



การลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการกักเก็บด้วยซีตะกรันจาก
กระบวนการผลิตเหล็กกล้า

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

สุดารัตน์ อิ่นจะนะ
Sudarat Tinchana

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Chemical Engineering
Prince of Songkla University**

2555

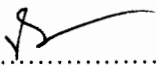
๐

เลขที่..... 62 101.01.....	ชื่อ.....
Bib Key.....
...../.....

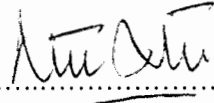
(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ การลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการกักเก็บด้วยซีตตระกรันจาก
กระบวนการผลิตเหล็กกล้า
ผู้เขียน นางสาวสุภารัตน์ ถิ่นจะนะ
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

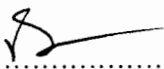

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรัญ บุญกาญจน์)


คณะกรรมการสอบ

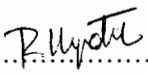

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กัญญา ศรีสุวรรณ)

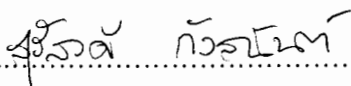
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร)

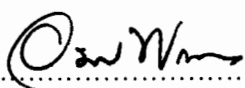

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรัญ บุญกาญจน์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร)


..... กรรมการ
(ดร.พรศิริ แก้วประดิษฐ์)


..... กรรมการ
(ดร.สุรัสวดี กังสนันท์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี


.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการกักเก็บด้วย ซีตากรันจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้า
ผู้เขียน	นางสาวสุภารัตน์ ถิ่นจะนะ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นก๊าซเรือนกระจกที่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน การลดการปล่อยก๊าซ CO_2 สู่บรรยากาศเป็นสิ่งจำเป็นซึ่งต้องมีการวิจัยพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ ที่สามารถกักเก็บ CO_2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ต่ำลง จากการศึกษาขององค์ประกอบที่มีอยู่ในซีตากรันที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมถลุงเหล็กกล้า พบว่ามีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งมีความสามารถในการกักเก็บ CO_2 งานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษาการดักจับ (Capture) CO_2 โดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตากรันในคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบ โดยแบ่งการศึกษาดังกล่าวออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตากรันโดยเปรียบเทียบชนิดของสารชะละลาย 2 ชนิด คือ สารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออน จากการศึกษาพบว่าสารละลายที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการดักจับ CO_2 คือ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตากรันด้วยน้ำปราศจากไอออน ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัด CO_2 เบื้องต้นร้อยละ 75.74 ซึ่งสูงกว่าสารละลายกรดอะซิติกซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัด CO_2 เพียงร้อยละ 39.69 เนื่องจากสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตากรันด้วยน้ำปราศจากไอออน มีค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมแก่การดูดซับ CO_2 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตากรันด้วยน้ำปราศจากไอออน ที่สภาวะในการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์คือ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (L/S) 10:1 (กรัมต่อกรัม) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นสารดูดซับสำหรับการกำจัด CO_2 ในคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบต่อไป

ตอนที่ 2 ศึกษาการนำสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตากรันด้วยน้ำปราศจากไอออนไปใช้ในการกำจัด CO_2 จากอากาศเสียจำลองและทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด CO_2 ในคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย อัตราการไหลของของเหลว (0.3-0.9 ลิตรต่อนาที) อัตราการไหลของก๊าซหรืออัตราการไหลอากาศ

เสีย (0.25-0.85 ลิตรต่อนาฬิกา) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน (200-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ออกแบบการทดลองและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง Response Surface Methodology (RSM) แบบ Central Composite Design (CCD) ด้วยโปรแกรม Design Expert Software เพื่อประเมินผลและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ อันจะนำไปสู่สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสม ทำให้ได้แบบจำลองสมการกำลังสอง (Quadratic Model) ของประสิทธิภาพการกำจัด CO₂ ดังสมการ และได้สภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ คือ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.77 ลิตรต่อนาฬิกา อัตราการไหลของก๊าซ 0.25 ลิตรต่อนาฬิกา ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 725 มิลลิกรัมต่อลิตร และดำเนินการโดยใช้สารละลายแบบไหลผ่านครั้งเดียวเป็นเวลา 15 นาที ซึ่งค่าจากการคำนวณจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัด CO₂ 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 CO₂ (ร้อยละ)
 x_1 = อัตราการไหลของของเหลว (ลิตรต่อนาฬิกา)
 x_2 = อัตราการไหลของก๊าซหรืออัตราการไหลอากาศเสีย (ลิตรต่อนาฬิกา)
 x_3 = ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

โดยสรุปแล้วงานวิจัยนี้ยืนยันได้ว่าสามารถนำซีตะกรันซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานถลุงเหล็กมาเป็นสารตั้งต้นในการกำจัด CO₂ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้จริงเพื่อลดการปล่อย CO₂ จากภาคอุตสาหกรรมสู่บรรยากาศได้

Thesis Title	Carbon Dioxide Emission Reduction by Sequestration using Slag from Steel Making Process
Author	Miss Sudarat Tinchana
Major Program	Chemical Engineering
Academic Year	2011

ABSTRACT

The global warming associated with an increase of the greenhouse gas emissions particularly carbon dioxide (CO_2) represents a worldwide problem. The CO_2 emissions reduction is necessary. Thus researches on 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 CO_2 to calcium carbonate (CaCO_3). These researches focuses on method of CO_2 fixation as environmentally benign carbonate minerals and determine the optimum condition for Ca^{2+} leaching process.

The Ca^{2+} leaching procedure with two solutions acetic acid and deionized water. The optimum solution to remove CO_2 was calcium ion solution leached 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 CO_2 . Therefore, this research selected calcium ion solution leached with deionized water at liquid per solid ratio (L/S) 10:1 (g/g), room temperature. This optimum condition was further examined with CO_2 absorption process.

The CO_2 removal was investigated by synthesis gas of CO_2 and studied the optimum condition for 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ (%)

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 CO₂. In addition, this approach can be applied as a guideline for CO₂ emission reduction in industrial sector.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากการสนับสนุนและความร่วมมือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายๆ ท่าน ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จรัญ บุญกาญจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา คอยชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหา รวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา อีกทั้งยังช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร กรรมการที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำในระหว่างการทดลองและการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ กรรมการผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ แก้วประดิษฐ์ และ ดร.สุรัสวดี กังสนันท์ กรรมการผู้แทนคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการบำบัดมลพิษและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน และ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่จัดสรรเงินทุนสำหรับการทำวิจัย การจัดซื้อ ซ่อมอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ รวมทั้งบริษัท สยามสติลซินดิเกท จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ซีตะกรันซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ขอขอบคุณนางจรรยา อินทมณี นางสาวจุฑารัตน์ ชันทกะพันธ์และนายบุญสิทธิ์ วัฒนไทย ที่ให้คำแนะนำการวิเคราะห์ต่างๆ ทางเคมี และขอขอบพระคุณครูช่างชำนาญการที่คอยช่วยซ่อมแซมและปรับปรุงอุปกรณ์ในการทดลอง รวมทั้งบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดจนขอขอบคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ด้วย ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดีทุกคน ที่มีส่วนช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดารัตน์ ถิ่นจะนะ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	5
2.1.1 คุณสมบัติ	5
2.1.2 สาเหตุที่ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	5
2.1.3 ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	6
2.1.4 มาตรฐานคุณภาพของอากาศเกี่ยวข้องกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	6
ในประเทศไทยตามที่กฎหมายกำหนด	
2.2 จีโตะกรันจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้า	7
2.3 กระบวนการชะละลาย	8
2.4 กระบวนการดูดซึม	10
2.4.1 การถ่ายเทมวลแก๊สสู่ของเหลว	10
2.4.2 ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบหอดูดซึม	15
2.5 ปฏิกริยาเคมีที่เกี่ยวข้อง	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 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชัน	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 แอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	47
3.2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพค่างด้วยวิธีการไทเทรต	47
3.2.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	47
3.2.7 วิธีการทดลองและการออกแบบการทดลอง	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	60
4.1 กระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากชีตะกรัน	61
4.2 ศึกษาการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายแคลเซียมไอออน ที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในคอลัมน์ บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ	71
4.3 ผลการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายแคลเซียมไอออน ที่ได้จากกระบวนการชะละลายชีตะกรันในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้คอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการด้วยเทคนิค Response Surface Methodology (RSM) ในการออกแบบการทดลอง	75
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	88
5.1 สรุปผลการทดลอง	88
5.2 ข้อเสนอแนะ	90
บรรณานุกรม	91
ภาคผนวก	97
ภาคผนวก ก ข้อมูลสารเคมีเบื้องต้น	97
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์	103
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง	118
ภาคผนวก ง การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน	161
ประวัติผู้เขียน	172

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	องค์ประกอบทั่วไปของจีตะกัณห์เหล็ก	8
3-1	สภาวะการทดลองสำหรับศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากจีตะกัณห์	41
3-2	รหัสตัวแปรและขอบเขตของตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยเทคนิค RSM ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร และตัวแปรตาม 1 ตัวแปร	53
3-3	แสดงสภาวะการทดลองสำหรับศึกษาการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายจีตะกัณห์ในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ	54
4-1	ปริมาณองค์ประกอบทั่วไปของจีตะกัณห์เหล็กก่อนทำการชะละลายวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์	61
4-2	ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในจีตะกัณห์ที่เหลือจากกระบวนการชะละลายด้วยสารละลายชนิดกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออน	68
4-3	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากกระบวนการชะละลายจีตะกัณห์ในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการที่สภาวะการทดลองต่างๆ ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD	76
4-4	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองสำหรับกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	78
4-5	สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับผลการทดลอง	84

รายการภาพประกอบ

	ภาพประกอบที่	หน้า
2-1	ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two Resistance Theory) สำหรับการถ้ายโอนมวลระหว่างแก๊สและของเหลว	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	แผนภาพแสดงสมมูลสารสำหรับหอคูดซึ่ม	16
2-5	การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$	21
3-1	ลักษณะทางกายภาพของขี้ตะกรันที่ได้จากเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF)	35
3-2	เครื่องบดย่อยแบบจาว (Jaw Crusher) ใช้สำหรับการบดหยาบขี้ตะกรัน	36
3-3	เครื่องบดย่อยแบบไจราทอรี (Gyratory Crusher)	37
3-4	เครื่องร่อนตะแกรงสำหรับคัดขนาดขี้ตะกรัน	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	กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นแคลเซียม (Ca^{2+}) โดยใช้เครื่อง AAS	45
3-11	สีของสารละลายก่อนและหลังการไทเทรต	46
3-12	ชุดอุปกรณ์การทดลองของหอคูดซึ่ม ชนิดคอลัมน์บรรจุสำหรับการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	48
3-13	ชุดการทดลองของคอลัมน์บรรจุที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	49
3-14	ชุดอุปกรณ์เก็บแก๊สด้วยวิธีการแทนที่น้ำเกลืออิมด้วยแก๊ส	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	ลักษณะทางกายภาพของซีตะกรันที่ผ่านการอบแห้งและคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 44 ไมครอน และค้ำตะแกรงขนาดรูเปิด 37 ไมครอน	60
4-2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันกับอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง	62
4-3	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันกับความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติก	63
4-4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันกับอุณหภูมิในการชะละลาย	64
4-5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายกับเวลาที่ใช้ในการชะละลาย	65
4-6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายกับเวลาที่ใช้ในการชะละลาย	66
4-7	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบของค์ประกอบตะกอนของซีตะกรันก่อนและหลังการชะละลายวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์	69
4-8	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับสารดูดซึมต่างๆ โดยใช้อัตราการไหลของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร	70
4-9	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียม ไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน	72
4-10	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราการไหลของของเหลว	73

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราการไหลของของแก๊ส	74
4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการค่าทดลองและจากการทำนาย ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-3)	79
4-13 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการไหลของแก๊ส (x_2) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตกรัน (x_3) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	81
4-14 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการไหลของของเหลว (x_1) และอัตราการไหลของแก๊ส (x_2) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ระดับความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร	82
4-15 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊ส (x_2) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตกรัน (x_3) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	83
4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนต่อเวลา	85
4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายแคลเซียมไอออนต่อเวลา	86
4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงเวลาต่างๆ	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 แต่ในปัจจุบันชั้นบรรยากาศของโลกมีปริมาณก๊าซดังกล่าวมากเกินไปจนส่งผลต่อธรรมชาติอันเป็นผลมาจากฝีมือมนุษย์ ทั้งก๊าซที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ตัวอย่างก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญได้แก่ ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon, CFCs) และก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) เป็นต้น แต่ก๊าซเรือนกระจกที่ถูกควบคุมโดยพิธีสารเกียวโตมีเพียง 6 ชนิด โดยจะต้องเป็นก๊าซที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic Greenhouse Gas Emission) เท่านั้น ได้แก่ ก๊าซ CO_2 ก๊าซมีเทน ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrofluorocarbon, HFCs) ก๊าซเปอร์ฟลูออโรคาร์บอน (Perfluorocarbon, PFCs) และก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulfurhexafluoride, SF_6) (Prigione *et al.*, 2009) โดยจะเห็นว่าก๊าซ CO_2 เป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ เนื่องจากก๊าซดังกล่าวมีปริมาณและความเข้มข้นที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศสูงกว่าก๊าซเรือนกระจกชนิดอื่นๆ ซึ่งในปัจจุบันทั่วโลกได้มีการพัฒนาอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ ทำให้มีความต้องการใช้พลังงานมากขึ้น โดยพลังงานส่วนใหญ่ได้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนภายในอากาศเกิดเป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์แล้วจะเกิดเป็นก๊าซ CO_2 อีกทั้งโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ก็มีการปล่อยก๊าซ CO_2 ออกมาในปริมาณมากมายมหาศาลซึ่งเร็วกว่าที่กระบวนการตามธรรมชาติจะ

กำจัดออกไปได้โดยก๊าซ CO_2 ที่เกิดขึ้นจะสะสมในชั้นบรรยากาศเกิดภาวะโลกร้อนขึ้นดังปัจจุบัน (เศรษฐศาสตร์กับสิ่งแวดล้อม, 2551) ดังนั้นจึงควรวางวิธีกำจัดก๊าซ CO_2 ที่ออกจากปล่องควัน โรงงานอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพสูงและมีค่าใช้จ่ายต่ำ

การพิจารณาเลือกใช้กระบวนการกำจัดก๊าซ CO_2 ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการกำจัดก๊าซ CO_2 เป็นต้น โดยกระบวนการพื้นฐานสำหรับการกำจัดก๊าซ CO_2 ที่นิยมใช้ได้แก่ กระบวนการดูดซับก๊าซ (Gas Adsorption) ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดสารพิษโดยใช้สารดูดซับ (Adsorbent) ที่เป็นของแข็ง ประสิทธิภาพในการดูดซับของวิธีนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ ซึ่งจะดูดซับโดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและการทำให้สารดูดซับมีความพรุนมากก็จะเป็นการเพิ่มพื้นที่การดูดซับให้มากขึ้นด้วย สารดูดซับที่นิยมใช้ได้แก่ โม-เลกุลาร์ซีฟ 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 ยังมีกระบวนการดูดซับก๊าซซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการกำจัดก๊าซ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้ของเหลวในการดูดซับสารพิษในอากาศ ทำให้ปริมาณสารพิษที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศภายนอกลดลง มักนิยมใช้ในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็ก หมอก ควัน และก๊าซที่ละลายได้ กระบวนการดูดซับก๊าซจึงเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับใช้ในการดูดซับก๊าซ เนื่องจากสามารถใช้สารดูดซับร่วมทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดได้ ซึ่งชนิดของสารดูดซับที่ใช้ในกระบวนการขึ้นอยู่กับราคาและชนิดของสารพิษที่ต้องการกำจัด สารดูดซับทั่วไปที่นิยมใช้ได้แก่ สารละลายจำพวก Sodium Hydroxide Selexol, Rectisol และ Monoethanolamine (MEA) เป็นต้น (Tinoco and Bouallou, 2010)

อุตสาหกรรมถลุงเหล็กเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการปล่อยก๊าซ CO_2 ซึ่งอุตสาหกรรมถลุงเหล็กกล้าจะมีชีตะกรันเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเกิดขึ้นถึงประมาณร้อยละ 10 ของเหล็กที่ผลิตได้ (Bonenfant *et al.*, 2008) แต่เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบที่มีอยู่ในชีตะกรันพบว่า มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งมีความสามารถในการดักจับก๊าซ CO_2 แล้วกลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยเมื่อชะละลายสารข้างต้นออกมาจากชีตะกรัน และนำไปใช้ในการดูดซับก๊าซ CO_2 พบว่าหลังทำปฏิกิริยาแล้วจะได้องค์ประกอบของก๊าซ CO_2 อยู่ใน

รูปของของแข็ง จึงเป็นการกักเก็บก๊าซ CO_2 ได้อย่างถาวร (Bonenfant *et al.*, 2009) นอกจากนี้ ยังสามารถนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ สี และกระดาษได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้สนใจที่จะนำซีตะกรันจากกระบวนการถลุงเหล็กมาชะละลายแคลเซียมออกมา เพื่อใช้เป็นสารละลายดูดซึมก๊าซ CO_2 จากอากาศเสียจำลองด้วยวิธี Packed Bed Gas Absorption และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการกำจัดก๊าซ CO_2 เช่น อัตราการไหลของก๊าซ CO_2 อัตราการไหลของสารดูดซึม ความเข้มข้นของสารดูดซึม โดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 สูงสุด ซึ่งจะเป็นแนวทางสำหรับการกำจัดก๊าซ CO_2 โดยใช้ซีตะกรันและลดการปล่อยก๊าซ CO_2 ออกสู่บรรยากาศและเพื่อเพิ่มมูลค่าแก๊วสคูเหลือใช้จากกระบวนการผลิตเหล็กด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อกำจัดก๊าซ CO_2 โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งชนิดซีตะกรันจากการผลิตเหล็ก

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ CO_2 โดยใช้สารละลายที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตะกรันเหล็กในคอลัมน์บรรจุ (Packed Column) ระดับห้องปฏิบัติการ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO_2 โดยใช้ซีตะกรันที่ได้จากกระบวนการผลิตเหล็ก ทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งมีขอบเขตงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 ศึกษาสภาวะที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการชะละลาย Ca^{2+} ออกจากซีตะกรันและหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการ โดยใช้เทคนิค Response Surface Methodology (RSM) ในการออกแบบการทดลอง

1.3.2 ศึกษาสภาวะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 ในก๊าซเสียจำลองในการดำเนินการทดลองและหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการโดยใช้เทคนิค RSM ในการออกแบบการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถกำจัดก๊าซ CO₂ โดยใช้ชีตะกรันหลัก
- 1.4.2 สามารถนำชีตะกรันซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการผลิตเหล็กมาใช้ในการกำจัดก๊าซ CO₂
- 1.4.3 เป็นการเพิ่มมูลค่าแก่วัสดุเหลือใช้จากการอุตสาหกรรมการถลุงเหล็ก
- 1.4.4 เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาภาวะโลกร้อน

บทที่ 2

ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

2.1.1 คุณสมบัติ

ก๊าซ CO₂ เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ มวลโมเลกุลเท่ากับ 44.01 กรัมต่อโมล จุดเดือด -78.5 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นที่ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 1.799 กรัมต่อลิตร สามารถละลายน้ำได้ โดยปกติแล้วเป็นก๊าซที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่กัดกร่อน แต่สามารถที่จะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของโลหะและไฮดรอกไซด์ได้ผลผลิตเป็นคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต ก๊าซ CO₂ เป็นก๊าซที่มีอยู่ในธรรมชาติประมาณร้อยละ 0.03 โดยปริมาตร ในเขตเมืองมีปริมาณเพิ่มเป็นประมาณร้อยละ 0.06 และลมหายใจออกของมนุษย์มีก๊าซประมาณร้อยละ 5.6 (ไพศาล, 2551)

2.1.2 สาเหตุที่ทำให้เกิดก๊าซ CO₂

การศึกษาปริมาณก๊าซ CO₂ โดยหน่วยงาน Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา รายงานว่าปริมาณก๊าซ CO₂ จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ และแหล่งอื่นที่เป็นผลมาจากฝีมือมนุษย์กำลังมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ผลการศึกษาของ IPCC ยังระบุว่าในบรรดาก๊าซเรือนกระจกต่างๆ ก๊าซ CO₂ เป็นก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดพลังงานความร้อนสะสมในบรรยากาศของโลกมากที่สุด ทั้งยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นกว่าก๊าซชนิดอื่นๆ ด้วย นั่นหมายถึงผลกระทบโดยตรงต่ออุณหภูมิของผิวโลกและชั้นบรรยากาศจะยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นต่อไปอีก ล่าสุดนี้หน่วยงาน IPCC ได้รายงานปริมาณก๊าซ CO₂ ที่เพิ่มขึ้นโดยฝีมือมนุษย์ ทำให้พลังงานรังสีความร้อนสะสมบนผิวโลกและชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นประมาณ 1.56 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยปริมาณนี้ยังไม่คิดรวมผลกระทบที่เกิดขึ้นทางอ้อม เช่น จากการเผาไหม้ เป็นต้น (ปานทิพย์, 2554)

2.1.3 ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซ CO₂

การเพิ่มขึ้นของก๊าซ CO₂ ส่งผลทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ซึ่งทำให้ชีวิตมนุษย์สั้นลง โดยมีการทำนายไว้ว่าในอีก 20 ปีข้างหน้า อุณหภูมิของโลกจะเพิ่มสูงขึ้นทุกปี นอกจากนี้ ภาวะโลกร้อนยังส่งผลให้พืชและสัตว์ต้องมีการปรับตัวเปลี่ยนแปลง มิเช่นนั้นแล้วอาจจะต้องถึงขั้นสูญพันธุ์ได้ เมื่อโลกร้อนขึ้นจะก่อให้เกิดสภาพแวดล้อมแบบร้อนชื้นที่เหมาะสมแก่การฟักตัวของเชื้อโรคและศัตรูพืช ส่วนแบคทีเรียในอากาศจะเพิ่มมากขึ้นกว่าปกติและโอกาสในการแพร่ระบาดของสู่มนุษย์ก็จะมีสูงด้วย (เดวิท, 2551) หากทำการรักษาด้วยยาปฏิชีวนะความรุนแรงของโรคจะทุเลาลงแต่ถ้าปล่อยไว้เป็นเวลานานก็มีโอกาสทำให้เสียชีวิตสูงถึงร้อยละ 60 อีกทั้งภาวะโลกร้อนยังส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงภูมิประเทศและภูมิอากาศ โดยเฉพาะแถบขั้วโลกซึ่งมีภูเขาน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ รวมทั้งก้อนน้ำแข็งจะละลายอย่างรวดเร็ว ทำให้ระดับน้ำทะเลทางขั้วโลกเพิ่มขึ้นและไหลลงสู่มหาสมุทรทำให้เกิดน้ำท่วมได้ทุกทวีป และบริเวณที่มีภูมิประเทศอยู่ในระดับต่ำอาจจะถึงขั้นสูญหายไปจากแผนที่โลกก็เป็นได้ นอกจากนี้ ภาวะโลกร้อนยังทำให้สัตว์น้ำเสียชีวิตเพราะระบบนิเวศเปลี่ยนแปลงไป ในส่วนของทวีปยุโรปและยุโรปใต้ที่มีภูมิประเทศและพื้นที่แบบลาดเอียงจะเกิดความแห้งแล้งในหลายพื้นที่ ทำให้ปัญหาอุทกภัยเพิ่มขึ้นเนื่องจากธารน้ำแข็งบริเวณยอดเขาสูงที่ปกคลุมด้วยหิมะจะละลายจนหมด ส่วนในทวีปเอเชียที่อุณหภูมิจะสูงขึ้นในฤดูกาลแล้งอาจมีน้ำท่วม ผลผลิตทางการเกษตรจะลดลง ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น

2.1.4 มาตรฐานคุณภาพของอากาศเกี่ยวข้องกับก๊าซ CO₂ ในประเทศไทยตามที่กฎหมายกำหนด

พิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) ตั้งชื่อขึ้นตามสถานที่ในการเจรจาที่เมืองเกียวโต เมืองหลวงเก่าของประเทศญี่ปุ่น เมื่อวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2540 และมีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 พิธีสารดังกล่าวเป็นข้อตกลงฉบับแรกของโลก ว่าด้วยการต่อสู้เพื่อลดก๊าซเรือนกระจก ซึ่งก๊าซ CO₂ ก็หนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่ได้กำหนดไว้ในพิธีสารดังกล่าวด้วย หลังจากการให้สัตยาบันของประเทศรัสเซียซึ่งปล่อยก๊าซร้อยละ 17 ของการปล่อยก๊าซทั่วโลก ทำให้ครบเงื่อนไขที่ว่าพิธีสารมีผลบังคับใช้ต่อเมื่อมีประเทศร่วมให้สัตยาบันไม่น้อยกว่า 55 ประเทศ โดยจะต้องมีประเทศที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมารวมแล้วอย่างน้อยร้อยละ 55 ของปริมาณก๊าซที่มีอยู่ในปัจจุบัน

ปัจจุบันมีประเทศที่ให้สัตยาบันแล้ว 191 ประเทศ ประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งได้ชื่อว่าเป็นประเทศที่สร้างภาวะโลกร้อนเป็นอันดับที่ 1 คิดเป็นร้อยละ 28 อันดับที่ 2 เป็นสาธารณรัฐ

ประชาชนจีน และอันดับที่ 3 ประเทศอินเดีย โดยวัดจากปริมาณก๊าซ CO₂ 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 CO₂ ที่สามารถปล่อยสู่บรรยากาศได้ เช่นมาตรฐาน ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers) ได้กำหนดปริมาณก๊าซ CO₂ จะมีได้ไม่เกิน 1,000 ppm เป็นต้น (ไพศาล, 2551)

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

ขี้ตะกรัน (Slag) เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้าชนิดเตาไฟฟ้า (Electrical Furnace Process) กระบวนการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านับเป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กชั้นกลาง กล่าวคือ การนำเศษเหล็ก (Scrap) มาทำการหลอมปรับปรุงคุณสมบัติและส่วนผสมทางเคมีให้ได้เป็นเหล็กกล้า โดยใช้ร่วมกับเครื่องมือหล่อแบบต่อเนื่อง (Continues Casting Machine, CCM) จะได้ผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จได้แก่ เหล็กทรงยาว (Billet) เหล็กทรงแบน (Slab) และเหล็กทรงใหญ่ (Bloom) เหล็กทรงยาวที่ได้จะเป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กเส้นและเหล็กหลอด ซึ่งสำหรับประเทศไทยการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นการผลิตเพื่อให้ได้เหล็กเส้นและเหล็กหลอดเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป ในขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นจะมีการเติมโลหะหินปูน (Limestone) เหล็กดิบหรือเศษเหล็ก หินปูน และโดลิม (Dolime) ในกระบวนการหลอมเหล็กเพื่อรวมตัวกับสิ่งเจือปนต่างๆ โดยหินปูนจะหลอมปกคลุมน้ำเหล็กภายใต้การควบคุมและการกำจัดสารมลทินต่างๆ เช่น คาร์บอน ซิลิกอน และแมงกานีส สารดังกล่าวจะถูกกำจัดออกไปเกิดเป็นขี้ตะกรัน เหล็กลอยอยู่ด้านบนน้ำเหล็ก จากนั้นจึงถูกคัดแยกออกจากเตาด้วยช่องระบายที่ถูกออกแบบไว้ เมื่อ

อุณหภูมิเย็นลงก็จะได้ซีตะกรันเหล็กที่เป็นก้อนแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเหล็กมีความต้วงจำเพาะมากกว่าจะจมลงสู่ก้นเตา ในขณะที่ซีตะกรันเตาหลอมจะถูกดันให้ลอยสู่ด้านบน ซีตะกรันจะถูกแยกออกจากน้ำเหล็กโดยการเทออกอย่างช้าๆ ลงในถังเหล็ก (Slag Pot) โดยอาจมีน้ำเหล็กปนมากับซีตะกรันเตาหลอมอยู่บ้าง (ศิริพงษ์, 2552) ซึ่งองค์ประกอบทั่วไปของซีตะกรันเหล็กแสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทั่วไปของซีตะกรันเหล็ก

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

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

2.3 กระบวนการชะละลาย (ศุภคินส์, 2548)

กระบวนการชะละลาย (Leaching Process) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวทำละลายชนิดของเหลวซึ่งเรียกว่า ตัวชะ (Leachant) ไปละลายสารที่อยู่ในของแข็ง สารที่ละลายได้ในตัวทำละลายนั้นๆ เรียกว่า ผลชะละลาย (Leachate) การชะละลายมีความแตกต่างกับการล้างของแข็งที่ตัวกรองตรงที่ว่า การล้างของแข็งที่ตัวกรองมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดตัวทำละลายออกจากของแข็งที่จับกัน โดยใช้น้ำหรือบางครั้งอาจใช้ตัวทำละลายในการล้างตัวทำละลายซึ่งเป็นสารเจือปน (Impurity) ที่ไม่ต้องการ ผลผลิตที่ต้องการคือของแข็งที่จับกัน ในขณะที่การชะละลายผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเป็นส่วนที่ถูกสกัดออกมาจากของแข็ง ในการชะละลายปริมาณของสารที่ละลายออกมาส่วนมากมีปริมาณที่มากกว่าการล้างของแข็งที่ตัวกรอง และสมบัติของของแข็งอาจเปลี่ยนแปลงไปในระหว่าง

ปฏิบัติการชะละลาย 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 แอมโมเนียไฮดรอกไซด์ 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 ความปั่นป่วนภายในของเหลว 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 และมีจุด

เดือดต่ำ

2.4.1 การถ่ายเทมวลก๊าซสู่ของเหลว

การถ่ายเทมวลโดยการแพร่หรือการพาเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่าง (Gradient) ของความเข้มข้นเฉลี่ยในแต่ละวัฏภาค ซึ่งไม่ได้อยู่ในสถานะสมดุลกัน ทำให้เกิดการปรับเข้าสู่สถานะสมดุลของความเข้มข้น 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 ในวัฏภาคของเหลว
 P'_A = ความดันไอของ A

และสำหรับก๊าซอุดมคติ

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

เมื่อ P_A = ความดันย่อยขององค์ประกอบ A
 y_A = สัดส่วนโมล A ในวัฏภาคของก๊าซ
 P'_A = ความดันไอของ A

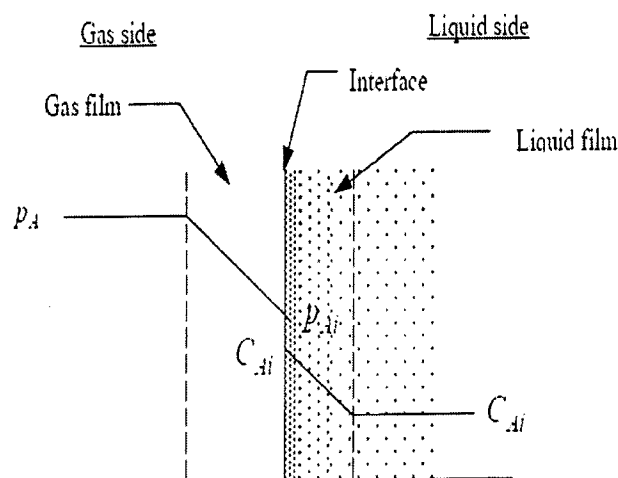
การถ่ายเทมวลของก๊าซไปยังของเหลวสามารถอธิบายโดยใช้ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two Resistance Theory) (Welty, 1984) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ

1. การถ่ายเทมวลจากวัฏภาคก๊าซไปยังผิวสัมผัสของก๊าซ
2. การถ่ายเทข้ามผิวสัมผัสไปยังฟิล์มของเหลว
3. การถ่ายเทจากฟิล์มของเหลวเข้าไปยังวัฏภาคของเหลว

ทฤษฎีนี้ได้อ้างสมมติฐานดังนี้ คือ

1. มีฟิล์มสองชั้นอยู่ที่แต่ละข้างของผิวสัมผัส (ฟิล์มด้านก๊าซและฟิล์มของเหลว) และอัตราการถ่ายเทมวลถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ผ่านฟิล์มของก๊าซและของเหลว
2. ความต้านทานในการถ่ายเทมวลข้ามผิวสัมผัสมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความต้านทานของฟิล์มก๊าซและของเหลว

ขั้นตอนการถ่ายเทมวลจากก๊าซสู่ของเหลว แสดงดังภาพประกอบที่ 2.1



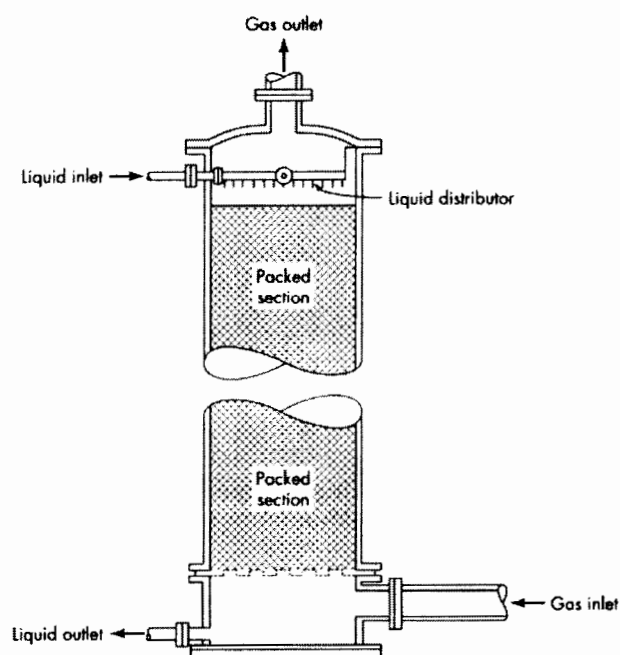
ภาพประกอบ 2.1 ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two Resistance Theory) สำหรับการถ่ายโอนมวลระหว่างก๊าซและของเหลว (Welty, 1984)

อุปกรณ์การดูดซึม

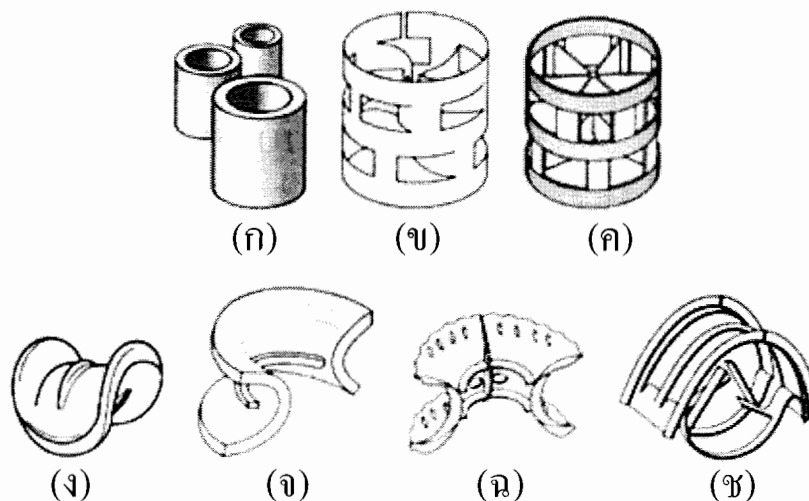
ในการดูดซึมต้องการให้ก๊าซและของเหลวมีการสัมผัสกันมาก และความดันลด (Pressure Drop) มีค่าน้อย โดยปกติจะมีวิธีการทำให้ของเหลวแตกย่อยเป็นหยดหรือฟิล์มบางๆ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวของเหลวมาก สำหรับการถ่ายเทมวลและเพิ่มแรงดัน (Driving Force) ให้ฟิล์มมักใช้เครื่องมือดูดซึมคือ คอลัมน์บรรจุและคอลัมน์แบบสเปรย์ เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะคอลัมน์บรรจุ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ให้ก๊าซสัมผัสกับของเหลวและมีการถ่ายเทมวลอย่างมีประสิทธิภาพ 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 ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัส

ระหว่างก๊าซและของเหลวมากขึ้น 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 ข้อเสียของวัสดุชนิดนี้ คือ 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 ตัวกลางเหล่านี้อาจบรรจุในคอลัมน์ดัดขึ้นโดยวิธีสุ่ม (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 (ฉ), 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 แต่เมื่อช่องว่างระหว่างวัสดุบรรจุลดลงทำให้ความดันตกภายในคอลัมน์บรรจุเพิ่มขึ้น

4. ความสูงของคอดัมน้ำบรรจุ (Packing Height) คอดัมน้ำบรรจุที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมด และระยะเวลาในการสัมผัสมากขึ้นเป็นผลทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงแต่ความดันลดและค่าใช้จ่ายสูงขึ้นด้วย ดังนั้นหากต้องการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและระยะเวลาในการสัมผัสส่วนใหญ่พิจารณาจากชนิดและขนาดของวัสดุบรรจุมากกว่า

2.4.2 ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบหอดูดซึม

2.4.2.1 อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ (L/G Ratio)

สิ่งที่ควรพิจารณาเป็นลำดับแรกในการออกแบบ คือ อัตราการไหลและองค์ประกอบของกระแสก๊าซที่จะไหลเข้าสู่ระบบ คุณสมบัติที่ถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาอัตราการไหลและองค์ประกอบในแต่ละกระแสน้ำของของไหลที่เข้าและออกจากระบบ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-4 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากปลายด้านหนึ่งของหอไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง การทำสมดุลสารในหอดังกรอเส้นประสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

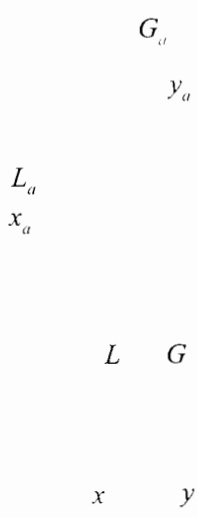
$$\text{ปริมาณสารรวม} \quad L_a + G = L + G_a \quad (2-3)$$

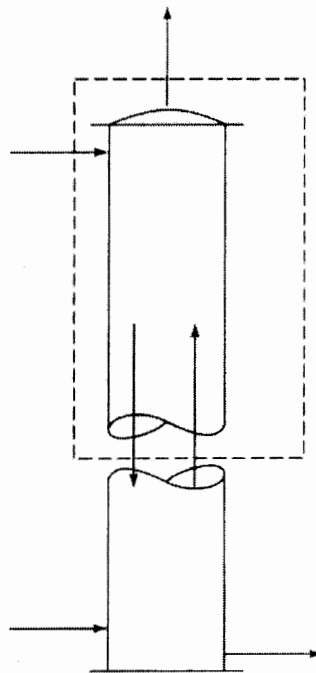
$$\text{สาร A :} \quad L_a x_a + G y = L x + G_a y_a \quad (2-4)$$

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)
$$L_a x_a + G_y = Lx + G_a y_a$$

จัดสมการใหม่ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x และ y ที่จุดใดๆ ในหอได้สมการ 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) หรือสามารถประมาณค่าให้เท่ากับศูนย์ถ้าไม่มีการนำของเหลวที่วนกลับมาใช้ใหม่ และต้องระบุค่าความเข้มข้นของก๊าซเสียหลังผ่านการบำบัด (Y_2) จากหลักการสมดุลของมวลทำให้สามารถประมาณอัตราการไหลของของเหลวที่ต้องการใช้น้อยที่สุดในการดูดซึมก๊าซเสียได้โดยให้มีความเข้มข้นอยู่ในมาตรฐาน (Y_2) สำหรับการใช้งานจริงนั้นจะไม่ใช้สัดส่วนอัตราการไหลของสารดูดซึมต่อก๊าซที่ต่ำที่สุด $(L_m/G_m)_{min}$ แต่จะเพิ่มเพื่ออัตราการไหลของสารดูดซึมให้มากกว่าค่าต่ำสุดดังกล่าวโดยทั่วไปนั้นอัตราการไหลของสารดูดซึมจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 ถึงร้อยละ 100 จากค่าความต้องการต่ำสุด เช่น 1.5 เท่าของอัตราส่วนของอัตราการไหลของเหลวต่อก๊าซต่ำสุด (Joseph and Beachler, 1981)

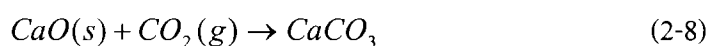
2.4.2.3 เส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึม (Pack tower Diameter)

หลังจากคำนวณหาอัตราอัตราการไหลของสารดูดซึมแล้วจะต้องประมาณขนาดของหอดูดซึมที่เหมาะสมกับสภาวะการไหลของของเหลวและก๊าซ โดยปกติจะออกแบบให้มีขนาดที่เล็กที่สุดแต่ยังสามารถทำงานได้เพื่อลดค่าใช้จ่ายให้ต่ำที่สุด แต่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลงจะมีผลทำให้ความเร็วของก๊าซมีทิศทางจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของหอดูดซึมจะสูงขึ้นและเมื่อถึงความเร็วระดับหนึ่งจะสูงจนกระทั่งสารละลายดูดซึมถูกกระแสน้ำขึ้นไหลย้อนขึ้นทางด้านบนของหอดูดซึม ความเร็วนี้เรียกว่า Flooding Velocity ซึ่งจะไม่สามารถใช้งานหอดูดซึมโดยใช้ความเร็วเท่ากับหรือเกินกว่า Flooding Velocity ได้ ดังนั้นโดยหลักการแล้วเส้นผ่านศูนย์กลางของหอดูดซึมจะถูกเลือกเพื่อให้ความเร็วของอากาศในหอดูดซึมมีค่าต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการไหลย้อนของของเหลวในหอดูดซึม โดยทั่วไปจะใช้ค่าความเร็วที่ร้อยละ 50-75 ของ Flooding Velocity เป็นเกณฑ์ในการออกแบบและเลือก Flooding Velocity ขึ้นกับอัตราส่วนของอัตราการไหลของของเหลวต่อก๊าซ ความหนืดของของเหลว คุณสมบัติของตัวกลาง (Richard, 1981)

2.5 ปฏิริยาเคมีที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการดูดซึมก๊าซ CO_2 ด้วยสารที่ได้จากการชะละลายของเกลือทิ้ง หรือ By-product ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก เป็นปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอเนต ซึ่งในสารชะละลายจะประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะ ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) เป็นต้น ที่รวมกันอยู่ในรูปของสารประกอบของ

แคลเซียมซัลไฟด์ ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้สูงที่ปฏิกิริยาระหว่างสารละลายจากซีตะกรันและก๊าซ CO_2 สามารถเกิดขึ้นได้ โดยปฏิกิริยาพื้นฐานที่สามารถเกิดขึ้นได้แสดงได้ดังสมการที่ (2-8) (Hisyamudin *et al.*, 2009)



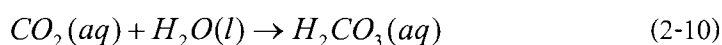
โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาหลายขั้นตอน สามารถเกิดปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

การชะละลายซีตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วทำปฏิกิริยากับก๊าซ CO_2

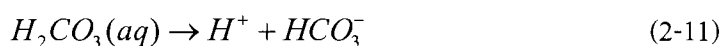
ก๊าซ CO_2 ที่อยู่ในรูปของโมเลกุลที่ไม่มีการแตกตัวเมื่อละลายน้ำเกิดเป็น CO_2 อิสระอยู่ในรูปสารละลาย



ก๊าซ CO_2 ละลายในน้ำปราศจากไอออนเกิดผลิตภัณฑ์เป็นกรดคาร์บอนิก



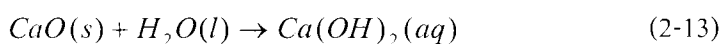
จากสารละลายกรดคาร์บอนิกเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนและไบคาร์บอเนต



ไบคาร์บอเนตเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนและคาร์บอเนต



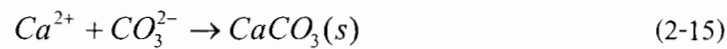
การชะละลายซีตะกรัน (CaO) ด้วยน้ำปราศจากไอออนเกิดผลิตภัณฑ์เป็น $Ca(OH)_2$



$Ca(OH)_2$ แตกตัวเป็นไอออนในสารละลายซีตะกรัน

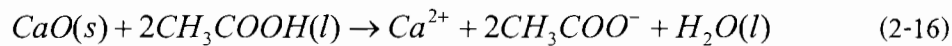


Ca^{2+} ผลิตภัณฑ์จากสมการที่ (2-14) ทำปฏิกิริยากับ CO_3^{2-} ผลิตภัณฑ์จากสมการที่ (2-12) เกิดเป็นตะกอนของหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนต $CaCO_3$

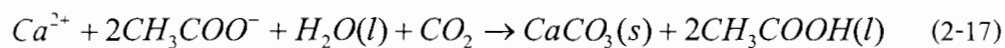


การชะละลายซีตกรันด้วยกรดอะซิติกแล้วทำปฏิกิริยากับก๊าซ CO₂

จากงานวิจัยของ Kakizawa และคณะ (2001) ได้ศึกษาการชะละลายแคลเซียมไอออนจากซีตกรันเหล็กที่มีสารประกอบของแคลเซียมซิติเกิดด้วยกรดอะซิติก (CH₃COOH) สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้
การชะละลายซีตกรัน (CaO) ด้วยกรดอะซิติก (CH₃COOH)



ผลิตภัณฑ์จากสมการที่ (2-16) ทำปฏิกิริยากับก๊าซ CO₂ ดังสมการที่ (2-17) แต่ปฏิกิริยานี้ ปริมาณของ CaCO₃ ที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าที่สภาวะการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน เนื่องจากที่เอชของสารละลายเป็นกรด



2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

การออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม โดยการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของ Input (Factor) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ Output (Response) ที่เกิดขึ้นในการออกแบบการทดลอง เราต้องทำการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของ Y และ X ต่างๆ โดยวิธียามใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งกระบวนการต้องมีปัจจัยหรือ Input (X₁, X₂, X₃, X₄) ต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่า Y ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพ (Quality Characteristic) ของกระบวนการ โดยความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ได้จะทำให้เกิดพื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface Methodology, RSM) งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิค RSM มาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อการศึกษาตัวแปรดำเนินการต่างๆ ตามหลักสถิติ โดยรายละเอียดและประโยชน์ของเทคนิค RSM ดังนี้

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

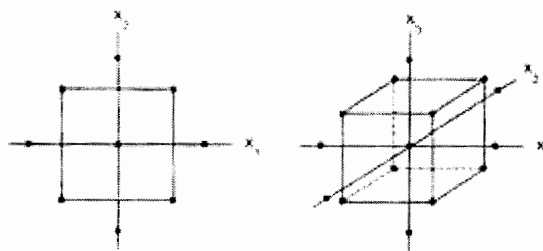
วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง RSM เป็นการรวบรวมข้อมูลทางสถิติและเทคนิคทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหา เพื่อพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพและการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการ RSM ประกอบด้วย กลุ่มของตัวแปรตาม หลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติ โดยจะใช้หลักการเหล่านี้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ 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
		คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดมาจากแหล่งต่างๆ ซึ่งไม่สามารถถูกรวบรวมเอาไว้ใน f ได้ ซึ่งแหล่งที่ว่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบ เช่น ค่าการวัดผิดพลาด โดยที่จะถูกคาดคะเนด้วยค่า มีการกระจายตัวด้วยค่าเฉลี่ยศูนย์และค่าความแปรปรวน

การออกแบบสำหรับพืดแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และการออกแบบสำหรับพืดแบบจำลองอันดับที่สอง ซึ่งการออกแบบสำหรับพืดแบบจำลองอันดับที่สองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองควอดรaticของผลตอบสนอง วิธีการที่สนใจคือ การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวผลตอบสนอง ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้คือหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย 2^k แฟกทอเรียลที่มี nc รัน ซึ่ง 2^k รันในแนวแกนหรือแนวรูปดาว และ nc รันที่จุดศูนย์กลาง ภาพประกอบที่ 2.5 แสดง CCD สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$ บัญชี



ภาพประกอบที่ 2.5 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$
(อิสรพงษ์, 2544)

ข้อดีของแผนการทดลอง CCD คือ เหมาะสมที่สุดในการศึกษาสมการโพลิโนเมียลดีกรี 2 (Second-order Model) กรณีการศึกษาเชิงปริมาณ (Quantitative Factors) และมีความยืดหยุ่นในการใช้สูง เนื่องจากมีค่า Resolution ให้เลือกได้ครอบคลุมทุกค่า เนื่องจากสามารถเลือกใช้ได้ทั้งส่วนที่เป็นการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ (2^k Full Factorial) และการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน นอกจากนี้ การออกแบบแบบ CCD สามารถแยกทดลองได้เป็นส่วนๆ ตามลำดับ คือ ทำการทดลองส่วนของ Factorial (Factorial Portion) และจุดศูนย์กลาง (Center Point) ก่อน จากนั้นทำการสร้างสมการแบบเชิงเส้นตรงสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ และพยากรณ์ส่วนของจุดศูนย์กลาง ถ้าสมการในรูปเส้นตรงไม่เหมาะสมจึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนของจุดแกน (Axial Portion) จะได้สมการโพลิโนเมียลดีกรี 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 นั้นมีความสำคัญเพราะความสำเร็จของการหาจุดที่

เหมาะสมนั้นเกี่ยวข้องกับสิ่งนี้โดยตรง 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. ทำการทดลองตามสถานะการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

4. แสดงผลของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่ได้จากการทดลองในรูปแบบของ Surface Plot โดยใช้โปรแกรม Regression Analysis แบบจำลองที่ได้จะอยู่ในรูปสมการกำลังสอง (Quadratic Equation) ดังแสดงในสมการที่ (2-20)

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

โดยที่ β_0 , β_i , β_{ii} และ β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้นและแบบกำลังสอง และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน ตามลำดับ

2.6.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

วิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป จะเป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-group Variance) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-group Variance) ความแปรปรวนระหว่างกลุ่มจะเกิดขึ้นจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่างๆ ถ้าค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มแตกต่างกันมาก ความแปรปรวนระหว่างกลุ่มก็จะมากตามไปด้วย สำหรับความแปรปรวนภายในกลุ่มเป็น

ค่าที่แสดงให้เห็นว่า คะแนนแต่ละตัวที่รวบรวมมาภายในแต่ละกลุ่มนั้นมีการกระจายมากหรือน้อย ค่าที่คำนวณได้เรียกว่าความคลาดเคลื่อน

2.6.1.3 แบบจำลองการถดถอย (Regression Model)

แบบจำลองการถดถอย (Regression Model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย เพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง ซึ่งจะช่วยให้สามารถหาผลตอบสนองที่จุดใดๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัยได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองนี้ส่วนใหญ่คือ วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) ซึ่งเป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (β) เพื่อให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด (SE) มีค่าน้อยที่สุด บางครั้งเราเรียก β 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

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

3) Quadratic Model

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

วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง

1) ทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและเซตของตัวแปรถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 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-R²) 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 เป็นการวัดว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมกับจุดที่ทำกรออกแบบไว้หรือไม่ 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 ข้อมูลของตัวแปรอิสระที่ได้รับผลตอบแทนมีความสอดคล้องกัน จึงกล่าวได้ว่า RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวเคมี

๒- งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการกำจัด CO₂ โดยการดูดซับด้วยสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันในคอลัมน์บรรจุ (Packed Column) ได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางในการทดลอง การเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดก๊าซ CO₂

Aroonwilas *et al.* (1999) ศึกษาการกำจัดก๊าซ CO₂ โดยการดูดซับในหลอดดูดซับ 3 ขนาด ได้แก่ ระดับห้องทดลอง ระดับ Pilot และระดับอุตสาหกรรม ซึ่งใช้ตัวกลางในการดูดซับประเภท Sulzer EX, Gempak 4A และ Sulzer BX โดยใช้สารดูดซับคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โมโนเอทานอลเอมีน และทูอะมิโนทูเมทิลโพรพานอล (2-amino-2-methylpropanol, AMP) ประสิทธิภาพในการกำจัดถูกอธิบายในเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลของก๊าซ ความดันส่วนของก๊าซ CO₂ อัตราการไหลของของเหลว อุณหภูมิของของเหลว ความเข้มข้นของสารดูดซับ ชนิดของสารดูดซับ และชนิดของตัวกลาง ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า อัตราการไหลของก๊าซไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด คือ ความดันส่วนของก๊าซ CO₂ อัตราการไหลของของเหลว อุณหภูมิของของเหลว ความเข้มข้นของสารดูดซับ ชนิดของสารดูดซับ และชนิดของตัวกลาง จากการทดลองพบว่า ระบบ CO₂-NaOH จะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรสูงกว่าระบบ CO₂-AMP แต่ระบบ CO₂-NaOH จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรต่ำกว่าระบบ CO₂-MEA เนื่องจาก NaOH มีค่าแรงตึงผิวที่ต่ำกว่า MEA ทำให้ในระบบ CO₂-NaOH จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรสูง

Bonenfant *et al.* (2008) ศึกษาประสิทธิภาพในการแยกก๊าซ CO₂ โดยใช้ซีตะกรันที่ได้จากโรงถลุงเหล็กเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF) และจากเตาปรุ้งน้ำเหล็ก (LF) ทำการทดลองในหลอดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และใช้เครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ โดยนำซีตะกรันผสมกับน้ำในอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 1 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม ซีตะกรันขนาดประมาณ 38-106 ไมโครเมตร ปริมาณซีตะกรัน 20 ± 1 กรัม กับน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของ CO₂ ร้อยละ 15 โดยปริมาตร และ N₂ ร้อยละ 85 โดยปริมาตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที จากการทดลองพบว่า การแยก CO₂ โดยใช้สารละลาย LF มีค่า 24.7 กรัม_{CO2} /100 กรัม_{slag} และสามารถทำซ้ำได้ถึง 14 ครั้ง มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้สารละลาย EAF ยิ่งไปกว่านั้น ประสิทธิภาพในการแยกก๊าซ CO₂ จากสารประกอบของ CaO และ

MgO ที่อยู่ในซีตะกรันแบบ LF มีสูงกว่าซีตะกรันแบบ EAF แต่สามารถสรุปได้ว่าทั้งซีตะกรันแบบ LF และ EAF สามารถใช้แยก CO₂ ได้และจะได้ผลลัพท์ที่สูงเมื่ออยู่ในรูปสารละลาย

Chen *et al.* (2003) ศึกษาการกำจัดก๊าซ CO₂ โดยใช้เครื่อง Spay Dryer ในระดับห้องปฏิบัติการ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร สูง 70 เซนติเมตร โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดของสารดูดซึมน้ำที่ผสมกับ Ca(OH)₂ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ความเข้มข้นของสารดูดซึมน้ำ ความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ ที่ทางเข้า และอัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซึมน้ำต่ออัตราการไหลของก๊าซ จากการทดลองที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสพบว่า ความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ ที่ทางเข้าเท่ากับร้อยละ 10 โดยปริมาตร สารดูดซึมน้ำที่ผสมระหว่างร้อยละ 10 ของ NaOH + ร้อยละ 5 ของ (Ca(OH)₂) โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซึมน้ำต่ออัตราการไหลของก๊าซที่ค่า 2.82 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ CO₂ ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO₂ สูงสุดเท่ากับร้อยละ 48

Eloneva *et al.* (2008) ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำซีตะกรันจากโรงถลุงเหล็กมาทำการตกตะกอนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความบริสุทธิ์ โดยนำซีตะกรันมาละลายด้วยกรดอะซิติกที่ความเข้มข้น 0 0.1 0.5 2 4 6 และ 8 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 30 50 และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับ เก็บตัวอย่างสารละลายหลังจากใส่ซีตะกรันที่เวลาต่างๆ แล้วนำมากรองด้วย Syringe Membrane Filter (0.45 ไมโครเมตร) และนำไปวิเคราะห์หา Ca Fe Si Mg Mn Al และ V โดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปตกตะกอนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตโดยการป้อนก๊าซ CO₂ 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 ทันทีหลังจากเติมซีตะกรันลงในสารละลายกรดอะซิติกอุณหภูมิของสารละลายจะเพิ่มขึ้นประมาณ 1-3 องศาเซลเซียสแล้วค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งคงที่ ค่า pH ลดต่ำลง 1-2 ค่าแล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ สำหรับผลจากการวิเคราะห์ด้วย ICP-AES พบว่า แคลเซียมสามารถละลายได้อย่างรวดเร็วภายใน 2-10 นาที ในขณะที่เดียวกันประสิทธิภาพในการละลายของแคลเซียมจะละลายได้ดีที่ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 2-8 โมลาร์ ซึ่งละลายได้ถึงร้อยละ 86-90 สำหรับการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อทำการป้อนก๊าซ CO₂ ค่า pH ของสารละลายมีค่าลดลงทันทีจากค่า pH 11 เป็น pH 6 และหลังจากที่ป้อนก๊าซ CO₂ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และให้ความร้อนแก่สารละลาย 58 องศาเซลเซียสสีของสารละลายเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นสีขาวขุ่น แสดงให้เห็นว่า มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นและ

พบว่า มีตะกอน 1 กรัม ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 3 ของการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนต ดังนั้นจึงทำการเติม โซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายของกรดอะซิติกกับซีตริก กรีน พบว่ามีค่า pH เพิ่มขึ้น 1-3 จากเดิม มีค่า pH 10 แต่เมื่อป้อนก๊าซ CO₂ พบว่า pH ลดลงอย่างช้าๆ และจะคงที่ที่เวลา 24 และ 62 นาที ขึ้นกับปริมาณของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมคือ 15 และ 61 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเวลาที่ทำให้ มีค่า pH คงที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งพบว่าความเข้มข้นของ ก๊าซ CO₂ ไม่ส่งผลต่อผลได้ของการตกตะกอน แต่อัตราการไหลของก๊าซ CO₂ มีผลต่อเวลาที่ทำให้ มีค่าคงที่ ซึ่งผลของการตกตะกอนพบว่า เมื่อใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 46 กรัม_{NaOH}/ลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มจะไม่มีผลต่อการตกตะกอน และผลของอุณหภูมิไม่มีผลต่อปริมาณการ ตกตะกอน โดยค่าแคลเซียมจากสารละลายสามารถเกิดเป็นตะกอนได้สูงสุดร้อยละ 86 และตะกอน ของแคลเซียมคาร์บอเนตมีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99

Georgiou *et al.* (2007) ศึกษาการดูดซึมก๊าซ CO₂ จากน้ำเสียของกระบวนการ ผลิตผ้า โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารประกอบ Aromatic Amines ในหอดูดซึม แบบคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร และใช้ ตัวกรองบรรจุชนิด Glass Raschig Ring (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร) ในการ ผลิตของนี้ก๊าซที่ใช้เป็นก๊าซจำลองจากก๊าซ CO₂ ที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการย้อมผ้า ซึ่งทำ การผสมระหว่าง CO₂ ร้อยละ 10 โดยปริมาตร และ N₂ ร้อยละ 90 โดยปริมาตร ที่อัตราการไหลก๊าซ 1 ลิตรต่อนาที จากการทดลองพบว่า สารละลายที่เหมาะสมที่ใช้เป็นสารดูดซึม คือ สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ พบว่าสามารถดูดซึมก๊าซ CO₂ ได้ถึง 7 กรัม_{CO₂}/ ลิตรน้ำเสีย

Hisyamudin *et al.* (2009) ศึกษาการดูดซึมก๊าซ CO₂ โดยใช้ซีตริก กรีนที่ได้จาก โรงผลิตเหล็กเตาอาร์คไฟฟ้า ทำการทดลองใน Vibrating Ball Mill ที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการ ผลิตของนี้เครื่อง Vibrating ball mill 1200 รอบต่อนาที โดยปัจจัยที่ศึกษามีดังนี้คือ ความดันเริ่มต้น 1 bar, 2 atm ปริมาณน้ำที่ป้อนเข้า 0 100 200 300 400 มิลลิลิตร ปริมาณซีตริก กรีน 0 100 200 300 และ 400 กรัม และขนาดลูกบอลที่ใช้ในการบด 0 (ไม่มีลูกบอล) 2 10 และ 20 มิลลิเมตร ในการทดลองนี้ มีการเติมน้ำเพื่อป้องกันการจับกันเป็นก้อนของซีตริก กรีนตอนทำการบด และปฏิกิริยาที่เกิดในการ ผลิตของนี้ มีความสนใจก๊าซ CO₂ ที่ทำปฏิกิริยากับ CaO (เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่อยู่ในซี ตริก กรีน) เกิดเป็น CaCO₃ ผลจากการดูดซึมก๊าซ CO₂ ด้วยซีตริก กรีนแบบเปียก พบว่าค่าการดูดซึมก๊าซ CO₂ จะสูงขึ้นที่ความดันเริ่มต้น ปริมาณน้ำ ปริมาณซีตริก กรีน และขนาดลูกบอลที่ใช้ในการบด

หุ้มขึ้น แต่ขนาดลูกบอลที่ใช้ในการบดจะมีผลต่อการดูดซึ่มก๊าซ CO_2 ในตอนเริ่มต้นเท่านั้น และเมื่อใช้ความดันเริ่มต้น 2 atm ปริมาณน้ำ 5 และ 400 กรัม ปริมาณซีตะกรัน 200 กรัม และขนาดลูกบอลที่ใช้ในการบด 20 มิลลิเมตร จะทำให้ปริมาณการดูดซึ่มก๊าซ CO_2 สูงสุดเท่ากับ 74.8 กรัม CO_2

Huijgen *et al.* (2006) ศึกษากระบวนการเกิดคาร์บอนเนชันของสารละลายแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) กับ CO_2 โดยทำการทดลองในหม้ออัดความดัน ใช้ใบพัดกวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 32×10^{-3} เมตร โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังนี้คือ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 175-225 องศาเซลเซียส ความดันส่วนของ 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 Ca^{2+} ออกจากแคลเซียมซิลิเกต ขั้นตอนที่ 2 การเกิดตะกอน CaCO_3 และทั้ง 2 ขั้นตอนนี้เกิดที่อุณหภูมิต่างกัน โดยอุณหภูมิที่ต่ำจะเหมาะกับขั้นตอนแรก และอุณหภูมิที่สูงกว่าจะเหมาะกับขั้นตอนที่ 2 จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 200 องศาเซลเซียส ความดันส่วนของ CO_2 20 บาร์ ขนาดอนุภาค < 38 ไมโครเมตร อัตราส่วนของของเหลวต่อของแข็ง 10 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม ความเร็วในการกวนผสม 500 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการคาร์บอนเนชันสูงสุดถึงร้อยละ 70

Lekakh *et al.* (2008) ศึกษาการกำจัดก๊าซ CO_2 โดยใช้ซีตะกรันที่ได้จากโรงถลุงเหล็ก ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ 2 ถัง ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ โดยถังปฏิกรณ์ 1 ประกอบด้วยซีตะกรันขนาด < 3.2 มิลลิเมตร ปริมาณ 200 กรัม และน้ำ 20 ลิตร และถังปฏิกรณ์ที่ 2 ประกอบด้วยน้ำ 2 ลิตร ซึ่งประกอบด้วยสารละลายที่ได้จากถังที่ 1 กับฟองของก๊าซ CO_2 ที่อัตรา 1.5 กรัมต่อวินาที ซึ่งเป็นการทดลองแบบกะกับแบบต่อเนื่องโดยการศึกษาจะใช้โปรแกรม METSIM Process Analyzer ร่วมกับการทดลองจริง เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง ผลที่ได้พบว่า น้ำที่ใช้ครั้งแรกมีประสิทธิภาพการสกัดดีที่สุดในถังที่ 1 ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการคาร์บอนเนชันในถังที่ 2 ดีที่สุดเช่นกัน แต่กระบวนการแบบต่อเนื่องในถังที่ 2 ต้องใช้น้ำเป็นจำนวนมากจึงมีการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ และมีการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 ดังนี้คือ ขนาดอนุภาคของซีตะกรัน และเวลาที่ใช้ในถังปฏิกรณ์ที่ 1 (กรณีที่ใช้อัตราการป้อนเข้าคงที่) จากการทดลองพบว่า เมื่อขนาดอนุภาคของซีตะกรันเล็กลง และเวลาที่ใช้ในถังปฏิกรณ์ที่ 1 นานขึ้น ส่งผลให้ร้อยละ

และการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าสามารถกำจัดก๊าซ CO₂ ได้มากขึ้น และพบว่าขนาดอนุภาคของซีตริก 20 ไมโครเมตร เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองนี้

Lin and Shyu (1999) ศึกษาการดูดซับก๊าซ CO₂ โดยใช้สารละลายเอมีน 2 ชนิด ได้แก่ Monoethanolamine (MEA) และ N-methyldiethanolamine (MDEA) เป็นสารดูดซับในหอดูดซับแบบคอลัมน์บรรจุทำจากแก้ว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.7 เซนติเมตร และสูง 100 เซนติเมตร ใช้ตัวกลางชนิด Ceramic Raschig Ring (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร และสูง 70 เซนติเมตร) จากการทดลองพบว่า สารละลายเอมีนทั้งสองชนิดที่ใช้เป็นสารดูดซับก๊าซ CO₂ ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อวิเคราะห์สารละลายทั้งสองจากปฏิกิริยาพบว่า สารละลาย MDEA สามารถนำมาปรับสภาพสารละลายได้ง่ายกว่าสารละลาย MEA

Yang *et al.* (2008) ศึกษาทบทวนกระบวนการแยกและการดักจับก๊าซ CO₂ ด้วยเทคนิคและวิธีการต่างๆ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทบทวนกระบวนการดักจับก๊าซ CO₂ ของกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยแบ่งกระบวนการแยกได้คือ กระบวนการแยกก๊าซ CO₂ ออกจากการเผาไหม้โดยใช้ถ่านหิน กระบวนการแยกก๊าซ CO₂ ออกจากกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน การแยกก๊าซ CO₂ ออกจากการเผาไหม้ออกไซด์ และการใช้สารเคมีช่วย เช่น Fe₂O₃, NiO และ CaO เป็นต้น ส่วนที่สองเป็นกระบวนการดักจับก๊าซ CO₂ โดยธรรมชาติ เช่น การปลูกต้นไม้เพื่อดักจับก๊าซ CO₂ กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การละลายก๊าซ CO₂ ในน้ำทะเลเพื่อให้แพลงตอนพืชในน้ำใช้งาน และการเกิดน้ำแร่ที่มีสารประกอบคาร์บอเนต ส่วนสุดท้ายเป็นเทคนิคในการดักจับก๊าซ CO₂ ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การใช้สารละลายในการดูดซับ เช่น การใช้สารประกอบเอมีน แอมโมเนีย อัลคาไลน์ เป็นต้น และการใช้เยื่อแผ่นบางในการดักจับก๊าซ CO₂ โดยกระบวนการทั้งหมดนี้ได้ทำการสรุปและเสนอแนะเทคนิคต่างๆ ที่เป็นตัวเลือกในการบำบัดก๊าซ CO₂

Yong *et al.* (2002) ทำการศึกษาทบทวนกระบวนการดูดซับก๊าซ CO₂ ด้วยวัสดุดูดซับที่อุณหภูมิสูง ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลของวัสดุดูดซับ การดูดซับด้วย Carbon-based การดูดซับด้วยวัสดุจำพวกสารประกอบออกไซด์ โดยปกติแล้วนิยมใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซีโอไลต์ (Zeolites) และสารประกอบ Hydrotalcite-like (HTLcs) ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง โดยพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซ CO₂ ที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง แต่ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับ และผลของพื้นที่ผิวต่อประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซ CO₂ มีผล

น้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิในการดูดซับ นอกจากนี้ยังพบว่าสารประกอบชนิดออกไซด์ของโลหะ (CaO และ MgO) มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูง

ธีรภัทร์ (2553) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซ CO₂ ในลมร้อน จากปล่องควันของเตาอบยางก๊าซเสียที่ปล่อยจากปล่องควันของเตาอบยาง โดยดูดซับด้วยสารดูดซับ 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโมโนเอทานอลเอมีน (MEA) ในหอดูดซับแบบคอลัมน์บรรจุ ได้ทำการศึกษาค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง 4 ตัวแปร ได้แก่ ความเข้มข้นของสารดูดซับ (C) อัตราการไหลของสารดูดซับ (L) อัตราการไหลของก๊าซร้อน (G) และอัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซับต่ออัตราการไหลของก๊าซ (L/G) ผลจากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซ CO₂ ในหอดูดซับแบบบรรจุ คือ อัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซับ (L) 4.5 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซร้อน (G) 0.15 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที อัตราส่วนของอัตราการไหลของสารดูดซับต่ออัตราการไหลของก๊าซ (L/G) คือ 30 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร และความเข้มข้นของสารดูดซับ (NaOH และ MEA) 0.7 โมลาร์ โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซ CO₂ จากสารละลาย NaOH เท่ากับร้อยละ 58.98 และสารละลาย MEA ร้อยละ 73.05 ตามลำดับ

มฤดี (2542) ทำการวิเคราะห์หาสารดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ CO₂ ในหอดูดซับแบบถาด โดยศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง 3 ตัวแปร ได้แก่ ชนิดสารดูดซับ โดยพิจารณาสารละลาย 5 ชนิด ได้แก่ สารละลายโมโนเอทานอลเอมีน (Monoethanolamine, MEA) ไดเอทานอลเอมีน (Diethanolamine, DEA) ไดไกลโคลเอมีน (Diglycolamine, DGA) ไดไอโซโพรพานอลเอมีน (Diisopropanolamine, DIPA) และเมทิลไดเอทานอลเอมีน (Methyldiethanolamine, MDEA) ความเข้มข้นของสารละลาย และอัตราส่วนโมลของก๊าซ CO₂ ต่อโมลของสารละลายเอมีน ผลจากการศึกษาพบว่า สารละลายที่เหมาะสมเพื่อใช้ในกระบวนการกำจัดก๊าซ CO₂ คือ สารละลายเมทิลไดเอทานอลเอมีน (MDEA) เนื่องจากเป็นสารละลายที่ใช้พลังงานในกระบวนการน้อยที่สุด ความเข้มข้นที่เหมาะสมคือร้อยละ 20 และอัตราส่วนโมลของก๊าซ CO₂ ต่อโมลสารละลายเอมีนเท่ากับ 3

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค CCD ของ RSM

Garcia *et al.* (2011) ศึกษาการดักจับก๊าซ CO₂ ด้วยถ่านกัมมันต์ในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ทำการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการดักจับก๊าซ CO₂ (Y₁) และ

ความสามารถในการดักจับก๊าซ CO₂ (Y₂) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษามี 2 ปัจจัย ได้แก่ ความดันส่วน
ก๊าซ CO₂ (1-3 บาร์) และอุณหภูมิ (25-65 องศาเซลเซียส) ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยทั้งสอง
ไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และยังพบว่าความดันส่วนก๊าซ CO₂ เป็นปัจจัยมีผลมากที่สุด เมื่อ
ค่าความดันส่วนก๊าซ CO₂ มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการดักจับและความสามารถในการดักจับ
ก๊าซ CO₂ สูงขึ้นเช่นกัน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกลับส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการดักจับและ
ความสามารถในการดักจับก๊าซ CO₂ ลดลง จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ได้สมการความสัมพันธ์
คือ

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

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

ซึ่งจะได้สภาวะเหมาะสมที่สุด คือที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน
ส่วนก๊าซ CO₂ 3 บาร์ เวลาที่ใช้ในการดักจับก๊าซ CO₂ เป็น 10.50 นาที และความสามารถในการ
ดักจับก๊าซ CO₂ เป็น 3.96 โมล/กิโกลกรัม_{Adsorbent}

Syeded *et al.* (2007) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเอนไซม์ที่ใช้เป็น
สารอาหารให้กับ *Bacillus Clausii* และสภาวะที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มการผลิตเอนไซม์ โดยปัจจัยที่
ศึกษามี 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของซูโครส ความเข้มข้นของยีสต์สกัด และความเข้มข้นของ
โพแทสเซียมไนเตรต ปัจจัยเหล่านี้ถูกนำไปใช้ทดลองเบื้องต้น โดยใช้แผนการทดลองออกแบบด้วย
วิธี 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 เพื่อทำการศึกษา
ปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียม Activated Carbon ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิสำหรับการกระตุ้น ระยะเวลาการ
กระตุ้น และอัตราส่วน KOH: char ต่อการดูดซับ Methyl Blue แต่ผู้ทำการวิจัยต้องการหาค่าที่
เหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียม Activated Carbon จึงนำไปสู่การวิเคราะห์การทดลองโดยใช้
วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method of Process Optimization) พบว่าสภาวะ

เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ คือ สภาวะอุณหภูมิประมาณ 816 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการกระตุ้นประมาณ 1 ชั่วโมง และต้องใช้อัตราส่วน KOH: char เท่ากับ 3.9

2.8 ข้อสรุปข้อมูลที่ได้จากการค้นคว้า

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าพบว่า ก๊าซเสียจากปล่องควันที่ได้โรงงานอุตสาหกรรมมีค่าความเข้มข้นก๊าซ CO_2 เป็นร้อยละ 15 โดยปริมาตร และจากการศึกษางานวิจัยพบว่าสารประกอบ CaO สามารถนำไปกำจัดก๊าซ CO_2 ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตะกั่วซึ่งมี CaO เป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อต้องการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้มาทดแทนสารเคมีในการกำจัดก๊าซ CO_2 ซึ่งเลือกใช้หอดูดซึมแบบคอลัมน์บรรจุมาทำการกำจัดก๊าซ CO_2 โดยเริ่มจากการศึกษาระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากขี้ตะกั่วเพื่อนำสารละลายที่ได้มาใช้เป็นสารดูดซึมก๊าซ CO_2 โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายอะซิติก อัตราส่วนเชิงมวลของเหลวต่อของแข็ง และอุณหภูมิ พร้อมทั้งทำการออกแบบการทดลองและสร้างแบบจำลองที่ได้จากกระบวนการชะละลายและหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองโดยใช้เทคนิค Response Surface Methodology (RSM) เพื่อนำสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากกระบวนการชะละลายนี้ไปใช้ผลิตสารดูดซึมสำหรับกระบวนการกำจัดก๊าซ CO_2 ต่อไป สำหรับการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO_2 ร้อยละ 15 โดยปริมาตร ด้วยสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายในคอลัมน์บรรจุ มีปัจจัยที่ทำการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหลของสารดูดซึม อัตราการไหลของก๊าซ และความเข้มข้นของสารดูดซึม และทำการออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM เช่นเดียวกัน แล้วนำสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองการกำจัดก๊าซ CO_2 มาทำการเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ทั้งนี้เพื่อเป็นทางเลือกในการนำวิธีการบำบัดก๊าซ CO_2 โดยใช้สารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายขี้ตะกั่วไปใช้ประโยชน์ต่อไป

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

สารเคมี อุปกรณ์ วิธีการทดลอง วิธีการออกแบบการทดลอง วิธีการเก็บตัวอย่าง วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง และแผนการดำเนินการทดลอง ในการศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรันในถังปฏิกรณ์แบบกะ และขั้นตอนการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO₂ ในคอลัมน์บรรจุ ซึ่งเป็นขั้นตอนหลักในงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลองสำหรับการศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรันในถังปฏิกรณ์แบบกะ

3.1.1 วัสดุ

ซีตะกรัน (Slag) จากเตาอาร์คไฟฟ้า มีลักษณะเป็นของแข็งสีเทา ไม่มีกลิ่นเหม็น แสดงในภาพประกอบที่ 3-1 ของบริษัทสยามสตีลซินดิเกท จำกัด ตั้งอยู่บนถนนท้ายบ้าน ตำบลท้ายบ้าน อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ



ภาพประกอบที่ 3-1 ลักษณะทางกายภาพของซีตะกรันที่ได้จากเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF)

3.1.2 สารเคมี

- กรดอะซิติก (CH_3COOH ร้อยละ 99 โดยปริมาตร) จากบริษัท Merck เกรดการวิเคราะห์
- น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (Atomic Adsorption Spectrometer, AAS)

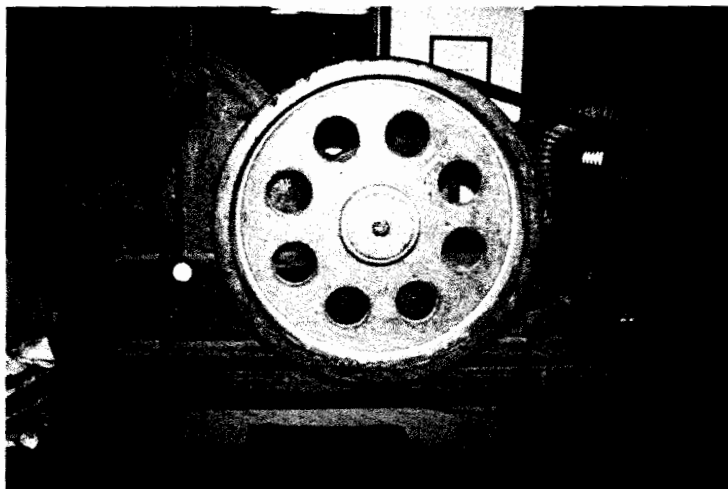
- แลนทานัม (La_2O_3) จากบริษัท Lab scan เกรดการวิเคราะห์
- น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพต่างด้วยวิธีการไทเทรต

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

3.1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องบดย่อยแบบจาว (Jaw Crusher) ใช้สำหรับการบดหยาบจีตะกรัน
- รายละเอียดดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-2

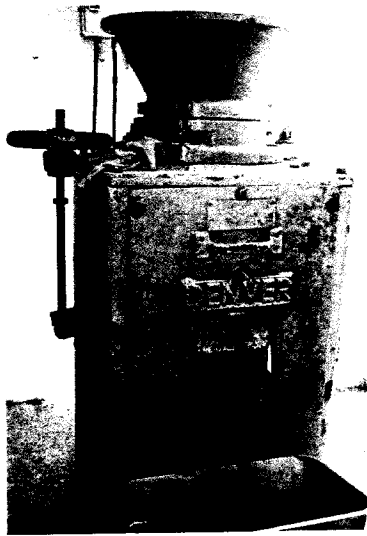


ภาพประกอบที่ 3-2 เครื่องบดย่อยแบบจาว (Jaw Crusher) ใช้สำหรับการบดหยาบจีตะกรัน

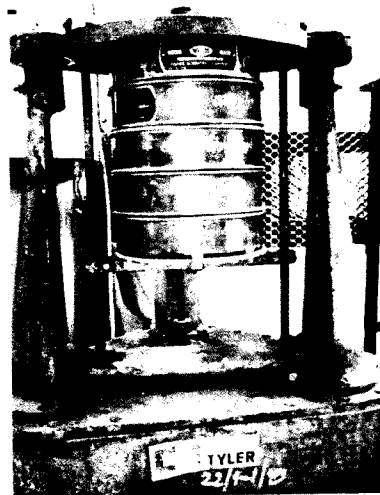
- เครื่องบดย่อยแบบไจราทอรี (Gyratory Crusher) สำหรับบดละเอียดหิน
 ภาพประกอบที่ 3-3

- 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)

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

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

3.1.4 ไมโครเมตร)

- เครื่องกรองสุญญากาศ
- กระดาษกรอง
- นาฬิกาจับเวลา

3.2 - อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

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

เมนต์ ลักษณะดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-5

- เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRFS) ใช้สำหรับวิเคราะห์หา

ปริมาณ และองค์ประกอบในซีตึกระัน ลักษณะดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-6

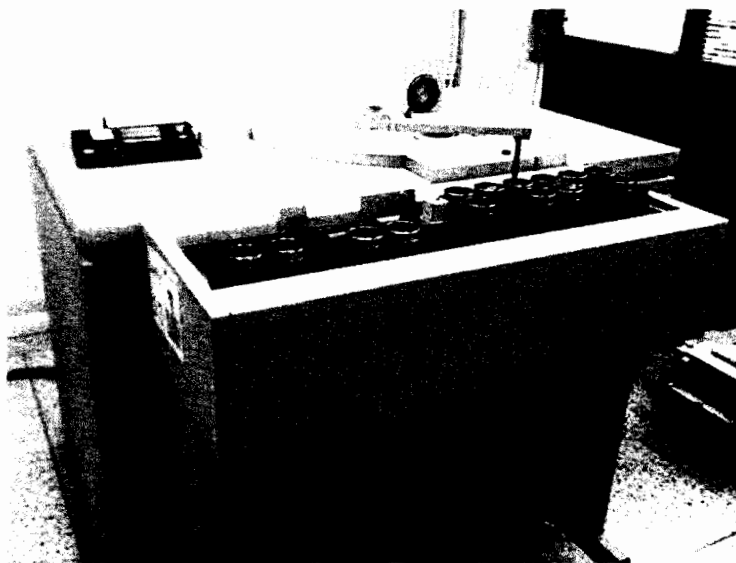
- Micropipette ขนาด 10-100 ไมโครเมตร
- เครื่อง Atomic Adsorption Spectrometer (AAS) รุ่น Perkin Elmer model AA

ใช้สำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้นแคลเซียม แสดงดังภาพประกอบที่ 3-7



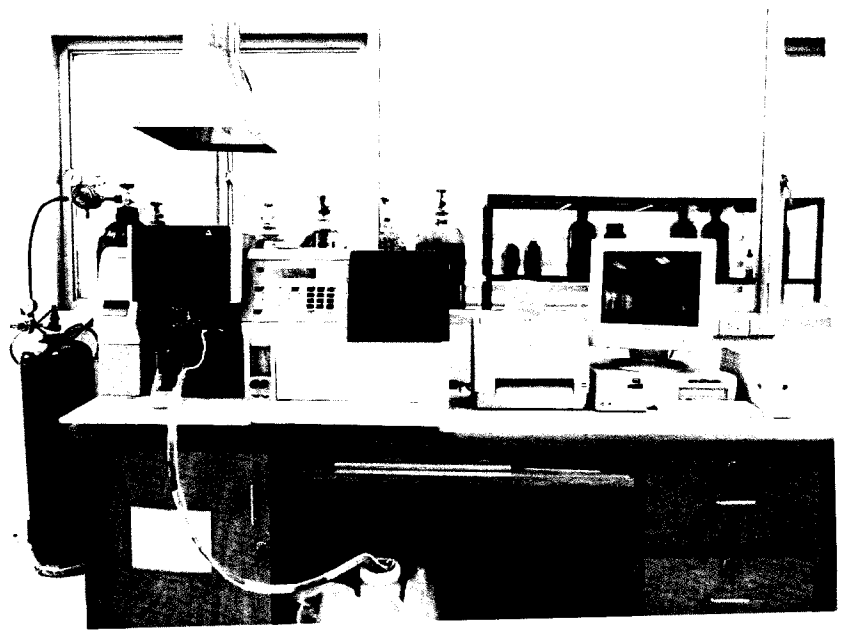
ภาพประกอบที่ 3-5 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD)

ที่มา: ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ภาพประกอบที่ 3-6 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (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

การศึกษาการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออน โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สภาวะการทดลองสำหรับศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรันโดยใช้น้ำปราศจากไอออนและสารละลายกรดอะซิติกมาเป็นตัวทำละลาย

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 วิธีการเตรียมวัสดุดิบ (Bonenfant *et al.*, 2008)

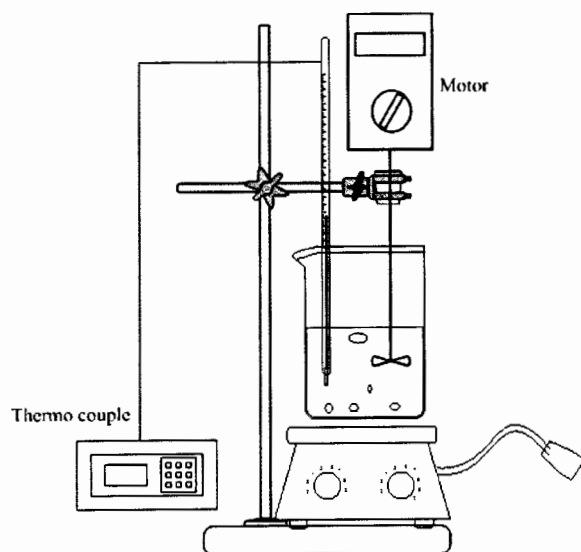
นำซีตะกรันไปอบในตู้อบ (Oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปบดลดขนาดโดยใช้เครื่องบดย่อยแบบจอร์ว (Jaw Crusher) ซึ่งเป็นการบดแบบหยาบ หลังจากนั้นทำการบดละเอียดด้วยเครื่องบดย่อยแบบไจราทอรี (Gyratory Crusher) นำไปคัดขนาดด้วยเครื่องร่อนตะแกรงให้ผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 44 ไมครอน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

3.1.8.2 วิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะของซีตะกรัน

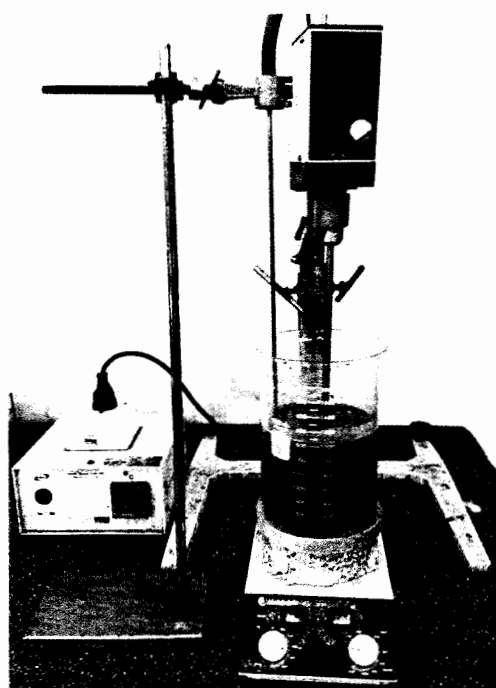
นำซีตะกรันที่เตรียมตามข้อ 3.1.8.1 มาทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของซีตะกรันด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD) และวิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบอื่นๆ ในซีตะกรันด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRFS)

3.1.8.3 วิธีการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรันในถังปฏิกรณ์แบบกะ

การศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรันซึ่งดำเนินการในถังปฏิบัติการ โดยใช้ในถังปฏิกรณ์แบบกะ ประกอบด้วย บีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร ที่ติดตั้งใบพัดกวน และควบคุมความเร็วใบกวนและชุดควบคุมอุณหภูมิ ไดอะแกรมแสดงปฏิกรณ์และอุปกรณ์ประกอบแสดงในภาพประกอบที่ 3-8 และลักษณะของปฏิกรณ์แบบกะที่ใช้ในการศึกษาจริงดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-9



ภาพประกอบที่ 3-8 ชุดอุปกรณ์การทดลองถึงปฏิบัติการแบบกะสำหรับการชะละลาย



ภาพประกอบที่ 3-9 ชุดอุปกรณ์การทดลองสำหรับถึงปฏิบัติการแบบกะในห้องปฏิบัติการ

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 $t = 0$ หลังจากนั้นเปิดเครื่องกวนโดยควบคุมความเร็วรอบที่ 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 แล้วทำการวิเคราะห์องค์ประกอบและวิเคราะห์หาปริมาณของซีตะกรันด้วยเครื่อง XRD และ XRFS ตามลำดับ ส่วนสารละลายที่ผ่านการกรองจะนำไปวัดค่าความเป็นกรดต่างด้วยเครื่องวัด pH วิเคราะห์หาสภาพด่าง (Alkalinity) ด้วยรีจาร์โทเทรตและวิเคราะห์หาปริมาณ Ca^{2+} ด้วยเครื่อง AAS ตามลำดับ

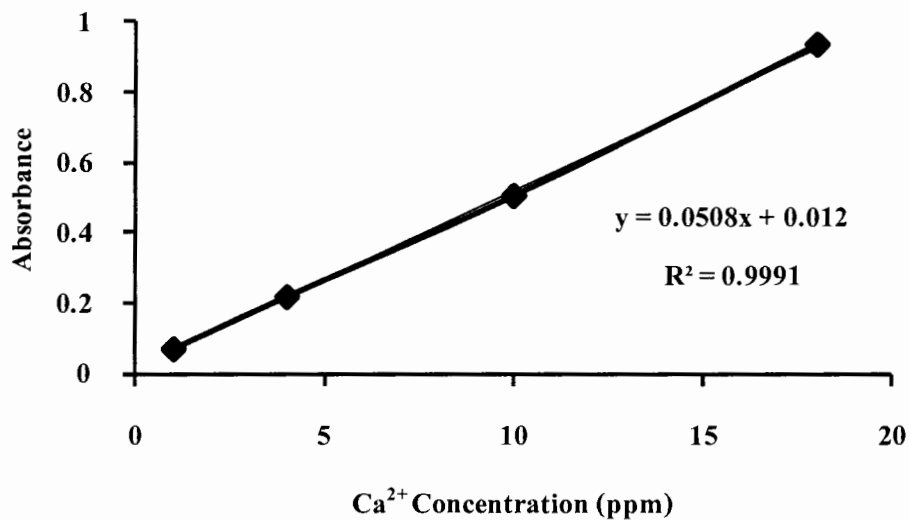
3.1.9 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลวในการศึกษาการดูดซึม CO_2 ด้วยสารละลายที่ได้จากการสกัดซีตะกรันของเหล็ก

3.1.9.1 วิธีการการเก็บตัวอย่างของเหลว

เก็บตัวอย่างสารละลาย 50 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของ Ca^{2+} เชื่อมและค่าความเป็นด่างที่เวลาต่างๆ โดยเก็บตัวอย่างสารละลายก่อนป้อนเข้าสู่คอลัมน์ดูดซึม $t = 0$ และที่ออกจากคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ

3.1.9.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายดูดซึม (สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2540)

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคลเซียมในตัวอย่างของสารละลายดูดซึมที่เวลาต่างๆ โดยมีการดึงตัวอย่างของสารละลายดูดซึมที่เวลาต่างๆเป็นปริมาตร 100 ไมโครลิตร โดยใช้ปิเปต บรรจุตัวอย่างลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิตร เติมสารละลายแลนทานัม 5 มิลลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนได้ปริมาตรเท่ากับ 50 มิลลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าความเข้มข้นของแคลเซียม (Ca^{2+}) โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer, AAS) ซึ่งมีกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นแคลเซียม (Ca^{2+}) ดังภาพประกอบที่ 3-10



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

3.1.9.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ในสารละลายดูดซึม

การวิเคราะห์หาค่าความเป็นด่างของตัวอย่างของสารละลายดูดซึมที่เวลาต่างๆ โดยมีการดึงตัวอย่างของสารละลายดูดซึมที่เวลาต่างๆ ปริมาตร 10 มิลลิตร แล้วปรับปริมาตรโดยการเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนได้ปริมาตรเท่ากับ 50 มิลลิตร จากนั้นเติมสารละลายกรดซัลฟูริก 0.01 โมลาร์ ซึ่งเริ่มจากการใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาเลอิน โดยทำการไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีชมพูเป็นสีน้ำเงิน

มี จากนั้นหยดสารละลายเมทิลโอเรนจ์แล้วไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีส้ม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-11



ภาพประกอบที่ 3-11 สีของสารละลายก่อนและหลังการไทเทรต

๒.๒ สารเคมี อุปกรณ์ วิธีการทดลอง สำหรับการศึกษาลักษณะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ CO_2

๒.๒.๑ สารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตริกในหลอดซีมชนิดคอลัมน์บรรจุ

๒.๒.๒ คับห้องปฏิบัติการ

๒.๒.๓ สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมก๊าซ CO_2

- ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร จากบริษัทไทยอินคัส

๒.๒.๓.๑ ก๊าซ จำกัด (มหาชน)

- ก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร จากบริษัทไทยอินคัสเทรียลแก๊ส

๒.๒.๓.๒ จำกัด (มหาชน)

๒.๒.๓.๓ สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารดูดซึม

- กรดอะซิติก (CH_3COOH ร้อยละ 99 โดยปริมาตร) จากบริษัท Merck เกรด

๒.๒.๓.๓.๑ เกรดการวิเคราะห์

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากบริษัท Labscan เกรดการวิเคราะห์

- น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

- แก๊สแกง จากบริษัทปฐพี เกรคการค้า
- น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

3.2.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Adsorption Spectrometer, AAS)

- แลนทานัม (La_2O_3) จากบริษัท Lab scan เกรคการวิเคราะห์
- น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

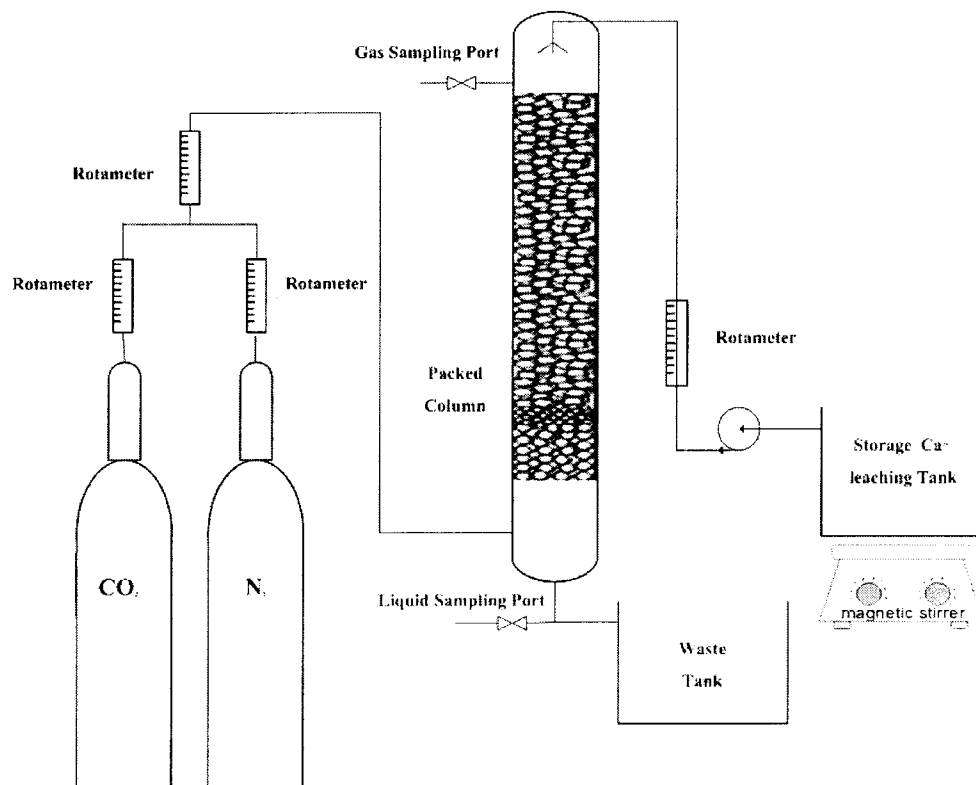
3.2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพต่างด้วยวิธีการไทเทรต

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

3.2.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

อุปกรณ์สำหรับการศึกษากำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เจือจางในก๊าซไนโตรเจนเป็นอากาศเสียจำลอง ด้วยสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีเมนต์ในหอคูดซึม ชนิดคอลัมน์บรรจุในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-12



ภาพประกอบที่ 3-12 ชุดอุปกรณ์การทดลองของหอดูดซึม ชนิดคอลัมน์บรรจุสำหรับการกำจัดก๊าซ CO₂

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

1. ระบบผลิตก๊าซที่ปนเปื้อนด้วยก๊าซ CO₂

ระบบสร้างก๊าซปนเปื้อนด้วยก๊าซ CO₂ ประกอบด้วย ถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ บริสุทธิ์ 1 ถัง และถังก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 1 ถัง ทำการสังเคราะห์อากาศเสียจำลองที่ปนเปื้อนด้วยก๊าซ CO₂ โดยการนำก๊าซ CO₂ มาผสมกับก๊าซ N₂ ด้วยอัตราการไหลที่กำหนด เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ เป็นร้อยละ 15 โดยปริมาตร (Bonenfant *et al.*, 2008)

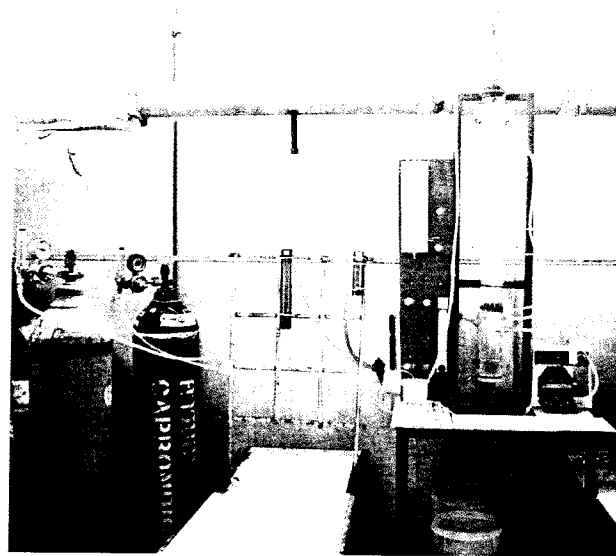
2. คอลัมน์บรรจุ (Packed Column)

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
- เพอริสตัลติกปั๊ม (Peristaltic Pump) ใช้ส่งสารดูดซึมจากถังเก็บเข้าสู่คอลัมน์ดูดซึม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่มีส่วนประกอบทั้ง 3 ระบบที่ติดตั้งในห้องปฏิบัติการ แสดงดังภาพประกอบที่ 3-13



ภาพประกอบที่ 3-13 ชุดการทดลองของคอลัมน์บรรจุที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.2.6.2 อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง

อุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ

- สายยางซิลิโคน (Silicone)
- เข็มฉีดยา
- ขวดบรรจุน้ำเกลืออ้อมตัวขนาด 15
- บีกเกอร์สำหรับรองรับน้ำเกลือที่ถู
- 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 (บีกเกอร์) ขนาด 2 ลิตร
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Thermocouple)
- นาฬิกาจับเวลา
- โถดูดความชื้น

3.2.6.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

- pH meter
- บิวเรตขนาด 25 มิลลิลิตร และแท่นจับ 1 ชุด
- ขวดรูปชมพูนขนาด 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_2 ในก๊าซเสียจำลองด้วยวิธีการดูดซับด้วยสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายชีตะกรันในหอดูดซับชนิดคลอัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการของหอดูดซับต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซ CO_2 และเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซ CO_2 โดยการดูดซับด้วยสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายชีตะกรัน

การออกแบบสภาวะการทดลองทำโดยใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) โดยทำการกำหนดตัวแปรที่จะศึกษา คือ ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียม อัตราการไหลของสารละลายแคลเซียม และอัตราการไหลของก๊าซ CO_2 เทคนิค RSM เป็นเครื่องมือสำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ โดยใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบการทดลองอย่างเหมาะสม สำหรับการทดลองที่มีหลายตัวแปร RSM จะช่วยในการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยไม่จำเป็นต้องทำการทดลองในทุกความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดที่เป็นไปได้ ขั้นตอนการออกแบบการทดลองโดยใช้ RSM มีขั้นตอน ดังนี้

1. กำหนดตัวแปรที่จะศึกษาซึ่งประกอบด้วย

1.1 ตัวแปรอิสระ ประกอบด้วย

- อัตราการไหลของสารละลายแคลเซียม (X_1) (0.3-0.9 ลิตรต่อนาที)
- อัตราการไหลของก๊าซ CO_2 (X_2) (0.25-0.85 ลิตรต่อนาที)
- ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียม (X_3) (200-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร)

1.2 ตัวแปรตาม คือ ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซ CO_2 (CO_2 Removal Efficiency,

%RE)

2. กำหนดรหัส (Code) ของช่วงดำเนินการออกแบบการทดลองของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการออกแบบภาวะที่ใช้ในการทดลองด้วยเทคนิคของ CCD และทำการแปลงค่ารหัสตัวแปรอิสระ (Coded Variables) โดยใช้สมการที่ (3-1) และผลการออกแบบการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3-3

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

เมื่อ

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

3. การแปลงรหัส (Decode) จากการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคของ CCD ในตารางที่ 3-2 ทำการแปลงค่าตัวแปรให้เป็นค่าดำเนินการของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามในแต่ละตัวในการดำเนินการทดลอง เพื่อหาค่าตัวแปรตอบสนองของกระบวนการ โดยการแปลงค่าตัวแปรแสดงตารางที่ 3-3 ทำการทดลองซ้ำค่ากลางของแต่ละตัวแปรที่เกิดจากการออกแบบเป็น 3 ซ้ำ ทำการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมในการทดลองที่ 18-20 เพื่อศึกษาแนวโน้มของตัวแปรอิสระเนื่องจากการออกแบบด้วยเทคนิค RSM จะให้ผลการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระตัวละ 3 ค่า ซึ่งข้อมูลยังไม่เพียงพอในการแสดงค่ากราฟ 2 มิติ จึงมีการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมให้ได้ผลของค่าตัวแปรอิสระ ตัวแปรละ 4 ค่า เพื่อได้แนวโน้มของตัวแปรนั้นสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ตารางที่ 3-2 รหัสตัวแปรและขอบเขตของตัวแปรที่ทำการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO₂ ด้วยเทคนิค RSM ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร และตัวแปรตาม 1 ตัวแปร

การทดลอง	X ₁	X ₂	X ₃	Response
1	-1	-1	-1	Y= ประสิทธิภาพ การบำบัด CO ₂
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	0.3-0.9	0.25-0.85	200-1000	

ตารางที่ 3-3 สภาวะการทดลองสำหรับศึกษาการกำจัดก๊าซ CO₂ ด้วยสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีเมนต์ในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ

การทดลอง	อัตราการไหล ของเหลว (ลิตรต่อนาที)	อัตราการไหล ของก๊าซ (ลิตรต่อนาที)	ความเข้มข้น ของแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Response
1	0.42	0.37	362	ประสิทธิภาพ การกำจัด CO ₂
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 β_0 β_i β_{ii} และ β_{ij} คือสัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้น แบบกำลังสอง และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน ตามลำดับ

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

6. นำสถานะที่เหมาะสมไปทำการทดลองซ้ำ เพื่อหาค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพที่ได้จากสหสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลอง และประสิทธิภาพที่วัดจริง

3.2.7.2 วิธีการทดลอง

การทดลองกำจัดก๊าซ CO₂ โดยใช้สารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตะกรันในหอดูดซึมแบบคอลัมน์บรรจุตามสภาวะการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ นั้น มีวิธีการในแต่ละการทดลองที่เหมือนกัน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานในแต่ละการทดลองดังนี้

1. เตรียมความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมตามที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม RSM โดยนำสารละลายแคลเซียมที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตะกรันจากกิจกรรมที่ 3.1 มาทำการเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นป้อนสารละลายแคลเซียมให้ไหลเข้าทางด้านบนของคอลัมน์ และปรับอัตราการไหลของสารละลายแคลเซียมให้มีอัตราการไหลที่ตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้

2. เตรียมก๊าซ CO₂ ร้อยละ 15 โดยปริมาตร โดยทำการเจือจางก๊าซ CO₂ ในก๊าซไนโตรเจน เริ่มจากการเปิดวาล์วของถังก๊าซ CO₂ และปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าผสมกับกระแสก๊าซ CO₂ จนได้อัตราการไหลของก๊าซผสมตามที่ต้องการตามโปรแกรมการทดลองแล้วปล่อยกระแสก๊าซผสมให้ไหลเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์บรรจุ

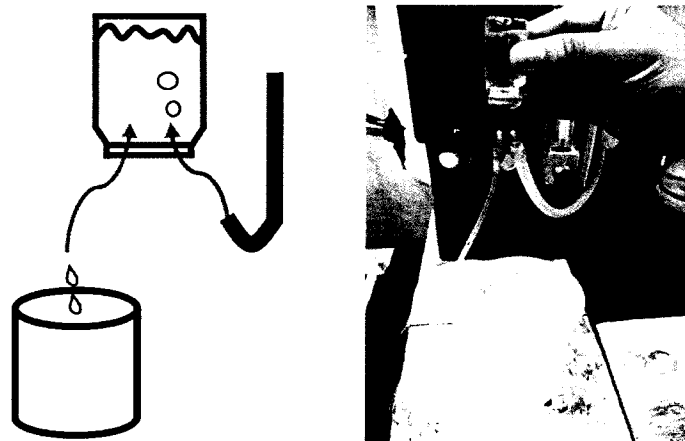
3. กระแสของก๊าซ CO_2 และสารดูดซึมไหลสวนทางกัน (Counter Current) ผ่านตัวกลาง (Packing) ที่บรรจุภายในคอลัมน์ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างวัฏภาคของก๊าซและวัฏภาคของเหลว ทำให้เกิดการดูดซึมและเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นภายในคอลัมน์บรรจุ

4. ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซ CO_2 ที่ทางเข้า (Inlet) และที่ทางออก (Outlet) ของคอลัมน์บรรจุ ทำการเก็บโดยใช้หลักการก๊าซแทนที่น้ำเกลืออิ่มตัวและทำการเก็บตัวอย่างสารละลายแคลเซียมที่ทางเข้าและออกของคอลัมน์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 15 นาที

3.2.7.3 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซเสีย

วิธีการเก็บตัวอย่างก๊าซเสีย

การเก็บตัวอย่างก๊าซ CO_2 ทำโดยใช้วิธีการเก็บก๊าซแทนที่น้ำเกลืออิ่มตัว ซึ่งรายละเอียดของวิธีการเก็บตัวอย่างก๊าซมีดังนี้ คือ นำขวดเก็บตัวอย่างขนาด 15 มิลลิลิตร บรรจุ น้ำเกลืออิ่มตัวเต็มขวดเพื่อป้องกันอากาศเข้าไปปนเปื้อนมาทำการเก็บก๊าซที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์ดูดซึม หลังจากนั้นนำก๊าซที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) ชุดการเก็บก๊าซแสดงดังภาพประกอบที่ 3-14

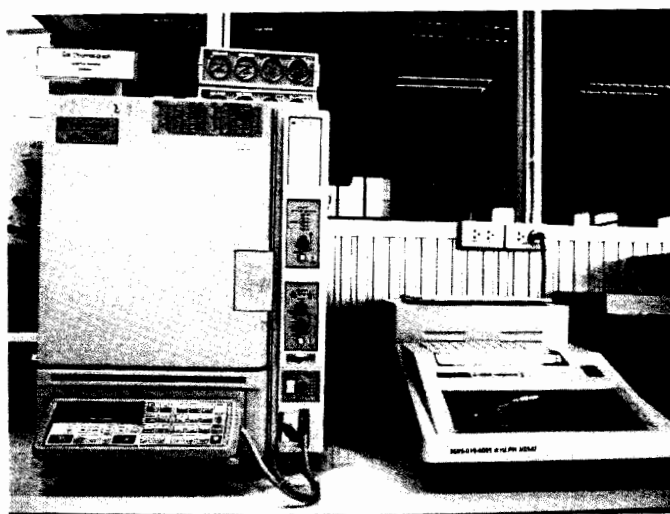


ภาพประกอบที่ 3-14 ชุดอุปกรณ์เก็บก๊าซด้วยวิธีการแทนที่น้ำเกลืออิ่มตัวด้วยก๊าซ

วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซเสีย

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นก๊าซ 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 CO_2

การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซ CO_2 (% CO_2 Removal Efficiency)

เมื่อทราบความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์บรรจุก็จะสามารถหาประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซ CO_2 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 CO₂ ที่เข้า (ร้อยละโดยปริมาตร)
 C_2 = ความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ ที่ออก (ร้อยละโดยปริมาตร)

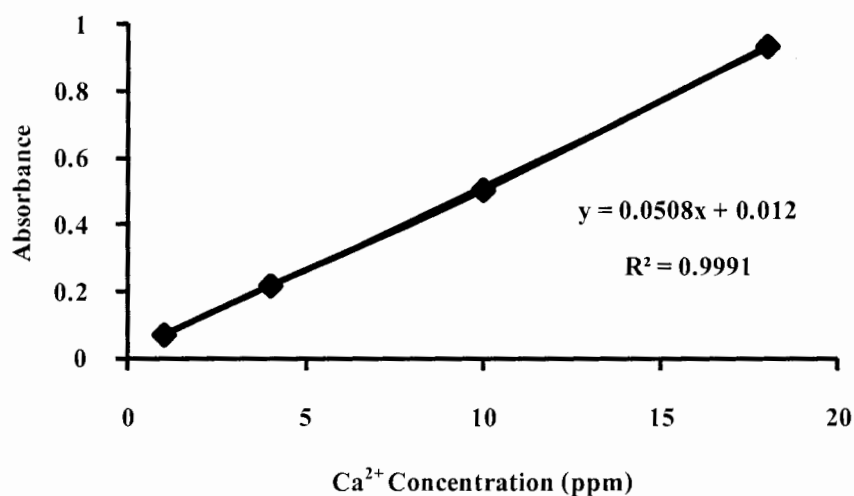
3.2.7.4 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลว

วิธีการเก็บตัวอย่างของเหลว

เก็บตัวอย่างสารละลาย 50 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคลเซียมและค่าความเป็นด่างที่เวลาต่างๆ โดยเก็บตัวอย่างสารละลายก่อนป้อนเข้าสู่คอลัมน์ดูดซึมที่ $t = 0$ และที่ออกจากคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ

การวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายดูดซึม

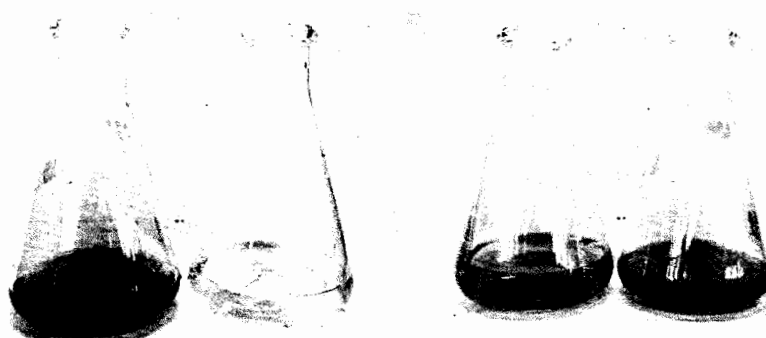
การวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคลเซียมในตัวอย่างของสารละลายดูดซึม โดยดึงสารตัวอย่างจากสารละลายดูดซึมที่เวลาต่างๆ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร โดยใช้ไมโครปิเปตบรรจุตัวอย่างลงขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายแลนทานัม 5 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนได้ปริมาตรเท่ากับ 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าความเข้มข้นของแคลเซียม (Ca²⁺) โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Adsorption Spectrometer, AAS) และกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นแคลเซียม (Ca²⁺) ดังภาพประกอบที่ 3-16



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

การวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ในสารละลายคูดซิม

การวิเคราะห์หาค่าความเป็นด่างในตัวอย่างของสารละลายคูดซิม โดยทำการดึงตัวอย่างของสารละลายคูดซิมจากตัวอย่างของสารละลายคูดซิมที่เวลาต่างๆ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรน้ำตัวอย่างโดยการเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนได้ปริมาตรเท่ากับ 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 0.01 โมลาร์ ซึ่งเริ่มจากการใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์เป็นตัวบ่งชี้จุดยุติโดยทำการไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายจะเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นใสไม่มีสี จากนั้นหยดสารละลายเมทิลโอเรนจ์แล้วไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีส้ม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-17



ภาพประกอบที่ 3-17 สีของสารละลายก่อนและหลังการไทเทรต

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

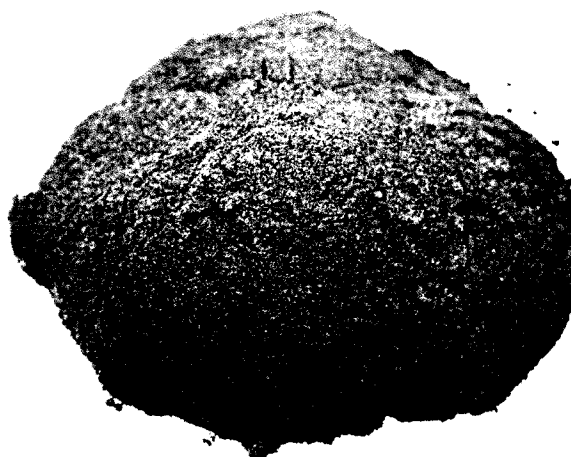
ผลการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO₂ โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันในคอลัมน์บรรจุ แบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 เป็นผลการศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรันในถังปฏิกรณ์แบบกะ และตอนที่ 2 เป็นผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ในคอลัมน์แบบบรรจุ ขนาดต้นแบบ โดยแต่ละตอนมีรายละเอียดดังนี้

4.1 กระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรัน

4.1.1 สมบัติของซีตะกรันใหม่สด (Fresh Steelmaking Slag) จากการหลอมเหล็ก

4.1.1.1 สมบัติทางกายภาพของซีตะกรันที่ได้จากการหลอมเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace, EAF) ของบริษัทสยามสตีลซินดิเกท จำกัด

ซีตะกรันของเหล็กที่ศึกษามีลักษณะเป็นของแข็งสีเทา ไม่มีกลิ่นเหม็น การศึกษาสมบัติทางกายภาพของซีตะกรันทำโดยนำซีตะกรันที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง บดลดขนาดแล้วร่อนคัดขนาดผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 44 ไมครอน และค้ำงตะแกรงขนาดรูเปิด 37 ไมครอน แสดงดังภาพประกอบที่ 4-1 ลักษณะของซีตะกรันที่ผ่านการอบและคัดขนาดแล้ว



ภาพประกอบที่ 4-1 ลักษณะทางกายภาพของซีตะกรันที่ผ่านการอบแห้งและคัดขนาดด้วยการร่อนตะแกรงให้ได้ขนาดอนุภาค 37-44 ไมครอน

4.1.1.2 สมบัติทางเคมีของซีตะกรันใหม่สดที่ได้จากเตาอาร์คไฟฟ้าของบริษัทสยามสตีลซินดิเกท จำกัดและซีตะกรันที่ผ่านการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนหรือสารละลายกรดอะซิติก ปริมาณองค์ประกอบออกไซด์ของซีตะกรัน

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

ตารางที่ 4-1 ปริมาณองค์ประกอบทั่วไปของซีตะกรันเหล็กก่อนทำการชะละลายวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์

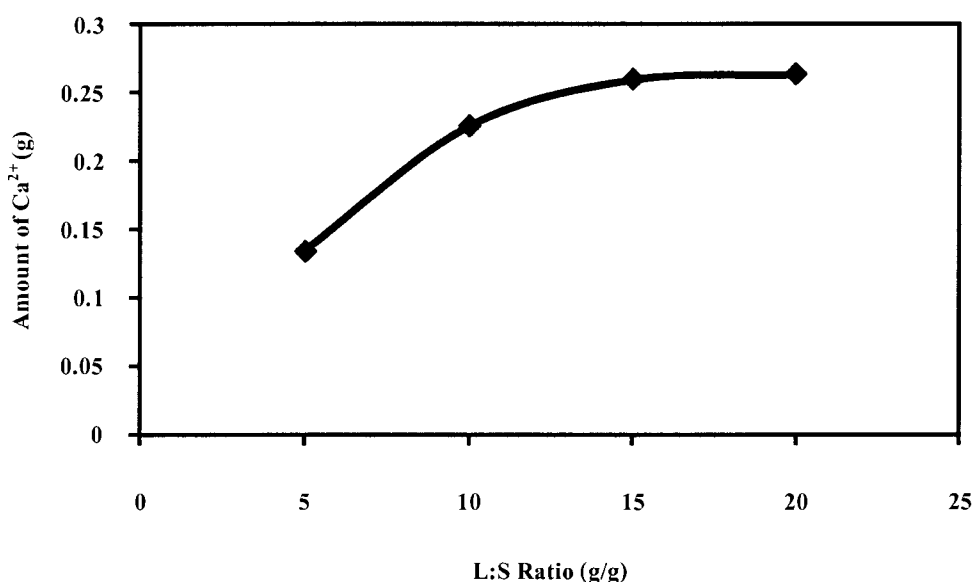
องค์ประกอบ	ปริมาณองค์ประกอบออกไซด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
CaO	53.21
Fe ₂ O ₃	13.52
SiO ₂	13.38
Al ₂ O ₃	8.38
MnO	4.94
MgO	4.07
TiO ₂	1.91
Cr ₂ O ₃	0.59

4.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลายซีตะกรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออน

ในหัวข้อนี้รายงานผลของปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการชะละลายซีตะกรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออน ได้ทำการวิเคราะห์พีเอช ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายและวัดปริมาณองค์ประกอบของซีตะกรันในตะกอนที่ผ่านการชะละลาย โดยปริมาณความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร มีรายละเอียดปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการชะละลายซีตะกรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออนดังนี้

4.1.2.1 ผลของอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (กรัมต่อกรัม)

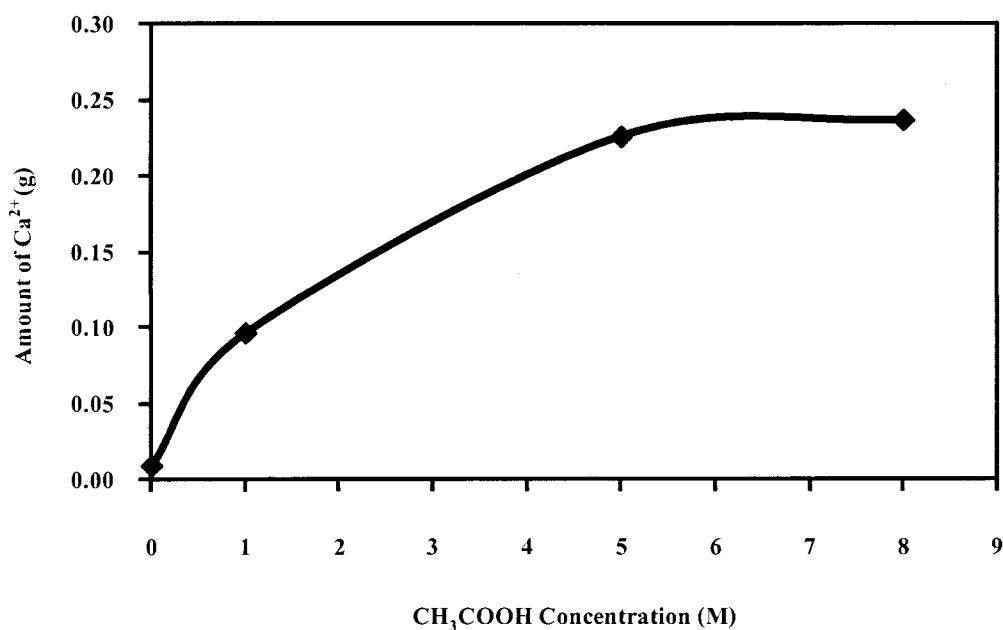
การทดลองชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์ด้วยสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสตลอดการชะละลาย และทำการศึกษาอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งตั้งแต่ 5 ถึง 20 (กรัมต่อกรัม) แสดงผลการทดลองในภาพประกอบที่ 4-2 โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีเมนต์ต่ออัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง พบว่า เมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากจำนวนโมลของกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้กรดอะซิติกทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบภายในซีเมนต์เพิ่มขึ้นด้วย ดังสมการที่ (4-1)



ภาพประกอบที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีเมนต์กับอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง ที่สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 5 โมลาร์

4.1.2.2 ผลของความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลาร์)

การทดลองการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการควบคุมอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเท่ากับ 10:1 (กรัมต่อกรัม) และอุณหภูมิการชะละลายเท่ากับ 50 องศาเซลเซียสตลอดการทดลอง ทำการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติกตั้งแต่ 0 ถึง 8 โมลาร์ ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4-3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติก

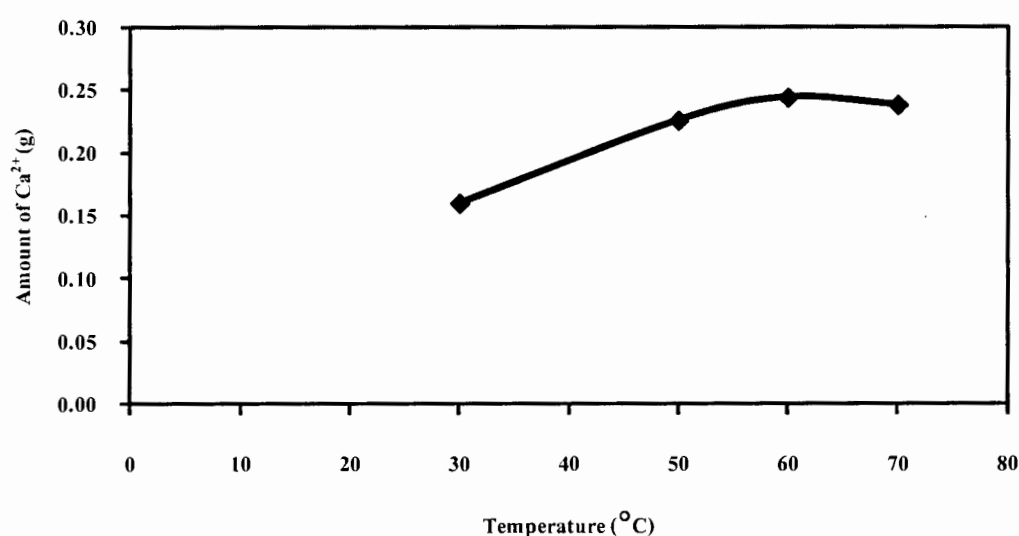


ภาพประกอบที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันกับความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติก

ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของกรดอะซิติกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นกรดอะซิติกส่งผลให้มีปริมาณไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น ซึ่งไฮโดรเจนไอออน (H^+) ดังกล่าวจะแพร่ไปยังซีตะกรันทำให้เกิดการละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันเพิ่มขึ้นด้วย (สุรชาติพิทย์, 2545) ส่วนในกรณีใช้น้ำปราศจากไอออนมาเป็นตัวชะละลาย (ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 0 โมลาร์) พบว่า ความสามารถในการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันเท่ากับ 0.00875 กรัม ซึ่งน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่ความเข้มข้นอื่นๆ แสดงให้เห็นว่า การชะละลายด้วยกรดอะซิติกสามารถชะละลายแคลเซียมไอออนได้ดีกว่าน้ำปราศจากไอออน (Bao, 2010)

4.1.2.3 ผลของอุณหภูมิในการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตริก

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



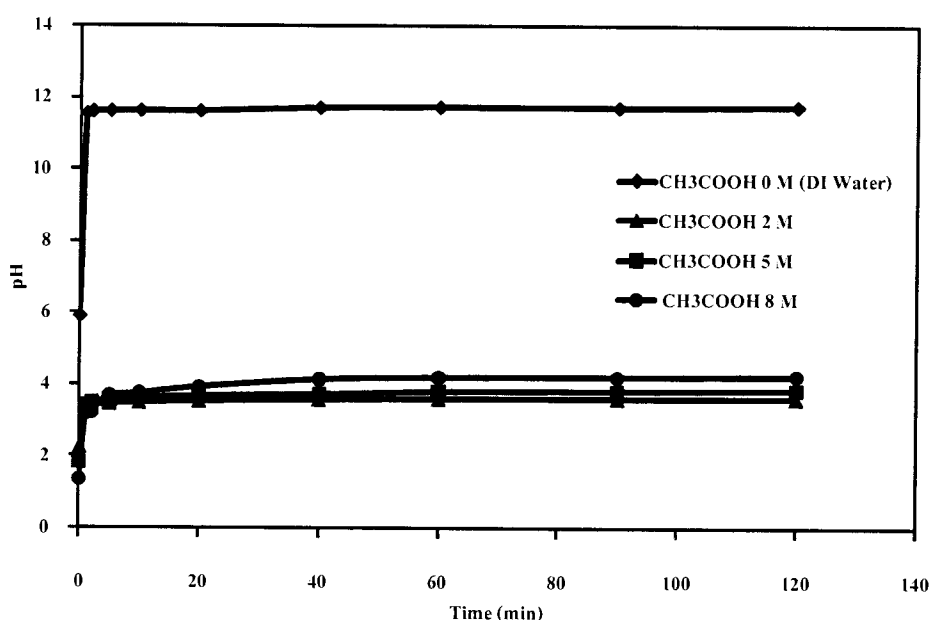
ภาพประกอบที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีตริกกับอุณหภูมิในการชะละลาย

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

4.1.2.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรัน

4-1) ผลของพีเอชของสารละลายต่อเวลาที่ใช้ในการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรัน

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



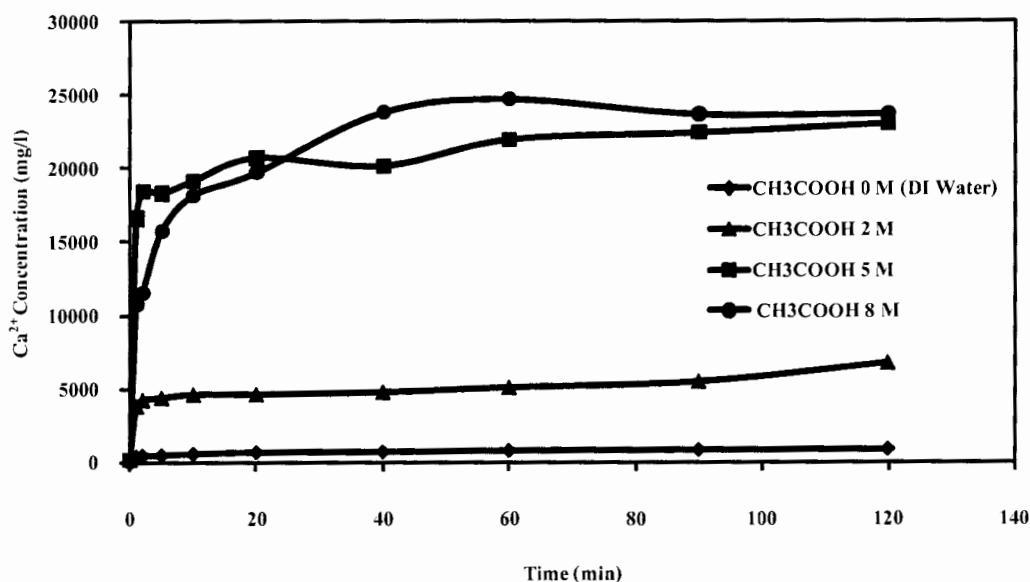
ภาพประกอบที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายกับเวลาที่ใช้ในการชะละลาย

จากภาพประกอบที่ 4-5 พบว่า ก่อนการชะละลายด้วยกรดอะซิติกสารละลายมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2.26 หลังจากนั้นละลายด้วยกรดอะซิติกแล้วค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นเป็น 3.62 เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่เกิดจากการแตกตัวของกรดอะซิติกแพร่ไปยังซีตะกรันทำให้เกิดการละลายของแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรัน ค่าพีเอชของสารละลายจึงมีค่าเพิ่มขึ้น (สุรชาติพย์, 2545) และพบว่าประสิทธิภาพในการชะละลายของแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 35 และเมื่อพิจารณาค่าพีเอชของสารละลายก่อนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนมีค่าเท่ากับ 5.88 และหลังการชะละลายพบว่า พีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นเป็น 11.74 สาเหตุเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีฤทธิ์เป็นด่างจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับน้ำปราศจากไอออนดังสมการที่ (4-2) (ประภฤต, 2542) อีกทั้งยัง

พบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.24 โดยจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการชะละลายด้วยกรดสูงกว่าน้ำ เนื่องจากโลหะจะละลายได้ดีที่สภาพเป็นกรดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bao และคณะ (2010) แต่น้ำปราศจากไอออนที่ใช้เป็นสารชะละลายที่มีสภาพเริ่มต้นเป็นกลางจึงทำให้สามารถชะละลายแคลเซียมไอออนออกมาได้ปริมาณน้อย แต่มีค่าพีเอชของสารละลายแคลเซียมไอออนหลังการชะละลายที่สูงแสดงถึงปริมาณค่าสภาพความเป็นด่างที่สูง

4-2) ผลของความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายต่อเวลาที่ในการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตะกรัน

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



ภาพประกอบที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายกับเวลาที่ใช้ในการชะละลาย

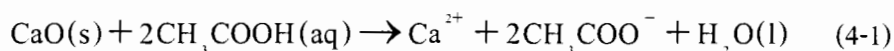
จากภาพประกอบที่ 4-6 พบว่า การชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นการชะละลาย จากนั้นจึงค่อยๆ คงที่ ซึ่งการชะละลายที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วในระยะแรกและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป ต่อมาปฏิกิริยาจะคงที่เนื่องจากความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสถานะของแข็งกับของเหลวแตกต่างกันน้อยลง หรือสารละลายเริ่มอิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์นั่นเอง

4.1.3 สมบัติของซีเมนต์ที่ผ่านการชะละลายด้วยน้ำและสารละลายกรดอะซิติก

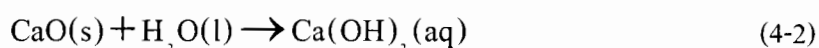
การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในซีเมนต์ส่วนที่เป็นภาคตะกอนที่เหลือจากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออนโดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ ดังแสดงในตารางที่ 4-1 พบว่า ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ภายในซีเมนต์ที่เหลือหลังจากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกน้อยกว่าการใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวชะละลาย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

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการชะละลายแคลเซียมออกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์ด้วยตัวทำละลายกรดอะซิติก หรือน้ำปราศจากไอออน และศึกษาการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายไปกำจัดก๊าซ CO₂ ดังปฏิกิริยาที่ (4-1) - (4-3)

ปฏิกิริยาการชะละลายซีเมนต์ (CaO) ด้วยกรดอะซิติก (CH₃COOH) (Kakizawa *et al.*, 2001)



ปฏิกิริยาการชะละลายซีเมนต์ (CaO) ด้วยน้ำปราศจากไอออนเกิดผลิตภัณฑ์เป็น Ca(OH)₂



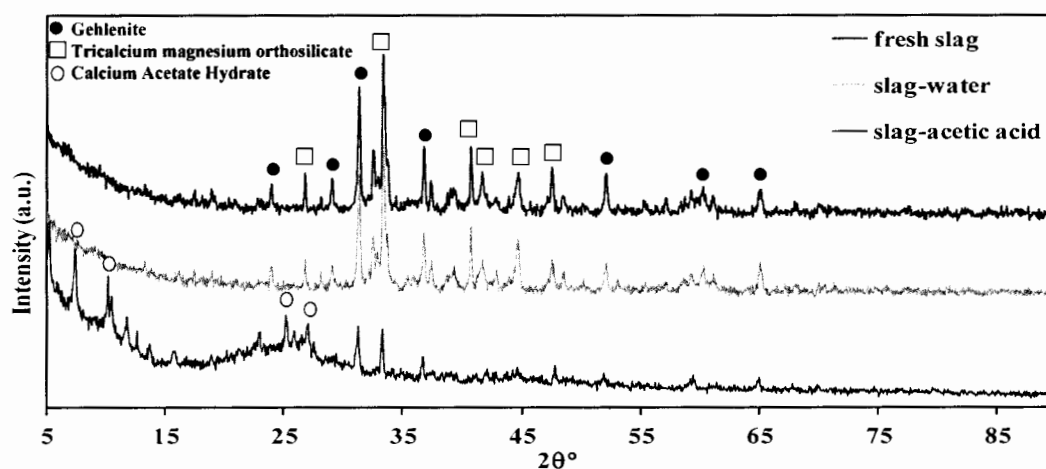
ปฏิกิริยาการแตกตัวของ Ca(OH)₂ แตกตัวเป็นไอออนในสารละลายซีเมนต์



ตารางที่ 4-2 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในซีตะกรันที่เหลือจากกระบวนการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออน

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

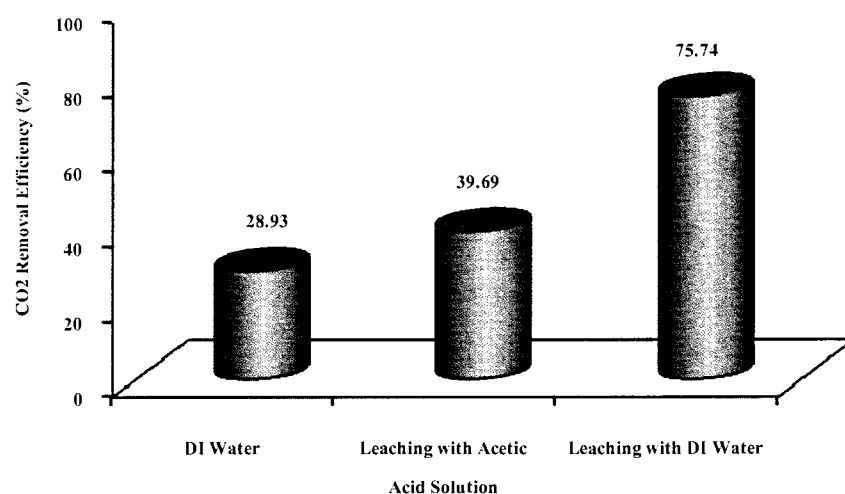
การวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ของซีตะกรันใหม่สด ซีตะกรันหลังจากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนและ หลังจากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรค-โตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD) แสดงดังภาพประกอบที่ 4-7 พบว่า ซีตะกรันหลังการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนไม่มีการเปลี่ยนแปลง นั่นคือ มี 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 (H^+) ที่เกิดจากการแตกตัวของกรดอะซิติกแพร่ไปยังซีตะกรัน แล้วละลายสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลผลิตส่วนหนึ่งที่ได้จากปฏิกิริยาไฮดรอลิซิสของซีตะกรัน โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเบสจะทำหน้าที่สะเทินกรดอะซิติกที่ใช้สกัด ทำให้ค่า pH ของสารละลายที่สกัดได้เพิ่มขึ้น (สุรชาติพิย์, 2545)



ภาพประกอบที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบองค์ประกอบตะกอนของซีเมนต์ก่อนและหลังการชะละลายวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรก โดมิเตอร์

4.1.4 ผลการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO_2 เบื้องต้นด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากกระบวนการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออน

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 กับสารดูดซึม 3 ชนิด คือ สารดูดซึมน้ำปราศจากไอออน สารดูดซึมจากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกและสารดูดซึมจากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ภายใต้สภาวะดำเนินการเดียวกันครั้งนี้คือ ที่อัตราการไหลของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซ 0.55 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4-8 ซึ่งเป็นแผนภูมิแสดงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 เมื่อใช้สารดูดซึมชนิดต่างๆ



ภาพประกอบที่ 4-8 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ กับสารดูดซึมต่างๆ โดยใช้อัตราการไหลของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซ 0.55 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากภาพประกอบที่ 4-8 พบว่า การใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกด้วยน้ำปราศจากไอออนจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ สูงสุดถึงร้อยละ 75.74 ซึ่งสูงกว่าทั้งสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออน เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นเดียวกันพบว่า สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนมีค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างมากที่สุด คือ 11.14 และ 1640 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในกรณีใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติก พบว่าค่าพีเอชเท่ากับ 4.00 เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าสารละลายนี้มีค่าความเป็นกรดเกินไปจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ต่ำ ส่วนกรณีใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารดูดซึมพบว่าให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO₂ ต่ำกว่าทั้งสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออน ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซึมก๊าซ CO₂ ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออนจะมีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งเรียกรวมๆ กันว่าการดูดซึมชนิดนี้ว่า การดูดซึมทางเคมี (Chemical Absorption) ทั้งนี้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกด้วยน้ำปราศจากไอออนจะทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน (Carbonation) กับก๊าซ CO₂ ได้ผลิตภัณฑ์คือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าการใช้

น้ำปราศจากไอออนมาเป็นสารดูดซับซึ่งเกิดการดูดซับทางกายภาพ (Physical Absorption) (ปรกรณ์, 2552)

งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็นสารดูดซับ เพื่อนำไปทำการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO₂ ในขั้นตอนการกำจัดก๊าซ CO₂ ต่อไป เนื่องจากสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO₂ ที่อัตราการไหลของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซ 0.55 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลาย 600 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับร้อยละ 75.74 โดยเป็นผลมาจากสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายข้างต้น มีสภาพความเป็นด่างทำให้สามารถกำจัดก๊าซ CO₂ ได้ดีกว่า โดยจะนำสภาวะที่ใช้ในการชะละลายแคลเซียมไอออน คือ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10:1 (กรัมต่อกรัม) ที่อุณหภูมิห้อง โดยดัดแปลงจากวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) (บุษราภรณ์, 2550) ไปใช้สำหรับการเตรียมสารดูดซับในการทดลองตอนที่ 2 ต่อไป

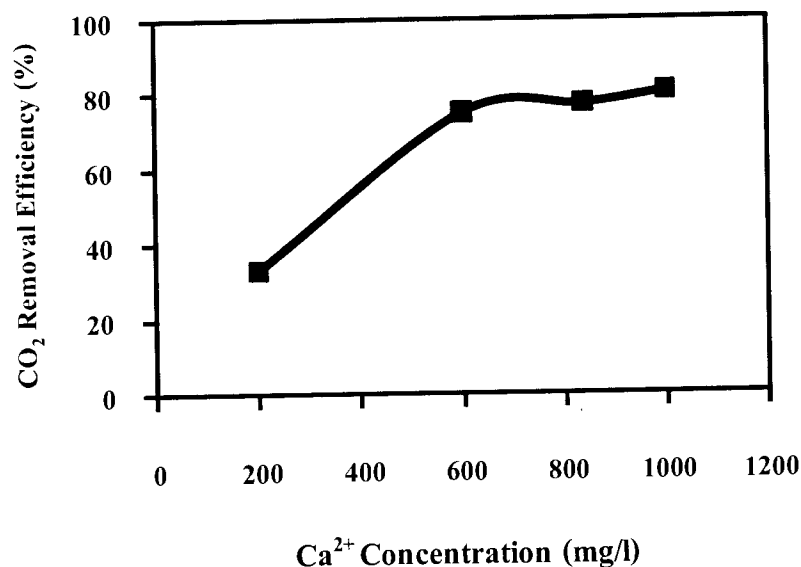
4.2 ศึกษาการกำจัดก๊าซ CO₂ ด้วยสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ

การศึกษการใช้สารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนมาเป็นสารดูดซับในการกำจัดก๊าซ CO₂ โดยใช้คอลัมน์บรรจุในระดับห้องปฏิบัติการ ภายในคอลัมน์บรรจุมีการไหลของกระแสก๊าซและกระแสของของเหลวที่สวนทางกัน โดยก๊าซ CO₂ จะถูกดูดซับเข้าสู่กระแสของเหลวและทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันกับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนซึ่งจะใช้สารละลายใหม่เสมอ และทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของก๊าซ และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลาย ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

4.2.1 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ โดยใช้คอลัมน์บรรจุห้องปฏิบัติการ

4.2.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂

การศึกษานี้ได้กำหนดให้ความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ ก่อนทำการกำจัดให้คงที่ร้อยละ 15 โดยปริมาตร โดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 0.55 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของของเหลวเท่ากับ 0.6 ลิตรต่อนาทีตลอดการทดลอง และทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันตั้งแต่ 200-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ผลการทดลองดังกราฟในภาพประกอบที่ 4-9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ กับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน



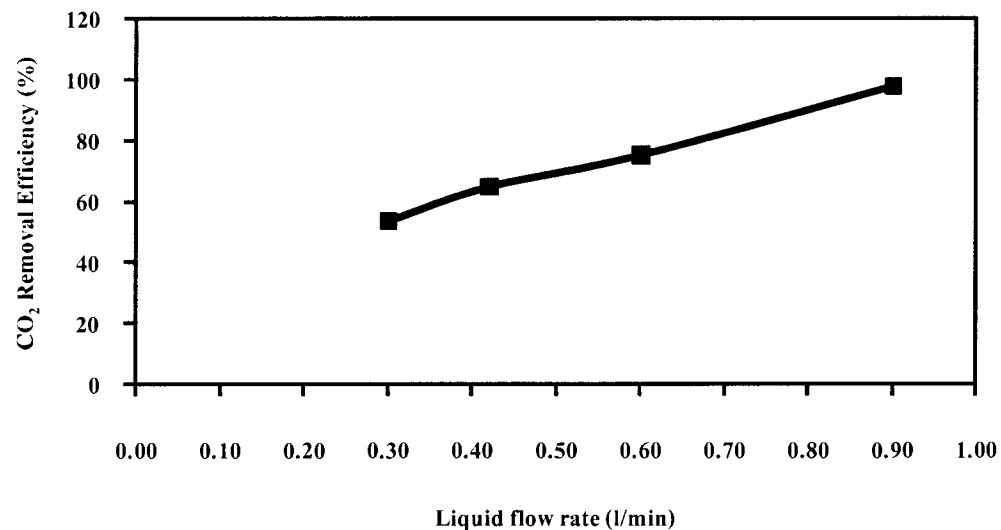
ภาพประกอบที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ กับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน

จากภาพประกอบที่ 4-9 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันเพิ่มขึ้นจาก 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ได้ร้อยละ 30 ถึง 80 โดยประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ จะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนสูงขึ้น เนื่องมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอน

ชั้นระหว่างก๊าซ CO_2 กับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกสูงเกินกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ความสามารถในการดูดซับก๊าซ CO_2 แตกต่างกันไปเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวจำกัดปริมาณสารตั้งต้นของการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน ดังนั้นที่สภาวะการดำเนินการในการศึกษานี้จะได้สภาวะที่เหมาะสม คือ ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริก เท่ากับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2.1.2 ผลของอัตราการไหลของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2

การทดลองได้ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ CO_2 เท่ากับ 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกเท่ากับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตรตลอดการทดลอง โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของเหลวตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.9 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองแสดงดังกราฟในภาพประกอบที่ 4-11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 ต่ออัตราการไหลของของเหลว

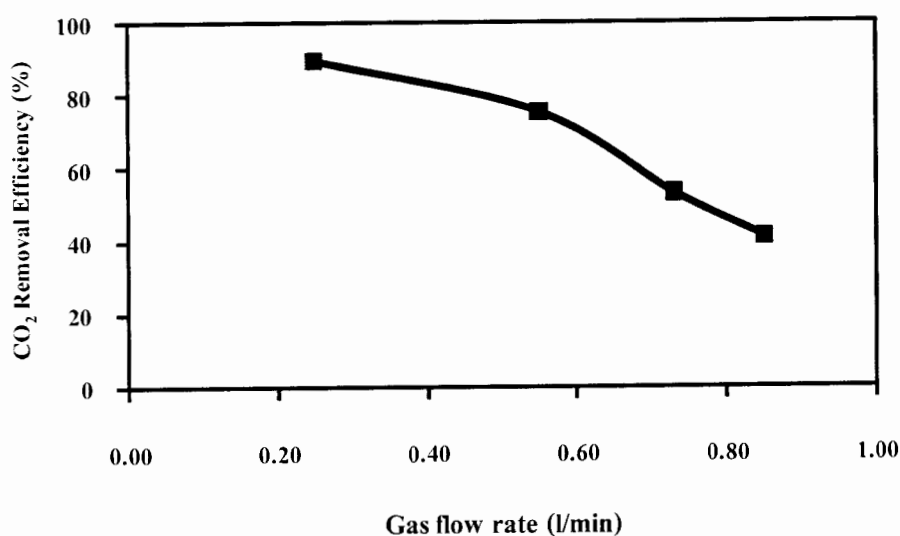


ภาพประกอบที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 กับอัตราการไหลของของเหลว

จากภาพประกอบที่ 4-10 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเพิ่มขึ้นระหว่างร้อยละ 53.92 ถึง 98.01 เนื่องจากอัตราการไหลของของเหลวที่เพิ่มขึ้นในขณะที่อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ ทำให้ปริมาณการดูดซึมและพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสของก๊าซและของเหลวในระบบเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราการไหลของสารดูดซึมมีข้อจำกัดในคอลัมน์บรรจุ เพราะถ้าอัตราการไหลของสารดูดซึมต่ำเกินไปจะทำให้เกิด Channeling ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง ดังนั้น การกำหนดช่วงของอัตราการไหลของสารดูดซึมที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้การเพิ่มอัตราการไหลของสารดูดซึมแสดงถึงการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตกรันทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 18

4.2.1.3 ผลของอัตราการไหลของก๊าซ CO_2 ต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2

การทดลองได้ควบคุมอัตราการไหลของเหลวให้เท่ากับ 0.6 ลิตรต่อนาทีและความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตกรันเท่ากับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตรตลอดการทดลอง โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.85 ลิตรต่อนาที ได้ผลการทดลองดังกราฟในภาพประกอบที่ 4-11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 ต่ออัตราการไหลของก๊าซ



ภาพประกอบที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 กับอัตราการไหลของก๊าซ

จากภาพประกอบที่ 4-11 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO₂ มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นมีผลต่อเวลาในการสัมผัสระหว่างเฟสของก๊าซและเฟสของเหลวลดลงจึงเกิดข้อจำกัดในการดูดซับ เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นจะต้านทานการไหลของสารดูดซับ (lin *et al.*, 2008) อีกทั้งอัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นก็ทำให้มีปริมาณก๊าซ CO₂ เข้ามาในระบบมากขึ้นเลยทำให้ปริมาณแคลเซียมที่อยู่ในสารละลายไม่เพียงพอสำหรับกำจัดก๊าซ CO₂ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

4.3 ผลการกำจัดก๊าซ CO₂ ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายชีตะกรันในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ 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 (- α , -1, 0, 1, α) งานวิจัยนี้จึงนำเทคนิค RSM แบบ CCD มาใช้ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองในการกำจัดก๊าซ CO₂ ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายชีตะกรันในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ

4.3.1 ผลการออกแบบการทดลองและผลตอบสนอง (Response)

การศึกษากำจัดก๊าซ CO₂ ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายชีตะกรันในคอลัมน์บรรจุห้องปฏิบัติการ โดยใช้หลักการทางสถิติด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD มาช่วยในการออกแบบการทดลอง ซึ่งทำให้ได้จำนวนการทดลองที่ประกอบไปด้วย 17 การทดลอง ทำการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมในการทดลองที่ 18-20 เพื่อศึกษาแนวโน้มของตัวแปรอิสระให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ค่าการกำจัดก๊าซ CO₂ ที่ได้จากการทดลองในแต่ละการทดลองแสดงผลดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีเมนต์ในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ ที่สภาวะการทดลองต่างๆ ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD

การทดลอง	อัตราการใช้ของเหลว (ลิตรต่อนาที)	อัตราการใช้ของก๊าซ (ลิตรต่อนาที)	ความเข้มข้นของแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัด CO ₂ (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 CO₂

จากข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตริกในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ ที่แสดงในตารางที่ 4-3 สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO₂ กับตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยเทคนิค RSM โดยใช้โปรแกรม Design Expert Software จะได้แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ซึ่งมีรูปแบบสมการแบบ Quadratic model ทำให้ได้แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ (4-4)

$$y = 72.52 + 54.11x_1 - 164.79x_2 + 0.079x_3 + 0.13x_2x_3 - 8.28 \times 10^{-3}x_3^2 \quad (4-4)$$

- เมื่อ y = ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ (ร้อยละ)
 x_1 = อัตราการไหลของของเหลว (ลิตรต่อนาที)
 x_2 = อัตราการไหลของก๊าซหรืออัตราการไหลอากาศเสีย (ลิตรต่อนาที)
 x_3 = ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตริก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

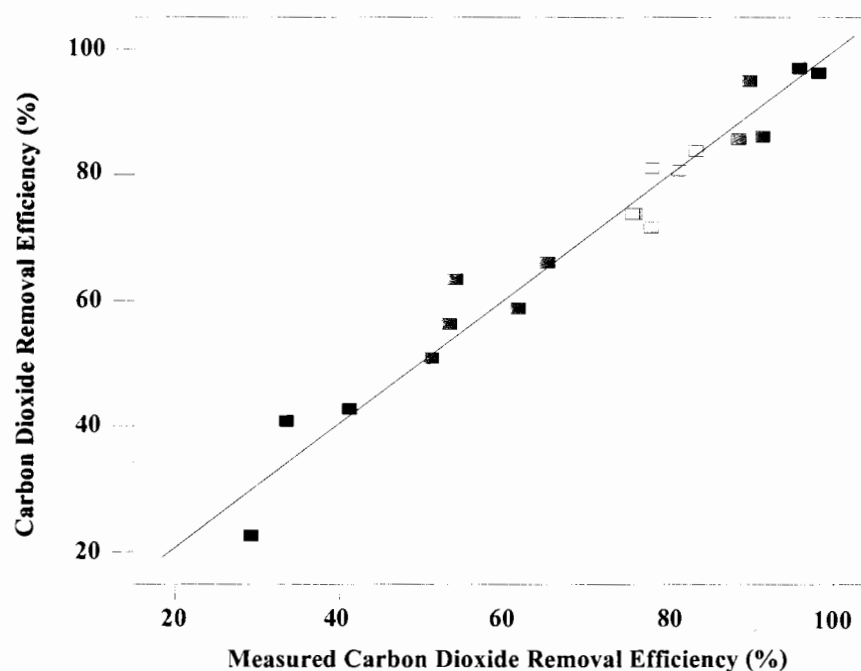
การพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองที่ได้จากสมการที่ (4-4) สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรบ่งบอกถึงความสำคัญของตัวแปรนั้นต่อผลประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ โดยหากสัมประสิทธิ์ของตัวแปรใดมีค่าสูงกว่าตัวแปรอื่น (ไม่คิดเครื่องหมายบวกหรือลบ ซึ่งเครื่องหมายแสดงถึงผลของตัวแปรอิสระที่แปรผันตรงหรือแปรผกผันกับตัวแปรตาม ตามลำดับ) 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 CO₂

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 ²	0.9287		Adjusted R ²	0.9033		
Predicted R ²	0.8180		Adequate Precision	21.363		

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองดังตารางที่ 4-4 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายการกำจัดก๊าซ CO₂ ภายใต้ช่วงของเงื่อนไขการดำเนินงานดังกล่าว ข้อมูลที่ให้ไว้ในตารางดังกล่าว จะเห็นว่าตัวแปรที่ศึกษาทุกตัวที่ปรากฏในสมการมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่า P-value ของตัวแปรแต่ละตัวนั้น ถ้าตัวแปรใดมีค่า P-value ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนตัวแปรที่มีค่า P-value สูงกว่า 0.10 ถือว่าไม่มีนัยสำคัญจึงต้องตัดทิ้งไป (Korbahti *et al.*, 2008) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation) (R² = 0.9287) ค่า R² เป็นค่าสถิติที่แสดงถึงสัดส่วนหรือร้อยละของความผิดพลาดที่แบบจำลองสามารถอธิบายได้จากสมการการ

ประมาณและเป็นค่าที่มีความสำคัญในการพิจารณาความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้มีความสำคัญอีกค่าหนึ่ง กล่าวคือค่า R^2 ควรมากกว่า 0.75 จึงเป็นค่าที่ยอมรับได้ (Seyedeh *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 เมื่อเปรียบเทียบค่าการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 ของแบบจำลองสมการเส้นโค้งกับค่าที่ได้จากผลการทดลองซึ่งแตกต่างกันเพียงร้อยละ 7.13 เท่านั้น โดยแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-12



ภาพประกอบที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 ที่ได้จากการคำนวณและจากการ คำนวณ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-4)

ภาพประกอบที่ 4-12 แสดงถึงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-4) ซึ่งข้อมูลที่ได้มีค่าการกระจายตัวรอบเส้นที่แสดงความสอดคล้องในระดับที่ยอมรับ

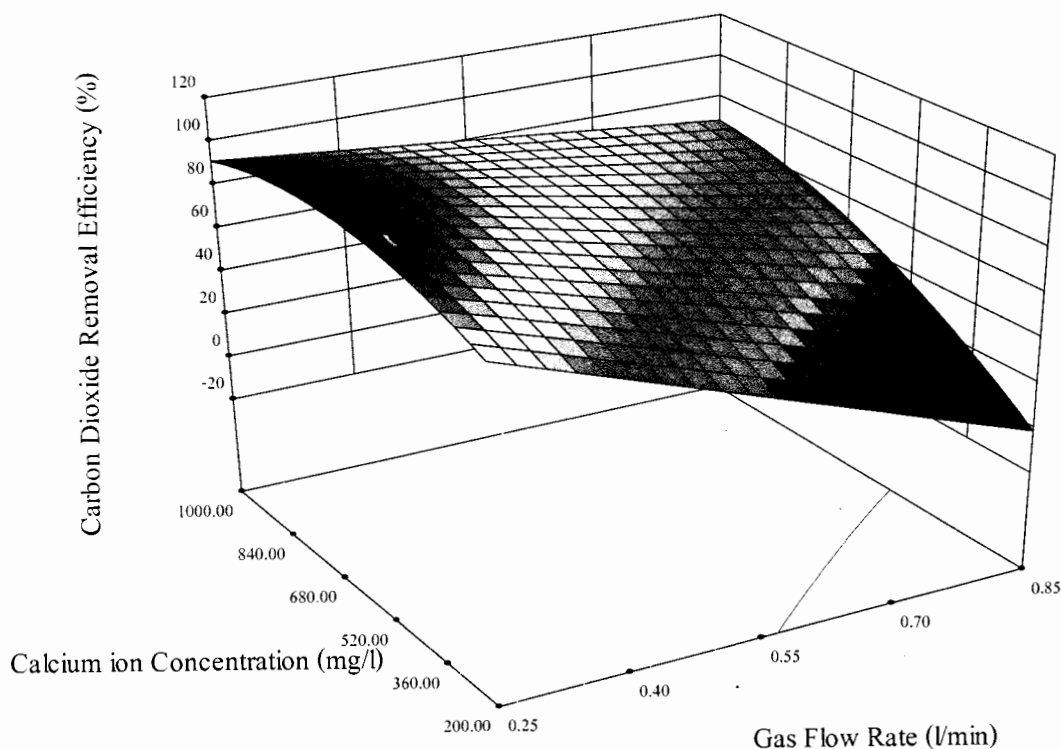
ได้ ($R^2 = 0.928$) แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 ในช่วงตัวแปรที่ศึกษาได้ดี

4.3.3 พื้นผิวตอบสนองของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2

จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำผลมาแสดงความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 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_2 ได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.3.3.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซ (x_2) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน (x_3)

ผลของความอัตราการไหลของก๊าซ (x_2) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน (x_3) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 เมื่อนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในรูปของกราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงผลการทดลองได้ดังภาพประกอบที่ 4-13 พบว่าผลของอัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์หน้า x_2 ในสมการ (4-4) ซึ่งมีค่าเป็นลบ เท่ากับ 164.79 เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นมีผลต่อเวลาในการสัมผัสระหว่างเฟสของก๊าซและเฟสของเหลวลดลงจึงทำให้การดูดซึมก๊าซ CO_2 ลดลง (Lin *et al.*, 2008) นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามสัมประสิทธิ์หน้า x_3 ในสมการ (4-4) ซึ่งมีค่าเป็นบวก เท่ากับ 0.079 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนเพิ่มขึ้นเสมือนเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อน (Driving Force) ในการเกิดปฏิกิริยาและอัตราการดูดซึมของก๊าซ CO_2 จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 เพิ่มขึ้น ทั้งผลของอัตราการไหลของก๊าซ CO_2 และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (x_2x_3) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 อย่างมีนัยสำคัญ

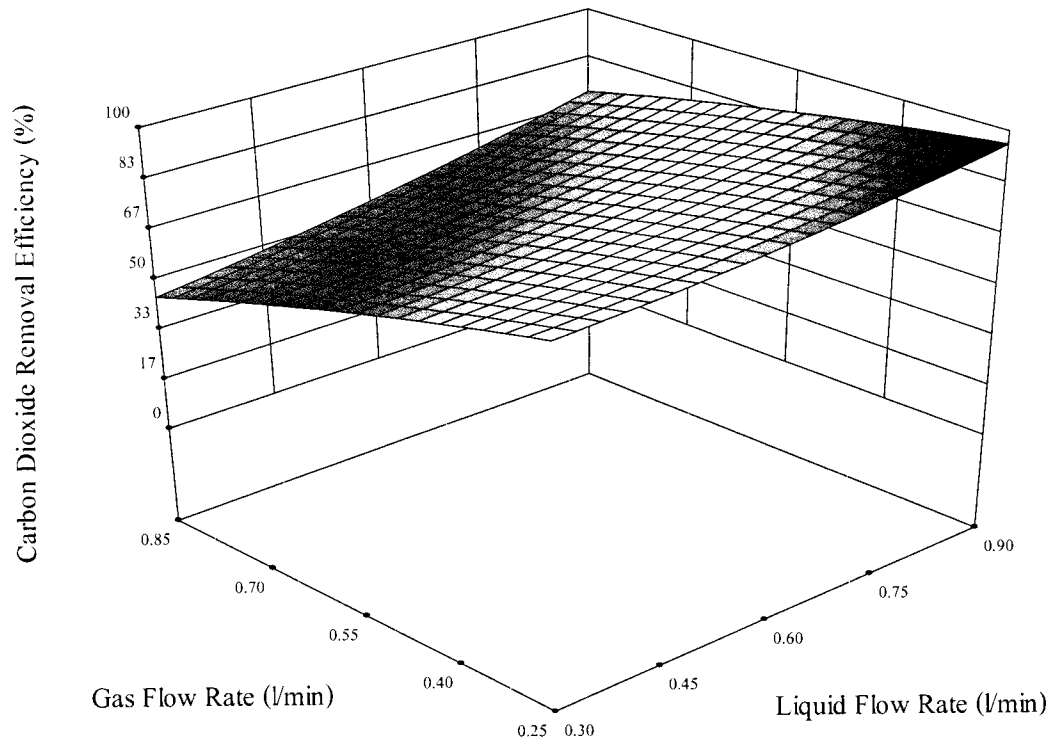


ภาพประกอบที่ 4-13 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการไหลของก๊าซ (x_2) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตริก (x_3) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2

4.3.3.2 ผลของอัตราการไหลของของเหลว (x_1) และอัตราการไหลของก๊าซ (x_2)

ผลของอัตราการไหลของของเหลว (x_1) และอัตราการไหลของก๊าซ (x_2) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 เมื่อนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในรูปของกราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงผลการทดลองได้ดังภาพประกอบที่ 4-14 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสารละลายแคลเซียมไอออนกับก๊าซ CO_2 สามารถเกิดได้เร็วขึ้นและเป็นการเพิ่มปริมาณของของเหลวจะเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างเฟสของเหลวกับเฟสของก๊าซส่งผลให้ประสิทธิภาพสูง จากสมการ (4-3) เมื่อพิจารณาอิทธิพลในเทอมของอัตราการไหลของของเหลว จะเห็นได้จากสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร (x_1) ที่มีค่าเป็นบวก เท่ากับ 54.11 ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 ของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และอัตราการไหลของก๊าซลดลงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (4-3) เมื่อพิจารณา

อิทธิพลในเทอมของอัตราการไหลของก๊าซ พบว่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร (x_2) ที่มีค่าเป็นลบ เท่ากับ 164.79

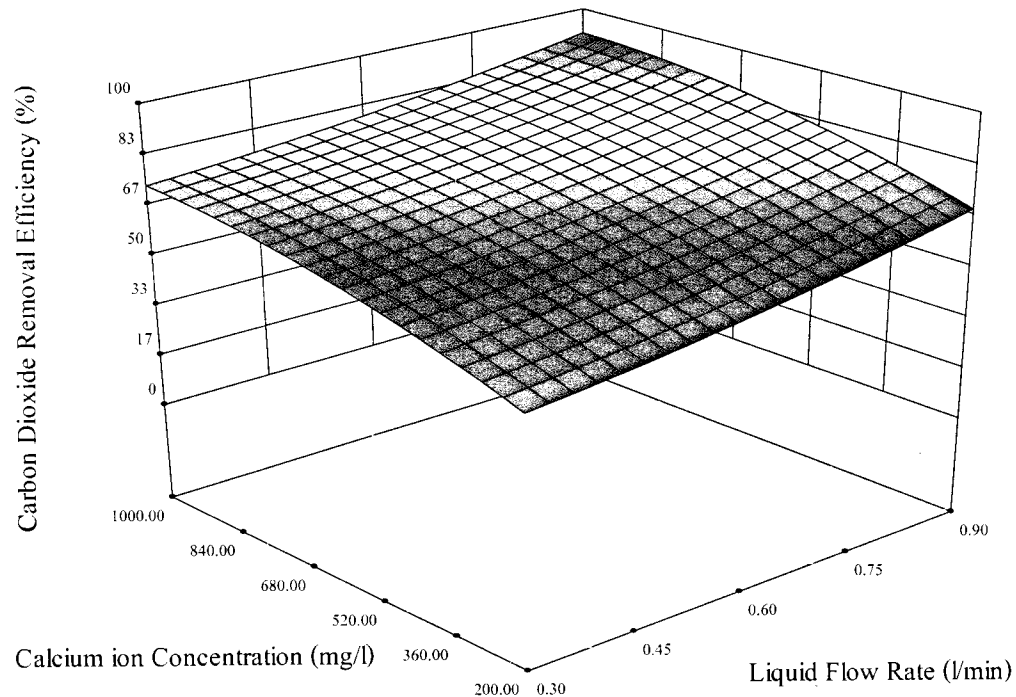


ภาพประกอบที่ 4-14 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการไหลของเหลว (x_1) และอัตราการไหลของก๊าซ (x_2) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 ที่ระดับความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.3.2 ผลของอัตราการไหลของเหลว (x_1) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน (x_3)

ภาพประกอบที่ 4-15 แสดงผลของปฏิสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปรระหว่างอัตราการไหลของเหลว (x_1) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน (x_3) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.55 ลิตรต่ออนาที จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของเหลวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์หน้า x_1 ในสมการ (4-3) ซึ่งมีค่าเป็นบวก เท่า 54.11 เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของเหลวเพิ่มขึ้นก็จะทำให้มีสารละลายแคลเซียมไอออนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อน (Driving force) ในการเกิดปฏิกิริยาและอัตราการดูดซึมของก๊าซ CO_2 เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 เพิ่มขึ้น

และในทำนองเดียวกันเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 เพิ่มขึ้นสูงขึ้น



ภาพประกอบที่ 4-15 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซ (x_2) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตริก (x_3) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2

4.3.4 ผลของสถานะที่เหมาะสมของการกำจัดก๊าซ CO_2

จากสมการแบบจำลองที่ (4-1) การกำจัดก๊าซ CO_2 ในช่วงของตัวแปรที่ทำการศึกษา สามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวทำนายประสิทธิภาพสถานะที่เหมาะสมในการดำเนินการได้ ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาผลเฉลยของสถานะที่เหมาะสมได้โดยใช้โปรแกรม Design Expert Software จะให้ค่าที่ดีที่สุดที่ทำให้ผลการตอบสนองพื้นผิวหรือประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 สูงสุด และสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสถานะการดำเนินการของตัวแปรที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วยอัตราการไหลของของเหลว (x_1) อัตราการไหลของก๊าซ (x_2) และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริก (x_3) จากการวิเคราะห์ด้วยแนวทางข้างต้น พบว่าสถานะการทดลองที่เหมาะสม (Optimum Condition) ในการกำจัดก๊าซ CO_2 ได้ คือ อัตราการไหลของของเหลว 0.77 ลิตรต่ออนาที อัตราการไหลของก๊าซ 0.25 ลิตรต่ออนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริก 725 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการควบคุมความ

เข้มข้นของก๊าซ CO₂ ให้คงที่ตลอดการทดลองที่ร้อยละ 15 โดยปริมาตร ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO₂ สูงสุดร้อยละ 97.83 โดยแสดงไว้ดังตารางที่ 4-5

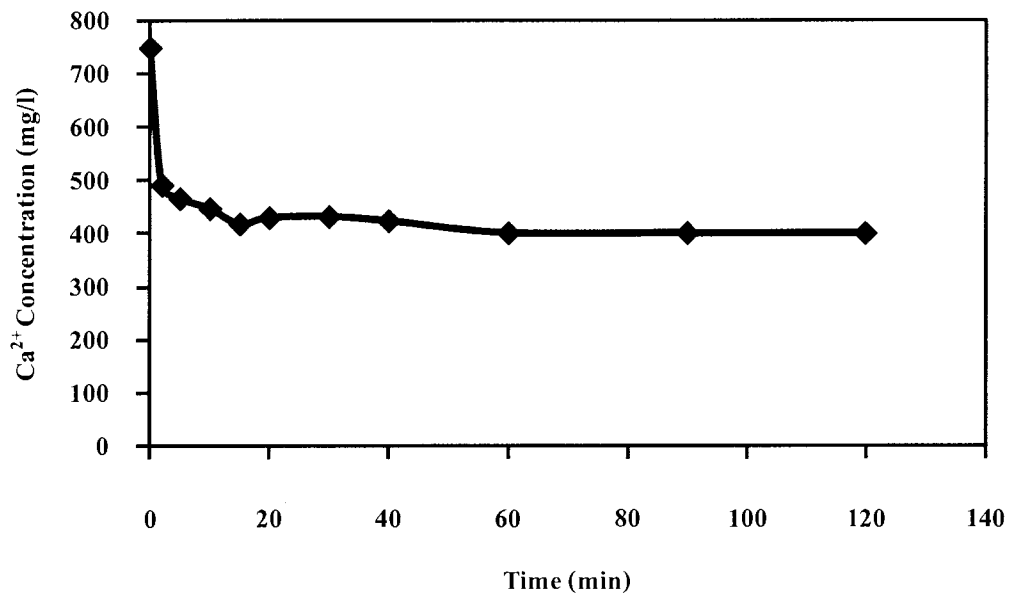
ตารางที่ 4-5 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ CO₂ และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับผลการทดลอง

อัตราการไหล ของเหลว (ลิตรต่อนาที) (x_1)	อัตราการไหล ของก๊าซ (ลิตรต่อนาที) (x_2)	ความเข้มข้น ของแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตร) (x_3)	ประสิทธิภาพ การกำจัด CO ₂	
			การคำนวณ	การทดลอง
0.77	0.25	725	100	97.83

จากตารางที่ 4-5 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้สามารถใช้ทำนายผลการกำจัดก๊าซ CO₂ ได้ในระดับดี และพบว่าผลลัพธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณไว้ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 5 เป็นตัวบ่งบอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์

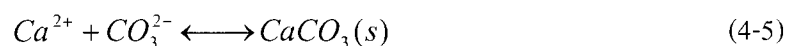
4.3.5 ประสิทธิภาพที่สภาวะที่เหมาะสมกับเวลาการใช้งาน

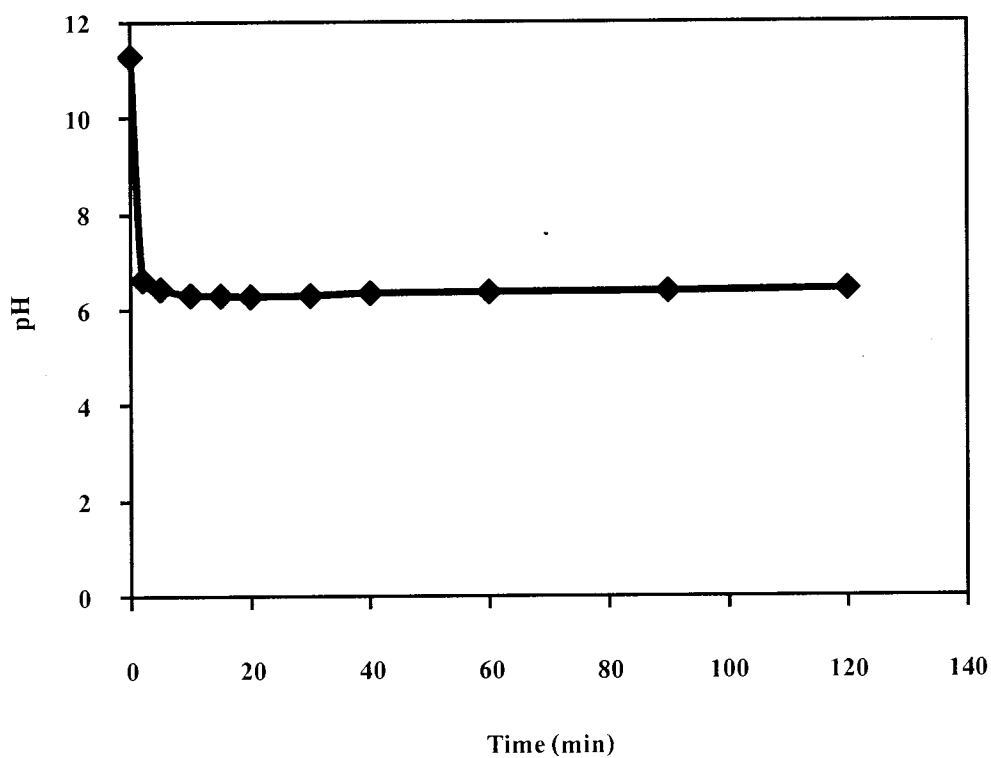
ในการศึกษานี้ได้นำผลของสภาวะที่เหมาะสมมาทำการศึกษาผลของเวลาในการกำจัดก๊าซ CO₂ โดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกด้วยน้ำปราศจากไอออนมาเป็นสารดูดซับในคอลัมน์บรรจุในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของเหลว 0.77 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซ 0.25 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลาย 725 มิลลิกรัมต่อลิตรและการทดลองนี้เป็นการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยซีตริกแบบวนซ้ำสารละลายในระบบเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แสดงผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4-16 ถึง 4-17 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ค่าพีเอช และประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ช่วงเวลาต่างๆ ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนต่อเวลา

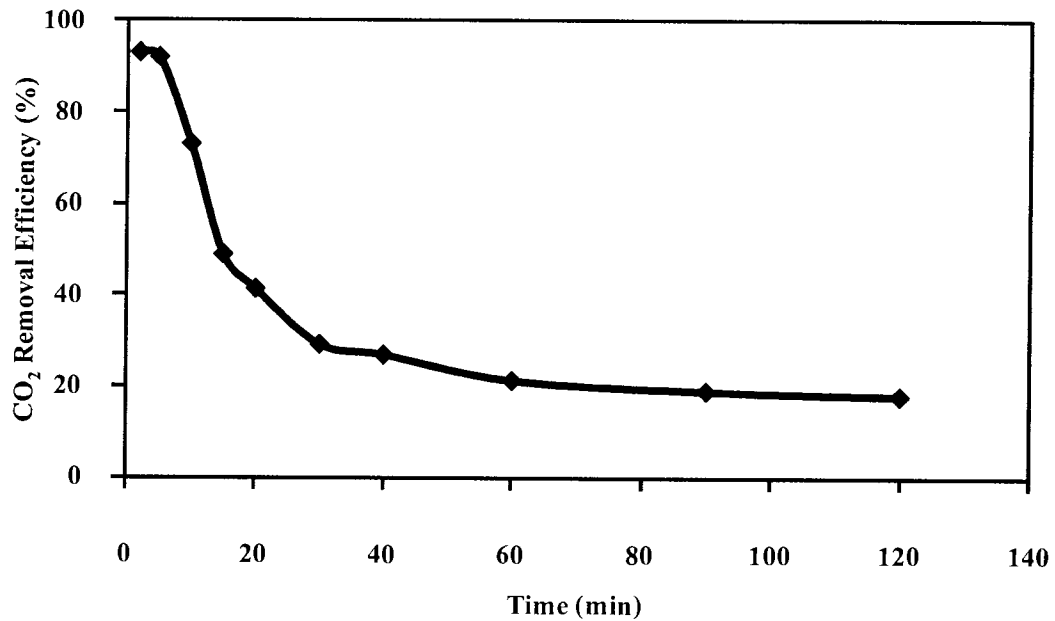
จากภาพประกอบที่ 4-16 พบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนลดลงจาก 747.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 475.89 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วง 2 นาทีแรก หลังจากนั้นความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนก็คงที่ที่ 430 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซ CO₂ เป็นปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน ก๊าซ CO₂ จะเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอเนตไอออน (CO₃²⁻) เข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน ปฏิกิริยาดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณไฮดรอกไซด์ (OH⁻) ในระบบ แต่หลังจากเวลาผ่านไป 2 นาที พีเอชของสารละลายแคลเซียมไอออนลดลงจาก 11.3 เหลือ 6.48 ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตไม่สามารถเกิดขึ้นได้เพราะการเกิดปฏิกิริยาข้างต้นจะเกิดขึ้นได้ที่พีเอชมากกว่า 8.3 ส่งผลให้ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนคงที่และสอดคล้องกับงานวิจัยของ จุฑามาศ (2548) ซึ่งพบว่าการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนจะคงที่ เป็นผลมาจากค่าสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเมื่อเกิดสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่สูงกว่าค่าการละลายน้ำ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (4-5)





ภาพประกอบที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายแคลเซียมไอออนต่อเวลา

จากภาพประกอบที่ 4-17 พบว่าค่าพีเอชของสารละลายแคลเซียมไอออนลดลงหลังปฏิกิริยาคูดซึ่มผ่านไป 2 นาที พีเอชสารละลายแคลเซียมไอออนลดลงจาก 11.3 เป็น 6.48 และจะคงที่ เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนจะถูกใช้ในการจับกับไฮโดรเจนไอออนที่มาจากการแตกตัวของกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) และไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) เกิดเป็นคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ส่งผลให้ทำให้ค่าความเป็นเบสลดลงดังแสดงในสมการที่ (2-8) ถึง (2-15)



ภาพประกอบที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ที่ช่วงเวลาต่างๆ

การศึกษาการกำจัดก๊าซ CO₂ ที่เวลาต่างๆ พบว่าการกำจัดก๊าซ CO₂ จะมีประสิทธิภาพสูงในตอนต้น แต่เมื่อเวลาผ่านไป ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-18 เนื่องจากในปฏิกิริยาคูดซิมก๊าซ CO₂ นั้นสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนที่ใช้เป็นสารคูดซิมนั้นจะค่อยๆ คูดซิมก๊าซ CO₂ และอิ่มตัว ทำให้ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ และในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แรงขับเคลื่อนในระบบจึงลดลง และเมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO₂ จะคงที่

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาทดลองในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการกำจัดก๊าซ CO₂ ในอากาศด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายซีตริกในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 การศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตริกในถังปฏิกรณ์แบบกะ และตอนที่ 2 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ในคอลัมน์แบบบรรจุ ขนาดต้นแบบ โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การศึกษาการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกจากซีตริกด้วยสารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออน

จากการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออน พบว่าสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกด้วยน้ำปราศจากไอออน ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO₂ สูงกว่าการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกด้วยน้ำปราศจากไอออน ที่สภาวะในการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10:1 (กรัมต่อกรัม) ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับการเตรียมสารดูดซับเพื่อนำไปทำการศึกษากำจัดก๊าซ CO₂ ในขั้นตอนการกำจัดก๊าซ CO₂ ในคอลัมน์บรรจุต่อไป

5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO₂ ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ

การศึกษการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกด้วยน้ำปราศจากไอออนมาเป็นสารดูดซับในการกำจัดก๊าซ CO₂ โดยใช้คอลัมน์บรรจุในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้เทคนิค RSM ในการออกแบบการทดลองแบบ CCD ทั้งหมด 20 การทดลอง จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ CO₂ ด้วยเทคนิคนี้ได้

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ที่สภาวะต่างๆ 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 = ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ (ร้อยละ)

x_1 = อัตราการไหลของของเหลว (ลิตรต่อนาที)

x_2 = อัตราการไหลของก๊าซหรืออัตราการไหลอากาศเสีย (ลิตรต่อนาที)

x_3 = ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

และได้สภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการกำจัดก๊าซ CO₂ ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน แสดงดังตารางที่ (5-1)

ตารางที่ 5-1 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ CO₂ ร้อยละ 15 โดยปริมาตรด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ

อัตราการไหล ของเหลว (ลิตรต่อนาที) (x_1)	อัตราการไหล ของก๊าซ (ลิตรต่อนาที) (x_2)	ความเข้มข้น ของแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตร) (x_3)	ประสิทธิภาพ การกำจัด CO ₂ (ร้อยละ) (y)
0.77	0.25	725	97.83

จากการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้คาดการณ์ไว้ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 5 จึงได้บ่งบอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถใช้คำนวณประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการได้

จากการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO₂ ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ สรุปได้ว่าสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นสารดูดซับให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ สูงถึงร้อยละ

97.83 ซึ่งเมื่อทำการทดลองเทียบกับเวลาพบว่าเมื่อเวลาในการกำจัดก๊าซ CO₂ เพิ่มขึ้น ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO₂ ก็มีแนวโน้มค่อยๆ ลดลง ดังนั้นในการนำกระบวนการนี้ไปใช้งานจริงจำเป็นต้องมีการเติมสารละลายใหม่สดเพื่อควบคุมความเข้มข้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์และค่าพีเอชให้คงที่ที่สถานะที่เหมาะสมก็จะสามารถควบคุมประสิทธิภาพของระบบให้คงที่ที่ประสิทธิภาพสูงสุดได้

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

5.2.1 ควรปรับปรุงและศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลายซีตริกเพื่อให้ได้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมกับการกำจัดก๊าซ CO₂ โดยคำนึงถึงค่าพีเอชของสารละลายและควรมีการศึกษาการเติมสารละลายใหม่สดเพื่อควบคุมความเข้มข้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์

5.2.2 ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาในกระบวนการชะละลายซีตริกและกระบวนการดูดซับก๊าซ CO₂

5.2.3 ควรศึกษาต่อจากผลงานวิจัยนี้เพื่อการประยุกต์ใช้สำหรับการใช้งานจริงในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยการกำจัดก๊าซ CO₂ ที่ปล่อยออกจากปล่องควันของโรงงานอุตสาหกรรมจริง

บรรณานุกรม

- จุฑามาศ โชติพานิช. 2548. ผลของโซเดียมคลอไรด์ต่อการตกตะกอนร่วมของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- จรรยา อินทมณี. 2546. การวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1 พฤษภาคม 2545. 187-196. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ชาคริต ทองอุไร. 2544. หลักปฏิบัติการเฉพาะหน่วย 2. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธีรภัทร์ ต้นกุลโรจน์. 2552. การบำบัดกลิ่นในก๊าซเสียที่เกิดจากกระบวนการอบยางแท่งโดยการดูดซับด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และ โมโนเอทานอลเอมีนในคอลัมน์บรรจุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- บุษราภรณ์ ทรัพย์ห้วง. 2550. การกักเก็บโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปกรณ์ ถนอมพงษ์ชาติ. 2552. การแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพโดยการดูดซับของเหลวในคอลัมน์อัดตัว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ประกฤต ฉัตรแสงอุทัย. 2542. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปานทิพย์ อัมมวนานิช. การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ Climatic Change. ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ

- ไพศาล จิตธรรม. 2551. การตรวจหาปริมาณก๊าซ CO₂ และ CO ในระบบปิดด้วยเครื่อง Gas-Chromatography และ CO₂, CO sensors. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- แม่น อมรสิทธิ์ และคณะ. 2552. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. ศูนย์หนังสือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 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
- ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น. 2552. การจำลองเชิงความร้อนของการทำงานของเข็มน้ำเหล็กระหว่างการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2540. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. คณะกรรมการจัดทำคู่มือการวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3.
- สุรชาติ อินทรวงศ์. 2545. การเปรียบเทียบวิธีการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุยึดประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ศิริภัทร ธรรมมัญญกุล, จตุพร อุปสัน, เอกราช รอดสว่าง และสมสกุล คงรอด. 2552. การผลิตโลหะและโลหะผสม. มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม.
<http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/5513101/termwork/iron/iron2.html> (สืบค้นเมื่อ 25 ธันวาคม 2552)

- สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2553. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- อิสรพงษ์ พงษ์ศิริกุล. 2544. การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับอุตสาหกรรมเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีการพัฒนาลิขิตภัณฑ์. คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Ahmad, A.L., Sunarti, A.R., Lee, K.T., and Fernando, W.J.N. 2010. CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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. CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ on Zeolite 13X and Zeolite X/Activated Carbon Composite. *J. Chem. Eng.* 47: 1237-1242.

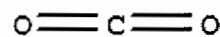
- Sheng H. Lin, Ching T. Shyu. 1999. Performance characteristics and modeling of carbon dioxide absorption by amines in a packed column. *Waste Management*. 19: 255-262.
- Lin, C.C., Chen, B.C., Chen, Y.S. and Hsu, S.K. 2008. Feasibility of a cross flow rotating packed bed in removing carbon dioxide 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*, 5th ed. McGraw-Hill International Edition. 686-730.
- Prigiobbe, V., Polettini, A., and Baciocchi, R. 2009. Gas-solid carbonation kinetics of Air Pollution Control residues for CO₂ storage. *Chemical Engineering Journal*. 148: 270-278.
- Rao, A. B. and Rubin, E. S., 2002. *A Technical, Economic and Environmental Assessment of Amine-based CO₂ Capture Technology for Power Plant Greenhouse Gas Control*. Carnegie Mellon University. Center of Energy and Environmental Study.
- Richards, J. 1981. *Control of Gaseous Emission*, 2nd 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 CO₂ 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 ก
ข้อมูลสารเคมีเบื้องต้น

ก-1 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide)

สูตรโมเลกุล	: CO ₂
น้ำหนักโมเลกุล	: 44.0095 กรัม/โมล
ชื่อเรียกอื่น	: Carbonic Acid Gas, Carbonic Anhydride; Dry Ice (Solid)
สูตรโครงสร้าง	



ลักษณะทั่วไป : แก๊สไม่มีสี สามารถกลายเป็นของแข็งสีขาวที่อุณหภูมิ -78 องศาเซลเซียส โดยไม่ผ่านการเป็นของเหลว หากต้องการให้แก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์เป็นของเหลวต้องใช้ความดันไม่น้อยกว่า 5.1 atm

ความหนาแน่น	: 1,562 กรัม/ลิตร (ของแข็งที่ 1 atm, -78.5 องศาเซลเซียส)
	770 กรัม/ลิตร (ของเหลวที่ 56 atm, 20 องศาเซลเซียส)
	1.977 กรัม/ลิตร (แก๊สที่ 1 atm, 0 องศาเซลเซียส)

จุดเดือด : -56.6 องศาเซลเซียส

จุดหลอมเหลว : -78.5 องศาเซลเซียส

ความสามารถในการละลายน้ำ : 1.45 กรัม/ลิตร ที่ 25 องศาเซลเซียส

อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

สัมผัสทางหายใจ : การหายใจเข้าไปทำให้คลื่นไส้ หัวใจเต้นผิดปกติ ปวดศีรษะ มึนงง ربกวน การมองเห็น หายใจไม่ออก มีอาการชัก อาการโคม่า

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสถูกผิวหนังจะเป็นแผลพอง เหมือนน้ำแข็งกัด

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือกินเข้าไป มีอาการเหมือนน้ำแข็งกัดบริเวณริมฝีปาก ปาก และ เยื่อเมือกจะมีผลทำลายตับ

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคือง การมองเห็น ไม่ชัดเจน

การก่อมะเร็ง ความผิดปกติ, อื่น ๆ : สารนี้เป็นสารก่อมะเร็งตาม OSHA, NTP, IARC

ความคงตัวทางเคมี : สารนี้เสถียรที่อุณหภูมิ และความดันปกติ

สารที่เข้ากันไม่ได้ : สารที่เผาไหม้ได้ สารออกซิไดซ์ เกลือของโลหะ สารรีดิวซ์ โลหะคาร์ไบด์ โลหะ เบส

สถานะที่ควรหลีกเลี่ยง : ภาชนะบรรจุอาจเกิดการระเบิดถ้าสัมผัสความร้อน หลีกเลี่ยงการสัมผัสกับน้ำหรือความชื้น

อันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ : ไม่เกิดขึ้น

ก-2 ไนโตรเจน (Nitrogen)

สูตรโมเลกุล : N_2

น้ำหนักโมเลกุล : 28.01 กรัม/โมล

ความหนาแน่น : 1.251 กรัม/ลิตร ที่ 0 องศาเซลเซียส

จุดเดือด : -195.8 องศาเซลเซียส

จุดเยือกแข็ง : -210 องศาเซลเซียส

ความร้อนของการหลอมเหลว : 0.720 กิโลจูล/โมล (N_2)

ลักษณะทั่วไป : ไนโตรเจนมีสถานะแก๊สที่อุณหภูมิห้อง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของชั้นบรรยากาศโลก

อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

สัมผัสทางหายใจ : การหายใจเข้าไป สารนี้จะทำให้ร่างกายขาดออกซิเจน ทำให้มีอาการหายใจติดขัด หายใจถี่เร็ว อารมณ์แปรปรวน กล้ามเนื้อทำงานไม่ประสานกัน สับสน ความรู้สึกชา เหนื่อย ทำให้สลบ คลื่นไส้ อาเจียน อ่อนเพลีย หมคสติ และเสียชีวิตได้

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสผิวหนัง ไม่มีผลกระทบ

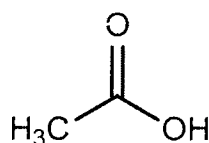
กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือกินเข้าไป ไม่มีผลกระทบ

สัมผัสลูกตา : การสัมผัสลูกตา ไม่มีผลกระทบ

การก่อมะเร็ง ความผิดปกติ, อื่น ๆ : การขาดออกซิเจนในระหว่างที่ตั้งครรภ์ จะทำให้ทารกในครรภ์มีความผิดปกติ

ก-3 กรดอะซิติก (Acetic acid)

สูตรโมเลกุล : CH_3COOH
 น้ำหนักโมเลกุล : 60.05 กรัม/โมล
 ชื่อเรียกอื่น : Ethanoic Acid
 สูตรโครงสร้าง



คุณสมบัติ : เป็นของเหลวใสไม่มีสี มีกลิ่นฉุน แสบจมูก ระเหยได้ละลายน้ำได้ดี มีความเสถียร มีลักษณะเป็นผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 17 องศาเซลเซียส

จุดเดือด : 118 องศาเซลเซียส

จุดเยือกแข็งที่ : 17 องศาเซลเซียส

อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

สัมผัสทางหายใจ : การหายใจเอาไอ ละอองหรือฝุ่นเข้าไปทำให้แสบไหม้จมูก คอและตา ไอ แน่นหน้าอก และหายใจติดขัด การสัมผัสเป็นเวลานานทำให้มีอาการ cyanosis (ผิวหนังและริมฝีปากเป็นสีเขียวคล้ำ) โรคปอดอักเสบ ทำลายปอดหรือ เสียชีวิตได้

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคือง เจ็บปวด เป็นผื่นแดง และบวม มีอาการแสบไหม้ เกิดเป็นตุ่มตามผิวหนัง และเนื้อเยื่อถูกทำลาย

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนกินเข้าไปทำให้แสบไหม้ปาก คอ และปวดท้อง เจ็บหน้าอก คลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง กระหายน้ำ อ่อนเพลีย และเป็นแผลในท้อง ทำให้อาเจียน และทำลายปอด

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคือง เจ็บปวด น้ำตาไหล ทำให้ตาบวม เป็นผื่นแดง และแสบไหม้ตา ถ้ารุนแรงอาจทำให้ตาบอดได้

การก่อมะเร็ง ความผิดปกติ, อื่น ๆ : การหายใจเอาสารเข้าไปนานๆ จะทำลายปอด ถ้าถูกผิวหนังเป็นเวลาดูติดต่อกันทำให้เป็นโรคมะเร็ง เป็นโรคผิวหนัง เป็นโรคหลอดเลือดอักเสบ โรคปอด ทำลายฟัน ไต

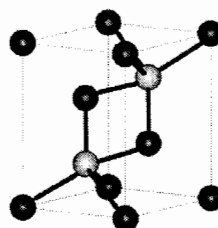
ความคงตัวทางเคมี : สารนี้มีความเสถียร

สารที่เข้ากันไม่ได้ : น้ำ ความร้อน สารออกซิไดซ์รุนแรง สารทำปฏิกิริยารุนแรงกับเบส

สถานะที่ควรหลีกเลี่ยง : ความชื้น

ก-5 แลนทานัมออกไซด์ (Lanthanum(III)oxide)

สูตรโมเลกุล	: La_2O_3
น้ำหนักโมเลกุล	: 325.809 กรัม/โมล
ชื่อเรียกอื่น	: Lanthanum Sesquioxide, Lanthana
สูตรโครงสร้าง	: โครงผลึกของแข็งแบบ Hexagonal



ความหนาแน่น	: 6.51 กรัม/ลิตร (ของแข็ง)
จุดหลอมเหลว	: 2250-2307 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	: 4200 องศาเซลเซียส
ลักษณะทั่วไป	: ออกไซด์ของธาตุที่หายาก เป็นของแข็งสีขาว ละลายน้ำได้ในกรดเล็กน้อย และละลายในน้ำ
ความสามารถในการละลายน้ำ	: ไม่ละลายน้ำ
สัมผัสทางหายใจ	: การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองทางเดินหายใจ
สัมผัสทางผิวหนัง	: การสัมผัสผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคืองผิวหนังเล็กน้อย
กินหรือกลืนเข้าไป	: การกลืนหรือกินเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองเล็กน้อย
สัมผัสดวงตา	: การสัมผัสดวงตา จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา น้ำตาไหล ตาแดง
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติ, อื่น ๆ	: อวัยวะเป้าหมาย: ปอด
ความคงตัวทางเคมี	: สารนี้มีความเสถียร แต่จะออกซิไดซ์ในอากาศ เป็นสารดูดความชื้น สามารถดูดไฟได้เองเมื่อสัมผัสกับอากาศหรือน้ำ
สารที่เข้ากันไม่ได้	: กรดแก่ สารออกซิไดซ์ อากาศ ความชื้น น้ำ
สถานะที่ควรหลีกเลี่ยง	: ความร้อน แหล่งจุดติดไฟ
สารอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว	: เมื่อสัมผัสกับกรดแก่จะทำให้เกิดไฮโดรเจน
อันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์	: ไม่เกิดขึ้น

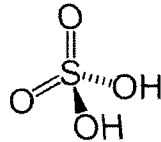
ก-6 กรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid)

สูตรโมเลกุล : H_2SO_4

น้ำหนักโมเลกุล : 99.08 กรัม/โมล

ชื่อเรียกอื่น : กรดกำมะถัน

สูตรโครงสร้าง



ลักษณะทั่วไป : ของเหลวใสขุ่น ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ควบแน่นได้ดี มีฤทธิ์เป็นกรดแก่ (Strong Acid)

ความหนาแน่น : 1.84 กรัม/ลิตร (ของเหลว)

จุดเดือด : 290 องศาเซลเซียส

จุดหลอมเหลว : 10 องศาเซลเซียส

อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

สัมผัสทางหายใจ : การหายใจเข้าไป สารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนและก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้มีอาการน้ำท่วมปอด เจ็บคอ ไอ หายใจติดขัด และหายใจถี่เร็ว การหายใจเอาสารที่มีความเข้มข้นสูงอาจทำให้เสียชีวิตได้

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสผิวหนัง สารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้เป็นแผลไหม้ และปวดแสบปวดร้อน

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือการกินเข้าไป ทำให้คลื่นไส้ อาเจียน แต่ไม่มีผลต่อเนื้อเยื่อ

สัมผัสลูกตา : การสัมผัสลูกตา สารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้ตาแดง ปวดตา และสายตาวัวมัว

การก่อมะเร็ง ความผิดปกติ, อื่น ๆ : สารนี้มีผลทำลายฟัน ระบบหลอดเลือดเลี้ยงหัวใจ

สารที่เข้ากันไม่ได้ : เบสแก่ น้ำ สารอินทรีย์ โลหะอัลคาไลน์

สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว : เมื่อทำปฏิกิริยากับโลหะจะเกิดออกไซด์ของกำมะถันและไฮโดรเจน

สารที่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ : ทำให้เกิดเพลิงไหม้และการระเบิด

ภาคผนวก ข
วิธีการวิเคราะห์

ข-1 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Atomic Absorption Spectroscopy, AAS) (แม้น, 2552)

เทคนิคทาง AAS เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุอย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณวิเคราะห์ที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง เพราะเป็นเทคนิคที่ให้ความเที่ยง ความแม่นยำ มีสภาพไวสูง และเป็นเทคนิคที่เฉพาะดีมาก พร้อมทั้งค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ไม่สูง ดังนั้น ห้องปฏิบัติการที่ทันสมัยโดยทั่วไปจึงมีเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์อยู่ด้วยเสมอ

หลักการของอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

อะตอมมิกแอบซอร์พชันเป็นกระบวนการที่เกิดจากอะตอมเสรีของธาตุดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นอันหนึ่ง โดยเฉพาะขึ้นกับชนิดของธาตุนั้นๆ โดยธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับพลังงานแตกต่างกันจึงมีการดูดกลืนพลังงานแตกต่างกัน ความยาวคลื่นเหล่านี้จัดเป็น Spectroscopic Line ของอะตอมธาตุ

ในการทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดเป็นอะตอมเสรีได้นั้น ต้องมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไป ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปต่างๆ กัน เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ หรือ ความร้อนจากไฟฟ้า เป็นต้น ความร้อนจะทำให้อะตอมเกิดกระบวนการแตกตัว (Dissociation) หรือ เปลี่ยนให้เป็นไอ (Vaporization) หรืออาจจะแตกตัวเป็นอะตอม หรือทำให้อยู่ในสถานะกระตุ้น หรือ อาจกลายเป็นไอออนก็ได้

เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี AAS

เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุนั้นสามารถทำได้หลายวิธี คือ

- Flame Atomization Technique เทคนิคนี้ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างแตกตัวเป็นอะตอมด้วยเปลวไฟ (Flame) ที่เหมาะสม

- Flameless Technique หรือ Non-flame Atomization Technique ซึ่งเทคนิคนี้ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างสลายตัวเป็นอะตอมได้ด้วยความร้อนทางไฟฟ้า (Electrothermal Atomizer หรือ Graphite Furnace) โดยสามารถโปรแกรมให้อุณหภูมิการเผามีค่าต่างๆ กัน และใช้เวลาต่างๆ กันได้

- Hydride Generation Technique เนื่องจากมีธาตุบางชนิดจะเปลี่ยนให้เป็นอะตอมโดยตรงด้วยเทคนิคดังกล่าวมาไม่ได้ แต่จำเป็นต้องใช้วิธีทำให้แตกตัวในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนเพื่อป้องกันการรวมตัวกับออกซิเจนของธาตุเหล่านี้ ดังนั้น จึงต้องทำให้ธาตุ

เหล่านี้กลายเป็นไอที่อุณหภูมิห้องด้วยการรีดิวซ์ให้เป็นไฮโดรด์ แล้วไฮโดรด์นั้นผ่านเข้าไปในเปลวไฟไฮโดรเจน ความร้อนจากเปลวไฟไฮโดรเจนจะทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมเสรีได้ เทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ของธาตุ As, Se, Te, Ge, Bi และ Sb

- Cold Vapor Generation Technique สำหรับเทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่สามารถเปลี่ยนเป็นไอได้ง่ายๆ ได้แก่ การวิเคราะห์ปรอทที่มีปริมาณน้อย โดยเฉพาะ

Calibration Method

ในกรณีที่สารตัวอย่างไม่ค่อยมีสิ่งรบกวนและสารตัวอย่างเจือจาง อาจจะทำการวิเคราะห์ได้ง่ายๆ โดยเทียบสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนแล้ว วิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป โดยปรับสัญญาณที่ได้จาก Blank ให้เป็นศูนย์ แล้วจึงวัดค่าแอมพลิจูดของสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน (4-5 ความเข้มข้น) เมื่อใช้ Flameless Atomization Technique อาจใช้วัด Peak Area หรือความสูงของพีค (Peak Height) แล้วนำมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย จะได้ Calibration Curve ซึ่งอาจเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งก็ได้ ในการเขียนกราฟ อาจให้เครื่องคอมพิวเตอร์หรือเครื่องคำนวณทำงานให้ ถ้าเป็นเส้นตรง ใช้ Least Square Fit แต่ถ้าเป็นเส้นโค้ง อาจใช้เครื่องลากเส้นโค้งให้ได้ พร้อมคำนวณความเข้มข้นให้ด้วยจากค่าที่วัดได้ของสารตัวอย่างซึ่งสะดวกมาก สิ่งสำคัญจะต้องไม่ลืมว่า Calibration Curve ที่ได้ ใช้เฉพาะการวิเคราะห์แต่ละครั้งเท่านั้น เมื่อจะวิเคราะห์ใหม่จะต้องทำใหม่ ทั้งนี้เพราะ Parameter ต่างๆ ที่ใช้อาจเปลี่ยนแปลงได้

การวิเคราะห์ Ca^{2+} (สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2540)

การหาปริมาณของแคลเซียม (Ca^{2+}) ด้วยวิธีอะตอมมิคแอมพลิจูด โดยฉีดสารละลายตัวอย่างโดยตรงเข้าไปในอะตอมไมเซอร์ที่ใช้เปลวไฟอากาศอะเซทิลีน (Direct Aspiration into an Air-acetylene Flame)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. อะตอมมิคแอมพลิจูดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์พร้อมด้วยอุปกรณ์
2. หัวเตาที่มีสามช่อง (Three-slot Burner Head) ถ้าไม่มีหัวเตาชนิดนี้อาจจะใช้หัวเตาที่มีช่องเดียว

สารเคมี

1. อากาศ อากาศที่ใช้จะต้องสะอาดและแห้ง ซึ่งทำโดยผ่านเครื่องกรองที่เหมาะสม เพื่อกำจัดน้ำมัน น้ำ และสารแปลกปลอมอื่นๆ อาจจะใช้อากาศในห้องโดยใช้เครื่องอัดอากาศ หรือจะใช้อากาศที่อัดอยู่ในท่อ (Cylinder) ก็ได้

2. แก๊สอะเซทิลีน ใช้ชนิดมาตรฐานการค้าที่บรรจุอยู่ในท่อ และควรจะหยุดเมื่อใช้ความดันของแก๊สในถังลดลงถึง 7 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร (หรือ 100 psig) เพื่อป้องกันไม่ให้อะซิโตนซึ่งอยู่ในถังปนออกมาด้วย

3. สารละลายแคลเซียมมาตรฐาน 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

4. น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized Distilled Water)

5. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น

6. สารละลายแลนทานัม (Lanthanum Solution) เตรียมโดยละลายแลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3) 58.65 กรัม ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 250 มิลลิลิตร โดยค่อยๆ เติมกรดจนกระทั่งแลนทานัมออกไซด์ละลายหมด แล้วเติมน้ำกลั่นจนปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. ขั้นตอนของวิธีใช้เครื่องมือ

เลือกสอลโลวแคทโทดแลมป์ของโลหะที่ต้องการวิเคราะห์ นำไปติดตั้งให้เข้าที่ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือ นั้น แล้วจัดโมโนโครมาเตอร์ให้มีความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร

2. การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับแคลเซียม

2.1. เลือกสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน อย่างน้อย 3 ความเข้มข้น

2.2. เติมสารละลายแลนทานัม 10 มิลลิลิตร ลงในสารละลายมาตรฐาน 100 มิลลิลิตร ก่อนจะทำการวิเคราะห์

2.3. จุ่มหลอดพลาสติกกรุเล็กลงในสารละลายแต่ละความเข้มข้น แล้ววัดค่าแอมป์เซอร์เบนซ์

3. วิธีวิเคราะห์สารตัวอย่าง

3.1. ล้างอะตอมไมเซอร์จนกระทั่งมาตรของระบบอ่านให้ค่าที่คงที่ แล้วจัดเครื่องมือให้อ่านศูนย์ทุกครั้งก่อนที่จะทำการวิเคราะห์สารละลายแต่ละตัวอย่าง รวมทั้งการทำกราฟมาตรฐานจะต้องล้างอะตอมไมเซอร์ก่อน

3.2. จุ่มหลอดพลาสติกกรุเหล็กลงในสารละลายตัวอย่างแล้ววัดค่าแอบซอร์พแบนซ์

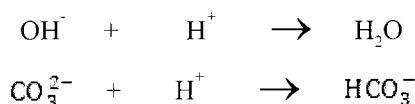
3.3. เมื่อจะหาปริมาณของแคลเซียม ให้ผสมและเจือจางสารละลายตัวอย่างด้วย 100 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายแลนทานัม 10 มิลลิลิตรก่อนจะทำการวิเคราะห์

4. การคำนวณ

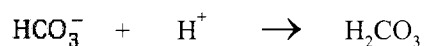
คำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารตัวอย่างโดยคิดเป็น มิลลิกรัม/ลิตร โดยอ่านจากกราฟมาตรฐานที่ถูกต้อง

ข-2 การวิเคราะห์ความเป็นด่าง (Alkalinity) ด้วยการไทเทรต (จรรยา, 2546)

ความเป็นด่างของน้ำ คือ ความสามารถของน้ำที่จะรับโปรตอน สารที่ทำให้เกิดความเป็นด่างของน้ำ ได้แก่ พวกไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) การวิเคราะห์ความเป็นด่างของน้ำ โดยนำมาไทเทรตด้วยกรดที่แตกตัวให้โปรตอนสูง เช่น กรดเกลือ (HCl) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) โดยใช้อินดิเคเตอร์ ซึ่งมีหลายตัวขึ้นอยู่กับช่วงความเป็นด่างของน้ำ เช่น ถ้าตัวอย่างมีค่า pH สูงกว่า 8.3 ใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ เมื่อหยดอินดิเคเตอร์ลงไป จะได้สารละลายสีชมพู ไทเทรตจนกระทั่งสีชมพูหายไป ความเป็นด่างชนิดนี้เกิดจากไฮดรอกไซด์ และบางส่วนของคาร์บอเนต เรียกว่า ฟีนอล์ฟทาลีนอัลคาไลน์นิตี (Phenolphthalein Alkalinity) ปฏิบัติการเกิดขึ้นดังนี้



และจากจุดยุติ (End Point) หลังจากไทเทรตด้วยฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์แล้ว pH ของสารละลายจะประมาณ 4.5 หยดเมทิลออเรนจ์อินดิเคเตอร์ 1-2 หยด จะได้สารละลายสีเหลือง ไทเทรตต่อไปจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีส้ม ความเป็นด่างนี้เกิดจากการไทเทรตด้วยกรดทำให้ไบคาร์บอเนตเปลี่ยนเป็นกรดคาร์บอนิก ดังสมการ



ความเป็นด่างนี้เรียกว่า เมทิลออเรนจ์อัลคาไลน์นิตี (Methyl Orange Alkalinity) ความเป็นด่างทั้งหมดคือ ความเป็นด่างที่เกิดจากไฮดรอกไซด์ (OH^-) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) หาได้จากการนำปริมาตรการไทเทรตทั้งสองจุดมารวมกัน

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปตขนาด 50 มิลลิลิตร
3. บีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
4. บิวเรต และแท่นจับ 1 ชุด

สารเคมี

1. น้ำปราศจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
2. สารละลายกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ เตรียมโดยปีเปตกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 28 มิลลิลิตร ค่อยๆ เติลงในน้ำกลั่น รอให้สารละลายเย็นเจือจางเป็น 1,000 มิลลิลิตร
3. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.01 โมลาร์ เตรียมโดยเจือจางสารละลายกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ 200 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร แล้วเจือจางเป็น 1,000 มิลลิลิตร
4. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์
5. สารละลายเมทิลออเรนจ์อินดิเคเตอร์

วิธีวิเคราะห์

1. ปีเปตสารตัวอย่างตามความเหมาะสม โดยทั่วไปใช้ 50 มิลลิลิตรหรือ 100 มิลลิลิตร
2. หยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ลง 2-3 หยด
3. ถ้าได้สารละลายไม่มีสี นำไปหยดสารละลายเมทิลออเรนจ์ 2-3 หยด ไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 0.01 โมลาร์ จนกระทั่งจุดยุติได้สารละลายสีส้ม (M)
4. ถ้าเติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนแล้วได้สารละลายสีชมพู นำไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 0.01 โมลาร์ จนกระทั่งสีชมพูหายไป จดปริมาตรที่ใช้ไทเทรต (P)
5. นำไปหยดสารละลายเมทิลออเรนจ์ 2-3 หยด จะได้สารละลายสีเหลือง นำไปไทเทรตต่อจนกระทั่งจุดยุติเป็นสีส้ม จดปริมาตรที่ใช้ไทเทรตทั้งหมด (T)

การคำนวณ

$$\text{ความเป็นด่าง} = \frac{\text{มิลลิกรัมของกรดซัลฟูริกที่ใช้}}{\text{มิลลิกรัมตัวอย่างที่ใช้}} \times 100$$

(มิลลิกรัม/ลิตร CO_2)

เราอาจจำแนกค่าความเป็นด่างในรูปแบบต่างๆ ได้ดังนี้

- ถ้าให้
- | | | |
|---|---|------------------------------------|
| P | = | ปริมาตรไทเทรตด้วยฟีนอล์ฟทาลีน |
| M | = | ปริมาตรไทเทรตด้วยเมทิลออเรนจ์ |
| T | = | ปริมาตรไทเทรตรวมทั้งหมดจาก P ถึง M |

$$\begin{aligned}
 1. \text{ ถ้า } P = T, \text{ ความแตกต่าง, OH}^- &= \frac{P \times 100}{\text{มิลลิกรัม ตัวอย่าง}} \\
 2. \text{ ถ้า } P > \frac{1}{2}T, \text{ ความแตกต่าง, OH}^- &= \frac{(2P-T) \times 100}{\text{มิลลิกรัม ตัวอย่าง}} \\
 \text{ความแตกต่าง, CO}_3^{2-} &= \frac{2(T-P) \times 100}{\text{มิลลิกรัม ตัวอย่าง}} \\
 3. \text{ ถ้า } P = \frac{1}{2}T, \text{ ความแตกต่าง, CO}_3^{2-} &= \frac{2P \times 100}{\text{มิลลิกรัม ตัวอย่าง}} \\
 4. \text{ ถ้า } P < \frac{1}{2}T, \text{ ความแตกต่าง, CO}_3^{2-} &= \frac{2P \times 100}{\text{มิลลิกรัม ตัวอย่าง}} \\
 \text{ความแตกต่าง, HCO}_3^- &= \frac{(T-2P) \times 100}{\text{มิลลิกรัม ตัวอย่าง}} \\
 5. \text{ ถ้า } P = 0, \text{ ความแตกต่าง, HCO}_3^- &= \frac{T \times 100}{\text{มิลลิกรัม ตัวอย่าง}}
 \end{aligned}$$

ข-3 การวิเคราะห์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้สำหรับแยกสารผสม ถ้าสารใดเปลี่ยนเป็นแก๊สเฟสยาก ก็อาจใช้เทคนิคอื่นๆ บางอย่างเข้าช่วย เช่น อาศัยปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนให้เป็นอนุพันธ์อื่นๆ หรืออาจใช้หลักการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) เมื่อสารนั้นถูกเปลี่ยนให้อยู่ในแก๊สเฟสแล้ว ให้สารเหล่านั้นผ่านเข้าไปยังคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเฟสคงที่ (Stationary Phase) โดยอาศัยการพาไปของเฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) หรือ Carrier Gas สารผสมเหล่านั้นจะเกิดการแยกขึ้น

ทฤษฎีและกระบวนการแยกสารทางโครมาโทกราฟี

กระบวนการแยกสารทางโครมาโทกราฟี สามารถกำหนดได้ด้วย 2 สถานะ คือ

1. ค่า Partition Coefficient หรือ Distribution Constant (K) ซึ่งแทนด้วย Distribution Isotherms อาจเป็นได้ทั้งแบบเส้นตรง (Linear) หรือไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear)
2. ระบบของโครมาโทกราฟีจะเป็นระบบอุดมคติ (Ideal) หรือไม่เป็นระบบอุดมคติ (Non-ideal) ก็ได้ ถ้าเป็นระบบอุดมคติ แสดงว่าการแลกเปลี่ยนระหว่างเฟส 2 เฟสนั้นเป็น Thermodynamically Reversible และสมดุลระหว่างอนุภาคที่เป็นของแข็ง หรือของแข็งที่มี Liquid Phase ฉาบผิวและแก๊สเฟสจะเข้าสู่สมดุลอย่างรวดเร็ว

รายละเอียดของแต่ละส่วนของเครื่องมือและข้อมูลต่างๆ มีดังนี้

แก๊สพา (Carrier Gas)

เป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสแล้วที่ Injection Port เข้าสู่คอลัมน์ต่อไป แก๊สพานี้จะต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (Flow Rate) ให้คงที่เสมอ โดยอัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

ระบบของการใส่สารตัวอย่าง (Sample Inlet System)

การนำสารเข้าฉีดเข้าสู่คอลัมน์ในเครื่อง GC เพื่อวิเคราะห์นั้นมามีวิธีการที่แตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของสารตัวอย่าง โดยทั่วไป ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างเข้าไป (Inlet) จะมีเครื่องให้ความร้อน (Heater) ประกอบอยู่ด้วยเพื่อทำให้สารตัวอย่างกลายเป็นไอปริมาณของสารตัวอย่างที่ใช้ก็มักจะน้อย

ตัวอย่างที่เป็นแก๊สมักจะฉีดเข้าไปด้วย Gas-tight Syringe แต่วิธีที่ดีที่สุดใช้ Gas Sampling Valve

คอลัมน์ (Column)

คอลัมน์ถือเป็นหัวใจของการแยกสารด้วยเทคนิค GC เมื่อแก๊สผสมหรือไอของสารที่ปนกันอยู่ในสารตัวอย่าง ผ่านคอลัมน์สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่าจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอผสมเหล่านั้นออกเป็นส่วนๆ ดังนั้น โครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่ดีจึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์มาก

เครื่องดีเทคเตอร์ (Detector)

เป็นเครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ดังนั้น ดีเทคเตอร์ที่ดีจะต้องมีลักษณะเฉพาะสามารถให้สัญญาณกับสารต่างๆ ได้ ให้สภาพไวที่สูง มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิด โดยดีเทคเตอร์ที่พบเห็นและใช้กันมากในปัจจุบัน ได้แก่

Thermal Conductivity Detector (TCD) เป็นดีเทคเตอร์ที่มีราคาถูก ทำได้ง่าย และใช้ได้กว้างขวาง หลักการขึ้นอยู่กับพื้นฐานที่ว่าวัตถุที่ร้อนจะมีการเสียความร้อนไปด้วยอัตราเร็วมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแก๊สที่อยู่รอบๆ

Flame Ionization Detector (FID) เป็นดีเทคเตอร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการตรวจสอบหาสารประกอบอินทรีย์

Electron Capture Detector (ECD) เป็นดีเทคเตอร์ที่ดีสำหรับตรวจวัดสารประกอบที่มีแอโรเจนอะตอมเป็นองค์ประกอบ เช่น ยาฆ่าแมลง ยาปราบวัชพืช เป็นต้น ซึ่งจับอิเล็กตรอนได้ดี

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี

1. การวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วย GC (Qualitative Analysis) มีดังนี้

- Retention Data เป็นที่ทราบกันว่า Retention Volume หรือ Retention Time นั้นเป็นลักษณะเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด โดยขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของแก๊สพาและอุณหภูมิของคอลัมน์นั้น ดังนั้น เมื่อให้สภาวะทั้งหลายมีค่าคงที่ ค่า Retention Time ของสารต่างๆ ที่ใช้วิเคราะห์ควรจะตรงกันหรือมีค่าใกล้เคียงที่สุด

- ใช้วิธีการอ่านจากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Retention Time กับ จำนวนอะตอมของคาร์บอนของสารที่อยู่ในพวกเดียวกัน (Homologous Series)
- ใช้ดัชนี Kovats (Kovats Index) Wehrli และ Kovats เป็นผู้นำหลักการของ Retention Index มาใช้เพื่อช่วยเพื่อพิสูจน์โครงสร้างของโมเลกุลสารอินทรีย์ โดยใช้ n-alkane เป็น สารมาตรฐาน
- การใช้คอลัมน์หลายชนิด (Multiple Column) การใช้คอลัมน์ 2 ชนิดหรือมากกว่า จะช่วยให้การตรวจพิสูจน์สารตัวอย่างมีความถูกต้องและมั่นใจยิ่งขึ้น

2. การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วย GC (Quantitative Analysis)

- Normalization Method การหา Area Normalization สามารถทำได้โดยการ กำหนดพื้นที่ของแต่ละพีคแล้วนำมารวมกันเป็น %Area Normalization
- External Standardization Method โครมาโทแกรมที่ได้นำไปหาพื้นที่พีคหรือ ความสูงของพีค แล้วนำไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่พีคหรือความสูงของพีคกับ ความเข้มข้นจะได้ Calibration Curve สำหรับหาปริมาณของสารตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นการวิเคราะห์ สารเดียวหรือหลายสารก็ได้
- Internal Standardization Method เป็นเทคนิคที่ใช้หาปริมาณของสารได้ ถูกต้องที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเลือกใช้ Internal Standard

วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างแก๊สเสีย

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (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

การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดคาร์บอนไดออกไซด์ (% CO₂ Removal Efficiency)

เมื่อทราบความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์บรรจุก็จะสามารถหาประสิทธิภาพในการบำบัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของคอลัมน์ได้ โดยประสิทธิภาพการบำบัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\text{Carbon dioxide removal efficiency (\%)} = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

C_1 = ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้า (ร้อยละโดยปริมาตร)

C_2 = ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออก (ร้อยละโดยปริมาตร)

ข-4 การวิเคราะห์เอกซ์-เรย์ สเปกโทรสโกปี (X-ray Spectroscopy) (แมน, 2552)

เอกซ์-เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรสโกปี (X-ray Fluorescence Spectroscopy, XRFS)

การเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสารนั้นก่อให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น เกิดการเปล่งแสงบางชนิด (Emission) การดูดกลืน (Absorption) การกระเจิง (Scattering) หรือการเลี้ยวเบน (Diffraction) เป็นต้น ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นลักษณะเฉพาะ (Characteristic) ของแต่ละสารที่เราสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ทางเคมีได้ คือ

1. ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในสาร (Elemental Analysis) ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ
2. ใช้ศึกษาหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Structure) ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมี (Chemical Bonding)
3. ใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (Crystal Structure) หรือโมเลกุลของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)

ลักษณะและองค์ประกอบของเครื่อง XRFS ชนิด Energy Dispersive System

เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ประกอบด้วยหลายส่วนคือ

- แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray Generator)
- หัววัดซึ่งเป็น Si (Li) หรือ Ge (Li)
- คีเทคเตอร์
- ระบบ Cooling ซึ่งเป็นไนโตรเจนเหลวเพื่อทำให้คีเทคเตอร์เย็น
- Preamplifier หรือ Amplifier ซึ่งจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้ใหญ่พอที่จะวัดได้ถูกต้อง
- Multichannel Analyzer ทำหน้าที่เก็บรวบรวมสัญญาณที่ได้จากคีเทคเตอร์ โดยมีการแยกขนาดของพลังงาน โดยที่พลังงานต่ำจะอยู่ในช่องต้นๆ แต่ถ้าพลังงานสูงขึ้นก็จะถูกเก็บไว้ในช่องที่สูงขึ้น
- Data System ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์และ Software เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องเก็บข้อมูลต่างๆ และผลการวิเคราะห์

การเตรียมสารตัวอย่าง

เนื่องจากเทคนิคทาง XRFS เป็นการเปรียบเทียบสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน ดังนั้น สภาวะต่างๆ ที่ใช้เปรียบเทียบจะต้องเหมือนกัน เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำ อย่างไรก็ตาม

ก็ตาม วิธีที่ใช้เตรียมสารตัวอย่างนั้นควรจะต้องทำได้รวดเร็ว ราคาถูก ไม่ทำให้สารตัวอย่างมีการปนเปื้อน หลักการทั่วไป สารตัวอย่างสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 พวกใหญ่ๆ คือ

1. สารตัวอย่างที่สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยตรง หรืออาจใช้วิธีเตรียมง่ายๆ เช่น นำไปอัดแผ่นหรือขจัดผิวได้เลย ได้แก่ สารตัวอย่างที่เข้ากันเป็นเนื้อเดียว อาจเป็นผง ก้อน โลหะ หรือของเหลว

2. สารตัวอย่างที่ต้องมีการเตรียมพอสมควร เช่น สารตัวอย่างที่มีเนื้อไม่เข้ากัน ต้องทำให้เจือจางเพื่อลดผลของเมทริกซ์

3. สารตัวอย่างที่ต้องเตรียมเป็นพิเศษ เช่น สารที่มีปริมาณจำกัด ต้องการเพิ่มความเข้มข้น ทำให้บริสุทธิ์ก่อนด้วยการแยก หรือสารตัวอย่างที่เป็นสารกัมมันตรังสี เป็นต้น

เทคนิคการวิเคราะห์

1. การทำคุณภาพวิเคราะห์ (Quantitative Analysis)

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากสารตัวอย่างจะเป็นสเปกตรัมที่แตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของธาตุ จากนั้นทำการหาว่าพีคแต่ละพีคนั้นมีพลังงานเท่าใด หรือมีความยาวคลื่นเท่าใด แต่ทั้งนี้จะต้องดูว่าการวิเคราะห์นั้นใช้ Analyzing Crystal เป็นอะไร ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของสารตัวอย่างนั้นเป็นวิธีที่นิยม เพราะทำได้ง่าย รวดเร็ว คือใช้ XRFS ชนิด Energy Dispersive System

2. การทำปริมาณวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRFS

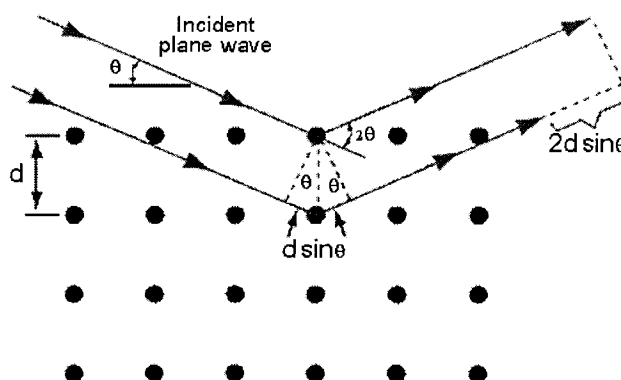
การวิเคราะห์สามารถทำได้โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ที่ได้จากสารตัวอย่าง กับความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ที่ได้จากสารมาตรฐาน การวัดความเข้มข้นของรังสีขึ้นอยู่กับความเข้มข้น หรือปริมาณของธาตุที่วิเคราะห์ และขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

ข-5 เอกซ์-เรย์ ดิฟแฟรคชัน สเปกโทรสโกปี (X-ray Diffraction Spectroscopy, XRDS)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ กัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง

หลักการและวิธีการวิเคราะห์

วัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ดังแสดงในภาพประกอบที่ ข.1 ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผลึก



ภาพประกอบที่ ข.1 การตกกระทบของรังสีตามกฎของ Bragg

ที่มา: www.kmitl.ac.th (สืบค้นเมื่อ 20 เมษายน 2555)

ในปี ค.ศ.1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดว่าเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ Theta (θ) รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ ดังภาพประกอบที่ ข.1 ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆถูกเสนอในรูปแบบสมการ

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

ภาคผนวก ค
ผลการทดลอง

ก-1 ผลการทดลองการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันด้วยสารละลายชนิดกรดอะซิติก และน้ำปราศจากไอออน

ตารางที่ ก-1.1 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันครั้งที่ 1 โดยใช้ความเข้มข้นของ กรดอะซิติก 0 โมลาร์ (น้ำปราศจากไอออน) อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียม ไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
0	5.88	140	0.0014	0.20
1	11.54	359	0.0036	0.50
2	11.60	430	0.0043	0.61
5	11.61	455	0.0045	0.64
10	11.62	554	0.0055	0.78
20	11.61	662	0.0066	0.93
40	11.70	690	0.0069	0.97
60	11.72	775	0.0078	1.09
90	11.71	830	0.0083	1.17
120	11.74	879	0.0088	1.24

ตารางที่ ค-1.2 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตกรันครั้งที่ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 2 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 8 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาท)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณ แคลเซียมไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
0	2.12	175	0.001	0.20
1	3.75	6850	0.055	7.72
2	3.79	7595	0.061	8.56
5	3.82	7750	0.062	8.73
10	3.83	7690	0.062	8.66
20	3.87	8185	0.065	9.22
40	3.90	8460	0.068	9.53
60	3.92	8695	0.070	9.80
90	3.94	9520	0.076	10.73
120	3.97	9610	0.077	10.83

ตารางที่ ค-1.3 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันครั้งที่ 3 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 2 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 8 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียม ไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
0	1.99	160	0.00	0.18
1	3.70	6080	0.05	6.85
2	3.77	6535	0.05	7.36
5	3.81	7500	0.06	8.45
10	3.87	8325	0.07	9.38
20	3.94	9605	0.08	10.82
40	4.02	10300	0.08	11.61
60	4.05	10570	0.08	11.91
90	4.07	11400	0.09	12.85
120	4.09	12140	0.10	13.68

ตารางที่ ค-1.4 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากขี้ตะกรันครั้งที่ 4 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 2 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 15 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียม ไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
0	2.26	165	0.00	0.35
1	3.41	3780	0.06	7.99
2	3.44	4211	0.06	8.90
5	3.46	4365	0.07	9.22
10	3.49	4583	0.07	9.68
20	3.53	4598	0.07	9.71
40	3.57	4740	0.07	10.01
60	3.59	5051	0.08	10.67
90	3.60	5456	0.08	11.53
120	3.61	6713	0.10	14.18

ตารางที่ ค-1.5 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะแกรนครั้งที่ 5 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 2 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 15 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียม ไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
0	2.29	168	0.00	0.35
1	3.46	4159	0.06	8.79
2	3.50	4324	0.06	9.13
5	3.52	4474	0.07	9.45
10	3.55	4560	0.07	9.63
20	3.60	4755	0.07	10.05
40	3.63	5434	0.08	11.48
60	3.68	6998	0.10	14.78
90	3.72	7193	0.11	15.20
120	3.72	7429	0.11	15.69

ตารางที่ ค-1.6 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันครั้งที่ 6 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 5 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียม ไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
0	1.79	163	0.00	0.11
1	3.87	13345	0.07	9.40
2	3.96	21315	0.11	15.01
5	4.03	23855	0.12	16.80
10	4.18	23915	0.12	16.84
20	4.23	23935	0.12	16.86
40	4.33	23975	0.12	16.88
60	4.40	26245	0.13	18.48
90	4.26	26270	0.13	18.50
120	4.50	26800	0.13	18.87

ตารางที่ ค-1.7 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันครั้งที่ 7 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาทีก)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียม ไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
0	1.83	147	0.00	0.21
1	3.52	13285	0.13	18.71
2	3.55	13895	0.14	19.57
5	3.58	14260	0.14	20.08
10	3.63	15120	0.15	21.30
20	3.67	15950	0.16	22.46
40	3.71	15295	0.15	21.54
60	3.72	15460	0.15	21.77
90	3.73	15950	0.16	22.46
120	3.75	15950	0.16	22.46

ตารางที่ ก-1.8 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันครั้งที่ 8 โดยใช้ความเข้มข้นของ กรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียม ไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
0	1.82	134	0.00	0.19
1	3.42	16580	0.17	23.35
2	3.49	18465	0.18	26.01
5	3.55	18285	0.18	25.75
10	3.60	19135	0.19	26.95
20	3.66	20700	0.21	29.15
40	3.71	20150	0.20	28.38
60	3.78	21940	0.22	30.90
90	3.80	22410	0.22	31.56
120	3.83	23025	0.23	32.43

ตารางที่ ค-1.9 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันครั้งที่ 9 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณ แคลเซียม ไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
0	1.83	255	0.00	0.36
1	3.52	16515	0.17	23.26
2	3.58	18275	0.18	25.74
5	3.61	18285	0.18	25.75
10	3.64	18735	0.19	26.39
20	3.70	20010	0.20	28.18
40	3.74	21585	0.22	30.40
60	3.78	22270	0.22	31.37
90	3.80	22640	0.23	31.89
120	3.83	22560	0.23	31.77

ตารางที่ ค-1.10 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันครั้งที่ 10 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ปริมาณ แคลเซียม ไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
0	1.89	198	0.00	0.28
1	3.46	16765	0.17	23.61
2	3.56	16685	0.17	23.50
5	3.60	20870	0.21	29.39
10	3.65	20265	0.20	28.54
20	3.68	20420	0.20	28.76
40	3.75	21700	0.22	30.56
60	3.81	21475	0.21	30.25
90	3.82	23205	0.23	32.68
120	3.84	22340	0.22	31.46

ตารางที่ ค-1.11 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันครั้งที่ 11 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของสารละลาย	ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียมไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการชะละลาย (%)
0	1.88	129	0.00	0.18
1	3.56	13535	0.14	19.06
2	3.61	15115	0.15	21.29
5	3.66	15970	0.16	22.49
10	3.74	16815	0.17	23.68
20	3.81	17600	0.18	24.79
40	3.86	18635	0.19	26.25
60	3.89	20135	0.20	28.36
90	3.92	21830	0.22	30.75
120	3.95	23795	0.24	33.51

ตารางที่ ค-1.12 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันครั้งที่ 12 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 20 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของสารละลาย	ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียมไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการชะละลาย (%)
0	1.93	220	0.00	0.62
1	3.22	6350	0.13	17.89
2	3.26	7105	0.14	20.01
5	3.28	7850	0.16	22.11
10	3.33	8670	0.17	24.42
20	3.34	8895	0.18	25.06
40	3.40	9545	0.19	26.89
60	3.41	9835	0.20	27.70
90	3.43	10740	0.21	30.25
120	3.44	11165	0.22	31.45

ตารางที่ ค-1.13 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากจีตะกรันครั้งที่ 13 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 6 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 8 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของสารละลาย	ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียมไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการชะละลาย (%)
0	1.46	98	0.00	0.11
1	3.54	18024	0.14	20.31
2	3.58	19434	0.16	21.90
5	3.64	21138	0.17	23.82
10	3.67	21216	0.17	23.91
20	3.75	21516	0.17	24.24
40	3.83	21594	0.17	24.33
60	3.87	22338	0.18	25.17
90	3.90	22896	0.18	25.80
120	3.91	23286	0.19	26.24

ตารางที่ ก-1.14 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันครั้งที่ 14 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 6 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 8 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของสารละลาย	ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียมไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการชะละลาย (%)
0	1.52	194	0.00	0.22
1	3.61	18234	0.15	20.55
2	3.69	20484	0.16	23.08
5	3.74	21684	0.17	24.43
10	3.81	22290	0.18	25.12
20	3.86	24954	0.20	28.12
40	3.96	25158	0.20	28.35
60	4.00	25098	0.20	28.28
90	4.03	25314	0.20	28.52
120	4.07	31560	0.25	35.56

ตารางที่ ก-1.15 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากจีตะกรันครั้งที่ 15 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 6 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 15 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของสารละลาย	ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียมไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการชะละลาย (%)
0	1.56	168	0.00	0.35
1	3.17	8760	0.13	18.51
2	3.26	9132	0.14	19.29
5	3.29	9432	0.14	19.93
10	3.33	9660	0.14	20.41
20	3.37	10626	0.16	22.45
40	3.41	11808	0.18	24.95
60	3.44	12936	0.19	27.33
90	3.47	13176	0.20	27.84
120	3.49	13194	0.20	27.87

ตารางที่ ก-1.16 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันครั้งที่ 16 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 6 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 15 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ปริมาณ แคลเซียม ไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
0	1.48	126	0.00	0.27
1	3.35	9942	0.15	21.00
2	3.37	9246	0.14	19.53
5	3.40	11046	0.17	23.34
10	3.45	12606	0.19	26.63
20	3.49	12306	0.18	26.00
40	3.55	13032	0.20	27.53
60	3.58	14250	0.21	30.11
90	3.60	14274	0.21	30.16
120	3.62	15930	0.24	33.65

ตารางที่ ค-1.17 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันครั้งที่ 17 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติค 8 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของสารละลาย	ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียมไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการชะละลาย (%)
0	1.37	80	0.00	0.11
1	3.17	10725	0.11	15.11
2	3.23	11547	0.12	16.26
5	3.66	15675	0.16	22.08
10	3.74	18108	0.18	25.50
20	3.92	19662	0.20	27.69
40	4.13	23760	0.24	33.46
60	4.18	24657	0.25	34.73
90	4.20	23613	0.24	33.26
120	4.22	23661	0.24	33.33

ตารางที่ ก-1.18 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันครั้งที่ 18 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 15 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ปริมาณ แคลเซียม ไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
0	1.86	137	0.00	0.29
1	3.58	14692	0.22	31.04
2	3.60	14895	0.22	31.47
5	3.62	15290	0.23	32.30
10	3.65	15120	0.23	31.94
20	3.69	16428	0.25	34.71
40	3.75	16595	0.25	35.06
60	3.78	17296	0.26	36.54
90	3.78	17982	0.27	37.99
120	3.80	18574	0.28	39.24

ตารางที่ ก-1.19 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากจีตะกรันครั้งที่ 19 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 2 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของสารละลาย	ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียมไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการชะละลาย (%)
0	2.22	171	0.00	0.24
1	3.52	2892	0.03	4.07
2	3.55	3084	0.03	4.34
5	3.67	4446	0.04	6.26
10	3.75	4872	0.05	6.86
20	3.81	5787	0.06	8.15
40	3.91	8160	0.08	11.49
60	3.99	8760	0.09	12.34
90	4.02	16737	0.17	23.57
120	4.03	17304	0.17	24.37

ตารางที่ ก-1.20 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันครั้งที่ 20 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของสารละลาย	ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียมไอออน (กรัม)	ประสิทธิภาพการชะละลาย (%)
0	1.81	153	0.00	0.21
1	3.17	4725	0.05	6.65
2	3.23	5547	0.06	7.81
5	3.66	15675	0.16	22.08
10	3.74	18108	0.18	25.50
20	3.92	19662	0.20	27.69
40	4.13	23760	0.24	33.46
60	4.18	24657	0.25	34.73
90	4.22	24613	0.25	34.67
120	4.26	24661	0.25	34.73

ก-2 ผลการทดลองการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากการชะละลายซีตะกรันในคอลัมน์บรรจุ

ตารางที่ ก-2.1 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.48	0
5	3.73	75.90
10	3.63	76.56
15	3.91	74.74
ค่าเฉลี่ย		75.74

ตารางที่ ก-2.2 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.42 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.47	0
5	5.95	61.53
10	5.92	61.70
15	5.97	61.42
ค่าเฉลี่ย		61.54

ตารางที่ ก-2.3 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.78 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริก 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.34	0
5	2.71	82.36
10	2.54	83.42
15	2.49	83.75
ค่าเฉลี่ย		83.18

ตารางที่ ก-2.4 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.9 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริก 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.94	0
5	0.32	97.96
10	0.32	98.02
15	0.31	98.07
ค่าเฉลี่ย		98.01

ตารางที่ ก-2.5 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.25 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	14.82	0
5	0.50	96.60
10	0.50	96.66
15	0.50	96.66
ค่าเฉลี่ย		96.64

ตารางที่ ก-2.6 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.78 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.37 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 362 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.83	0
5	1.76	88.89
10	1.87	88.19
15	1.91	87.92
ค่าเฉลี่ย		88.33

ตารางที่ ค-2.7 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.78 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.37 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.39	0
5	0.65	95.78
10	0.67	95.62
15	0.67	95.67
ค่าเฉลี่ย		95.69

ตารางที่ ค-2.8 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.60	0
5	3.48	77.67
10	3.50	77.56
15	3.44	77.94
ค่าเฉลี่ย		77.72

ตารางที่ ค-2.9 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรีน 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	16.10	0
5	3.12	80.59
10	3.20	80.12
15	2.83	82.45
ค่าเฉลี่ย		81.05

ตารางที่ ค-2.10 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรีน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.83	0
5	3.66	76.86
10	3.84	75.73
15	3.68	76.75
ค่าเฉลี่ย		76.45

ตารางที่ ค-2.11 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.42 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.37 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.13	0
5	1.93	87.44
10	1.03	93.30
15	1.09	92.91
ค่าเฉลี่ย		91.22

ตารางที่ ค-2.12 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.78 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 362 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.30	0
5	7.47	51.17
10	7.55	50.67
15	7.43	51.45
ค่าเฉลี่ย		51.10

ตารางที่ ก-2.13 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.25	0
5	10.23	32.92
10	10.09	33.82
15	10.09	33.82
ค่าเฉลี่ย		33.50

ตารางที่ ก-2.14 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	14.75	0
5	7.03	54.02
10	7.23	52.73
15	7.19	53.01
ค่าเฉลี่ย		53.26

ตารางที่ ก-2.15 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.42 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 362 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.73	0
5	11.15	29.14
10	11.09	29.52
15	11.14	29.19
ค่าเฉลี่ย		29.29

ตารางที่ ก-2.16 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.94	0
5	4.04	74.67
10	4.05	74.61
15	3.65	77.08
ค่าเฉลี่ย		75.45

ตารางที่ ค-2.17 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.42 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริก 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.07	0
5	5.35	64.48
10	5.19	65.55
15	5.22	65.33
ค่าเฉลี่ย		65.12

ตารางที่ ค-2.18 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.3 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริก 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.89	0
5	7.31	54.00
10	7.32	53.95
15	7.33	53.84
ค่าเฉลี่ย		53.93

ตารางที่ ก-2.19 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.85 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.34	0
5	9.06	40.96
10	9.10	40.68
15	8.92	41.85
ค่าเฉลี่ย		41.16

ตารางที่ ก-2.20 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละโดยปริมาตร	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.26	0
5	3.32	78.07
10	3.42	77.40
15	3.34	77.96
ค่าเฉลี่ย		77.81

ตารางที่ ค-2.21 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพในกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตามภาวะที่เหมาะสม ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.77 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.25 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีเมนต์ 725 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละโดยปริมาตร)	ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0	15.71	
2	0.98	93.75
5	1.14	92.78
10	3.91	75.12
15	7.32	53.39
20	8.39	46.61
30	9.46	39.82
40	10.48	33.30
60	11.33	27.92
90	11.70	25.53
120	11.69	25.64

ตารางที่ ค-2.22 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.58	612.89
5	6.45	474.49
10	6.46	474.51
15	6.44	474.47
ค่าเฉลี่ย	6.45	474.49

ตารางที่ ค-2.23 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.42 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.70	850.35
5	6.54	674.58
10	6.56	674.59
15	6.55	674.62
ค่าเฉลี่ย	6.55	674.60

ตารางที่ ค-2.24 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.78 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.97	821.80
5	7.54	681.13
10	7.55	681.08
15	7.56	681.11
ค่าเฉลี่ย	7.55	681.11

ตารางที่ ค-2.25 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.9 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.74	632.29
5	8.77	440.76
10	8.78	440.79
15	8.78	440.77
ค่าเฉลี่ย	8.78	440.77

ตารางที่ ค-2.26 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.25 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.70	627.13
5	7.17	467.19
10	7.19	467.24
15	7.18	467.19
ค่าเฉลี่ย	7.18	467.21

ตารางที่ ค-2.27 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.78 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.37 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 362 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.33	382.89
5	7.55	209.04
10	7.57	209.00
15	7.53	208.03
ค่าเฉลี่ย	7.55	209.02

ตารางที่ ค-2.28 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.78 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.37 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.93	885.04
5	7.81	693.72
10	7.82	693.75
15	7.82	693.70
ค่าเฉลี่ย	7.82	693.72

ตารางที่ ค-2.29 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.42 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.37 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 362 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.32	350.02
5	7.49	148.26
10	7.48	148.27
15	7.48	148.25
ค่าเฉลี่ย	7.48	148.26

ตารางที่ ค-2.30 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	11.32	1129.6
5	7.73	879.06
10	7.72	879.05
15	7.72	879.03
ค่าเฉลี่ย	7.72	879.05

ตารางที่ ค-2.31 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.62	603.80
5	6.74	423.68
10	6.72	423.71
15	6.71	423.75
ค่าเฉลี่ย	6.72	423.71

ตารางที่ ค-2.32 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.42 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.37 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.70	845.68
5	7.72	630.51
10	7.71	630.51
15	7.73	630.54
ค่าเฉลี่ย	7.72	630.52

ตารางที่ ค-2.33 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.78 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 362 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.08	369.67
5	7.27	216.09
10	7.27	216.11
15	7.29	216.10
ค่าเฉลี่ย	7.28	216.10

ตารางที่ ก-2.34 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตริก 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.03	198.31
5	6.69	108.93
10	6.70	108.95
15	6.67	108.91
ค่าเฉลี่ย	6.69	108.93

ตารางที่ ก-2.35 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตริก 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.57	625.79
5	6.02	473.75
10	5.99	473.71
15	6.01	473.77
ค่าเฉลี่ย	6.00	473.74

ตารางที่ ค-2.36 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.42 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 362 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.03	309.26
5	6.64	237.42
10	6.64	237.44
15	6.65	237.40
ค่าเฉลี่ย	6.64	237.42

ตารางที่ ค-2.37 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.52	600.53
5	6.43	418.54
10	6.43	418.55
15	6.44	418.56
ค่าเฉลี่ย	6.43	418.55

ตารางที่ ค-2.38 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.42 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.56	642.36
5	6.16	351.17
10	6.15	351.21
15	6.16	351.19
ค่าเฉลี่ย	6.16	351.19

ตารางที่ ค-2.39 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.3 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.01	584.21
5	6.67	431.74
10	6.67	431.76
15	6.65	431.78
ค่าเฉลี่ย	6.66	431.76

ตารางที่ ก-2.40 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊ส 0.85 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายที่ตะกอน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	10.53	590.23
5	6.03	432.76
10	6.07	432.79
15	6.06	432.84
ค่าเฉลี่ย	6.05	432.80

ตารางที่ ก-2.41 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายที่ตะกอน 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

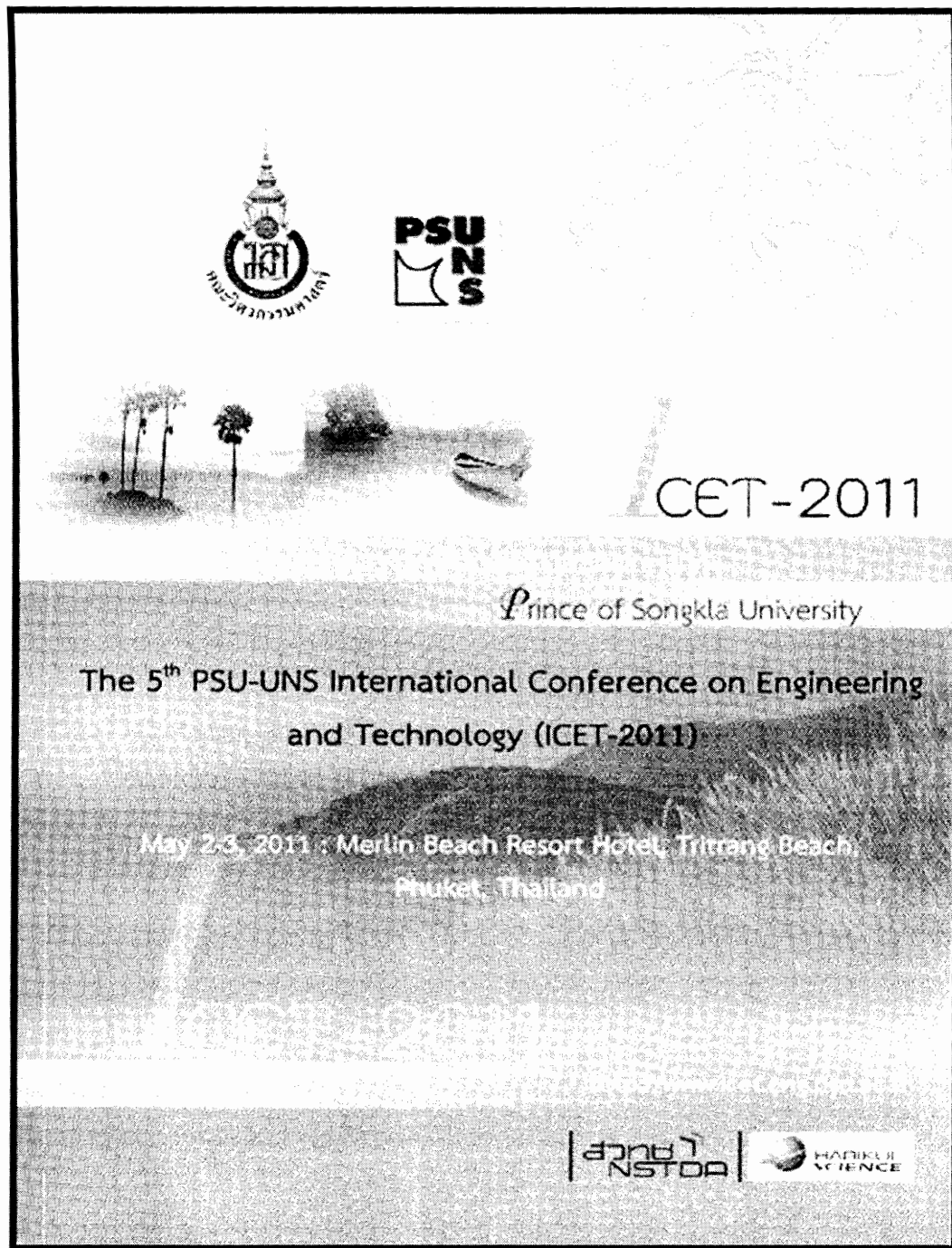
เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	11.02	879.84
5	7.40	579.00
10	7.37	579.04
15	7.39	579.03
ค่าเฉลี่ย	7.39	579.02

ตารางที่ ก-2.42 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตามภาวะที่เหมาะสม ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.77 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.25 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายที่ตะกอน 725 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นสารละลาย แคลเซียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	11.3	747.5
2	6.48	475.89
5	6.45	465.95
10	6.4	447
15	6.44	440.45
20	6.38	435.15
30	6.36	432.95
40	6.32	430.95
60	6.31	430.05
90	6.29	428.5
120	6.31	428

ภาคผนวก ง
การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

หัวข้อเรื่อง OPTIMIZATION OF Ca^{2+} LEACHING FROM STEELMAKING SLAGS USING ACETIC ACID FOR MINERAL CO_2 SEQUESTRATION





The 5th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2011), Phuket, May 2-3, 2011
 Prince of Songkla University, Faculty of Engineering
 Hat Yai, Songkhla, Thailand 90112

OPTIMIZATION OF Ca²⁺ LEACHING FROM STEELMAKING SLAGS USING ACETIC ACID FOR MINERAL CO₂ SEQUESTRATION

Sudarat Tinchana¹, Juntima Chungsiriporn¹, Charun Bunyakan^{1*}

¹Prince 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 (CO₂) sequestration using steelmaking slag via carbonation reaction comprises of two steps. First, the calcium ions (Ca²⁺) from the slag particles were extracted into an acid solution. Second, the chemical absorption of CO₂ by Ca²⁺ solution to form a solid particle of calcium carbonate (CaCO₃), where the CO₂ was sequestered. This studies aim to investigate the optimal condition for Ca²⁺ extraction from steelmaking slag by using acetic acid solution. The response surface methodology (RSM) was used to optimize the concentration of Ca²⁺. 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 Ca²⁺ concentration of 35226 ppm

Key Words: CaCO₃/ Carbonation/ CO₂/ 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 (CO₂) in the atmosphere [2]. Carbon dioxide mineral sequestration is a technology that can reduce CO₂ emissions to the atmosphere for long-term storage of CO₂ [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 CO₂ and transform to calcium carbonate (CaCO₃) owing to their high contents of calcium (Ca²⁺) as in a form of calcium oxide (CaO) [5]. Thus, the extraction of Ca²⁺ 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 Ca²⁺ which the main objective was to determine the optimum condition for Ca²⁺ 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 μm. 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 Ca²⁺ 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 (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 Ca²⁺ 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 Ca²⁺ leaching experiments. Three independent variables, namely acetic acid concentration (X₁, M), liquid/solid mass ratio (X₂, g/g) and temperature (X₃, °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; x₀ was the actual value of the x_i on the center point; and Δx_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 (Ca²⁺). A₀ is intercept term. A_i, A_{ij}, and A_{ii} are, respectively the measures of the effects of variables X_i, X_iX_j, and X_i². The variable X_iX_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 (Ca₃Mg(SiO₄)₂), gehlenite (Ca₂Al₂SiO₇), and calcium strontium manganese oxide ((Ca_{0.6}Sr_{0.4})MnO₃). This composition characteristic make them suitable candidates for the industrial sequestration of CO₂ [6].

4.2 Optimize leaching condition

The concentrations of Ca²⁺ at various leaching conditions are listed in Table 2. From this table, the optimum conditions for Ca²⁺ leaching were liquid/solid ratio of 5:1, acetic acid concentration of 7.3 M, and temperature 70 °C which gave a maximum Ca²⁺ concentration of 35226 ppm. The application of response surface methodology yielded an empirical model that expressed the relationship between the Ca²⁺ concentration and investigated leaching parameters as given by Eq. (3).

$$Y = 11165.3X_1 + 187.16X_2 - 679.88X_1^2 - 244.39X_1X_2 - 14230.7 \quad (3)$$

The value of the determination coefficient (R²) and adjusted value of the determination coefficient (Adjusted R²) 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 Ca²⁺ 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_3 (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

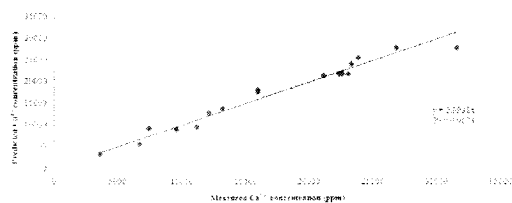


Fig. 1. Plot of predicted and measured Ca^{2+} concentration

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_3	187.16	4.261	0.00110
X_1^2	-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.

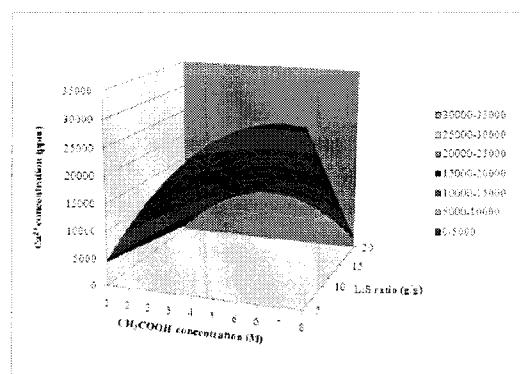


Fig. 2. Response surface plot showing the effect on acetic acid concentration, liquid/solid mass ratio and their mutual effect on the production of Ca^{2+}

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.

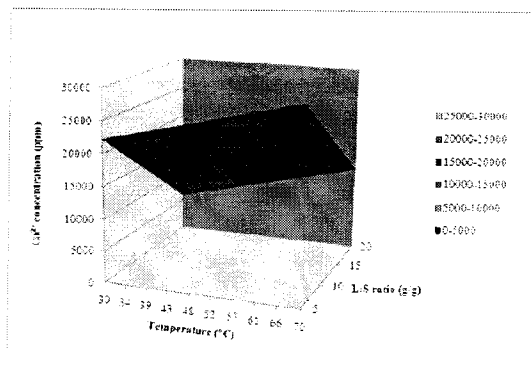


Fig. 3. Response surface plot showing the effect on temperature, liquid/solid mass ratio and their mutual effect on the production of Ca^{2+}

5. CONCLUSIONS

The leaching of Ca^{2+} from steelmaking slag using acetic acid solution was investigated. The optimum conditions for leaching of Ca^{2+} were determined using a statistical response surface methodology (RSM). From the equation of response variables, the acetic acid concentration has the most significant effect on the concentrations of Ca^{2+} . The optimum conditions for leaching of 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 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. "CO₂ Sequestration Potential of Steel Slags at Ambient Pressure and Temperature". *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2008, Vol. 47, pp. 7610–6.
- [2] V. Prigiobbe, A. Polettini, and R. Baciocchi. "Gas Solid Carbonation Kinetics of Air Pollution Control Residues for CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂-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. Brandstetr, 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 CO₂ Sequestration by Steel Slag Carbonation". *Environ. Sci. Technol.*, 2005, Vol. 39, pp. 9676-82.

หัวข้อเรื่อง Leaching of Steelmaking Slag using Acetic Acid Solution and Deionized Water
for CO₂ 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 CO₂ Sequestration

Sudarat Tinchana¹, Juntima Chungsiripom¹, Charun Bunyakan^{1*}

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,

Hat Yai, Songkhla 90112

E-mail: charun.b@psu.ac.th *

Abstract

CO₂ mineral sequestration is an important technology for reducing greenhouse gas emissions. The steelmaking slag was interested for CO₂ 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 CO₂ sequestration was also investigated and reported in this work.

Keywords: Leaching, Precipitation, Steelmaking Slag

1. Introduction

The increasing CO₂ 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 CO₂ sequestration by mineral carbonation. Sequestering carbon dioxide in synthesized carbonates is a long-term solution to global warming that will keep CO₂ 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 Ca²⁺ [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 CO₂ 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 CO₂ to

calcium carbonate (CaCO₃), due to their high contents of calcium (Ca²⁺) in the form of calcium oxide (CaO). So, the leaching of Ca²⁺ from slag is an important step for CO₂ sequestration via carbonation process [5]. This research focuses on method of CO₂ sequestration: permanent CO₂ fixation as environmentally benign carbonate minerals. In this case, the steelmaking slag was used as a precursor for Ca²⁺ and the main objective was to determine the optimum condition for Ca²⁺ 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 Ca²⁺ 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 CO₂ removal efficiency

The CO₂ 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.

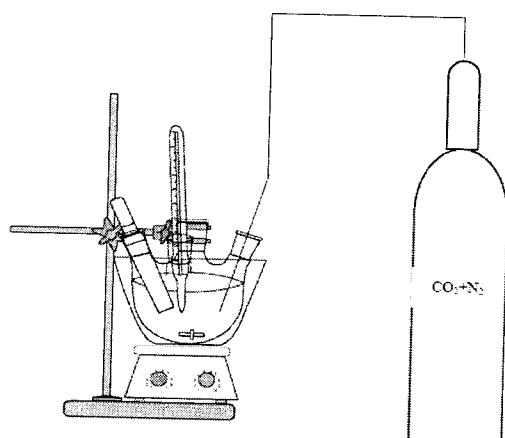


Figure 1. A schematic of laboratory CO₂ absorption reactor

From figure 1, the gas mixture containing 15.0 vol % CO₂ and 85.0 vol % N₂ was fed to 1 L of steelmaking slag leachate in absorption reactor at a flow rate of 0.73 l/min. The CO₂ concentrations at the inlet and outlet of reactor were measured. The CO₂ removal efficiency (CO₂ RE) was determined from the inlet (C_m) and outlet (C_{out}) CO₂ concentration according to equation (1).

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

Where C_m = inlet CO₂ concentration (ppm)
C_{out} = outlet CO₂ concentration (ppm)
CO₂ RE = CO₂ 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 (Ca²⁺) in the leaching solution is measured by using Atomic Absorption Spectrometry (AAS) (AAAnalyst 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 (Ca₃Mg(SiO₄)₂), and gehlenite (Ca₂Al₂SiO₇). This composition characteristic make them suitable candidates for the industrial sequestration of CO₂ [6]. The extraction of Ca²⁺ 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 (Ca₃Mg(SiO₄)₂) 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.

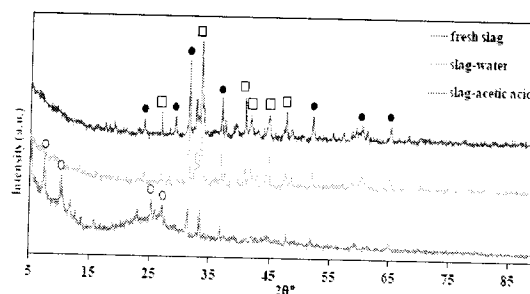


Figure 2. XRD patterns of the steelmaking slag used in the experiment: □ Tricalcium magnesium orthosilicate (Ca₃Mg(SiO₄)₂), ● gehlenite, and ○ calcium acetate hydrate

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 ₂ O ₃	9.32	10.71	7.67
SiO ₂	14.19	24.31	13.3
Fe ₂ O ₃	14.46	6.84	14.44
MnO	4.78	0.52	5.09

4.2 Concentrations of calcium

The concentrations of calcium (Ca²⁺) 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 Ca²⁺ is a metal thus it was better dissolved in acid solution than water. The concentration of Ca²⁺ in leachate using acetic acid and deionized water leaching were up to 4755 mg/l and 502 mg/l, respectively.

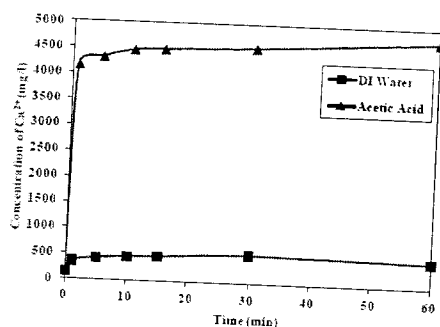


Figure 3. The concentration of Ca^{2+} from leaching process

4.3 CO_2 removal efficiency

The concentrations of Ca^{2+} in precipitate (solid) from CO_2 removal using leachate of steelmaking slag obtained by using acetic acid and deionized water as extracted solvent were compared in figure 4.

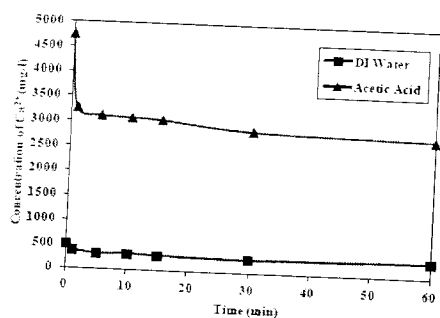


Figure 4. The concentration of Ca^{2+} in precipitate (solid) from CO_2 removal process

It can be seen from figure 4 that Ca^{2+} in acetic acid solution and deionized water hold with carbon dioxide, to form calcium carbonate as indicated by the reduction of Ca^{2+} concentration. The CO_2 removal efficiencies using these solution were shown in figure 5. Although Ca^{2+} eluted with acetic acid was even high, the maximum CO_2 removal efficiency was only 39%. Where as that of 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 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 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, possess much higher pH and alkalinity than that obtains by using acetic acid solution. This results implied that the alkalinity and pH are the most important parameters for CO_2 removal instead of Ca^{2+} concentration in solution.

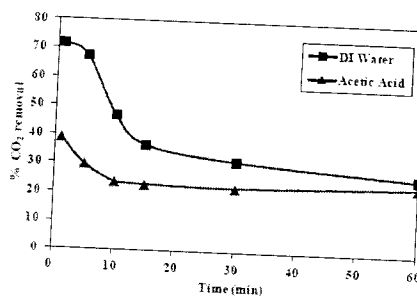


Figure 5. Efficiency of CO_2 removal

Table 2 Leachate properties

Properties	Leachate using acetic acid	Leachate using deionized water
Ca^{2+} concentration	4755 mg/l	502 mg/l
pH	3.7	11.7
Alkalinity	0	1270 mg/l as CaCO_3

5. Conclusions

The conclusion of this work can be drawn as follow. The leaching of Ca^{2+} from steelmaking slag using acetic acid and deionized water as extracted solution was investigated. The concentration of Ca^{2+} in acetic acid solution were much greater than that of deionized water. Although Ca^{2+} eluted with acetic acid was even high, the maximum efficiency of CO_2 removal was much lower than 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 CO_2 removal instead of Ca^{2+} concentration. Thus deionized water leaching process is adequate for steelmaking slag extraction for 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. Kharoune, L. Sauve, S. Hausler, R. Niquette, P. Mimeault, M. and Kharoune, M. 2008. 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 Carbonation Kinetics of Air Pollution Control Residues for 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. Sahminen, J. Fogelholma, C.J. and Zevenhoven, R. 2008. Fixation of CO₂ 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 CO₂-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 CO₂ sequestration. Proceedings of the Third International Green Energy Conference, Västerås, Sweden, June 17-21, 2007: Paper ID-129.

