

ภาคผนวก ก
ข้อมูลสารเคมีเบื้องต้น

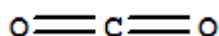
ก-1 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide)

สูตรโมเลกุล : CO_2

น้ำหนักโมเลกุล : 44.0095 กรัม/โมล

ชื่อเรียกอื่น : Carbonic Acid Gas, Carbonic Anhydride; Dry Ice (Solid)

สูตรโครงสร้าง



ลักษณะทั่วไป : แก๊สไม่มีสี สามารถกลายเป็นของแข็งสีขาวที่อุณหภูมิ -78 องศาเซลเซียส โดยไม่ผ่านการเป็นของเหลว หากต้องการให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นของเหลวต้องใช้ความดันไม่น้อยกว่า 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 : การหายใจเข้าไปทำให้เกิดคลื่นไส้ หัวใจเต้นผิดปกติ ปวดศีรษะ มึนงง ระบาย การมองเห็น หายใจไม่ออก มีอาการชัก อาการโคม่า

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสถูกผิวหนังจะเป็นแผลพอง เหมือนน้ำแข็งกัด

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือกินเข้าไป มีอาการเหมือนน้ำแข็งกัดบริเวณริมฝีปาก ปาก และ เยื่อเมือกจะมีผลทำลายตับ

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคือง การมองเห็นไม่ชัดเจน

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 หมดสติ และเสียชีวิตได้

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสถูกผิวหนัง ไม่มีผลกระทบ

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือกินเข้าไป ไม่มีผลกระทบ

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสถูกตา ไม่มีผลกระทบ

การก่อมะเร็ง ความผิดปกติ, อื่น ๆ : การขาดออกซิเจนในระหว่างที่ตั้งครรภ์ จะทำให้ทารกในครรภ์มีความผิดปกติ

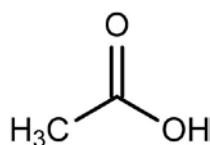
ก-3 กรดอะซิติก (Acetic acid)

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 การสัมผัสเป็นเวลานานทำให้เกิดมีอาการ cyanosis (ผิวหนังและริมฝีปากเป็นสีเขียวคล้ำ) โรคปอดอักเสบ ทำลายปอดหรือ เสียชีวิตได้

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคือง เจ็บปวด เป็นผื่นแดง และบวม มีอาการแสบไหม้ เกิดเป็นตุ่มตามผิวหนัง และเนื้อเยื่อถูกทำลาย

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

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสถูกตาจะทำให้เกิดการระคายเคือง เจ็บปวด น้ำตาไหล ทำให้ตาบวม เป็นผื่นแดง และแสบไหม้ตา ถ้ารุนแรงอาจทำให้ตาบอดได้

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

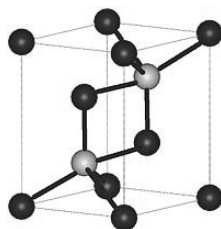
ความคงตัวทางเคมี : สารนี้มีความเสถียร

สารที่เข้ากันไม่ได้ : น้ำ ความร้อน สารออกซิไดซ์รุนแรง สารทำปฏิกิริยารุนแรงกับเบส

สถานะที่ควรหลีกเลี่ยง : ความชื้น

ก-5 แลนทานัมออกไซด์ (Lanthanum(III)oxide)

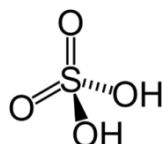
สูตรโมเลกุล	: La_2O_3
น้ำหนักโมเลกุล	: 325.809 กรัม/โมล
ชื่อเรียกอื่น	: Lanthanum Sesquioxide, Lanthana
สูตรโครงสร้าง	: โครงผลึกของแข็งแบบ Hexagonal



ความหนาแน่น	: 6.51 กรัม/ลิตร (ของแข็ง)
จุดหลอมเหลว	: 2250-2307 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	: 4200 องศาเซลเซียส
ลักษณะทั่วไป	: ออกไซด์ของธาตุที่หายาก เป็นของแข็งสีขาว ละลายน้ำได้ในกรดเล็กน้อย และละลายในน้ำ
ความสามารถในการละลายน้ำ	: ไม่ละลายน้ำ
สัมผัสทางหายใจ	: การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองทางเดินหายใจ
สัมผัสทางผิวหนัง	: การสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคืองผิวหนังเล็กน้อย
กินหรือกลืนเข้าไป	: การกลืนหรือกินเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองเล็กน้อย
สัมผัสถูกตา	: การสัมผัสถูกตา จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา น้ำตาไหล ตาแดง
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติ, อื่น ๆ	: อวัยวะเป้าหมาย: ปอด
ความคงตัวทางเคมี	: สารนี้มีความเสถียร แต่จะออกซิไดซ์ในอากาศ เป็นสารดูดความชื้น สามารถดูดซับไฟได้เองเมื่อสัมผัสกับอากาศหรือน้ำ
สารที่เข้ากันไม่ได้	: กรดแก่สารออกซิไดซ์ 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 : ของเหลวใสข้น 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 : การสัมผัสถูกผิวหนัง สารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้เป็นแผลไหม้ และปวดแสบปวดร้อน

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือการกินเข้าไป ทำให้คลื่นไส้ อาเจียน แต่ไม่มีผลต่อเนื้อเยื่อ

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสถูกตา สารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้ตาแดง ปวดตา และสายตาวัวมัว

การก่อมะเร็ง ความผิดปกติ, อื่น ๆ : สารนี้มีผลทำลายฟัน ระบบหลอดเลือดเลี้ยงหัวใจ

สารที่เข้ากันไม่ได้ : เบสแก่ น้ำ สารอินทรีย์ โลหะอัลคาไลด์

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

อะตอมมิกแอบซอร์พชันเป็นกระบวนการที่เกิดจากอะตอมเสรีของธาตุดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นอันหนึ่งโดยเฉพาะขึ้นกับชนิดของธาตุนั้นๆ 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 แต่จำเป็นต้องใช้วิธีทำให้แตกตัวในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนเพื่อป้องกันการรบกวนกับออกซิเจนของธาตุเหล่านี้ ดังนั้น จึงต้องทำให้ธาตุ

เหล่านีกลายเป็นไอที่อุณหภูมิห้องด้วยการรีดิวซ์ให้เป็นไฮไดรด์ แล้วไฮไดรด์นั้นผ่านเข้าไปในเปลวไฟไฮไดรเจน ความร้อนจากเปลวไฟไฮไดรเจนจะทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมเสรีได้ เทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ของธาตุ As, Se, Te, Ge, Bi และ Sb

- Cold Vapor Generation Technique สำหรับเทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้เพื่อวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่สามารถเปลี่ยนเป็นไอได้ง่ายๆ ได้แก่ การวิเคราะห์ปรอทที่มีปริมาณน้อยโดยเฉพาะ

Calibration Method

ในกรณีที่สารตัวอย่างไม่ค่อยมีสิ่งรบกวนและสารตัวอย่างเจือจาง อาจทำการวิเคราะห์ได้ง่ายๆ โดยเทียบสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนแล้ว วิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป โดยปรับสัญญาณที่ได้จาก Blank ให้เป็นศูนย์ แล้วจึงวัดค่าแอมพลิจูดของสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่างๆ 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 ที่ได้ใช้เฉพาะการวิเคราะห์แต่ละครั้งเท่านั้น เมื่อจะวิเคราะห์ใหม่จะต้องทำใหม่ ทั้งนี้เพราะ Parameter ต่างๆ ที่ใช้อาจเปลี่ยนแปลงได้

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

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

เครื่องมือและอุปกรณ์

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

สารเคมี

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

2. แก๊สอะเซทิลีน ใช้ชนิตมาตรฐานการก้ำที่บรรจุอยู่ในท่อ 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

เลือกฮอลโลวแคทโทดแลมป์ของโลหะที่ต้องการวิเคราะห์ น้ำไปติดตั้งให้เข้าที่ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือ นั้น แล้วจัดโมโนโครมาเตอร์ให้มีค่าความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร

2. การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับแคลเซียม

2.1. เลือกสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน อย่างน้อย 3 ความเข้มข้น

2.2. เติมสารละลายแลนทานัม 10 มิลลิลิตร ลงในสารละลายมาตรฐาน 100 มิลลิลิตร ก่อนจะทำการวิเคราะห์

2.3. จุ่มหลอดพลาสติกงูเล็กลงในสารละลายแต่ละความเข้มข้น แล้ววัดค่าแอมป์เซอร์เบนซ์

3. วิธีวิเคราะห์สารตัวอย่าง

3.1. ล้างอะตอมไมเซอร์จนกระทั่งมาตรของระบบอ่านให้ค่าที่คงที่ แล้วจัดเครื่องมือให้อ่านศูนย์ทุกครั้งก่อนที่จะทำการวิเคราะห์สารละลายแต่ละตัวอย่าง รวมทั้งการทำกราฟมาตรฐานจะต้องล้างอะตอมไมเซอร์ก่อน

3.2. จุ่มหลอดพลาสติกกรุเหล็กลงในสารละลายตัวอย่างแล้ววัดค่าแอบซอร์พแบนซ์

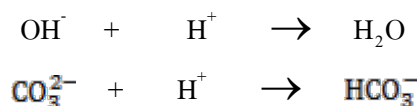
3.3. เมื่อจะหาปริมาณของแคลเซียม ให้ผสมและเจือจางสารละลายตัวอย่างด้วย 100 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายแลนทานัม 10 มิลลิลิตรก่อนจะทำการวิเคราะห์

4. การคำนวณ

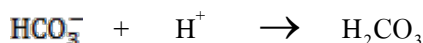
คำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารตัวอย่างโดยคิดเป็น มิลลิกรัม/ลิตร โดยอ่านจากกราฟมาตรฐานที่ถูกต้อง

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) ปฏิกริยาเกิดขึ้นดังนี้



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. ปีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
4. บิวเรต และแท่นจับ 1 ชุด

สารเคมี

1. น้ำปราศจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
2. สารละลายกรดซัลฟูริก 0.05 โมลาร์ เตรียมโดยปีเปตกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 28 มิลลิลิตร ค่อยๆ เทลงในน้ำกลั่น 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 หยดไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 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)

เราอาจนำค่าความเป็นด่างในรูปแบบต่างๆ ได้ดังนี้

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

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

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 เพื่อวิเคราะห์นั้นมีวิธีการที่แตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของสารตัวอย่าง โดยทั่วไป ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างเข้าไป (Inlet) จะมีเครื่องให้ความร้อน (Heater) ประกอบอยู่ด้วยเพื่อทำให้สารตัวอย่างกลายเป็นไอปริมาณของสารตัวอย่างที่ใช้ก็มักจะน้อย

ตัวอย่างที่เป็นแก๊สมักจะฉีดเข้าไปด้วย Gas-tight Syringe แต่วิธีที่ดีที่สุดใช้ Gas Sampling Valve

คอลัมน์ (Column)

คอลัมน์ถือเป็นหัวใจของการแยกสารด้วยเทคนิค GC เมื่อแก๊สผสมหรือไอของสารที่ปนกันอยู่ในสารตัวอย่าง ผ่านคอลัมน์สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอผสมเหล่านั้นออกเป็นส่วนๆ 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) เป็นดีเทคเตอร์ที่ดีสำหรับตรวจวัดสารประกอบที่มีแอมัลโฟรเจนอะตอมเป็นองค์ประกอบ 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 ที่ใช้วิเคราะห์ควรจะคงที่หรือมีค่าใกล้เคียงที่สุด

- ใช้วิธีการอ่านจากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Retention Time กับ จำนวนอะตอมของคาร์บอนของสารที่อยู่ในพวกเดียวกัน (Homologous Series)

- ใช้ดัชนี Kovats (Kovats Index) Wehrli และ Kovats เป็นผู้นำหลักการของ Retention Index มาใช้เพื่อช่วยเพื่อพิสูจน์โครงสร้างของโมเลกุลสารอินทรีย์ โดยใช้ n-alkane เป็น มาตรฐาน

- การใช้คอลัมน์หลายชนิด (Multiple Column) การใช้คอลัมน์ 2 ชนิดหรือมากกว่า จะช่วยให้การตรวจพิสูจน์สารตัวอย่างมีความถูกต้องและมั่นใจยิ่งขึ้น

2. การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วย GC (Quantitative Analysis)

- Normalization Method การหา Area Normalization สามารถทำได้โดยการ คำนวณพื้นที่ของแต่ละพีคแล้วนำมารวมกันเป็น %Area Normalization

- External Standardization Method โครมาโทแกรมที่ได้นำไปหาพื้นที่พีคหรือ ความสูงของพีค แล้วนำไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่พีคหรือความสูงของพีคกับ ความเข้มข้นจะได้ Calibration Curve สำหรับหาปริมาณของสารตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นการวิเคราะห์ สารเดี่ยวหรือหลายสารก็ได้

- Internal Standardization Method เป็นเทคนิคที่ใช้หาปริมาณของสารได้ ถูกต้องที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ Internal Standard

วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างแก๊สเสีย

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องแก๊สโครมา- โตกราฟี (Gas Chromatography, GC) รุ่น GC-14A ของบริษัท Shimadzu ใช้ตัวตรวจวัดชนิด Thermal Conductivity Detector, TCD) โดยมีสถานะดำเนินการของเครื่อง 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 (ร้อยละ โดยปริมาตร)

C_2 = ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออก (ร้อยละ โดยปริมาตร)

ข-4 การวิเคราะห์เอกซ์-เรย์ สเปกโทรสโกปี (X-ray Spectroscopy) (แม่น, 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)
- ดีเทกเตอร์
- ระบบ Cooling ซึ่งเป็นไนโตรเจนเหลวเพื่อทำให้ดีเทกเตอร์เย็น
- Preamplifier หรือ Amplifier ซึ่งจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้ใหญ่พอที่จะวัดได้ถูกต้อง

- Multichannel Analyzer ทำหน้าที่เก็บรวบรวมสัญญาณที่ได้จากดีเทกเตอร์ 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 นำไปอัดแผ่นหรือขัดผิวได้เลย 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 จากนั้นทำการหาว่าฟลักแต่ละฟลักนั้นมีพลังงานเท่าใด หรือมีความยาวคลื่นเท่าใด แต่ทั้งนี้จะต้องดูว่าการวิเคราะห์นั้นใช้ Analyzing Crystal เป็นอะไร ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของสารตัวอย่างนั้นเป็นวิธีที่นิยม เพราะทำได้ง่าย รวดเร็ว คือใช้ XRFS ชนิด Energy Dispersive System

2. การทำปริมาณวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRFS

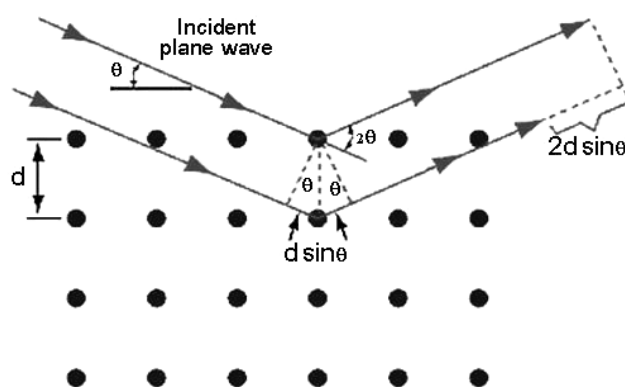
การวิเคราะห์สามารถทำได้โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ที่ได้จากสารตัวอย่าง กับความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ที่ได้จากสารมาตรฐาน การวัดความเข้มข้นของรังสีขึ้นอยู่กับความเข้มข้น หรือปริมาณของธาตุที่วิเคราะห์ และขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

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 ได้เสนอแนวคิดที่ว่าเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ θ รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ ดังภาพประกอบที่ ข.1 ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆถูกเสนอในรูปสมการ

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

ภาคผนวก ค
ผลการทดลอง

ค-1 ผลการทดลองการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากซีตะกรันด้วยสารละลายชนิดกรดอะซิติก และน้ำปราศจากไอออน

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

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาทื)	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 ผลการชะละลายแคลเซียมไอออนออกจากขี้ตะก้นครั้งที่ 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 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากขี้ตะกรันครั้งที่ 3 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 2 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 8 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาทีก)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (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 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากขี้ตะกรันครั้งที่ 4 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 2 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 15 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาทีก)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (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 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากขี้ตะกรันครั้งที่ 5 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 2 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 15 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาทีก)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (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 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากขี้ตะกรันครั้งที่ 6 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 5 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาทีก)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (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 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากขี้ตะกรันครั้งที่ 7 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาท)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (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 ค-1.8 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากขี้ตะกรันครั้งที่ 8 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการ เก็บตัวอย่าง (นาทีก)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (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 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากขี้ตะกรันครั้งที่ 9 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณ แคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (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 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์ครั้งที่ 10 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาทีก)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ปริมาณ แคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (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 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีตะกรันครั้งที่ 11 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาทีก)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ปริมาณ แคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
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 ก-1.12 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์ครั้งที่ 12 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 20 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ปริมาณ แคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
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 ก-1.13 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์ครั้งที่ 13 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 6 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 8 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาทีก)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ปริมาณ แคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
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 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์ครั้งที่ 14 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 6 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 8 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของสารละลาย	ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (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 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์ครั้งที่ 15 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 6 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 15 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของสารละลาย	ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (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 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์ครั้งที่ 16 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 6 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 15 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาทีก)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ปริมาณ แคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (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 ก-1.17 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์ครั้งที่ 17 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 8 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาทีก)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ปริมาณ แคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
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 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์ครั้งที่ 18 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 15 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาที)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ปริมาณ แคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (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 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์ครั้งที่ 19 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 2 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาทีก)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ปริมาณ แคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
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 ผลการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์ครั้งที่ 20 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดอะซิติก 5 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 กรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการเก็บ ตัวอย่าง (นาทีก)	ค่าพีเอชของ สารละลาย	ความเข้มข้นของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ปริมาณ แคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (กรัม)	ประสิทธิภาพการ ชะละลาย (%)
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

ค-2 ผลการทดลองการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากการชะละลายซีเมนต์ในคอลัมน์บรรจุ

ตารางที่ ค-2.1 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีเมนต์ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 ค-2.2 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.42 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีเมนต์ 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 ค-2.3 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.78 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีเมนต์ 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 ค-2.4 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.9 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีเมนต์ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 ค-2.5 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.25 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตกรัน 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 ค-2.6 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.78 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.37 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตกรัน 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 (นาทีก)	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 (นาทีก)	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 และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีเมนต์ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีเมนต์ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 ค-2.13 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 ค-2.14 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 ค-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 ค-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 และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 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 และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 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 ค-2.19 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.85 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 ค-2.20 แสดงผลของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตามภาวะที่เหมาะสม ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.77 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.25 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน 725 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาท)	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 และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาท)	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 และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาท)	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 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.78 ลิตรต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.9 ลิตรต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 362 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.78 ลิตรต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊ส 0.37 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 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 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.42 ลิตรต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊ส 0.37 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 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 และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.42 ลิตรต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊ส 0.37 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 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 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.78 ลิตรต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 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 ค-2.34 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที่)	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 ค-2.35 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที่)	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 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.42 ลิตรต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊ส 0.73 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 362 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาทีก)	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 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.42 ลิตรต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 600มิลลิกรัมต่อลิตร

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 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.3 ลิตรต่อนาที อัตราการไหล ของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 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 ค-2.40 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.85 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที่)	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 ค-2.41 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.55 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายจีตะกรัน 838 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที่)	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

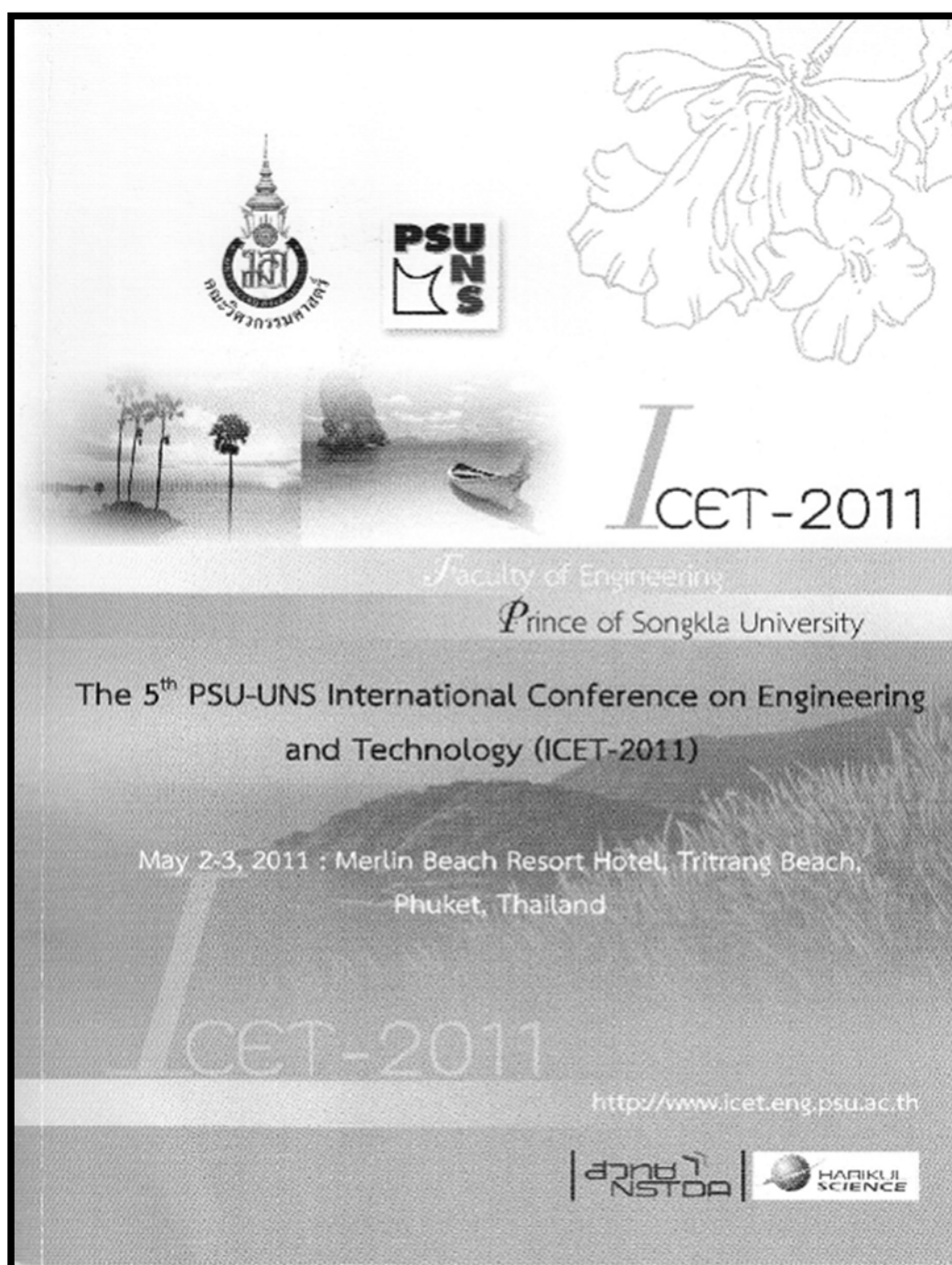
ตารางที่ ค-2.42 แสดงผลของค่าพีเอชและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ผ่าน การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตามภาวะที่เหมาะสม ที่อัตราการไหลของของเหลว 0.77 ลิตร ต่อนาที อัตราการไหลของแก๊ส 0.25 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตกรัน 725 มิลลิกรัมต่อลิตร

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

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานในการประชุมวิชาการ

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 Ca^{2+} LEACHING FROM STEELMAKING SLAGS USING ACETIC ACID FOR MINERAL CO_2 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 (CO_2) sequestration using steelmaking slag via carbonation reaction comprises of two steps. First, the calcium ions (Ca^{2+}) from the slag particles were extracted into an acid solution. Second, the chemical absorption of CO_2 by Ca^{2+} solution to form a solid particle of calcium carbonate (CaCO_3), where the CO_2 was sequestered. This study aims to investigate the optimal condition for Ca^{2+} extraction from steelmaking slag by using acetic acid solution. The response surface methodology (RSM) was used to optimize the concentration of Ca^{2+} . The investigated parameters were the temperatures in the range of 30-70 °C, whereby liquid/solid mass ratio and the acetic concentration in the range of 5:1-20:1 and 1-8 M, respectively, were investigated. The optimum conditions in the leaching process are the liquid/solid ratio of 5:1, the acetic acid concentration and temperature of 7.3 M and 70 °C, respectively. This optimum condition gave maximum Ca^{2+} concentration of 35226 ppm

Key Words: CaCO_3 / Carbonation/ CO_2 / Extraction/ Leaching/ Slag

1. INTRODUCTION

The global warming associated with an increase of the greenhouse gas emissions represents a worldwide problem that is due in major part to the industrial combustion of fossil fuels [1]. The current global warming is a global problem which caused by the climate change due to an increasing of carbon dioxide (CO_2) in the atmosphere [2]. Carbon dioxide mineral sequestration is a technology that can reduce CO_2 emissions to the atmosphere for long-term storage of CO_2 [3].

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

would be trapped in inert carbonates [4]. The slag from steelmaking process is known as a material which has the ability to capture CO_2 and transform to calcium carbonate (CaCO_3) owing to their high contents of calcium (Ca^{2+}) as in a form of calcium oxide (CaO) [5]. Thus, the extraction of Ca^{2+} from slag is an important step for carbon dioxide sequestration via carbonation process.

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

2. MATERIALS

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

3. EXPERIMENTAL

3.1 Preparation of the steelmaking slag

The steelmaking slag was dried at 105 °C in an oven and roughly grinded with jaw crushers. The steelmaking slag was then finely grinded by gyratory crusher and sieved to get particle size of smaller than 45 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 Ca^{2+} 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 Ca^{2+} in the leaching solution is measured by AAS (Aanalyst 100 spectrometry manufactured by Perkin-Elmer, USA).

3.4 Experimental design

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

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

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

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

The variables were coded according to the following equation:

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

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

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

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

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

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Slag composition

Chemical and physical properties of slag were measured using XRF, XRD, and AAS. The results from XRF indicated that the slag posses CaO up to 55% which is a key component and XRD analysis showed that the main compositions of slag are tricalcium magnesium orthosilicate ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$), gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), and calcium strontium manganese oxide ($(\text{Ca}_{0.6}\text{Sr}_{0.4})\text{MnO}_3$). This composition characteristic make them suitable candidates for the industrial sequestration of CO_2 [6].

4.2 Optimize leaching condition

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

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

The value of the determination coefficient (R^2) and adjusted value of the determination coefficient (Adjusted R^2) were 0.963 and 0.951, respectively, indicating the model is present the experimental data well. This is also evident from the fact that the plot of predicted versus experimental concentrations of Ca^{2+} 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

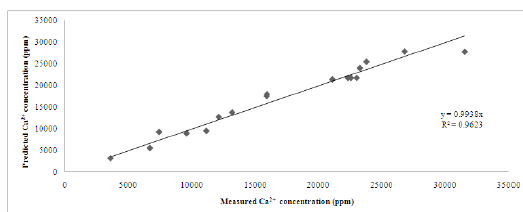


Fig. 1. Plot of predicted and measured Ca^{2+} concentration

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.

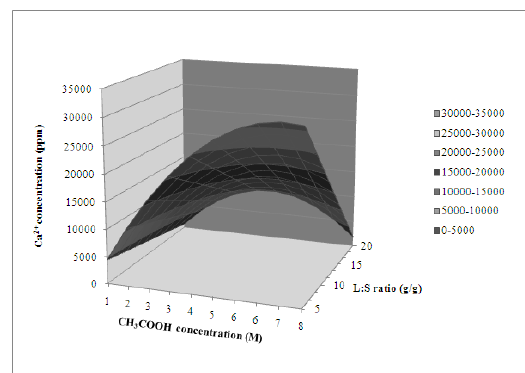


Fig. 2. Response surface plot showing the effect on acetic acid concentration, liquid/solid mass ratio and their mutual effect on the production of Ca^{2+}

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.

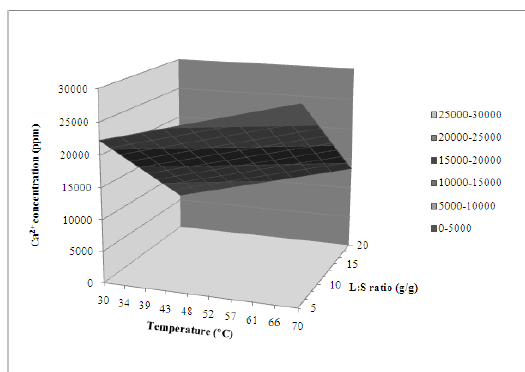


Fig. 3. Response surface plot showing the effect on temperature, liquid/solid mass ratio and their mutual effect on the production of Ca^{2+}

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 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. Fogelholma, 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



The 10th
International
PSU Engineering Conference
(IPEC-10)
May 14 - 15, 2012

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 Chungsiriporn¹, 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.

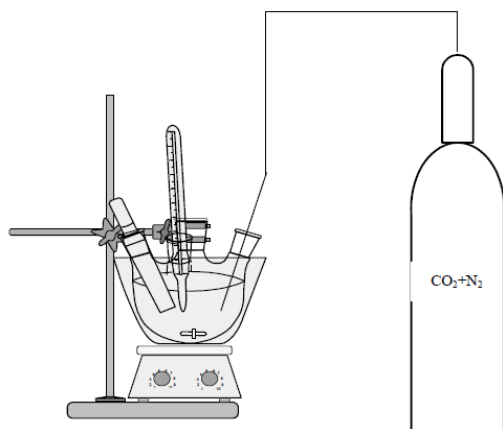


Figure 1. A schematic of laboratory CO₂ absorption reactor

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_{in}) 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_{in} = 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.

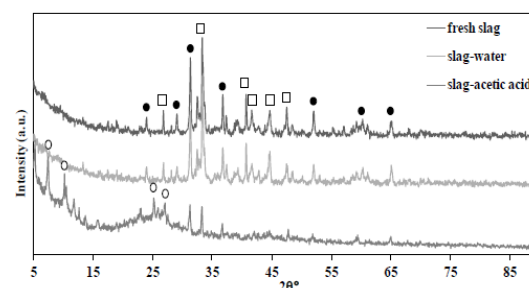


Figure 2. XRD patterns of the steelmaking slag used in the experiment; □ Tricalcium magnesium orthosilicate (Ca₃Mg(SiO₄)₂), ● gehlenite, and ○ calcium acetate hydrate

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.

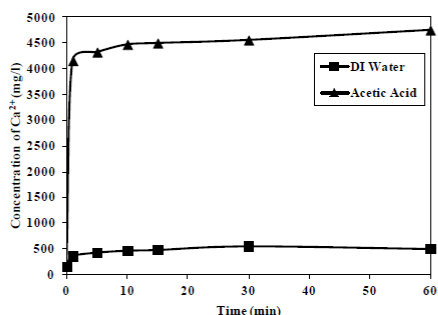


Figure 3. The concentration of Ca^{2+} from leaching process

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.

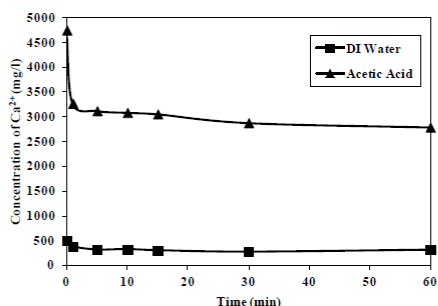


Figure 4. The concentration of Ca^{2+} in precipitate (solid) from CO_2 removal process

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, possesses much higher pH and alkalinity than that obtained by using acetic acid solution. This result implied that the alkalinity and pH are the most important parameters for CO_2 removal instead of Ca^{2+} concentration in solution.

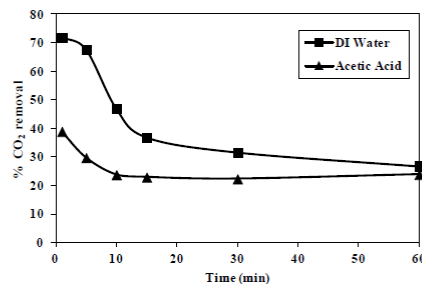


Figure 5. Efficiency of CO_2 removal

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 follows. 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 was 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 that of deionized water extraction. In addition, the alkalinity in water leaching was very high. It can be concluded that the alkalinity and pH are the most important parameters for 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. Polettini, 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. Salminen, 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.