

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO₂ โดยใช้สารละลายที่ได้จากการชะละลายขี้ตะกรันในคอลัมน์บรรจุ แบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 เป็นผลการศึกษากระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากขี้ตะกรันในถังปฏิกรณ์แบบกะ และตอนที่ 2 เป็นผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ในคอลัมน์แบบบรรจุ ขนาดต้นแบบ โดยแต่ละตอนมีรายละเอียดดังนี้

4.1 กระบวนการชะละลายแคลเซียมออกจากขี้ตะกรัน

4.1.1 สมบัติของขี้ตะกรันใหม่สด (Fresh Steelmaking Slag) จากการถลุงเหล็ก

4.1.1.1 สมบัติทางกายภาพของขี้ตะกรันที่ได้จากการถลุงเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace, EAF) ของบริษัทสยามสตีลซินดิเกท จำกัด

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



ภาพประกอบที่ 4-1 ลักษณะทางกายภาพของขี้ตะกรันที่ผ่านการอบแห้งและคัดขนาดด้วยการร่อนตะแกรงให้ได้ขนาดอนุภาค 37-44 ไมครอน

4.1.1.2 สมบัติทางเคมีของซีตากรันใหม่สดที่ได้จากเตาอาร์คไฟฟ้าของบริษัทสยามสตีลซินดิเกต จำกัดและซีตากรันที่ผ่านการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนหรือสารละลายกรดอะซิติก ปริมาณองค์ประกอบออกไซด์ของซีตากรัน

การวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของซีตากรันด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRFS) พบว่า ซีตากรันมีปริมาณองค์ประกอบออกไซด์ของโลหะอยู่หลายชนิด โดยมีแคลเซียมออกไซด์ในปริมาณมากที่สุด ที่เหลือจะเป็นสารประกอบอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ปริมาณองค์ประกอบทั่วไปของซีตากรันหลักก่อนทำการชะละลายวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์

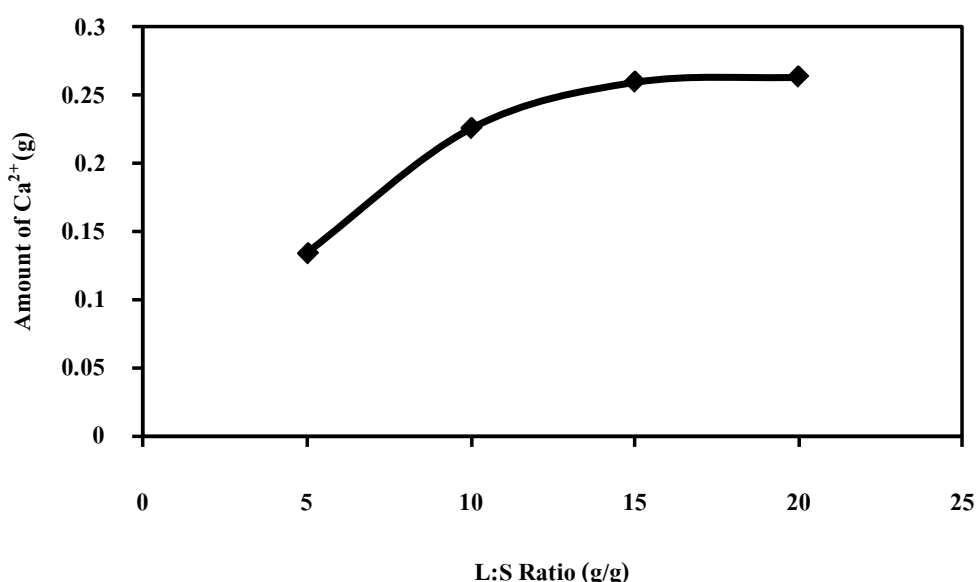
องค์ประกอบ	ปริมาณองค์ประกอบออกไซด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
CaO	53.21
Fe ₂ O ₃	13.52
SiO ₂	13.38
Al ₂ O ₃	8.38
MnO	4.94
MgO	4.07
TiO ₂	1.91
Cr ₂ O ₃	0.59

4.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลายซีตากรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออน

ในหัวข้อนี้รายงานผลของปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการชะละลายซีตากรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออน ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายและวัดปริมาณองค์ประกอบของซีตากรันในตะกอนที่ผ่านการชะละลาย โดยปริมาณความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร มีรายละเอียดปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการชะละลายซีตากรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออนดังนี้

4.1.2.1 ผลของอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (กรัมต่อกรัม)

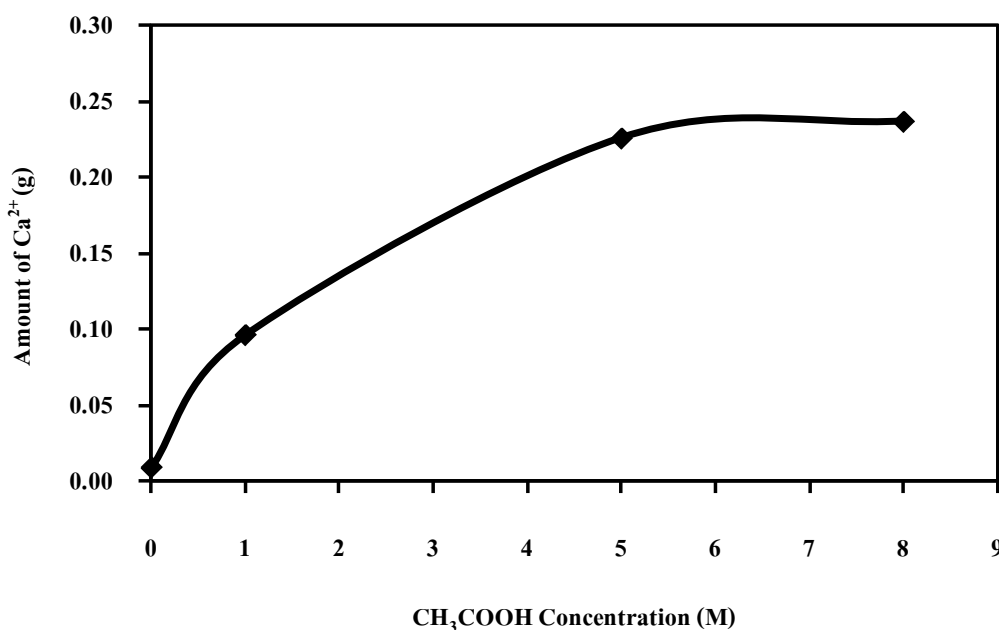
การทดลองชะละลายแคลเซียมไอออนจากจีตะกรันด้วยสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสตลอดการชะละลาย และทำการศึกษาอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งตั้งแต่ 5 ถึง 20 (กรัมต่อกรัม) แสดงผลการทดลองในภาพประกอบที่ 4-2 โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายจีตะกรันต่ออัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง พบว่า เมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไอออนเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากจำนวนโมลของกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้กรดอะซิติกทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบภายในจีตะกรันเพิ่มขึ้นด้วย ดังสมการที่ (4-1)



ภาพประกอบที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายจีตะกรันกับอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง ที่สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 5 โมลาร์

4.1.2.2 ผลของความเข้มข้นของกรดอะซิติก (โมลาร์)

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

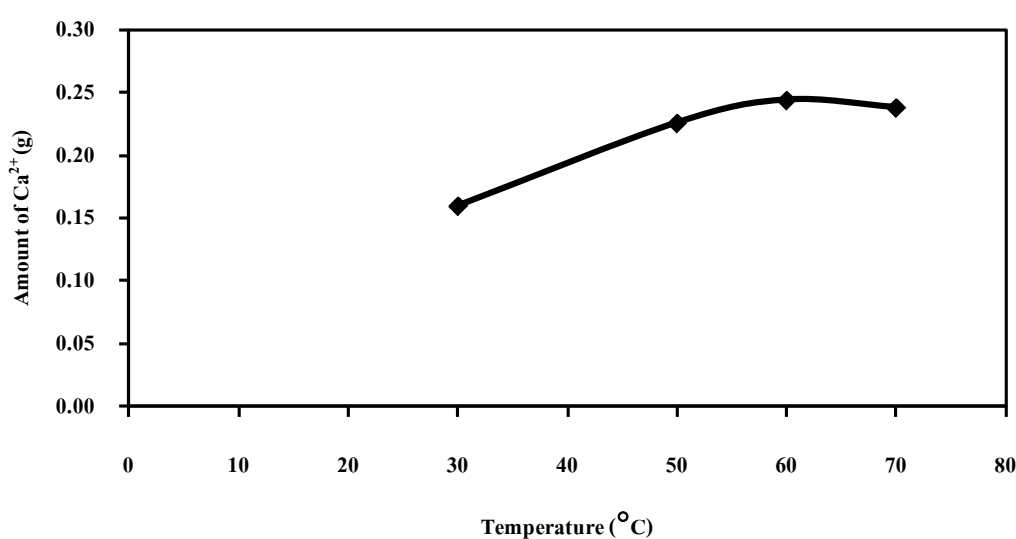


ภาพประกอบที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายจีตะกรันกับความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติก

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

4.1.2.3 ผลของอุณหภูมิในการชะละลายแคลเซียมออกจากจีตะกรัน

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



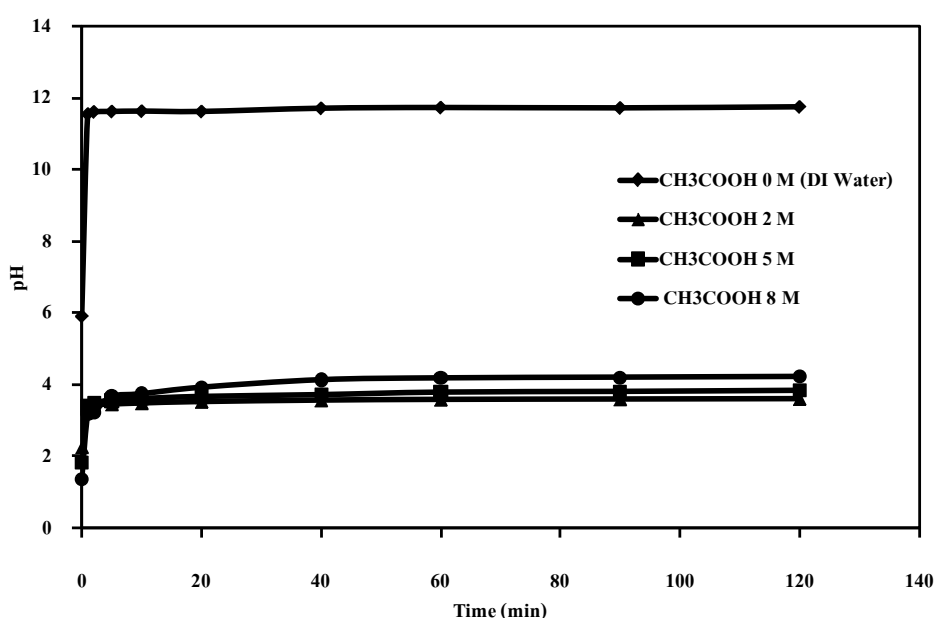
ภาพประกอบที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการชะละลายจีตะกรันกับอุณหภูมิในการชะละลาย

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

4.1.2.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์

4-1) ผลของพีเอชของสารละลายต่อเวลาที่ใช้ในการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์

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



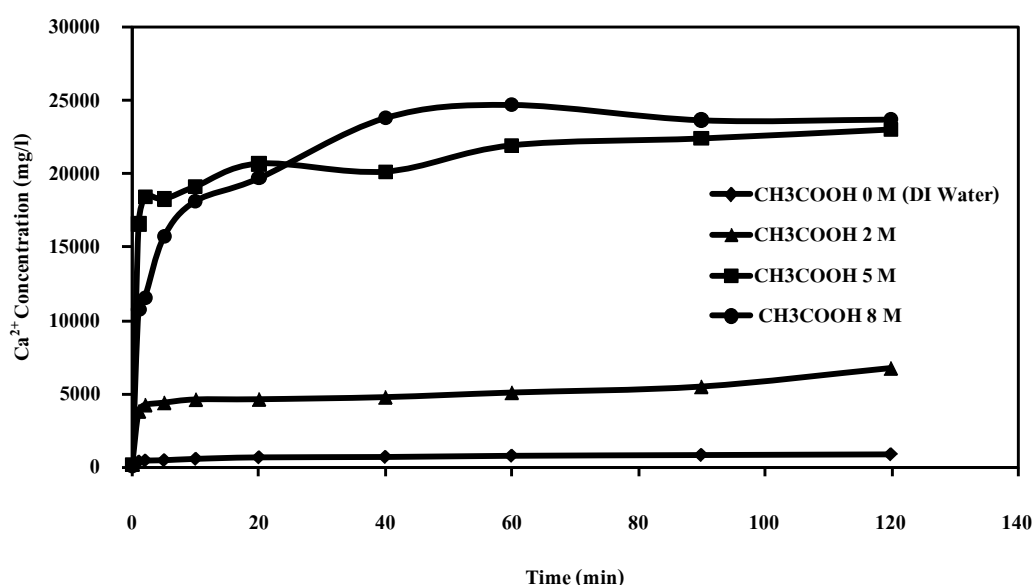
ภาพประกอบที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายกับเวลาที่ใช้ในการชะละลาย

จากภาพประกอบที่ 4-5 พบว่า ก่อนการชะละลายด้วยกรดอะซิติกสารละลายมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2.26 หลังจากนั้นละลายด้วยกรดอะซิติกแล้วค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นเป็น 3.62 เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่เกิดจากการแตกตัวของกรดอะซิติกแพร่ไปยังซีเมนต์ทำให้เกิดการละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์ ค่าพีเอชของสารละลายจึงมีค่าเพิ่มขึ้น (สุรทพิย์, 2545) และพบว่าประสิทธิภาพในการชะละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากซีเมนต์ด้วยสารละลายกรดอะซิติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 35 และเมื่อพิจารณาค่าพีเอชของสารละลายก่อนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนมีค่าเท่ากับ 5.88 และหลังการชะละลายพบว่า พีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นเป็น 11.74 สาเหตุเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีฤทธิ์เป็นด่างจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับน้ำปราศจากไอออนดังสมการที่ (4-2) (ประภุต, 2542) อีกทั้งยัง

พบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดแคลเซียมไอออนออกจากซีตกรีนด้วยน้ำปราศจากไอออนมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.24 โดยจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการชะละลายด้วยกรดสูงกว่าน้ำ เนื่องจากโลหะจะละลายได้ดีที่สภาพเป็นกรดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bao และคณะ (2010) แต่น้ำปราศจากไอออนที่ใช้เป็นสารละลายที่มีสภาพเริ่มต้นเป็นกลางจึงทำให้สามารถชะละลายแคลเซียมไอออนออกมาได้ปริมาณน้อย แต่มีค่าพีเอชของสารละลายแคลเซียมไอออนหลังการชะละลายที่สูงแสดงถึงปริมาณค่าสภาพความเป็นด่างที่สูง

4-2) ผลของความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายต่อเวลาที่ใช้ในการชะละลายแคลเซียมออกจากซีตกรีน

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



ภาพประกอบที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารละลายกับเวลาที่ใช้ในการชะละลาย

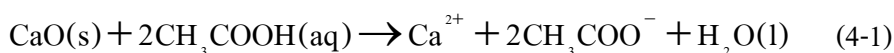
จากภาพประกอบที่ 4-6 พบว่า การชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นการชะละลาย จากนั้นจึงค่อยๆ คงที่ ซึ่งการชะละลายที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วในระยะแรกและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป ต่อมาปฏิกิริยาจะคงที่เนื่องจากความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสถานะของแข็งกับของเหลวแตกต่างกันน้อยลง หรือสารละลายเริ่มอิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์นั่นเอง

4.1.3 สมบัติของซีเมนต์ที่ผ่านการชะละลายด้วยน้ำและสารละลายกรดอะซิติก

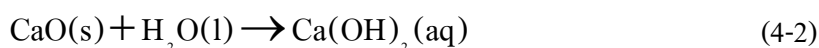
การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในซีเมนต์ส่วนที่เป็นกากตะกอนที่เหลือจากกระบวนการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไฮดรอกไซด์โดยใช้เครื่องเอ็กสเรย์ฟลูออเรสเซนส์ ดังแสดงในตารางที่ 4-1 พบว่า ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ภายในซีเมนต์ที่เหลือหลังจากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกน้อยกว่าการใช้น้ำปราศจากไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลาย ส่วนของสารละลายที่ได้จากการชะละลายซีเมนต์ด้วยสารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไฮดรอกไซด์มีค่าพีเอชสุดท้ายเท่ากับ 3.83 และ 11.74 ตามลำดับ และมีความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 879 และ 23025 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า สารละลายกรดอะซิติกมีความสามารถในการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดีกว่าน้ำปราศจากไฮดรอกไซด์เนื่องจากโลหะดังกล่าวมีคุณสมบัติในการละลายได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด

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

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



ปฏิกิริยาการชะละลายซีเมนต์ (CaO) ด้วยน้ำปราศจากไฮดรอกไซด์เกิดผลิตภัณฑ์เป็น Ca(OH)₂



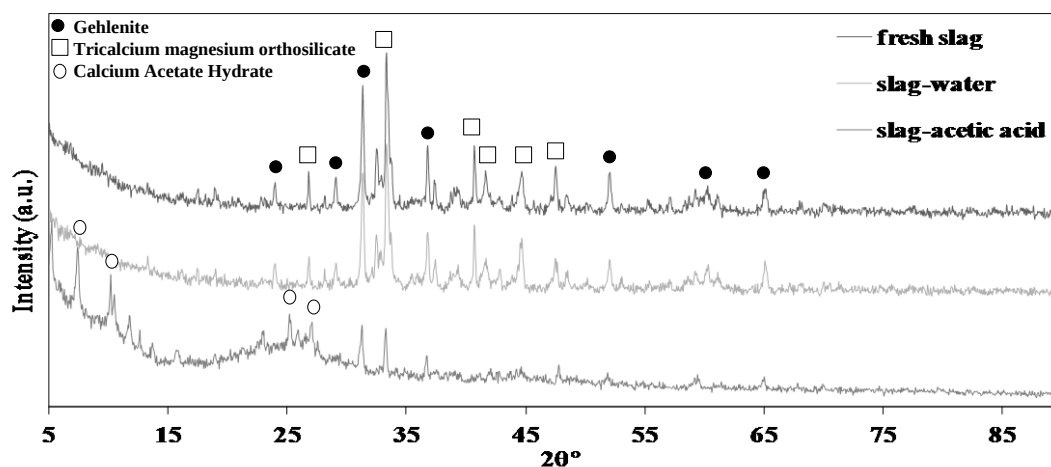
ปฏิกิริยาการแตกตัวของ Ca(OH)₂ แตกตัวเป็นไฮดรอกไซด์ในสารละลายซีเมนต์



ตารางที่ 4-2 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในซีตะกรันที่เหลือจากกระบวนการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออน

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

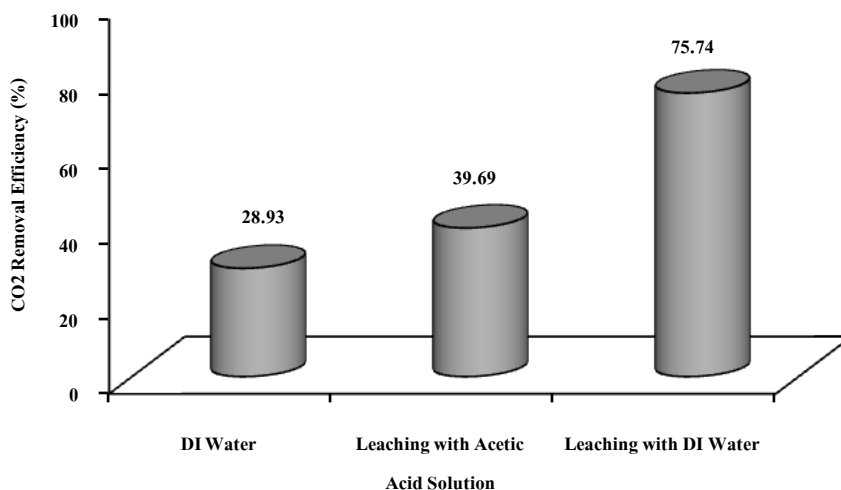
การวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ของซีตะกรันใหม่สด ซีตะกรันหลังจากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนและ หลังจากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็ก-โทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD) แสดงดังภาพประกอบที่ 4-7 พบว่า ซีตะกรันหลังการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนไม่มีการเปลี่ยนแปลง นั่นคือ มี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



ภาพประกอบที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบองค์ประกอบตะกอนของซีเมนต์ก่อนและหลังการชะละลายวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

4.1.4 ผลการศึกษาการกำจัดก๊าซ CO_2 เบื้องต้นด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากกระบวนการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไฮดรอกไซด์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 กับสารดูดซึม 3 ชนิด คือ สารดูดซึมน้ำปราศจากไฮดรอกไซด์ สารดูดซึมจากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกและสารดูดซึมจากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไฮดรอกไซด์ ภายใต้สภาวะดำเนินการเดียวกันดังนี้คือ 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 การใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายขี้ตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ สูงสุดถึงร้อยละ 75.74 ซึ่งสูงกว่าทั้งสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออน เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นเดียวกันพบว่า สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนมีค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างมากที่สุด คือ 11.14 และ 1640 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในกรณีใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติก พบว่าค่าพีเอชเท่ากับ 4.00 เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าสารละลายนี้มีค่าความเป็นกรดเกินไปถึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ต่ำ ส่วนกรณีใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารดูดซึมพบว่าให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO₂ ต่ำกว่าทั้งสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกและน้ำปราศจากไอออน ทั้งนี้เนื่องจากในการดูดซึมก๊าซ CO₂ ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยสารละลายกรดอะซิติกหรือน้ำปราศจากไอออนจะมีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งเรียกการดูดซึมชนิดนี้ว่า การดูดซึมทางเคมี (Chemical Absorption) ทั้งนี้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายขี้ตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนจะทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน (Carbonation) กับก๊าซ CO₂ ได้ผลิตภัณฑ์คือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าการใช้

น้ำปราศจากไอออนมาเป็นสารดูดซึมซึ่งเกิดการดูดซึมทางกายภาพ (Physical Absorption) (ปกรณ, 2552)

งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็นสารดูดซึม เพื่อนำไปทำการศึกษากำจัดก๊าซ CO_2 ในขั้นตอนการกำจัดก๊าซ CO_2 ต่อไป เนื่องจากสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 ที่อัตราการไหลของเหลว 0.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซ 0.55 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลาย 600 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับร้อยละ 75.74 โดยเป็นผลมาจากสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายข้างต้น มีสภาพความเป็นด่างทำให้สามารถกำจัดก๊าซ CO_2 ได้ดีกว่า โดยจะนำสภาวะที่ใช้ในการชะละลายแคลเซียมไอออน คือ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10:1 (กรัมต่อกรัม) ที่อุณหภูมิห้อง โดยดัดแปลงจากวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) (บุษราภรณ์, 2550) ไปใช้สำหรับการเตรียมสารดูดซึมในการทดลองตอนที่ 2 ต่อไป

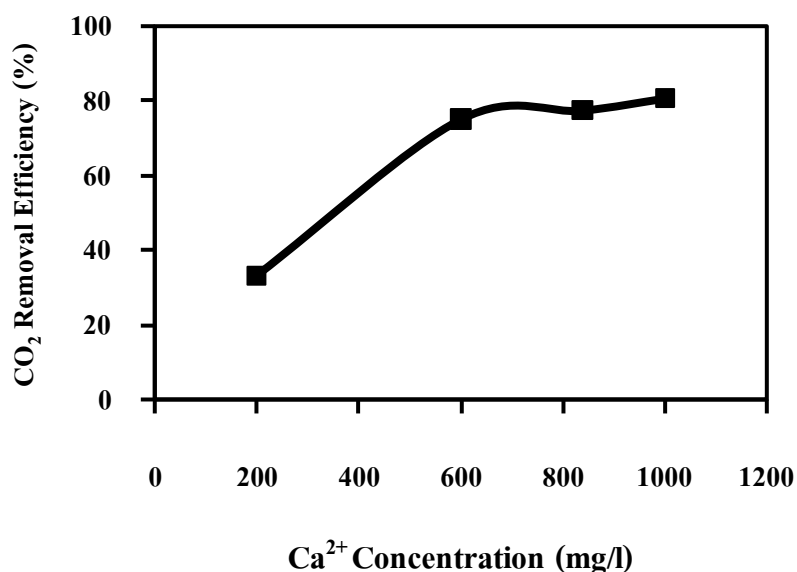
4.2 ศึกษาการกำจัดก๊าซ CO_2 ด้วยสารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ

การศึกษการใช้สารละลายแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนมาเป็นสารดูดซึมในการกำจัดก๊าซ CO_2 โดยใช้คอลัมน์บรรจุในระดับห้องปฏิบัติการ ภายในคอลัมน์บรรจุมีการไหลของกระแสก๊าซและกระแสของเหลวที่สวนทางกัน โดยก๊าซ CO_2 จะถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสของเหลวและทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันกับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนซึ่งจะใช้สารละลายใหม่เสมอ และทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของก๊าซ และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่ได้จากการชะละลาย ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 และหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

4.2.1 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ โดยใช้คอลัมน์บรรจุห้องปฏิบัติการ

4.2.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂

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



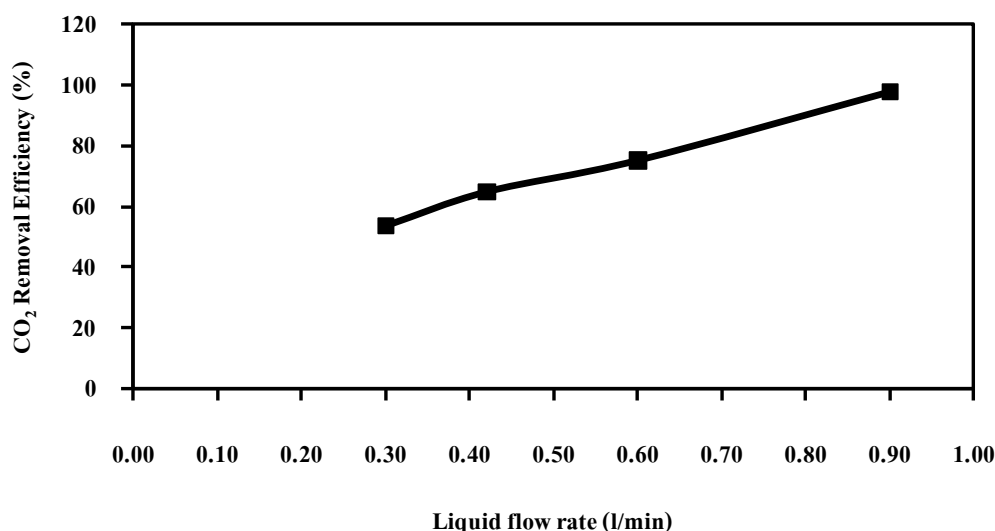
ภาพประกอบที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ กับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน

จากภาพประกอบที่ 4-9 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันเพิ่มขึ้นจาก 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ได้ร้อยละ 30 ถึง 80 โดยประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ จะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น เนื่องมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาการ

บอเนชันระหว่างก๊าซ CO_2 กับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันสูงกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ความสามารถในการดูดซึมก๊าซ CO_2 แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวจำกัดปริมาณสารตั้งต้นของการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน ดังนั้นที่สภาวะการดำเนินการในการศึกษานี้จะได้สภาวะที่เหมาะสม คือ ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน เท่ากับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2.1.2 ผลของอัตราการไหลของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2

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

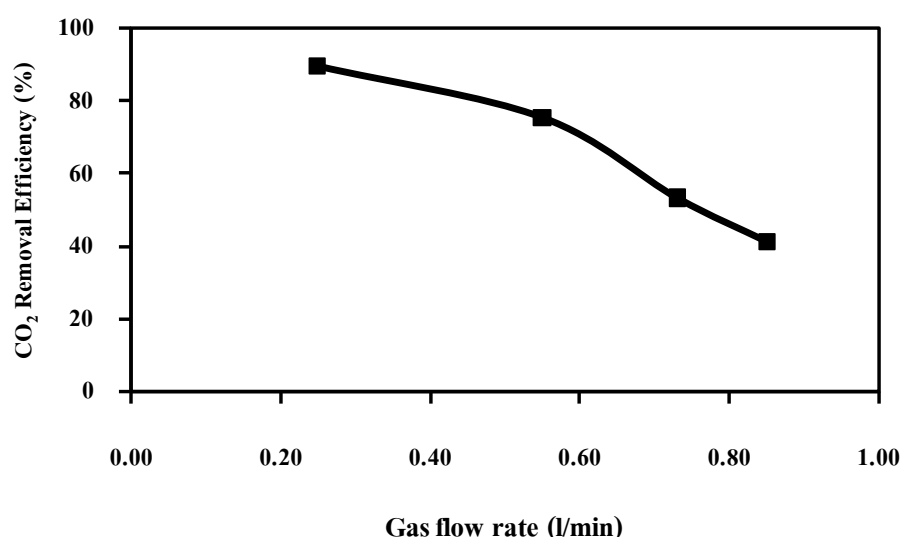


ภาพประกอบที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 กับอัตราการไหลของของเหลว

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

4.2.1.3 ผลของอัตราการไหลของก๊าซ CO_2 ต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2

การทดลองได้ควบคุมอัตราการไหลของเหลวให้เท่ากับ 0.6 ลิตรต่อนาทีและความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตริกเท่ากับ 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 CO_2 มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นมีผลต่อเวลาในการสัมผัสระหว่างเฟสของก๊าซและเฟสของเหลวลดลงจึงเกิดข้อจำกัดในการดูดซึม เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นจะต้านทานการไหลของสารดูดซึม (lin *et al.*, 2008) อีกทั้งอัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้นก็ทำให้มีปริมาณก๊าซ CO_2 เข้ามาในระบบมากขึ้นเลยทำให้ปริมาณแคลเซียมที่อยู่ในสารละลายไม่เพียงพอสำหรับกำจัดก๊าซ CO_2 ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

4.3 ผลการกำจัดก๊าซ CO_2 ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายจีตะกวนในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้คอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการด้วยเทคนิค Response Surface Methodology (RSM) ในการออกแบบการทดลอง

เทคนิค Response Surface Methodology (RSM) เป็นการรวบรวมข้อมูลทางสถิติ และเทคนิคทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและหาจุดที่เหมาะสมในกระบวนการ ซึ่งเทคนิค RSM ประกอบด้วย กลุ่มของตัวแปรตามหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการตอบสนองและตัวแปรอิสระ แผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) เป็นการออกแบบการทดลองทุกระดับของแต่ละปัจจัยห่างจาก Center ของการออกแบบเท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลางแต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 5 ระดับ $(-\alpha, -1, 0, 1, \alpha)$ งานวิจัยนี้จึงนำเทคนิค RSM แบบ CCD มาใช้ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองในการกำจัดก๊าซ CO_2 ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายจีตะกวนในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ

4.3.1 ผลการออกแบบการทดลองและผลตอบสนอง (Response)

การศึกษากำจัดก๊าซ CO_2 ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายจีตะกวนในคอลัมน์บรรจุห้องปฏิบัติการโดยใช้หลักการทางสถิติด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD มาช่วยในการออกแบบการทดลอง ซึ่งทำให้ได้จำนวนการทดลองที่ประกอบไปด้วย 17 การทดลอง ทำการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมในการทดลองที่ 18-20 เพื่อศึกษาแนวโน้มของตัวแปรอิสระให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ค่าการกำจัดก๊าซ CO_2 ที่ได้จากการทดลองในแต่ละการทดลองแสดงผลดังตารางที่ 4-3

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

การทดลอง	อัตราการไหล ของเหลว (ลิตรต่อนาที)	อัตราการไหล ของก๊าซ (ลิตรต่อนาที)	ความเข้มข้น ของแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพ การกำจัด 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 ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการชะละลายชีตะกรันในคอลัมน์บรรจุระดับห้องปฏิบัติการ ที่แสดงในตารางที่ 4-3 สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO₂ กับตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยเทคนิค RSM โดยใช้โปรแกรม Design Expert Software จะได้แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ ซึ่งมีรูปแบบสมการแบบ Quadratic model ทำให้ได้แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ (4-4)

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

เมื่อ y = ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ (ร้อยละ)

x_1 = อัตราการไหลของของเหลว (ลิตรต่อนาที)

x_2 = อัตราการไหลของก๊าซหรืออัตราการไหลอากาศเสีย (ลิตรต่อนาที)

x_3 = ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายชีตะกรัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

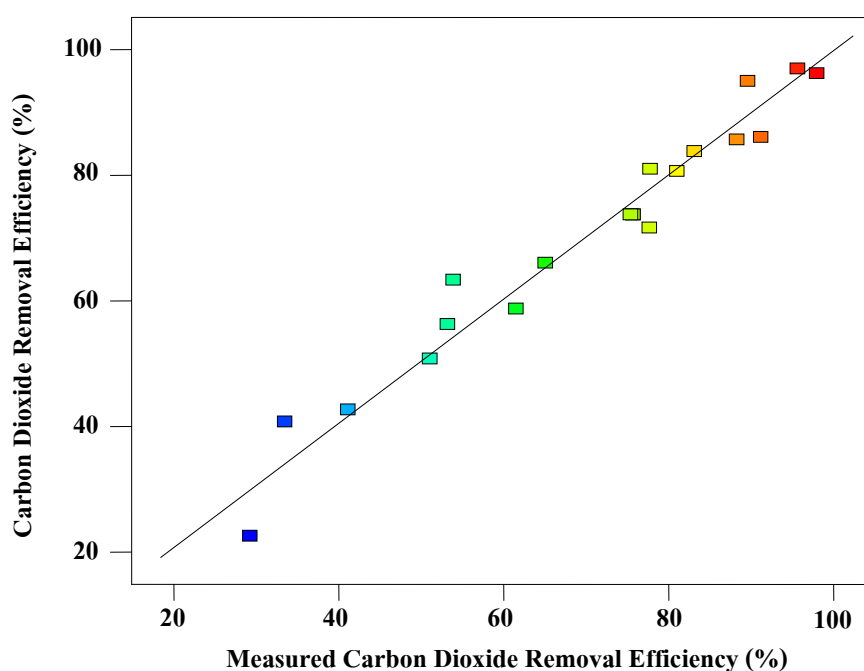
การพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองที่ได้จากสมการที่ (4-4) สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรบ่งบอกถึงความสำคัญของตัวแปรนั้นต่อผลประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO₂ โดยหากสัมประสิทธิ์ของตัวแปรใดมีค่าสูงกว่าตัวแปรอื่น (ไม่คิดเครื่องหมายบวกหรือลบ ซึ่งเครื่องหมายแสดงถึงผลของตัวแปรอิสระที่แปรผันตรงหรือแปรผกผันกับตัวแปรตาม ตามลำดับ) 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 ภายใต้ช่วงของเงื่อนไขการดำเนินงานดังข้อมูลที่ให้ไว้ในตารางดังกล่าว 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) ($R^2 = 0.9287$) ค่า R^2 เป็นค่าสถิติที่แสดงถึงสัดส่วนหรือร้อยละของความผิดพลาดที่แบบจำลองสามารถอธิบายได้จากสมการการ

ประมาณและเป็นค่าที่มีความสำคัญในการพิจารณาความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีความสำคัญอีกค่าหนึ่ง กล่าวคือค่า R^2 ควรมากกว่า 0.75 จึงเป็นค่าที่ยอมรับได้ (Seyedeh *et al.*, 2007) โดยค่า R^2 ที่ดีควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ส่วนค่า R^2_{adj} หากมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 แสดงว่าแต่ละเทอมในแบบจำลองที่ได้ล้วนส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมด 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 ที่ได้จากการค่าทดลองและจากการ คำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-4)

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

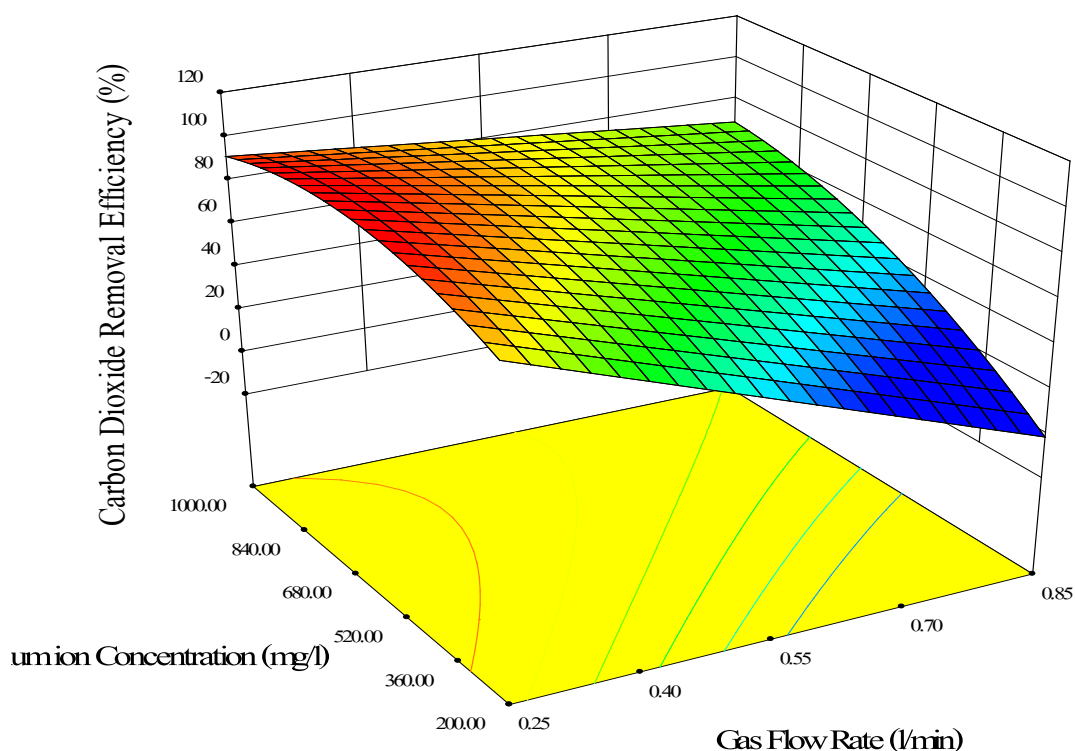
ได้ ($R^2 = 0.928$) แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 ในช่วงตัวแปรที่ศึกษาได้ดี

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) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตริก (x_3) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 ได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.3.3.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซ (x_2) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตริก (x_3)

ผลของความอัตราการไหลของก๊าซ (x_2) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตริก (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

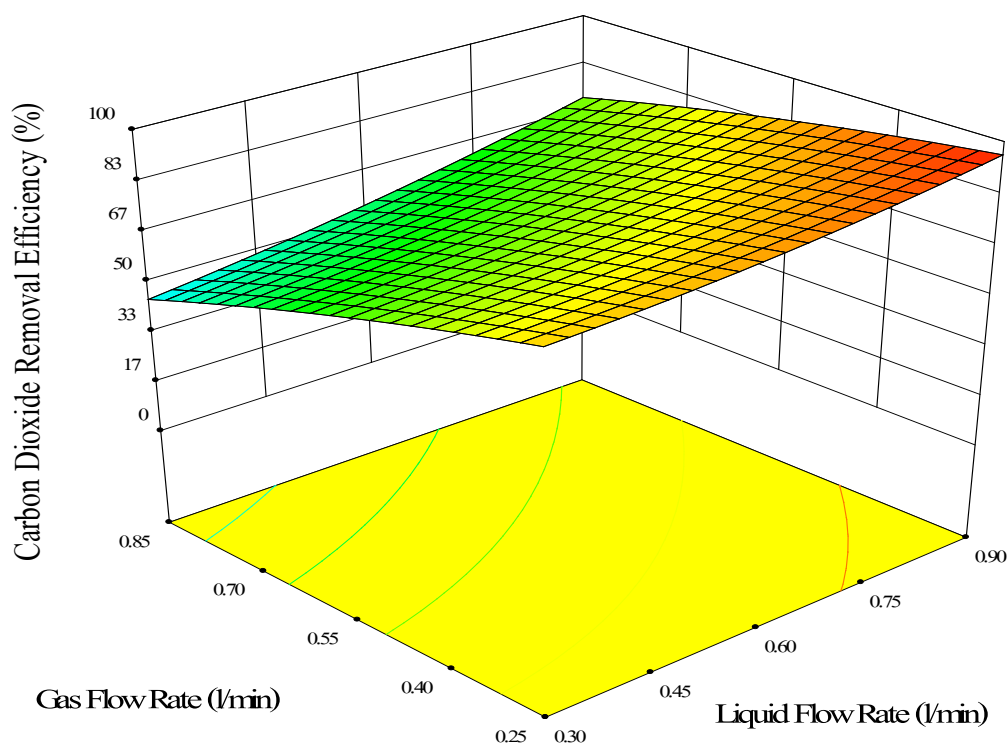


ภาพประกอบที่ 4-13 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการไหลของก๊าซ (x_2) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายจีตะกรีน (x_3) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2

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 เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับก๊าซ CO_2 สามารถเกิดได้เร็วขึ้นและเป็นการเพิ่มปริมาณของของเหลวจะเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างเฟสของเหลวกับเฟสของก๊าซส่งผลให้ประสิทธิภาพสูง จากสมการ (4-3) เมื่อพิจารณาอิทธิพลในเทอมของอัตราการไหลของของเหลว จะเห็นได้จากสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร (x_1) ที่มีค่าเป็นบวก เท่ากับ 54.11 ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 ของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และอัตราการไหลของก๊าซลดลงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (4-3) เมื่อพิจารณา

อิทธิพลในเทอมของอัตราการไหลของก๊าซ พบว่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร (x_2) ที่มีค่าเป็นลบ เท่ากับ 164.79

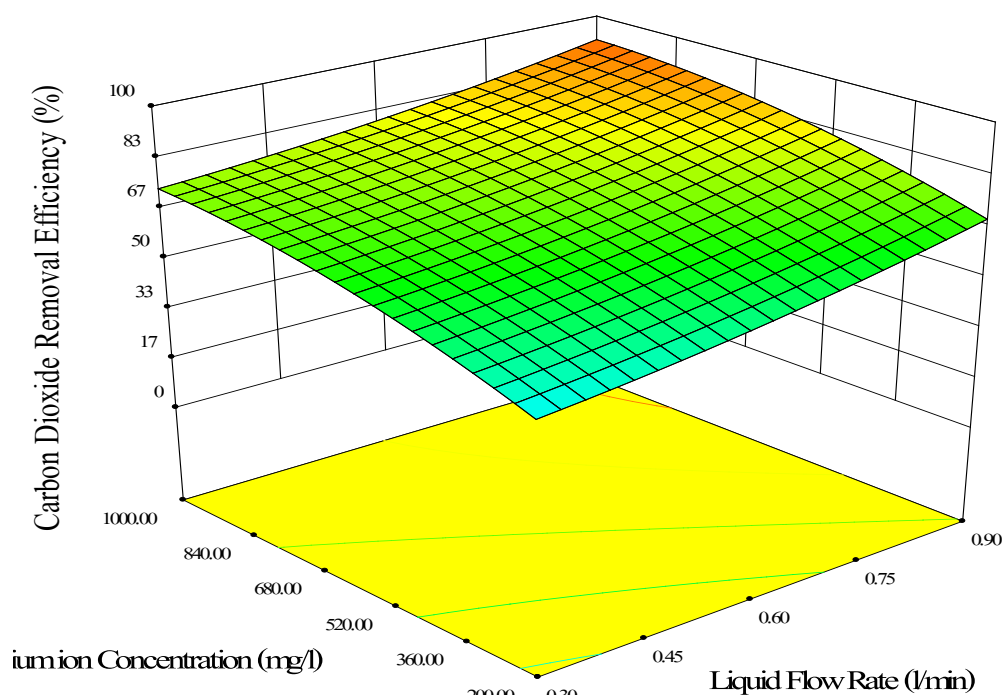


ภาพประกอบที่ 4-14 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการไหลของของเหลว (x_1) และอัตราการไหลของก๊าซ (x_2) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 ที่ระดับความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.3.2 ผลของอัตราการไหลของเหลว (x_1) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน (x_3)

ภาพประกอบที่ 4-15 แสดงผลของปฏิสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปรระหว่างอัตราการไหลของเหลว (x_1) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตะกรัน (x_3) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.55 ลิตรต่อวินาที 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) และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ได้จากการชะละลายซีตกรัน (x_3) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2

4.3.4 ผลของสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดก๊าซ CO_2

จากสมการแบบจำลองที่ (4-1) การกำจัดก๊าซ CO_2 ในช่วงของตัวแปรที่ทำการศึกษา สามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวทำนายประสิทธิภาพสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการได้ ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาผลเฉลยของสภาวะที่เหมาะสมได้โดยใช้โปรแกรม Design Expert Software จะให้ค่าที่ดีที่สุดที่ทำให้ผลการตอบสนองพื้นผิวหรือประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 สูงสุด และสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสภาวะการดำเนินการของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยอัตราการไหลของของเหลว (x_1) อัตราการไหลของก๊าซ (x_2) และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตกรัน (x_3) จากการวิเคราะห์ด้วยแนวทางข้างต้น พบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสม (Optimum Condition) ในการกำจัดก๊าซ CO_2 ได้คือ อัตราการไหลของของเหลว 0.77 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของก๊าซ 0.25 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตกรัน 725 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการควบคุมความ

เข้มข้นของก๊าซ CO_2 ให้คงที่ตลอดการทดลองที่ร้อยละ 15 โดยปริมาตร ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO_2 สูงสุดร้อยละ 97.83 โดยแสดงไว้ดังตารางที่ 4-5

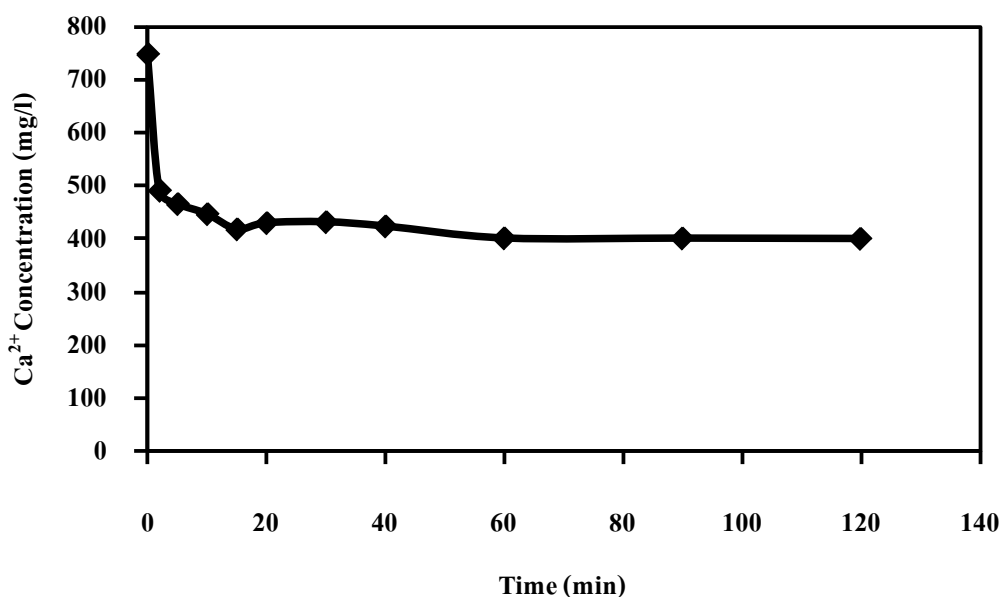
ตารางที่ 4-5 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซ CO_2 และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับผลการทดลอง

อัตราการใช้ ของเหลว (ลิตรต่อนาที) (x_1)	อัตราการใช้ 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 CO_2 ได้ในระดับดี และพบว่าผลลัพธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ CO_2 ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณไว้ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 5 เป็นตัวบ่งบอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์

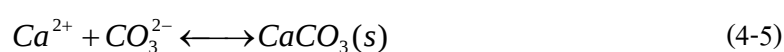
4.3.5 ประสิทธิภาพที่สภาวะที่เหมาะสมกับเวลาการใช้งาน

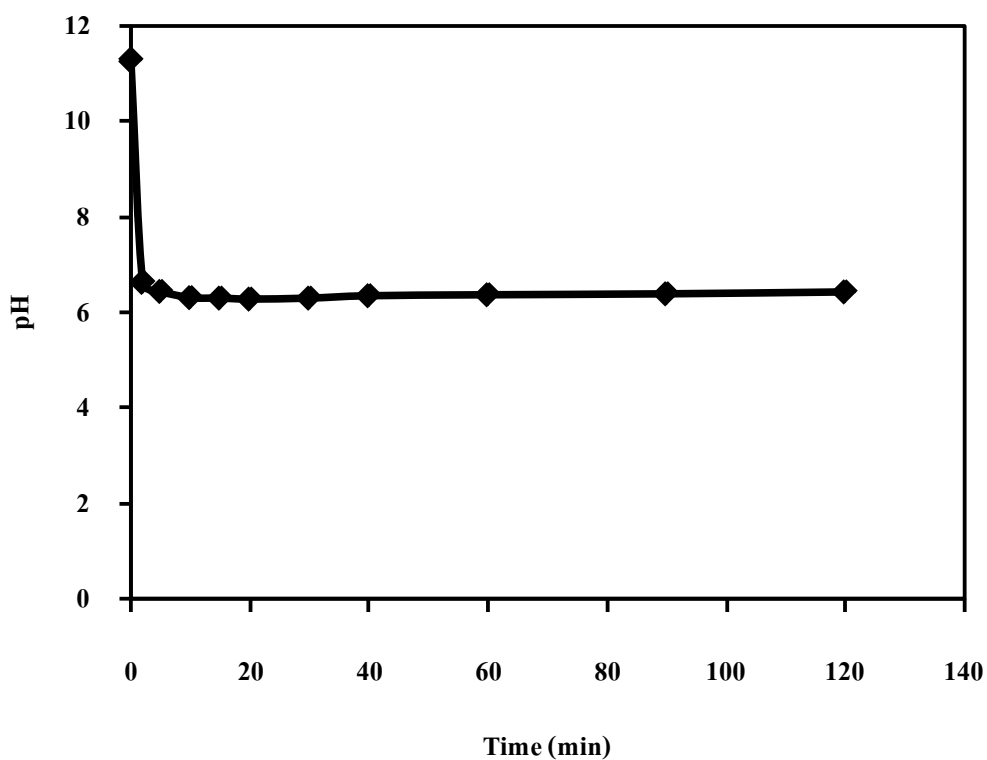
ในการศึกษานี้ได้นำผลของสภาวะที่เหมาะสมมาทำการศึกษาผลของเวลาในการกำจัดก๊าซ CO_2 โดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายซีตะกรันด้วยน้ำปราศจากไอออนมาเป็นสารดูดซับในคอลัมน์บรรจุในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองที่อัตราการใช้ของเหลว 0.77 ลิตรต่อนาที อัตราการใช้ของก๊าซ 0.25 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลาย 725 มิลลิกรัมต่อลิตรและการทดลองนี้เป็นการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยซีตะกรันแบบวนซ้ำสารละลายในระบบเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แสดงผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4-16 ถึง 4-17 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ค่าพีเอช และประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ช่วงเวลาต่างๆ ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลา

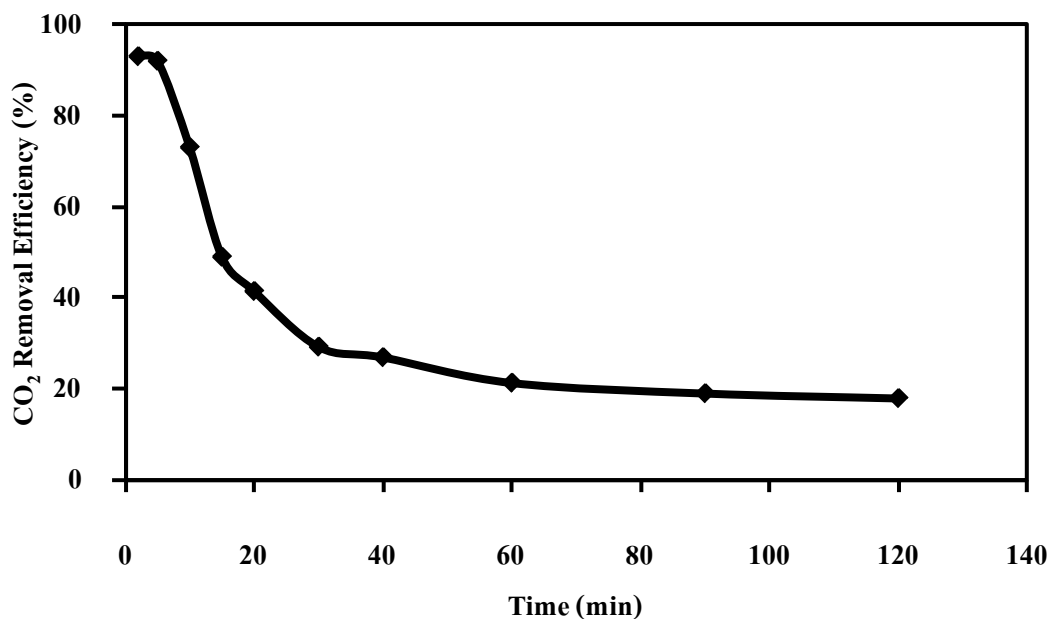
จากภาพประกอบที่ 4-16 พบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงจาก 747.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 475.89 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วง 2 นาทีแรก หลังจากนั้นความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อยู่ที่ 430 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซ CO₂ เป็นปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน ก๊าซ CO₂ จะเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอเนตไฮดรอกไซด์ (CO₃²⁻) เข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยาดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณไฮดรอกไซด์ (OH⁻) ในระบบ แต่หลังจากเวลาผ่านไป 2 นาที พีเอชของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงจาก 11.3 เหลือ 6.48 ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตไม่สามารถเกิดขึ้นได้เพราะการเกิดปฏิกิริยาข้างต้นจะเกิดขึ้นได้ที่พีเอชมากกว่า 8.3 ส่งผลให้ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่และสอดคล้องกับงานวิจัยของ จุฑามาศ (2548) ซึ่งพบว่าการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเป็นผลมาจากค่าสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเมื่อเกิดสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่สูงกว่าค่าการละลายน้ำ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (4-5)





ภาพประกอบที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลา

จากภาพประกอบที่ 4-17 พบว่าค่าพีเอชของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงหลังปฏิกิริยาคลอไรด์ผ่านไประยะเวลา 2 นาที พีเอชสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงจาก 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 เนื่องจากในปฏิกิริยาดูดซึมก๊าซ CO₂ นั้นสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนที่ใช้เป็นสารดูดซับนั้นจะค่อยๆ ดูดซับก๊าซ CO₂ และอิ่มตัว ทำให้ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ และในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง แรงขับเคลื่อนในระบบจึงลดลง และเมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ CO₂ จะคงที่

4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต (Economic analysis)

4.4.1 การประมาณค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากกระบวนการชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนซึ่งใช้เป็นสารดูดซับก๊าซ CO₂

ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการชะละลายประกอบด้วย จีตะกรัน ค่าไฟฟ้าจากการบัด ค่าไฟฟ้าจากการร่อนตะแกรง ค่าไฟฟ้าจากการอบและค่าไฟฟ้าจากการกวนผสม ซึ่งสามารถคำนวณจำนวนหน่วยการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสมการที่ 4-5 และส่วนของอัตราค่าไฟฟ้าและรายละเอียดการคำนวณค่าใช้จ่ายแสดงดังตารางที่ 4-6 และ 4-8 ตามลำดับ

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

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

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

$$\text{Cost} = W \times C \quad (4-6)$$

เมื่อ C = ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)

W = หน่วยการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)

ตารางที่ 4-7 ผลของการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (100 ลิตร)

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

จากตารางที่ 4-7 พบว่าค่าใช้จ่ายในการเตรียมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์คือ 1.27 บาท/ลิตร และค่าต้นทุนของสารดูดซึมสำหรับการกำจัด CO₂ เมื่อพิจารณาค่า L/G ที่เหมาะสม คือ L/G = 3.08 โดยให้ประสิทธิภาพ 97% ดังนั้นถ้าใช้สารละลาย 100 ลิตรจะสามารถบำบัดก๊าซ CO₂ ได้ประมาณ 32.5 ลิตร คิดเป็น 3.92 บาท/ลิตรของก๊าซ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าต้นทุนในการเตรียมสารดูดซึม พบว่าค่าใช้จ่ายเกือบทั้งหมดเป็นค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบขี้ตะกรัน (102.78 บาท จากค่าไฟฟ้าทั้งหมด 123 บาท) ซึ่งถ้าปรับขั้นตอนเตรียมขี้ตะกรันให้เหมาะสมก็จะสามารถลดต้นทุนของสารดูดซึมและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด CO₂ ลงได้อย่างมีนัยสำคัญ