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนได้ปริมาตรเท่ากับ 50 มิลลิตร จากนั้นนำไป

ไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 0.01 โมลาร์ ซึ่งเริ่มจากการใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนเป็นตัวบอจุดยุติ โดยทำการไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายจะเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นใสไม่มีสี จากนั้นหยดสารละลายเมทิลโอเรนจ์แล้วไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีส้ม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-11



ภาพประกอบที่ 3-11 สีของสารละลายก่อนและหลังการไทเทรต

3.2 สารเคมี อุปกรณ์ วิธีการทดลอง สำหรับการศึกษาลักษณะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  โดยใช้สารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตริกในหอดูดซึมชนิดคอลัมน์บรรจุในระดับห้องปฏิบัติการ

### 3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมก๊าซ $\text{CO}_2$

- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร จากบริษัทไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)

- ก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร จากบริษัทไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)

### 3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารดูดซึม

- กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$  ร้อยละ 99 โดยปริมาตร) จากบริษัท Merck เกรดการวิเคราะห์

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) จากบริษัท Labscan เกรดการวิเคราะห์

- น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

### 3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

- แก๊สแกง จากบริษัทปทุมทิพย์ เกรดการค้า
- น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

### 3.2.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Adsorption Spectrometer, AAS)

- แลนทานัม ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) จากบริษัท Lab scan เกรดการวิเคราะห์
- น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

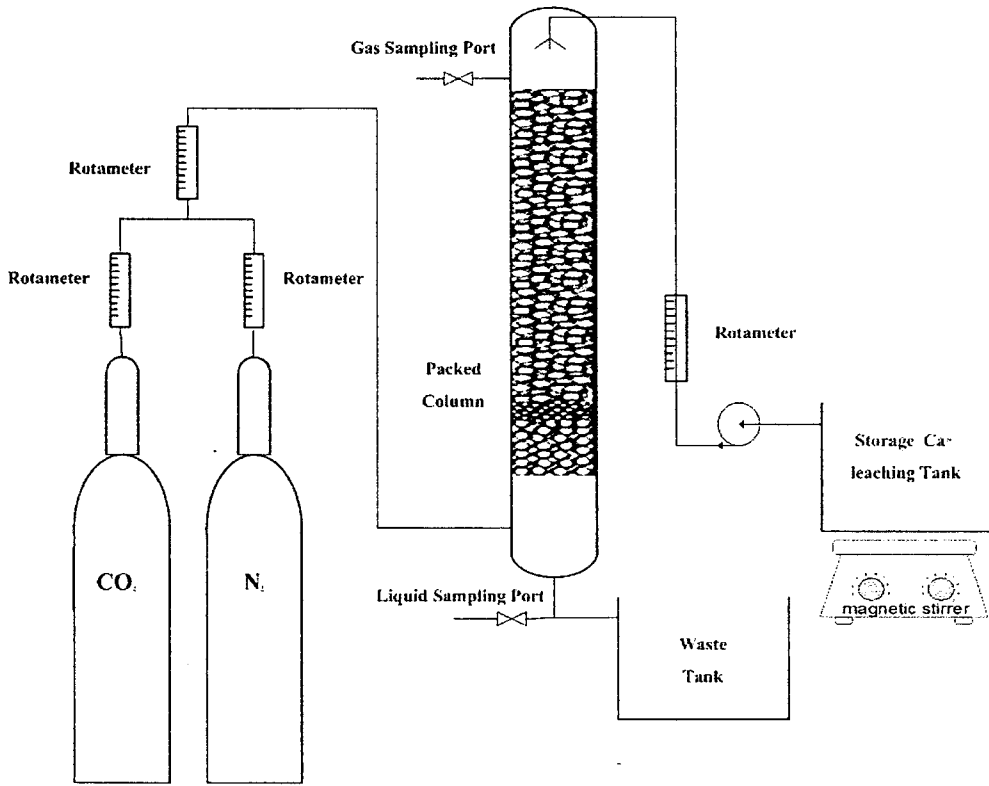
### 3.2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพต่างด้วยวิธีการไทเทรต

- กรดซัลฟิวริก จากบริษัท Lab scan เกรดการวิเคราะห์
- สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์
- สารละลายเมทิลโอเรนจ์ อินดิเคเตอร์

### 3.2.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

อุปกรณ์สำหรับการศึกษากำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เจือจางในก๊าซไนโตรเจนเป็นอากาศเสียจำลอง ด้วยสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายจีตะกรันในหอดูดซึม ชนิดคอลัมน์บรรจุในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-12



ภาพประกอบที่ 3-12 ชุดอุปกรณ์การทดลองของหอดูดซึม ชนิดคอลัมน์บรรจุสำหรับการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub>

จากภาพประกอบที่ 3-12 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย ระบบป้อนและเก็บก๊าซ หอดูดซึม ชนิดคอลัมน์บรรจุ (Packed Column Absorber) ที่บรรจุด้วยวัสดุตัวกลาง (Packing Material) และระบบป้อนและเก็บสารละลาย โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1. ระบบผลิตก๊าซที่ป้อนเป็นด้วยก๊าซ CO<sub>2</sub>

ระบบสร้างก๊าซป้อนเป็นด้วยก๊าซ CO<sub>2</sub> ประกอบด้วย ถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ บริสุทธิ์ 1 ถัง และถังก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 1 ถัง ทำการสังเคราะห์อากาศเสียจำลองที่ป้อนเป็นด้วยก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยการนำก๊าซ CO<sub>2</sub> มาผสมกับก๊าซ N<sub>2</sub> ด้วยอัตราการไหลที่กำหนด เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซ CO<sub>2</sub> เป็นร้อยละ 15 โดยปริมาตร (Bonenfant *et al.*, 2008)

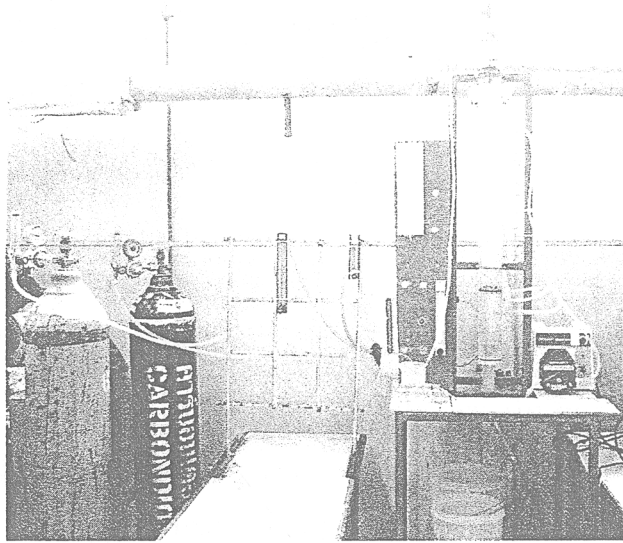
2. คอลัมน์บรรจุ (Packed Column)

คอลัมน์บรรจุที่ใช้ศึกษามีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกทำจากอะคริลิกใส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร ภายในคอลัมน์บรรจุด้วยวัสดุตัวกลางแบบ Raschig Rings ที่ทำจากโพลีเอทิลีนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร

### 3. ระบบเก็บและป้อนสารดูดซึม ประกอบด้วย

- ถังเก็บสารดูดซึม (Storage Tank) เป็นถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร จำนวน 2 ถัง
- หัวพ่นฝอย (Spray Nozzle) ติดตั้งอยู่ที่ปลายท่อป้อนของเหลวดูดซึมภายในคอลัมน์ ทำหน้าที่เพิ่มการกระจายตัวของสารดูดซึม
- เพอริสตาติกปั๊ม (Peristaltic Pump) ใช้ส่งสารดูดซึมจากถังเก็บเข้าสู่คอลัมน์ดูดซึม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่มีส่วนประกอบทั้ง 3 ระบบที่ติดตั้งในห้องปฏิบัติการ แสดงดังภาพประกอบที่ 3-13



ภาพประกอบที่ 3-13 ชุดการทดลองของคอลัมน์บรรจุที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

#### 3.2.6.2 อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง

##### อุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ

- สายยางซิลิโคน (Silicone)

- เข็มฉีดยา
- ขวดบรรจุน้ำเกลืออิมิตัวขนาด 15 มิลลิลิตร
- ปีกเกอร์สำหรับรองรับน้ำเกลือที่ถูกแทนที่ด้วยก๊าซ
- พาราฟิล์ม

### อุปกรณ์เก็บตัวอย่างสารดูดซึม

- สายยางซิลิโคน (Silicone)
- ขวดเก็บตัวอย่างสารดูดซึมขนาด 50 มิลลิลิตร
- ถังเก็บน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด ใช้ในการรองรับน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัด
- เครื่อง Peristaltic Pump (Masterflex, Model 7520-47, Barrington Co.,

Illinois)

- เครื่องบดย่อยแบบจอร์ (Jaw Crusher)
- เครื่องบดย่อยแบบบอลมิลล์ (Ball Mill)
- เครื่องชั่ง
- เครื่องร่อนตะแกรง
- ตู้อบ
- ชุดเครื่องกวน
- ถังปฏิกรณ์ทำจากแก้ว (ปีกเกอร์) ขนาด 2 ลิตร
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Thermocouple)
- นาฬิกาจับเวลา
- โถดูดความชื้น

### 3.2.6.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

- pH meter
- บิวเรตขนาด 25 มิลลิลิตร และแท่นจับ 1 ชุด
- ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- หลอดหยด



- เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)
- เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRFS)
- Micro Pipette ขนาด 10-100 ไมโครลิตร
- เครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

### 3.2.7 วิธีการทดลองและการออกแบบการทดลอง

#### 3.2.7.1 การออกแบบการทดลอง

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ในก๊าซเสียจำลองด้วยวิธีการดูดซับด้วยสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายจีตะกรันในหอดูดซับชนิดคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการของหอดูดซับต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซ CO<sub>2</sub> และเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยการดูดซับด้วยสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายจีตะกรัน

การออกแบบสภาวะการทดลองทำโดยใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) โดยทำการกำหนดตัวแปรที่จะศึกษา คือ ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียม อัตราการไหลของสารละลายแคลเซียม และอัตราการไหลของก๊าซ CO<sub>2</sub> เทคนิค RSM เป็นเครื่องมือสำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ โดยใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบการทดลองอย่างเหมาะสม สำหรับการทดลองที่มีหลายตัวแปร RSM จะช่วยในการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยไม่จำเป็นต้องทำการทดลองในทุกความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดที่เป็นไปได้ ขั้นตอนการออกแบบการทดลองโดยใช้ RSM มีขั้นตอน ดังนี้

#### 1. กำหนดตัวแปรที่จะศึกษาซึ่งประกอบด้วย

##### 1.1 ตัวแปรอิสระ ประกอบด้วย

- อัตราการไหลของสารละลายแคลเซียม (X<sub>1</sub>) (0.3-0.9 ลิตรต่อนาที)
- อัตราการไหลของก๊าซ CO<sub>2</sub> (X<sub>2</sub>) (0.25-0.85 ลิตรต่อนาที)
- ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียม (X<sub>3</sub>) (200-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร)

##### 1.2 ตัวแปรตาม คือ ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซ CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Removal Efficiency,

%RE)

2. กำหนดรหัส (Code) ของช่วงดำเนินการออกแบบการทดลองของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมดังตารางที่ 3-2 เพื่อใช้ในการออกแบบภาวะที่ใช้ในการทดลองด้วยเทคนิคของ CCD และทำการแปลงค่ารหัสตัวแปรอิสระ (Coded Variables) โดยใช้สมการที่ (3-1)

$$x = \left[ \begin{array}{c} z - \frac{z_{\max} + z_{\min}}{2} \\ \frac{z_{\max} - z_{\min}}{2} \end{array} \right] \quad (3-1)$$

เมื่อ

- x = Coded Variables
- z = ตัวแปรอิสระ
- $z_{\max}$  = ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระ
- $z_{\min}$  = ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระ

3. ทำการแปลงรหัส (Decode) จากการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคของ CCD จากตารางที่ 3-2 ให้เป็นค่าดำเนินการของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามสำหรับการดำเนินการทดลอง ได้สภาวะการทดลองสำหรับศึกษาการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> จำนวน 17 การทดลอง (การทดลองที่ 1-17) ดังแสดงในตารางที่ 3-3 และเนื่องจากการออกแบบด้วยเทคนิค RSM จะให้ผลการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระเพียงตัวละ 3 ค่า ซึ่งไม่เพียงพอในการแสดงค่ากราฟ 2 มิติ จึงมีการทดลองเพิ่มเติมในการทดลองที่ 18- 20 เพื่อให้ได้ผลของค่าตัวแปรอิสระ ตัวแปรละ 4 ค่า ซึ่งเพียงพอสำหรับการศึกษาแนวโน้มของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกราฟ 2 มิติได้

ตารางที่ 3-2 รหัสตัวแปรและขอบเขตของตัวแปรที่ทำการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิค RSM ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร และตัวแปรตาม 1 ตัวแปร

การทดลอง	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Response
1	-1	-1	-1	Y= ประสิทธิภาพ การบำบัด CO <sub>2</sub>
2	-1	-1	1	
3	-1	1	-1	
4	-1	1	1	
5	1	-1	-1	
6	1	-1	1	
7	1	1	-1	
8	1	1	1	
9	0	0	0	
10	0	0	0	
11	0	0	0	
12	1.682	0	0	
13	-1.682	0	0	
14	0	1.682	0	
15	0	-1.682	0	
16	0	0	1.682	
17	0	0	-1.682	
18	0	1	0	
19	-1	0	0	
20	0	0	1	
<b>Min-Max</b>	0.3-0.9	0.25-0.85	200-1000	

ตารางที่ 3-3 สถานะการทดลองสำหรับศึกษาการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีเมนต์ในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ

การทดลอง	อัตราการไหล ของเหลว (ลิตรต่อนาที)	อัตราการไหล ของก๊าซ (ลิตรต่อนาที)	ความเข้มข้น ของแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Response
1	0.42	0.37	362	ประสิทธิภาพ การกำจัด CO <sub>2</sub>
2	0.42	0.37	838	
3	0.42	0.73	362	
4	0.42	0.73	838	
5	0.78	0.37	362	
6	0.78	0.37	838	
7	0.78	0.73	362	
8	0.78	0.73	838	
9	0.6	0.55	600	
10	0.6	0.55	600	
11	0.6	0.55	600	
12	0.9	0.55	600	
13	0.3	0.55	600	
14	0.6	0.85	600	
15	0.6	0.25	600	
16	0.6	0.55	1000	
17	0.6	0.55	200	
18	0.6	0.73	600	
19	0.42	0.55	600	
20	0.6	0.55	838	

4. ดำเนินการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 3 ตัวแปร โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองใช้การวิเคราะห์ Multiple Regression Analysis ด้วยวิธีวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA แบบจำลองที่ได้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นโค้ง (Quadratic Equation) ดังสมการที่ (3-2)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \left( \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \right)_{i < j} \quad (3-2)$$

เมื่อ  $\beta_0$   $\beta_i$   $\beta_{ii}$  และ  $\beta_{ij}$  คือสัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้น แบบกำลังสอง และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน ตามลำดับ

5. หากกราฟพื้นผิว (Surface Plot) ของการทดลองเพื่อแสดงผลของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรัน กราฟพื้นผิวได้จากการสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง โดยการเอาผลความสัมพันธ์ของผลตอบสนองกับตัวแปรที่ทำการศึกษานำมาพล็อตเป็นกราฟพื้นผิวเพื่อนำไปหาค่าภาวะที่เหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Design Expert Software

6. นำสภาวะที่เหมาะสมไปทำการทดลองซ้ำ เพื่อหาค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพที่ได้จากสสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลอง และประสิทธิภาพที่วัดจริง

### 3.2.7.2 วิธีการทดลอง

การทดลองกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้สารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตะกรันในหอคูดซิมแบบคอลัมน์บรรจุตามสภาวะการทดลองที่ได้ออกแบบไว้นั้น มีวิธีการในแต่ละการทดลองที่เหมือนกัน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานในแต่ละการทดลองดังนี้

1. เตรียมความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมตามที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม RSM โดยนำสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตะกรันจากกิจกรรมที่ 3.1 มาทำการเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นป้อนสารละลายแคลเซียมให้ไหลเข้าทางด้านบนของคอลัมน์ และปรับอัตราการไหลของสารละลายแคลเซียมให้มีอัตราการไหลที่ตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้

2. เตรียมก๊าซ CO<sub>2</sub> ร้อยละ 15 โดยปริมาตร โดยทำการเจือจางก๊าซ CO<sub>2</sub> ในก๊าซไนโตรเจน เริ่มจากการเปิดวาล์วของถังก๊าซ CO<sub>2</sub> และปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าผสมกับกระแส

ก๊าซ CO<sub>2</sub> จนได้อัตราการไหลของก๊าซผสมตามที่ต้องการตามโปรแกรมการทดลองแล้วปล่อยให้กระแสก๊าซผสมให้ไหลเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์บรรจุ

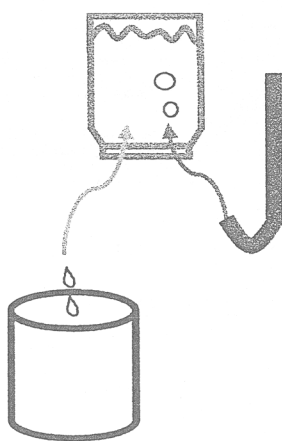
3. กระแสของก๊าซ CO<sub>2</sub> และสารดูดซึมไหลสวนทางกัน (Counter Current) ผ่านตัวกลาง (Packing) ที่บรรจุภายในคอลัมน์ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างวัฏภาคของก๊าซและวัฏภาคของเหลว ทำให้เกิดการดูดซึมและเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นภายในคอลัมน์บรรจุ

4. ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ทางเข้า (Inlet) และที่ทางออก (Outlet) ของคอลัมน์บรรจุ ทำการเก็บโดยใช้หลักการก๊าซแทนที่น้ำเกลืออิ่มตัวและทำการเก็บตัวอย่างสารละลายแคลเซียมที่ทางเข้าและออกของคอลัมน์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 15 นาที

### 3.2.7.3 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซเสีย

#### วิธีการเก็บตัวอย่างก๊าซเสีย

การเก็บตัวอย่างก๊าซ CO<sub>2</sub> ทำโดยใช้วิธีการเก็บก๊าซแทนที่น้ำเกลืออิ่มตัว ซึ่งรายละเอียดของวิธีการเก็บตัวอย่างก๊าซมีดังนี้ คือ นำขวดเก็บตัวอย่างขนาด 15 มิลลิลิตร บรรจุ น้ำเกลืออิ่มตัวเต็มขวดเพื่อป้องกันอากาศเข้าไปปนเปื้อนมาทำการเก็บก๊าซที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์ดูดซึม หลังจากนั้นนำก๊าซที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) ชุดการเก็บก๊าซแสดงดังภาพประกอบที่ 3-14

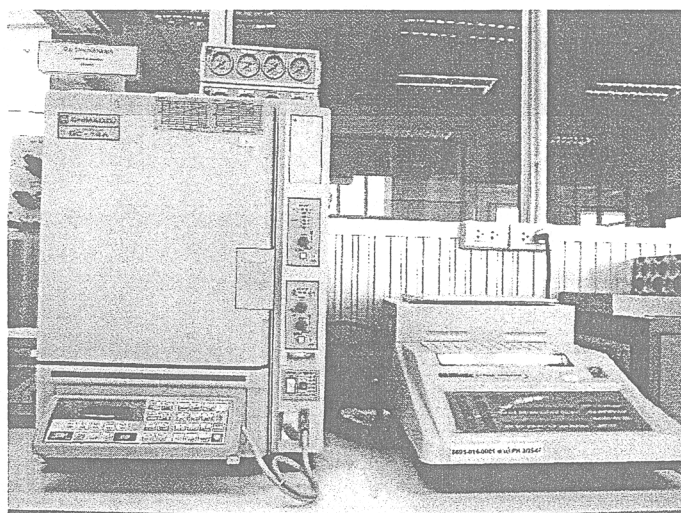


ภาพประกอบที่ 3-14 ชุดอุปกรณ์เก็บก๊าซด้วยวิธีการแทนที่น้ำเกลืออิ่มตัวด้วยก๊าซ

## วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซเสีย

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นก๊าซ  $\text{CO}_2$  ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) รุ่น GC-14A ของบริษัท Shimadzu ใช้ตัวตรวจวัดชนิด Thermal Conductivity Detector, (TCD) โดยมีสภาวะดำเนินการของเครื่อง GC ดังนี้

Column Temperature	: 50 องศาเซลเซียส
Detector Temperature	: 40 องศาเซลเซียส
Injection Temperature	: 40 องศาเซลเซียส
Column	: Porapak Q Column
Carrier Gas Flow	: Helium
Flow rate	: 30 มิลลิลิตรต่อนาที
Injection Sample	: 0.6 มิลลิลิตร



ภาพประกอบที่ 3-15 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) สำหรับวิเคราะห์หาความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{CO}_2$

### การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซ CO<sub>2</sub> (% CO<sub>2</sub> Removal Efficiency)

เมื่อทราบความเข้มข้นของก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์บรรจุก็จะสามารถหาประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ของคอลัมน์ได้ โดยประสิทธิภาพการบำบัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-3)

$$\text{Carbon dioxide removal efficiency (\%)} = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100 \quad (3-3)$$

เมื่อ  $C_1$  = ความเข้มข้นของก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่เข้า (ร้อยละโดยปริมาตร)  
 $C_2$  = ความเข้มข้นของก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ออก (ร้อยละโดยปริมาตร)

#### 3.2.7.4 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลว

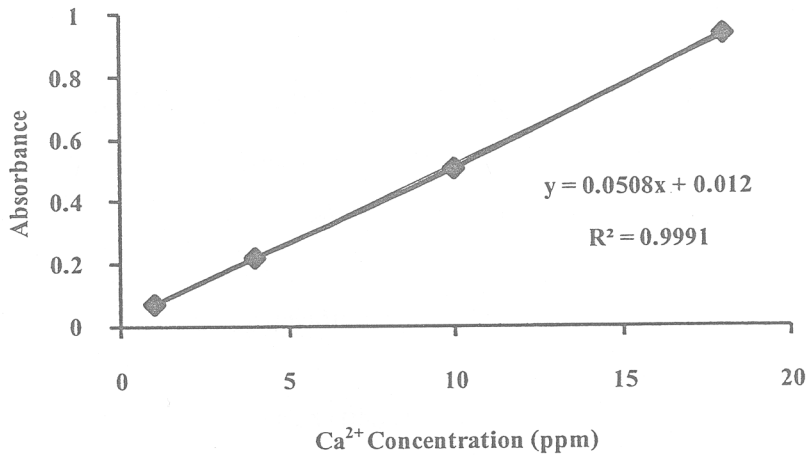
##### วิธีการการเก็บตัวอย่างของเหลว

เก็บตัวอย่างสารละลาย 50 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคลเซียมและค่าความเป็นด่างที่เวลาต่างๆ โดยเก็บตัวอย่างสารละลายก่อนป้อนเข้าสู่คอลัมน์ดูดซึมที่  $t = 0$  และที่ออกจากคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ

##### การวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายดูดซึม

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคลเซียมในตัวอย่างของสารละลายดูดซึม โดยดึงสารตัวอย่างจากสารละลายดูดซึมที่เวลาต่างๆ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร โดยใช้ไมโครปิเปตบรรจุตัวอย่างลงขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายแลนทานัม 5 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนได้ปริมาตรเท่ากับ 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าความเข้มข้นของแคลเซียม (Ca<sup>2+</sup>) โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Adsorption Spectrometer, AAS) และกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นแคลเซียม (Ca<sup>2+</sup>) ดังภาพประกอบที่ 3-16





ภาพประกอบที่ 3-16 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) โดยใช้เครื่อง AAS

### การวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ในสารละลายดูดซึม

การวิเคราะห์หาค่าความเป็นด่างในตัวอย่างของสารละลายดูดซึม โดยทำการดึงตัวอย่างของสารละลายดูดซึมจากตัวอย่างของสารละลายดูดซึมที่เวลาต่างๆ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรน้ำตัวอย่างโดยการเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนได้ปริมาตรเท่ากับ 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 0.01 โมลาร์ ซึ่งเริ่มจากการใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลินเป็นตัวบ่งชี้จุดยุติโดยทำการไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายจะเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นใสไม่มีสี จากนั้นหยดสารละลายเมทิลโอเรนจ์แล้วไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีส้ม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-17



ภาพประกอบที่ 3-17 สีของสารละลายก่อนและหลังการไทเทรต

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายขี้ตะกรันในคอลัมน์บรรจุ แบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 เป็นผลการศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากขี้ตะกรันในถังปฏิกรณ์แบบกะ และตอนที่ 2 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ในคอลัมน์แบบบรรจุ ขนาดต้นแบบ โดยแต่ละตอนมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 กระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากขี้ตะกรัน

##### 4.1.1 สมบัติของขี้ตะกรันใหม่สด (Fresh Steelmaking Slag) จากการถลุงเหล็ก

4.1.1.1 สมบัติทางกายภาพของขี้ตะกรันที่ได้จากการถลุงเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace, EAF) ของบริษัทสยามสตีลซินดิเคต จำกัด

ขี้ตะกรันของเหล็กที่ศึกษามีลักษณะเป็นของแข็งสีเทา ไม่มีกลิ่นเหม็น การศึกษาสมบัติทางกายภาพของขี้ตะกรันทำโดยนำขี้ตะกรันที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง บดลดขนาดแล้วร่อนคัดขนาดผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 44 ไมครอน และค้ำตะแกรงขนาดรูเปิด 37 ไมครอน แสดงดังภาพประกอบที่ 4-1 ลักษณะของขี้ตะกรันที่ผ่านการอบและคัดขนาดแล้ว



ภาพประกอบที่ 4-1 ลักษณะทางกายภาพของขี้ตะกรันที่ผ่านการอบแห้งและคัดขนาดด้วยการร่อนตะแกรงให้ได้ขนาดอนุภาค 37-44 ไมครอน

**4.1.1.2 สมบัติทางเคมีของซีตะกรันใหม่สดที่ได้จากเตาอาร์คไฟฟ้าของบริษัทสยามสตีลซินติเกต จำกัดและซีตะกรันที่ผ่านการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนหรือสารละลายกรดอะซิติก ปริมาณองค์ประกอบออกไซด์ของซีตะกรัน**

การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบออกไซด์ของซีตะกรันด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRFS) พบว่า ซีตะกรันมีปริมาณองค์ประกอบออกไซด์ของโลหะอยู่หลายชนิด โดยมีแคลเซียมออกไซด์ในปริมาณมากที่สุด ที่เหลือจะเป็นสารประกอบอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-1

**ตารางที่ 4-1 ปริมาณองค์ประกอบทั่วไปของซีตะกรันเหล็กก่อนทำการชะละลายวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์**

องค์ประกอบ	ปริมาณองค์ประกอบออกไซด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
CaO	53.21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.52
SiO <sub>2</sub>	13.38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.38
MnO	4.94
MgO	4.07
TiO <sub>2</sub>	1.91
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.59

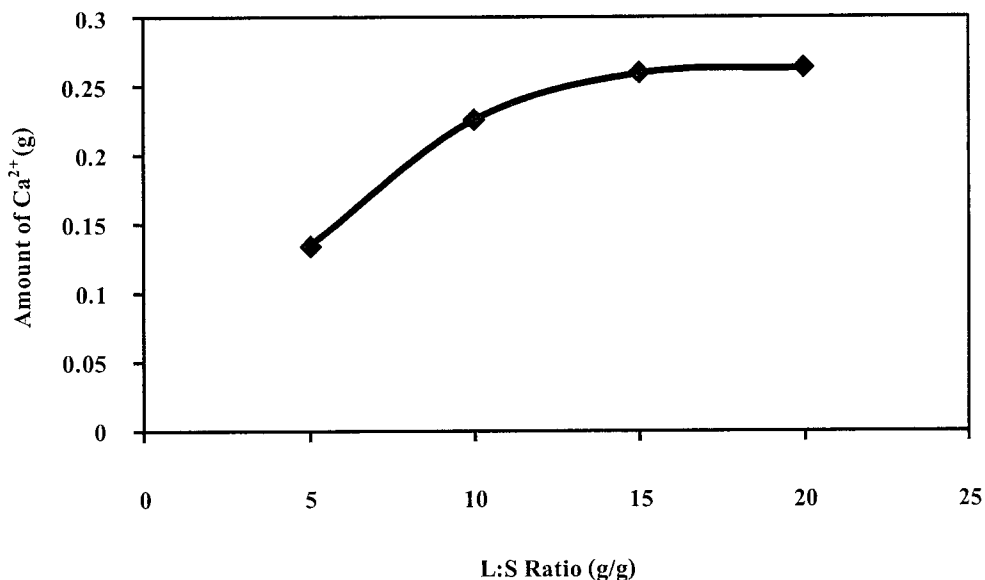
**4.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลายซีตะกรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออน**

ในหัวข้อนี้รายงานผลของปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการชะละลายซีตะกรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออน ได้ทำการวิเคราะห์ห้พิเศษ ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายและวัดปริมาณองค์ประกอบของซีตะกรันในตะกอนที่ผ่านการชะละลาย โดยปริมาณความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พ

ชั้นสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS) ที่ความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร มีรายละเอียดปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการชะละลายซีตะกรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออนดังนี้

#### 4.1.2.1 ผลของอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (กรัมต่อกรัม)

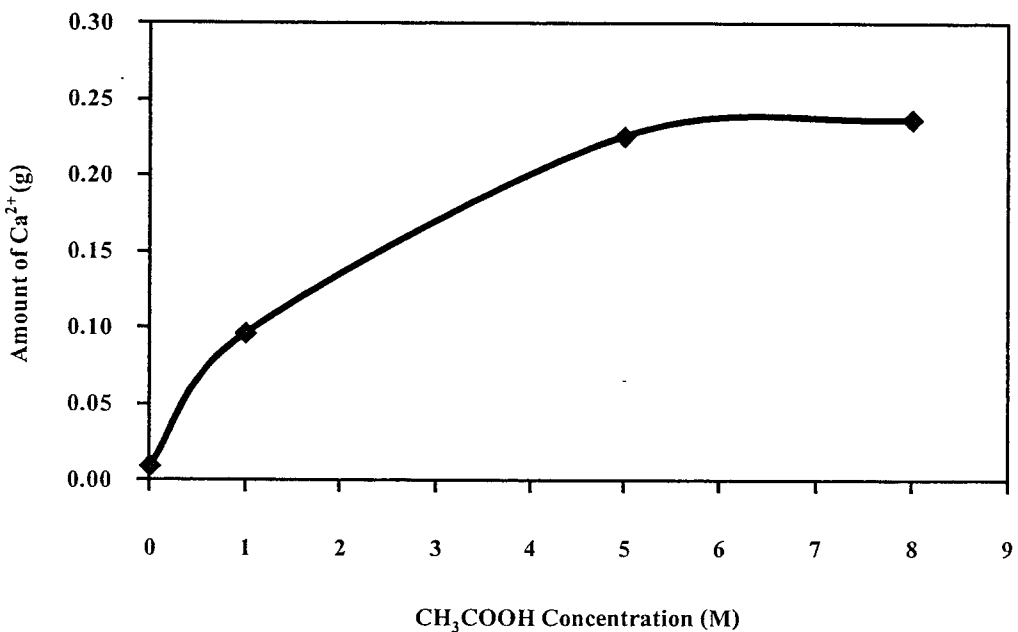
การทดลองชะละลายแคลเซียมไอออนจากซีตะกรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสตลอดการชะละลาย และทำการศึกษาอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งตั้งแต่ 5 ถึง 20 (กรัมต่อกรัม) แสดงผลการทดลองในภาพประกอบที่ 4-2 โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันต่ออัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง พบว่า เมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไอออนเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากจำนวนโมลของกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้กรดอะซิติกทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบภายในซีตะกรันเพิ่มขึ้นด้วย



ภาพประกอบที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันกับอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งที่สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 5 โมลาร์

#### 4.1.2.2 ผลของความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลาร์)

การทดลองการชะละลายแคลเซียมไอออน โดยทำการควบคุมอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเท่ากับ 10:1 (กรัมต่อกรัม) และอุณหภูมิการชะละลายเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ตลอดการทดลอง ทำการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติกตั้งแต่ 0 ถึง 8 โมลาร์ ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4-3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแคลเซียมไอออนต่อความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติก



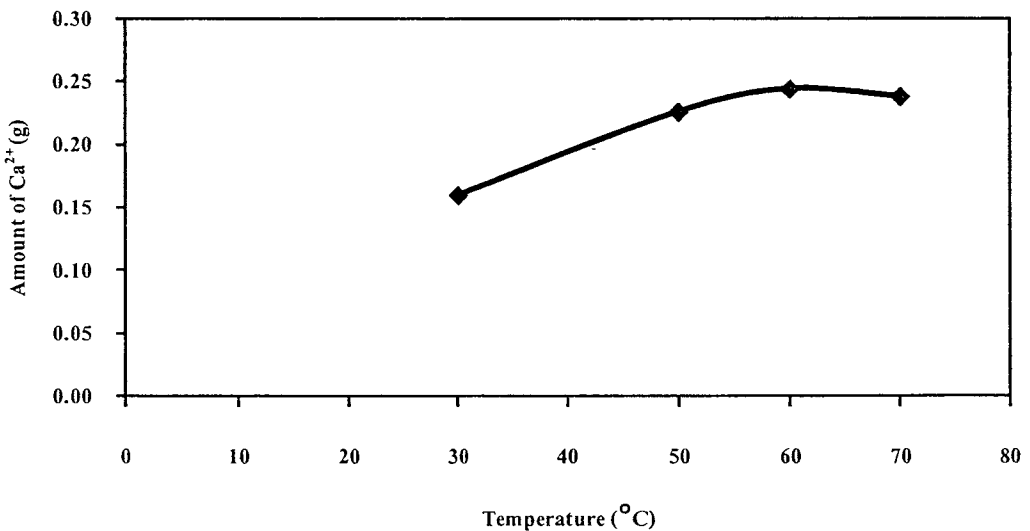
ภาพประกอบที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันกับความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติก

ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของกรดอะซิติกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นกรดอะซิติกส่งผลให้มีปริมาณไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น ซึ่งไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ดังกล่าวจะแพร่ไปยังซีตะกรันทำให้เกิดการละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันเพิ่มขึ้นด้วย (สุรชาติพิศ, 2545) ส่วนในกรณีใช้น้ำปราศจากไอออนมาเป็นตัวชะละลาย (ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 0 โมลาร์) พบว่า ความสามารถในการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันเท่ากับ 0.00875 กรัม ซึ่ง

น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่ความเข้มข้นอื่นๆ แสดงให้เห็นว่า การชะละลายด้วยกรดอะซิติกสามารถชะละลายแคลเซียมไอออนได้ดีกว่าน้ำปราศจากไอออน (Bao, 2010)

#### 4.1.2.3 ผลของอุณหภูมิในการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรัน

การทดลองชะละลายแคลเซียมไอออนจากซีตะกรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10:1 (กรัมต่อกรัม) ตลอดการทดลอง โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการชะละลายให้อยู่ตั้งแต่ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการชะละลายต่อปริมาณของแคลเซียมไอออนที่ชะละลายได้



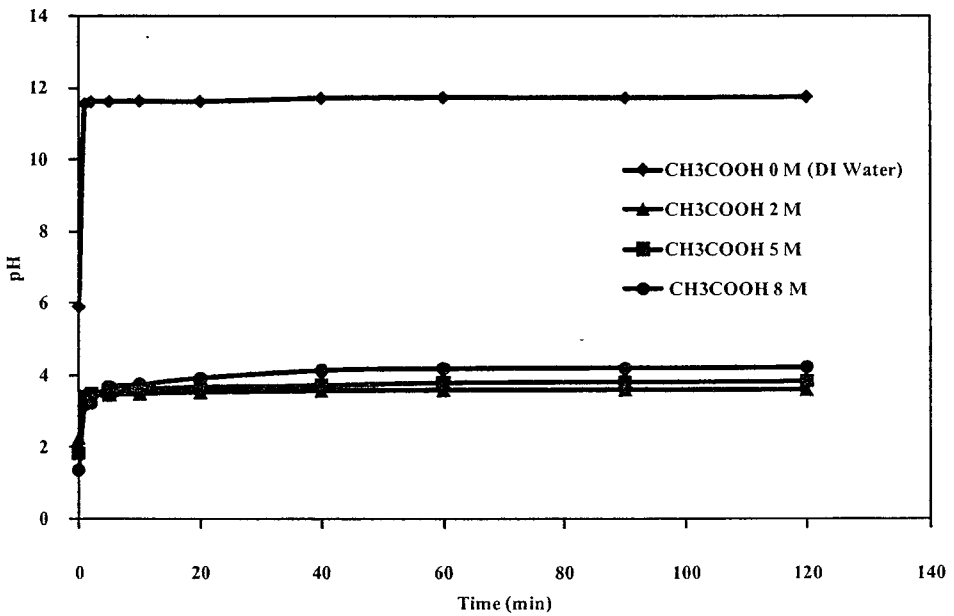
ภาพประกอบที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันกับอุณหภูมิในการชะละลาย

จากภาพประกอบที่ 4-4 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส สามารถชะละลายแคลเซียมไอออนได้มากขึ้น เนื่องจากการที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้กรดอะซิติกแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) เพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ได้สูงและเกิดการถ่ายโอนมวลได้ดีขึ้น ส่งผลต่อการชะละลายแคลเซียมไอออนให้สูงขึ้น (สุชาติพิทย์, 2545)

#### 4.1.2.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากจีตะกรัน

##### 4-1) ผลของพีเอชของสารละลายต่อเวลาที่ใช้ในการชะละลายแคลเซียมออกจากจีตะกรัน

จากการทดลองการชะละลายแคลเซียมไอออน ความเข้มข้นส่วนของเหลวต่อของแข็งให้เท่ากับ 10:1 (กรัมต่อกรัม) และอุณหภูมิการชะละลายเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ตลอดการทดลอง โดยทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติกตั้งแต่ 0 ถึง 8 โมลาร์ ได้ผลการทดลองแสดงดังกราฟในภาพประกอบที่ 4-5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายต่อเวลาที่ใช้ในการชะละลาย



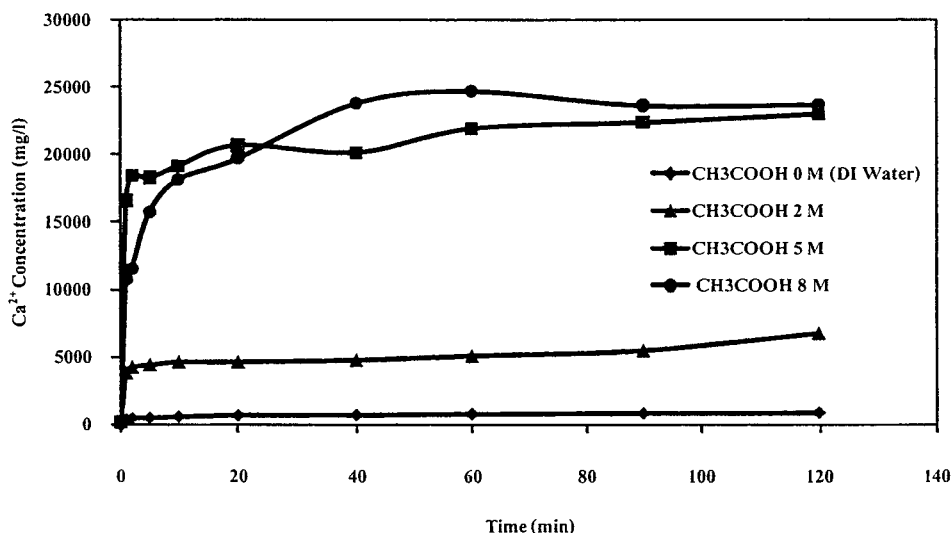
ภาพประกอบที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายกับเวลาที่ใช้ในการชะละลาย

จากภาพประกอบที่ 4-5 พบว่า ก่อนการชะละลายด้วยกรดอะซิติกสารละลายมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2.26 หลังจากนั้นละลายด้วยกรดอะซิติกแล้วค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นเป็น 3.62 เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่เกิดจากการแตกตัวของกรดอะซิติกแพร่ไปยังจีตะกรันทำให้เกิดการละลายของแคลเซียมไอออนออกจากจีตะกรัน ค่าพีเอชของสารละลายจึงมีค่าเพิ่มขึ้น (สุรชาติพย์, 2545) และพบว่าประสิทธิภาพในการชะละลายของแคลเซียมไอออนออกจากจีตะกรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 35 และเมื่อพิจารณาค่าพีเอชของสารละลายก่อนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนมีค่าเท่ากับ 5.88 และหลังการชะละลายพบว่า พีเอชของ

สารละลายเพิ่มขึ้นเป็น 11.74 สาเหตุเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีฤทธิ์เป็นด่างจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับน้ำปราศจากไอออนด่างสมการที่ (4-2) (ประภต, 2542) อีกทั้งยังพบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.24 โดยจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการชะละลายด้วยกรดสูงกว่าน้ำ เนื่องจากโลหะจะละลายได้ดีที่สภาพเป็นกรดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bao และคณะ (2010) แต่น้ำปราศจากไอออนที่ใช้เป็นสารชะละลายที่มีสภาพเริ่มต้นเป็นกลางจึงทำให้สามารถชะละลายแคลเซียมไอออนออกมาได้ปริมาณน้อย แต่มีค่าพีเอชของสารละลายแคลเซียมไอออนหลังการชะละลายที่สูงแสดงถึงปริมาณค่าสภาพความเป็นด่างที่สูง

#### 4-2) ผลของความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายต่อเวลาที่ในการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรัน

การทดลองการชะละลายแคลเซียมไอออน โดยควบคุมอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเท่ากับ 10:1 (กรัมต่อกรัม) และอุณหภูมิการชะละลายเท่ากับ 50 องศาเซลเซียสตลอดการทดลอง ความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติกที่ใช้อยู่ตั้งแต่ 0 ถึง 8 โมลาร์ ได้ผลการทดลองแสดงดังกราฟในภาพประกอบที่ 4-6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายต่อเวลาที่ใช้ในการชะละลาย



ภาพประกอบที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลาย กับเวลาที่ใช้ในการชะละลาย



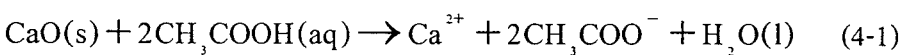
จากภาพประกอบที่ 4-6 พบว่า การชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นการชะละลาย จากนั้นจึงค่อยๆ คงที่ ซึ่งการชะละลายที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วในระยะแรกและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป ต่อมาปฏิกิริยาจะคงที่เนื่องจากความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสถานะของแข็งกับของเหลวแตกต่างกันน้อยลง หรือสารละลายเริ่มอิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์นั่นเอง

#### 4.1.3 สมบัติของซีเมนต์ที่ผ่านการชะละลายด้วยน้ำและสารละลายกรดอะซิติก

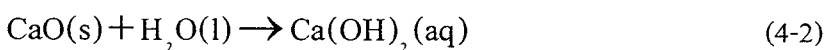
การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในซีเมนต์ส่วนที่เป็นภาคตะกอนที่เหลือจากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออนโดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ ดังแสดงในตารางที่ 4-1 พบว่า ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ภายในซีเมนต์ที่เหลือหลังจากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกน้อยกว่าการใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวชะละลาย ส่วนของสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีเมนต์ด้วยสารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออนมีค่าพีเอชสุดท้ายเท่ากับ 3.83 และ 11.74 ตามลำดับ และมีความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 879 และ 23025 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า สารละลายกรดอะซิติกมีความสามารถในการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดีกว่าน้ำปราศจากไอออนเนื่องจากโลหะดังกล่าวมีคุณสมบัติในการละลายได้ดีในสถานะที่เป็นกรด

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการชะละลายแคลเซียมออกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์ด้วยตัวทำละลายกรดอะซิติก หรือน้ำปราศจากไอออน และศึกษาการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายไปกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ดังปฏิกิริยาที่ (4-1) - (4-3)

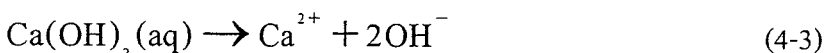
ปฏิกิริยาการชะละลายซีเมนต์ (CaO) ด้วยกรดอะซิติก (CH<sub>3</sub>COOH) (Kakizawa *et al.*, 2001)



ปฏิกิริยาการชะละลายซีเมนต์ (CaO) ด้วยน้ำปราศจากไอออนเกิดผลิตภัณฑ์เป็น Ca(OH)<sub>2</sub>



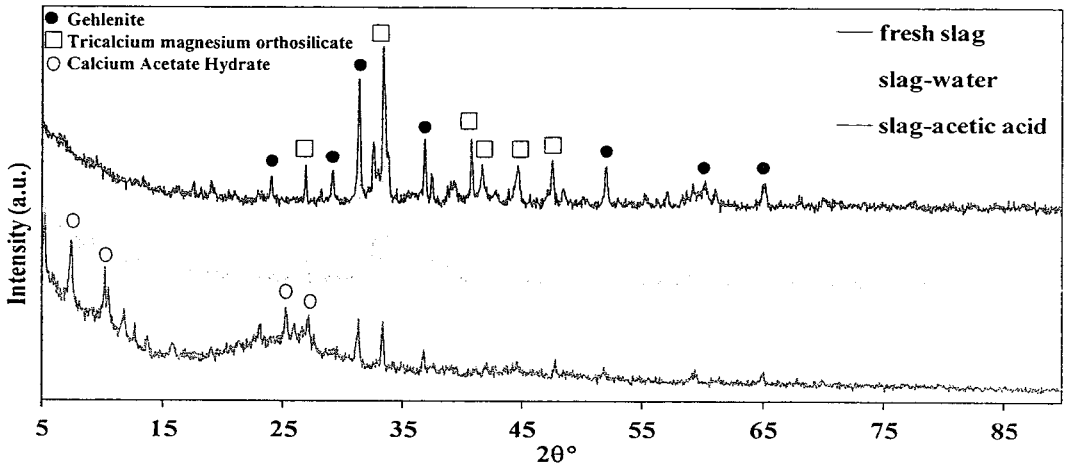
ปฏิกิริยาการแตกตัวของ Ca(OH)<sub>2</sub> แตกตัวเป็นไฮดรอกไซด์ในสารละลายซีเมนต์



ตารางที่ 4-2 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในซีตะกรันที่เหลือจากกระบวนการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออน

องค์ประกอบ	ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในซีตะกรัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ก่อนทำการชะละลาย	หลังการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน	หลังการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติก
CaO	53.21	53.16	20.33

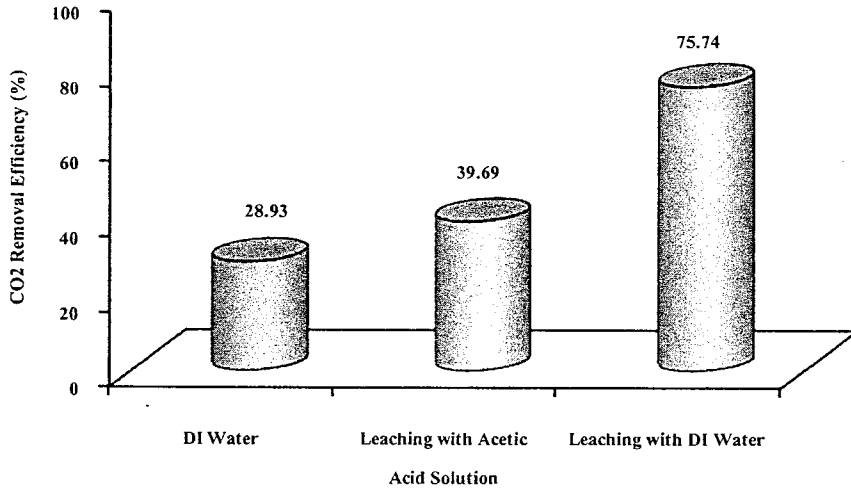
การวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ของซีตะกรันใหม่สด ซีตะกรันหลังจากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนและ หลังจากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็ก-โทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD) แสดงดังภาพประกอบที่ 4-7 พบว่า ซีตะกรันหลังการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนไม่มีการเปลี่ยนแปลง นั่นคือ มี Gehlenite ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ) และ Tricalcium Magnesium Orthosilicate ( $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ ) เหมือนเดิมทั้งก่อนและหลังการชะละลาย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำปราศจากไอออนมาทำการชะละลายนั้นเป็นการชะละลายทางกายภาพ (Lekakh *et al.*, 2008) ส่วนการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เนื่องจากพบว่ามี Calcium Acetate Hydrate ( $\text{C}_4\text{H}_6\text{CaO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})_{0.5}$ ) เกิดขึ้น จึงจัดเป็นการชะละลายทางเคมี นอกจากนี้ จากการทดลองยังพบว่า พีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นตามเวลาการชะละลายจาก pH 1.82 เป็น pH 3.83 เป็นผลมาจากไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) ที่เกิดจากการแตกตัวของกรดอะซิติกแพร่ไปยังซีตะกรัน แล้วละลายสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลผลิตส่วนหนึ่งที่ได้จากปฏิกิริยาไฮดรอลิซิสของซีตะกรัน โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเบสจะทำหน้าที่สะเทินกรดอะซิติกที่ใช้สกัด ทำให้ค่า pH ของสารละลายที่สกัดได้เพิ่มขึ้น (สุชาติพิย์, 2545)



ภาพประกอบที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบของค่าประกอบตะกอนของซีเมนต์ก่อนและหลังการชะละลายวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์

#### 4.1.4 ผลการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> เบื้องต้นด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากกระบวนการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไฮดรอกไซด์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> กับสารดูดซับ 3 ชนิด คือ สารดูดซับน้ำปราศจากไฮดรอกไซด์ สารดูดซับจากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกและสารดูดซับจากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไฮดรอกไซด์ ภายใต้สภาวะดำเนินการเดียวกันดังนี้คือ ที่อัตราการไหลของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซ 0.55 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4-8 ซึ่งเป็นแผนภูมิแสดงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> เมื่อใช้สารดูดซับชนิดต่างๆ



ภาพประกอบที่ 4-8 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> กับสารดูดซึมต่างๆ โดยใช้อัตราการไหลของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซ 0.55 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากภาพประกอบที่ 4-8 พบว่า การใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกด้วยน้ำปราศจากไอออนจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> สูงสุดถึงร้อยละ 75.74 ซึ่งสูงกว่าทั้งสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออน เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นเดียวกันพบว่า สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนมีค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างมากที่สุด คือ 11.14 และ 1640 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในกรณีใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติก พบว่าค่าพีเอชเท่ากับ 4.00 เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าสารละลายนี้มีค่าความเป็นกรดเกินไปจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ต่ำ ส่วนกรณีใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารดูดซึมพบว่าให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ต่ำกว่าทั้งสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออน ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซึมก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออนจะมีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งเรียกรวมการดูดซึมชนิดนี้ว่า การดูดซึมทางเคมี (Chemical Absorption) ทั้งนี้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกด้วยน้ำปราศจากไอออนจะทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน (Carbonation) กับก๊าซ

CO<sub>2</sub> ได้ผลิตภัณฑ์คือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) ทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าการใช้ น้ำปราศจากไอออนมาเป็นสารดูดซับซึ่งเกิดการดูดซับทางกายภาพ (Physical Absorption) (ปกรณ, 2552)

งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซี ตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็นสารดูดซับ เพื่อนำไปทำการศึกษากำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ใน ขั้นตอนการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ต่อไป เนื่องจากสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายด้วย น้ำปราศจากไอออน ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่อัตราการไหลของเหลว 0.6 ลิตรต่อ นาที อัตราการไหลของก๊าซ 0.55 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลาย 600 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับร้อยละ 75.74 โดยเป็นผลมาจากสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายข้างต้น มี สภาพความเป็นด่างทำให้สามารถกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ได้ดีกว่า โดยจะนำสภาวะที่ใช้ในการชะละลาย แคลเซียมไอออน คือ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10:1 (กรัมต่อกรัม) ที่อุณหภูมิห้อง โดย คัดแปลงจากวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) (บุษราภรณ์, 2550) ไปใช้ สำหรับการเตรียมสารดูดซับในการทดลองตอนที่ 2 ต่อไป

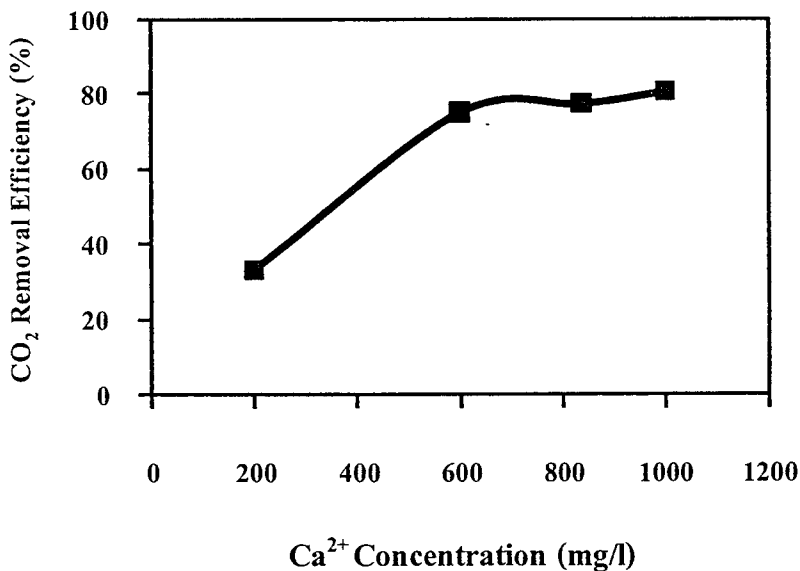
#### 4.2 ศึกษาการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วย น้ำปราศจากไอออนในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ

การศึกษากำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน ด้วยน้ำปราศจากไอออนมาเป็นสารดูดซับในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้คอลัมน์บรรจุในระดับ ห้องปฏิบัติการ ภายในคอลัมน์บรรจุมีการไหลของกระแสก๊าซและกระแสของเหลวที่สวนทาง กัน โดยก๊าซ CO<sub>2</sub> จะถูกดูดซับเข้าสู่กระแสน้ำของเหลวและทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชันกับสารละลาย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนซึ่งจะใช้สารละลาย ใหม่เสมอ และทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของก๊าซ และ ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลาย ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> และหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

#### 4.2.1 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้คอลัมน์บรรจุห้องปฏิบัติการ

##### 4.2.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub>

การศึกษานี้ได้กำหนดให้ความเข้มข้นของก๊าซ CO<sub>2</sub> ก่อนทำการกำจัดให้คงที่ร้อยละ 15 โดยปริมาตร โดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 0.55 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของของเหลวเท่ากับ 0.6 ลิตรต่อนาทีตลอดการทดลอง และทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันตั้งแต่ 200-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ผลการทดลองดังกราฟในภาพประกอบที่ 4-9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> กับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน



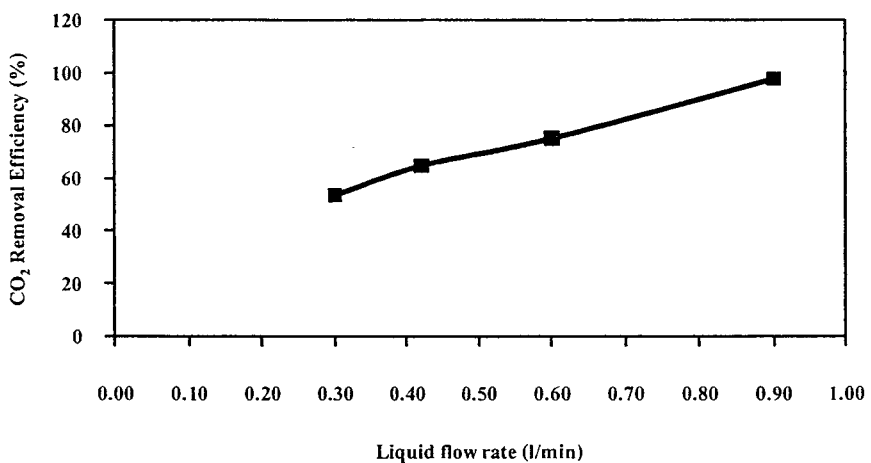
ภาพประกอบที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> กับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน

จากภาพประกอบที่ 4-9 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันเพิ่มขึ้นจาก 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ได้ร้อยละ 30 ถึง 80 โดยประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> จะสูงขึ้น

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันระหว่างก๊าซ  $\text{CO}_2$  กับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันสูงกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ความสามารถในการดูดซับก๊าซ  $\text{CO}_2$  แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวจำกัดปริมาณสารตั้งต้นของการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน ดังนั้นที่สภาวะการดำเนินการในการศึกษานี้จะได้สภาวะที่เหมาะสม คือ ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน เท่ากับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 4.2.1.2 ผลของอัตราการไหลของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ $\text{CO}_2$

การทดลองได้ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ  $\text{CO}_2$  เท่ากับ 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันเท่ากับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตรตลอดการทดลอง โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของเหลวตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.9 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองแสดงดังกราฟในภาพประกอบที่ 4-11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  ต่ออัตราการไหลของของเหลว

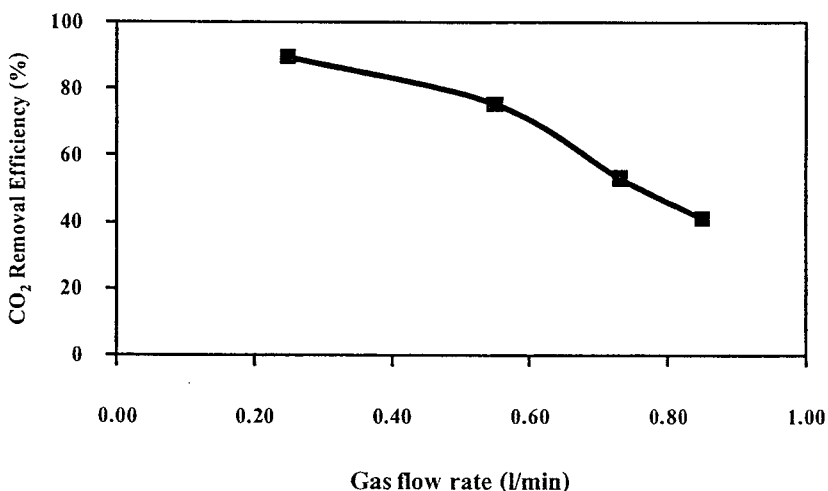


ภาพประกอบที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  กับอัตราการไหลของของเหลว

จากภาพประกอบที่ 4-10 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเพิ่มขึ้นระหว่างร้อยละ 53.92 ถึง 98.01 เนื่องจากอัตราการไหลของของเหลวที่เพิ่มขึ้นในขณะที่อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์คงที่ ทำให้ปริมาณการดูดซึมและพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสของก๊าซและของเหลวในระบบเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราการไหลของสารดูดซึมมีข้อจำกัดในคอลัมน์บรรจุ เพราะถ้าอัตราการไหลของสารดูดซึมต่ำเกินไปจะทำให้เกิด Channeling ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง ดังนั้น การกำหนดช่วงของอัตราการไหลของสารดูดซึมที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ ทั้งนี้การเพิ่มอัตราการไหลของสารดูดซึมแสดงถึงการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริก ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 18

#### 4.2.1.3 ผลของอัตราการไหลของก๊าซ $\text{CO}_2$ ต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ $\text{CO}_2$

การทดลองได้ควบคุมอัตราการไหลของเหลวให้เท่ากับ 0.6 ลิตรต่อนาทีและความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกเท่ากับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตรตลอดการทดลอง โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.85 ลิตรต่อนาที ได้ผลการทดลองดังกราฟในภาพประกอบที่ 4-11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  ต่ออัตราการไหลของก๊าซ



ภาพประกอบที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  กับอัตราการไหลของก๊าซ



จากภาพประกอบที่ 4-11 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นมีผลต่อเวลาในการสัมผัสระหว่างเฟสของก๊าซและเฟสของเหลวลดลงจึงเกิดข้อจำกัดในการดูดซับ เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นจะต้านทานการไหลของสารดูดซับ (lin *et al.*, 2008) อีกทั้งอัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นก็ทำให้มีปริมาณก๊าซ CO<sub>2</sub> เข้ามาในระบบมากขึ้นเลยทำให้ปริมาณแคลเซียมที่อยู่ในสารละลายไม่เพียงพอสำหรับกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

#### 4.3 ผลการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตะกรันในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้คอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการด้วยเทคนิค Response Surface Methodology (RSM) ในการออกแบบการทดลอง

เทคนิค Response Surface Methodology (RSM) เป็นการรวบรวมข้อมูลทางสถิติ และเทคนิคทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและหาจุดที่เหมาะสมในกระบวนการ ซึ่งเทคนิค RSM ประกอบด้วย กลุ่มของตัวแปรตามหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการตอบสนองและตัวแปรอิสระ แผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) เป็นการออกแบบการทดลองทุกระดับของแต่ละปัจจัยห่างจาก Center ของการออกแบบเท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลางแต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 5 ระดับ (- $\alpha$ , -1, 0, 1,  $\alpha$ ) งานวิจัยนี้จึงนำเทคนิค RSM แบบ CCD มาใช้ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตะกรันในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ

##### 4.3.1 ผลการออกแบบการทดลองและผลตอบสนอง (Response)

การศึกษากำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตะกรันในคอลัมน์บรรจุห้องปฏิบัติการโดยใช้หลักการทางสถิติด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD มาช่วยในการออกแบบการทดลอง ซึ่งทำให้ได้จำนวนการทดลองที่ประกอบไปด้วย 17 การทดลอง ทำการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมในการทดลองที่ 18-20 เพื่อศึกษาแนวโน้มของตัวแปรอิสระให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ค่าการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ได้จากการทดลองในแต่ละการทดลองแสดงผลดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากกระบวนการชะละลายซีเมนต์ในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ ที่สภาวะการทดลองต่างๆ ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD

การทดลอง	อัตราการไหล ของเหลว (ลิตรต่อนาที)	อัตราการไหล ของก๊าซ (ลิตรต่อนาที)	ความเข้มข้น ของแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพ การกำจัด CO <sub>2</sub> (ร้อยละ)
1	0.42	0.37	362	77.72
2	0.42	0.37	838	91.22
3	0.42	0.73	362	29.29
4	0.42	0.73	838	61.54
5	0.78	0.37	362	88.33
6	0.78	0.37	838	95.69
7	0.78	0.73	362	51.10
8	0.78	0.73	838	83.18
9	0.6	0.55	600	75.74
10	0.6	0.55	600	75.74
11	0.6	0.55	600	75.45
12	0.9	0.55	600	98.01
13	0.3	0.55	600	53.92
14	0.6	0.85	600	41.16
15	0.6	0.25	600	89.64
16	0.6	0.55	1000	81.05
17	0.6	0.55	200	33.50
18	0.6	0.73	600	53.26
19	0.42	0.55	600	65.12
20	0.6	0.55	838	77.81

### 4.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub>

จากข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายชีตะกรันในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ ที่แสดงในตารางที่ 4-3 สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> กับตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยเทคนิค RSM โดยใช้โปรแกรม Design Expert Software จะได้แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ซึ่งมีรูปแบบสมการแบบ Quadratic model ทำให้ได้แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ (4-4)

$$y = 72.52 + 54.11x_1 - 164.79x_2 + 0.079x_3 + 0.13x_2x_3 - 8.28 \times 10^{-5}x_3^2 \quad (4-4)$$

เมื่อ  $y$  = ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> (ร้อยละ)

$x_1$  = อัตราการไหลของของเหลว (ลิตรต่อนาที)

$x_2$  = อัตราการไหลของก๊าซหรืออัตราการไหลอากาศเสีย (ลิตรต่อนาที)

$x_3$  = ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายชีตะกรัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

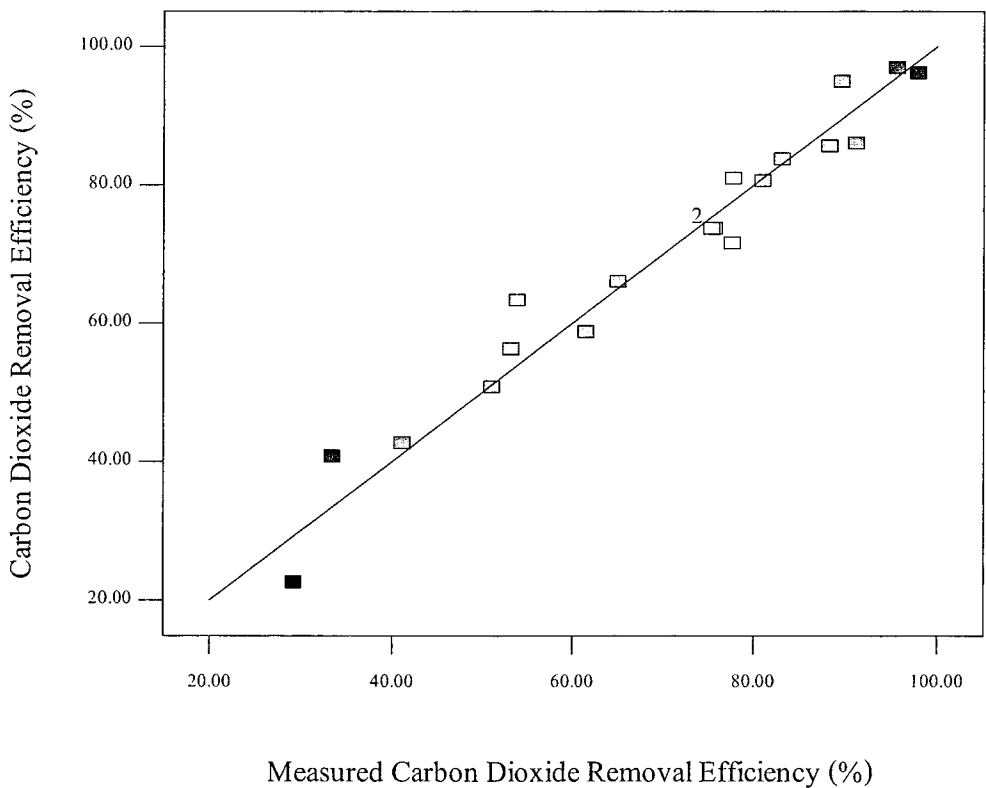
การพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองที่ได้จากสมการที่ (4-4) สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรบ่งบอกถึงความสำคัญของตัวแปรนั้นต่อผลประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยหากสัมประสิทธิ์ของตัวแปรใดมีค่าสูงกว่าตัวแปรอื่น (ไม่คิดเครื่องหมายบวกหรือลบ ซึ่งเครื่องหมายแสดงถึงผลของตัวแปรอิสระที่แปรผันตรงหรือแปรผกผันกับตัวแปรตาม ตามลำดับ) แสดงถึงตัวแปรนั้นมีผลต่อค่า  $y$  สูงกว่าค่าอื่นๆ จากแบบจำลองสมการที่ได้อยู่ในรูปสมการกำลังสอง (Quadratic Equation) ประกอบด้วยเทอมผลของตัวแปรเชิงเส้น ( $x_1$ ,  $x_2$ ) และ ( $x_3$ ) เทอมของตัวแปรเชิงซ้อน ( $x_2x_3$ ) เทอมของตัวแปรกำลังสอง  $x_3^2$  และค่าสัมประสิทธิ์จุดตัดและจากการพิจารณาการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของสมการ (4-4) ด้วยวิธี ANOVA แสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองสำหรับกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub>

Source of Variation	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-value	P-value Prob > F	Remarks
Model	7375.22	5	1475.04	36.48	< 0.0001	significant
$x_1$	1359.01	1	1359.01	33.61	< 0.0001	significant
$x_2$	3594.68	1	3594.63	88.91	< 0.0001	significant
$x_3$	2048.79	1	2048.79	50.68	< 0.0001	significant
$x_2x_3$	236.19	1	236.19	5.84	0.0029	significant
$x_3^2$	311.61	1	311.61	7.71	0.0149	significant
Residual	566.01	14	40.43			
Lack of Fit	565.95	12	47.16	1680.06	0.006	significant
Pure Error	0.056	2	0.028			
Correlation Total	7942.23	19				
R <sup>2</sup>	0.9287		Adjusted R <sup>2</sup>	0.9033		
Predicted R <sup>2</sup>	0.8180		Adequate Precision	21.363		

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองดังตารางที่ 4-4 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ภายใต้ช่วงของเงื่อนไขการดำเนินงานดังข้อมูลที่ให้ไว้ในตารางดังกล่าว จะเห็นว่าตัวแปรที่ศึกษาทุกตัวที่ปรากฏในสมการมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่า P-value ของตัวแปรแต่ละตัวนั้น ถ้าตัวแปรใดมีค่า P-value ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนตัวแปรที่มีค่า P-value สูงกว่า 0.10 ถือว่าไม่มีนัยสำคัญจึงต้องตัดทิ้งไป

(Korbahiti *et al.*, 2008) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation) ( $R^2 = 0.9287$ ) ค่า  $R^2$  เป็นค่าสถิติที่แสดงถึงสัดส่วนหรือร้อยละของความผิดพลาดที่แบบจำลองสามารถอธิบายได้จากสมการการประมาณและเป็นค่าที่มีความสำคัญในการพิจารณาความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีความสำคัญอีกค่าหนึ่ง กล่าวคือค่า  $R^2$  ควรมากกว่า 0.75 จึงเป็นค่าที่ยอมรับได้ (Seyede *et al.*, 2007) โดยค่า  $R^2$  ที่ดีควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ส่วนค่า  $R^2_{adj}$  หากมีค่าใกล้เคียงกับค่า  $R^2$  แสดงว่าแต่ละเทอมในแบบจำลองที่ได้มีส่วนส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมด โดยจากการทดลองพบว่า  $R^2$  และ  $R^2_{adj}$  เท่ากับ 0.9287 และ 0.9033 ตามลำดับ จากการทดลองค่า  $R^2_{adj}$  มีค่าต่ำกว่า  $R^2$  เนื่องจากได้จากการปรับค่าผลการทดลองและค่าจากแบบจำลองให้มีความสัมพันธ์กันมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์ดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบค่าการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองสมการเส้นโค้งกับค่าที่ได้จากผลการทดลองซึ่งแตกต่างกันเพียงร้อยละ 7.13 เท่านั้น โดยแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-12



ภาพประกอบที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส  $CO_2$  ที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-4)

ภาพประกอบที่ 4-12 แสดงถึงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-4) ซึ่งข้อมูลที่ได้มีค่าการกระจายตัวรอบเส้นที่แสดงความสอดคล้องในระดับที่ยอมรับได้ ( $R^2 = 0.928$ ) แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ในช่วงตัวแปรที่ศึกษาได้ดี

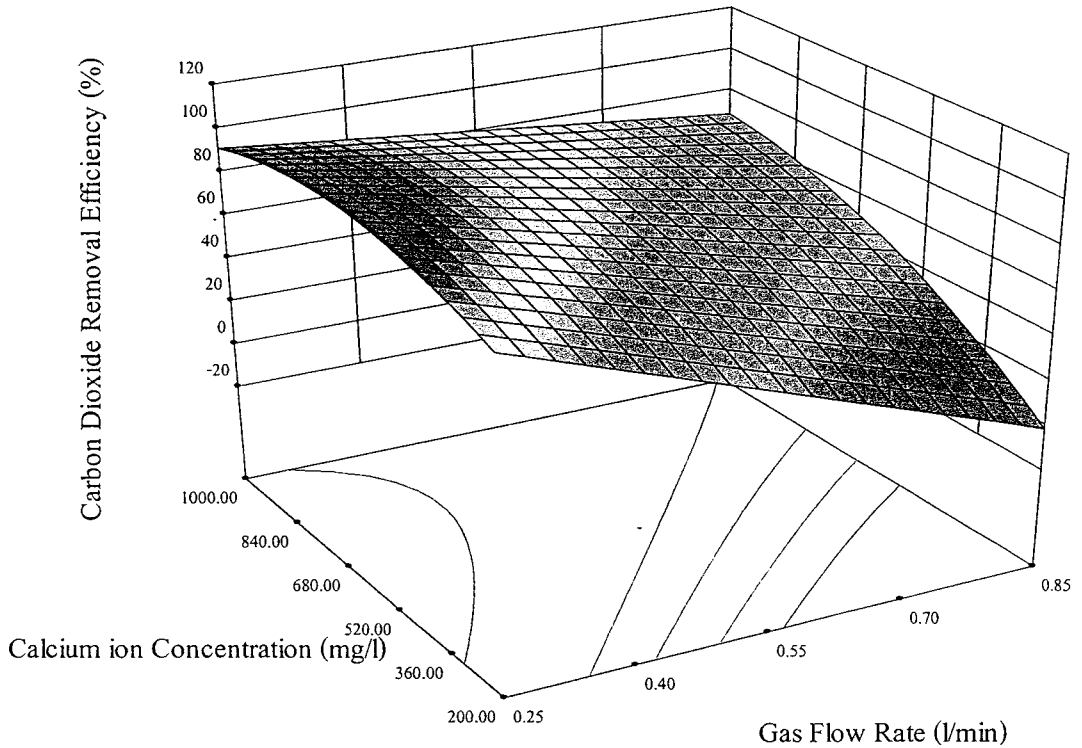
### 4.3.3 พื้นผิวตอบสนองของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub>

จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำผลมาแสดงความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ในรูปกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟ 3 มิติ แสดงไว้ดังภาพประกอบที่ 4-13 ถึง 4-14 ข้อมูลเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองของตัวแปรที่มีความแตกต่างกัน กราฟพื้นผิวตอบสนองสามารถนำมาใช้ในการอธิบายและระบุผลกระทบของตัวแปรแต่ละตัวในด้านปฏิสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างตัวแปร ซึ่งจะแสดงผลของตัวแปรอิสระครั้งละ 2 ตัวแปร คือ อัตราการไหลของของเหลว ( $x_1$ ) อัตราการไหลของก๊าซ ( $x_2$ ) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน ( $x_3$ ) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.3.3.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซ ( $x_2$ ) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน ( $x_3$ )

ผลของอัตราการไหลของก๊าซ ( $x_2$ ) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน ( $x_3$ ) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> เมื่อนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในรูปของกราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงผลการทดลองได้ดังภาพประกอบที่ 4-13 พบว่าผลของอัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์หน้า  $x_2$  ในสมการ (4-4) ซึ่งมีค่าเป็นลบ เท่ากับ 164.79 เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นมีผลต่อเวลาในการสัมผัสระหว่างเฟสของก๊าซและเฟสของเหลวลดลงจึงทำให้การดูดซับก๊าซ CO<sub>2</sub> ลดลง (Lin et al., 2008) นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียม ไอออนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้นซึ่ง

เป็นไปตามสัมประสิทธิ์หน้า  $x_3$  ในสมการ (4-4) ซึ่งมีค่าเป็นบวก เท่ากับ 0.079 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเสมือนเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อน (Driving Force) ในการเกิดปฏิกิริยาและอัตราการดูดซึมของก๊าซ  $\text{CO}_2$  จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  เพิ่มขึ้น ทั้งผลของอัตราการไหลของก๊าซ  $\text{CO}_2$  และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $x_2, x_3$ ) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  อย่างมีนัยสำคัญ

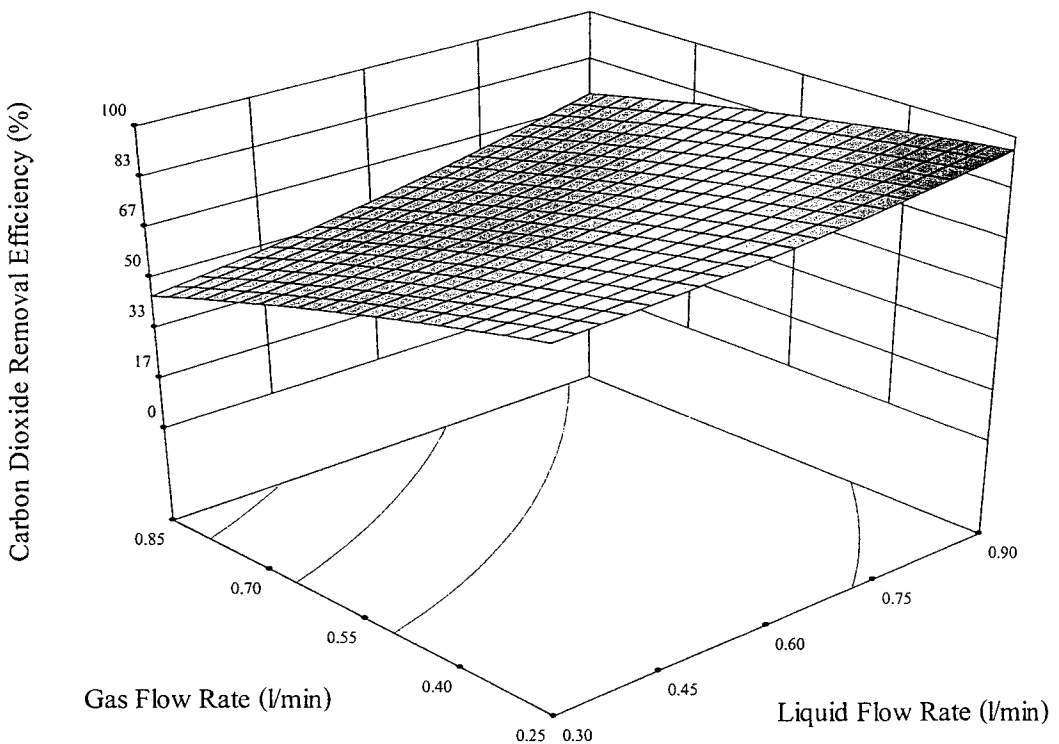


ภาพประกอบที่ 4-13 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการไหลของก๊าซ ( $x_2$ ) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน ( $x_3$ ) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$

#### 4.3.3.2 ผลของอัตราการไหลของของเหลว ( $x_1$ ) และอัตราการไหลของก๊าซ ( $x_2$ )

ผลของอัตราการไหลของของเหลว ( $x_1$ ) และอัตราการไหลของก๊าซ ( $x_2$ ) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  เมื่อนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในรูปของกราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงผลการทดลองได้ดังภาพประกอบที่ 4-14 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของ

ของเหลวเพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับก๊าซ  $\text{CO}_2$  สามารถเกิดได้เร็วขึ้นและเป็นการเพิ่มปริมาณของของเหลวจะเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างเฟสของเหลวกับเฟสของก๊าซส่งผลให้ประสิทธิภาพสูง จากสมการ (4-3) เมื่อพิจารณาอิทธิพลในเทอมของอัตราการไหลของของเหลว จะเห็นได้จากสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร ( $x_1$ ) ที่มีค่าเป็นบวก เท่ากับ 54.11 ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  ของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และอัตราการไหลของก๊าซลดลงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (4-3) เมื่อพิจารณาอิทธิพลในเทอมของอัตราการไหลของก๊าซ พบว่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร ( $x_2$ ) ที่มีค่าเป็นลบ เท่ากับ 164.79

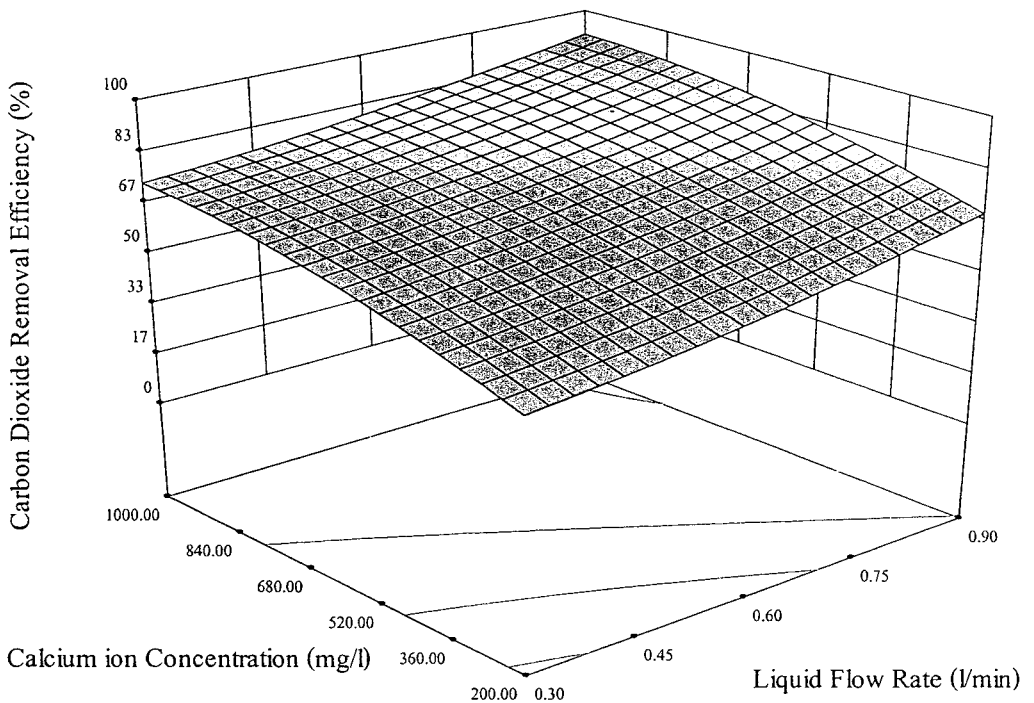


ภาพประกอบที่ 4-14 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการไหลของของเหลว ( $x_1$ ) และอัตราการไหลของก๊าซ ( $x_2$ ) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  ที่ระดับความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร



#### 4.3.3.2 ผลของอัตราการไหลของเหลว ( $x_1$ ) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน ( $x_3$ )

ภาพประกอบที่ 4-15 แสดงผลของปฏิสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปรระหว่างอัตราการไหลของเหลว ( $x_1$ ) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน ( $x_3$ ) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.55 ลิตรต่อนาที จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของเหลวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์หน้า  $x_1$  ในสมการ (4-3) ซึ่งมีค่าเป็นบวก เท่า 54.11 เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของเหลวเพิ่มขึ้นก็จะทำให้มีสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อน (Driving force) ในการเกิดปฏิกิริยาและอัตราการดูดซึมของก๊าซ  $\text{CO}_2$  เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  เพิ่มขึ้น และในทำนองเดียวกันเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  เพิ่มขึ้นสูงขึ้น



ภาพประกอบที่ 4-15 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ ( $x_2$ ) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน ( $x_3$ ) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$

#### 4.3.4 ผลของสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากสมการแบบจำลองที่ (4-1) การกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงของตัวแปรที่ทำการศึกษา สามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวทำนายประสิทธิภาพสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการได้ ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาผลเฉลยของสภาวะที่เหมาะสมได้โดยใช้โปรแกรม Design Expert Software จะให้ค่าที่ดีที่สุดที่ทำให้ผลการตอบสนองพื้นผิวหรือประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด และสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสภาวะการดำเนินการของตัวแปรที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วยอัตราการไหลของของเหลว ( $x_1$ ) อัตราการไหลของแก๊ส ( $x_2$ ) และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริก ( $x_3$ ) จากการวิเคราะห์ด้วยแนวทางข้างต้น พบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสม (Optimum Condition) ในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ คือ อัตราการไหลของของเหลว 0.77 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.25 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริก 725 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้คงที่ตลอดการทดลองที่ร้อยละ 15 โดยปริมาตร ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดร้อยละ 97.83 โดยแสดงไว้ดังตารางที่ 4-5

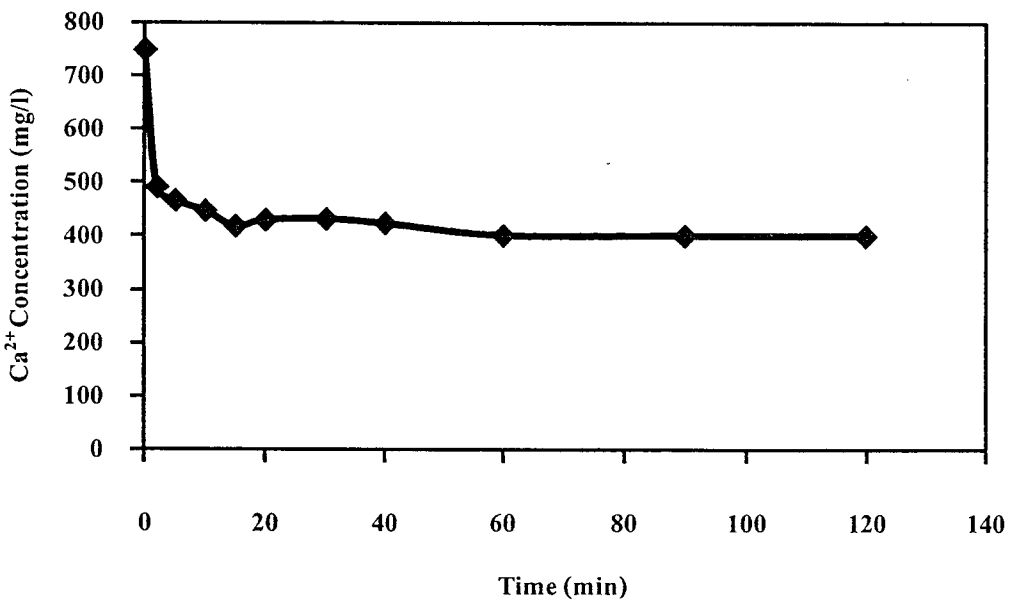
**ตารางที่ 4-5** สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับผลการทดลอง

อัตราการไหล ของเหลว (ลิตรต่อนาที)	อัตราการไหล ของแก๊ส (ลิตรต่อนาที)	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพ การกำจัด CO <sub>2</sub> (%)	
			การทำนาย	การทดลอง
( $x_1$ )	( $x_2$ )	( $x_3$ )		
0.77	0.25	725	100	97.83

จากตารางที่ 4-5 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้สามารถใช้ทำนายผลการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในระดับดี และพบว่าผลลัพธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 5 เป็นตัวบ่งบอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์

#### 4.3.5 ประสิทธิภาพที่สภาวะที่เหมาะสมกับเวลาการใช้งาน

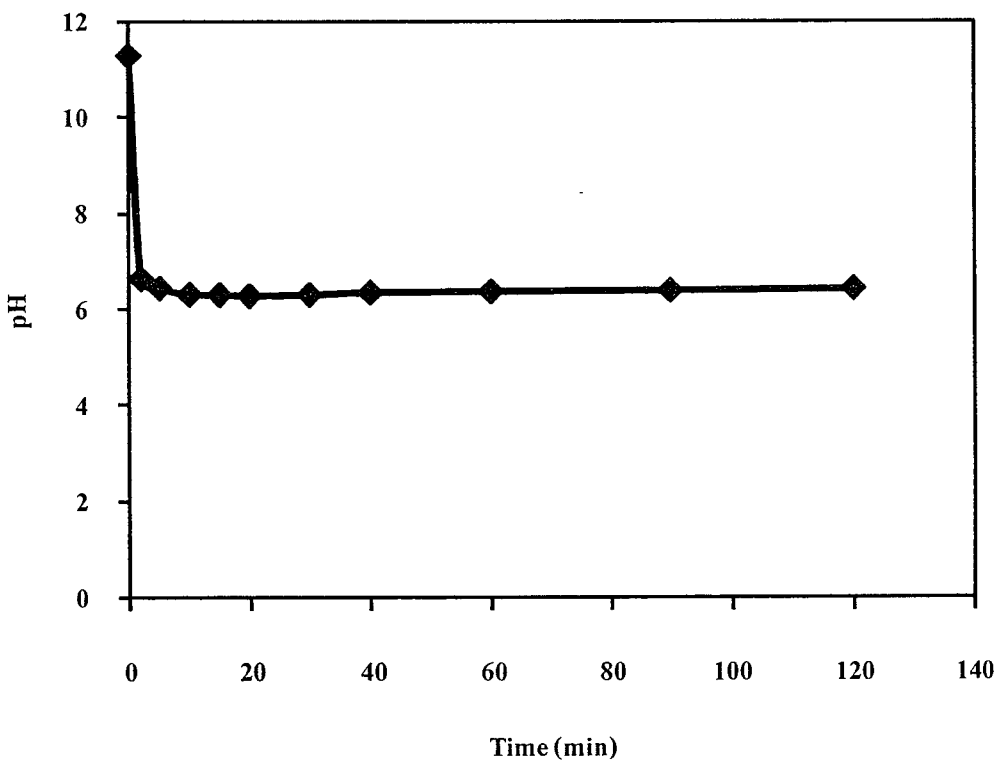
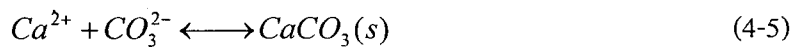
ในการศึกษานี้ได้นำผลของสภาวะที่เหมาะสมมาทำการศึกษาผลของเวลาในการกำจัดก๊าซ  $\text{CO}_2$  โดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกด้วยน้ำปราศจากไอออนมาเป็นสารดูดซับในคอลัมน์บรรจุในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของเหลว 0.77 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซ 0.25 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลาย 725 มิลลิกรัมต่อลิตรและการทดลองนี้เป็นการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยซีตริกแบบวนซ้ำสารละลายในระบบเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แสดงผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4-16 ถึง 4-17 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ค่าพีเอช และประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ช่วงเวลาต่างๆ ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลา

จากภาพประกอบที่ 4-16 พบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงจาก 747.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 475.89 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วง 2 นาทีแรก หลังจากนั้นความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์คงที่ที่ 430 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซ  $\text{CO}_2$  เป็นปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน ก๊าซ  $\text{CO}_2$  จะเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอเนตไฮดรอกไซด์ ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) เข้าทำปฏิกิริยา

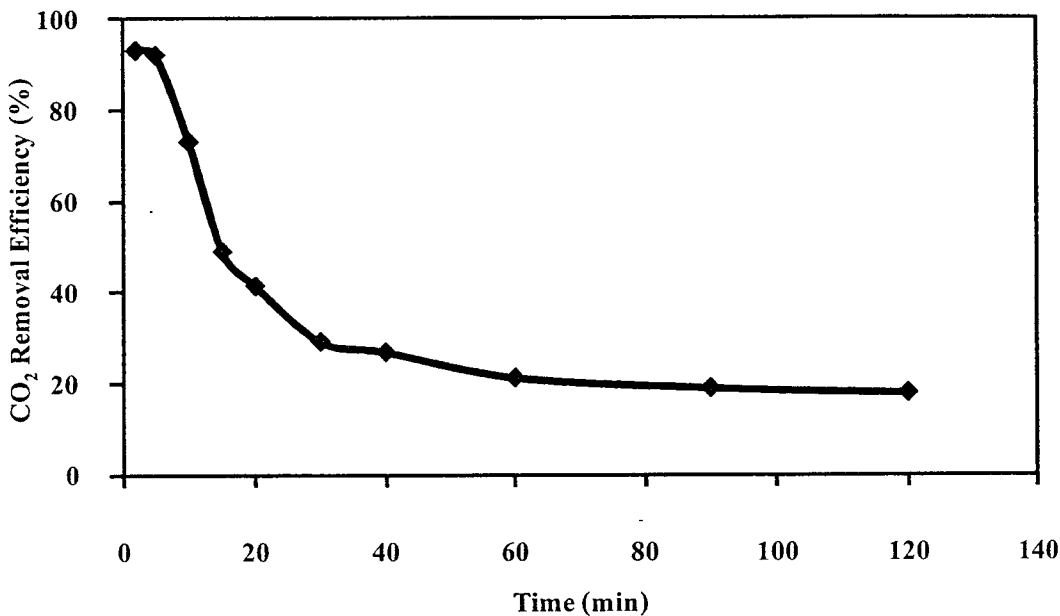
กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยาดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณไฮดรอกไซด์ (OH<sup>-</sup>) ในระบบ แต่หลังจากเวลาผ่านไป 2 นาที พีเอชของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงจาก 11.3 เหลือ 6.48 ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตไม่สามารถเกิดขึ้นได้เพราะการเกิดปฏิกิริยาข้างต้นจะเกิดขึ้นได้ที่พีเอชมากกว่า 8.3 ส่งผลให้ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เสถียรสอดคล้องกับงานวิจัยของ จุฑามาศ (2548) ซึ่งพบว่าการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลมาจากค่าสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเมื่อเกิดสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่สูงกว่าค่าการละลายน้ำ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (4-5)



ภาพประกอบที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลา

จากภาพประกอบที่ 4-17 พบว่าค่าพีเอชของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงหลังปฏิกิริยาเกิดขึ้นผ่านไป 2 นาที พีเอชสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงจาก 11.3 เป็น 6.48 และ

จะคงที่ เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนจะถูกใช้ในการจับกับไฮโดรเจนไอออนที่มาจากการแตกตัวของกรดคาร์บอนิก ( $H_2CO_3$ ) และไบคาร์บอเนตไอออน ( $HCO_3^-$ ) เกิดเป็นคาร์บอเนตไอออน ( $CO_3^{2-}$ ) ส่งผลให้ทำให้ค่าความเป็นเบสลดลงดังแสดงในสมการที่ (2-8) ถึง (2-15)



ภาพประกอบที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ช่วงเวลาต่างๆ

การศึกษากำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่เวลาต่างๆ พบว่าการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> จะมีประสิทธิภาพสูงในตอนต้น แต่เมื่อเวลาผ่านไป ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-18 เนื่องจากในปฏิกิริยาคูดซิมก๊าซ CO<sub>2</sub> นั้นสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนที่ใช้เป็นสารคูดซิมนั้นจะค่อยๆ คูดซิมก๊าซ CO<sub>2</sub> และอิ่มตัว ทำให้ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของก๊าซ CO<sub>2</sub> และในสารละลายแคลเซียมไอออนลดลง แรงขับเคลื่อนในระบบจึงลดลง และเมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> จะคงที่

4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต (Economic analysis)

4.4.1 การประมาณค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนซึ่งใช้เป็นสารดูดซับก๊าซ CO<sub>2</sub>

ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการชะละลายประกอบด้วย ชีตะกรัน ค่าไฟฟ้าจากการบัด ค่าไฟฟ้าจากการร่อนตะแกรง ค่าไฟฟ้าจากการอบและค่าไฟฟ้าจากการกวนผสม ซึ่งสามารถคำนวณจำนวนหน่วยการใช้งานพลังงานไฟฟ้าจากสมการที่ 4-5 และส่วนของอัตราค่าไฟฟ้าและรายละเอียดการคำนวณค่าใช้จ่ายแสดงดังตารางที่ 4-6 และ 4-8 ตามลำดับ

$$\text{Electricity Unit} = \frac{\text{Power (watt)} \times \text{Time (hr)}}{1000} \tag{4-5}$$

ตารางที่ 4-6 อัตราค่าไฟฟ้าประเภทกิจการขนาดเล็ก ซึ่งมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยในเวลา 15 นาทีสูงสุดต่ำกว่า 30 กิโลวัตต์ โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2554)

อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาทต่อหน่วย)
150 หน่วยแรก (หน่วยที่ 0 - 150)	2.7628
250 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 151 - 400)	3.7362
เกิน 400 หน่วยขึ้นไป (หน่วยที่ 401 เป็นต้นไป)	3.9361

$$\text{Cost} = W \times C \tag{4-6}$$

เมื่อ  $C$  = ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)

$w$  = หน่วยการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)

ตารางที่ 4-7 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 100 ลิตร

ต้นทุนค่าใช้จ่าย	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ขี้ตะกรัน	10 กิโลกรัม	0.4 บาท/กิโลกรัม	4
ค่าไฟฟ้า			
• การบด	4.20 หน่วย		11.60
• การคัดขนาด	1.46 หน่วย	2.7628 บาท/หน่วย	4.03
• การอบ	37.20 หน่วย		102.78
• การกวน	1.65 หน่วย		4.56
น้ำ	100 ลิตร	4 บาท/ลบ.ม.	0.4
รวม			127.4

จากตารางที่ 4-7 พบว่าค่าใช้จ่ายในการเตรียมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์คือ 1.27 บาท/ลิตร และค่าต้นทุนของสารดูดซึ่มสำหรับการกำจัด CO<sub>2</sub> เมื่อพิจารณา L/G ที่เหมาะสม คือ L/G = 3.08 โดยให้ประสิทธิภาพ 97% ดังนั้นถ้าใช้สารละลาย 100 ลิตรจะสามารถบำบัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ได้ประมาณ 32.5 ลิตร คิดเป็น 3.92 บาท/ลิตรของก๊าซ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าต้นทุนในการเตรียมสารดูดซึ่มพบว่าค่าใช้จ่ายเกือบทั้งหมดเป็นค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบขี้ตะกรัน (102.78 บาท จากค่าไฟฟ้าทั้งหมด 123 บาท) ซึ่งถ้าปรับขั้นตอนเตรียมขี้ตะกรันให้เหมาะสมก็จะสามารถลดต้นทุนของสารดูดซึ่มและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด CO<sub>2</sub> ลงได้อย่างมีนัยสำคัญ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาทดลองในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ในอากาศด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตริกในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 การศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตริกในถังปฏิกรณ์แบบกะ และตอนที่ 2 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ในคอลัมน์แบบบรรจุ ขนาดต้นแบบ โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 การศึกษาการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกจากซีตริกด้วยสารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออน

จากการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออน พบว่าสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกด้วยน้ำปราศจากไอออน ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> สูงกว่าการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกด้วยน้ำปราศจากไอออน ที่สภาวะในการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์คือ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10:1 (กรัมต่อกรัม) ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับการเตรียมสารดูดซับเพื่อนำไปทำการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ในขั้นตอนการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ในคอลัมน์บรรจุต่อไป

##### 5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ

การศึกษาการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกด้วยน้ำปราศจากไอออนมาเป็นสารดูดซับในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยใช้คอลัมน์บรรจุในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้เทคนิค RSM ในการออกแบบการทดลองแบบ CCD ทั้งหมด 20 การทดลอง



จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิคนี้ได้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะต่างๆ ในช่วงขอบเขตของการศึกษาได้ สมการ (5-1)

$$y = 72.52 + 54.11x_1 - 164.79x_2 + 0.079x_3 + 0.13x_2x_3 - 8.28 \times 10^{-5} x_3^2 \quad (5-1)$$

เมื่อ  $y$  = ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ)

$x_1$  = อัตราการไหลของของเหลว (ลิตรต่อนาที)

$x_2$  = อัตราการไหลของแก๊สหรืออัตราการไหลอากาศเสีย (ลิตรต่อนาที)

$x_3$  = ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

และได้สถานะที่เหมาะสมที่ใช้ในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน แสดงดังตารางที่ (5-1)

**ตารางที่ 5-1** สถานะที่เหมาะสมในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ

อัตราการไหลของเหลว (ลิตรต่อนาที) ( $x_1$ )	อัตราการไหลของแก๊ส (ลิตรต่อนาที) ( $x_2$ )	L/G ratio	ความเข้มข้นของแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตร) ( $x_3$ )	ประสิทธิภาพการกำจัด CO <sub>2</sub> (ร้อยละ) (y)
0.77	0.25	3.08	725	97.83

จากการทดสอบสถานะที่เหมาะสมพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้คาดการณ์ไว้ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 5 จึงต่อบ่งบอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการได้

จากการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ สรุปได้ว่า สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นสารดูดซับมีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> สูงถึงร้อยละ 97.83 ซึ่งเมื่อทำการทดลองเทียบกับเวลาพบว่าเมื่อเวลาในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้น ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ก็มีแนวโน้มค่อยๆ ลดลง ดังนั้นในการนำกระบวนการนี้ไปใช้งานจริงจำเป็นต้องมีการเติมสารละลายใหม่สดเพื่อควบคุมความเข้มข้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์และค่าพีเอชให้คงที่ที่สภาวะที่เหมาะสมก็จะสามารถควบคุมประสิทธิภาพของระบบให้คงที่ที่ประสิทธิภาพสูงสุดได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

5.2.1 ควรปรับปรุงและศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลายซีตริกแอซิดเพื่อให้ได้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมกับการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยคำนึงถึงค่าพีเอชของสารละลายและควรมีการศึกษาการเติมสารละลายใหม่สดเพื่อควบคุมความเข้มข้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์

5.2.2 ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาในกระบวนการชะละลายซีตริกแอซิดและกระบวนการดูดซับก๊าซ CO<sub>2</sub>

5.2.3 ควรศึกษาต่อจากผลงานวิจัยนี้เพื่อการประยุกต์ใช้สำหรับการใช้งานจริงในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยการกำจัดก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ปล่อยออกจากปล่องควันของโรงงานอุตสาหกรรมจริง

## บรรณานุกรม

- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2554. อัตราค่าไฟฟ้า; ประเภทที่ 2 กิจการขนาดเล็ก. Available Online:  
<http://www.erc.or.th/ERCWeb2/Upload/Download/PEA-Tariff.pdf>
- จุฑามาศ โชติพานิช. 2548. ผลของลโซเดียมคลอไรด์ต่อการตกตะกอนร่วมของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- จรรยา อินทมณี. 2546. การวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1 พฤษภาคม 2545. 187-196. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ชาคริต ทองอุไร. 2544. หลักปฏิบัติการเฉพาะหน่วย 2. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธีรภัทร์ ตันกุลโรจน์. 2552. การบำบัดกลิ่นในก๊าซเสียที่เกิดจากระบวนการอบยางแท่งโดยการดูดซึมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโมโนเอทานอลเอมีนในคอลัมน์บรรจุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- บุษราภรณ์ ทรัพย์ห้วง. 2550. การกักเก็บโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปกรณ์ ถนอมพงษ์ชาติ. 2552. การแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพโดยการดูดซับของเหลวในคอลัมน์อัดตัว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ประภคต นัทรแสงอุทัย. 2542. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปานทิพย์ อัดนวนนิช. การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ Climatic Change. ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

- ปารเมศ ชุติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ
- ไพศาล จิตธรรม. 2551. การตรวจหาปริมาณก๊าซ CO<sub>2</sub> และ CO ในระบบปิดด้วยเครื่อง Gas-Chromatography และ CO<sub>2</sub>, CO sensors. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- แม่น อมรสิทธิ์ และคณะ. 2552. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร. 10700
- มฤดี ประกอบกลิ่น. 2542. การออกแบบที่เหมาะสมของระบบแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เศรษฐศาสตร์กับสิ่งแวดล้อม. 2551. International Cooperation Study Center. Thammasat University. Available online:  
[www.apecthai.org/apec/th/environment.php?year=2012](http://www.apecthai.org/apec/th/environment.php?year=2012)
- ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น. 2552. การจำลองเชิงความร้อนของการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2540. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. คณะกรรมการจัดทำคู่มือการวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3.
- สุชาติ อินทวงศ์. 2545. การเปรียบเทียบวิธีการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุยึดประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สิริภัทร ธรรมมนูญกุล, จตุพร อุปสัน, เอกราช รอดสว่าง และสมสกุล คงรอด. 2552. การผลิตโลหะ และ โลหะผสม. มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม. <http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/5513101/termwork/iron/iron2.html> (สืบค้นเมื่อ 25 ธันวาคม 2552)

สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2553. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

อิสรพงษ์ พงษ์ศิริกุล. 2544. การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับ  
อุตสาหกรรมเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีการ  
พัฒนาผลิตภัณฑ์. คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Ahmad, A.L., Sunarti, A.R., Lee, K.T., and Fernando, W.J.N. 2010. CO<sub>2</sub> removal using membrane gas absorption. International Journal of Greenhouse Gas Control. 4: 495–498.

Aroonwilas, A., Veawab, A. and Tontiwachwuthikul, P.1999. Behavior of the Mass-Transfer coefficient of Structured Packing in CO<sub>2</sub> absorbers with chemical reactions. Ind. Eng. Chem. RES. 38: 2044-2050.

Weijun B., Huiquan L., and Yi Z.. 2010. Selective Leaching of Steelmaking Slag for Indirect CO<sub>2</sub> Mineral Sequestration. Ind. Eng. Chem. Res. 49: 2055-2063.

Bonenfant, D., Kharoune, L., Sauve, S., Hausler, R., Niquette, P., Mimeault, M., and Kharoune, M. 2008. CO<sub>2</sub> Sequestration Potential of Steel Slags at Ambient Pressure and Temperature. Ind. Eng. Chem. Res. 47(20): 7610-7616.

Bonenfant, D., Kharoune, L., Sauve, S., Hausler, R., Niquette, P., Mimeault, M., and Kharoune, M. 2009. Molecular analysis of carbon dioxide adsorption processes on steel slag oxides. International Journal of Greenhouse Gas Control. 3: 20-28.

- Chen, J.C., Fang, G.C. and Tag, J.T. 2003. Removal of carbon dioxide by spray dryer. *Chemosphere*. 59: 99-105.
- Eloneva, S., Teir, S., Salminen, J., Fogelholm, C. J., and Zevenhoven, R. 2008. Steel Converter Slag as a Raw Material for Precipitation of Pure Calcium Carbonate. . *Ind. Eng. Chem. Res.* 47: 7104-7111.
- Garcia S., Gil M.V., Martin C.F., Pis J.J., Rubiera F. and Pevida C.. 2011. Breakthrough adsorption study of a commercial activated carbon for pre-combustion CO<sub>2</sub> capture. *Chemical Engineering Journal*. 171: 541-556.
- Georgiou D., Petrolekas P.D., Hatzixanthis S., Aivasidis A.. 2007. Absorption of carbon dioxide by raw and treated dye-bath effluents. *Journal of Hazardous Materials*. 144: 369-376.
- Hisyamudin, B. M. N. N., Yokoyama, S., and Umemoto, M. 2009. Absorption of CO<sub>2</sub> in EAF Reducing Slag from Stainless Steel Making Process by Wet Grinding. *Engineering and Technology* .56.
- Huijgen, W. J. J., Witkamp, G. J., and Comans, R. N. J. 2005. Mineral CO<sub>2</sub> Sequestration by SteelSlag Carbonation. *Environ. Sci. Technol.* 39(24) : 9676-9682.
- Huijgen, W. J. J., Witkamp, G. J., and Comans, R. N. J. 2006. Mechanisms of Aqueous Wollastonite Carbonation as a Possible CO<sub>2</sub> Sequestration Process. *Chemical Engineering Science* .16: 4242–4251.
- Joseph, G.T. and Beachler, D.S. 1981. *Control of Gaseous Emission: Student Manual* New York, Northrop Service, p. 1080.
- Kakizawa M, Yamasaki A, Yanagisawa Y. 2001. A new CO<sub>2</sub> disposal process via artificial weathering of calcium silicate accelerated by acetic acid. *Energy*. 26(4): 341-354.

- Korbahti, K. B., and Tanyolac, A. 2008. Electrochemical treatment of simulated textile wastewater with industrial components and Levafix Blue CA reactive dye: Optimization through response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials*. 151: 422–431.
- Lee, J. S., Kim, J. H., Kim, J. T., Suh, J. K., Lee, J. M., and Lee, C. H. 2002. Adsorption Equilibria of CO<sub>2</sub> on Zeolite 13X and Zeolite X/Activated Carbon Composite. *J. Chem. Eng.* 47: 1237-1242.
- Sheng H. Lin, Ching T. Shyu. 1999. Performance characteristics and modeling of carbon dioxide absorption by amines in a packed column. *Waste Management*. 19: 255-262.
- Lin, C.C., Chen, B.C., Chen, Y.S. and Hsu, S.K. 2008. Feasibility of a cross flow rotating packed bed in removing carbon dioxide from gaseous streams. *Separation and purification Technology*. 62: 507-512.
- Lekakh, S. N., Robertson, D.G.C., Rawlins, C. H., Richards, V. L., and Peaslee, K. D. 2008. Investigation of a Two-Stage Aqueous Reactor Design for Carbon Dioxide Sequestration Using Steelmaking Slag. *Metallurgical and Materials Transactions B* .39B: 485-492.
- McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P. 1993. *Unit Operation of Chemical Engineering*, 5<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill International Edition. 686-730.
- Prigiobbe, V., Poletini, A., and Baciocchi, R. 2009. Gas–solid carbonation kinetics of Air Pollution Control residues for CO<sub>2</sub> storage. *Chemical Engineering Journal*. 148: 270–278.
- Rao, A. B. and Rubin, E. S., 2002. *A Technical, Economic and Environmental Assessment of Amine-based CO<sub>2</sub> Capture Technology for Power Plant Greenhouse Gas Control*. Carnegie Mellon University. Center of Energy and Environmental Study.

- Richards, J. 1981. Control of Gaseous Emission, 2<sup>nd</sup> edition, North Carolina State University. USA.
- Seyedeh, F.G.O., Fatemeh, T., Bagher, Y., and Fereshteh, E. 2007. Biochemical Engineering Journal. 39: 37-42.
- Tan I.A.W., Ahmad A.L., Hameed B.H. 2008. Optimization of preparation conditions for activated carbons from coconut husk using response surface methodology. Chemical Engineering Journal. 137: 462-470.
- Tinoco, R. R., and Bouallou, C. 2010. Comparison of absorption rates and absorption capacity of ammonia solvents with MEA and MDEA aqueous blends for CO<sub>2</sub> capture. Journal of Cleaner Production. 18: 875-80.
- Welty, J. R., Wicks, C.E. and Wilson, R.E.1984. Fundamentals of Momentum Heat and Mass Transfer. JohnWiley&Sons, NewYork. p. 803.
- Hongqun Y., Zhenghe X., Maohong F., Rajender G., Rachid B.S., Alan E Bland, and Ian Wright. 2008. Progress in carbon dioxide separation and capture: A review. Journal of Environmental Sciences. 20(2008): 14-27.
- Zou Y., Vera M. and Alirio E.R. 2002. Adsorption of Carbon dioxide at high Temperature –a review. Separation and Purification Technology. 26: 195-205.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลงานวิชาการที่เผยแพร่ในที่ประชุมวิชาการ

1. OPTIMIZATION OF  $\text{Ca}^{2+}$  LEACHING FROM STEELMAKING SLAGS USING ACETIC ACID FOR MINERAL  $\text{CO}_2$  SEQUESTRATION

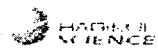


CET-2011

*Prince of Songkla University*

The 5<sup>th</sup> PSU-UNS International Conference on Engineering  
and Technology (ICET-2011)

Marlin Beach Resort, Prince of Songkla University  
Kampong Som, Thailand





# OPTIMIZATION OF $\text{Ca}^{2+}$ LEACHING FROM STEELMAKING SLAGS USING ACETIC ACID FOR MINERAL $\text{CO}_2$ SEQUESTRATION

Sudarat Tinchana<sup>1</sup>, Juntima Chungsiriporn<sup>1</sup>, Charun Bunyakan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Prince of Songkla University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, Thailand

\* Authors to correspondence should be addressed via email: charun.b@psu.ac.th

**Abstract:** Carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) sequestration using steelmaking slag via carbonation reaction comprises of two steps. First, the calcium ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ) from the slag particles were extracted into an acid solution. Second, the chemical absorption of  $\text{CO}_2$  by  $\text{Ca}^{2+}$  solution to form a solid particle of calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ), where the  $\text{CO}_2$  was sequestered. This studies aim to investigate the optimal condition for  $\text{Ca}^{2+}$  extraction from steelmaking slag by using acetic acid solution. The response surface methodology (RSM) was used to optimize the concentration of  $\text{Ca}^{2+}$ . The investigated parameters were the temperatures in the range of 30-70°C, whereby liquid/solid mass ratio and the acetic concentration in the range of 5:1-20:1 and 1-8 M, respectively, were investigated. The optimum conditions in the leaching process are the liquid/solid ratio of 5:1, the acetic acid concentration and temperature of 7.3 M and 70 °C, respectively. This optimum condition gave maximum  $\text{Ca}^{2+}$  concentration of 35226 ppm

**Key Words:**  $\text{CaCO}_3$ / Carbonation/  $\text{CO}_2$ / Extraction/ Leaching/ Slag

## 1. INTRODUCTION

The global warming associated with an increase of the greenhouse gas emissions represents a worldwide problem that is due in major part to the industrial combustion of fossil fuels [1]. The current global warming is a global problem which caused by the climate change due to an increasing of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) in the atmosphere [2]. Carbon dioxide mineral sequestration is a technology that can reduce  $\text{CO}_2$  emissions to the atmosphere for long-term storage of  $\text{CO}_2$  [3].

Interest in using industrial residue materials and by-products as sources of calcium for mineral carbonation has arisen because they are readily available and cheap. Besides that, the carbonation of these waste materials could reduce the amount of harmful substances, such as trace elements, released to the environment, as they

would be trapped in inert carbonates [4]. The slag from steelmaking process is known as a material which has the ability to capture  $\text{CO}_2$  and transform to calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) owing to their high contents of calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) as in a form of calcium oxide ( $\text{CaO}$ ) [5]. Thus, the extraction of  $\text{Ca}^{2+}$  from slag is an important step for carbon dioxide sequestration via carbonation process.

In this study, the steel making slag was used as a precursor for leaching  $\text{Ca}^{2+}$  which the main objective was to determine the optimum condition for  $\text{Ca}^{2+}$  leaching process.

## 2. MATERIALS

The steelmaking slag is a by product from the electric arc furnace (EAF) steel production obtained from Siam Steel Syndicate co., Ltd. (Samut Prakan, Thailand). Acetic acid (99.7 wt %), analytical grade, was obtained from Baker, Inc. USA and used as received without further purification.

## 3. EXPERIMENTAL

### 3.1 Preparation of the steelmaking slag

The steelmaking slag was dried at 105 °C in an oven and roughly grinded with jaw crushers. The steelmaking slag was then finely grinded by gyratory crusher and sieved to get particle size of smaller than 45  $\mu\text{m}$ . The fine grinded material was then dried overnight at 105 °C. The composition of the slag is analyzed using X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence spectroscopy (XRF)

### 3.2 $\text{Ca}^{2+}$ leaching procedure

The leaching experiments were carried out in 2 L beaker glass. The prepared slag which particle size smaller than 45  $\mu\text{m}$  is added into 1 L of acetic acid solution with different concentrations (1, 2, 5, 6 and 8 M) which corresponded to the ratio of the liquid/solid mass ratio (L/S) of 5:1, 8:1, 10:1, 15:1 and 20:1 g/g.

respectively. The solutions were well mixed by using a mechanical stirrer at 300 rpm. The leaching temperatures were varied from 30 to 70 °C. For each experiment, the liquid samples of 10 ml were taken during the leaching period at 0, 1, 2, 5, 10, 20, 40, 60, 90 and 120 minutes. The sample was filtered by syringe membrane filter (0.45 µm) before it was analyzed by XRD, XRF and Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS).

### 3.3 Analysis

The structure of the steelmaking slag is analyzed by XRD, using a Philips X'Pert MPD, and the elemental composition of the steelmaking slag is analyzed by XRF using a Philips PW2400. The concentration of Ca<sup>2+</sup> in the leaching solution is measured by AAS (Aanalyst 100 spectrometry manufactured by Perkin-Elmer, USA).

### 3.4 Experimental design

Central composite design (CCD) was used to design of Ca<sup>2+</sup> leaching experiments. Three independent variables, namely acetic acid concentration ( $X_1$ , M), liquid/solid mass ratio ( $X_2$ , g/g) and temperature ( $X_3$ , °C) have been investigated by the single factor method. The coded units for each factor investigated in this work are presented in Table 1.

Table 1: The CCD consisting of 17 experiments for the study of 5 experimental factors in coded units

Run no.	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	0	0
2	-0.59	-0.59	-0.59
3	-0.59	-0.59	0.59
4	-0.59	0.59	-0.59
5	-0.59	0.59	0.59
6	0	-1	0
7	0	0	-1
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	1
12	0	1	0
13	0.59	-0.59	-0.59
14	0.59	-0.59	0.59
15	0.59	0.59	-0.59
16	0.59	0.59	0.59
17	1	0	0
Min-Max Value	1-8	5-20	30-70

The statistical significance of the full predicted quadratic models was evaluated by the analysis of variance (ANOVA). The ANOVA regression coefficients of individual linear, quadratic and interaction terms were determined.

The variables were coded according to the following equation:

$$X_i = \frac{x_i - x_0}{\Delta x_i} \quad (1)$$

Where  $X_i$  was a coded value of the variable;  $x_i$  was the actual value of variable;  $x_0$  was the actual value of the  $x_i$  on the center point; and  $\Delta x_i$  was the step change value.

Empirical model describing the experimental results were developed using data collected from the 17 runs. Model parameters were estimated using a second order polynomial as given by Eq. (2).

$$Y = \sum A_0 + \sum_{i=1}^3 A_i X_i + \sum_{i=1}^3 A_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 A_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

Where  $Y$  is the measured response that means concentration of calcium (Ca<sup>2+</sup>).  $A_0$  is intercept term.  $A_i$ ,  $A_{ij}$ , and  $A_{ii}$  are, respectively the measures of the effects of variables  $X_i$ ,  $X_i X_j$ , and  $X_i^2$ . The variable  $X_i X_j$  represents the first-order interactions between  $X_i$  and  $X_j$  ( $i < j$ ). The regression coefficients were used to make statistical calculations to generate surface and contour plots from the regression models. The P-values of less than 0.05 were considered to be statistically significant parameters where as the parameters with p-values greater than 0.100 was considered as an in-significant parameter, which could be dropped out manually from the model to enhance the regression quality and optimization results.

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

### 4.1 Slag composition

Chemical and physical properties of slag were measured using XRF, XRD, and AAS. The results from XRF indicated that the slag posses CaO up to 55% which is a key component and XRD analysis showed that the main compositions of slag are tricalcium magnesium orthosilicate (Ca<sub>3</sub>Mg(SiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>), gehlenite (Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>), and calcium strontium manganese oxide ((Ca<sub>0.6</sub> Sr<sub>0.4</sub>)MnO<sub>3</sub>). This composition characteristic make them suitable candidates for the industrial sequestration of CO<sub>2</sub> [6].

### 4.2 Optimize leaching condition

The concentrations of Ca<sup>2+</sup> at various leaching conditions are listed in Table 2. From this table, the optimum conditions for Ca<sup>2+</sup> leaching were liquid/solid ratio of 5:1, acetic acid concentration of 7.3 M, and temperature 70 °C which gave a maximum Ca<sup>2+</sup> concentration of 35226 ppm. The application of response surface methodology yielded an empirical model that expressed the relationship between the Ca<sup>2+</sup> concentration and investigated leaching parameters as given by Eq. (3).

$$Y = 11165.3X_1 + 187.16X_3 - 679.88X_1^2 - 244.39X_1X_2 - 14230.7 \quad (3)$$

The value of the determination coefficient (R<sup>2</sup>) and adjusted value of the determination coefficient (Adjusted R<sup>2</sup>) were 0.963 and 0.951, respectively, indicating the model is present the experimental data well. This is also evident from the fact that the plot of predicted versus experimental concentrations of Ca<sup>2+</sup> in Fig. 1 is close to y = x showing that the prediction of experimental data is quite satisfactory.

The ANOVA of the quadratic regression model indicates that the model is significant. The P values were

used as a tool to check the significance of each of the coefficients, which, in turn, are necessary to understand the pattern of the mutual interactions between the test variables. The t ratio and the corresponding P values, along with the coefficient estimate, are given in Table 3. The smaller the magnitude of the P, the more significant is the corresponding coefficient. Values of P less than 0.05 indicate model terms are significant. The coefficient estimates and the corresponding P values suggests that, among the test variables used in the study,  $X_1$  (Concentration of acetic acid),  $X_2$  (Temperatures, °C) and  $X_1X_2$  (mutual interaction between concentration of acetic acid and liquid/solid mass ratio (L/S)) are the significant model terms. Concentration of acetic acid ( $P < 0.0001$ ) has the largest effect on concentrations of  $Ca^{2+}$ . The mutual interaction between concentration of acetic acid and liquid/solid mass ratio (L/S) ( $P < 0.0001$ ) were also found to be important.

Table 2: Uncoded values of the variables used in the different experimental of the central composite design and the corresponding experimental results

Run no.	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Y	
				Experimental	Predicted
1	1	10	50	3601	3169
2	2	8	40	9610	8957
3	2	8	60	12140	12700
4	2	15	40	6713	5535
5	2	15	60	7429	9278
6	5	5	50	26800	27847
7	5	10	30	15950	17994
8	5	10	50	23025	21737
9	5	10	50	22560	21737
10	5	10	50	22340	21737
11	5	10	70	23795	25481
12	5	20	50	11165	9518
13	6	8	40	23286	24041
14	6	8	60	31560	27784
15	6	15	40	13194	13777
16	6	15	60	15930	17520
17	8	10	50	21102	21386

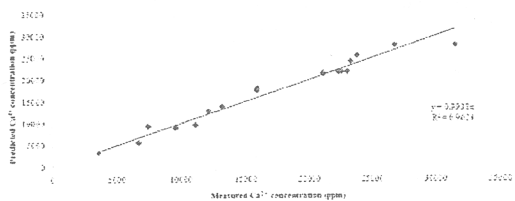


Fig. 1. Plot of predicted and measured  $Ca^{2+}$  concentration

Response surface are drawn as a function of two factors at a time, holding all other factors at fixed levels (zero, for instance). Those plots are helpful in understanding both the main and the interaction effects

of these two factors. These plots can be easily obtained by calculating from the model the values taken by one factor where the second varies with constraint of a given Y value. The typical surface plots obtained from Eq. (2) are given in Fig. 2 and Fig. 3. Each figure graphically explained the effect of two interested parameters on the production of  $Ca^{2+}$ .

Table 3: Model coefficients estimated by multiples linear regression

Factor	Coefficient	Computed t value	P value
Intercept	-14230.7	-4.906	0.000362
$X_1$	11165.3	10.78	<0.0001
$X_2$	187.16	4.261	0.00110
$X_3$	-679.88	-5.831	<0.0001
$X_1 \times X_2$	-244.39	-9.922	<0.0001

Fig. 2 show the response surface plot obtained as a function of acetic acid concentration versus liquid/solid mass ratio.  $Ca^{2+}$  concentration was increased with the increasing acetic acid concentration. It is obvious that the concentration of  $Ca^{2+}$  was decrease while liquid/solid mass ratio was increase.

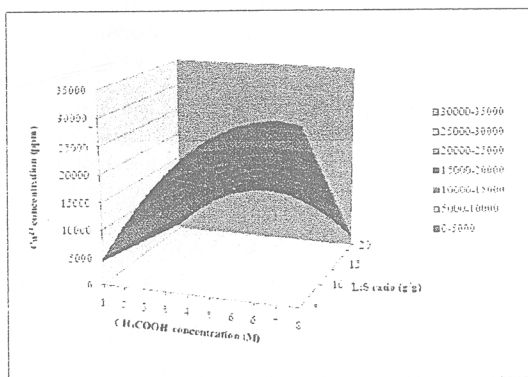


Fig. 2. Response surface plot showing the effect on acetic acid concentration, liquid/solid mass ratio and their mutual effect on the production of  $Ca^{2+}$

Fig. 3 show the response surface plot obtained as a function of temperature versus liquid/solid mass ratio. An increase in  $Ca^{2+}$  concentration with increase in temperature. Acceleration of diffusion phenomenon with increasing temperature gives the reason for this fact [7]. A decrease of liquid/solid mass ratio results in an increase of  $Ca^{2+}$  concentration, which might be explained by the higher ionic strength and, consequently, higher solubility of calcium [8]. It can be observed from Fig.3 that the lowest liquid/solid mass ratio of 5 g/g gave the highest  $Ca^{2+}$  concentration.

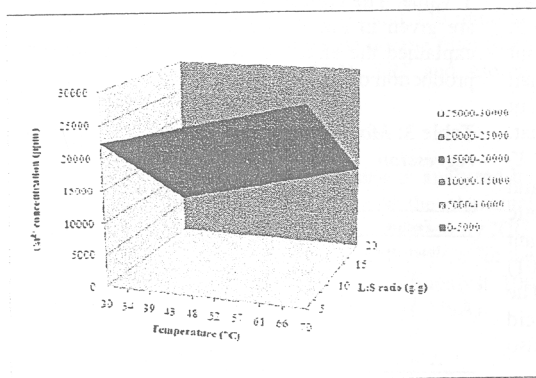


Fig. 3. Response surface plot showing the effect on temperature, liquid/solid mass ratio and their mutual effect on the production of  $\text{Ca}^{2+}$

## 5. CONCLUSIONS

The leaching of  $\text{Ca}^{2+}$  from steelmaking slag using acetic acid solution was investigated. The optimum conditions for leaching of  $\text{Ca}^{2+}$  were determined using a statistical response surface methodology (RSM). From the equation of response variables, the acetic concentration has the most significant effect on the concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$ . The optimum conditions for leaching of  $\text{Ca}^{2+}$  were liquid/solid ratio of 5:1, acetic acid concentration of 7.3 M and temperature of 70 °C which gave a maximum  $\text{Ca}^{2+}$  concentration of 35226 ppm.

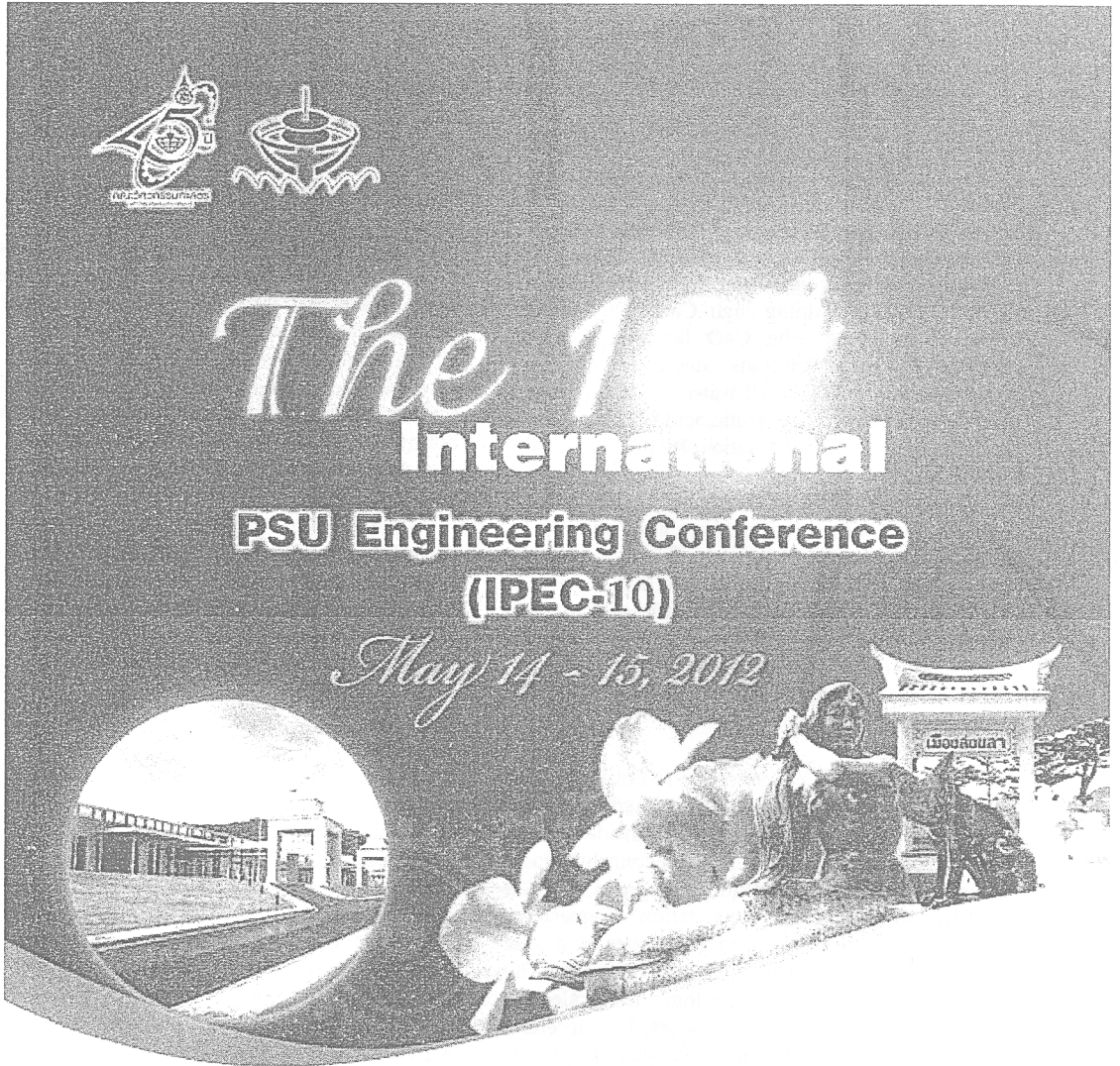
## 6. ACKNOWLEDGEMENT

The authors wish to thank the Discipline of Excellence (DOE) in Chemical Engineering and the Department of Chemical Engineering, Faculty of engineering, Prince of Songkla University for providing scholarship to the student.

## 7. REFERENCE

- [1] D. Bonenfant, L. Kharoune, S. Sauve, R. Hausler, P. Niquette, M. Mimeault, and M. Kharoune. "CO<sub>2</sub> Sequestration Potential of Steel Slags at Ambient Pressure and Temperature". *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2008, Vol. 47, pp. 7610–6.
- [2] V. Prigiobbe, A. Poletti, and R. Baciocchi. "Gas Solid Carbonation Kinetics of Air Pollution Control Residues for CO<sub>2</sub> Storage". *J. Chem. Eng.*, 2009, Vol. 148, pp. 270–8.
- [3] F. Goff, and K.S. Lackner. "Carbon Dioxide Sequestering Using Ultramafic Rocks". *Environ. Geosci.*, 1998, Vol. 5, No. 3, pp. 89–101.
- [4] S. Eloneva, S. Teir, J. Salminen, C. J. Fogelholm, and R. Zevenhoven. "Fixation of CO<sub>2</sub> by carbonating calcium derived from blast furnace slag". *Energy*, 2008, Vol. 33, pp 1461– 7.
- [5] D. Bonenfant, L. Kharoune, S. Sauve, R. Hausler, P. Niquette, M. Mimeault, and M. Kharoune. "Molecular Analysis of Carbon Dioxide Adsorption Processes on Steel Slag Oxides". *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 2009, Vol. 3, pp. 20-2.
- [6] F. J. Doucet. "Effective CO<sub>2</sub>-specific sequestration capacity of steel slag and variability in their leaching behaviour in view of industrial mineral carbonation". *Miner. Eng.*, 2010, vol. 23, pp. 262-9.
- [7] P. Ptacek, M. Noskova, J. Brandstet, F. Soukal, and T. Opravil. "Dissolving behavior and calcium release from fibrous wollastonite in acetic acid solution". *Thermochim Acta*, 2010, Vol. 498, pp. 56-60.
- [8] W. J. J. Huijgen, G. J. Witkamp, and R. N. J. Comans. "Mineral CO<sub>2</sub> Sequestration by Steel Slag Carbonation". *Environ. Sci. Technol.*, 2005, Vol. 39, pp. 9676-82.

2. Leaching of Steelmaking Slag using Acetic Acid Solution and Deionized Water for CO<sub>2</sub> Sequestration



Faculty of Engineering  
Prince of Songkla University  
<http://www.ipec10.eng.psu.ac.th>





# Leaching of Steelmaking Slag using Acetic Acid Solution and Deionized Water for CO<sub>2</sub> Sequestration

Sudarat Tinchana<sup>1</sup>, Juntima Chungsiropom<sup>1</sup>, Charun Bunyakan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,  
Hat Yai, Songkhla 90112  
E-mail: charun.b@psu.ac.th \*

## Abstract

CO<sub>2</sub> mineral sequestration is an important technology for reducing greenhouse gas emissions. The steelmaking slag was interested for CO<sub>2</sub> sequestration because of its containing high CaO. This research aimed to investigate the CaO leaching efficiency using two common solutions which are acetic acid solution and pure deionized water. Several operating variables including initial acetic acid concentration (0 and 2 M), liquid-to-slag ratio (10:1 g/g), reaction temperature (70 °C) and reaction time (0-60 min) were investigated. The alkalinity of leaching solution obtained from both solutions were also studied. The results shown that leaching solution of steelmaking slag using deionized water gave higher pH and alkalinity than acetic acid. The efficiency of both leaching solutions on CO<sub>2</sub> sequestration was also investigated and reported in this work.

**Keywords:** Leaching, Precipitation, Steelmaking Slag

## 1. Introduction

The increasing CO<sub>2</sub> concentration mainly caused by fossil fuel combustion associated with the greenhouse effects represented a worldwide problem [1, 2]. A possible technology that can contribute to the reduction of carbon dioxide emissions is CO<sub>2</sub> sequestration by mineral carbonation. Sequestering carbon dioxide in synthesized carbonates is a long-term solution to global warming that will keep CO<sub>2</sub> out of the atmosphere on geologic timescales [3]. Mineral sequestration research pointed to accelerate the reaction for a potential industrial process. Research on the aqueous carbonation route has focused on alkaline and concentration of Ca<sup>2+</sup> [4]. These residues are likely to be more reactive for carbonation than primary minerals due to their chemical instability and thus their use might enable to reduce energy consumption and costs of CO<sub>2</sub> mineral sequestration. The interesting in using the industrial residue materials as a source of calcium for mineral carbonation has increased since they are readily available and cheap. Furthermore, the carbonation of these wastes could reduce the amount of harmful substances, such as trace elements, released to the environment, as they are trapped in inert carbonates. The slag from steelmaking process is known as a material has the ability to capture and convert CO<sub>2</sub> to

calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>), due to their high contents of calcium (Ca<sup>2+</sup>) in the form of calcium oxide (CaO). So, the leaching of Ca<sup>2+</sup> from slag is an important step for CO<sub>2</sub> sequestration via carbonation process [5]. This research focuses on method of CO<sub>2</sub> sequestration: permanent CO<sub>2</sub> fixation as environmentally benign carbonate minerals. In this case, the steelmaking slag was used as a precursor for Ca<sup>2+</sup> and the main objective was to determine the optimum condition for Ca<sup>2+</sup> leaching process.

## 2. Materials

The steelmaking slag is a byproduct of the electric arc furnace (EAF) obtained from Siam Steel Syndicate co., Ltd. (Samut Prakan, Thailand). Glacial acetic acid (99.7 wt %) analytical grade, was obtained from Baker, Inc. USA and used as received without further purification. The deionized water was produce onsite at our laboratory.

## 3. Experimental

### 3.1 Preparation of the steelmaking slag

The steelmaking slag was dried at 105 °C in an oven and roughly grinded with jaw crushers. The steelmaking slag was then finely grinded by gyratory crusher and sieved to get particle size of smaller than 45 μm. The fine grinded material was then dried overnight at 105 °C. The compositions of prepared slag were analyzed using X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) and Atomic absorption spectrometry (AAS).

### 3.2 Ca<sup>2+</sup> leaching procedure

The leaching experiments were carried out in 2 L beaker glass. The prepared slag which particle size smaller than 45 μm is added into 1 L of acetic acid solution with different concentrations (0 and 2 M) which corresponded to the ratio of the liquid/solid mass ratio (L/S) of 10:1 g/g. The solutions were well mixed by using a mechanical stirrer at 300 rpm. The leaching temperature was 70 °C. For each experiment, the liquid samples of 10 ml were taken during the leaching period at 0, 1, 5, 10, 15, 30 and 60 minutes. The samples were filtered by syringe membrane filter (0.45 μm) before analyzed by XRD, XRF and AAS.

### 3.3 CO<sub>2</sub> removal efficiency

The CO<sub>2</sub> removal efficiency using steelmaking slag leaching solution obtained from section 3.2 was

performed using a lab scale absorption reactor as described in figure 1.

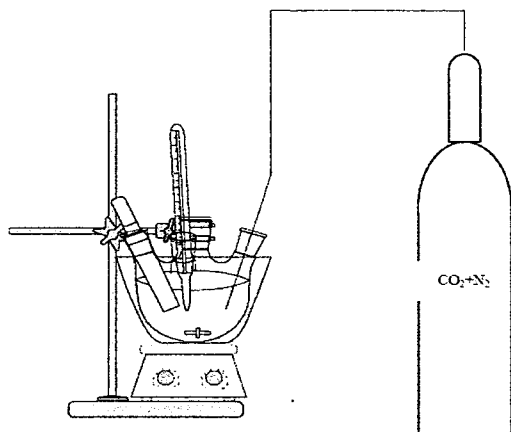


Figure 1. A schematic of laboratory CO<sub>2</sub> absorption reactor

From figure 1, the gas mixture containing 15.0 vol % CO<sub>2</sub> and 85.0 vol % N<sub>2</sub> was fed to 1 L of steelmaking slag leachate in absorption reactor at a flow rate of 0.73 l/min. The CO<sub>2</sub> concentrations at the inlet and outlet of reactor were measured. The CO<sub>2</sub> removal efficiency (CO<sub>2</sub> RE) was determined from the inlet (C<sub>in</sub>) and outlet (C<sub>out</sub>) CO<sub>2</sub> concentration according to equation (1).

$$CO_2 RE = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100 \quad (1)$$

Where C<sub>in</sub> = inlet CO<sub>2</sub> concentration (ppm)  
 C<sub>out</sub> = outlet CO<sub>2</sub> concentration (ppm)  
 CO<sub>2</sub> RE = CO<sub>2</sub> removal efficiency (%)

### 3.4 Analysis

The structure of the steelmaking slag is analyzed by X-ray diffraction (XRD), using a Philips X'Pert MPD, and the elemental composition of the steelmaking slag is analyzed by X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), using a Philips PW2400. The concentration of calcium (Ca<sup>2+</sup>) in the leaching solution is measured by using Atomic Absorption Spectrometry (AAS) (AA-analyst 100 spectrometry manufactured by Perkin-Elmer, USA).

## 4. Results and Discussion

### 4.1 Slag composition

The XRF was applied to evaluate the slag compositions. The compositions of the fresh slag, precipitated solid leached with acetic acid and deionized water were presented in Table 1. From Table 1, the fresh slag contains 51.61 % of CaO. After extraction with acetic acid, CaO content in a remaining precipitate was 6.56% where as the amount of CaO in the precipitate when using deionized water as leaching solution was almost the same as original found in fresh slag. The XRD patterns of fresh slag, and the solid slag leached with acetic and deionized water were compared in figure 2. It can be seen from

figure 2 that the main compositions of slag in all cases are tricalcium magnesium orthosilicate (Ca<sub>3</sub>Mg(SiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>), and gehlenite (Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>). This composition characteristic make them suitable candidates for the industrial sequestration of CO<sub>2</sub> [6]. The extraction of Ca<sup>2+</sup> from fresh steelmaking slag by acetic acid and deionized water gave a leachate and leached hydrated-matrix. The XRD patterns (see figure 2) revealed that the leached hydrated-matrixes obtained from steelmaking slag leaching with acetic acid (slag - acetic acid) contains Tricalcium magnesium orthosilicate (Ca<sub>3</sub>Mg(SiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>) structure (calcium acetate hydrate) indicating that some elements in steelmaking slag have reacted with acetic acid resulting in structure change. While the leached hydrated-matrixes obtained from steelmaking slag leaching process using only deionized water (slag-water) has no structural changes.

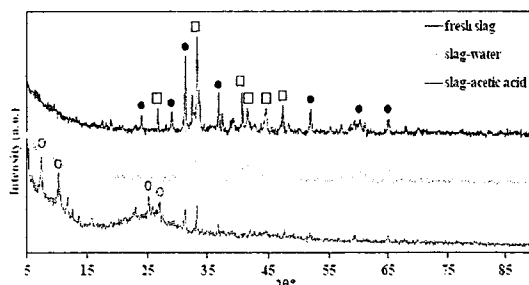


Figure 2. XRD patterns of the steelmaking slag used in the experiment: □ Tricalcium magnesium orthosilicate (Ca<sub>3</sub>Mg(SiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>), ● gehlenite, and ○ calcium acetate hydrate

Table 1 Composition of remained – solid from XRF analyses (units: wt.%)

Components	Composition, wt. %		
	Fresh slag	Solid slag leached with acetic acid	Solid slag leached with deionized water
CaO	51.61	6.56	51.1
MgO	4.51	1.33	3.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.32	10.71	7.67
SiO <sub>2</sub>	14.19	24.31	13.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.46	6.84	14.44
MnO	4.78	0.52	5.09

### 4.2 Concentrations of calcium

The concentrations of calcium (Ca<sup>2+</sup>) in the leaching solution in time period of 60 min are shown in figure 3. It clearly shown that the acetic acid can extract CaO from fresh slag much better than deionized water. Since Ca<sup>2+</sup> is a metal thus it was better dissolved in acid solution than water. The concentration of Ca<sup>2+</sup> in leachate using acetic acid and deionized water leaching were up to 4755 mg/l and 502 mg/l, respectively.

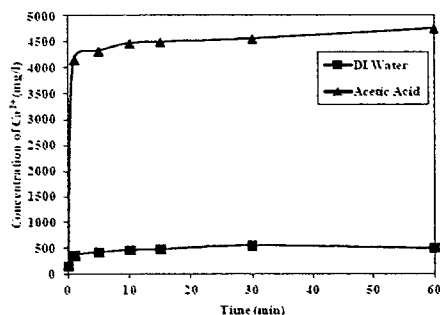


Figure 3. The concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  from leaching process

#### 4.3 $\text{CO}_2$ removal efficiency

The concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$  in precipitate (solid) from  $\text{CO}_2$  removal, using leachate of steelmaking slag obtained by using acetic acid and deionized water as extracted solvent were compared in figure 4.

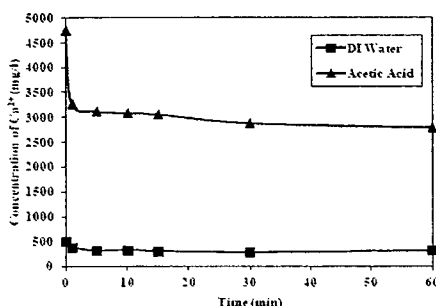


Figure 4. The concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  in precipitate (solid) from  $\text{CO}_2$  removal process

It can be seen from figure 4 that  $\text{Ca}^{2+}$  in acetic acid solution and deionized water hold with carbon dioxide, to form calcium carbonate as indicated by the reduction of  $\text{Ca}^{2+}$  concentration. The  $\text{CO}_2$  removal efficiencies using these solution were shown in figure 5. Although  $\text{Ca}^{2+}$  eluted with acetic acid was even high, the maximum  $\text{CO}_2$  removal efficiency was only 39%. Whereas that of  $\text{Ca}^{2+}$  in deionized water was up to 72%. It is surprised that the leachate of steelmaking slag obtained by deionized water gave much higher  $\text{CO}_2$  removal efficiency than that of acetic solution. The leachate properties using acetic acid and deionized water are compared in table 2. It was found that the  $\text{Ca}^{2+}$  concentration in leachate of acetic acid solution was about 9.5 times of deionized water. The leachate of steelmaking slag obtained by deionized water, however, possesses much higher pH and alkalinity than that obtained by using acetic acid solution. This result implied that the alkalinity and pH are the most important parameters for  $\text{CO}_2$  removal instead of  $\text{Ca}^{2+}$  concentration in solution.

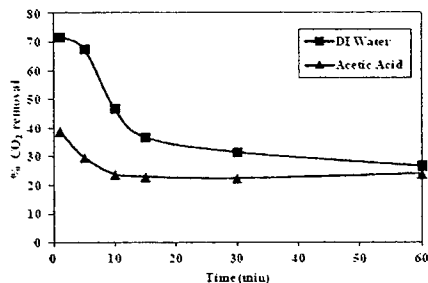


Figure 5. Efficiency of  $\text{CO}_2$  removal

Table 2 Leachate properties

Properties	Leachate using acetic acid	Leachate using deionized water
$\text{Ca}^{2+}$ concentration	4755 mg/l	502 mg/l
pH	3.7	11.7
Alkalinity	0	1270 mg/l as $\text{CaCO}_3$

#### 5. Conclusions

The conclusion of this work can be drawn as follows. The leaching of  $\text{Ca}^{2+}$  from steelmaking slag using acetic acid and deionized water as extracted solution was investigated. The concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  in acetic acid solution were much greater than that of deionized water. Although  $\text{Ca}^{2+}$  eluted with acetic acid was even high, the maximum efficiency of  $\text{CO}_2$  removal was much lower than that of deionized water extraction. In addition, the alkalinity in water leaching was very high. It can be concluded that the alkalinity and pH are the most important parameters for  $\text{CO}_2$  removal instead of  $\text{Ca}^{2+}$  concentration. Thus deionized water leaching process is adequate for steelmaking slag extraction for  $\text{CO}_2$  sequestration.

#### 6. Acknowledgement

The authors wish to thank for financially supported by the Discipline of Excellence (DOE) in Chemical Engineering, the Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University. In addition, authors wish to thank the National Research Council of Thailand (NRCT), Thailand and the Energy Policy and Planning Office (EPPO) for providing a scholarship to the student.

#### 7. Reference

- [1] Bonenfant, D. Kharoume, L. Sauve, S. Hausler, R. Niquette, P. Mimeault, M. and Kharoume, M. 2008.  $\text{CO}_2$  Sequestration Potential of Steel Slags at Ambient Pressure and Temperature. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47: 7610–7616.
- [2] Prigiobbe, V. Poletini, A. and Baciocchi, R. 2009. Gas Solid Carburation Kinetics of Air Pollution Control Residues for  $\text{CO}_2$  Storage. *J. Chem. Eng.*, 148: 270–278.

- [3] Goff, F. and Lackner, K.S. 1998. Carbon Dioxide Sequestering Using Ultramafic Rocks. *Environ. Geosci.* 5(3): 89-101.
- [4] Eloneva, S. Teir, S. Salminen, J. Fogelholma, C.J. and Zevenhoven, R. 2008. Fixation of CO<sub>2</sub> by Carbonating Calcium Derived from Blast Furnace slag. *Energy*. 33: 1461- 1467.
- [5] Bonenfant, D. Kharoune, L. Sauve, S. Hausler, R. Niquette, P. Mimeault, M. and Kharoune, M. 2009. Molecular Analysis of Carbon Dioxide Adsorption Processes on Steel Slag Oxides. *Int. J. Greenhouse Gas Control*. 3: 20-22.
- [6] Doucet, F.J. 2010. Effective CO<sub>2</sub>-Specific Sequestration Capacity of Steel Slag and Variability in Their Leaching Behaviour in View of Industrial Mineral Carbonation. *Miner. Eng.* 23: 262-269.
- [7] Teir, S. Eloneva, S. Fogelholma, C.J. and Zevenhoven, R. 2007. Carbonation of minerals and industrial by-products for CO<sub>2</sub> sequestration. *Proceedings of the Third International Green Energy Conference*. Västerås, Sweden. June 17-21, 2007: Paper ID-129.

ภาคผนวก ข  
นิพนธ์ต้นฉบับเพื่อส่งตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

# Carbon Dioxide Emission Reduction by Sequestration Using Slag from Steel Making Process

TINCHANA, S. <sup>1</sup> and BUNYAKAN, C. <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,  
Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand

**Abstract:** The slag from steelmaking process that is able to convert CO<sub>2</sub> to be calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) was studied. Calcium ion solution was prepared by optimum condition of leaching. The leaching condition is liquid to solid ratio (L/S) 10:1 (g/g), room temperature. The CO<sub>2</sub> removal was investigated by synthesis gas of CO<sub>2</sub> and studied the optimum condition for CO<sub>2</sub> removal in packed column. The studied parameters include liquid flow rate (0.3 – 0.9 L/min), gas flow rate (0.25 – 0.85 L/min) and concentration of calcium ion (200 – 1000 mg/L). Design of experimental and mathematic model by response surface metrology (RSM) and central composite design (CCD) with Design Expert Software Program was used for evaluate and showed relation between independent variables. The optimum condition for CO<sub>2</sub> removal process is liquid flow rate of 0.77 L/min, gas flow rate of 0.25 L/min and concentration of calcium ion 725 mg/L. The predicted-efficiency in CO<sub>2</sub> treatment was up to 100 % and the results of experiment is 97.81 % with less than 5% errors. In conclusion, this research has confirmed that the steel slag can effectively use to remove CO<sub>2</sub>. In addition, this approach can be applied as a guideline for CO<sub>2</sub> emission reduction in industrial sector.

**Keywords:** Leaching, Precipitation, Steelmaking Slag, CaCO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>

## 1 Introduction

The global warming associated with an increase of the greenhouse gas emissions represents a worldwide problem that is due in major part to the industrial combustion of fossil fuels [1]. The current global warming is a global problem which caused by the climate change due to an increasing of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) in the atmosphere [2]. Carbon dioxide mineral sequestration is a technology that can reduce  $\text{CO}_2$  emissions to the atmosphere for long-term storage of  $\text{CO}_2$  [3].

A possible technology that can contribute to the reduction of carbon dioxide emissions is  $\text{CO}_2$  sequestration by mineral carbonation. Sequestering carbon dioxide in synthesized carbonates is a long-term solution to global warming that will keep  $\text{CO}_2$  out of the atmosphere on geologic timescales [4]. Mineral sequestration research pointed to accelerate the reaction for a potential industrial process. Research on the aqueous carbonation route has focused on alkaline and concentration of calcium ion [5]. These residues are likely to be more reactive for carbonation than primary minerals due to their chemical instability and thus their use might enable to reduce energy consumption and costs of  $\text{CO}_2$  mineral sequestration. The interesting in using the industrial residue materials as a source of calcium for mineral carbonation has increased since they are readily available and cheap. Furthermore, the carbonation of these wastes could reduce the amount of harmful substances, such as trace elements, released to the environment, as they are trapped in inert carbonates. The slag from steelmaking process is known as a material has the ability to capture and convert  $\text{CO}_2$  to calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ), due to their high contents of calcium ion ( $\text{Ca}^{2+}$ ) in the form of calcium oxide ( $\text{CaO}$ ) so, the leaching of  $\text{Ca}^{2+}$  from slag is an important step for  $\text{CO}_2$  sequestration via carbonation process [6]. Interest in using industrial residue materials and by-products as sources of calcium for mineral carbonation has arisen because they are readily available and cheap. Besides that, the carbonation of these waste materials could reduce the amount of harmful substances, such as trace elements, released to the environment, as they would be trapped in inert carbonates [7]. The slag from steelmaking process is known as a material which has the ability to capture  $\text{CO}_2$  and transform to calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) owing to their high contents of calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) as in a form of calcium oxide ( $\text{CaO}$ ) [8]. Thus, the extraction of  $\text{Ca}^{2+}$  from slag is an important step for carbon dioxide sequestration via carbonation process.

Response surface methodologies (RSM) have long been applied to design and evaluate experiments to find how the outcomes are influenced by various input factors or process variables. RSM has been applied to optimize and evaluate interactive effects of independent factors. This methodology arises from experiments which include interactive effects among various parameters. The responses of the experiment can be simply related to the chosen independent factors by quadratic models. The model is fitted by using multiple regressions and plotted 3D response surfaces. This approach could effectively be used to form a process model and prediction for achieving the optimal  $\text{CO}_2$  removal efficiency. Analysis of variance (ANOVA) has been employed to justify the significance of the models.

This research focuses on method of  $\text{CO}_2$  removal. The main objective was to determine the optimum condition for  $\text{CO}_2$  removal process.

## 2 Materials and Method

### 2.1 Material

The steelmaking slag gained from Siam Steel Syndicate co., Ltd. (Samut Prakan, Thailand) was a byproduct of the electric arc furnace (EAF). The de-ionized water was produced onsite at our laboratory.

### 2.2 Experimental procedure

#### 2.2.1 Preparation of the steelmaking slag

The steelmaking slag was dried at 105 °C in an oven and roughly grinded with jaw crushers. The steelmaking slag was then finely grinded by gyratory crusher and sieved to get particle size that was smaller than 45 µm. The fine grinded material was then dried overnight at 105 °C. The compositions of prepared slag were analyzed using X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) and Atomic absorption spectrometry (AAS).

#### 2.2.2 Ca<sup>2+</sup> leaching procedure

The leaching experiments were carried out in 2 L beaker glass. The prepared slag which particle size is smaller than 45 µm was added into 1 L of the de-ionized water which corresponded to the ratio of the liquid/solid mass ratio (L/S) of 10:1 g/g. The solutions were well mixed by using a mechanical stirrer at 300 rpm. The leaching temperature was 25 °C. For each experiment, the liquid samples of 10 ml were taken during the leaching period at 0, 1, 5, 10, 15, 30 and 60 minutes. The samples were filtered by syringe membrane filter (0.45 µm) before analyzing by X-ray diffraction (XRD). The XRD was used to identify the structure of the steelmaking slag. X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) was used to measure the elemental composition of the steelmaking slag. The concentration of Calcium ion in the solution was analyzed using Atomic absorption spectrometry (AAS). The experimental setup is shown in Fig. 1

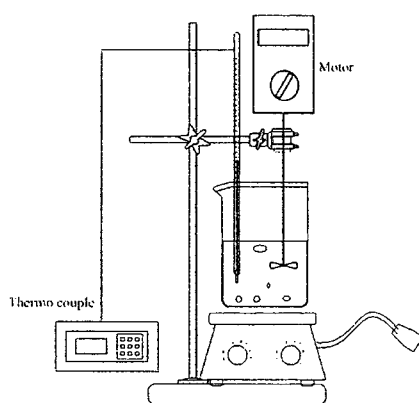


Fig. 1 The experimental setup

#### 2.2.3 CO<sub>2</sub> removal efficiency

The CO<sub>2</sub> removal efficiency using steelmaking slag leaching solution obtained from section 2.2.2 was performed in a packed column as shown in Fig. 2.



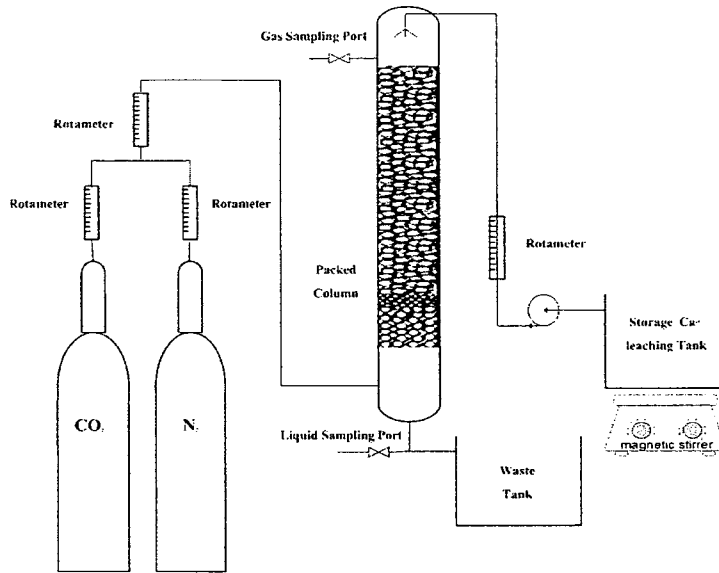


Fig. 2 A schematic of packed column absorber for CO<sub>2</sub> removal

Fig. 2 shows the process diagram of the CO<sub>2</sub> removal. Dimension of the packed column is 100 cm height and a 6.5 cm in diameter of acrylic column with a 60 cm bed section height polyethylene packing. The packing material is 6 mm raschig ring. Mixed gases contain 15.0 vol % CO<sub>2</sub>, 85.0 vol %N<sub>2</sub> and two Storage Tanks for steelmaking slag leaching solution were equipped. The experiments were performed in absorption column system for CO<sub>2</sub> removal over room temperature (25 °C). The packed column was carried out by feeding the mixed gases at the bottom of column and exiting to the top of column. The steelmaking slag leaching solution was launched at the top of column and exited to the bottom of column by flowing across to the raschig ring packing media in absorption column. Counter current flow between gas and solution were performed to absorb CO<sub>2</sub>. The experimental operations were to investigate parameters of liquid flow rate (0.3-0.9 l/min), Gas flow rate (0.25-0.85 l/min) and concentration of calcium ion (Ca<sup>2+</sup>) (200-1000 mg/l) in counter current operating mode. The CO<sub>2</sub> concentrations at the inlet and outlet of adsorber were measured. The CO<sub>2</sub> removal efficiency (CO<sub>2</sub> RE) was determined from the inlet (C<sub>in</sub>) and outlet (C<sub>out</sub>) CO<sub>2</sub> concentration according to equation (1).

$$CO_2 RE = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100 \quad (1)$$

Where C<sub>in</sub> = inlet CO<sub>2</sub> concentration (ppm)  
 C<sub>out</sub> = outlet CO<sub>2</sub> concentration (ppm)  
 CO<sub>2</sub> RE = CO<sub>2</sub> removal efficiency (%)

#### 2.2.4 Analysis

The structure of the steelmaking slag is analyzed by X-ray diffraction (XRD), using a Philips X'Pert MPD model, and the elemental composition of the steelmaking slag is analyzed by X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), using a Philips PW2400 model. The concentration of calcium ion (Ca<sup>2+</sup>) in the leaching solution is measured by using Atomic Absorption Spectrometry (AAS) (AAanalyst 100 spectrometry manufactured by Perkin-Elmer, USA).

### 2.2.5 Experimental design

The experimental design for modeling CO<sub>2</sub> removal was carried out by using response surface methodology (RSM). RSM is useful software for optimization performing and experimental designs [9]. In this study, RSM was used to relate parameter between the response (CO<sub>2</sub> removal efficiency, %CO<sub>2</sub> RE) and the independent variables, as well as to optimize the relevant conditions of independent variables in order to predict the best value of the responses. Central Composite Design (CCD) was employed to determine the effect of operational variables on the CO<sub>2</sub> removal efficiency [10]. RSM was established with the help of the Design Expert software program. Three independent variables, namely liquid flow rate ( $X_1$ , l/min), gas flow rate ( $X_2$ , l/min) and concentration of calcium ion (Ca<sup>2+</sup>) ( $X_3$ , mg/l) have been investigated by the single factor method. The corresponding actual values for each variable are presented in Table 1. The coded units for each factor investigated in this work are presented in Table 2.

**Table 1 Independent variables levels for the central composite design**

Independent variables	values for the coded levels				
	-1.682	-1.000	0	1.000	1.682
Liquid flow rate ( $X_1$ ), l/min	0.3	0.42	0.6	0.78	0.9
Gas flow rate ( $X_2$ ), l/min	0.25	0.37	0.55	0.73	0.85
Concentration of calcium ion ( $X_3$ ), mg/l	200	362	600	838	1000

**Table 2 The CCD consisting of 20 experiments for the study of 3 experimental factors in coded units**

Run no.	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	1
3	-1	1	-1
4	-1	1	1
5	1	-1	-1
6	1	-1	1
7	1	1	-1
8	1	1	1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	1.682	0	0
13	-1.682	0	0
14	0	1.682	0
15	0	-1.682	0
16	0	0	1.682
17	0	0	-1.682
18	0	1	0
19	-1	0	0
20	0	0	1
Min-Max Value	0.3-0.9	0.25-0.85	200-1000

The statistical significance of the full predicted quadratic models was evaluated by the analysis of variance (ANOVA). The ANOVA regression coefficients of individual linear, quadratic and interaction terms were determined. The variables were coded according to the following equation (2).

$$X_i = \frac{x_i - x_0}{\Delta x_i} \quad (2)$$

Where  $X_i$  was a coded value of the variable;  $x_i$  was the actual value of variable;  $x_0$  was the actual value of the  $x_i$  on the center point; and  $\Delta x$  was the step change value.

Empirical model describing the experimental results were developed using data collected from the 20 runs. Model parameters were estimated using a second order polynomial as given by equation (3).

$$Y = \sum A_0 + \sum_{i=1}^3 A_i X_i + \sum_{i=1}^3 A_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 A_{ij} X_i X_j \quad (3)$$

Where  $Y$  is the measured response that means the  $\text{CO}_2$  removal efficiency,  $A_0$  is intercept term,  $A_i$ ,  $A_j$ , and  $A_{ij}$  are the measures of the effects of variables  $X_i$ ,  $X_i X_j$ , and  $X_i^2$  respectively. The variable  $X_i X_j$  represents the first-order interactions between  $X_i$  and  $X_j$  ( $i < j$ ). The regression coefficients were used to make statistical calculations to generate surface and contour plots from the regression models. The p-values of less than 0.05 were considered to be statistically significant parameters where as the parameters with p-values greater than 0.100 was considered as an insignificant parameter, which could be dropped out manually from the model to enhance the regression quality and optimization

### 3 Results and discussion

#### 3.1 Slag composition

Chemical and physical properties of slag were measured using XRD, XRF, and AAS. The XRD patterns of fresh slag and the leached slag were compared in Fig. 3. It can be seen from Fig. 3 that the main compositions of slag in all cases are tricalcium magnesium orthosilicate ( $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ ), and gehlenite ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ). This form of calcium ion is suitable for the  $\text{CO}_2$  removal [11]. The XRF was applied to evaluate the slag compositions. The compositions of the fresh slag, precipitated solid leached with deionized water were presented in Table 3. From Table 3, the fresh slag contains 51.61 % of CaO but after extraction with deionized water the composition of slag is 51.1%. It mean that CaO was dissolve around 0.5%. That is in line with the result of AAS which indicate 2000 ppm of calcium ion.

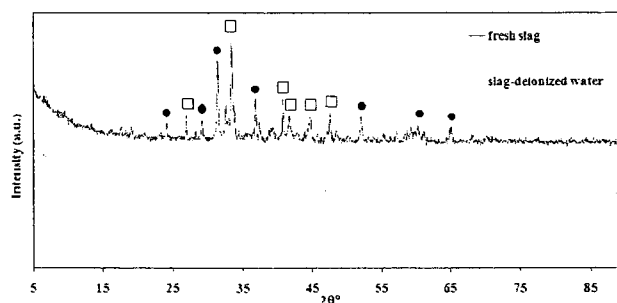


Fig. 3 XRD patterns of the steelmaking slag used in the experiment; □ Tricalcium magnesium orthosilicate ( $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ ), • gehlenite, and o calcium acetate hydrate

Table 3 Composition of remained – solid from XRF analyses (units: wt.%)

Components	Composition , wt.%	
	Fresh slag	Solid slag leached with deionized water
CaO	51.61	51.10
MgO	4.51	3.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.32	7.67
SiO <sub>2</sub>	14.19	13.30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.46	14.44
MnO	4.78	5.09

### 3.2 The coefficients in a mathematical model and model design

Process and parameters of the CO<sub>2</sub> removal efficiency using steelmaking slag leaching solution in packed column were designed and investigated by RSM and CCD design. The CO<sub>2</sub> removals are carried out based on the design experiment given in Table 4.

Table 4. Uncoded values of the variables used in the different experimental of the central composite design and the corresponding experimental results

Run no.	Variable			CO <sub>2</sub> removal efficiency (%CO <sub>2</sub> RE)
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	
	liquid flow rate (l/min)	gas flow rate (l/min)	Concentration of calcium ion (mg/l)	
1	0.42	0.37	362	77.72
2	0.42	0.37	838	91.22
3	0.42	0.73	362	29.29
4	0.42	0.73	838	61.54
5	0.78	0.37	362	88.33
6	0.78	0.37	838	95.69
7	0.78	0.73	362	51.10
8	0.78	0.73	838	83.18
9	0.6	0.55	600	75.74
10	0.6	0.55	600	75.74
11	0.6	0.55	600	75.45
12	0.9	0.55	600	98.01
13	0.3	0.55	600	53.92
14	0.6	0.85	600	41.16
15	0.6	0.25	600	89.64
16	0.6	0.55	1000	81.05
17	0.6	0.55	200	33.50
18	0.6	0.73	600	53.26

19	0.42	0.55	600	65.12
20	0.6	0.55	838	77.81

The ANOVA of the quadratic regression model indicates that the model is significant. The p-values were used as a tool to check the significance of each of the coefficients, which, in turn, are necessary to understand the pattern of the mutual interactions between the test variables. The f-value and the corresponding p-values, along with the coefficient estimate, are given in Table 5. Corresponding p-values suggest that, among the test variables used in this study,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_2X_3$  and  $X_3^2$  are significant model terms. Other model terms are not significant (with a probability value less than 0.05). The effects of the terms on the response could be easily seen from the normalized coefficients. Based on the results, the response surface constructed in this study for predicting CO<sub>2</sub> removal efficiency was considered reasonable. The application of response surface methodology yielded an empirical model that expressed the relationship between the CO<sub>2</sub> removal and investigated absorption parameters as given by equation (4).

$$y = 72.52 + 54.11x_1 - 164.79x_2 + 0.079x_3 + 0.13x_2x_3 - 8.28 \times 10^{-5} x_3^2 \quad (4)$$

Table 5 ANOVA for adequacy of the quadratic model

Source of Variation	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-value	P-value Prob > F	Remarks
Model	7375.22	5	1475.04	36.48	< 0.0001	significant
$x_1$	1359.01	1	1359.01	33.61	< 0.0001	significant
$x_2$	3594.68	1	3594.63	88.91	< 0.0001	significant
$x_3$	2048.79	1	2048.79	50.68	< 0.0001	significant
$x_2x_3$	236.19	1	236.19	5.84	0.0029	significant
$x_3^2$	311.61	1	311.61	7.71	0.0149	significant
Residual	566.01	14	40.43			
Lack of Fit	565.95	12	47.16	1680.06	0.006	significant
Pure Error	0.056	2	0.028			
Correlation Total	7942.23	19				
R <sup>2</sup>	0.9287		Adjusted R <sup>2</sup>	0.9033		
Predicted R <sup>2</sup>	0.8180		Adequate Precision	21.363		

ANOVA results of the reduced quadratic model in Table 5 indicated that the model could adequately be used to describe the CO<sub>2</sub> removal under a range of operating conditions. Data given in this Table demonstrate that the quadratic model was significant at 5% confidence level since P-values (0.0001) were less than 0.0500. Values of p>f less than 0.0500 indicate that model terms are significant, while values greater than 0.1000 indicate that the model terms are not significant. The value of the determination coefficient (R<sup>2</sup>) and adjusted value of the

determination coefficient (Adjusted  $R^2$ ) were 0.9287 and 0.9033, respectively, indicating the model is presented the experimental data well. This is also evident from the fact that the plot of predicted  $\text{CO}_2$  removal efficiency versus measured  $\text{CO}_2$  removal efficiency in Fig. 4 is close to  $y = x$  showing that the prediction of experimental data is quite satisfactory.

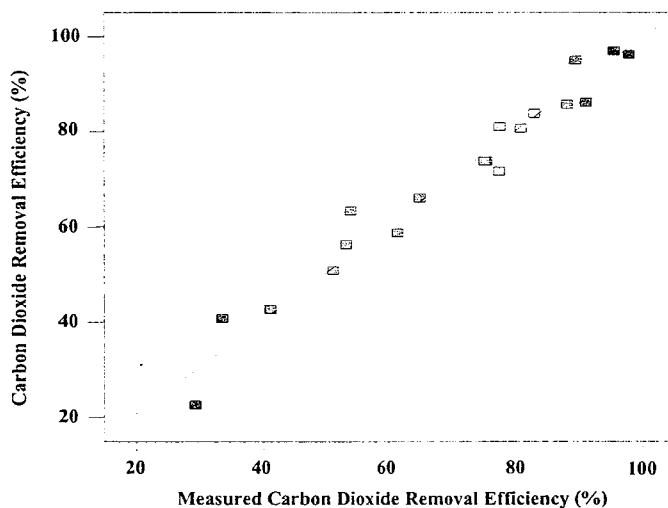


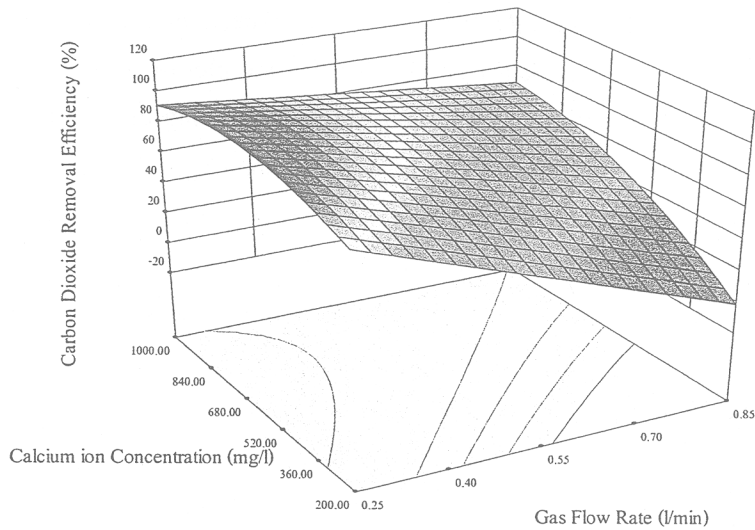
Fig. 4 Plot of predicted  $\text{CO}_2$  removal efficiency versus measured  $\text{CO}_2$  removal efficiency from quadratic model.

### 3.3 Effect of independent variables on $\text{CO}_2$ removal efficiency

Individual and interaction effects of the three factors consist of liquid flow rate, gas flow rate, and concentration of calcium ion on the  $\text{CO}_2$  removal efficiency were presented by the quadratic model (equation (4)). The three dimensional (3D) surface plot of the  $\text{CO}_2$  removal efficiency by the quadratic model from the regression analysis are given in Fig. 5-7. The 3D plots can be used to explain and identify the effect of each variables and major interactions between the variables. The variables were individually, it is also important to check the interaction effect of these variables, especially the two factor interaction effects.

#### 3.3.1 Effect of gas flow rate and concentration of calcium ion

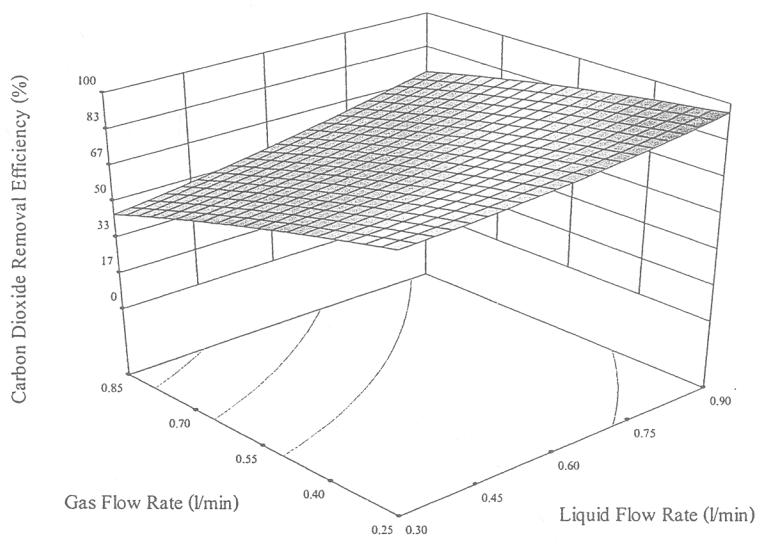
Fig. 5 show the response surface plot obtained as a function of gas flow rate ( $X_2$ ) versus concentration of calcium ion ( $X_3$ ). It is observed that  $\text{CO}_2$  removal efficiency significantly increases with increasing concentration of calcium ion and decreasing gas flow rate. The Fig. 5 expressed relation between flow rate of liquid and gas and Concentration of calcium ion. It was shown that percent removal of  $\text{CO}_2$  decrease with increasing gas flow rate, so the coefficient of  $X_2$  is -164.79. The reason is few contact time between gas and liquid at high gas flow rate, so, percent removal of  $\text{CO}_2$  lesson [12]. Furthermore, the coefficient of  $X_3$  in equation (4) is 0.079 that is the percent  $\text{CO}_2$  removal depend on calcium ion concentration of  $\text{CO}_2$  directly but weakly. Because increasing bulk concentration affect to more different between bulk and surface concentration.



**Fig. 5** Response surface plot showing the effect on Gas flow rate ( $X_2$ ) and Concentration of calcium ion ( $X_3$ ) on  $\text{CO}_2$  removal efficiency

### 3.3.2 Effect of liquid flow rate and gas flow rate

The Fig. 6 showed relation between liquid flow rate and gas flow rate. It was found that the higher liquid flow rate provide the higher percent removal of  $\text{CO}_2$ . Because it is more contact time between liquid and gas at the high liquid flow rate. The equation (4), the coefficient of  $X_1$  is 54.11, the  $\text{CO}_2$  removal efficiency depend on liquid flow rate strongly.



**Fig. 6** Response surface plot showing the effect on liquid flow rate ( $X_1$ ) and gas flow rate ( $X_2$ ) on  $\text{CO}_2$  removal efficiency

### 3.3.3 Effect of liquid flow rate and Concentration of calcium ion

Fig. 7 expressed the relation between liquid flow rate and calcium ion concentration at gas flow rate 0.55 l/min. It can be seen that higher liquid flow rate gain higher percentage of  $\text{CO}_2$  removal been in line with the coefficient of  $X_1$  in equation (4), that is 54.11. The reason why higher liquid flow rate showed higher percentage removal is that higher flow rate gain higher mass transfer coefficient, so it can be absorbed more than at lower flow rate.

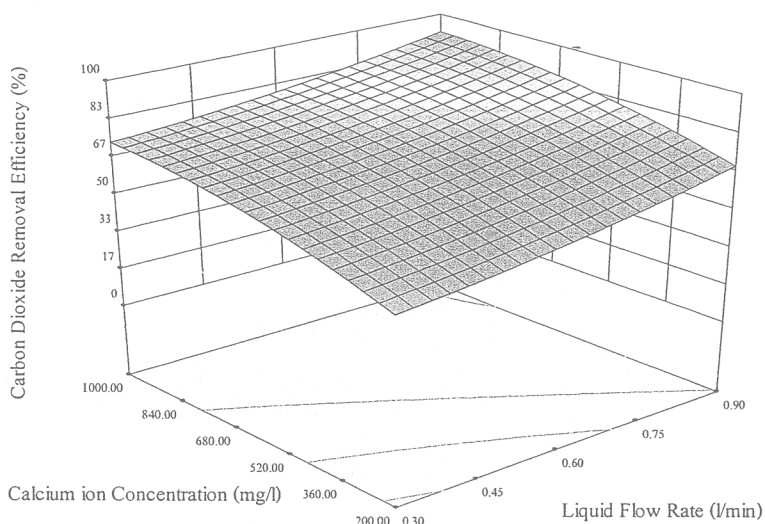


Fig. 7 Response surface plot showing the effect on liquid flow rate ( $X_1$ ) and Concentration of calcium ion ( $X_3$ ) on  $\text{CO}_2$  removal efficiency

### 3.4 Optimization of $\text{CO}_2$ removal conditions

An optimization process was carried out to determine the optimum value of  $\text{CO}_2$  removal efficiency using the Design Expert software. Parameters used in the software for each operational condition (liquid flow rate, gas flow rate, and concentration of calcium ion ) were set as constraints within the upper and lower limit ranges. The  $\text{CO}_2$  removal model (equation (4)) was employed as objective function for the response of  $\text{CO}_2$  removal efficiency to achieve the highest performance. The program combines the constraints into the objective function, and then searches for the best combination to maximize this function. Accordingly, the optimum condition and respective  $\text{CO}_2$  removal efficiencies were established. As presented in Table 6

Table 6 Model validity of response surface for  $\text{CO}_2$  removal under optimal condition

liquid flow rate (l/min)	gas flow rate (l/min)	Concentration of calcium ion (mg/l)	$\text{CO}_2$ removal efficiency (% $\text{CO}_2$ RE)	
			Predicted	Experimental
$(X_1)$	$(X_2)$	$(X_3)$		
0.77	0.25	725	100	97.83

An experiment was then performed to validate and confirm the optimum results of the optimization performance.  $\text{CO}_2$  removal efficiency of 97.83% as shown also in Table 6 was obtained from the experiment which agrees well to the predicted response value, 100 %, with 95% confident.

## 4 Conclusion

The conclusion of this work can be drawn as follow. The optimum condition for  $\text{CO}_2$  removal was determined using a statistical response surface methodology (RSM). From the equation of response variables, the gas flow rate has the most significant effect on  $\text{CO}_2$  removal. The optimum condition for  $\text{CO}_2$  removal was carried out of liquid flow rate of 0.77 l/min, gas flow rate of 0.25 l/min and concentration of calcium ion of 725. It was most suitable to achieve 100% and verified by an actual experimental result of 97.83%. The multiple correlation



coefficient of determination  $R^2$  obtained was 0.9287, indicating that the acquired data fitted well with the predicted data from the quadratic model. Thus, the steel slag can effectively use to remove  $\text{CO}_2$  with high potential to be applied as a guideline for  $\text{CO}_2$  emission reduction in industrial sector.

## Acknowledgments

The authors wish to thank for financially supported by the Discipline of Excellence (DOE) in Chemical Engineering, the Department of Chemical Engineering, Faculty of engineering, Prince of Songkla University. In addition, authors wish to thank the National Research Council of Thailand (NRCT), Thailand and the Energy Policy and Planning Office (EPPO) for providing a scholarship to the student.

## References

- [1] D. Bonenfant, L. Kharoune, S. Sauve, R. Hausler, P. Niquette, M. Mimeault, and M. Kharoune, "CO<sub>2</sub> Sequestration Potential of Steel Slags at Ambient Pressure and Temperature", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2008, Vol. 47, pp. 7610–6.
- [2] V. Prigiobbe, A. Polettoni, and R. Baciocchi, "Gas Solid Carbonation Kinetics of Air Pollution Control Residues for CO<sub>2</sub> Storage", *J. Chem. Eng.*, 2009, Vol. 148, pp. 270–8.
- [3] F. Goff, and K.S. Lackner, "Carbon Dioxide Sequestering Using Ultramafic Rocks", *Environ. Geosci.*, 1998, Vol. 5, No. 3, pp. 89–101
- [4] Goff, F. and Lackner, K.S. 1998. Carbon Dioxide Sequestering Using Ultramafic Rocks. *Environ. Geosci.*,5(3): 89–101.
- [5] Eloneva, S. Teir, S. Salminen, J. Fogelholm, C.J. and Zevenhoven, R. 2008. Fixation of CO<sub>2</sub> by Carbonating Calcium Derived from Blast Furnace slag. *Energy*, 33: 1461– 1467.
- [6] Bonenfant, D. Kharoune, L. Sauve, S. Hausler, R. Niquette, P. Mimeault, M. and Kharoune, M. 2009. Molecular Analysis of Carbon Dioxide Adsorption Processes on Steel Slag Oxides. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 3: 20-22.
- [7] S. Eloneva, S. Teir, J. Salminen, C. J. Fogelholm, and R. Zevenhoven, "Fixation of CO<sub>2</sub> by carbonating calcium derived from blast furnace slag", *Energy*, 2008, Vol. 33, pp 1461– 7.
- [8] D. Bonenfant, L. Kharoune, S. Sauve, R. Hausler, P. Niquette, M. Mimeault, and M. Kharoune, "Molecular Analysis of Carbon Dioxide Adsorption Processes on Steel Slag Oxides", *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 2009, Vol. 3, pp. 20-2.
- [9] K. Filiz, O. Umit, and K. Suleyman, "Optimization of manufacturing conditions for activated carbon from Turkish lignite by chemical activation using response surface methodology", *Appl. Therm. Eng.*, 2007, Vol. 27, pp. 1212-1218.
- [10] W.C. Lee, S. Yusof, N.S.A. Hamid, B.S. Baharin, "Optimizing conditions for hot water extraction of banana juice using response surface methodology (RSM)", *J. F. Eng.*, 2006, Vol. 75, pp. 437-479.
- [11] Doucet, F.J. 2010. Effective CO<sub>2</sub>-Specific Sequestration Capacity of Steel Slag and Variability in Their Leaching Behaviour in View of Industrial Mineral Carbonation. *Miner. Eng.*, 23: 262-269.
- [12] Lin, C.C., Chen, B.C., Chen, Y.S. and Hsu, S.K. 2008. Feasibility of a cross flow rotating packed bed in removing carbon dioxide from gaseous streams. *Separation and purification Technology*. 62: 507-512.