การควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์

นายอานนท์ สิทธิเวช

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTROL OF SULFUR DIOXIDE BY PACKED BED SCRUBBER

Mr.Arnon Sitdhivej

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2009
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์
โดย	นายอานนท์ สิทธิเวช
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา เทพไพฑูรย์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อานนท์ สิทธิเวช : การควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์. (CONTROL OF SULFUR DIOXIDE BY PACKED BED SCRUBBER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์, 164 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ในการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ รวมทั้งศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม เส้นผ่านศูนย์กลางแพคเบดสครับเบอร์ 0.15 เมตร บรรจุตัวกลางชนิดเฮ็ดจ์ฮ็อก (Hedgehog) สูง 1.5 เมตร เดินระบบแบบกระแสไหลสวนทางกัน โดยแปรผันความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้น 1,000–4,000 ส่วนในล้านส่วน อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5–18.1 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0-0.005 โมลต่อลิตร อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ 27.9–83.6 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร-ชั่วโมง

ผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์ พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง และพบว่าอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซที่เหมาะสมคือ มากกว่า 13.5 ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และอัตราการไหลโดยโมลก๊าซเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้นเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีค่าลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมที่สภาวะการทดลองต่าง ๆอยู่ในช่วง 27–338 กิโลกรัมโมลต่อลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง-บรรยากาศ และมีค่าความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลอยู่ในช่วง 0.2–2.2 เมตร

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต อานนท์ สิทธิเวช
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา 2552

5070647021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS : SULFUR DIOXIDE / PACKED BED SCRUBBER / GAS ABSORPTION / OVERALL MASS TRANSFER COEFFICIENT

ARNON SITDHIVEJ: CONTROL OF SULFUR DIOXIDE BY PACKED BED SCRUBBER. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.WONGPUN LIMPASENI, 164 pp.

The objective of this research was to study parameter effects on the overall mass transfer coefficient and sulfur dioxide control efficiency using counter-current bench scale packed bed scrubber with the internal diameter 0.15 m and packed with 1.5 inch polypropylene Hedgehog, the height of packing media being 1.5 m. The initial SO_2 concentration was varied from 1,000–4,000 ppm, L/G ratio varied from 4.5–18.1, NaOH concentration varied from 0–0.005 mol/l and gas mass flow rate varied from 27.9–83.6 kg_{mole}/m^2-hr

The results indicated that the removal efficiency increased with L/G ratio and NaOH concentration and decreased with the increased initial SO_2 concentration and also found that the major parameter affecting the SO_2 removal efficiency is the L/G ratio. The optimum L/G ratio is more than 13.5 that provides SO_2 removal efficiency more than 90% at various initial SO_2 concentrations. Similarly, the overall mass transfer coefficient increased with L/G ratio and gas flow rate and decreased with the increased initial SO_2 concentration. The overall mass transfer coefficient ranged from 27 to 338 kg_{mol}/m^3-hr-atm and height of transfer units ranged from 0.2 to 2.2 meters at overall experimental conditions.

Department : Environmental Engineering	Student's Signature Arnon Sitdhivej
Field of Study : Environmental Engineering	Advisor's Signature Won Lim
Academic Year : 2009	

กิตติกรรมประกาศ

คุณความดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้แก่บิดามารดา ผู้ที่มีพระคุณอย่างสูงยิ่ง ซึ่งคอยให้การเลี้ยงดู การอบรม การศึกษา มาตั้งแต่เยาว์วัย และยังได้ให้คำปรึกษาคำแนะนำ และกำลังใจที่ดีที่สุดในระหว่างการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ คำชี้แนะ ถ่ายทอดวิชาความรู้ในด้านต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ใน ครั้งนี้ ตลอดจนประสบการณ์ทำงานต่างๆที่ได้จากการเป็นผู้ช่วยอาจารย์และผู้ช่วยวิจัย รวมทั้ง สนับสนุนเงินทุนในการวิจัยนี้ตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา เทพไพฑูรย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้เกียรติและสละเวลามาเป็นกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ รวมทั้งให้คำแนะนำต่างๆอันเป็นประโยชน์ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา เทพไพฑูรย์ อาจารย์ประจำภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่อนุเคราะห์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยครั้งนี้ อาจารย์ ดร.อัจฉริยา สุริยะวงศ์ และ อาจารย์ ดร.พรรณวดี สุวัฒิกะ สำหรับคำแนะนำในเรื่องต่างๆ ครูอนันต์ วีระณรงค์ ที่ได้อนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการ ทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการ ทำวิทยานิพนธ์นี้

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้อง ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็น กำลังใจให้เสมอจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..จ
กิตติกรรมประกาศ..ฉ
สารบัญ..ช
สารบัญตาราง..ฏ
สารบัญภาพ..ฑ
บทที่ 1 บทนำ..1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..5
2.1 ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์..5
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์..5
2.1.2 แหล่งกำเนิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์..6
2.1.3 ผลกระทบของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์..7
2.1.4 มาตรฐานการระบายก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรม......10
2.2 การควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์..12
2.2.1 การเลือกใช้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณซัลเฟอร์เป็นส่วนผสมต่ำ..12
2.2.2 การควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างที่เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้....13
2.2.3 การนำถ่านหินไปผ่านกระบวนการเปลี่ยนถ่านหินให้เป็นเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปก๊าซ..13
2.2.4 การนำถ่านหินซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งไปผ่านกระบวนการให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงเหลว..13
2.2.5 การควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นหลังการเผาไหม้..13
2.3 การดูดซึมก๊าซ..17
2.3.1 นิยามและทฤษฎี..17
2.3.2 กลไกการดูดซึม..18
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์..19
2.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร..21

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย....................22
2.4.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม....................23
2.5 แพคเบดสครับเบอร์....................25
2.5.1 ประเภทของแพคเบดสครับเบอร์....................25
2.5.2 ส่วนประกอบภายในแพคเบดสครับเบอร์....................28
2.5.2.1 ตัวกลางบรรจุ....................28
2.5.2.2 อุปกรณ์ดักจับละอองน้ำ....................31
2.5.2.3 แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุ....................31
2.5.2.4 ตัวกระจายของเหลว....................32
2.5.2.5 ตัวกระจายของเหลวซ้ำ....................33
2.5.2.6 แผ่นทับหน้า....................33
2.6 การออกแบบแพคเบดสครับเบอร์....................34
2.6.1 อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ....................34
2.6.2 ความต้องการของเหลวในระบบ....................36
2.6.3 เส้นผ่านศูนย์กลางของแพคเบดสครับเบอร์....................36
2.6.4 ความสูงของตัวกลางบรรจุ....................36
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการเดินระบบ....................39
2.7.1 ความดันลด....................39
2.7.2 การคงค้างของของเหลว....................39
2.7.3 การกระจายของของเหลว....................39
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....................41
2.9 สรุปผลการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....................47

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย....................48
3.1 รูปแบบและแผนงานวิจัย....................48
3.2 ระบบการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์....................50
3.2.1 ระบบการผสมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์....................53
3.2.2 ระบบแพคเบดสครับเบอร์....................54
3.2.3 ระบบสารดูดซึม....................57
3.3 ระบบการตรวจวัดและการควบคุมตัวแปร....................60
3.3.1 ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์....................60
3.3.2 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์....................61

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3 ความดันลด....61
3.3.4 ค่าพีเอช....62
3.3.5 อัตราการไหลก๊าซ.... 62
3.3.6 ระบบการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.... 63
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย....64
3.4.1 การศึกษาผลเบื้องต้นของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์....64
3.4.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.... 65
3.4.3 การศึกษาผลของอัตราการไหลโดยโมลของก๊าซที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์....69
3.4.4 การศึกษาผลของการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับมาใช้ซ้ำที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์.... 70

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.... 71
4.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์....71
4.1.1 ผลการศึกษาเบื้องต้นของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.... 71
4.1.2 ผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์....74
4.1.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์....77
4.1.4 ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์....81
4.1.5 ผลของอัตราการไหลโดยโมลของก๊าซที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์....86
4.1.6 ผลของการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับมาใช้ซ้ำ.... 88

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.17 ผลการศึกษาความดันลดของระบบแพคเบดสครับเบอร์ และพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์....90
4.2 การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมของการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์....93
4.2.1 ผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม....94
4.2.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม....95
4.2.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม....98
4.2.4 ผลของอัตราการไหลโดยโมลของก๊าซที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม....100
4.2.5 สรุปผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและการนำไปประยุกต์ใช้....102

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....106
5.1 สรุปผลการทดลอง....106
5.1.1 ผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์....106
5.1.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ....106
5.1.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์....107
5.1.4 ผลของอัตราการไหลโดยโมลของก๊าซ....107
5.1.5 ผลของการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับมาใช้ซ้ำ....107
5.1.6 ผลการศึกษาความดันลดของระบบแพคเบดสครับเบอร์ และพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์....108
5.2 การนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบแพคเบดสครับเบอร์....108
5.3 ข้อเสนอแนะ....110
รายการอ้างอิง....111
ภาคผนวก....116
ภาคผนวก ก. การออกแบบแพคเบดสครับเบอร์....117
ภาคผนวก ข. การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม....124

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์...127
ภาคผนวก ง. วิธีวิเคราะห์หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย
โซเดียมไฮดรอกไซด์... 131
ภาคผนวก จ. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
ที่ตัวแปรต่างๆ..134
ภาคผนวก ฉ. ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม
และความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล...140
ภาคผนวก ช. ผลการศึกษาค่าพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.. 146
ภาคผนวก ซ ผลการศึกษาความดันลดภายในระบบแพคเบดสครับเบอร์................. 152
ภาคผนวก ฌ ผลการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียม
ไฮดรอกไซด์...158
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..163

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.................................. 5
2.2 ผลกระทบของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อมนุษย์...9
2.3 มาตรฐานการระบายก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรม........................ 10
2.4 กระบวนการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์... 16
2.5 ค่าคงที่ของเฮนรี่สำหรับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในน้ำ...18
2.6 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแพคเบดสครับเบอร์ที่มีกระแสการไหลแตกต่างกัน............ 25
2.7 ขนาดของตัวกลางบรรจุที่ควรใช้สำหรับแพคเบดสครับเบอร์ที่บรรจุตัวกลางแบบสุ่ม..... 28
2.8 ลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์ของตัวกลางบรรจุชนิดต่าง ๆ...27
2.8 เปรียบเทียบตัวแปรและค่าที่ใช้ในงานวิจัยต่าง ๆที่ผ่านมา..41
2.9 งานวิจัยที่ศึกษาเพิ่มเติม..44
3.1 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามของงานวิจัย.. 51
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์... 50
3.3 การปรับอัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้ได้อัตราส่วน
โดยโมลของของเหลวต่อก๊าซที่ต้องการ...63
3.4 การศึกษาผลเบื้องต้นของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้น
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์...65
3.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อัตราส่วนโดยโมล
ของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
ที่มีต่อประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์...66
3.6 การศึกษาผลของอัตราการไหลโดยโมลของก๊าซที่มีต่อประสิทธิภาพ
ของแพคเบดสครับเบอร์... 69
3.7 การศึกษาผลของการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
เพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ.. 70
4.1 เปรียบเทียบหน่วยของตัวแปรต่าง ๆ... 93
4.2 ผลการคำนวณความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์
ไดออกไซด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน.. 103
4.3 ผลการคำนวณความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์
ไดออกไซด์ 2,000 ส่วนในล้านส่วน.. 103
4.4 ผลการคำนวณความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์
ไดออกไซด์ 3,000 ส่วนในล้านส่วน.. 104
4.5 ผลการคำนวณความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์
ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน.. 104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

5.1 ขอบเขตการทดลองและตัวแปรที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน........................109
ง การเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ...132
จ-1 ผลการศึกษาเบื้องต้นของผลของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ
และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์..135
จ-2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตัวแปรต่างๆ................ 136
ฉ ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม
และความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล...141
ช ผลการศึกษาพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์..147
ซ ผลการศึกษาความดันลดภายในระบบแพคเบดสครับเบอร์..153
ฌ ผลการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์........................... 159

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

1.1 ปริมาณการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จำแนกตามสาขาในปี 2547–2551............ 1
2.1 ระบบการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบแห้ง...14
2.2 ระบบควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบนำผลิตภัณฑ์กลับไปใช้ใหม่......................15
2.3 ระบบควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบไม่นำผลิตภัณฑ์กลับไปใช้ใหม่.................15
2.4 ลักษณะการดูดซึมทางกายภาพของหยดน้ำ...17
2.5 ลักษณะการดูดซึมทางเคมี...18
2.6 ทฤษฎีฟิล์มสองชั้น.. 18
2.7 แบบจำลองของทฤษฎีฟิล์มสองชั้น..22
2.8 แพคเบดสครับเบอร์ที่มีกระแสการไหลทางเดียวกัน...26
2.9 แพคเบดสครับเบอร์ที่มีกระแสการไหลสวนทางกัน..27
2.10 แพคเบดสครับเบอร์ในแนวระดับที่มีกระแสการไหลตัดกัน...................................... 27
2.11 อุปกรณ์ดักจับละอองน้ำ... 31
2.12 แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุ... 32
2.13 ตัวกระจายของเหลว.. 32
2.14 ตัวกระจายของเหลวซ้ำ..33
2.15 แผ่นทับหน้า...34
2.16 สมดุลมวลสารของระบบแพคเบดสครับเบอร์..35
2.17 ความสัมพันธ์ของความเร็วอากาศในแพคเบดสครับเบอร์ที่ทำให้
ของเหลวไหลย้อนกลับกับความดันลด..37
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วของก๊าซ... 39
3.1 แผนงานการดำเนินการวิจัย...49
3.2 แผนผังระบบบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์....................... 51
3.3 ระบบควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์................................52
3.4 ระบบการผสมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์...53
3.5 ตัวกลางชนิดเทลเลอเรทท์...54
3.6 คอลัมน์.. 55
3.7 ตัวกลางชนิดเฮ็ดจ์ฮ็อก..56
3.8 แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุและการติดตั้ง.. 56
3.9 อุปกรณ์ดักจับละอองน้ำ... 57
3.10 การติดตั้งอุปกรณ์ดักจับละอองน้ำ... 57
3.11 การติดตั้งระบบสารดูดซึมและการระบายน้ำเสีย...58
3.12 ปั๊มหอยโข่ง... 58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3.13 ตัวกระจายของเหลว........ 59
3.14 การติดตั้งตัวกระจายของเหลว........ 59
3.15 ฟุตวาล์ว........60
3.16 เครื่องวัดก๊าซไอเสียและค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้แบบพกพา........61
3.17 การติดตั้งมานอมิเตอร์........61
3.18 โรตามิเตอร์สำหรับวัดอัตราการไหลก๊าซ........62
3.19 เครื่องวัดความเร็วลมและอุณหภูมิชนิด Hot Wire........ 62
3.20 โรตามิเตอร์สำหรับวัดอัตราการไหลสารละลาย........ 63
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซและความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์........ 72
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไอดรอกไซด์........73
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 โมลต่อลิตร........74
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.001 โมลต่อลิตร........75
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.003 โมลต่อลิตร........76
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 โมลต่อลิตร........77
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 โมลต่อลิตร........78
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.001 โมลต่อลิตร........79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.003 โมลต่อลิตร............................ 80
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 โมลต่อลิตร............................ 80
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 4.5...82
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 9.0...83
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 13.5...84
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 18.1...84
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และอัตราการไหลของก๊าซโดยโมล ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน...86
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับอัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์...87
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับช่วงเวลาเดินระบบเมื่อนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กลับมาใช้ซ้ำ.. 88
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากระบบ แพคเบดสครับเบอร์กับช่วงเวลาในการเดินระบบเมื่อนำสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์กลับมาใช้ซ้ำ.. 89
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่าง ๆ.. 90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหลสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 91
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม กับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 โมลต่อลิตร 93
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม กับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.001 โมลต่อลิตร 94
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม กับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.003 โมลต่อลิตร 94
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม กับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 โมลต่อลิตร 95
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 โมลต่อลิตร 96
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.001 โมลต่อลิตร 96
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.003 โมลต่อลิตร 97
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 โมลต่อลิตร 97
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน 98
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2,000 ส่วนในล้านส่วน 99

สารบัญภาพ (ต่อ)

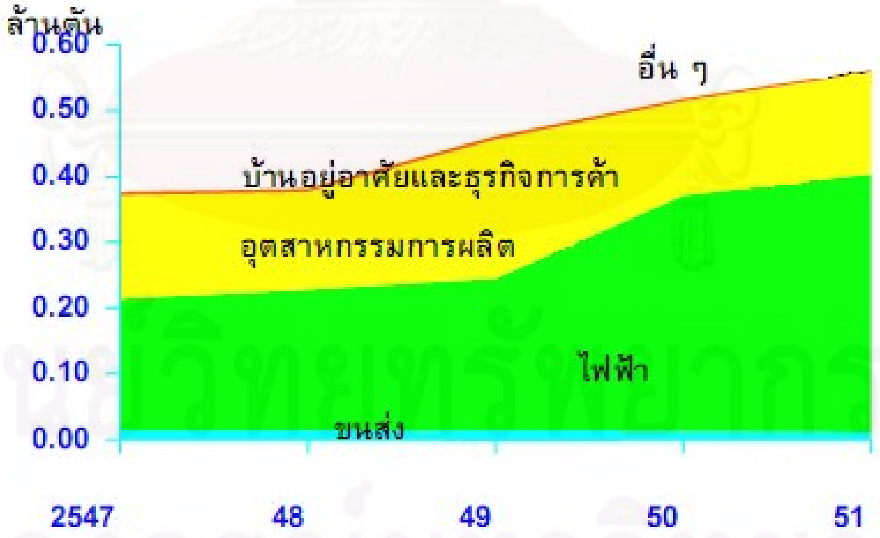
ภาพที่		หน้า
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3,000 ส่วนในล้านส่วน	99
4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน	100
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม กับอัตราการไหลของก๊าซโดยโมล ที่อัตราการไหลสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ	101
4.34	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม กับอัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซต่างๆ	102

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปี พ.ศ.2551 ประเทศไทยได้มีการนำเข้าถ่านหินรวมทั้งสิ้น 10,034 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นปีที่ 10 และเพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 12.1 ทั้งนี้เนื่องจากความต้องการใช้ถ่านหินในภาคอุตสาหกรรมการผลิตที่เพิ่มขึ้น (กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซมลพิษที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้สารอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่านหิน น้ำมันหรือน้ำมันเตา เชื้อเพลิงชีวมวล เป็นต้น เมื่อซัลเฟอร์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะเกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปล่อยออกมาพร้อมกับก๊าซไอเสีย (Flue gas) พบได้ในอุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้า อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมถลุงโลหะ เป็นต้น จากการประมาณปริมาณการปล่อยมลพิษทางอากาศจำแนกตามชนิดและสาขา ของกรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551 พบว่าแหล่งกำเนิดหลักของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาจากโรงไฟฟ้า ซึ่งปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ประมาณ 0.38 ล้านตัน ดังรูปที่ 1.1 จากการศึกษาความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในไอเสียพบว่าจะอยู่ในช่วง 100–4,000 ส่วนในล้านส่วน (Majeed, Korda และ Bekassy-Molar, 1995)



รูปที่ 1.1 ปริมาณการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จำแนกตามสาขาในปี 2547–2551 (กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551)

หากปราศจากกระบวนการควบคุมที่เหมาะสมแล้วจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของมนุษย์ตามมา การเกิดฝนกรด (Acid Rain) เป็นปัญหามลภาวะอากาศที่มีสาเหตุหลักมาจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบอย่างกว้างขวางต่อประชาชน (Chien และ Chu, 2000) สำหรับผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์นั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและระยะเวลาสัมผัส โดยอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ เช่น โรคหลอดลมอักเสบเรื้อรัง เป็นต้น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยมากขึ้นเมื่ออยู่รวมกับฝุ่นละออง เนื่องจากฝุ่นละอองจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กลายเป็นกรดซัลฟูริกได้เร็วยิ่งขึ้น ทำให้เป็นอันตรายต่อปอดตลอดจนเพิ่มความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของอากาศภายในระบบทางเดินหายใจ (Haq และ Schwela, 2002) และในบางครั้งเมื่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในบรรยากาศจะสามารถเปลี่ยนเป็นซัลเฟต ซึ่งจะมีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน มีผลทำให้การมองเห็น (Visibility) ลดลง (Srivastava, Jozewicz และ Singer, 2001)

ประเทศต่างๆได้มีการปรับปรุงกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมที่มีการเผาไหม้ถ่านหินให้มีความเข้มงวดมากขึ้น (Ebrahimi และคณะ, 2003) สำหรับประเทศไทยนั้นได้มีประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องกำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ.2549 ว่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) จากอุตสาหกรรมการผลิตที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ต้องไม่เกิน 700 ส่วนในล้านส่วน สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตทั่วไปที่ไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต้องไม่เกิน 500 ส่วนในล้านส่วน ด้วยเหตุนี้โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกจากปล่องไม่ให้เกินมาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนด

แนวทางในการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาไหม้ (Flue Gas Desulfurization: FGD) อย่างมีประสิทธิภาพนั้นมักใช้กระบวนการดูดซึมก๊าซ (Gas absorption) สำหรับสารดูดซึมก๊าซมลพิษส่วนใหญ่แล้วจะเป็นสารละลายด่างของโซเดียม แคลเซียมหรือแมกนีเซียม ในจำนวนสารดูดซึมดังกล่าวข้างต้นพบว่า สารละลายด่างของโซเดียมเป็นสารดูดซึมที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Colle และคณะ, 2005) อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการควบคุมก๊าซมลพิษโดยอาศัยกระบวนการดูดซึมคือ แพคเบดสครับเบอร์ (Packed Bed Scrubber) โดยมีการกระจายสารดูดซึมเหนือชั้นตัวกลางเพื่อช่วยให้ก๊าซมลพิษและสารดูดซึมมีการสัมผัสกันมากที่สุด (Richards, 2000)

จากการศึกษาของธนิตา ทองเงา (2551) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์ ได้แก่ ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ (L/G) อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ และความเข้มข้นของ

สารดูดซึม สำหรับงานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆดังกล่าวข้างต้นเพิ่มเติมโดยการเพิ่มความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ และความเข้มข้นสารดูดซึม รวมทั้งศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและควบคุมการเดินระบบแพคเบดสครับเบอร์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ในการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารดูดซึม

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ในการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

1.2.3 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมของการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Bench Scale) ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ณ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตของงานวิจัยไว้ดังนี้

1.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ในการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ทำการศึกษา ได้แก่

- ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตั้งแต่ 1,000, 2,000, 3,000 และ 4,000 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ
- อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ (L/G) ตั้งแต่ 4.5–67.7
- อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ 27.9–83.6 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร-ชั่วโมง
- ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตั้งแต่ 0.001–0.005 โมลต่อลิตร
- ผลของการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับไปใช้ในการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซ้ำ

1.3.2 แพคเบดสครับเบอร์ทำด้วยอะคริลิก เป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ภายในคอลัมน์นั้นจะประกอบด้วย ตัวกลางบรรจุ แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุ ตัวกระจายของเหลว และอุปกรณ์ดักจับละอองน้ำ

1.3.3 ตัวกลางบรรจุ (Packing Media) ที่ใช้เป็นแบบชนิดเฮ็ดจ์ฮ็อก (Hedgehog) ทำมาจากพลาสติกโพลีโพรพิลีน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว มีพื้นที่ผิวประมาณ 500 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร และค่า Packing Factor (F_p) เท่ากับ 150 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร โดยบรรจุตัวกลางสูงเท่ากับ 1.5 เมตร

1.3.4 ตัวแปรตามที่ทำการศึกษาได้แก่ ประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ ความดันลดของระบบแพคเบดสครับเบอร์ ค่าพีเอช ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถใช้เป็นข้อมูลเพื่อประยุกต์ในการออกแบบและเดินระบบควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์ในอุตสาหกรรมต่างๆได้

1.4.2 แพคเบดสครับเบอร์เป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาผลกระทบที่เกิดจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกจากอุตสาหกรรมต่างๆได้

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

สารประกอบของซัลเฟอร์ที่สามารถพบได้ในบรรยากาศมีอยู่ 3 ชนิด คือ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และซัลเฟต (SO_4^{2-}) โดยส่วนใหญ่แล้วซัลเฟตจะอยู่ในรูปของละอองไอ (aerosol) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารประกอบของซัลเฟอร์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นมลพิษที่มีผลกระทบมากที่สุด ก่อให้เกิดผลเสียหายในวงกว้างต่อมนุษย์ สัตว์ พืช ตลอดจนวัสดุสิ่งก่อสร้างต่างๆ (กุลยา โอตากะ, 2545)

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่ไวไฟ ไม่ระเบิด มีกลิ่นฉุน สามารถรับรู้ได้แม้ที่ระดับความเข้มข้นต่ำเพียง 0.35–1.05 ส่วนในล้านส่วน โดยลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี	ค่า
น้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	64.06
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	-72.7
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	-10.02
ความหนาแน่น (กรัมต่อลิตร)	2.551
ค่าคงที่เฮนรี่ (ความดันบรรยากาศ-ลูกบาศก์เมตร ต่อโมล)	0.00081
ความสามารถในการละลายน้ำ (ที่ 1013 กิโลปาสคาล, กรัมต่อ 100 กรัมน้ำ)	
0 °C	22.791
10 °C	16.413
20 °C	11.577
30 °C	8.247
40 °C	5.881

ที่มา: Kirk และ Othmer, 1983

2.1.2 แหล่งกำเนิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศมาจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่งคือ จากการกระทำของมนุษย์และจากแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ ดังนี้

1) แหล่งกำเนิดจากการกระทำของมนุษย์ เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ถ่านหินบางแหล่งนั้นมีปริมาณซัลเฟอร์สูงถึงร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อเผาไหม้ถ่านหิน ซัลเฟอร์จะถูกออกซิไดซ์ได้เป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.1

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2 \tag{2.1}$$

นอกจากนี้ในการเผาไหม้อาจเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ด้วยเช่นกัน แต่มีปริมาณไม่มากนัก สำหรับซัลเฟอร์ที่เป็นองค์ประกอบในถ่านหินชนิดต่าง ๆ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเหล็กไพไรต์ (Iron pyrite) ซึ่งมีสูตรทั่วไปคือ FeS_2 เมื่อเหล็กไพไรต์เกิดการเผาไหม้ซัลเฟอร์ที่เป็นองค์ประกอบของเหล็กไพไรต์จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.2

$$4FeS_2 + 11O_2 \longrightarrow 2Fe_2O_3 + 8SO_2 \tag{2.2}$$

การประมาณปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ระบายออกมาจากกระบวนการผลิตนั้น สามารถประมาณได้จากปริมาณซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงแต่ละชนิด แหล่งกำเนิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงอีกแหล่งหนึ่ง ก็คือ อุตสาหกรรมถลุงโลหะที่ไม่ใช่พวกเหล็ก เช่น การถลุงตะกั่ว นิเกิลหรือสังกะสี โดยโลหะเหล่านี้จะอยู่ในรูปสินแร่ซัลไฟด์ ซึ่งจะต้องกำจัดออกโดยการเผาในสภาวะที่มีออกซิเจน ส่งผลให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาด้วย (กุลยา โอตากะ, 2545) ดังสมการที่ 2.3

$$2NiS(s) + 3O_2\,(g) \longrightarrow 2NiO(s) + 2SO_2\,(g) \tag{2.3}$$

2) แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ ธรรมชาติก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปริมาณไล่เลี่ยกับส่วนที่เป็นผลมาจากการกระทำของมนุษย์ (วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์, นิตยา มหาผล และธีระ เกรอต, 2538) เมื่อสารอินทรีย์เน่าเปื่อยจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้น เนื่องจากสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศในดิน หรือหล่มบึง หลังจากนั้นจะถูกออกซิไดซ์โดย O, O_2 หรือ O_3 เกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ขึ้น ดังสมการที่ 2.4–2.6

$$H_2S + O \longrightarrow HS + HO \xrightarrow{P} SO_2 + H_2O \tag{2.4}$$

$$H_2S + 3/2O_2 \longrightarrow SO_2 + H_2O \tag{2.5}$$

$$H_2S + O_3 + P \longrightarrow SO_2 + H_2O + P \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.6 สาร P (Particle) อาจเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ เช่น ฝุ่นละออง หรือละอองน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาทั้ง 3 ดังกล่างข้างต้นจะเกิดได้เร็วขึ้นหากเกิดหมอกควันจากปฏิกิริยาเคมีโดยมีแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Photochemical smog) ในกรณีที่อากาศมีความชื้นมากเพียงพอ จะส่งผลให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์รวมตัวกับน้ำหรือความชื้น ทำให้เกิดกรดซัลฟูรัสซึ่งสามารถแตกตัวได้เป็นไบซัลไฟต์ (HSO_3^-) หากมีฝุ่นละอองซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไบซัลไฟต์จะถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ได้ง่าย แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$SO_2 + H_2O \longrightarrow H_2SO_3 \quad (2.7)$$

$$H_2SO_3 + 1/2O_2 \longrightarrow H_2SO_4 \quad (2.8)$$

กรดซัลฟูริกที่เกิดขึ้นอาจทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย (NH_3) หรือเกลือของโลหะ เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกิดเป็นซัลเฟต (SO_4^{2-}) ได้ดังนี้

$$H_2SO_4 + 2NH_3 \longrightarrow (NH_4)_2SO_4 \quad (2.9)$$

$$H_2SO_4 + 2NaCl \longrightarrow Na_2SO_4 + 2HCl \quad (2.10)$$

กรดซัลฟูริก ซัลเฟต และกรดไฮโดรคลอริกที่เกิดขึ้นจะลงสู่ผิวดิน ถ้าฝนตกจะทำให้น้ำฝนมีฤทธิ์เป็นกรด หรือเรียกว่า ฝนกรด (Acid rain) นั่นเอง โดยทั่วไปฝนกรดมีช่วงพีเอชประมาณ 2.1–5.0 ทั้งนี้ค่าพีเอชจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

2.1.3 ผลกระทบของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

เนื่องจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ทำให้มีฤทธิ์เป็นกรด จึงมีผลโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิต รวมทั้งก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้างได้ ผลกระทบที่เกิดจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีดังนี้

1) ผลกระทบต่อสุขภาพ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีกลิ่นฉุนและระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจตอนบนหากมีระยะสัมผัสนานเพียงพอ เมื่อได้รับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทางการหายใจที่ระดับความเข้มข้น 20 ส่วนในล้านส่วน จะทำให้เกิดการระคายเคือง หายใจไม่ออก อาเจียน ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยมากขึ้นเมื่อรวมตัวอยู่กับฝุ่นละออง (Synergistic) เนื่องจากทำให้เพิ่มความระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อในระบบหัวใจ นอกจากนั้นฝุ่นละอองบางชนิดเป็นสารมีพิษ และบางชนิดทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กลายเป็นกรดซัลฟูริกได้รวดเร็วยิ่งขึ้น เช่น ละอองไอของ

เฟอรัส แมงกานีส วานาเดียม เป็นต้น ซึ่งเป็นอันตรายต่อปอดอย่างรุนแรง ตลอดจนเพิ่มความต้านทานการเคลื่อนที่ของอากาศภายในทางเดินหายใจ ผลกระทบของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อมนุษย์ ดังตารางที่ 2.2

2) ผลกระทบต่อพืช ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อพืช คือการเกิดฝนกรด ซึ่งจะทำให้ดินมีพีเอช (pH) ต่ำเกินไป จากการศึกษาของธัชชา รัมมะศักดิ์ (2538) พบว่าเมื่อดินได้รับฝนกรด ไฮโดรเจนอิออนจะถูกดูดซับในดินมีผลทำให้พีเอชของดินลดลง เช่น ที่พีเอช 2 ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของธาตุอาหารและโลหะในดินออกมาพร้อมกับน้ำชะมากที่สุด ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ที่ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพียง 0.03 ส่วนในล้านส่วน ส่งผลให้เกิดการฟอกสีของใบไม้และทำให้ต้นไม้ล้มตายในที่สุด ไลเคนส์ และมอสบางชนิดสามารถทนต่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ (Indicator) ในการวัดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปนเปื้อนในบรรยากาศได้ วิธีนี้เรียกว่าการตรวจวัดทางชีวภาพ (Biomonitoring) (สุวรรณี จรรยาพูน, 2548)

3) ผลกระทบต่อวัสดุ และสิ่งก่อสร้าง ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีผลทำให้สิ่งทอที่ทำด้วยผ้าฝ้าย ไนลอน และเรยอน รวมทั้งวัตถุที่ทำด้วยสัตว์และยาง ทั้งยางสังเคราะห์และยางธรรมชาติ เสื่อมคุณภาพและสีจางลงเร็วกว่าปกติ และมีผลทำให้สิ่งก่อสร้างที่เป็นหินปูนและหินอ่อนชำรุด และสึกกร่อนได้ เมื่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศถูกดูดซึมเข้าไป จะถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟตได้ เข้าไปแทนที่คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ในแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) มีความหนาแน่นน้อยกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต จึงเกิดการขยายตัวขึ้นในโครงสร้าง (Matrix) ของแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้เกิดรอยร้าวและสึกกร่อนในที่สุด (พัชร์วิไล พงษ์พานิช, 2547)

4) ผลกระทบต่อการมองเห็น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศเมื่อกลายเป็นซัลเฟต จะมีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน โดยมีขนาดส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.2–0.9 ไมครอน มีผลทำให้การมองเห็น (Visibility) ลดลง ถ้าความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศสูงถึง 0.1 ส่วนในล้านส่วน และมีความชื้นสัมพัทธ์เพียง 50 เปอร์เซ็นต์ จะลดการมองเห็นลงซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการบินของเครื่องบิน (วราวุธ เสือดี, 2541)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อมนุษย์

ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ผลที่เกิดขึ้น	เอกสารอ้างอิง
1500 (0.52) (ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง)	เพิ่มอัตราการตาย	Mc Carroll และ Bradley (1996)
เท่ากับหรือมากกว่า 715 (0.25) (ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง)	อาจเพิ่มอัตราการตายต่อวัน	Lawther (1963)
600 (0.21) (ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง)	ผู้ป่วยด้วยโรคเรื้อรังอาจมีอาการรุนแรง	Lawter (1958)
500 (0.19) (ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง)	อาจเพิ่มอัตราการตาย	Brasser และคณะ (1967)
300–500 (0.11–0.19) (ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง)	อัตราการเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลด้วยโรคทางเดินหายใจ และอัตราการขาดงานเพิ่มขึ้น	Brasser และคณะ (1967)
105–265 (0.037–0.092) (ค่าเฉลี่ย 1 ปี)	มีอาการโรคทางเดินหายใจบ่อยครั้งขึ้นและอาจเกิดโรคปอด	Petrilli และคณะ (1967)
120 (0.046) (ค่าเฉลี่ย 1 ปี)	เป็นโรคทางเดินหายใจบ่อยครั้งขึ้น และอาการร้ายแรงขึ้น	Lunn และคณะ (1967)
115 (0.040) (ค่าเฉลี่ย 1 ปี)	เพิ่มอัตราการตายด้วยโรคหลอดลมอักเสบและมะเร็งปอด	Buck และ Wicken (1964)

ที่มา: USHEW, Division of Air Pollution, Washington, 1992 อ้างถึงใน นพภาพร พานิช และคณะ, 2550

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.4 มาตรฐานการระบายก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรม

ปัญหามลพิษอากาศในประเทศไทยนั้น มีแหล่งกำเนิดทั้งจากแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ได้ เช่น รถยนต์ และจากแหล่งกำเนิดอยู่กับที่ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมปัญหามลพิษอากาศจากอุตสาหกรรมนั้นมีหลายฉบับ และเกี่ยวข้องกับหลายหน่วยงาน มาตรฐานที่กำหนดขึ้นนั้นแบ่งออกตามวัตถุประสงค์ของการควบคุมคุณภาพอากาศ ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทคือ มาตรฐานคุณภาพอากาศโดยทั่วไป มาตรฐานอากาศจากแหล่งกำเนิดมลพิษอุตสาหกรรม และมาตรฐานอากาศภายในสถานประกอบการ สำหรับมาตรฐานอากาศจากแหล่งกำเนิดมลพิษอุตสาหกรรมนั้น กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้กำหนดระดับของปริมาณหรือความเข้มข้นของมลพิษต่างๆไว้ โดยจำแนกตามประเภทโรงงานอุตสาหกรรม แหล่งที่มาของสารเจือปน สำหรับมาตรฐานการระบายก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรมนั้น มีรายละเอียดดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานการระบายก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรม

ประเภทอุตสาหกรรม	แหล่งที่มาของสารเจือปน	ค่าปริมาณสารเจือปนในอากาศ (ส่วนในล้านส่วน)	
		ไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง	มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง
1. ทั่วไป	แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้		
	- น้ำมันหรือน้ำมันเตา	-	950
	- ถ่านหิน	-	700
	- เชื้อเพลิงชีวมวล	-	60
	- เชื้อเพลิงอื่นๆ	-	60
	การผลิตทั่วไป	500	-
2. เตาเผาสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นอันตรายจากอุตสาหกรรม	ระบบกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นอันตรายด้วยวิธีการเผาไหม้	-	80 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
3. ทั่วไป	กรณีการใช้น้ำมันใช้แล้วที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพและเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในเตาอุตสาหกรรม	-	800

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานการระบายออกของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรม (ต่อ)

ประเภทอุตสาหกรรม	แหล่งที่มาของสารเจือปน	ค่าปริมาณสารเจือปนในอากาศที่	
		ไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง	มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง
4. โรงงานปูนซีเมนต์	- หม้อเผาปูนซีเมนต์ทั่วไป	-	50
	- หม้อเผาปูนซีเมนต์ขาว		
	- หม้อเย็น หม้อบดปูนและหม้อบดถ่านหิน	-	500
	- หน่วยการผลิตอื่นๆ กรณีมีการเผาไหม้เชื้อเพลิง	700	-
5. โรงไฟฟ้า	แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้เชื้อเพลิง		
5.1 โรงไฟฟ้าเก่า	- น้ำมันเตา	-	950
	- ถ่านหิน	-	700
	- ชีวมวล	-	60
	- ก๊าซธรรมชาติ	-	60
5.2 โรงไฟฟ้าใหม่	แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้เชื้อเพลิง		
	1) ถ่านหิน		
	- ที่มีกำลังการผลิตไม่เกิน 300 MW	-	640
	- ที่มีกำลังการผลิตเกิน 300 MW แต่ไม่เกิน 500 MW	-	450
	- ที่มีกำลังการผลิตเกิน 500 MW	-	320
	2) ใช้น้ำมันเชื้อเพลิง		
	- ที่มีกำลังการผลิตไม่เกิน 300 MW	-	640
	- ที่มีกำลังการผลิตเกิน 300 MW แต่ไม่เกิน 500 MW	-	450
	- ที่มีกำลังการผลิตเกิน 500 MW	-	320
	3) ใช้ก๊าซธรรมชาติ	-	20
	4) ใช้ชีวมวล	-	60

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่มา: 1. คัดแปลงจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาเผาสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นอันตรายจากอุตสาหกรรม พ.ศ. 2545 ลงวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ.2545 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 119 ตอนพิเศษ 106ง เมื่อวันที่ 30 ตุลาคม พ.ศ.2545

2. คัดแปลงจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง กำหนดค่าปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงานซึ่งใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ พ.ศ.2547 ลงวันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ.2547 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 121 ตอนพิเศษ 59ง เมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ.2547

3. คัดแปลงจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนที่ระบายออกจากโรงงานผลิต ส่ง หรือจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า พ.ศ.2547 ลงวันที่ 28 กันยายน พ.ศ.2547 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 121 ตอนพิเศษ 113ง เมื่อวันที่ 7 ตุลาคม พ.ศ.2547

4. คัดแปลงจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ.2549 ลงวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ.2549 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 123 ตอนพิเศษ 125ง เมื่อวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2549

5. คัดแปลงจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนที่ระบายออกจากโรงงานปูนซีเมนต์ พ.ศ.2549 ลงวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ.2549 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 123 ตอนพิเศษ 125ง เมื่อวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ.2549

2.2 การควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

กระบวนการเผาไหม้ถ่านหินหรือน้ำมันของโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆนั้นจะก่อให้เกิดกระแสก๊าซสกปรกที่มีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบ กระบวนการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากกระแสก๊าซสกปรกที่มีความเข้มข้นต่ำ สามารถกระทำได้ดังต่อไปนี้ (Richards, 2000)

2.2.1 การเลือกใช้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณซัลเฟอร์เป็นส่วนผสมต่ำ

โดยทั่วไปแล้วถ่านหินจะมีปริมาณซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบอยู่ 3-5% ซึ่งมีปริมาณมาก ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการทำความสะอาด (Coal cleaning) เพื่อลดปริมาณซัลเฟอร์ให้น้อยลงซึ่งสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ

1) การทำความสะอาดถ่านหินทางกายภาพ (Physical Coal Cleaning) คือการลดปริมาณซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปสารอนินทรีย์ เมื่อผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วพบว่าสามารถลดซัลเฟอร์ได้ประมาณ 40–90%

2) การทำความสะอาดถ่านหินทางเคมี (Chemical Coal Cleaning) เป็นการลดปริมาณซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์โดยใช้แบคทีเรียย่อยสลายออกมาในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นต้น

2.2.2 การควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้

การควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระหว่างเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ ทำได้โดยการเติมสารดูดซึมพวกหินปูนหรือปูนขาว ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกกำจัดในระหว่างการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งมีด้วยกัน 2 วิธีคือ

1) การเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed Combustion) เชื้อเพลิงพวกถ่านหินและหินปูนหรือปูนขาวจะถูกทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบฟลูอิดไดซ์พร้อมกับการเกิดการเผาไหม้ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับสารดูดซึม ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) และถูกพาเข้าสู่ระบบกำจัดฝุ่นต่อไป (Baird และ Cann, 2005)

2) การกำจัดโดยการผสมถ่านหินกับสารดูดซึมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วอัดเป็นเม็ดไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งขณะที่เม็ดเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับสารดูดซึม เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซัลเฟต และถูกพาเข้าสู่ระบบกำจัดฝุ่นต่อไป

2.2.3 การนำถ่านหินไปผ่านกระบวนการให้เป็นเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปก๊าซ (Coal Gasification)

ระบบดังกล่าวถ่านหินจะถูกให้ความร้อนให้อยู่ในสภาพที่ควบคุมปริมาณออกซิเจน จะได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ส่วนซัลเฟอร์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อไป

2.2.4 การนำถ่านหินไปผ่านกระบวนการให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงเหลว (Coal Liquefaction)

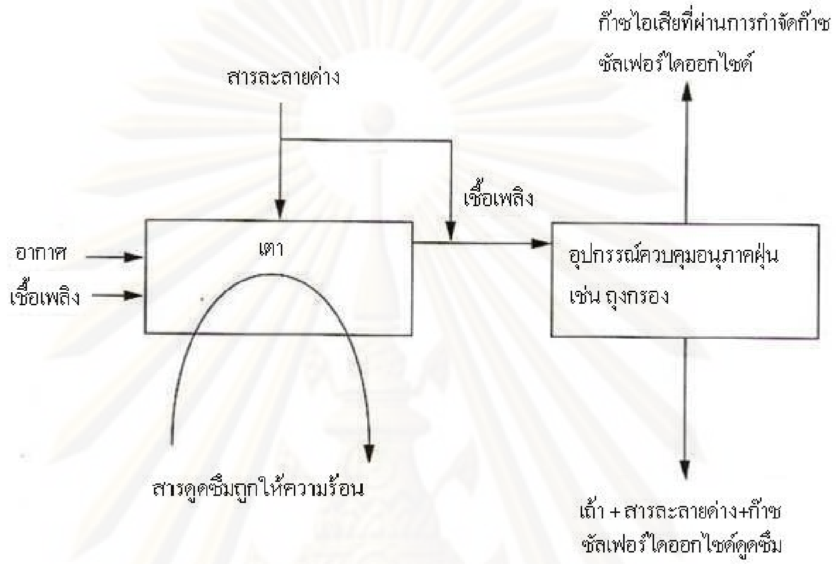
กระบวนการดังกล่าวจะคล้ายกับ Coal Gasification แต่จะแตกต่างกันตรงที่การทำให้ก๊าซที่ได้จากกระบวนการ Gasification ให้กลายเป็นของเหลว หรืออาจจะใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสำหรับสกัดสารที่อยู่ในถ่านหินออกมาในรูปน้ำมัน ส่วนซัลเฟอร์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ได้อีกครั้งโดยการออกซิไดซ์กลับไปเป็นซัลเฟอร์

2.2.5 การควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นหลังการเผาไหม้ (Flue Gas Desulfurization: FGD)

1) การควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบแห้ง ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับสารดูดซึมที่อุณหภูมิสูง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสภาพที่เป็นของแข็งแห้ง จากรูปที่ 2.1 เป็นระบบการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบแห้ง โดยการพ่นอนุภาคสารละลายด่างแห้งให้ทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งอยู่ในกระแสก๊าซสกปรก สารละลายด่างแห้ง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดเป็นแคลเซียมออกไซด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.11

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + SO_2 \longrightarrow CaSO_3 \longrightarrow CaSO_4 \quad (2.11)$$

กระแสก๊าซสะอาดจะแคลเซียมซัลเฟตปนอยู่ ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็ง จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในการดักจับ เช่น เครื่องตกตะกอนด้วยแรงไฟฟ้าสถิต หรือถุงกรอง เป็นต้น ก่อนปล่อยกระแสก๊าซสะอาดออกสู่บรรยากาศ

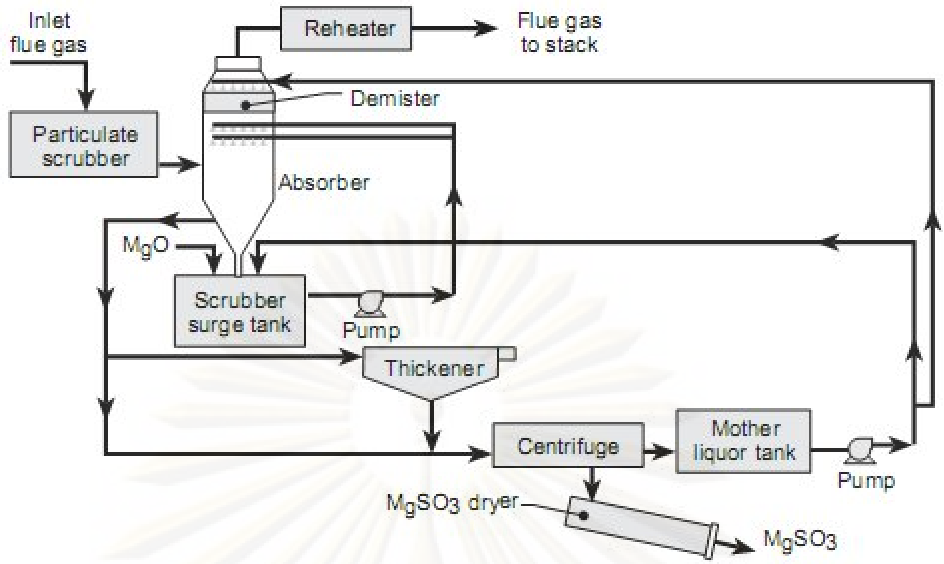


รูปที่ 2.1 ระบบการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบแห้ง (de Nevers, 2000)

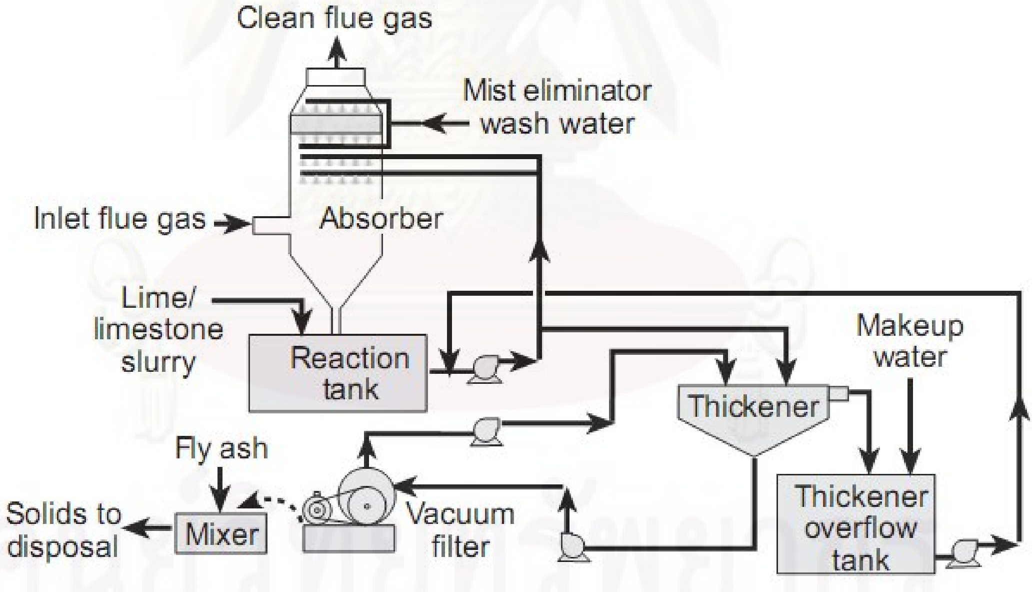
2) การควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบเปียกหรือการดูดซึมก๊าซ วิธีดังกล่าวจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการเป็นสารละลายหรือสารแขวนลอย การควบคุมแบบเปียกหรือการดูดซึมก๊าซนั้น สามารถแบ่งได้ 2 แบบคือ

- แบบสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก (Renewable FGD Process) ระบบดังกล่าวจะมีการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไปผ่านกระบวนการรีเจนเนอเรท (Regeneration) เพื่อนำเอาสารตั้งต้นกลับมาใช้ใหม่ เช่นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดซัลฟูริกหรือซัลเฟอร์ เพื่อนำกลับมาใช้ในอุตสาหกรรมอื่นต่อไป ดังรูปที่ 2.2

- แบบไม่นำกลับมาใช้ (Nonregenerated FGD Process) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะนำไปทิ้งหรือเอาไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น ระบบบำบัดแบบเปียกเป็นที่นิยมใช้กันเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้เพราะต้นทุนการบำบัดต่ำ และให้ประสิทธิภาพในการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูง ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ระบบควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบนำผลิตภัณฑ์กลับไปใช้ใหม่ (Renewable FGD Process) (Richards, 2000)



รูปที่ 2.3 ระบบควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบไม่นำผลิตภัณฑ์กลับไปใช้ใหม่ (Nonregenerated FGD Process (Richards, 2000)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 กระบวนการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

	กระบวนการควบคุมซัลเฟอร์	สารดูดซึม	ผลิตภัณฑ์พลอยได้
แบบเปียก	วิธีดูดซึมด้วยปูนขาว	หินปูน โดโลไมท์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เถ้าลอย	ยิปซั่ม สลัดจ์ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นแคลเซียมซัลไฟท์
	วิธีดูดซึมด้วยแมกนีเซียม-ไฮดรอกไซด์แบบเปียก	แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ยิปซั่ม แมกนีเซียมซัลเฟต
	วิธีดูดซึมด้วยสารละลายด่าง	โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟท์ น้ำ แอมโมเนีย	โซเดียมซัลไฟท์ กำมะถัน กรดซัลฟูริก แอมโมเนียมซัลเฟต
	ระบบด่างคู่	โซเดียมคาร์บอเนต แอมโมเนีย แอมโมเนียมซัลเฟต	ยิปซั่ม
	วิธีดูดซึมแบบปฏิกิริยาออกซิ-เดชัน	กรดซัลฟูริกเจือจาง เติมสารเร่งปฏิกิริยา	ยิปซั่ม
แบบกึ่งแห้ง	วิธี spray dryer	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต	แคลเซียมซัลไฟท์ ยิปซั่ม
	วิธีกำจัดซัลเฟอร์ในเตา+ฉีดพ่นน้ำ	หินปูน	แคลเซียมซัลไฟท์ ยิปซั่ม
แบบแห้ง	วิธีพ่นปูนขาวเข้าไปในเตาและท่อควัน	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ สารปรับสภาพไอน้ำ (ใช้เถ้าถ่านหิน)	แคลเซียมซัลไฟท์ ยิปซั่ม
	การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	ถ่านกัมมันต์	กรดซัลฟูริก
	วิธียิงลำอิเล็กตรอน	แอมโมเนีย	แอมโมเนียซัลเฟต

ที่มา: นพภาพร พานิช และคณะ, 2550

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

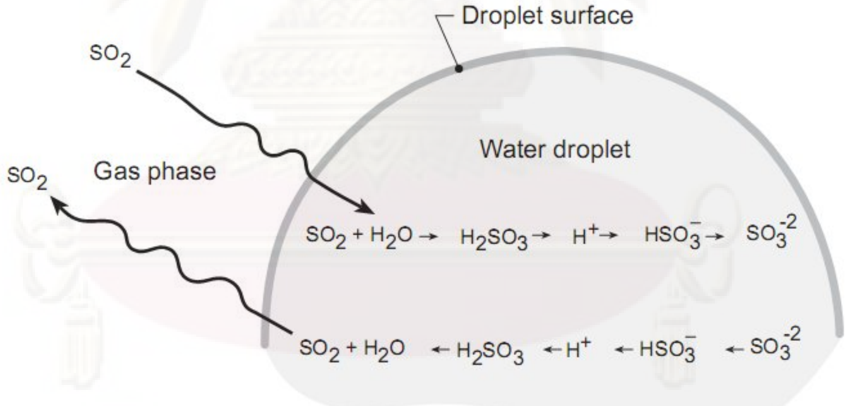
2.3 การดูดซึมก๊าซ (Gas Absorption)

2.3.1 นิยามและทฤษฎี

การดูดซึมก๊าซเป็นกระบวนการที่แพร่หลายสำหรับใช้ในการควบคุมก๊าซมลพิษที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ การดูดซึมก๊าซด้วยของเหลวจะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณก๊าซในของเหลวน้อยกว่าปริมาณที่ทำให้เกิดสมดุลทางเคมีหรือการละลายที่อิ่มตัว ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นจริงกับความเข้มข้นขณะสมดุลทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนของการดูดซึม ก๊าซมลพิษที่อาศัยกระบวนการดูดซึมในการควบคุม ได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไฮโดรเจนคลอไรด์ คลอรีน แอมโมเนีย ไนโตรเจนออกไซด์ และสารไฮโดรคาร์บอนเบา เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2532) การดูดซึมก๊าซสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือ การดูดซึมทางกายภาพ และการดูดซึมทางเคมี

- **การดูดซึมทางกายภาพ (Physical Absorption)**

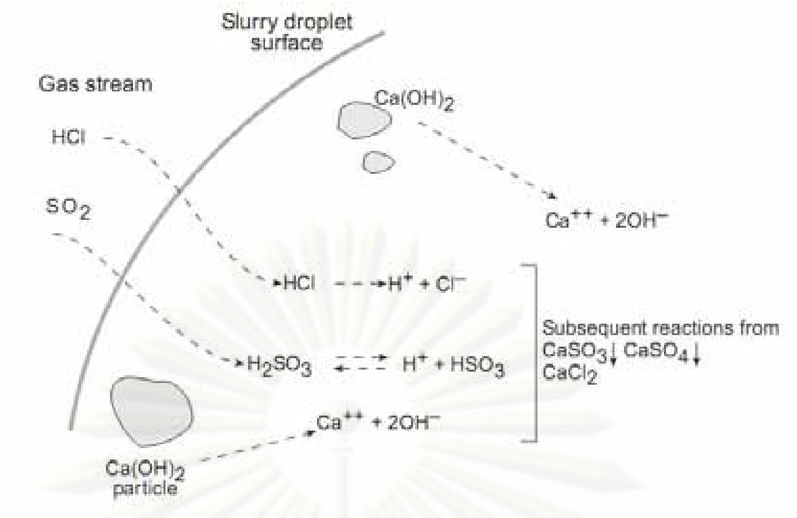
การดูดซึมในลักษณะนี้อาศัยหลักการที่ว่า ก๊าซที่ต้องการแยกออกสามารถละลายได้ในของเหลวมากกว่าก๊าซที่ไม่ต้องการแยกออก ความสามารถในการดูดซึมในลักษณะนี้จะขึ้นอยู่กับการถ่ายเทมวลสารจากวัฏภาคของเหลวจนเกิดสมดุลขึ้นในวัฏภาคทั้งสอง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะการดูดซึมทางกายภาพของหยดน้ำ (Richards, 2000)

- **การดูดซึมทางเคมี (Chemical Absorption)**

การดูดซึมในลักษณะนี้จะเกิดการดูดซึมทางกายภาพ พร้อมกับมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น โดยเมื่อก๊าซละลายไปในวัฏภาคของเหลวแล้ว ก๊าซซึ่งอยู่ในสภาพของเหลวจะทำปฏิกิริยาเคมีกับของเหลว และเปลี่ยนเป็นสารใหม่ในสภาพของเหลว ความดันไอของก๊าซลดลง ทำให้มีอัตราการดูดซึมสูงกว่าการดูดซึมก๊าซทางกายภาพเพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 2.5

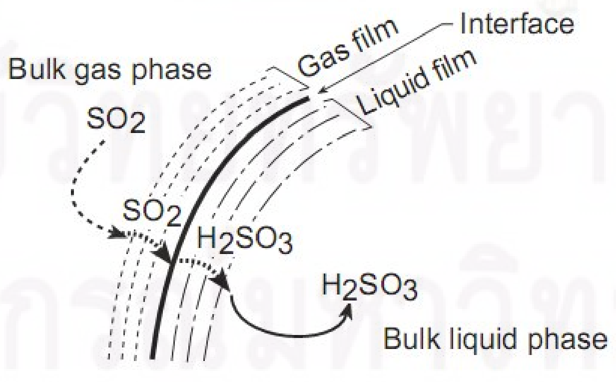


รูปที่ 2.5 ลักษณะการดูดซึมทางเคมี (Richards, 2000)

2.3.2 กลไกการดูดซึม (Absorption Mechanism)

ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการอธิบายกระบวนการดูดซึมคือ ทฤษฎีฟิล์มสองชั้น (Two-film Theory) ซึ่งกล่าวว่าผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคก๊าซและของเหลวนั้นถูกกั้นไว้ด้วยเยื่อบาง ๆ สองชั้น ชั้นแรกเป็นชั้นฟิล์มก๊าซ (Gas Film) และอีกชั้นเป็นชั้นฟิล์มของเหลว (Liquid Film) ดังรูปที่ 2.6 ทฤษฎีนี้สามารถนำมาใช้อธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของมวลสารมลพิษจากวัฏภาคก๊าซไปสู่วัฏภาคของเหลว โดยผ่านชั้นฟิล์มบาง ๆสองชั้น การถ่ายเทมวลสารนั้นประกอบด้วยสามขั้นตอนคือ

- การถ่ายเทมวลสารจากภายในวัฏภาคหนึ่งไปยังผิวระหว่างวัฏภาค
- การถ่ายเทมวลสารข้ามผิวระหว่างวัฏภาค
- การถ่ายเทมวลสารไปยังวัฏภาคก๊าซหรือวัฏภาคของของเหลว



รูปที่ 2.6 ทฤษฎีฟิล์มสองชั้น (Richards, 2000)

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ในการออกแบบแพคเบดสครับเบอร์โดยอาศัยหลักการดูดซึมเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวสัมผัส การผสมกัน เวลาในการสัมผัสระหว่างวัฏภาคก๊าซและของเหลว ตัวถูกละลายมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายสูง โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ได้แก่

- ความเป็นด่าง (Alkalinity)

สารเคมีแต่ละชนิดมีองค์ประกอบแตกต่างกันทั้งทางกายภาพและทางเคมี ดังนั้นพฤติกรรมในการทำปฏิกิริยาหรือการดูดซึมของสารแต่ละชนิดจะต่างกัน ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เช่น ปูนขาวมีความเป็นด่างมากกว่าหินปูน หรือหินปูนมีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกันแต่ถ้าหินปูนนั้นมีแหล่งที่มาต่างกัน ประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก็จะแตกต่างกันด้วย (สมัคร ขันเงิน, 2538) เนื่องจากอายุและแหล่งกำเนิดแตกต่างกัน จึงทำให้ลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน

- สิ่งเจือปนในสารเคมี (Impurity)

สิ่งเจือปนที่มีอยู่ในสารเคมีทั้งภายนอกและเป็นองค์ประกอบอยู่ภายในโครงสร้างของสารดูดซึม (Absorbent) จะมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เนื่องจากอัตราส่วนโดยโมลของสารเคมีที่สามารถดูดซึมต่อซัลเฟอร์เปลี่ยนไป เช่น หินปูนที่มีปริมาณโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เจือปนอยู่ จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงกว่าหินปูนธรรมดาและถ้ามีปริมาณมากขึ้นประสิทธิภาพก็จะเกิดได้ดีขึ้น

- สารตัวเติม (Additives)

สารเคมีที่ใช้เป็นสารตัวเสริมและเติมเข้าไปผสมในสารดูดซึมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ ซึ่งองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกาพบว่าการเติม MgO ในปริมาณที่น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงขึ้นเป็น 99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสันนิษฐานว่า MgO มีความสามารถในการละลายดีกว่าหินปูน จึงทำให้เกิดปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้เร็วขึ้น นอกจากนี้การเติมสารเคมีตัวเติมยังทำหน้าที่ยับยั้งการเกิดชั้นผลิตภัณฑ์ (Blinding) สะสมในระบบแพคเบดสครับเบอร์ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น

- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอชของสารดูดซึมที่ใช้ในระบบบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำงานได้ดีที่ค่าพีเอชในช่วง 5–9 หรือมีความเป็นด่างเล็กน้อย

- อุณหภูมิ (Temperture)

โดยทั่วไปก๊าซเกือบทุกชนิดละลายน้ำได้ดีที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หากก๊าซไอเสีย (Flue gas) ที่ปล่อยออกมามีอุณหภูมิต่ำ ประสิทธิภาพของระบบบำบัดจะเพิ่มขึ้น

- ความเข้มข้นของสารดูดซึม (Absorbent concentration)

ความเข้มข้นของสารดูดซึมเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งนี้เพราะมีผลต่ออัตราส่วนโดยโมลของสารดูดซึมที่ใช้ต่อปริมาตรก๊าซเสียที่ต้องบำบัด (L/G) เพราะถ้าความเข้มข้นของสารดูดซึมมากก็สามารถที่จะลดอัตราส่วนโดยโมล L/G แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วถ้าต้องการประสิทธิภาพบำบัดสูงขึ้น ค่า L/G ต้องมีค่ามาก แต่ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสารเคมีก็จะมากขึ้นตาม ดังนั้นความเข้มข้นของสารดูดซึมที่ใช้ควรอยู่ในช่วง 5-15 %โดยน้ำหนัก

- ความสามารถในการละลาย (Solubility)

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลาย คือ อุณหภูมิและความดันของระบบ ความสามารถในการละลายนั้นสามารถวัดได้ที่สภาวะสมดุล โดยวัดปริมาตรก๊าซและของเหลวในภาชนะปิด และตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่งจนปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซึมเข้าไปในของเหลวเท่ากับปริมาณสารที่ละลายได้ ณ จุดนี้จะไม่มีการเปลี่ยนรูปของก๊าซมลพิษอีก และความเข้มข้นของก๊าซในวัฏภาคก๊าซและในของเหลวจะคงที่ คือระบบก๊าซและของเหลวเกิดสมดุล กฎของเฮนรี่ (Henry’s law) สามารถใช้ทำนายความสามารถในการละลาย เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายถูกทำให้เจือจางลงมาก (นพภาพร พานิช และคณะ, 2551) กฎของเฮนรี่ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.12

$$p^* = Hx \tag{2.12}$$

เมื่อ p^* = ความดันย่อยของตัวถูกละลาย หรือก๊าซมลพิษที่สภาวะสมดุล, ปาสคาล

x = สัดส่วนโมลของตัวถูกละลายหรือก๊าซมลพิษในของเหลว

H = ค่าคงที่เฮนรี่, ปาสคาลต่อสัดส่วนโมล

จากสมการที่ 2.12 สามารถเขียนกฎของเฮนรี่ได้อีกรูปแบบหนึ่ง โดยหารทั้งสองข้างของสมการด้วยความดันรวม ทำให้ด้านซ้ายของสมการกลายเป็นความดันย่อยต่อความดันรวม ซึ่งจะเท่ากับสัดส่วนโมลของก๊าซ, y^* ดังสมการที่ 2.13

$$y^* = Hx \tag{2.13}$$

เมื่อ y^* = สัดส่วนโมลของก๊าซมลพิษในวัฏภาคก๊าซ ณ สภาวะสมดุลกับของเหลว

H = ค่าคงที่ในกฎของเฮนรี่, สัดส่วนโมลในก๊าซต่อสัดส่วนโมลในของเหลว ซึ่ง H ในสมการนี้ขึ้นอยู่กับความดันรวม

สำหรับค่าคงที่เฮนรี่ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่สามารถละลายได้ในน้ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ 2.5

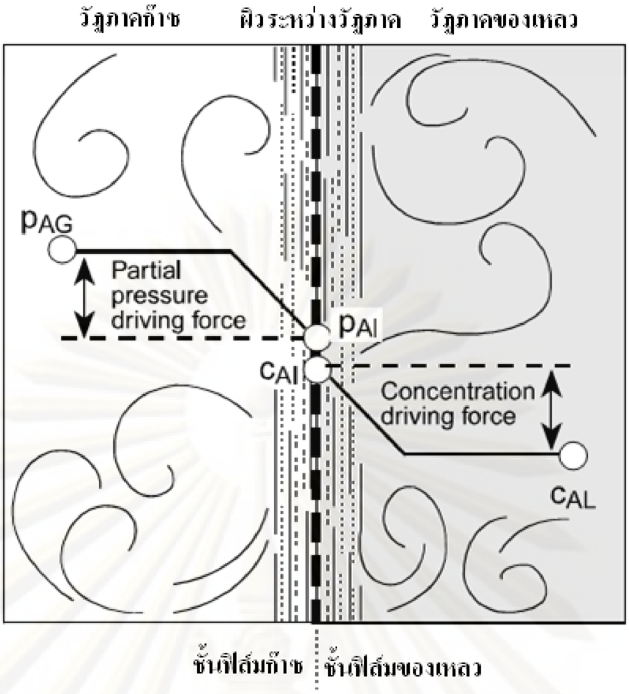
ตารางที่ 2.5 ค่าคงที่ของเฮนรี่สำหรับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในน้ำ (ความดันบรรยากาศต่อสัดส่วนโมล)

อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส	ค่าคงที่ของเฮนรี่สำหรับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในน้ำ (ความดันบรรยากาศต่อสัดส่วนโมล)
0	11
10	17
20	24
30	34
40	54
50	70
60	--
70	130
80	--
90	--
100	260

ที่มา: Ledbetter, 1974 อ้างถึงใน นพภาพร พานิช และคณะ, 2551

2.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร

อัตราการถ่ายเทมวลสารจะขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่โมเลกุลในวัฏภาคก๊าซหรือวัฏภาคของเหลว โดยสมมติว่าทั้งวัฏภาคก๊าซและวัฏภาคของเหลวมีการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน (Turbulent) บริเวณที่เกิดการถ่ายเทมวลสารคือบริเวณรอยต่อของทั้งสองวัฏภาคซึ่งมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) ดังรูปที่ 2.7 ทฤษฎีฟิล์มสองชั้นนี้ได้สมมติว่าทั้งสองวัฏภาคนั้นแต่ละส่วนมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์และแยกออกจากกัน โดยมีสมดุลของการเคลื่อนที่ของมวลสารทั้งเข้าและออก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการถ่ายเทมวลสารของก๊าซมลพิษที่ผ่านฟิล์มสองชั้นที่กั้นระหว่างวัฏภาคก๊าซและของเหลว ซึ่งทำให้ความเข้มข้นมลพิษ (มีค่าคงที่ในก๊าซ) จะเปลี่ยนจาก P_{AG} เป็น P_{Al} ในชั้นบางๆในส่วนของวัฏภาคก๊าซ ในทำนองเดียวกันความเข้มข้นของก๊าซมลพิษในของเหลวจะเปลี่ยนจาก C_{Al} (มีค่าคงที่ในของเหลว) เป็น C_{AL} ในชั้นบางๆในส่วนของวัฏภาคของเหลว



รูปที่ 2.7 แบบจำลองของทฤษฎีฟิล์มสองชั้น (Manyele, 2008)

โดยที่ความแตกต่างของความดันย่อยภายในวัฏภาคก๊าซและของเหลว $\left(P_{A,i}\right)$ และความแตกต่างของความเข้มข้นของของเหลวระหว่างความเข้มข้นในวัฏภาคของเหลว$\left(C_{A,L}\right)$ กับความเข้มข้นที่ผิวระหว่างวัฏภาคก๊าซและของเหลว $(C_{A,i})$ ส่วน δ_G และ δ_L เป็นความหนาของชั้นขอบเขตในวัฏภาคก๊าซและของเหลว ตามลำดับ ถ้าไม่มีความต้านทานระหว่างต้านทานระหว่างการถ่ายเทมวลสารที่ผิวระหว่างวัฏภาค แสดงว่า $P_{A,i}$ และ $C_{A,i}$ คือความเข้มข้นที่สมดุล ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่ได้เมื่อทั้งสองวัฏภาคสัมผัสกันเป็นเวลานาน ความดันย่อยที่ผิวสัมผัส $\left(P_{A,i}\right)$ อาจมีค่าน้อยกว่า เท่ากับ หรือมากกว่า $C_{A,i}$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของระบบนั้น จากรูปที่ 2.7 แสดงกรณีที่ค่าคงที่เฮนรี่มีค่าน้อยกว่าและเท่ากับหนึ่ง เมื่อความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลเป็นไปตามกฎของเฮนรี่ กรณีเป็นการถ่ายเทมวลสารจากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคของเหลว และจะได้ว่า $C_{A,L} < C_{A,i}$ และ $P_{A,I} < P_{A,G}$ และในกรณีที่เป็นการถ่ายเทมวลสารจากวัฏภาคของเหลวไปยังวัฏภาคก๊าซ จะได้ว่า $C_{A,L} > C_{A,i}$ และ $P_{A,I} > P_{A,G}$

2.4.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย

การถ่ายเทมวลสารขององค์ประกอบ A ระหว่างวัฏภาคที่สภาวะคงตัว ในทิศทาง Z สามารถเขียนสมการของฟลักซ์หรืออัตราการแพร่ที่แต่ละด้านของชั้นผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคได้ดังนี้

$$N_{A,Z} = k_G\left(P_{A,G} - P_{A,i}\right) \tag{2.14}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$N_{A,Z} = k_L\left(C_{A,i} - C_{A,L}\right) \qquad (2.15)$$

เมื่อ k_G = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในวัฏภาคก๊าซ

k_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในวัฏภาคของเหลว

$P_{A,G} - P_{A,i}$ = แรงขับดันที่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสาร A จากภายในวัฏภาคก๊าซไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค

$C_{A,i} - C_{A,L}$ = แรงขับดันที่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสาร A ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคมายังภายใน วัฏภาคของเหลว

ที่สภาวะคงตัว ฟลักซ์เชิงมวลในแต่ละวัฏภาคย่อมมีค่าเท่ากัน ดังนั้นรวมสมการที่ 2.14 และ 2.15 ได้เป็น

$$N_{A,z} = k_G(P_{A,G} - P_{A,i}) = -k_L(C_{A,L} - C_{A,i}) \qquad (2.16)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารทั้งสอง

$$-\frac{k_L}{k_G} = \frac{P_{A,G} - P_{A,i}}{C_{A,L} - C_{A,i}} \qquad (2.17)$$

ดังนั้นอาจเรียก k_G และ k_L ว่าเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อย เพราะเป็นค่าที่ระบุเฉพาะวัฏภาคใดวัฏภาคหนึ่ง

2.4.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยด้วยสมการ 2.14 และ 2.15 นั้นจะต้องทราบค่าความเข้มข้น และค่าความดันย่อยที่ผิวระหว่างวัฏภาค $P_{A,i}$ และ $C_{A,i}$ ซึ่งไม่สามารถวัดได้ง่ายนัก ดังนั้นจึงคำนวณในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (Overall mass transfer coefficient) ซึ่งใช้ค่าแรงขับดันรวมที่ความเข้มข้นรวมในทั้งสองวัฏภาค $P_{A,G}$ และ $C_{A,L}$ โดยจากนิยามของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

$$N_A = K_G\left(P_{A,G} - P_{A^*}\right) \qquad (2.18)$$

เมื่อ $P_{A,G}$ = เป็นความดันย่อยในวัฏภาคก๊าซ

P_{A^*} = ความดันย่อยของ A ซึ่งอยู่ในสมดุลกับความเข้มข้นภายในวัฏภาคของเหลว, $C_{A,L}$

K_G = สัมประสิทธิ์การพามวลสารรวมที่คำนวณจากแรงขับดันในรูปผลต่างของความดันย่อย มีหน่วยเป็น [(จำนวนโมลที่ถ่ายเท) / (เวลา) (พื้นที่ผิวสัมผัส) (ความดัน)]

และเนื่องจากค่าที่สมดุลระหว่างวัฏภาคก๊าซและของเหลวที่ความดันและอุณหภูมิหนึ่งจะมีเพียงค่าเดียว ดังนั้น P_{A^*} (ที่สมดุลกับ $C_{A,L}$) จะสามารถนำมาใช้วัดค่า C_{AL} ได้

$$N_A = K_L \left(C_{A*} - C_{A,L} \right) \tag{2.19}$$

เมื่อ C_{A^*} = ความเข้มข้นของ A ที่อยู่ในสมดุลกับ $P_{A,G}$ ในทำนองเดียวกันค่า $C_{A,L}$ สามารถนำมาใช้วัดค่า $P_{A,G}$ ได้

K_L = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ที่คำนวณจากแรงขับดันในรูปผลต่างของความเข้มข้นในวัฏภาคของเหลวมีหน่วยเป็น [(จำนวนโมลที่ถ่ายเท)/ (เวลา)(พื้นที่ผิวสัมผัส)(ความเข้มข้น, ΔC_A)]

จากนิยามของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมสำหรับวัฏภาคก๊าซและวัฏภาคของเหลว โดยที่หน่วยของฟลักซ์ (N_A) คือ จำนวนโมลต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยแรงดัน ซึ่งพื้นที่ในที่นี้คือ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค การหาพื้นที่นี้สำหรับอุปกรณ์การดูดซึมค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งได้นิยามตัวประกอบ a

โดย a = พื้นที่ผิวสัมผัสต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของแพคเบดสครับเบอร์

S = พื้นที่หน้าตัดของแพคเบดสครับเบอร์

Z = ความสูงของตัวกลางในแพคเบดสครับเบอร์

$$\text{ดังนั้น} \quad A = aSZ$$

ค่าฟลักซ์เป็นโมลต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดในช่วงความยาว dZ ของแพคเบดสครับเบอร์ คือ

$$N_A a dZ = \left(\frac{\text{โมลของ A ที่ถ่ายเทมวลสาร}}{\text{(เวลา)(พ.ท.ผิวสัมผัส)}} \right) \left(\frac{\text{พื้นที่ผิวสัมผัส}}{\text{ปริมาตร}} \right) \left(\text{ความยาว} \right)$$

$$= \left(\frac{\text{โมลของ A ที่ถ่ายเทมวลสาร}}{\text{(เวลา)(พ.ท.หน้าตัด)}} \right)$$

หรืออาจเขียนในเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในวัฏภาคก๊าซได้ดังนี้

$$N_A adZ = k_G a\left(P_{A,G} - P_{A,i}\right)dZ \qquad (2.20)$$

และ

$$N_A adZ = K_g a\left(P_{A,G} - P_{A^*}\right)dZ \qquad (2.21)$$

เนื่องจากตัวประกอบ a และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเรขาคณิตของสครับเบอร์ และอัตราการไหลของทั้งสองวัฏภาค ดังนั้นจึงรวมตัวแปรทั้งสองเป็นผลคูณที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารย่อยเชิงปริมาตร $(k_G a)$ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเชิงปริมาตร $(K_G a)$ ตามลำดับ

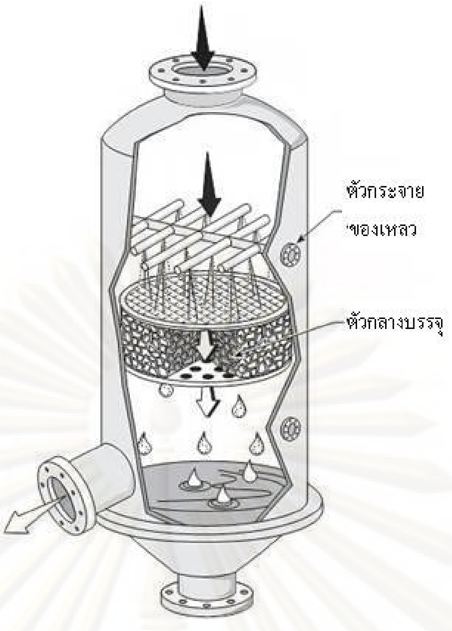
2.5 แพคเบดสครับเบอร์ (Packed Bed Scrubber)

อุปกรณ์สำหรับใช้ในการควบคุมมลพิษอากาศโดยอาศัยกระบวนการดูดซึมส่วนใหญ่แล้วมักทำเป็นหอ (Tower) มีตัวกลางเพื่อทำหน้าที่ให้เกิดการสัมผัสกันอย่างต่อเนื่องระหว่างวัฏภาคก๊าซและของเหลว แพคเบดสครับเบอร์มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกวางในแนวตั้งหรือแนวนอนที่มีกระแสการไหลแตกต่างกัน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 ประเภทของแพคเบดสครับเบอร์

ประเภทของแพคเบดสครับเบอร์นั้นสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการไหลของก๊าซและของเหลว โดยสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทคือ

1. กระแสการไหลทางเดียวกัน (Co-current) ก๊าซและของเหลวมีทิศทางในการสัมผัสแบบตามกัน บางครั้งเรียกว่า Vertical Air Washer โดยก๊าซและของเหลวจะมีทิศทางไหลลงจากด้านบนของแพคเบดสครับเบอร์ ดังรูปที่ 2.8 โดยแพคเบดสครับเบอร์ที่มีกระแสการไหลทางเดียวกันนี้สามารถเดินระบบที่อัตราเร็วก๊าซและของเหลวได้สูงกว่าแพคเบดสครับเบอร์ที่มีกระแสการไหลสวนทางกันได้โดยไม่เกิดการท่วม (Flooding) และความดันลดต่ำกว่าด้วยเนื่องจากทั้งสองวัฏภาคเคลื่อนที่ลงมาด้วยแรงโน้มถ่วง แต่ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการควบคุมก๊าซมลพิษจะต่ำกว่า เนื่องจากแรงขับดันจะลดลงตามระยะทางที่เคลื่อนที่

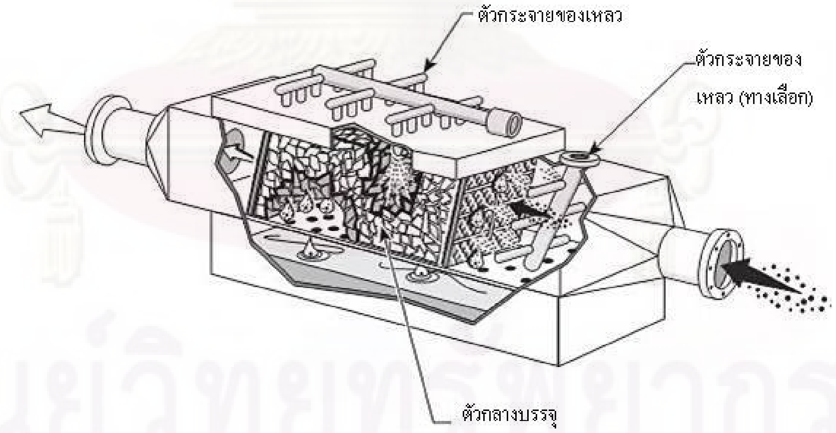


รูปที่ 2.8 แพคเบดสครับเบอร์ที่มีกระแสการไหลทางเดียวกัน (Richards, 2000)

2. กระแสการไหลสวนทางกัน (Counter-current) ก๊าซและของเหลวมีทิศทางในการสัมผัสแบบสวนทางกัน โดยก๊าซจะไหลจากด้านล่างของแพคเบดสครับเบอร์ ส่วนของเหลวจะไหลจากด้านบนของสครับเบอร์ ดังรูปที่ 2.9 กระแสการไหลแบบสวนทางกันนั้นจะทำให้เกิดแรงขับ (driving force) มีค่ามากที่สุด เนื่องจากได้นำเอาก๊าซมลพิษที่มีความเข้มข้นน้อยที่สุดมาสัมผัสกับสารละลายที่ใช้ในการดูดซึม แพคเบดสครับเบอร์แบบนี้มีขนาดกะทัดรัด มีการถ่ายเทมวลสารสูง เหมาะสำหรับใช้ในการควบคุมก๊าซมลพิษที่ไม่มีฝุ่นละอองปะปนอยู่ด้วย หากมีฝุ่นละอองเข้ามาพร้อมกับก๊าซมลพิษแล้วจะทำให้ตัวกลางบรรจุอุดตันและส่งผลต่อความดันลดภายในระบบเพิ่มสูงขึ้น

3. กระแสการไหลตัดกัน (Cross-current) กระแสก๊าซผ่านตัวกลางในแนวนอน (Horizontal) โดยของเหลวจะถูกปล่อยลงมาจากด้านบนเหนือตัวกลางที่บรรจุอยู่ ของเหลวผ่านตัวกลางลงมาในแนวดิ่งและตั้งฉากกับกระแสก๊าซ ดังรูปที่ 2.10 ลักษณะของแพคเบดสครับเบอร์ชนิดนี้สามารถแยกมวลสารขนาดเล็กทั้งในรูปของแข็งและของเหลว และสามารถลดการฟุ้งกระจายของของเหลวออกจากกระแสก๊าซสกปรกได้ ข้อดีของแพคแบดสครับเบอร์ที่มีกระแสการไหลตัดกันในด้านการเดินระบบคือความดันลดต่ำ ทำให้สามารถเดินระบบที่อัตราเร็วก๊าซสูงๆได้ และพลังงานที่ใช้ในการขับดันน้อยกว่า แต่ประสิทธิภาพต่ำกว่าแพคเบดสครับเบอร์ที่มีกระแสการไหลสวนทางกัน

รูปที่ 2.9 แพคเบดสครับเบอร์ที่มีกระแสการไหลสวนทางกัน (Richards, 2000)



รูปที่ 2.10 แพคเบดสครับเบอร์ในแนวระดับที่มีกระแสการไหลตัดกัน (Richards, 2000)

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแพคเบดสครับเบอร์ที่มีกระแสการไหลแตกต่างกัน

ข้อพิจารณาในการออกแบบ	กระแสการไหลสวนทางกัน	กระแสการไหลตัดกัน
ความซับซ้อนของระบบ	ง่าย	ซับซ้อน
อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ	น้อย	มาก
แรงขับดันมาก	ประสิทธิภาพสูง	ประสิทธิภาพสูง
แรงขับดันน้อย	ประสิทธิภาพต่ำ	ประสิทธิภาพสูง
ความแตกต่างของความดันในวัฏภาคก๊าซ	มาก	น้อย
ความต้องการกำลังของวัฏภาคก๊าซ	น้อย	มาก
ความต้องการกำลังของวัฏภาคของเหลว	เท่ากัน	เท่ากัน
พื้นที่และขนาดของสครับเบอร์	เท่ากัน	เท่ากัน

ที่มา: Thibodeaux, 1969

2.5.2 ส่วนประกอบภายในแพคเบดสครับเบอร์

ส่วนประกอบภายในแพคเบดสครับเบอร์ประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญคือ หอหรือคอลัมน์ ตัวกลางบรรจุ แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุ ตัวกระจายของเหลว ตัวกระจายของเหลวอีกครั้ง แผ่นทับหน้า และอุปกรณ์ดักจับละอองน้ำ เป็นต้น โดยมีส่วนประกอบต่างๆ ภายในแพคเบดสครับเบอร์ดังต่อไปนี้

2.5.2.1 ตัวกลางบรรจุ (Packing Media)

ตัวกลางบรรจุเป็นสิ่งสำคัญของระบบการดูดซึมก๊าซมลพิษ เพราะทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคก๊าซและของเหลว ดังนั้นการเลือกตัวกลางบรรจุที่เหมาะสมจะต้องเข้าใจถึงลักษณะการกระจายของของเหลวและความความแตกต่างทางกายภาพของตัวกลางบรรจุแต่ละชนิด ตัวกลางบรรจุนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ (ปิยะสาร ประเสริฐธรรม, 2536)

1) ตัวกลางบรรจุแบบจัดเรียง (Stacked Packing Media)

ตัวกลางบรรจุจะถูกนำมาจัดเรียงตัวในลักษณะที่มีแบบหรือรูปร่างที่กำหนดไว้แล้ว เพื่อให้สครับเบอร์มีคุณสมบัติที่ต้องการ เช่น กริด (Grids) จะมีโครงสร้างเปิดและสามารถใช้กับอัตราการไหลของก๊าซที่สูงได้ โดยมีความดันลดไม่มากนัก

2) ตัวกลางบรรจุแบบสุ่ม (Random Packing Media)

ตัวกลางบรรจุแบบสุ่มใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการควบคุมก๊าซมลพิษจากอุตสาหกรรม การจัดเรียงแบบสุ่มนั้นให้พื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า แต่มีข้อเสียก็คือทำให้เกิดความดันลดสูงกว่าการบรรจุตัวกลางแบบจัดเรียง ตัวกลางบรรจุแบบสุ่มที่นิยมใช้ เช่น ราชชิก

ริง (Raschig Ring) เบิร์ล แซดเดิลส์ (Berl Saddles) อินทาล็อก แซดเดิลส์ (Intalox Saddles) พอลล์ ริง (Pall Ring) สไปรอล ริง (Spiral Ring) และ เทลเลอเรทท์ (Tellerette) เป็นต้น ขนาดของตัวกลางที่ควรใช้สำหรับแพคเบดสครับเบอร์ที่มีการจัดเรียงตัวกลางแบบสุ่ม ดังตารางที่ 2.7 ตัวกลางบรรจุที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

- ควรให้มีพื้นที่เปียกของของเหลวต่อปริมาตรของแพคเบดสครับเบอร์มีค่ามาก เพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัส (Interfacial area) สำหรับวัฏภาคที่จะสัมผัสกันมาก
- ควรมีปริมาณของช่องว่างมาก ทั้งนี้เพื่อให้ของไหลทั้งสองไหลผ่านกันได้สะดวก ส่งผลให้ไม่เกิดความดันลดมากเกินไป
- ควรมีลักษณะที่เปียกของเหลวได้ดี
- ควรมีความหนาแน่นต่ำเพราะว่าแพคเบดสครับเบอร์ที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักของตัวกลางจะมาก ส่งผลต่อโครงสร้างของระบบในด้านความสามารถในการรับน้ำหนักรวม
- ราคาไม่แพงนัก
- อายุการใช้งานนาน ไม่สึกหรอง่าย

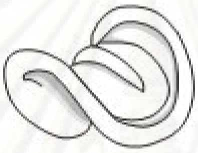
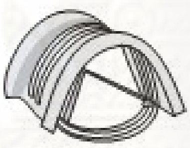
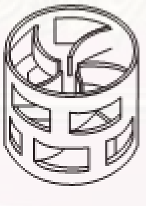
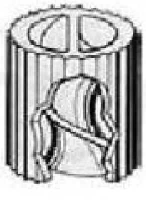
ขนาดของตัวกลางบรรจุที่ใช้มีผลต่อความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง ความดันลดของแพคเบดสครับเบอร์และราคาของตัวกลางบรรจุ โดยทั่วไปเมื่อขนาดของตัวกลางบรรจุเพิ่มขึ้น ราคาต่อหน่วยปริมาตรและความดันลดต่อหน่วยปริมาตรของตัวกลางบรรจุจะลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารหรือการดูดซึมก๊าซมลพิษลดลง ทำให้จำเป็นต้องออกแบบแพคเบดสครับเบอร์ให้สูงขึ้น ตัวกลางบรรจุมักมีขนาดตั้งแต่ 6.35–101.6 มิลลิเมตร โดยปกติขนาดของตัวกลางบรรจุสำหรับแพคเบดสครับเบอร์ที่มีการบรรจุตัวกลางแบบสุ่มนั้นควรมีขนาดไม่เกิน 1/10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางแพคเบดสครับเบอร์ ถ้ามีขนาดใหญ่กว่านี้การกระจายของของเหลวและประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารจะลดลงอย่างรวดเร็ว การนำไปใช้ประโยชน์ของตัวกลางบรรจุแบบสุ่มแต่ละชนิดดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.7 ขนาดของตัวกลางบรรจุที่ควรใช้สำหรับแพคเบดสครับเบอร์ที่บรรจุตัวกลางแบบสุ่ม

เส้นผ่านศูนย์กลางแพคเบดสครับเบอร์	ขนาดของตัวกลางบรรจุ
น้อยกว่า 0.3 เมตร (1 ฟุต)	น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว)
0.3 ถึง 0.9 เมตร (1 ถึง 3 ฟุต)	25 ถึง 38 มิลลิเมตร (1 ถึง 1.5 นิ้ว)
มากกว่า 0.9 เมตร (3 ฟุต)	50 ถึง 75 มิลลิเมตร (2 ถึง 3 นิ้ว)

ที่มา: พัตราภรณ์ ชาติศิริวัฒนา, 2542

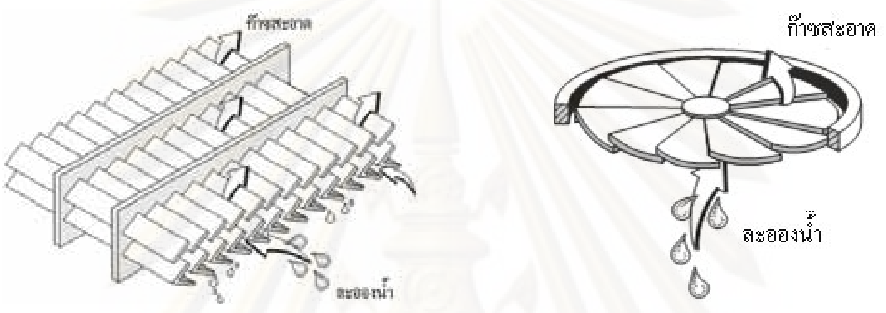
ตารางที่ 2.8 ลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์ของตัวกลางบรรจุชนิดต่างๆ

ชนิดของตัวกลางบรรจุ	ลักษณะตัวกลางบรรจุ	การนำไปใช้ประโยชน์
ราชชิกริง (Raschig Ring)		เป็นตัวกลางที่ใช้กันมานา แต่ประสิทธิภาพต่ำ วัสดุที่ใช้ทำมีหลายชนิด การบรรจุเป็นแบบ Dumping Wet หรือ Dry ราชชิกริงที่มีขนาดใหญ่กว่า 4-6 นิ้ว จะมีการบรรจุแบบสุ่ม ราชชิกริงมักจะทำให้เกิดการไหลไปตามผนังแพคเบดสครับเบอร์ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพต่ำลง
เบิร์ลแซดเดิลส์ (Berl Saddles)		มีประสิทธิภาพต่ำกว่าราชชิกริง ราคาแพง เกิดปัญหาการไหลไปตามผนังแพคเบดสครับเบอร์น้อยกว่าราชิกริง มีค่าความสูงของหน่วยในการถ่ายเทมวล (Height of Transfer unit) ต่ำกว่าราชชิกริง และค่าความดันลดสูงกว่าราชชิกริง เบิร์ลแซดเดิลส์มีปัญหาแตกได้ง่าย
อินทาล็อกแซดเดิลส์ (Intalox Saddles)		มีประสิทธิภาพสูงแต่ราคาแพง ให้ลักษณะเบดที่สม่ำเสมอ พื้นที่การปิดกั้นการไหลของของเหลวและก๊าซน้อย จุดท่วมสูงและความดันลดต่ำกว่าราชชิกริง และเบิร์ลแซดเดิลส์ แต่มีค่าความสูงของหน่วยในการถ่ายเทมวลต่ำกว่า
พอลล์ริง (Pall Ring)		ความดันลดต่ำกว่าราชชิกริง ค่าความสูงของหน่วยในการถ่ายเทมวลต่ำกว่า (ในบางระบบจะต่ำกว่าเบิร์ลแซดเดิลส์) จุดท่วมจะสูงกว่า การกระจายของเหลวเกิดขึ้นได้ดี และมีประสิทธิภาพสูง
สไปรอลริง (Spiral Ring)		มักจะติดตั้งแบบจัดเรียง ให้การกระจายตัวของของเหลวและก๊าซเกิดได้ดี มีพื้นที่ผิวสัมผัสดีกว่าราชชิกริง แต่ความดันลดสูงกว่า
เทลเลอเรทท์ (Tellerette)		มีความดันลดต่ำมาก ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ นิยมใช้ในการบำบัดมลพิษอากาศ

ที่มา: Perry, Green และ Maloney, 1984; Richards, 2000 และ Stingle, 1994

2.5.2.2 อุปกรณ์ดักจับละอองน้ำ (Demister)

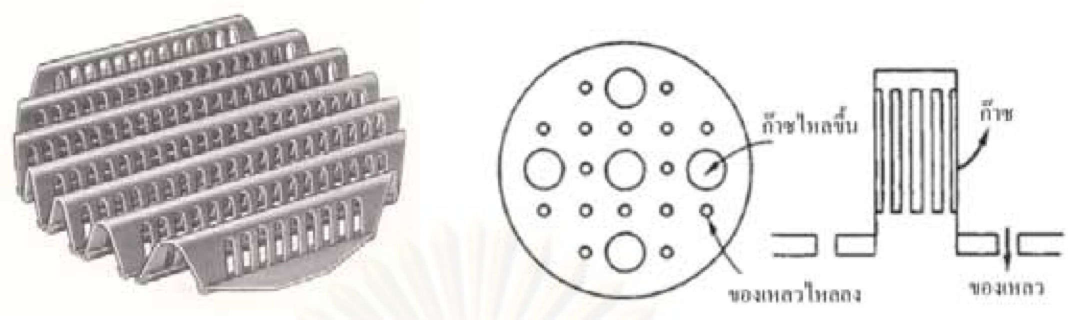
การควบคุมก๊าซมลพิษต่าง ๆด้วยระบบแพคเบดสครับเบอร์นั้นมักจะมีหยดของเหลวเล็ก ๆที่อยู่ในกระแสก๊าซสะอาดออกจากระบบ โดยทั่วไปขนาดของหยดของเหลวที่เกิดขึ้นประมาณ 200-1,000 ไมครอน จึงจำเป็นต้องมีการดักจับหยดของเหลวเล็ก ๆเหล่านั้นก่อนปล่อยออกจากปล่อง หากปราศจากอุปกรณ์ดักจับละอองน้ำจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียสารดูดซึม รวมทั้งส่งผลให้ไอของหยดของเหลวเล็ก ๆลอยตัวขึ้น เกิดเป็นควันสีขาวเหนือปล่องไอเสีย ตัวอย่างอุปกรณ์ดักจับละอองน้ำ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์ดักจับละอองน้ำ (Richards, 2000)

2.5.2.3 แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุ (Packing media support plate)

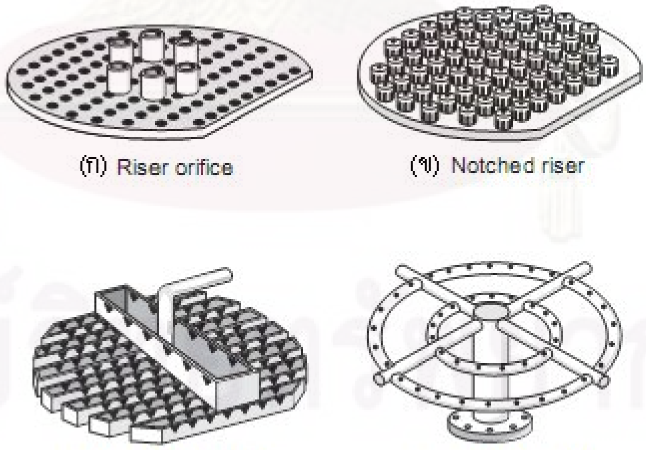
แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุมีหน้าที่เพื่อรับน้ำหนักของตัวกลางในขณะที่มีการกระจายของของเหลว แต่จะยอมให้ก๊าซและของเหลวไหลผ่านได้สะดวก แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุที่มีการออกแบบได้ไม่ดีนั้นจะทำให้ความดันลดเกิดขึ้นสูง และเกิดการท่วมของของเหลวได้ กริด (Grid) หรือแผ่นรูพรุน (Perforated plate) แบบธรรมดาสามารถใช้รองรับตัวกลางบรรจุได้ แต่จำเป็นต้องยอมให้ของเหลวและก๊าซไหลผ่านช่องทางเดียวกัน บางครั้งมีการใช้กริดที่มีช่องว่างกว้าง เพื่อให้ของเหลวที่ใช้ในการดูดซึมไหลผ่านไปด้วยดี การออกแบบแผ่นรองรับตัวกลางบรรจุที่ดีนั้นควรแยกช่องทางการไหลของก๊าซออกจากของเหลว โดยให้ช่องทางการไหลของก๊าซอยู่ข้างเหนือช่องทางไหลของของเหลว การออกแบบลักษณะนี้จะทำให้ความดันลดต่ำและไม่มีโอกาสเกิดการท่วมของของเหลว แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุมีขนาดต่าง ๆกัน วัสดุที่ใช้อาจจะเป็นโลหะ เซรามิก หรือพลาสติก ตัวอย่างลักษณะแผ่นรองรับตัวกลางบรรจุ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุ (Perry, Green และ Maloney, 1984)

2.5.2.4 ตัวกระจายของเหลว (Liquid Distributor)

ตัวกระจายของเหลวทำหน้าที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของของเหลวบนตัวกลางบรรจุเกิดขึ้นอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอในขณะที่ป้อนเข้าแพคเบดสครับเบอร์ ดังนั้นการเลือกชนิดของตัวกระจายของเหลวจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพราะถ้าการกระจายตัวของของเหลวเกิดขึ้นไม่ทั่วถึงแล้วจะส่งผลให้บางส่วนของตัวกลางบรรจุแห้ง ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารภายในระบบมีค่าลดลง การเลือกขนาดและชนิดของตัวกระจายของเหลวนี้ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของแพคเบดสครับเบอร์ เช่น ถ้าแพคเบดสครับเบอร์มีขนาดเล็กอาจจะเลือกใช้หัวฉีด (Spray nozzle) แต่ถ้ามีขนาดใหญ่อาจจะต้องใช้อุปกรณ์พวกออริฟิส (Orifice) หรือเวียร์ (Wier) ซึ่งเป็นตัวกระจายของเหลวที่นิยมใช้มากที่สุด ตัวกระจายของเหลวชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ตัวกระจายของเหลว (Richards, 2000)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

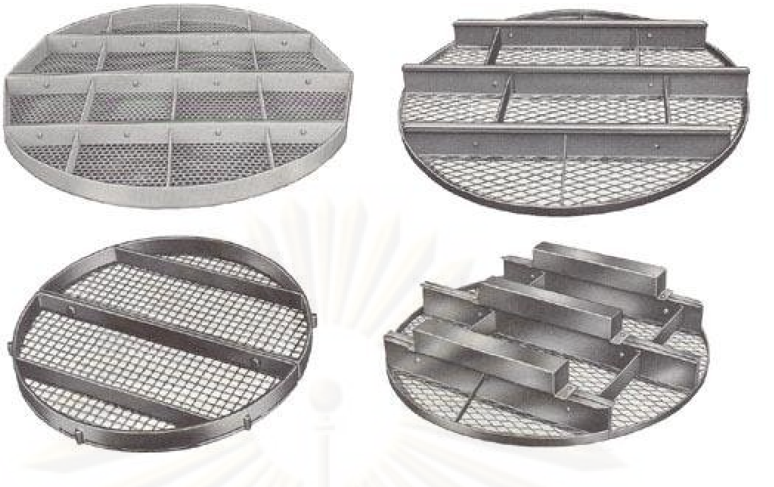
2.5.2.5 ตัวกระจายของเหลวซ้ำ (Liquid Redistributor)

เมื่อของเหลวหรือสารดูดซึมไหลผ่านตัวกลางที่บรรจุอยู่ในภายในแพคเบดสครับเบอร์ ของเหลวจะซึมผ่านตัวกลางบรรจุลงสู่ด้านล่างโดยไหลลงในแนวดิ่ง ขณะเดียวกันก็จะมีของเหลวบางส่วนที่ไหลเข้าหาผนังของแพคเบดสครับเบอร์ ช่องว่างที่เกิดจากผนังสครับเบอร์กับตัวกลางบรรจุจะมีช่องว่างสำหรับการไหลของของเหลวมากกว่าบริเวณที่เป็นตัวกลางบรรจุอย่างเดียว ดังนั้นของเหลวส่วนใหญ่เมื่อไหลผ่านตัวกลางบรรจุไประยะหนึ่งจะไหลลงไปตามผนังของแพคเบดสครับเบอร์ แทนที่จะไหลผ่านตัวกลางที่บรรจุอยู่ส่วนกลาง ทำให้ตัวกลางที่บรรจุอยู่ส่วนกลางของแพคเบดสครับเบอร์ไม่สามารถสัมผัสกับของเหลวได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ลดลง ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดลักษณะดังกล่าวข้างต้น จึงจำเป็นต้องใส่ตัวกระจายของเหลวซ้ำ เพื่อรวบรวมของเหลวส่วนที่อยู่กับผนังแพคเบดสครับเบอร์ นำกลับมากระจายให้ทั่วตัวกลางบรรจุอีกครั้ง และในขณะเดียวกันตัวกระจายของเหลวซ้ำยังทำหน้าที่เป็นตัวรองรับตัวกลางบรรจุที่อยู่ด้านบนด้วย จากรูปที่ 2.14 เป็นตัวกระจายของเหลวซ้ำแบบกวาดผนัง (Wall wiper) ประกอบด้วยวงแหวน ซึ่งทำหน้าที่รวบรวมของเหลวจากผนังของแพคเบดสครับเบอร์แล้วเปลี่ยนทิศทางการไหลของของเหลวสู่ศูนย์กลางของแพคเบดสครับเบอร์

รูปที่ 2.14 ตัวกระจายของเหลวอีกครั้ง (Richards, 2000)

2.5.2.6 แผ่นทับหน้า (Hold-down Plate)

แผ่นทับหน้าจะวางอยู่ส่วนบนสุดของตัวกลางบรรจุ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวกลางที่บรรจุเกิดการเคลื่อนตัว (Fluidization) ซึ่งเกิดเมื่ออัตราการไหลของก๊าซมีค่าสูงหรือถ้าเกิดการล้น (Surging) เกิดขึ้นเนื่องจากการเดินระบบที่ผิดพลาด ลักษณะของแผ่นทับหน้า ดังรูปที่ 2.15



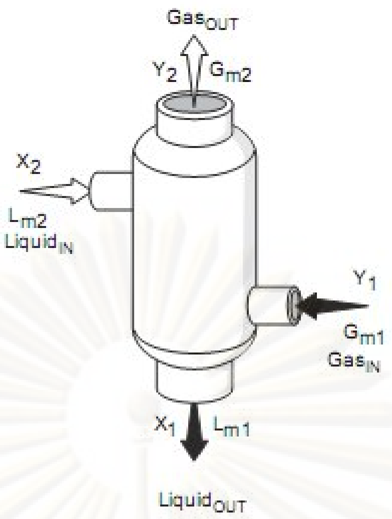
รูปที่ 2.15 แผ่นทับหน้า (Perry, Green และ Maloney, 1984)

2.6 การออกแบบแพคเบดสครับเบอร์

การออกแบบแพคเบดสครับเบอร์เพื่อใช้สำหรับควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้น จำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรต่างๆของกระบวนการผลิต เช่น อัตราการไหลของก๊าซมลพิษ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของก๊าซมลพิษ และความเข้มข้นสุดท้ายที่ต้องการบำบัด ซึ่งโดยปกติใช้ค่ามาตรฐานสารมลพิษที่ปล่อยออกจากปล่องเป็นเกณฑ์ นำค่าตัวแปรดังกล่าวข้างต้นเพื่อใช้ในการออกแบบแพคเบดสครับเบอร์เพื่อที่จะทราบถึง 1) อัตราการไหลของของเหลวหรือสารที่ใช้ดูดซึมต่อก๊าซ 2) เส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมของแพคเบดสครับเบอร์และ 3) ความสูงของตัวกลางบรรจุ สำหรับรายละเอียดการออกแบบจะกล่าวต่อไป

2.6.1 อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ

การออกแบบแพคเบดสครับเบอร์นั้นสิ่งที่จำเป็นต้องคำนวณหาในอันดับแรก ก็คืออัตราไหลและองค์ประกอบของก๊าซมลพิษและของเหลวที่ไหลเข้าสู่ระบบ ในการคำนวณนั้นจะใช้หลักสมดุลมวลสารเพื่อพิจารณาอัตราไหลและองค์ประกอบในแต่ละกระแสที่จะเข้าสู่ระบบควบคุม ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 สมดุลมวลสารของระบบแพคเบดสครับเบอร์ (Richards, 2000)

จากรูปที่ 2.16 จะได้ว่า

กรัมโมลที่เข้า = กรัมโมลที่ออก

$$G_m(in) + L_m(in) = G_m(out) + L_m(out)$$

เมื่อ L_m = อัตราไหลของของเหลว หน่วย กรัมโมล/ ชั่วโมง

G_m = อัตราไหลของก๊าซ หน่วย กรัมโมล/ ชั่วโมง

จากสมการจะสมมติให้อัตราการไหลของก๊าซและของเหลวในตัวดูดซึมไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณมวลทั้งหมดที่มีอยู่ ($G_{m,1} = G_{m,2}$ และ $L_{m,1} = L_{m,2}$) ซึ่งระบบควบคุมมลพิษอากาศนั้น มวลของสิ่งปนเปื้อนหรือสารมลพิษจะเป็นสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของก๊าซและของเหลว (นพภาพร พานิช และคณะ, 2551)

$$G_m(Y_1 - Y_2) = L_m(X_2 - X_1) \tag{2.22}$$

$$Y_1 - Y_2 = \frac{L_m}{G_m}(X_2 - X_1) \tag{2.23}$$

เมื่อ X_1, X_2 = สัดส่วนโมลของตัวละลายในของเหลวบริสุทธิ์บริเวณด้านล่างและด้านบนของแพคเบดสครับเบอร์

Y_1, Y_2 = สัดส่วนโมลของตัวละลายในก๊าซมลพิษบริเวณด้านล่างและด้านบนของแพคเบดสครับเบอร์

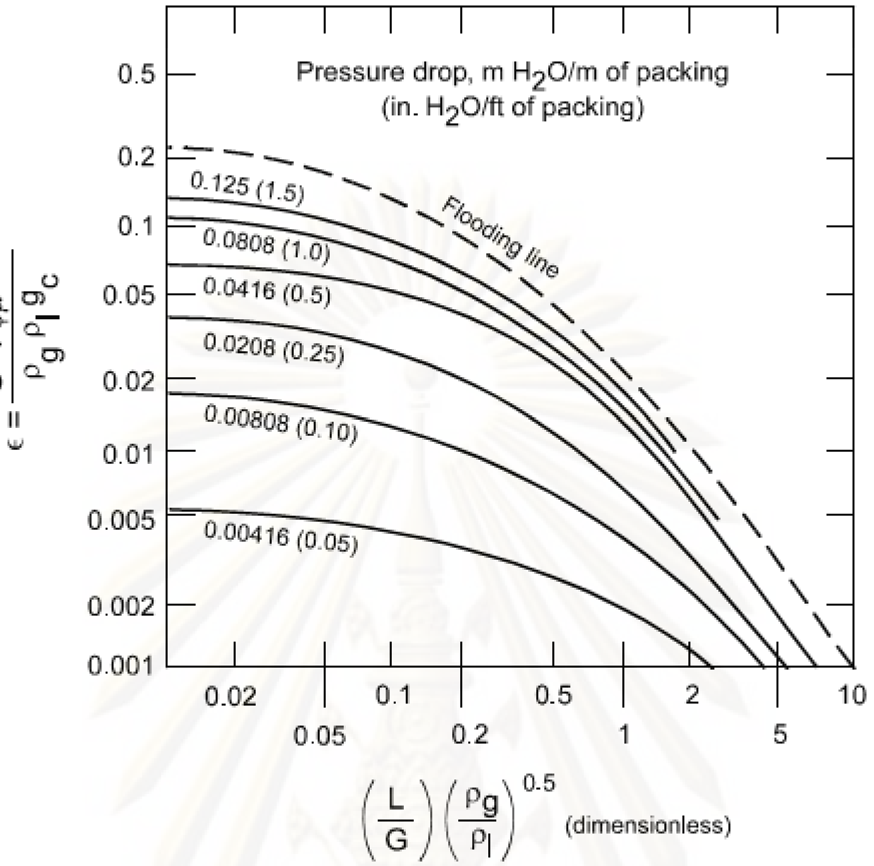
สมการดังกล่าวข้างต้นนั้นเป็นสมการเส้นตรง ความชันของเส้นตรงนี้คือ อัตราการไหลของของเหลวที่ใช้ดูดซึมต่ออัตราการไหลของก๊าซมลพิษ (Liquid-Gas Ratio) หรือ $\frac{L_m}{G_m}$

2.6.2 ความต้องการของเหลวในระบบ

การออกแบบแพคเบดสครับเบอร์นั้นปริมาณของก๊าซมลพิษที่เข้าสู่ระบบควบคุม ความเข้มข้นของก๊าซและปริมาณของของเหลวหรือสารดูดซึม เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องการทราบ แต่ทั้งนี้ปริมาณของของเหลวหรืออัตราเร็วของของเหลวหรือสารดูดซึมเป็นข้อมูลที่ไม่ทราบ แต่สามารถคำนวณได้จากอัตราเร็วของของเหลวต่ำสุด (Minimum Liquid Rate) ณ จุดที่ความเข้มข้นของก๊าซที่เข้าสู่ระบบควบคุมก๊าซมลพิษอยู่ในสภาวะสมดุลกับความเข้มข้นของของเหลวขาออก ซึ่งเป็นจุดที่ของเหลวมีความเข้มข้นมากที่สุด ($X_{\max}$) สำหรับการใช้งานจริงมักจะไม่ใช้ค่าอัตราการไหลของของเหลวที่ต่ำสุด แต่จะเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวให้มากกว่าค่าต่ำสุดดังกล่าว โดยทั่วไปนั้นมักเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวอีก 25–100 เปอร์เซ็นต์ หรือ 1.5 เท่าจากค่าความต้องการต่ำสุด (นพภาพร พานิช และคณะ, 2551)

2.6.3 เส้นผ่านศูนย์กลางของแพคเบดสครับเบอร์

ตัวแปรหลักที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแพคเบดสครับเบอร์ คือ อัตราเร็วของก๊าซ เมื่อลดขนาดของแพคเบดสครับเบอร์ลง อัตราเร็วของก๊าซจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ของเหลวถูกต้านทานด้วยอัตราเร็วของก๊าซ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างตัวกลางบรรจุ ถ้าอัตราเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นทำให้ความดันลดมากขึ้น จนกระทั่งของเหลวถูกต้านทานด้วยก๊าซ ทำให้เกิดการท่วมของของเหลวขึ้น ความเร็วของก๊าซที่ทำให้เกิดการท่วมนี้ก็คือ ความเร็วไหลย้อนกลับ (Flooding Velocity) ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดใหญ่ขึ้นก็สามารถช่วยลดปัญหาการท่วมของของเหลวได้ แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น ในทางปฏิบัติความเร็วของก๊าซที่ใช้จะอยู่ในช่วง 50–75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วไหลย้อนกลับ (นพภาพร พานิช และคณะ, 2551; Strigle, 1994) ในการหาค่าความเร็วไหลย้อนกลับนั้นมักใช้กราฟ U.S. Stoneware's Generalized Pressure Drop Correlation ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก๊าซในแพคเบดสครับเบอร์ที่ทำให้ของเหลวไหลย้อนกลับกับความดันลด (Manyele, 2008)

2.6.4 ความสูงของตัวกลางบรรจุ

เมื่อคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของแพคเบดสครับเบอร์ได้แล้ว ก็สามารถคำนวณหาความสูงของตัวกลางได้เช่นกัน ความสูงของตัวกลางที่บรรจุในแพคเบดสครับเบอร์นั้นหมายถึงความกว้างและความสูงของตัวกลาง ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการแยกสารมลพิษอย่างสมบูรณ์ การหาความสูงของตัวกลาง สามารถหาได้จากสมการที่ 2.24

$$Z = HTU \times NTU \tag{2.24}$$

เมื่อ HTU = ความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล (Height of Transfer Unit), เมตร

NTU = จำนวนของหน่วยการถ่ายเทมวล (Number of Transfer Unit), เมตร

จำนวนและความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล (Number and Height of Transfer Unit) ใช้ได้ทั้งในสภาพของก๊าซและของเหลว ดังสมการที่ 2.25

$$Z = N_{OG} \times H_{OG} = N_{OL} \times H_{OL} \tag{2.25}$$

เมื่อ N_{OG} = จำนวนของหน่วยการถ่ายเทมวล (Number of Transfer Unit) ที่ขึ้นกับประสิทธิภาพของฟิล์มก๊าซทั้งหมด

N_{OL} = จำนวนของหน่วยการถ่ายเทมวล (Number of Transfer Unit) ที่ขึ้นกับประสิทธิภาพของฟิล์มของเหลว

H_{OG} = ความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล (Height of Transfer Unit) ที่ขึ้นกับประสิทธิภาพของฟิล์มก๊าซทั้งหมด

H_{OL} = ความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล (Height of Transfer Unit) ที่ขึ้นกับประสิทธิภาพของฟิล์มของเหลว

การหาค่า N_{OG} หาได้จากสมการที่ 2.26

$$N_{OG} = \frac{\ln\left[\left(\frac{Y_1 - mX_2}{Y_2 - mX_2}\right)\left(1 - \frac{mG_m}{L_m}\right) + \frac{mG_m}{L_m}\right]}{1 - \frac{mG_m}{L_m}} \tag{2.26}$$

เมื่อ m = ความชันของเส้นสมดุล

G_m = อัตราไหลของก๊าซ, กิโลกรัมโมลต่อชั่วโมง

L_m = อัตราไหลของของเหลว, กิโลกรัมโมลต่อชั่วโมง

X_2 = สัดส่วนโมลของสารละลายเข้าไปในแพคเบดสครับเบอร์

Y_1 = สัดส่วนโมลของสารละลายในก๊าซที่เข้าไปในแพคเบดสครับเบอร์

Y_2 = สัดส่วนโมลของสารละลายในก๊าซที่ออกจากแพคเบดสครับเบอร์

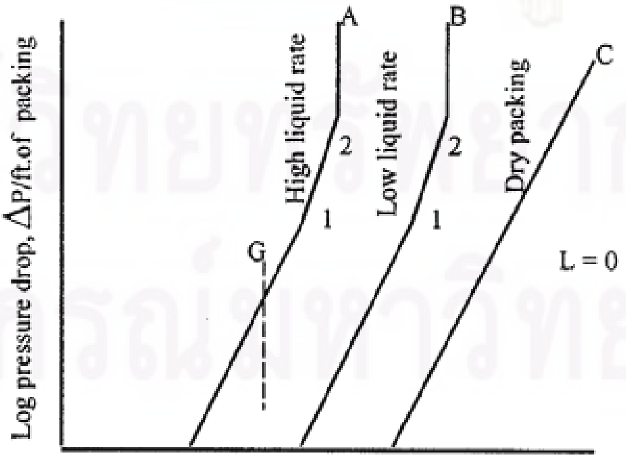
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการเดินระบบ

2.7.1 ความดันลด

เมื่อของเหลวไหลผ่านวัตถุรูปทรงต่าง ๆจะเกิดความแตกต่างของความดันระหว่างทางเข้าและทางออกของของไหล ความดันที่แตกต่างนี้เรียกว่าความดันลด ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความดันลดภายในแพคเบดสครับเบอร์มีดังนี้ (Leva, 1951)

1) ความเร็วมวลก๊าซ
2) ความเร็วมวลของของเหลว
3) เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลางบรรจุ
4) เปอร์เซ็นต์ช่องว่างในตัวกลางบรรจุ
5) ความหนาแน่นก๊าซ

ความดันลดภายในแพคเบดสครับเบอร์จะเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.18 กล่าวคือเมื่อก๊าซไหลขึ้นจากด้านล่างของแพคเบดสครับเบอร์ และในขณะเดียวกันของเหลวหรือสารที่ใช้ในการดูดซึมเริ่มไหลลงจากด้านบน จะพบว่าที่อัตราไหลของของเหลวต่ำ เส้นความดันลดจะคล้ายกับกรณีที่ไม่มีของเหลวไหลอยู่ด้วย นั่นคือการไหลของของเหลวไม่มีผลต่อการไหลของก๊าซ แต่เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นค่าหนึ่ง ความดันลดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในช่วง 1–2 บนเส้นกราฟ B บนช่วง 1–2 นี้ การไหลของของเหลวมีผลต่อค่าการไหลของก๊าซและค่าคงค้างของของเหลว (Hold up) จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยของเหลวจะอยู่ในช่องว่างของตัวกลางบรรจุเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความต้านทานของการไหลสูงขึ้นเรื่อย ๆ และที่การไหลของก๊าซเหนือจุดที่ 2 จะทำให้ค่าความดันลดสูงขึ้นมาก และจะทำให้ของเหลวในแพคเบดสครับเบอร์หยุดไหล จุดที่ 1 เรียกว่า loading point และจุดที่ 2 เรียกว่า จุดการท่วม (flooding point) สำหรับการไหลของของเหลวที่ค่านั้น ๆถ้าการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นจะได้เส้นกราฟใหม่ คือเส้นกราฟ A ซึ่งพบว่าจุดการท่วมจะเกิดขึ้นที่ค่าการไหลของก๊าซต่ำกว่า แต่ค่าความดันลดยังคงเป็นค่าเดิม (Foust, 1980)



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วของก๊าซ (Foust, 1980)

2.7.2 การคงค้างของของเหลว

การเกิดการคงค้างของของเหลว (Hold up) จะเกิดในขณะเดินระบบ ซึ่งของเหลวจะไปเกาะติดกับพื้นที่ผิวของตัวกลางบรรจุ โดยทั่วไปจะแสดงค่าในรูปปริมาตรของเหลวที่เกาะติดต่อปริมาตรของแพคเบดสครับเบอร์ โดยปกติในการเดินระบบต้องการค่าคงค้างของของเหลวต่ำ เพราะถ้าหากมีค่าสูงจะทำให้น้ำหนักรวมของแพคเบดสครับเบอร์มีค่ามาก เวลาในการกระจายตัวของก๊าซและของเหลวสูงและความดันลดสูง ในกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารดูดซึมสามารถคำนวณค่าการคงค้างของของเหลวได้ดังนี้

$$h = 0.0004\left(\frac{L}{D_p}\right)^{0.6} \qquad (2.27)$$

เมื่อ L = อัตราการไหลของของเหลว (ปอนด์ต่อตารางฟุต-ชั่วโมง)

D_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมซึ่งมีปริมาตรเท่ากับตัวกลางบรรจุ 1 เม็ด (นิ้ว)

2.7.3 การกระจายของของเหลว

ตัวกลางบรรจุที่มีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรสูง อาจไม่เป็นผลดีต่อการสัมผัสระหว่างวัฏภาคก๊าซและของเหลว หากการกระจายของของเหลวไม่สม่ำเสมอบนพื้นผิวของตัวกลางบรรจุ การกระจายของของเหลวและขนาดของตัวกลางบรรจุที่ถูกต้องนั้น เป็นสิ่งจำเป็นอันดับแรกของการทำงานของสครับเบอร์ เมื่ออัตราการไหลของของเหลวลดลง จะทำให้พื้นที่ผิวเปียกลดลง สำหรับตัวกลางบรรจุชนิดหนึ่งๆ จะมีค่าอัตราการไหลของของเหลวต่ำสุด ที่ทำให้พื้นที่ผิวของตัวกลางบรรจุเปียกทั้งหมด ซึ่งจะวัดเป็นอัตราการเปียก (Wetting rate) ได้จากสมการที่ 2.28

$$L_{\min} = MWT \times a_t \qquad (2.28)$$

เมื่อ $L_{\min}$ = อัตราการไหลของของเหลว

MWR = ค่าอัตราเปียกต่ำสุด

a_t = พื้นที่ผิวของตัวกลางบรรจุต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมัคร ขันเงิน (2538) ศึกษาระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้วิธีแบบเปียก ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของปริมาณก๊าซเสียต่อปริมาณของเหลวที่เข้าหอดูดซึม (L/G) อัตราส่วนโดยโมลของปริมาณสารดูดซึมต่อปริมาณสารที่ถูกดูดซึม ชนิดและแหล่งกำเนิดของสารดูดซึม และขนาดอนุภาคของสารดูดซึม โดยใช้หอดูดซึมแบบบรรจุตัวกลาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร ตัวกลางบรรจุที่ใช้ชนิด Ceramic intalox saddle ขนาด 1 นิ้ว และบรรจุสูง 180 เซนติเมตร ใช้ปูนขาวและหินปูนจากแหล่งแม่เมาะและพุทธบาท เป็นสารดูดซึม ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีความเข้มข้นประมาณ 1,900 ส่วนในล้านส่วน และศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในวัฏภาคก๊าซ (K_Ga) ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมล L/G, Ca:S เพิ่มขึ้น ในการทดลองที่มีสภาวะเดียวกันสารดูดซึมชนิดปูนขาวให้ผลดีกว่าหินปูนจากทั้งสองแหล่ง เมื่อใช้สารแขวนลอยหินปูนเป็นของเหลวป้อนเข้าหอดูดซึม พบว่าค่า K_Ga มีค่ามากกว่ากรณีที่ใช้น้ำเป็นสารดูดซึม

วิทย์ธวัช ปราการวิวัฒน์ (2541) ศึกษาการดูดซึมก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ด้วยหอดูดซึมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 เซนติเมตร ความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ 300–1,600 ส่วนในล้านส่วน (ppm) และอัตราส่วนของก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) ต่อก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) อยู่ในช่วง 0.69–3.55 วัสดุบรรจุที่ใช้เป็นแบบราชชิกริง (Raschig Ring) ขนาด 1.59 เซนติเมตร ความสูง 110 เซนติเมตร อัตราการไหลของก๊าซอยู่ในช่วง 21–474 ลิตรต่อนาที สารละลายดูดซึมสองชนิดคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) ให้ประสิทธิภาพการดูดซึมร้อยละ 81 และ 95 ตามลำดับ การดูดซึมโดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพการดูดกลืนแปรผันตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่จะผกผันกับอัตราไหลของก๊าซ และประสิทธิภาพการดูดซึมไม่ขึ้นกับอัตราการไหลของของเหลว โดยประสิทธิภาพจะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก

สถิตย์ จุ้ยเตย (2541) ศึกษาผลของการเติมออกซิเจนต่อการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในหอดูดซึมแบบเบดนิ่ง การศึกษาพบว่าปริมาณการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.68 เป็น 23.15, 32.12 และ 50.04 โดยมวล โดยใช้อัตราไหลของของเหลวและก๊าซคงที่ ที่ 200 ลิตรต่อชั่วโมงและ 18 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการตกตะกอนขององค์ประกอบซัลเฟตและ

ซัลไฟด์มากขึ้น ทำให้เกิดการอุดตันตัวกลางบรรจุ ส่งผลให้ปริมาณการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลดลง

พัสตราภรณ์ ชาติศิริวัฒนา (2542) ศึกษาการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยหอดูดซึมแบบแพคเบดที่มีกระแสการไหลแบบสวนทางกัน และแบบไหลตัดกัน ซึ่งมีขนาดของหอ 1×1×3 ฟุต และใช้ตัวกลางบรรจุคือ ราชชิกริง ขนาด ¾ นิ้ว ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้น 1,000–1,500 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลของน้ำ 1,492–3,186 ปอนด์ต่อชั่วโมง–ตารางฟุต ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความดันลดและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม พบว่าความดันลดในหอดูดซึมแบบกระแสไหลตัดกันมีความดันลดต่ำกว่าแบบกระแสไหลสวนทางกันถึง 2 เท่า ในช่วงอัตราเร็วก๊าซเท่ากับ 68-238 ปอนด์ต่อชั่วโมง-ตารางฟุต ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในหอดูดซึมแบบกระแสไหลสวนทางกันและไหลตัดกันอยู่ในช่วง 1.33–5.4 ปอนด์โมลต่อชั่วโมง-ลูกบาศก์ฟุต-บรรยากาศ และ 1.81–4.41 ปอนด์โมลต่อชั่วโมง–ลูกบาศก์ฟุต–บรรยากาศ ตามลำดับ

ธนิตา ทองเงา (2551) ศึกษาประสิทธิภาพของสครับเบอร์แบบแพคเบดในการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้ตัวกลางพลาสติกชนิดเทลเลอเรทท์ ขนาด 70 มิลลิเมตร บรรจุตัวกลางสูง 1.50 เมตร ทั้งนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นก๊าซ ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งใช้เป็นตัวดูดซึม อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ (L/G) และความเร็วก๊าซ แปรผันความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในช่วง 200–500 ส่วนในล้านส่วน และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในช่วง 50–200 ส่วนในล้านส่วน แปรผันความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 0.025 โมลาร์ อัตราส่วนของน้ำและก๊าซ (L/G) ที่ 5–13 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตรของก๊าซ และความเร็วก๊าซที่ 0.707–1.627 เมตรต่อนาที ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์จะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.01 และ 0.002 โมลต่อลิตร ตามลำดับ เพิ่มอัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ (L/G) และลดความเร็วของก๊าซ เวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดคือ 60 วินาที สำหรับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และ 120 วินาที สำหรับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ เท่ากับร้อยละ 98 และ 100 ตามลำดับ

Aroonwilas, Tontiwachwuthikul และ Chakma (2001) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเดินระบบและออกแบบการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในแพคเบดสครับเบอร์ ผลการทดลองสรุปว่า การเพิ่มอัตราไหลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมเพิ่มมากขึ้น พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางมีผลต่ออัตราไหลของของเหลว คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางที่สูงจะดูดซึมได้ดีที่สุด ในขณะที่พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางที่ต่ำจะดูดซึมได้น้อยที่สุด และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารจะมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิที่สูงมากกว่า 36

องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารจะลดลงร้อยละ 10 การจัดเรียงตัวของตัวกลาง 90 องศา และ 45 องศา มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมมากกว่าจัดเรียงตัวของตัวกลาง 0 องศา และลักษณะการกระจายตัวของน้ำ มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซึมน้อยมาก

Senol (2001) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลสารของแพคเบดสครับเบอร์ที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ตัวกลางบรรจุที่ใช้ชนิดราชชิกริง ที่มีขนาดต่างกันคือ 6.25, 9 และ 10.8 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของแพคเบดสครับเบอร์ 9 เซนติเมตร สูง 1.90 เมตร ใช้การกระจายน้ำจากด้านบนของสครับเบอร์ที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 470 จุดต่อตารางเมตร จากการศึกษาพบว่าการถ่ายเทมวลสารขึ้นกับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างไอกับของเหลวและสัดส่วนของการท่วม โดยเมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น ทำให้มีการถ่ายเทมวลสารดีขึ้นเพราะสามารถสัมผัสกับสารดูดซึมได้ดี

Sultan, Hamed และ Sultan (2002) ศึกษาตัวแปรต่างๆที่ทางเข้าแพคเบดสครับเบอร์ที่มีผลต่อการนำของเหลวมาใช้ซ้ำโดยศึกษาตัวแปรต่างๆดังนี้คือ อุณหภูมิ อัตราไหลของสารละลาย ความเข้มข้นสารละลาย อัตราไหลก๊าซ และความชื้น พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราไหลของก๊าซจาก 0.005-0.023 กิโลกรัมต่อวินาที เพิ่มอุณหภูมิที่ทางเข้า และเพิ่มอัตราไหลของสารละลายทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้น แต่ความดันไอของอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความชื้นของอากาศ มีผลทำให้พลังงานศักย์สำหรับการถ่ายเทมวลสารลดลง และเมื่อเพิ่มความชื้นของก๊าซที่เข้าและความเข้มข้นสารละลายที่เข้า อัตราการนำของเหลวกลับมาใช้ใหม่จะลดลงด้วย

Wang, Lana และ Chuang (2004) ศึกษาลักษณะการถ่ายเทมวลสารของก๊าซกับของเหลว ในแพคเบดสครับเบอร์โดยใช้วัสดุบรรจุชนิดราชชิกริง เส้นผ่านศูนย์กลางของแพคเบดสครับเบอร์ 0.06 เมตร สูง 1 เมตร ทำการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์กับกรดซัลฟูริกโดยใช้สารละลายกรดประมาณ 5 ลิตร ที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 96 โดยมวล พบว่าเมื่ออัตราไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 0.764–1.27 กิโลกรัมต่อตารางเมตร–วินาที ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลวัฏภาคของเหลว (K_L) จะเพิ่มขึ้น แต่ค่า K_L ยังจะคงที่เมื่ออัตราไหลเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรดจากร้อยละ 90 โดยมวล เป็นร้อยละ 96 โดยมวล มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น

ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบตัวแปรและค่าที่ใช้ในงานวิจัยต่าง ๆที่ผ่านมา

คณะผู้วิจัย	ชนิดถังปฏิกรณ์	สารมลพิษ	ความเข้มข้นสารมลพิษ (ส่วนในล้านส่วน)	สารดูดซึม	ความเข้มข้นสารดูดซึม (โมลต่อลิตร)	ความเร็วก๊าซ (เมตรต่อวินาที)	อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ (L/G)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
Majeed, Korda และ Molnar (1995)	Air Lift Tube Reactor	SO_2	1,000–4,000	$CaCO_3$/NaOH	10–20wt% / 0.5–1.0	1.77–7.07	8.3–33.3/ 10.3–43.3	67.3–89.10/ 92.57–98.5
Chu, Chien และ Li (2000)	Wet Scrubber	SO_2	500–1,800	$KMnO_4$/NaOH	0.01–0.05/ 0.01–0.1	N/A	N/A	N/A
		NO	300–800					
Chien และ Chu (2000)	Wet Scrubber	SO_x/NO_x	500–2,000/ 200–800	$NaClO_2$	0–1.0	N/A	5-10	100.0–59.8/ 44.0–96.8
		NO_2	300–800	$NaClO_2$	0–1.0	N/A	10-30	80.7–91.8
Liu, Wey และ Lin (2002)	Spray dryer	SO_2/HCl	500–2,000/ 500–2,000	$Ca(OH)_2$,$CaCl_2$	1:1	N/A	N/A	56.7–97.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

44

ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบตัวแปรและค่าที่ใช้ในงานวิจัยต่าง ๆที่ผ่านมา (ต่อ)

คณะผู้วิจัย	ชนิดถังปฏิกรณ์	สารมลพิษ	ความเข้มข้นสารมลพิษ (ส่วนในล้านส่วน)	สารดูดซึม	ความเข้มข้นสารดูดซึม (โมลต่อลิตร)	ความเร็วก๊าซ (เมตรต่อวินาที)	อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ (L/G)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
Colle, Thomas และ Vanderschuren (2005)	Packed Bed Scrubber	SO_2	500–5,000	H_2SO_4/H_2O_2	1.6–6.6/ 0.13–0.74	0.621–0.786	N/A	95.0–98.0
Banyopadhyay และ Biswas (2006)	Tapered Bubble Column Scrubber	SO_2	400–1,780	$NaOH/H_2O$	2×10^{-4}–5×10^{-3}	6.20×10^{-3} / 3.75–6.20 $\times10^{-3}$ m^3/s	1–6	15–100
Jung, Jeong, Lee, Cha และ Park (2007)	Packed Bed Scrubber	SO_2	375±25	EDTA	0.03	0.1	27.52–58.98	85–100
Ipek, Ekinci, Arslan, Cuci และ Hasar (2008)	Wet Scrubber	SO_2	1,000–5,000	NH_3	0–328 mg/L	0.1–0.16 m^3/s	N/A	91–100

45

ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบตัวแปรและค่าที่ใช้ในงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา (ต่อ)

คณะผู้วิจัย	ชนิดถังปฏิกรณ์	สารมลพิษ	ความเข้มข้นสารมลพิษ (ส่วนในล้านส่วน)	สารดูดซึม	ความเข้มข้นสารดูดซึม (โมลต่อลิตร)	ความเร็วก๊าซ (เมตรต่อวินาที)	อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ (L/G)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
สมัคร (2536)	Packed Bed Scrubber	SO_2	1,900	$CaCO_3$, CaO	N/A	N/A	4.86, 6.31 และ 10.52	95–99.8
ธนิตา (2551)	Packed Bed Scrubber	SO_2	200–500	NaOH	0–0.025	0.707–1.627	5–13	98–100
		H_2S	50–200					

2.9 สรุปผลการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์นั้นได้แก่

- ความเข้มข้นของก๊าซที่เข้าระบบแพคเบดสครับเบอร์
- อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ
- ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการดูดซึม
- อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ (L/G)

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆดังกล่าวข้างต้นเพิ่มเติมจากงานวิจัยของ ธนิตา ทองเงา (2551) โดยมีตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 2.10 รวมทั้งศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม และการออกแบบแพคเบดสครับเบอร์เพื่อประยุกต์ใช้อุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.10 งานวิจัยที่ทำการศึกษาเพิ่มเติม

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	ธนิตา ทองเงา (2551)	งานวิจัยที่ศึกษาเพิ่มเติม
ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	200, 300 และ 500	1000, 2000, 3000 และ 4000
อัตราการไหลก๊าซ (ลิตรต่อนาที)	50, 75, 95 และ 115	200, 400 และ 600
อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ (ลิตรต่อลูกบาศก์เมตรก๊าซ)	6–13	3.3–13.3
ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	0.001, 0.01 และ 0.025	0.001, 0.003, 0.005, 0.01, 0.02 และ 0.03
การหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับไปใช้ซ้ำ	–	วัดพีเอชของสารละลายที่ผ่านการดูดซึม เพื่อนำกลับไปใช้อีกครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
การดำเนินงานวิจัย

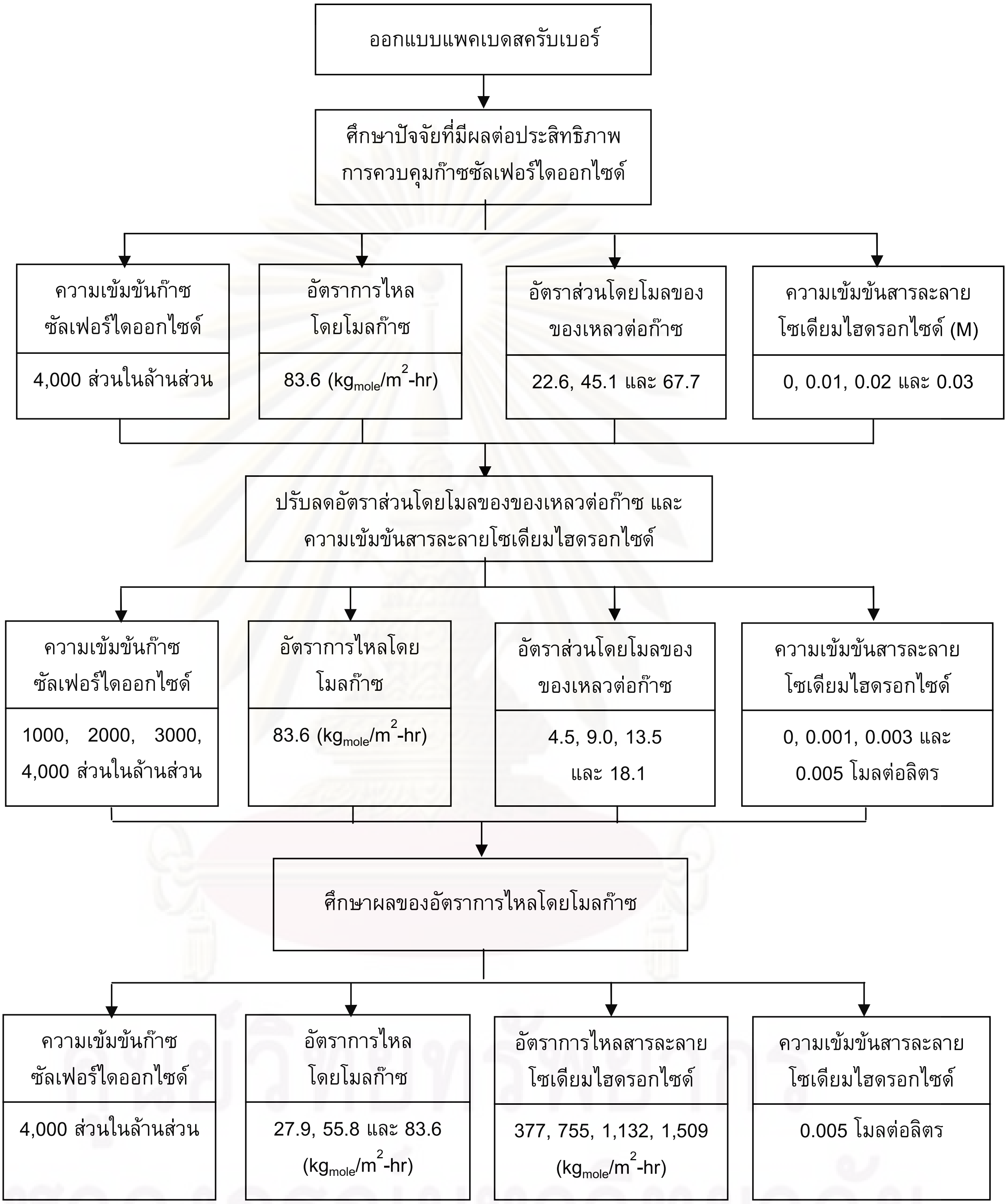
3.1 รูปแบบและแผนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองแบบต่อเนื่องและแบบแบตซ์ในระดับห้องปฏิบัติการ (Bench–scale) ดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 องศาเซลเซียส) และความดันบรรยากาศ ณ ห้อง 653 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์ที่มีกระแสการไหลของก๊าซและสารดูดซึมสวนทางกัน (Counter Current) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารดูดซึม รวมทั้งศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบแพคเบดสครับเบอร์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้น อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ (L/G) ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ รวมทั้งศึกษาผลของการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับมาใช้ซ้ำ โดยมีตัวแปรต้นและตัวแปรตามของงานวิจัย ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอนคือ

- การทดลองขั้นตอนที่หนึ่ง ศึกษาผลเบื้องต้นของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- การทดลองขั้นตอนที่สอง ศึกษาผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้น อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- การทดลองขั้นตอนที่สาม ศึกษาผลของอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ
- การทดลองขั้นตอนที่สี่ ศึกษาผลของการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับมาใช้ซ้ำ

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามของงานวิจัย

ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม
- ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้น - อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ - ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ - อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ	- ประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ - สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม - ความดันลด - ค่าพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังผ่านการบำบัดก๊าซ



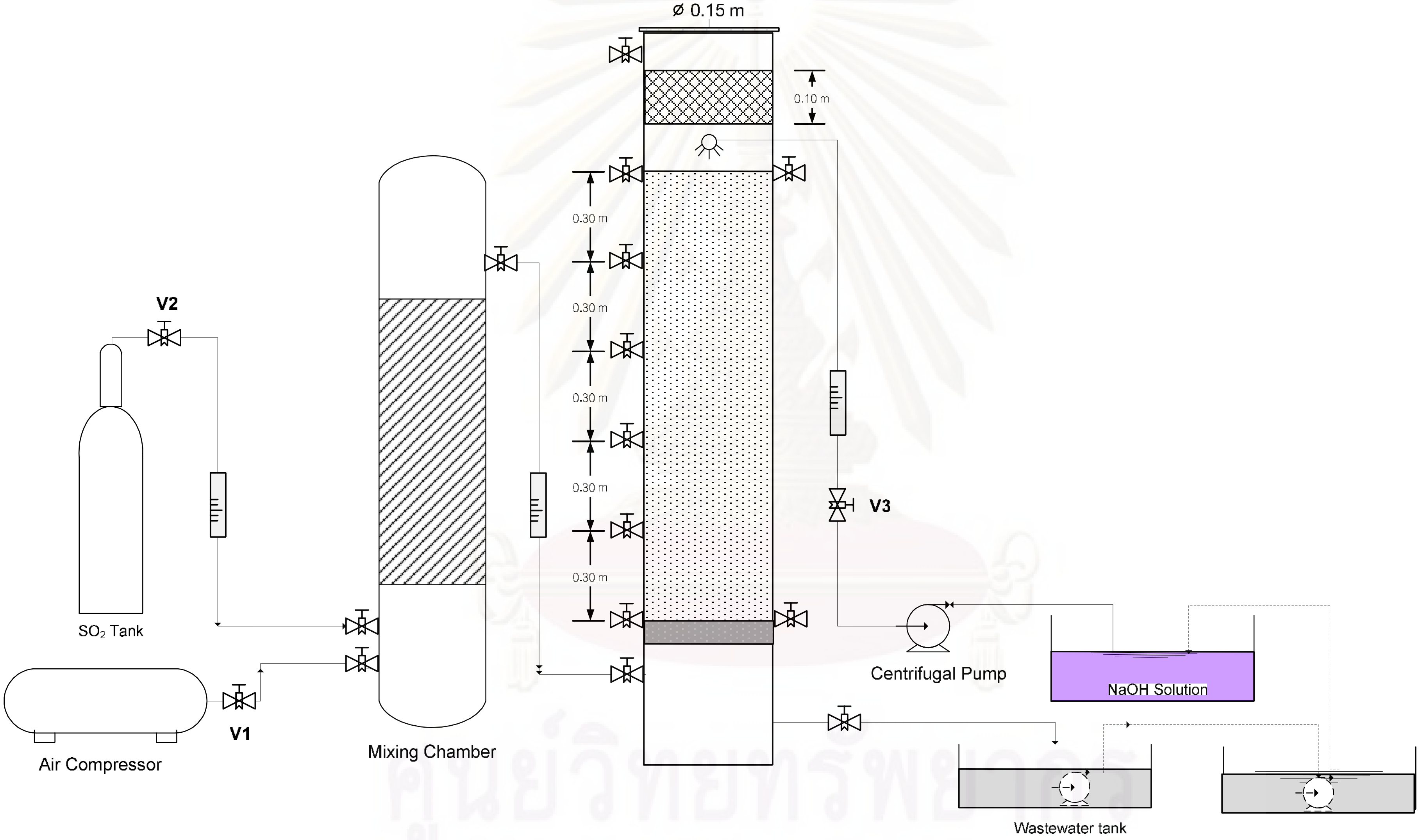
รูปที่ 3.1 แผนงานการดำเนินการวิจัย

3.2 ระบบการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์

ระบบการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ระบบการผสมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ระบบแพคเบดสครับเบอร์ และระบบสารดูดซึม แสดงดังรูปที่ 3.2–3.3 รายละเอียดของระบบต่าง ๆจะกล่าวในลำดับต่อไป สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

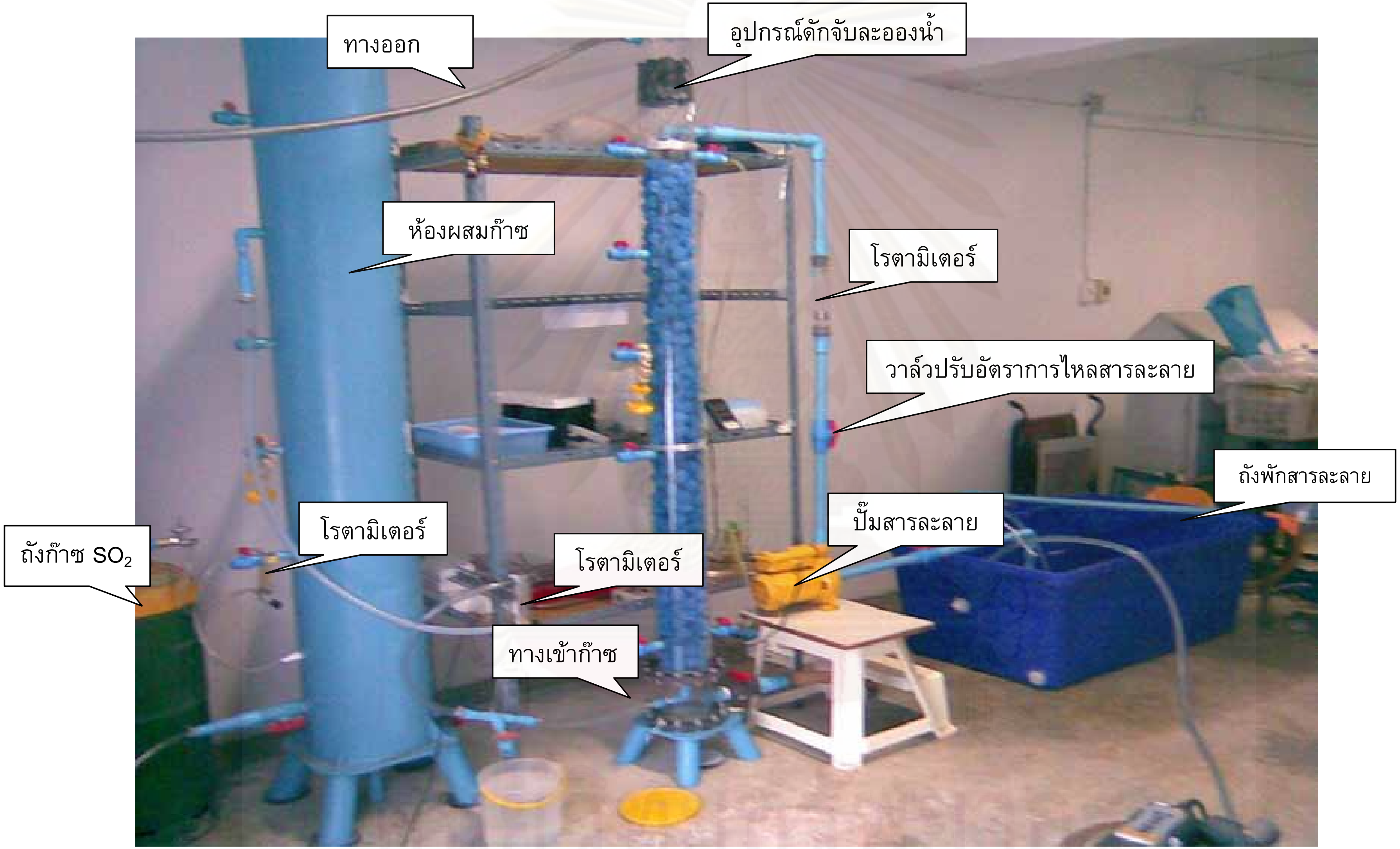
ตัวแปร	เครื่องมือและอุปกรณ์	รุ่นและขนาด
ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	เครื่องวัดก๊าซไอเสียและค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้แบบพกพา	Testo 335/ 0-5000 ส่วนในล้านส่วน
อัตราการไหลก๊าซ	โรตามิเตอร์	LZT-10A24M-V / 72-720 ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	โรตามิเตอร์	Nitto/10-80, 2-10 ลิตรต่อนาที
ความดันลด	มานอมิเตอร์	Dwyer ความดันสูงสุด 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ค่าพีเอช	กระดาษลิสมัต	กระดาษลิสมัต ช่วง pH 0-14
การป้อนสารดูดซึม	ปั๊มน้ำ	Mitsubishi/ 120 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 3.2 แผนผังระบบบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์

51

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 ระบบควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์

52

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.1 ระบบการผสมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide Simulation System)

ระบบผสมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.4 โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละส่วนดังนี้

รูปที่ 3.4 ระบบการผสมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

1) ปั๊มลม (Air compressor)

ยี่ห้อฟูเช็ง รุ่น TA-80 กำลัง 5 แรงม้า 3 ลูกสูบ ขนาดถังอากาศ (Air Tank) 155 ลิตร แรงดันใช้งานและแรงดันสูงสุด 8 และ 10 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลอากาศสูงสุด 767 ลิตรต่อนาที อากาศจากปั๊มลมจะถูกปล่อยและควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์ว (Release Valve) และเข้าสู่ทางด้านล่างของห้องผสมก๊าซเพื่อผสมกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์บริสุทธิ์ต่อไป

2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์บริสุทธ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์บริสุทธิ์จากถังอัดความดันจะถูกปล่อยผ่านวาล์วควบคุมและโรตามิเตอร์สำหรับวัดอัตราการไหลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากนั้นจึงเข้าไปผสมกับอากาศภายในห้องผสมก๊าซ

3) ห้องผสมก๊าซ (Mixing chamber)

ห้องผสมก๊าซทำมาจากท่อพีวีซี (Poly Vinyl Chloride) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร สูงประมาณ 2.40 เมตร ภายในบรรจุตัวกลางชนิดเทลเลอเรทท์ (Tellerete) ดังรูปที่ 3.5 โดยบรรจุตัวกลางสูง 1.50 เมตร ซึ่งได้จากงานวิจัยของธนิตา ทองเงา (2551) เพื่อประยุกต์ใช้ในการช่วยให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอากาศ เมื่อได้ความเข้มข้นและอัตราการไหลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ต้องการแล้ว จะผ่านโรตามิเตอร์และหลังจากนั้นจะเข้าสู่ระบบแพคเบดสครับเบอร์ต่อไป

รูปที่ 3.5 ตัวกลางชนิดเทลเลอเรทท์

3.2.2 ระบบแพคเบสครับเบอร์ (Bench-scale packed bed scrubber)

แพคเบดสครับเบอร์เป็นองค์ประกอบสำคัญในการแยกมลสารออกจากก๊าซไอเสีย (Flue gases) ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ได้แก่ คอลัมน์ (Column) ตัวกลางบรรจุ (Packing media) แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุ (Packing media support plate) และอุปกรณ์ดักจับละอองน้ำ (Demister) โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

1) คอลัมน์ (Column)

คอลัมน์ทำด้วยอะคริลิก ซึ่งมีลักษณะใสสามารถมองเห็นลักษณะการไหลของน้ำหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ คอลัมน์เป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูงประมาณ 2 เมตร มีโครงสร้างเหล็กเพื่อช่วยรองรับคอลัมน์ไว้ ภายในคอลัมน์นั้นจะประกอบด้วย ตัวกลางบรรจุ แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุ ตัวกระจายของเหลว และอุปกรณ์ดักจับละอองน้ำ ลักษณะของคอลัมน์ดังรูปที่ 3.6 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบแพคเบดสครับเบอร์ ดังภาคผนวก ก

รูปที่ 3.6 คอลัมน์

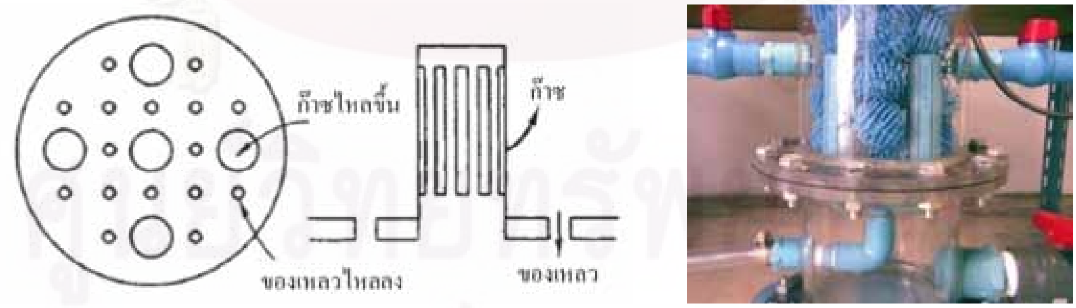
2) ตัวกลางบรรจุ (Packing media)

ตัวกลางบรรจุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ตัวกลางชนิดเฮ็ดจ์ฮ็อก(Hedgehog) ทำมาจากพลาสติกโพลีโพรพิลีน (PP) มีลักษณะทางกายภาพดังนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว สัดส่วนพื้นที่ว่างประมาณ (Void volume) 85 เปอร์เซ็นต์ และค่า Packing Factor (F_p) ประมาณ 150 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร โดยบรรจุตัวกลางสูง 1.5 เมตร ลักษณะของตัวกลางชนิดเฮ็ดจ์ฮ็อก ดังรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 ตัวกลางชนิดเฮ็ดจ์ฮ็อก (Hedgehog)

3) แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุ (Packing media support plate)

แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุทำมาจากอะคริลิกใสและพีวีซี ซึ่งแยกท่อสำหรับให้ก๊าซไหลขึ้นและให้น้ำไหลลงต่างกัน โดยท่อสำหรับกระจายก๊าซให้ไหลขึ้นนั้นทำมาจากพีวีซี มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ½ นิ้ว สูงประมาณ 10 เซนติเมตร และเจาะท่อเป็นแนวยาวโดยรอบให้มีความกว้างประมาณ 1 มิลลิเมตร และสำหรับส่วนที่ให้น้ำไหลลงนั้นทำมาจากแผ่นอะคริลิกใส เจาะรูให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความดันลดสูงเกินไป ดังรูปที่ 3.8

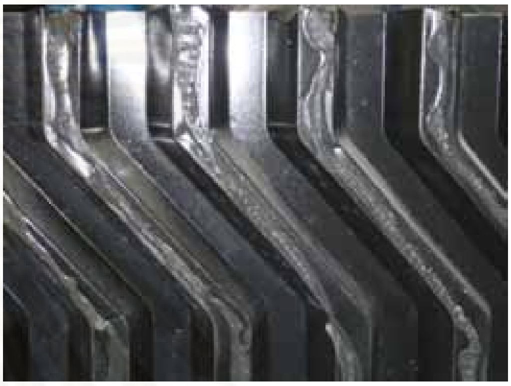


รูปที่ 3.8 แผ่นรองรับตัวกลางบรรจุและการติดตั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4) อุปกรณ์ดักจับละอองน้ำ (Demister)

อุปกรณ์ดักจับละอองน้ำทำมาจากพลาสติกโพลีเอธิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE) แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 14 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร โดยบรรจุอยู่ด้านบนของแพคเบดสรับเบอร์ ดังรูปที่ 3.10 อุปกรณ์ดักจับละอองน้ำเพื่อใช้สำหรับดักจับละอองน้ำขนาดเล็กที่ปะปนไปกับกระแสก๊าซสะอาดที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้ว



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ดักจับละอองน้ำ

รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์ดักจับละอองน้ำ

3.2.3 ระบบสารดูดซึม (Scrubbing solution system)

ระบบสารดูดซึมเป็นส่วนสำคัญอีกประการหนึ่งของกระบวนการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์หลังการเผาไหม้แบบเปียก สารดูดซึมที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆนั้น ดังภาคผนวก ง. ระบบสารดูดซึมประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 3.11 โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

รูปที่ 3.11 การติดตั้งระบบสารดูดซึมและการระบายน้ำเสีย

1) ปั๊มสารดูดซึม (Centrifugal pump)

ปั๊มสำหรับดูดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นปั๊มหอยโข่ง (Centrifugal pump) ยี่ห้อมิซซูบิชิ รุ่น WCH-375S ขนาด ½ แรงม้า ระดับเฮด 5-24 เมตร อัตราการปั๊มน้ำสูงสุด 120 ลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 3.12 หากมีอากาศรั่วเข้ามาในตัวปั๊มในปริมาณมากจะส่งผลให้ปั๊มไม่สามารถทำงานได้ ต้องทำการเติมน้ำให้เต็มตัวปั๊ม เรียกว่าการล่อน้ำ (priming) การติดตั้งฟุตวาล์วสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นได้

รูปที่ 3.12 ปั๊มหอยโข่ง

2) ตัวกระจายของเหลว (Liquid distributor)

ตัวกระจายของเหลวที่ใช้ในงานวิจัยมีสองชนิดคือ ชนิด Full cone spiral nozzle ทำมาจากพลาสติกโพลิโพรพิลีน เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวสเปรย์ 9.5 มิลลิเมตร มุมในการฉีดน้ำเป็นฝอย (Spray angle) ที่ 0.7 บาร์ เท่ากับ 120 องศา ความสามารถในการฉีดน้ำเป็นฝอย (Capacity) ประมาณ 45 ลิตรต่อนาที ใช้สำหรับการศึกษาเบื้องต้นของอัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ และผลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังรูปที่ 3.13 (ก) สำหรับชนิดที่สองนั้น

มีความสามารถในการฉีดเป็นฝอยประมาณ 10 ลิตรต่อนาที ใช้สำหรับการทดลองขั้นตอนที่ 2–4 ดังรูปที่ 3.13 (ข)

(ก) Full cone spiral nozzle

(ข) ***S*drop**

รูปที่ 3.13 ตัวกระจายของเหลว

รูปที่ 3.14 การติดตั้งตัวกระจายของเหลว

3) ระบบท่อและฟุตวาล์ว (Foot Valve)

ท่อสำหรับส่งสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นท่อพีวีซีขนาด ½ นิ้ว และติดตั้งฟุตวาล์ว เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของสารละลายหรือน้ำภายในเส้นท่อ ซึ่งหากสารละลายหรือน้ำไหลย้อนกลับจะทำให้อากาศไหลเข้าไปในเส้นท่อแล้ว ส่งผลให้ปั๊มไม่สามารถดูดสารละลายหรือน้ำขึ้นไปได้ ทั้งนี้ฟุตวาล์วออกแบบให้มีตะแกรงป้องกันสิ่งสกปรกซึ่งสามารถเข้าสู่ตัวระบบปั๊มและระบบท่อน้ำได้ ฟุตวาล์วที่ใช้ขนาด ½ นิ้ว ความดันสูงสุด 10 บาร์ ดังรูปที่ 3.15

รูปที่ 3.15 ฟุตวาล์ว

4) ถังพักสารละลาย (Liquid solution supply tank)

ถังพักสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำมาจากพลาสติกโพลิโพพิลีน (Polypoplylene: PP) ขนาด 500 ลิตร ตามลำดับ สำหรับการศึกษาผลของการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำนั้นจะใช้ถังพักสารละลายขนาด 45 ลิตร จำนวน 2 ถัง

5) ระบบระบายน้ำเสีย (Wastewater drainage system)

น้ำเสียจะระบายออกจากแพคเบดสครับเบอร์ทางด้านล่างซึ่งจะต่อกับวาล์วปรับอัตราการไหลของสารละลาย โดยให้มีสารละลายส่วนหนึ่งคงค้างอยู่ที่ด้านล่างของแพคเบดสครับเบอร์ทั้งนี้เพื่อป้องกันก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไหลออกทางด้านล่าง (End Effect) น้ำเสียจะไหลลงถังพักน้ำเสียเพื่อปรับพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้งต่อไป

3.3 การตรวจวัดและการควบคุมตัวแปร

3.3.1 ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

การตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะใช้เครื่องวัดก๊าซไอเสียและค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้แบบพกพา รุ่น TESTO 335 ดังรูปที่ 3.17 ก่อนใช้เครื่องทุกครั้งจะต้องตรวจสอบแบตเตอรี่และปรับให้ได้มาตรฐาน แล้ววัดความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนและหลังบำบัดทุกๆหนึ่งนาที เป็นระยะเวลา 5 นาที โดยความเข้มข้นที่วัดได้จะอ่านค่าในหน่วยส่วนในล้านส่วน ความสามารถในการตรวจวัดอยู่ในช่วง (Measuring range) 0-5,000 ส่วนในล้านส่วน

รูปที่ 3.16 เครื่องวัดก๊าซไอเสียและค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้แบบพกพา

3.3.2 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นสามารถหาได้โดยการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนพลาเลท โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ การเก็บตัวอย่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อหาความเข้มข้นที่แน่นอนก่อนการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้น ทำได้โดยแบ่งถังพักสารละลายออกเป็นสี่ส่วน แล้วปิเปตสารละลายที่กึ่งกลางของแต่ละส่วนมา 50 มิลลิลิตรใส่บีกเกอร์ คนสารละลายให้เข้ากัน วัดค่าพีเอช แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้น โดยมีรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ดังภาคผนวก ง.

3.3.3 ความดันลด

วัดโดยใช้มานอมิเตอร์ที่บรรจุน้ำอยู่ภายใน ดังรูปที่ 3.17 โดยจะวัดคร่อมระหว่างส่วนบนและส่วนล่างของแพคเบดสครับเบอร์ ซึ่งวัดออกมาในหน่วยนิ้วน้ำ

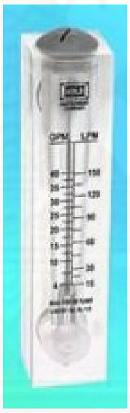
รูปที่ 3.17 การติดตั้งมานอมิเตอร์

3.3.4 ค่าพีเอช

การวัดค่าพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นวัดโดยใช้กระดาษลิตมัสพีเอช 1–14 โดยทำพร้อมกับการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนหลังบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วนั้น ทำได้โดยเก็บตัวอย่างบริเวณท่อระบายน้ำเสีย เก็บตัวอย่างที่เวลาประมาณ 5 นาที ใส่ขวดยาพลาสติกขนาด 50 ซีซี แล้วนำไปวัดค่าพีเอชทันที

3.3.5 อัตราการไหลของก๊าซ

อัตราการไหลที่แน่นอนของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อ่านค่าได้จากโรตามิเตอร์ที่สามารถวัดอัตราการไหลได้ช่วง 72–720 ลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 3.18 สำหรับโรตามิเตอร์จะผ่านการเทียบอัตราการไหลโดยใช้เครื่องวัดความเร็วลมและอุณหภูมิชนิด Hot Wire (Hot Wire Thermo Anemometer) ยี่ห้อ Airflow รุ่น TA45 ดังรูปที่ 3.19 ค่าที่อ่านได้จะอยู่ในหน่วยเมตรต่อวินาที โดยสามารถวัดความเร็วลมได้ในช่วง 0.25–30 เมตรต่อวินาที และช่วงอัตราการไหล 0–2,700 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที



รูปที่ 3.18 โรตามิเตอร์สำหรับวัดอัตราการไหลก๊าซ

รูปที่ 3.19 เครื่องวัดความเร็วลมและอุณหภูมิชนิด Hot Wire
(Hot Wire Thermo Anemometer)

3.3.6 ระบบการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะถูกสูบจากถังพักสารละลายผ่านโรตามิเตอร์ โดยโรตามิเตอร์ที่ใช้เป็นแบบลูกลอย ซึ่งสามารถวัดอัตราการไหลได้ในช่วง 10–80 ลิตรต่อนาที (รูปที่ 3.20 ก) ใช้สำหรับการทดลองขั้นตอนที่หนึ่ง และโรตามิเตอร์ที่สามารถวัดอัตราการไหลได้ในช่วง 2–10 ลิตรต่อนาที (รูปที่ 3.20 ข) ใช้สำหรับการทดลองขั้นตอนที่ 2–4 ตามลำดับ การปรับอัตราการไหลของสารละลายนั้นทำได้โดยปรับจากวาล์วก่อนที่สารละลายจะผ่านโรตามิเตอร์

(ก) **(ข)**

รูปที่ 3.20 โรตามิเตอร์สำหรับวัดอัตราการไหลสารละลาย

ตารางที่ 3.3 การปรับอัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซที่ต้องการ

อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	อัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ลิตรต่อนาที)
4.5	2
9.0	4
13.5	6
18.1	8
22.6	10
45.1	20
67.7	30

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์นั้นแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราการไหลโดยโมลก๊าซแตกต่างกัน และศึกษาผลของการนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่บำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วมาทำการดูดซึมซ้ำอีกครั้ง เพื่อนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและบำบัดก๊าซไอเสียในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

3.4.1 การศึกษาผลเบื้องต้นของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

1) เปิดวาล์ว V1 ให้มีอัตราการไหลอากาศคงที่ประมาณ 600 ลิตรต่อนาที (เท่ากับอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ 83.6 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

2) เปิดวาล์ว V2 เพื่อปรับอัตราการไหลก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้คงที่ แล้วทำการวัดความเข้มข้นบริเวณทางออกของแพคเบดสครับเบอร์ให้ได้ประมาณ 4,000 ส่วนในล้านส่วน

3) ปรับวาล์ว V3 ให้มีอัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 ลิตรต่อนาที (เท่ากับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 22.6)

4) แปรผันความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0, 0.01, 0.02 และ 0.03 โมลต่อลิตร ตามลำดับ

5) ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 3) โดยแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 45.1 และ 67.7 ตามลำดับ (ปรับอัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 20 และ 30 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 การศึกษาผลเบื้องต้นของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

<table>
<tr><th>ชุดการทดลอง</th><th>ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)</th><th>อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)</th><th>อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ</th><th>ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)</th></tr>
<tr><td>1</td><td rowspan="12">4,000</td><td rowspan="12">83.6</td><td rowspan="4">22.6</td><td>0</td></tr>
<tr><td>2</td><td>0.01</td></tr>
<tr><td>3</td><td>0.02</td></tr>
<tr><td>4</td><td>0.03</td></tr>
<tr><td>5</td><td rowspan="4">45.1</td><td>0</td></tr>
<tr><td>6</td><td>0.01</td></tr>
<tr><td>7</td><td>0.02</td></tr>
<tr><td>8</td><td>0.03</td></tr>
<tr><td>9</td><td rowspan="4">67.7</td><td>0</td></tr>
<tr><td>10</td><td>0.01</td></tr>
<tr><td>11</td><td>0.02</td></tr>
<tr><td>12</td><td>0.03</td></tr>
</table>

3.4.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

1) เปิดวาล์ว V1 เพื่อให้ได้อัตราการไหลอากาศคงที่ประมาณ 600 ลิตรต่อนาที (เท่ากับอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ 83.6 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

2) เปิดวาล์ว V2 เพื่อปรับอัตราการไหลก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้คงที่ แล้ววัดความเข้มข้นบริเวณทางออกของแพคเบดสครับเบอร์ให้ได้ประมาณ 1,000 ส่วนในล้านส่วน

3) ปรับวาล์ว V3 ให้มีอัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 ลิตรต่อนาที (เท่ากับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5)

4) แปรผันความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 โมลต่อลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5) ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 4) ซ้ำ โดยแปรค่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.001, 0.003 และ 0.005 โมลต่อลิตร ตามลำดับ

6) ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 3) ซ้ำ โดยแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเป็น 9.0, 13.5 และ 18.1 ตามลำดับ (เท่ากับอัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4, 6 และ 8 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ)

7) ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 2) ซ้ำ โดยแปรค่าความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้ได้ประมาณ 2,000, 3,000 และ 4,000 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ

ตารางที่ 3.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์

<table>
<tr><th>ชุดการทดลอง</th><th>ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)</th><th>อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)</th><th>อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ</th><th>ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)</th></tr>
<tr><td>1</td><td rowspan="16">1,000</td><td rowspan="16">83.6</td><td rowspan="4">4.5</td><td>0</td></tr>
<tr><td>2</td><td>0.001</td></tr>
<tr><td>3</td><td>0.003</td></tr>
<tr><td>4</td><td>0.005</td></tr>
<tr><td>5</td><td rowspan="4">9.0</td><td>0</td></tr>
<tr><td>6</td><td>0.001</td></tr>
<tr><td>7</td><td>0.003</td></tr>
<tr><td>8</td><td>0.005</td></tr>
<tr><td>9</td><td rowspan="4">13.5</td><td>0</td></tr>
<tr><td>10</td><td>0.001</td></tr>
<tr><td>11</td><td>0.003</td></tr>
<tr><td>12</td><td>0.005</td></tr>
<tr><td>13</td><td rowspan="4">18.1</td><td>0</td></tr>
<tr><td>14</td><td>0.001</td></tr>
<tr><td>15</td><td>0.003</td></tr>
<tr><td>16</td><td>0.005</td></tr>
</table>

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ (ต่อ)

<table>
<tr><th>ชุดการทดลอง</th><th>ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)</th><th>อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ $(kg_{mole}/m^2\text{-}hr)$</th><th>อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ</th><th>ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)</th></tr>
<tr><td>17</td><td rowspan="16">2,000</td><td rowspan="16">83.6</td><td rowspan="4">4.5</td><td>0</td></tr>
<tr><td>18</td><td>0.001</td></tr>
<tr><td>19</td><td>0.003</td></tr>
<tr><td>20</td><td>0.005</td></tr>
<tr><td>21</td><td rowspan="4">9.0</td><td>0</td></tr>
<tr><td>22</td><td>0.001</td></tr>
<tr><td>23</td><td>0.003</td></tr>
<tr><td>24</td><td>0.005</td></tr>
<tr><td>25</td><td rowspan="4">13.5</td><td>0</td></tr>
<tr><td>26</td><td>0.001</td></tr>
<tr><td>27</td><td>0.003</td></tr>
<tr><td>28</td><td>0.005</td></tr>
<tr><td>29</td><td rowspan="4">18.1</td><td>0</td></tr>
<tr><td>30</td><td>0.001</td></tr>
<tr><td>31</td><td>0.003</td></tr>
<tr><td>32</td><td>0.005</td></tr>
<tr><td>33</td><td rowspan="8">3,000</td><td rowspan="8">83.6</td><td rowspan="4">4.5</td><td>0</td></tr>
<tr><td>34</td><td>0.001</td></tr>
<tr><td>35</td><td>0.003</td></tr>
<tr><td>36</td><td>0.005</td></tr>
<tr><td>37</td><td rowspan="4">9.0</td><td>0</td></tr>
<tr><td>38</td><td>0.001</td></tr>
<tr><td>39</td><td>0.003</td></tr>
<tr><td>40</td><td>0.005</td></tr>
</table>

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ (ต่อ)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)
41	3,000	83.6	13.5	0
42				0.001
43				0.003
44				0.005
45			18.1	0
46				0.001
47				0.003
48				0.005
49	4,000	83.6	4.5	0
50				0.001
51				0.003
52				0.005
53			9.0	0
54				0.001
55				0.003
56				0.005
57			13.5	0
58				0.001
59				0.003
60				0.005
61			18.1	0
62				0.001
63				0.003
64				0.005

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.3 การศึกษาผลของอัตราการไหลโดยโมลของก๊าซที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์

1) เปิดวาล์ว V1 เพื่อให้ได้อัตราการไหลอากาศคงที่ประมาณ 200 ลิตรต่อนาที (เท่ากับอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ 27.9 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

2) เปิดวาล์ว V2 เพื่อปรับอัตราการไหลก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้คงที่ แล้ววัดความเข้มข้นบริเวณทางออกของแพคเบดสครับเบอร์ให้ได้ประมาณ 4,000 ส่วนในล้านส่วน

3) เตรียมความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.005 โมลต่อลิตร

3) ปรับวาล์ว V3 แปรค่าอัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2, 4, 6 และ 8 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ (เท่ากับ 377, 755, 1,132 และ 1,509 กิโลกรัมต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ตามลำดับ)

5) ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 1) ซ้ำ โดยแปรค่าอัตราการไหลก๊าซเป็น 400 และ 600 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ (เท่ากับอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ 55.8 และ 83.6 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ตามลำดับ)

ตารางที่ 3.6 การศึกษาผลของอัตราการไหลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (kg_{mole}/m^2-hr)
1	4,000	0.005	27.9	377
2				755
3				1,132
4				1,509
5			55.8	377
6				755
7				1,132
8				1,509
9			83.6	377
10				755
11				1,132
12				1,509

3.4.4 การศึกษาผลของการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์

1) เปิดวาล์ว V1 เพื่อให้ได้อัตราการไหลอากาศคงที่ประมาณ 600 ลิตรต่อนาที (เท่ากับอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ 83.6 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร-ชั่วโมง)

2) เปิดวาล์ว V2 เพื่อปรับอัตราการไหลก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้คงที่ และตรวจวัดความเข้มข้นบริเวณทางออกของแพคเบดสครับเบอร์ให้ได้ประมาณ 1,000 ส่วนในล้านส่วน

3) ปรับวาล์ว V3 ให้มีอัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 ลิตรต่อนาที (เท่ากับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 18.1)

4) เตรียมความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 โมลต่อลิตร

5) นำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วกลับไปใช้ดูดซึมซ้ำ ตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบกับค่ามาตรฐาน

6) ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 2) ซ้ำ โดยแปรค่าความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้ได้ประมาณ 2,000, 3,000 และ 4,000 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ

ตารางที่ 3.7 การศึกษาผลของการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ
1	1,000	83.6	0.005	18.1
2	2,000			
3	3,000			
4	4,000			

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยเรื่องการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ในการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารดูดซึม รวมทั้งศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบระบบแพคเบดสครับเบอร์เพื่อใช้ในการบำบัดก๊าซไอเสียในอุตสาหกรรมต่างๆ สำหรับผลการทดลองและวิจารณ์ผลจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ในการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และส่วนที่สองจะกล่าวถึงผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม $(K_G a)$ ของการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

4.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

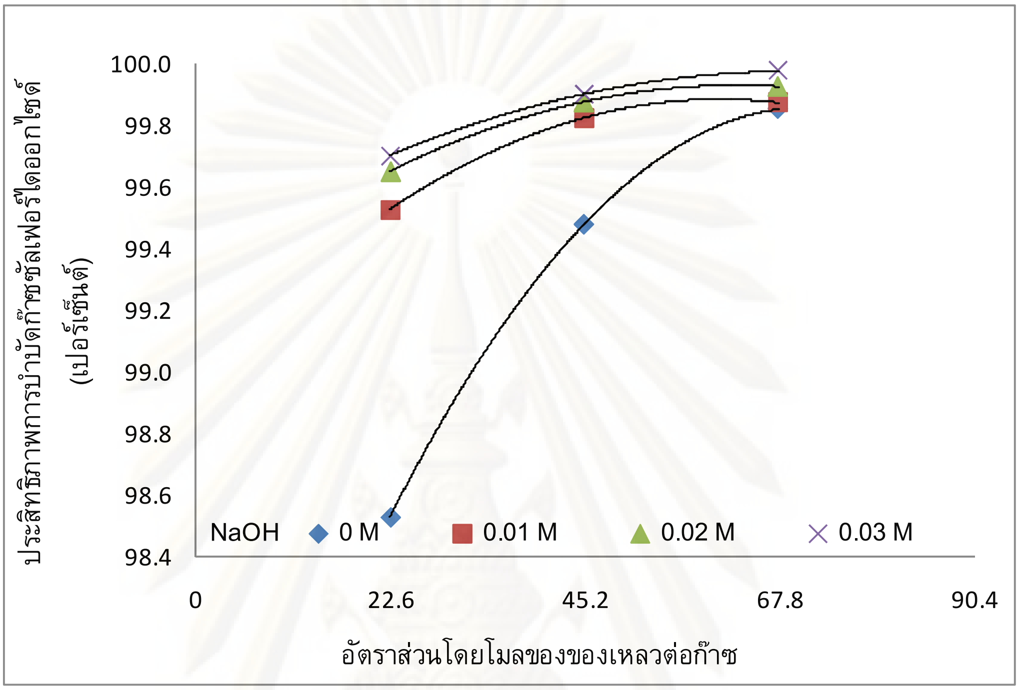
ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ในการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ทำการศึกษาจะกล่าวตามลำดับดังนี้

- ผลการศึกษาเบื้องต้นของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- ผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้น
- ผลของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ
- ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- ผลของการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับมาใช้ซ้ำ
- ผลของอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ
- ผลการศึกษาความดันลดภายในระบบแพคเบดสครับเบอร์และพีเอชสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

4.1.1 ผลการศึกษาเบื้องต้นของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การศึกษาเบื้องต้นของผลของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นจะใช้ค่าที่ได้จากการออกแบบแพคเบดสครับเบอร์ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน โดยแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 22.6, 45.1 และ 67.7 ตามลำดับ แต่ละอัตราส่วนโดยโมลของ

ของเหลวต่อก๊าซแปรค่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0, 0.01, 0.02 และ 0.03 โมลต่อลิตร ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 22.6–67.7 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในช่วง 98.4–100 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.1

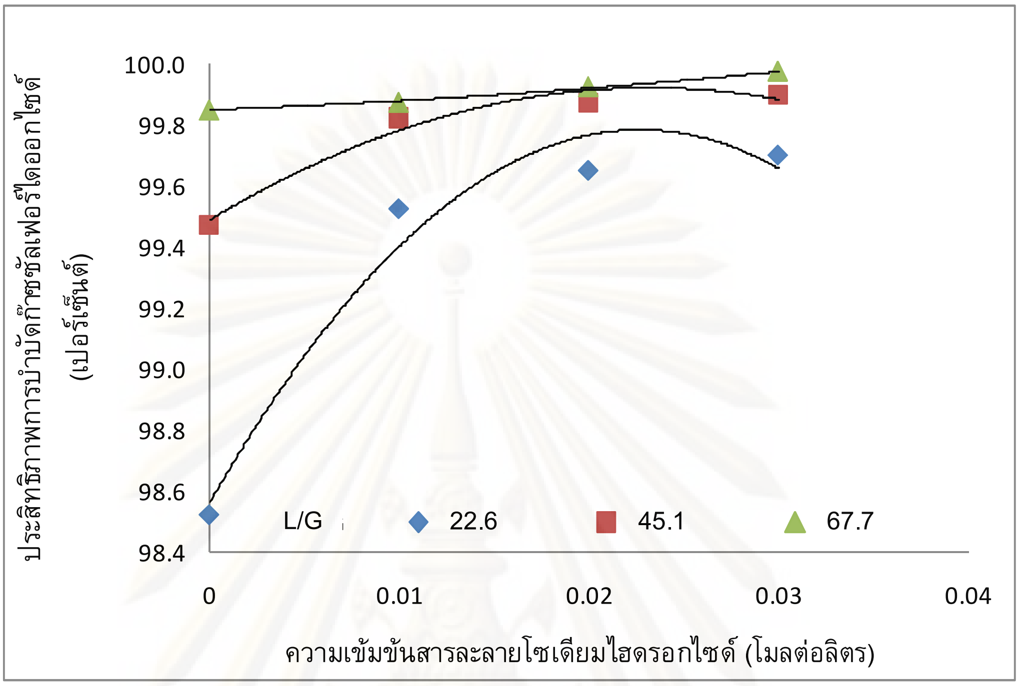


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ

อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซแตกต่างกัน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่และไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซนั้นมากเกินพอในการทำปฏิกิริยากันระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0, 0.01, 0.02 และ 0.03 โมลต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 22.6 เท่ากับ 98.4, 99.5, 99.6 และ 99.7 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 45.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 99.5, 99.8, 99.8 และ 99.8 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 67.7 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 99.8, 99.8, 99.9 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซ

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซมีค่ามากขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซมีค่ามากเกินพอต่อการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

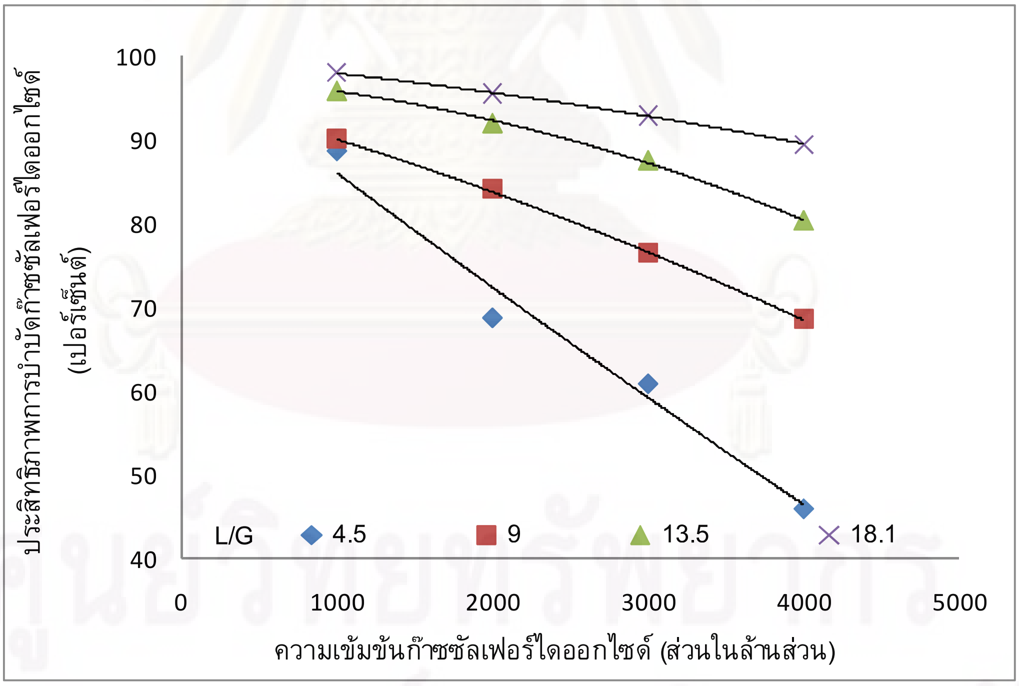
จากผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์ จึงไม่สามารถบ่งบอกได้อย่างชัดเจนว่าประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยใด จากการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากแพคเบดสครับเบอร์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซและความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่าง ๆนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 1–59 ส่วนในล้านส่วน เมื่อคำนึงถึงมาตรฐานการระบายก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตทั่วไปที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เท่ากับ 700 ส่วนในล้านส่วน ก็จะสามารถลดอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงได้ ทั้งนี้เพื่อช่วยให้ลดปริมาณน้ำเสียที่ออกจากระบบแพคเบดสครับเบอร์และประหยัดสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลงได้

ด้วยเหตุนี้ในการทดลองขั้นต่อไปจึงได้ทำการปรับลดอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซอยู่ในช่วง 4.5–18.1 และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ในช่วง 0–0.005

โมลต่อลิตร ตามลำดับ รวมทั้งศึกษาผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้น (1,000–4,000 ส่วนในล้านส่วน) อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ (27.9–83.6 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง) และการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับมาใช้ซ้ำ

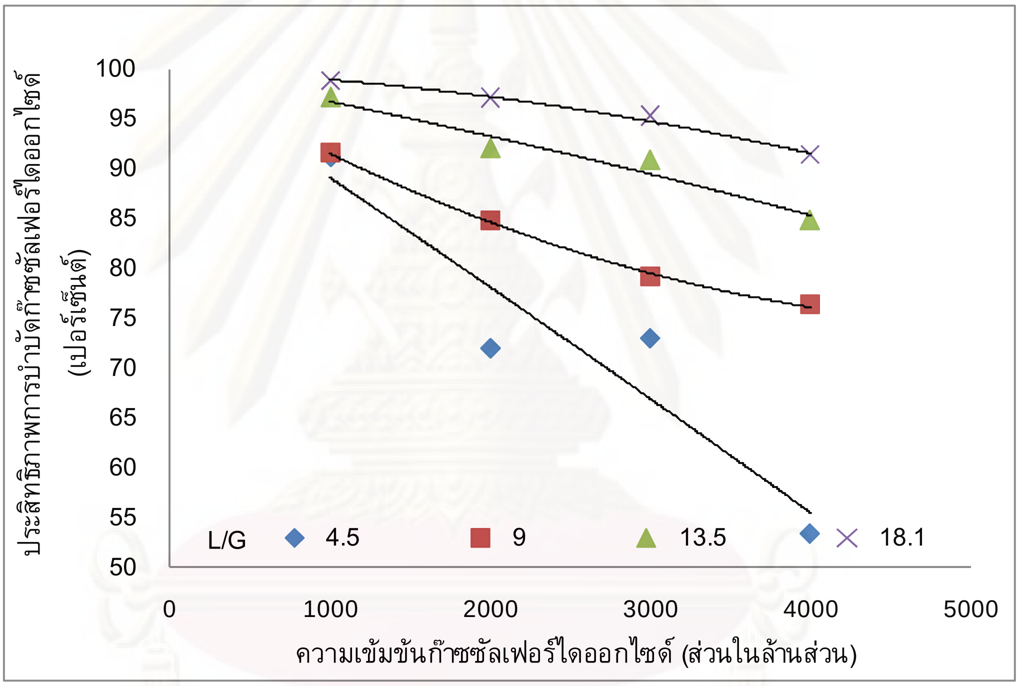
4.1.2 ผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์

ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในแต่ละครั้งนั้นย่อมแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปริมาณการผลิต ชนิดและปริมาณซัลเฟอร์ที่อยู่ในเชื้อเพลิงที่ใช้ ดังนั้นในการออกแบบระบบบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้แพคเบดสครับเบอร์นั้น ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เข้าและออกจากระบบแพคเบดสครับเบอร์ จึงเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญซึ่งส่งผลต่อความสูงของชั้นตัวกลางภายในแพคเบดสครับเบอร์เพื่อให้ความเข้มข้นก๊าซที่ออกจากระบบบำบัดนั้นเป็นไปตามมาตรฐานที่กฎหมายกำหนดไว้ การศึกษาผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นจะแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000, 2,000, 3,000 และ 4,000 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 โมลต่อลิตร

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 โมลต่อลิตร โดยมีผลการศึกษาดังนี้ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะลดลงจาก 90–45 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 1,000–4,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 9.0 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะลดลงจาก 90–70 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 13.5 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะลดลงจาก 95–80 เปอร์เซ็นต์ และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 18.1 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะลดลงจาก 99–92 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

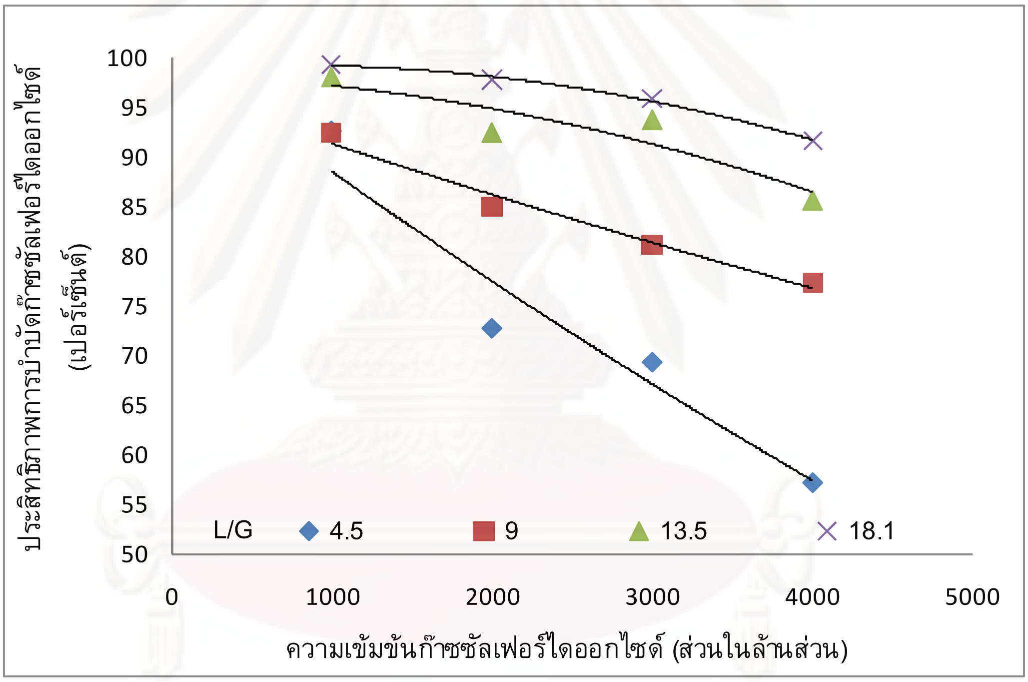


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.001 โมลต่อลิตร

จากรูปที่ 4.4 ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่เท่ากับ 0.001 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ 4.5 เมื่อความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 1,000–4,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในช่วง 90–54 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ 9.0 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในช่วง 90–75 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ 13.5 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในช่วง 97–85 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราส่วน

ของของเหลวต่อก๊าซ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในช่วง 99–93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

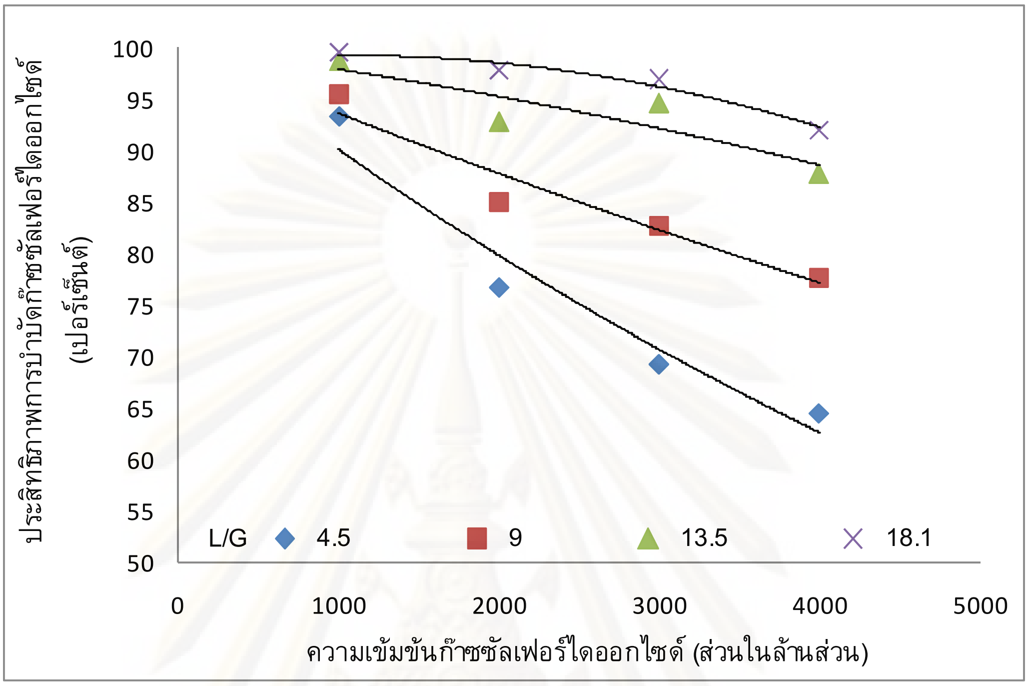
ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่เท่ากับ 0.003 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ 4.5 เมื่อความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 1,000–4,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในช่วง 93–56 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ 9.0 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในช่วง 93–78 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ 13.5 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในช่วง 97–85 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในช่วง 99–94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.003 โมลต่อลิตร

และที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่เท่ากับ 0.005 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ 4.5 เมื่อความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 1,000–4,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในช่วง 93–65 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ 9.0 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในช่วง 95–79 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ 13.5 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในช่วง 98–87 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราส่วนของของเหลว

ต่อก๊าซ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในช่วง 99–95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6



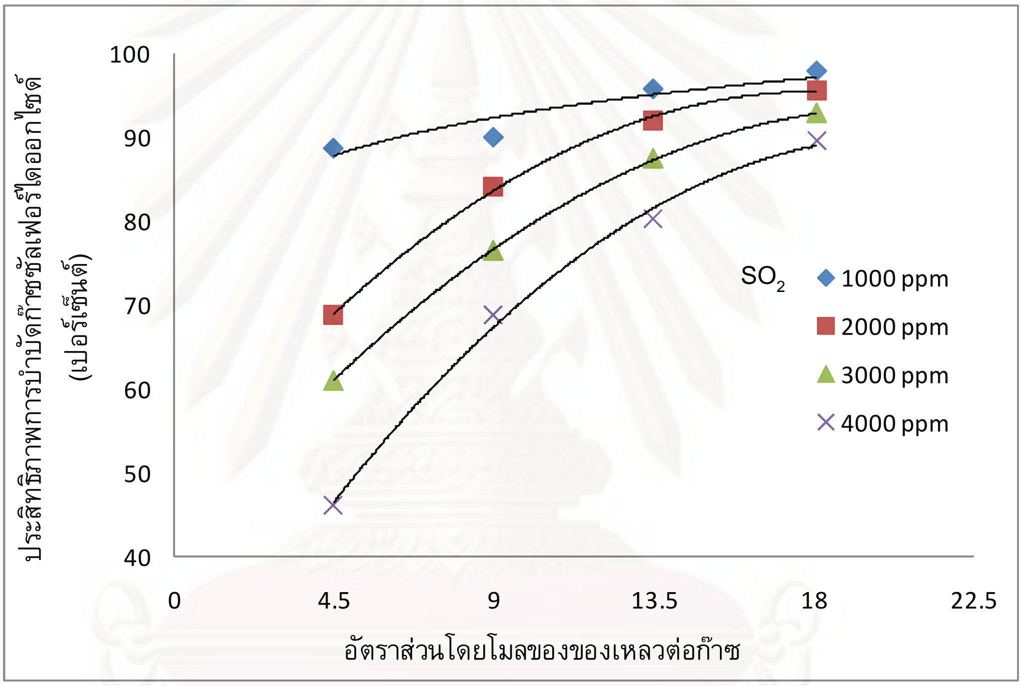
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 โมลต่อลิตร

จากผลการศึกษาดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าวามเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นมีผลต่อประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ในการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีค่ามากขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดของแพคเบดสครับเบอร์จะมีค่าลดลง

4.1.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์

การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซทำได้โดยแปรค่าอัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2, 4, 6 และ 8 ลิตรต่อนาที ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ตามลำดับ โดยมีผลการศึกษาดังนี้ จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของ

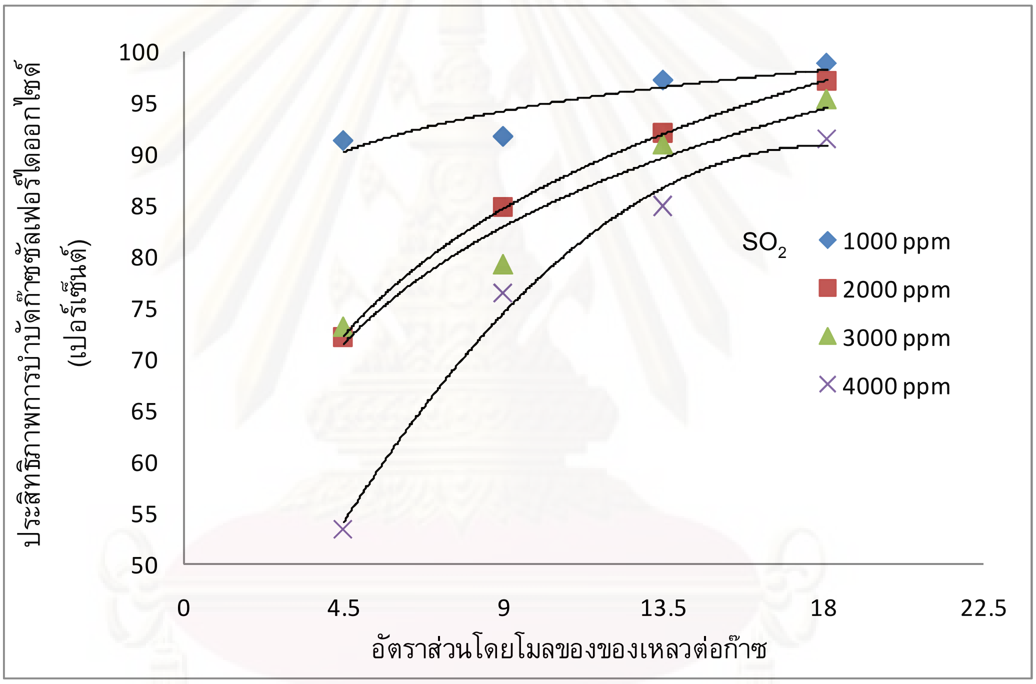
ของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 89, 90, 95 และ 98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 69, 83, 91 และ 94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 60, 77, 81 และ 93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 4.5, 69, 81 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 โมลต่อลิตร

จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 โมลต่อลิตร โดยมีผลการศึกษาดังนี้ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 91, 91, 96 และ 97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 73, 84, 90 และ 95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อ

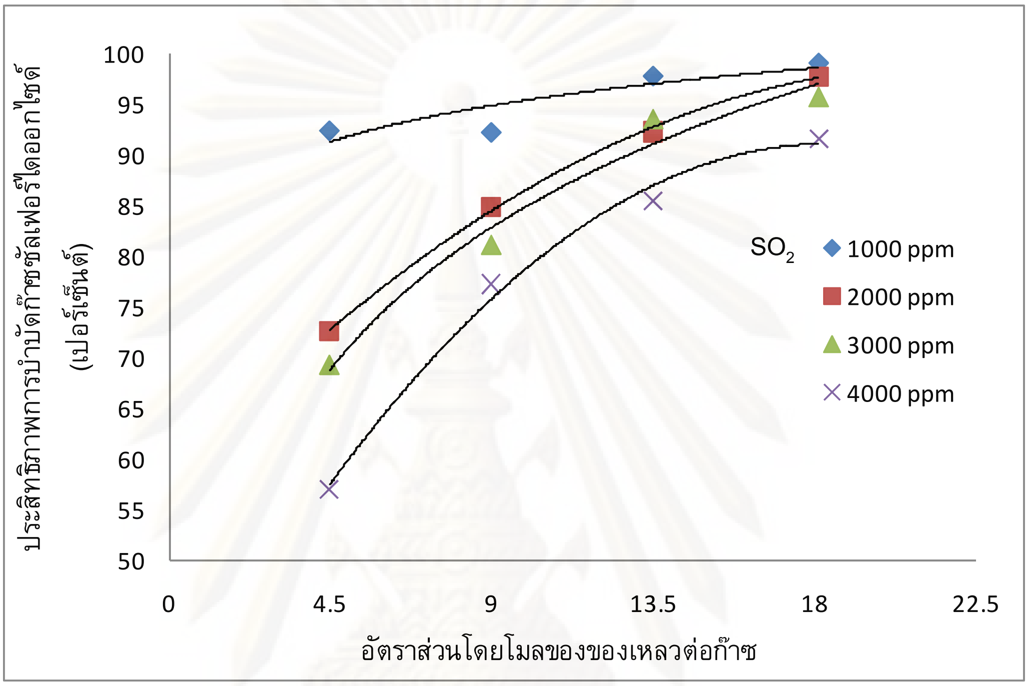
ก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 73, 77, 89 และ 92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซเท่ากับ 53, 75, 84 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่ทั้งนี้ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 4.5 และ 13.5 และความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 3,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซที่ความเข้มข้น 2,000 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดขณะการทดลอง โดยในการเดินระบบแต่ละครั้งนั้นจำเป็นต้องรักษาระดับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้คงค้างอยู่ในคอลัมน์ส่วนหนึ่ง โดยให้เหลืออยู่เหนือระดับท่อระบายสารละลาย หากมิเช่นนั้นแล้วก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะออกทางด้านล่างซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า End effect



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.001 โมลต่อลิตร

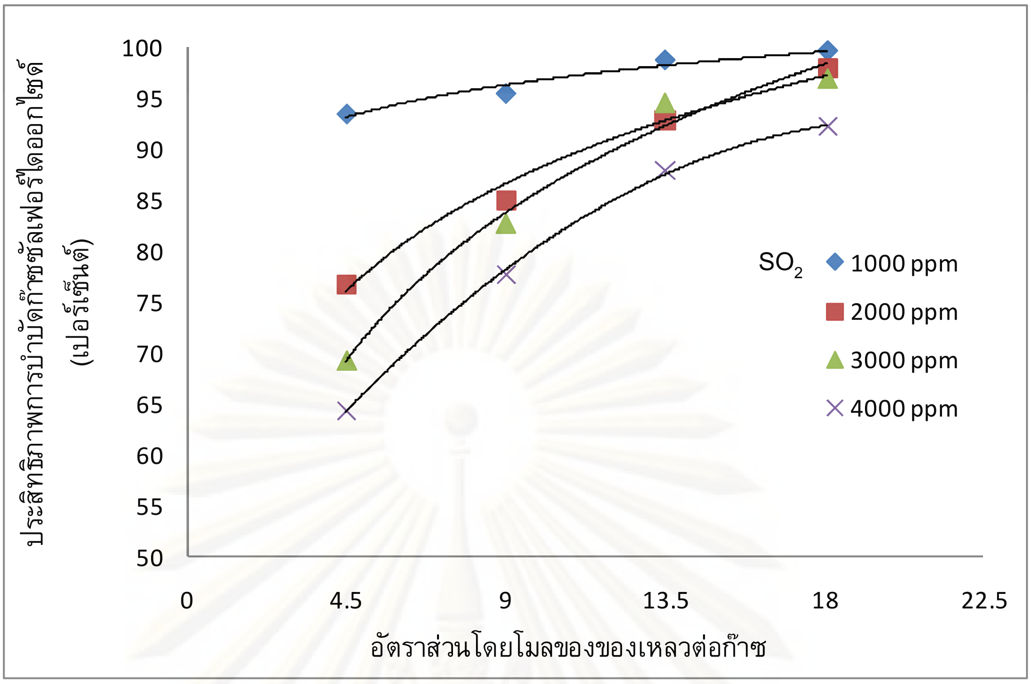
จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.003 โมลต่อลิตร พบว่าที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 93, 93, 98 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 73, 85, 93 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 79, 80, 93 และ 95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซเท่ากับ 57, 77, 85 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.003 โมลต่อลิตร

และจากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 โมลต่อลิตร พบว่าที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 93, 95, 99 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 76, 85, 93 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 70, 83, 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซเท่ากับ 65, 77, 87 และ 92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 โมลต่อลิตร

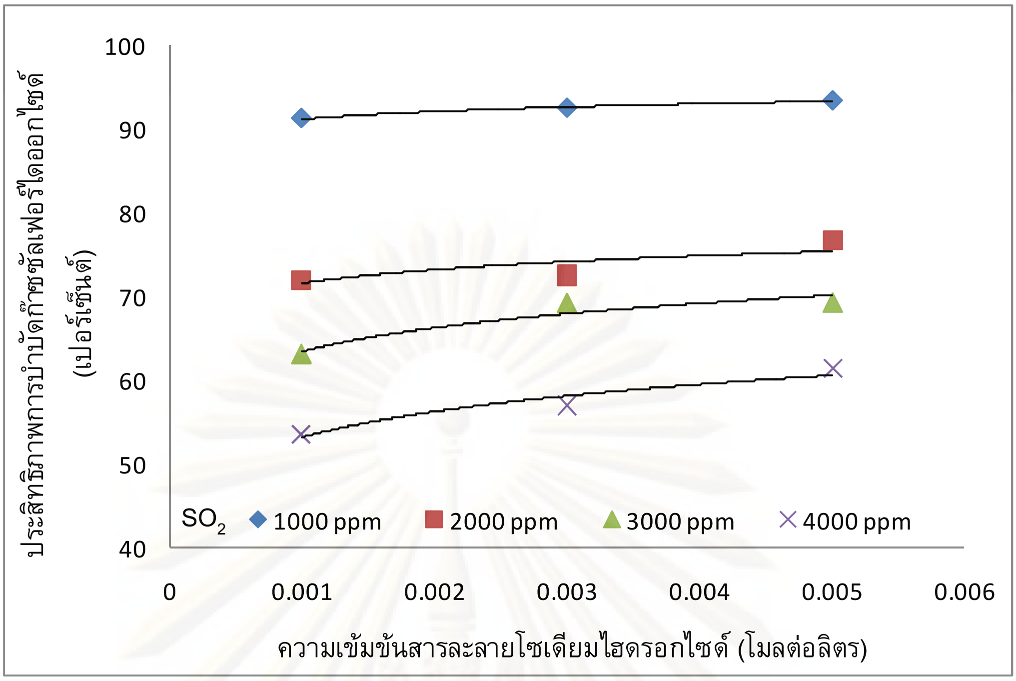
จากรูปที่ 4.7–4.10 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1,000–4,000 ส่วนในล้านส่วนนั้นแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซที่มีค่าต่ำนั้น ย่อมส่งผลต่อพื้นที่ผิวเปียกของตัวกลางที่สามารถเกิดการถ่ายเทมวลสารได้ ด้วยเหตุนี้เมื่อพื้นที่ผิวเปียกน้อย บริเวณที่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก็ลดลงตามไปด้วย จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซลดต่ำลง จากผลการศึกษาข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซที่เหมาะสมต่อการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1,000, 2,000, 3,000 และ 4,000 ส่วนในล้านส่วนเท่ากับ 4.5, 13.5, 13.5 และ 18 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อถึงจุดนี้แล้วการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซจึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดมากนัก

4.1.4 ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์

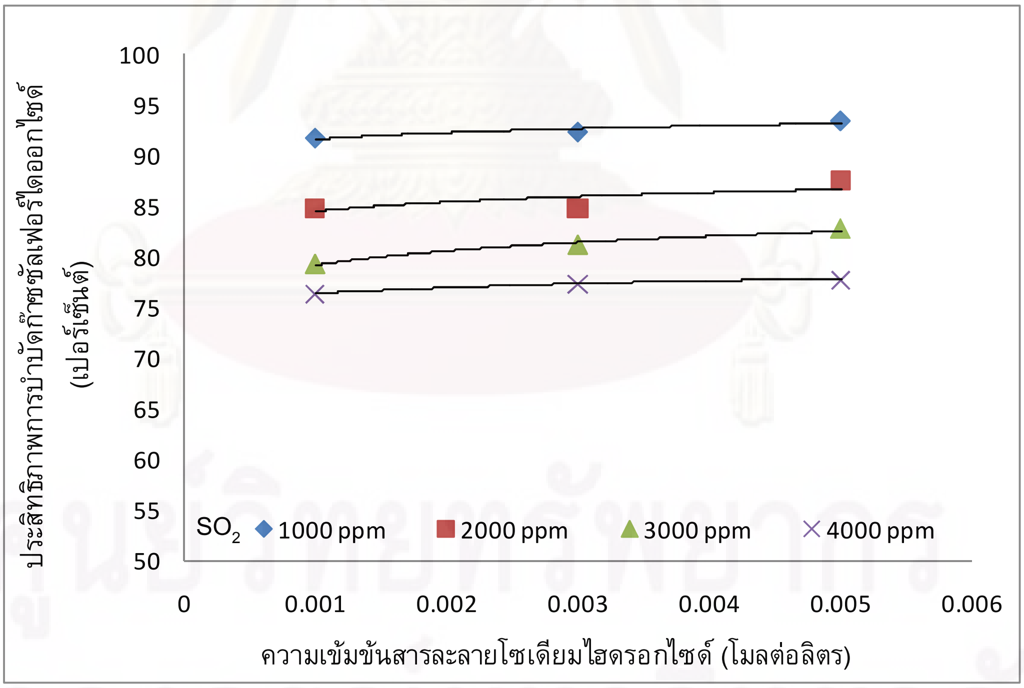
ความเข้มข้นของสารดูดซึมเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งนี้เพราะความเข้มข้นหรือพีเอชของสารดูดซึมมีผลต่ออัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซไอเสียที่ต้องบำบัด เพราะถ้าหากมีความเข้มข้นของสารดูดซึมมากก็สามารถลดอัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้แปรค่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0, 0.001, 0.003 และ 0.005 โมลต่อลิตร ตามลำดับ (มีค่าพีเอชเริ่มต้นโดยประมาณ 7, 8, 9 และ 10 ตามลำดับ) โดยมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

- จากรูปที่ 4.11 ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 4.5 และความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จาก 0 เป็น 0.001, 0.003 และ 0.005 โมลต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 89, 92, 93 และ 94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 69, 72, 72 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 60, 61, 69 และ 69 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 46, 53, 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

- จากรูปที่ 4.12 ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 9.0 และความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จาก 0 เป็น 0.001, 0.003 และ 0.005 โมลต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 90, 92, 93 และ 94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 84, 85, 85 และ 87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 76, 79, 80 และ 82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 69, 76, 77 และ 77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

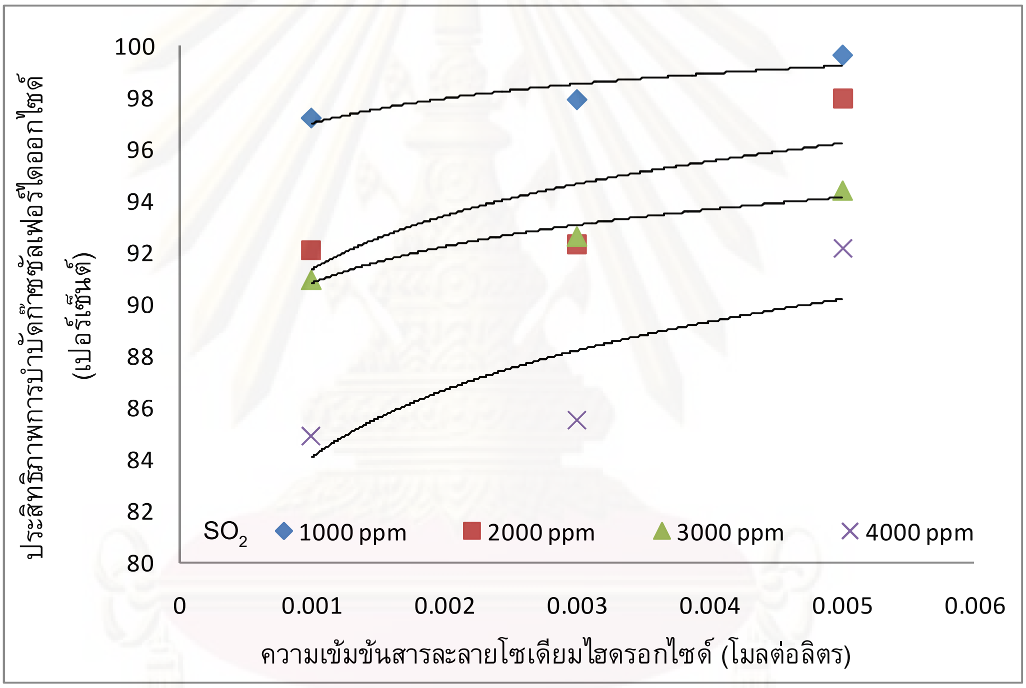


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 4.5

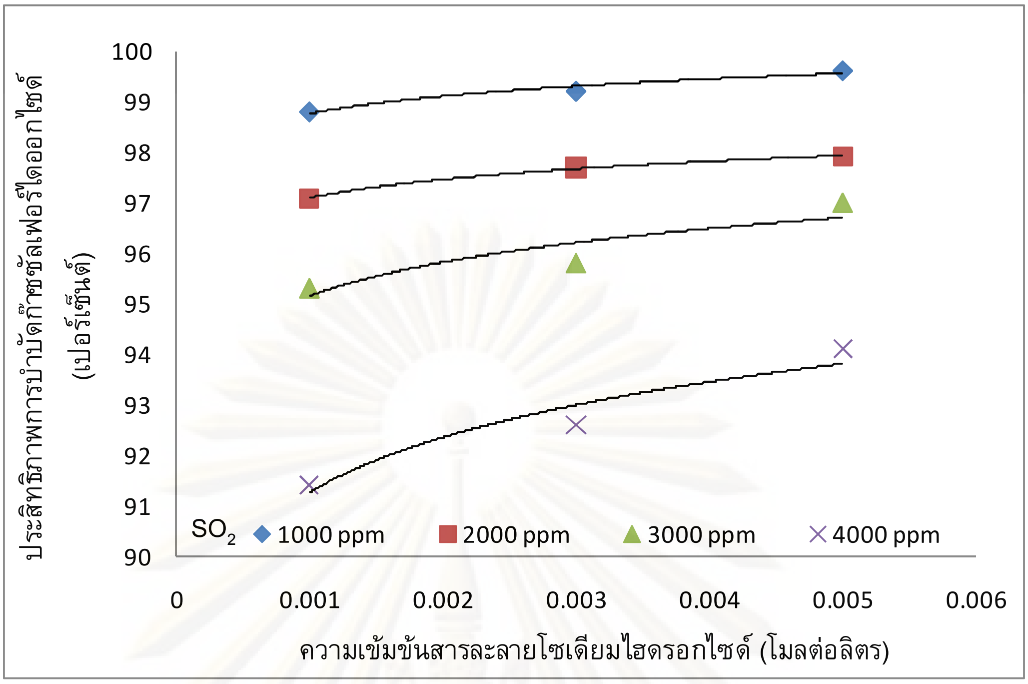


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 9.0

– ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 13.5 และความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จาก 0 เป็น 0.001, 0.003 และ 0.005 โมลต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 96, 97, 98 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 92, 92, 92 และ 97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 87, 91, 92 และ 94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 84.5, 85, 85.5 และ 92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 13.5



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 18.1

– ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 18.1 และความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จาก 0 เป็น 0.001, 0.003 และ 0.005 โมลต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 98, 99, 99.5 และ 99.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 95.8, 97, 97.8 และ 97.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 94, 95, 95.7 และ 97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 89.5, 91.5, 92.5 และ 94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถสรุปได้ว่าเมื่อความเข้มข้นหรือพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นการเพิ่มปริมาณไฮดรอกไซด์ (OH^-) ที่ละลายในน้ำ ทำให้โอกาสที่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ทำปฏิริยากับซัลเฟต (SO_3^{2-}) (ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำ) จึงมากขึ้น ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ ดังนั้นประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จึงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อความเข้มข้น

ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น แนวโน้มค่าประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากประสิทธิภาพการบำบัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ

$$SO_2 + 2H_2O \longrightarrow 2H_2SO_4 \qquad (4.1)$$

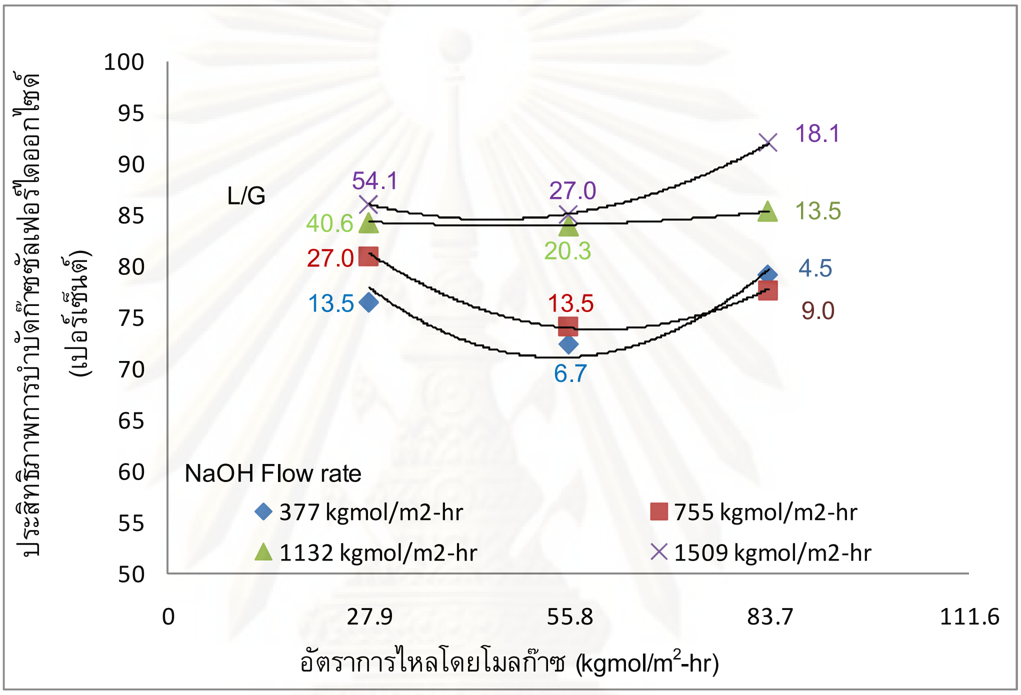
$$2NaOH + SO_2 \longrightarrow Na_2SO_3 + H_2O \qquad (4.2)$$

4.1.5 ผลของอัตราการไหลโดยโมลก๊าซที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์

อัตราการไหลก๊าซที่เกิดจากกระบวนการผลิตในแต่ละครั้งนั้นอาจมีค่าไม่แน่นอน ซึ่งอัตราการไหลก๊าซนั้นจะเป็นตัวกำหนดสภาพการทำงานของระบบแพคเบดสครับเบอร์ เมื่อทราบอัตราการไหลก๊าซและของเหลวที่เข้าและออกจากระบบก็สามารถคำนวณหาเส้นศูนย์กลางของแพคเบดสครับเบอร์ได้ โดยแพคเบดสครับเบอร์จะต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่พอเหมาะกับกระแสก๊าซและของเหลวโดยที่ไม่ทำให้เกิดการไหลย้อนกลับของของเหลว (Flooding Velocity) สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอัตราการไหลก๊าซที่มีต่อประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ โดยแปรค่าอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ 27.9, 55.8 และ 83.6 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง (เท่ากับอัตราการไหลก๊าซ 200, 400 และ 600 ลิตรต่อนาที) กำหนดให้ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (4,000 ส่วนในล้านส่วน) และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.005 โมลต่อลิตร) เป็นตัวแปรควบคุม

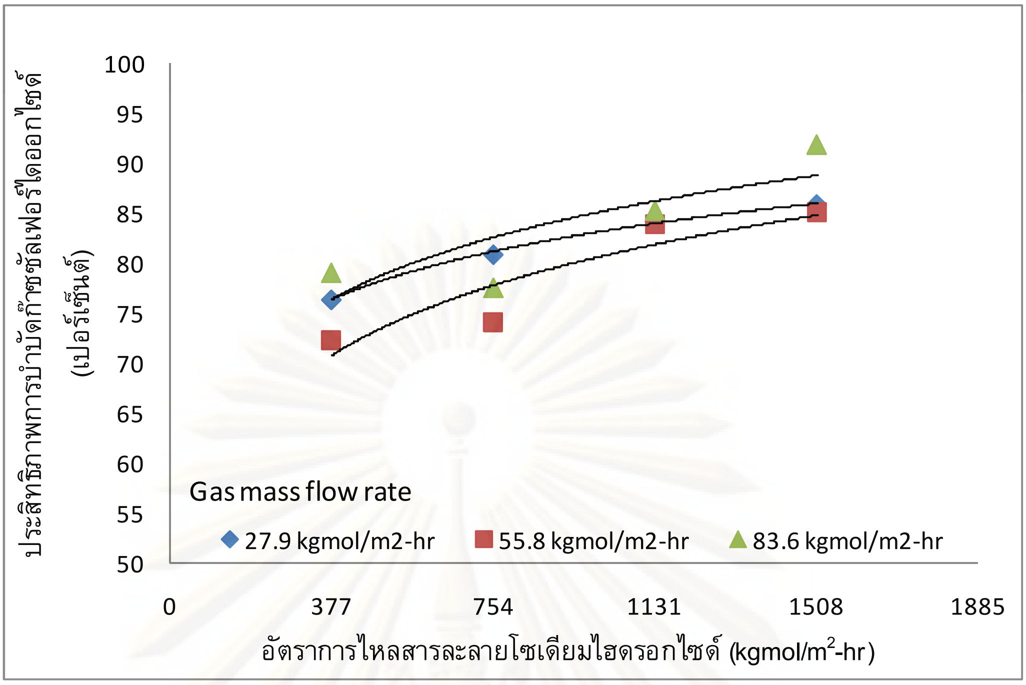
จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ โดยมีผลการศึกษาดังนี้ ที่อัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่เท่ากับ 377 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 76, 73 และ 79 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออัตราการไหลโดยโมลก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 27.9, 55.8 และ83.7 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 13.5, 6.7 และ 4.5 ตามลำดับ ที่อัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่เท่ากับ 755 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 81, 75 และ 77 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออัตราการไหลโดยโมลก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 27.9, 55.8 และ83.7 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 27.0, 13.5 และ 9.0 ตามลำดับ ที่อัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่เท่ากับ 1,132 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 84, 84 และ 85 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออัตราการไหลโดยโมลก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 27.9, 55.8 และ83.7 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–

ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 40.6, 20.3 และ 13.5 ตามลำดับ ที่อัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่เท่ากับ 1,509 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 86, 86 และ 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออัตราการไหลโดยโมลก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 27.9, 55.8 และ83.7 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 54.1, 27.0 และ 18.1 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และอัตราการไหลก๊าซ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน

จากผลการทดลองจากเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นขึ้นอยู่กับอัตราการไหลโดยโมลก๊าซและอัตราการไหลโดยโมลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ การเพิ่มอัตราการไหลโดยโมลก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นทำให้เกิดความปั่นป่วนขึ้นภายในวัฏภาคก๊าซและภายในแพคเบดสครับเบอร์ ความต้านทานในการถ่ายเทมวลสารจึงลดลง ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนั้นยังขึ้นอยู่กับอัตราการส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซมีค่าเท่ากัน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น

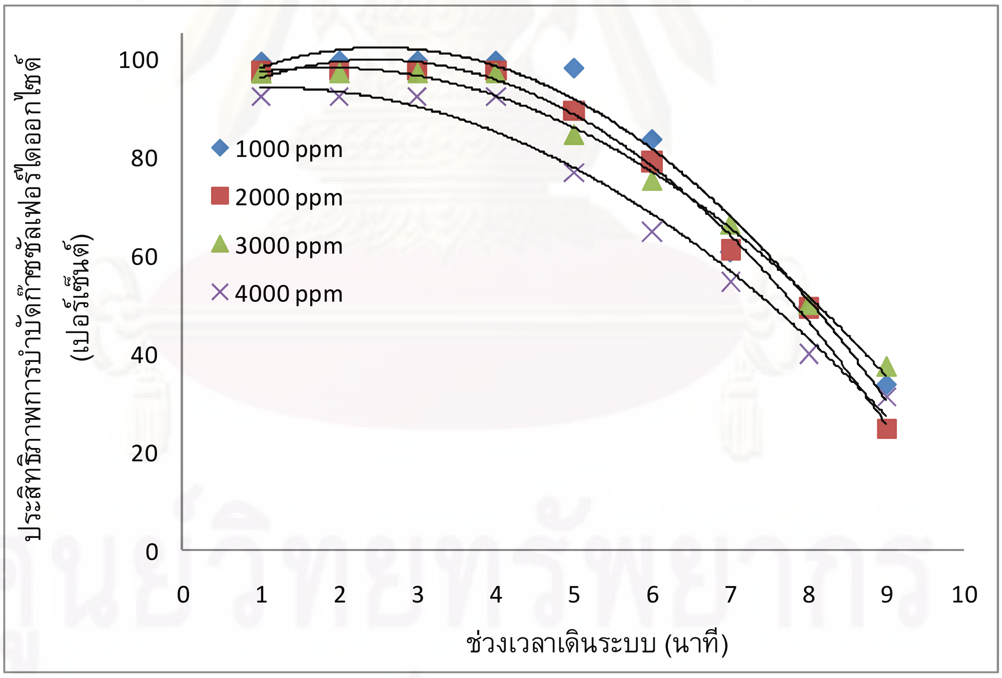


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน

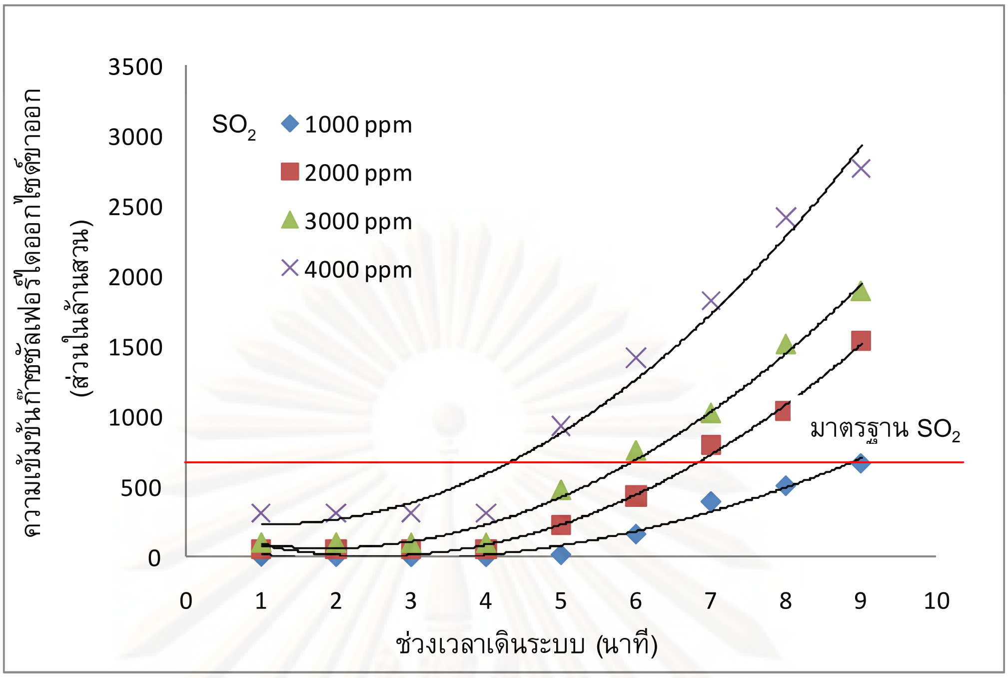
จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับอัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าเมื่ออัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 377, 754, 1,131 และ 1,885 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซเพิ่มขึ้นที่ทุก ๆอัตราการไหลโดยโมลก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

4.1.6 ผลของการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับมาใช้ซ้ำ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กลับมาใช้ซ้ำ โดยเดินระบบที่อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 18.1 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.005 โมลต่อลิตร จากการศึกษาพบว่า ช่วงของการเดินระบบ 1–4 นาทีแรกนั้น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้นั้นจะเป็นสารละลายใหม่ (Fresh solution) ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซที่ความเข้มข้นต่าง ๆอยู่ในช่วง 90–100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากแพคเบดสครับเบอร์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กฎหมายกำหนดไว้คือ 700 ส่วนในล้านส่วน ในช่วงที่สองของการเดินระบบ (ตั้งแต่นาทีที่ 5) เป็นการนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วกลับมาใช้ซ้ำโดยไม่มีการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มเติม จะเห็นได้ว่าตั้งแต่นาทีที่ 5 เป็นต้นไป ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.17 และตั้งแต่นาทีที่ 8 เป็นต้นไป ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากระบบแพคเบดสครับเบอร์เกินกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับช่วงเวลาเดินระบบเมื่อนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับมาใช้ซ้ำ



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากระบบแพคเบดสครับเบอร์กับช่วงเวลาในการเดินระบบเมื่อนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับมาใช้ซ้ำ

จากการศึกษาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารดูดซึมนั้น ไม่สามารถนำสารเคมีที่เป็นผลิตภัณฑ์ตัวสุดท้าย (Na_2SO_4) กลับมาใช้ซ้ำได้ โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในช่วงแรกและช่วงที่สองนั้นแสดงดังสมการที่ 4.3–4.5

$$2NaOH + SO_2 \longrightarrow Na_2SO_3 + H_2O \qquad (4.3)$$

$$Na_2OH_3 + SO_2 + H_2O \longrightarrow 2NaHSO_3 \qquad (4.4)$$

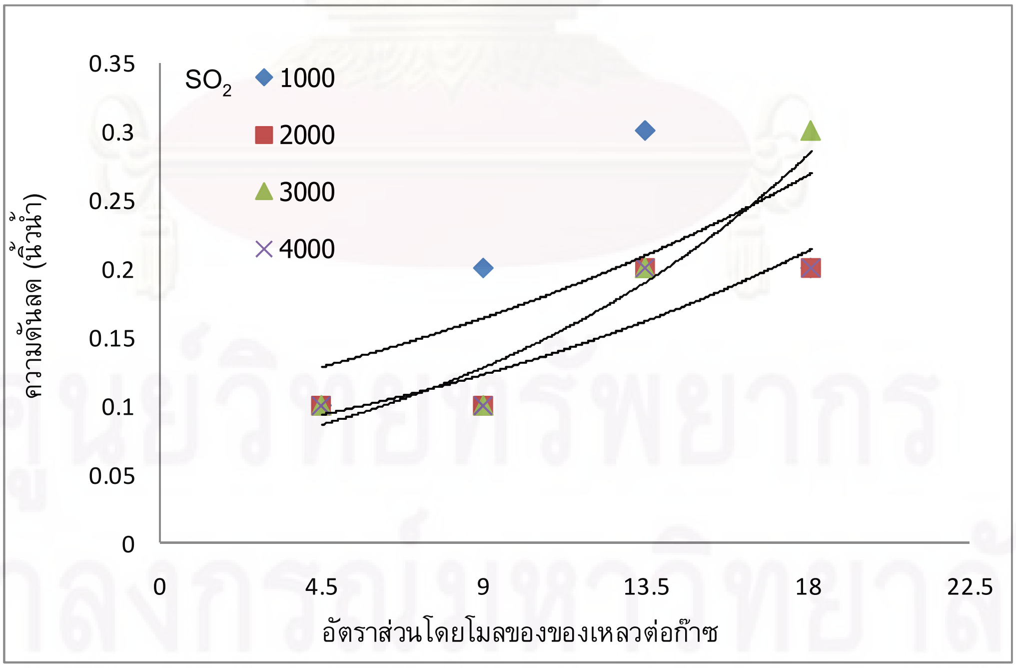
$$2NaHSO_3 + O_2 \longrightarrow Na_2SO_4 \qquad (4.5)$$

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาอยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นสารประกอบของเกลือซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่ไม่สามารถดูดซึมหรือทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้อีก ถ้าหากจะนำกลับมาใช้ซ้ำนั้นสามารถทำได้โดยใช้ระบบการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้ระบบด่างสองชนิด (Double–Alkali process) ซึ่งสารละลายด่างทั้งสองชนิดนั้นจะทำหน้าที่ต่างกันในระบบ และประโยชน์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาต่างกันคือ สารละลายชนิดที่หนึ่งใช้ในการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หลังจากการทำปฏิกิริยาแล้วจะสารประกอบเกลือซัลเฟตที่ยังมีความสามารถในการละลายน้ำได้ เมื่อต้องการนำสารประกอบดังกล่าวมาใช้ซ้ำ จึงต้องมีการเติมสารเคมีชนิดที่สอง ส่วนมากแล้วจะใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$)

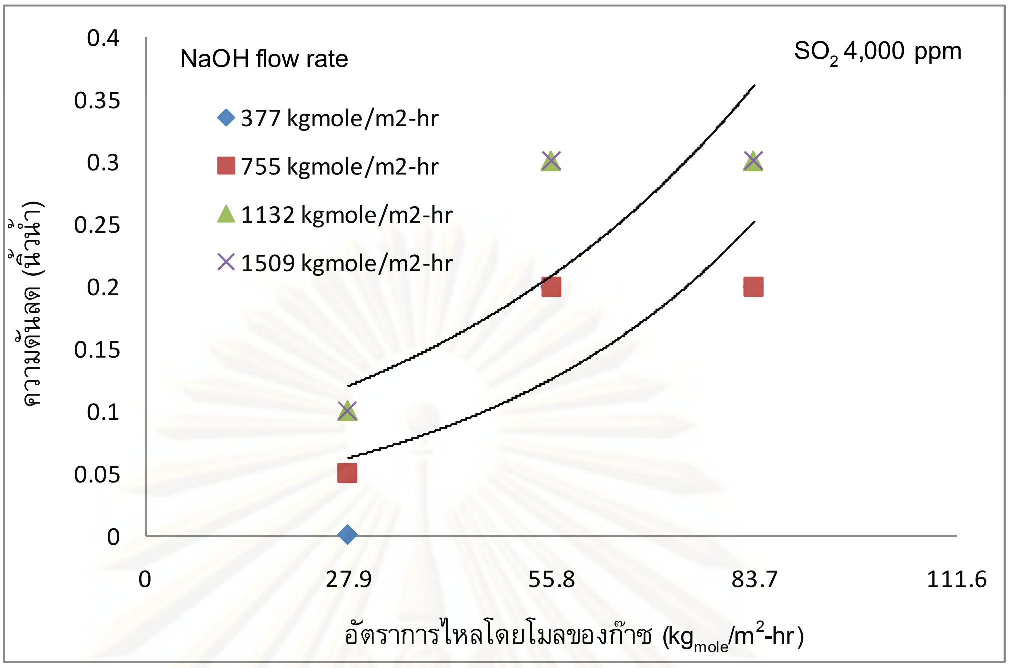
เพื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบเกลือซัลเฟตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของสารละลายด่างชนิดแรกกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้กลับมาอยู่ในรูปเดิม และสามารถนำกลับไปใช้ได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไปยังทำหน้าที่เป็นตัวช่วยให้ตกตะกอน (precipitant) เกิดเป็นสารประกอบเกลือที่ไม่ละลายน้ำและสามารถแยกออกไปได้

4.1.7 ผลการศึกษาความดันลดของระบบแพคเบดสครับเบอร์และพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ความดันลดที่เกิดขึ้นในระบบแพคเบดสครับเบอร์นั้นเกิดจากการที่กระแสก๊าซและของเหลวมีทิศทางการเคลื่อนที่ที่สวนทางกันผ่านตัวกลางบรรจุในแนวดิ่งซึ่งจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างทางเข้าและทางออกของของเหลวขึ้น จากรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซที่สภาวะการทดลองต่างๆ จากการศึกษาจะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเพิ่มขึ้น จะทำให้ความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซจะทำให้มีของเหลวบางส่วนไปปิดกั้นช่องทางการไหลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังนั้นความดันลดจึงเพิ่มขึ้น (สมัคร ขันเงิน, 2538) โดยความดันลดจากสภาวะการทดลองจะอยู่ในช่วง 0.1–0.3 นิ้วน้ำ ส่วนความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นไม่มีผลต่อความดันลด



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่างๆ



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ ที่อัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.20 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ พบว่าเมื่ออัตราการไหลโดยโมลก๊าซ ความดันลดของแพคเบดสครับเบอร์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วง 0–0.3 นิ้วน้ำ ซึ่งอยู่ในช่วงการเดินระบบที่เหมาะสม ทั้งนี้เพราะการเพิ่มอัตราการไหลโดยโมลก๊าซและอัตราการไหลของสารดูดซึมนั้นทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนภายในแพคเบดสครับเบอร์ การเดินระบบที่ความดันลดที่มีค่าสูงนั้นจะส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการเดินระบบที่เพิ่มขึ้น และหากความดันมีค่าสูงเกินไปจะทำให้เกิดการท่วมของน้ำขึ้น (Flooding) ภายในแพคเบดสครับเบอร์ ส่งผลให้ความสูงของตัวกลางที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการถ่ายเทมวลสารลดลง ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก็จะลดลงด้วย โดยงานวิจัยนี้ได้ออกแบบแผ่นรองรับตัวกลางบรรจุโดยให้กระแสก๊าซไหลขึ้นและของเหลวไหลลงแยกออกจากกันสามารถช่วยให้ความดันลดไม่สูงเกินไปในระดับหนึ่ง

สำหรับตัวแปรตามที่ทำการศึกษาอีกประการหนึ่งก็คือค่าพีเอชสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้ว ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วที่ทุกๆการทดลอง ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 2–3 ซึ่งพีเอชค่อนข้างต่ำ ดังภาคผนวก ช. ในการเดินระบบโดยทั่วไปนั้นควรควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เป็นด่างเล็กน้อยประมาณพีเอช 9

4.2 การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมของการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้แพคเบดสครับเบอร์นั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบ โดยมีตัวแปรต่างๆเกี่ยวข้อง เช่น ปริมาณ อุณหภูมิ และองค์ประกอบของก๊าซ เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม $(K_G a)$ เป็นตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อความสูงของตัวกลางที่บรรจุในแพคเบดสครับเบอร์ เป็นความกว้างของตัวกลางที่จำเป็นต้องใช้เพื่อทำให้เกิดการแยกมลพิษที่สมบูรณ์ (นพภาพร และคณะ, 2550) สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมของระบบแพคเบดสครับเบอร์รวมทั้งปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้น อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ ความเข้มข้น/พีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับการเปรียบเทียบหน่วยของตัวแปรต่างๆนั้น ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นหน่วยโดยโมล

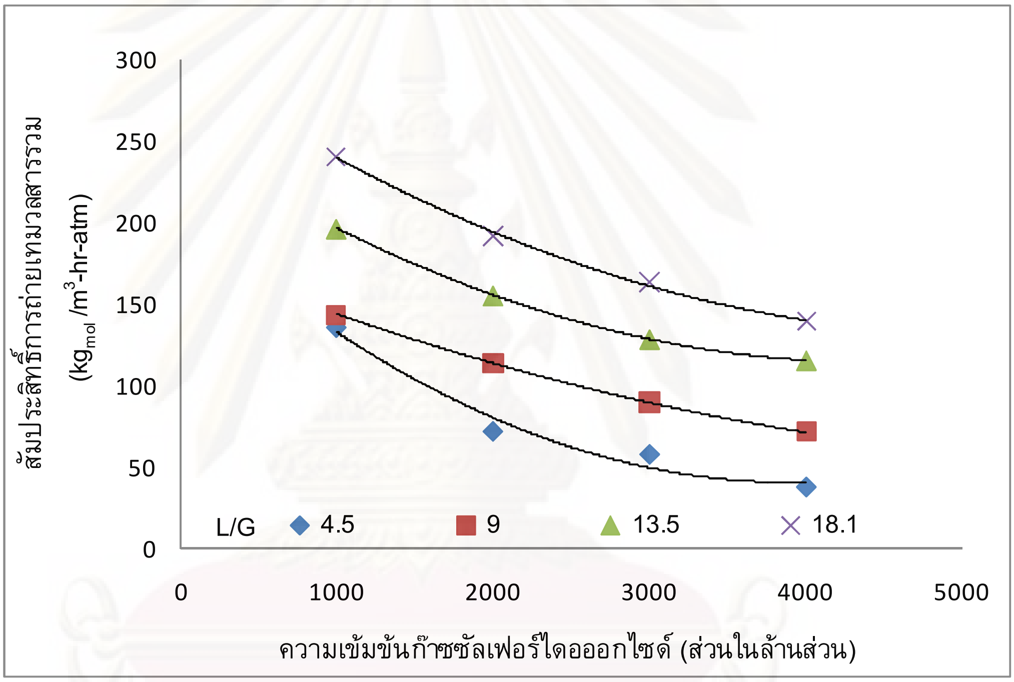
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบหน่วยของตัวแปรต่างๆ

อัตราการไหลก๊าซ (G)			อัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (L)			อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ (L/G)	
ลิตรต่อนาที	กิโลกรัมโมลต่อชั่วโมง	กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร-ชั่วโมง	ลิตรต่อนาที	กิโลกรัมโมลต่อชั่วโมง	กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร-ชั่วโมง	ลิตรต่อลูกบาศก์เมตรก๊าซ	โมล/โมล
200	0.49	27.9	2	6.7	377	10	13.5
			4	13.3	755	20	27.0
			6	20	1,132	30	40.6
			8	26.7	1,509	40	54.1
400	0.98	55.8	2	6.7	377	5	6.7
			4	13.3	755	10	13.5
			6	20	1,132	15	20.3
			8	26.7	1,509	20	27.0
600	1.48	83.6	2	6.7	377	3.3	4.5
			4	13.3	755	6.6	9.0
			6	20	1,132	10	13.5
			8	26.7	1,509	13.3	18.1

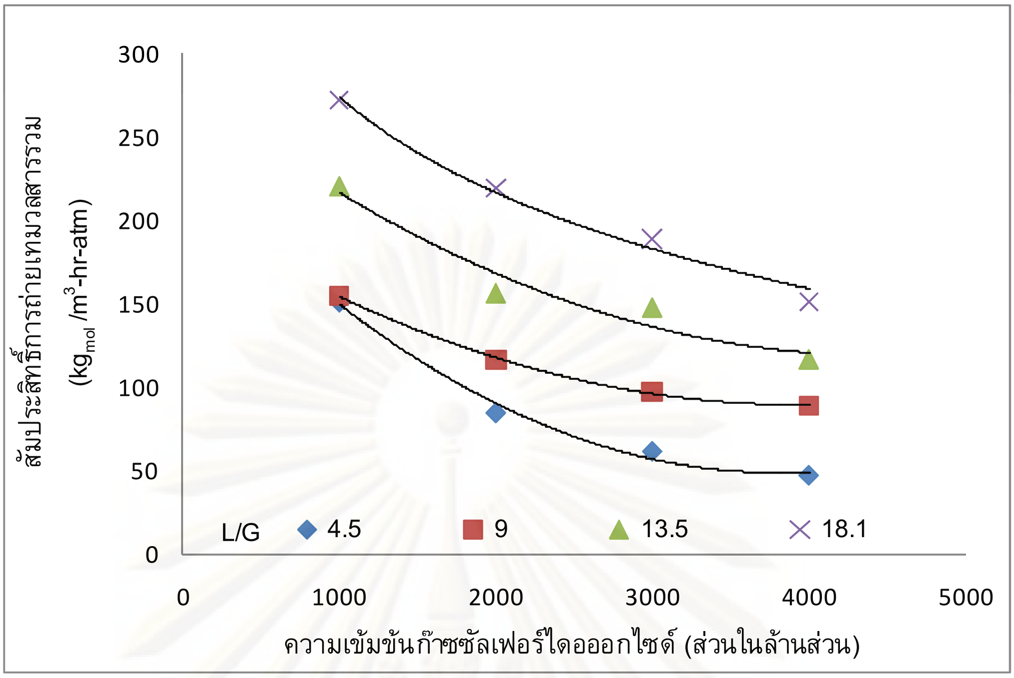
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.1 ผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์ถ่ายเทมวลสารรวม

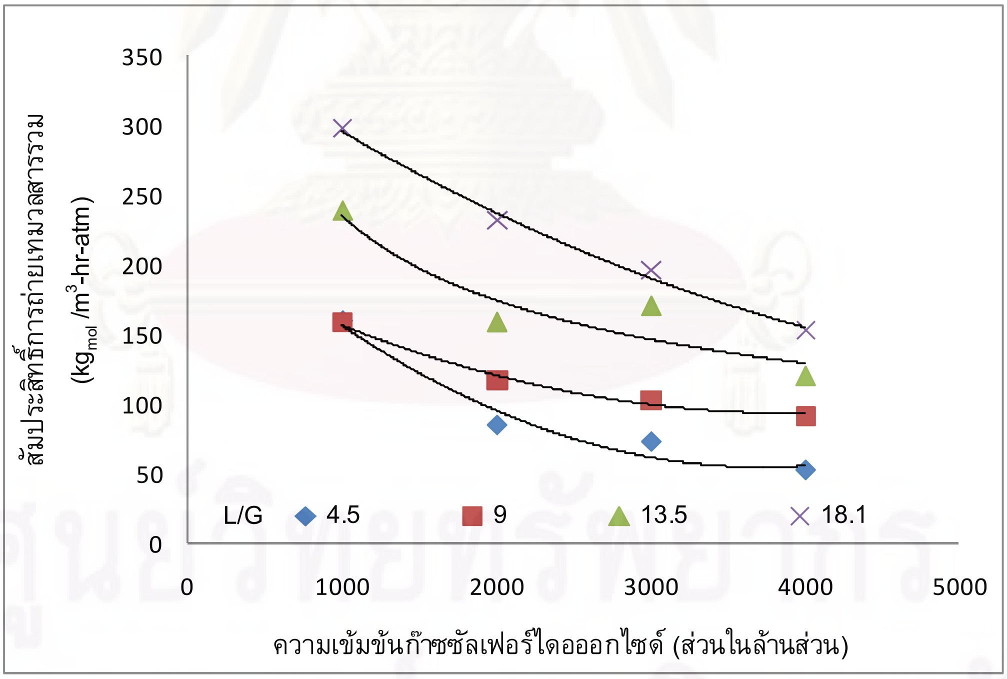
จากรูปที่ 4.21–4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0, 0.001, 0.003 และ 0.005 โมลต่อลิตร ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซและความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่ เมื่อความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมลดลง เนื่องจากสารตั้งต้นที่เป็นคู่ปฏิกิริยาไม่สมดุลกัน ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จึงออกมาจากทางออกของแพคเบดสครับเบอร์มากขึ้น



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 โมลต่อลิตร

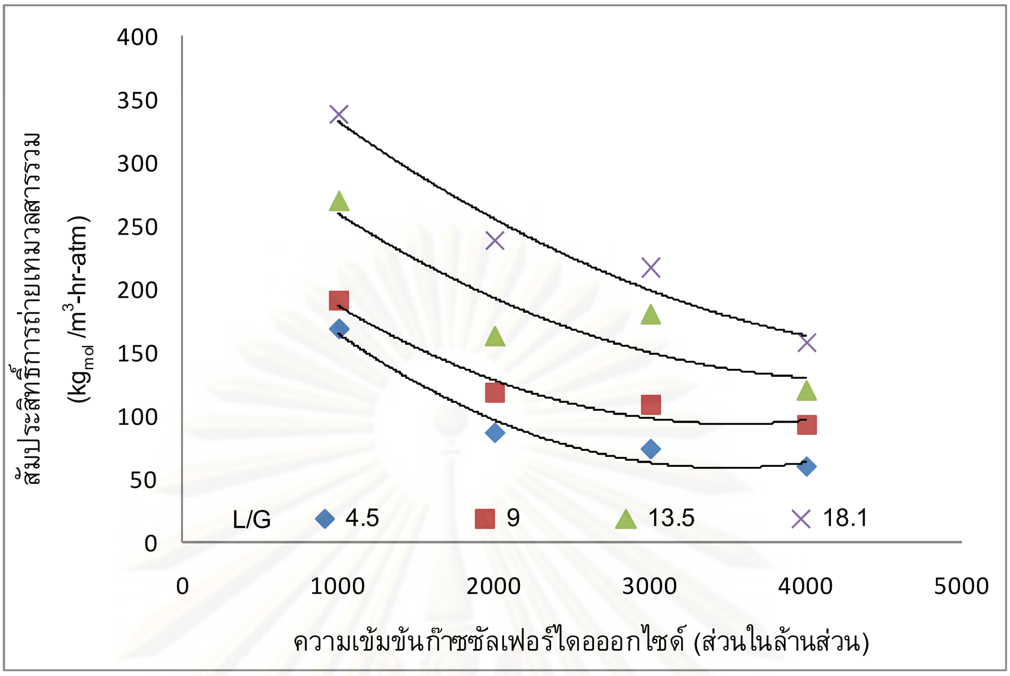


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.001 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.003 โมลต่อลิตร

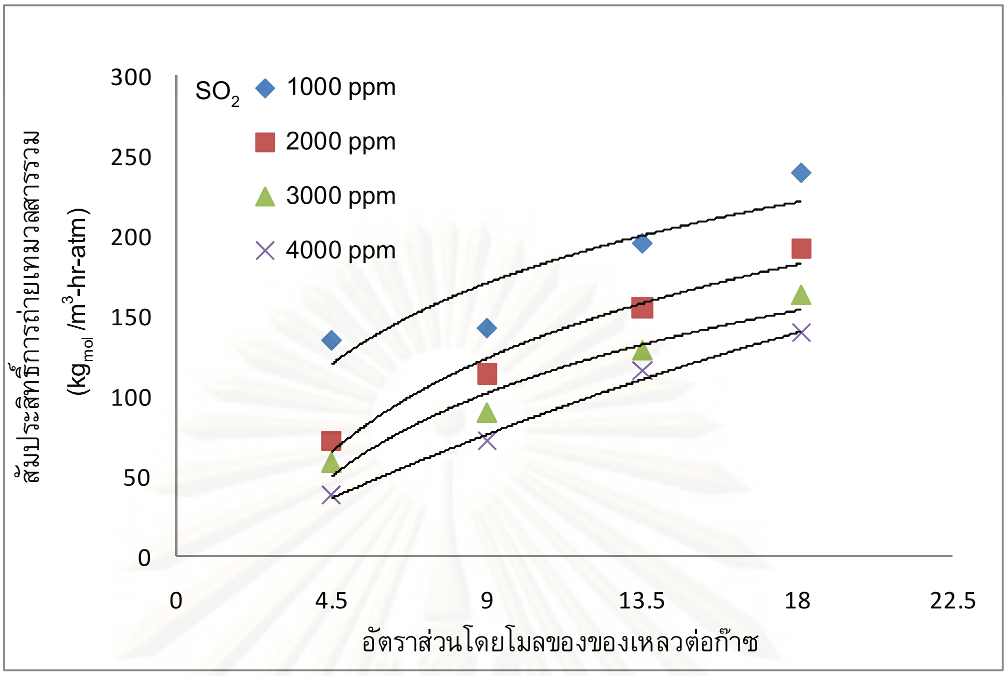
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



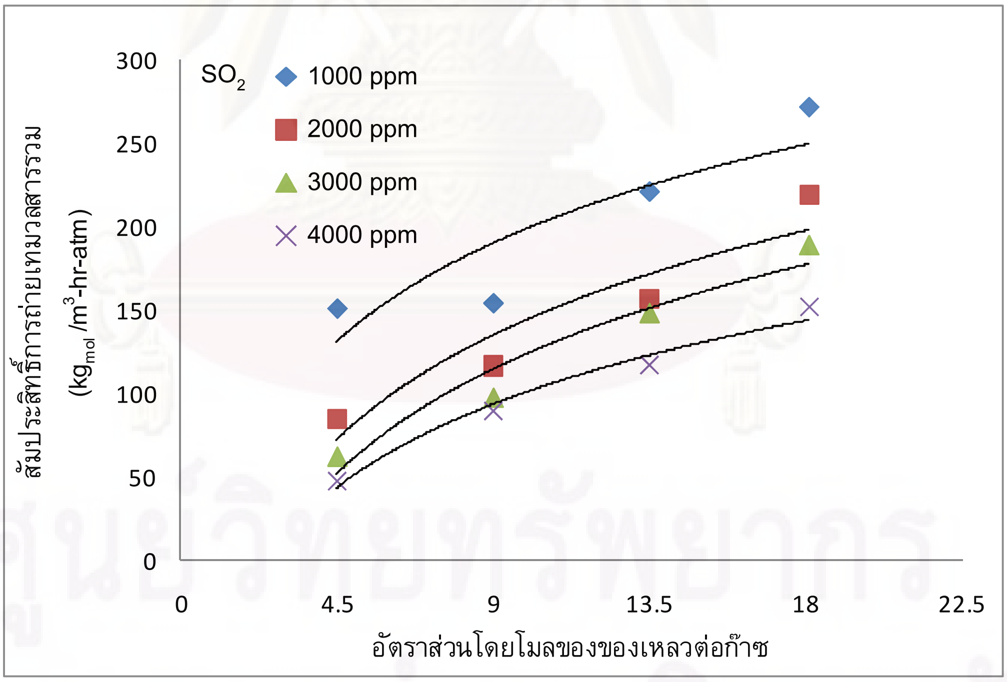
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 โมลต่อลิตร

4.2.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

จากผลการศึกษาดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์คืออัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ จากรูปที่ 4.25–4.28 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเพิ่มขึ้น ที่ทุกๆความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซจะทำให้พื้นที่ผิวเปียกบนตัวกลางและสารตั้งต้นที่เป็นคู่ปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น

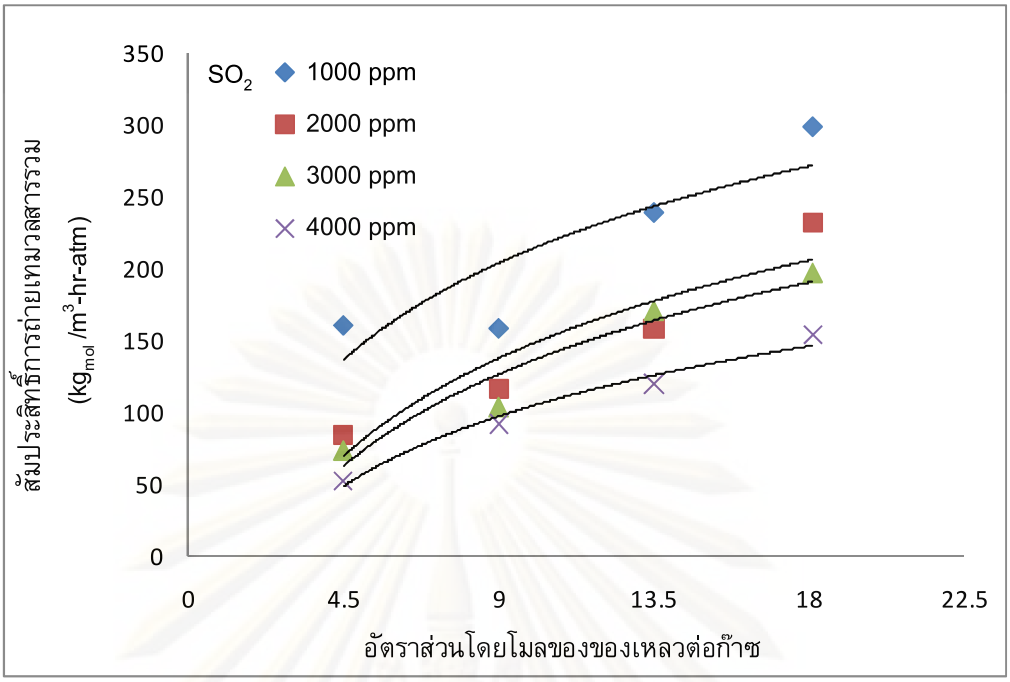


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 โมลต่อลิตร

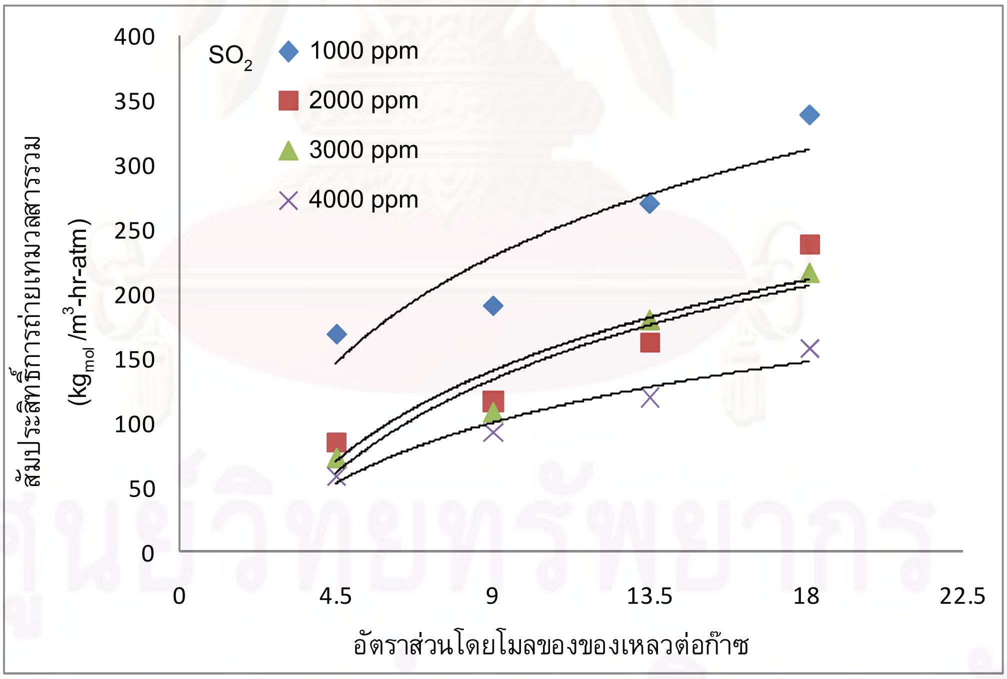


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.001 โมลต่อลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



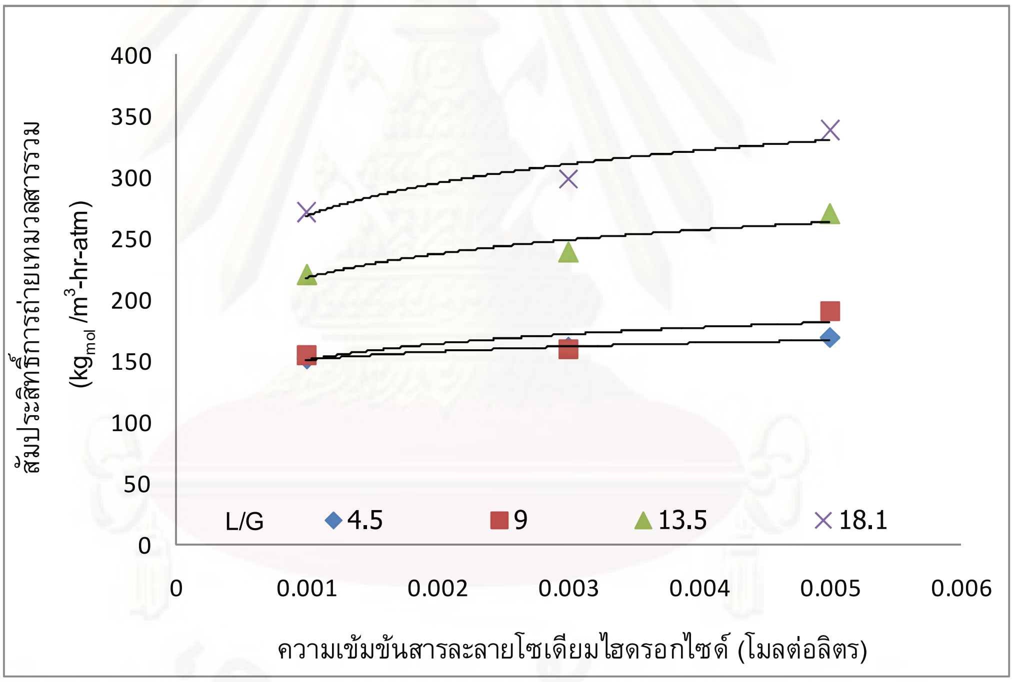
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.003 โมลต่อลิตร



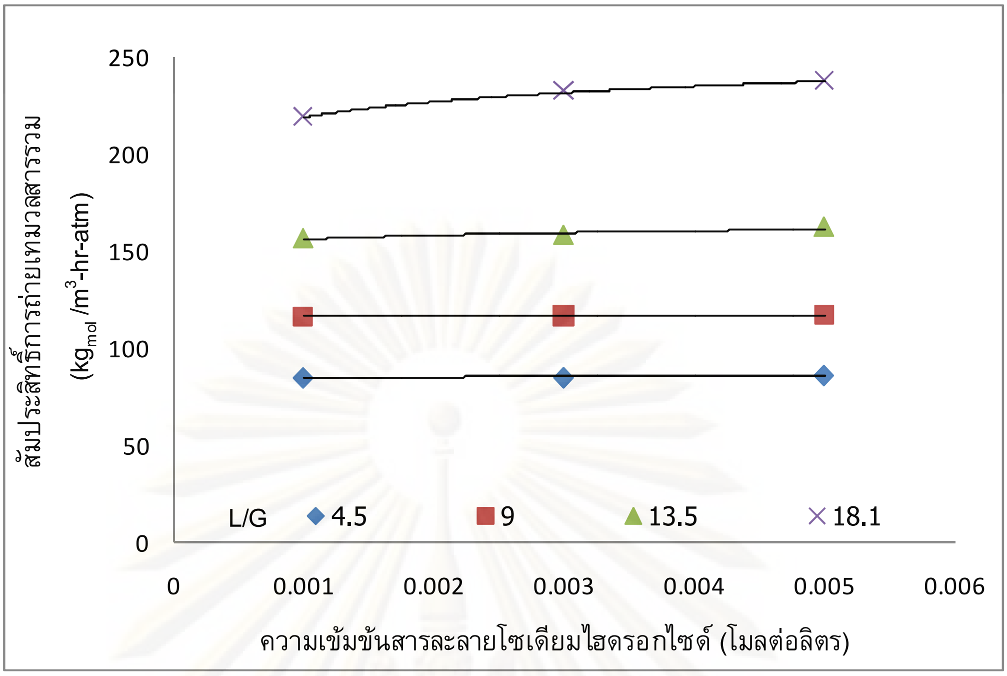
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 โมลต่อลิตร

4.2.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

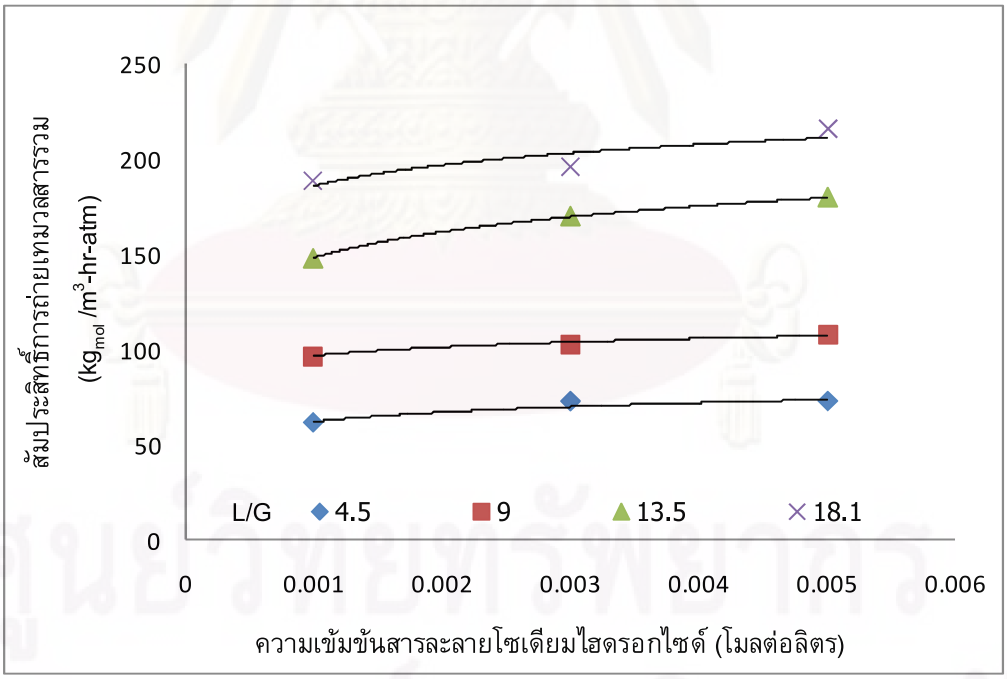
จากรูปที่ 4.29–4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ และความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่างๆ จะเห็นได้ว่าที่ทุกๆความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นการเพิ่มปริมาณไฮดรอกไซด์ (OH^-) ที่ละลายในน้ำ ทำให้โอกาสที่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ทำปฏิริยากับซัลเฟต (SO_3^{2-}) (ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำ) จึงมากขึ้น ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน



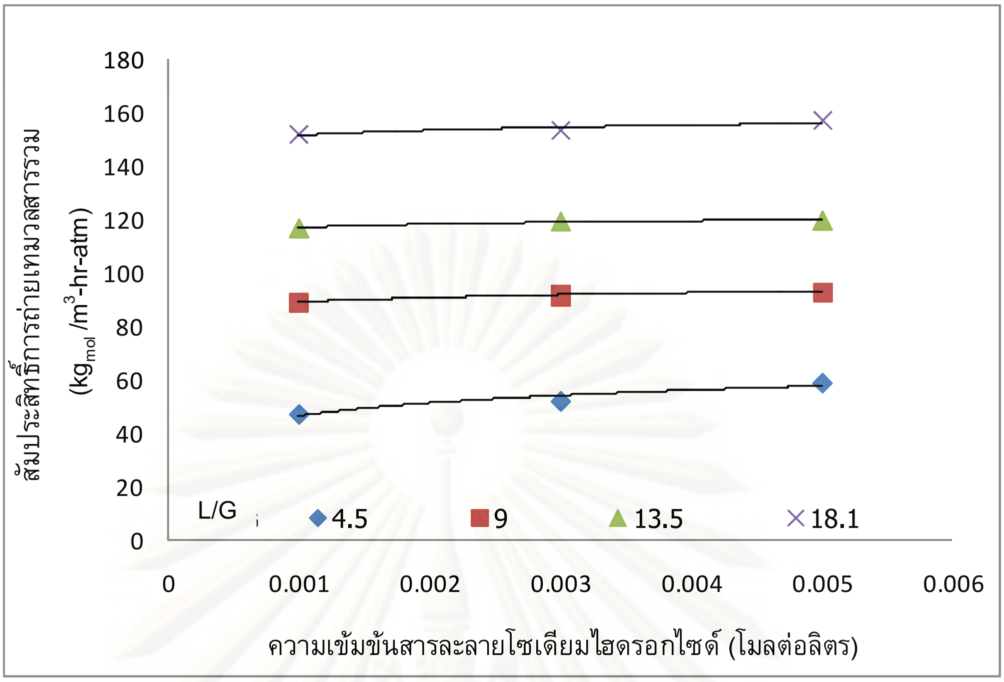
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1,000 ส่วนในล้านส่วน



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2,000 ส่วนในล้านส่วน



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3,000 ส่วนในล้านส่วน

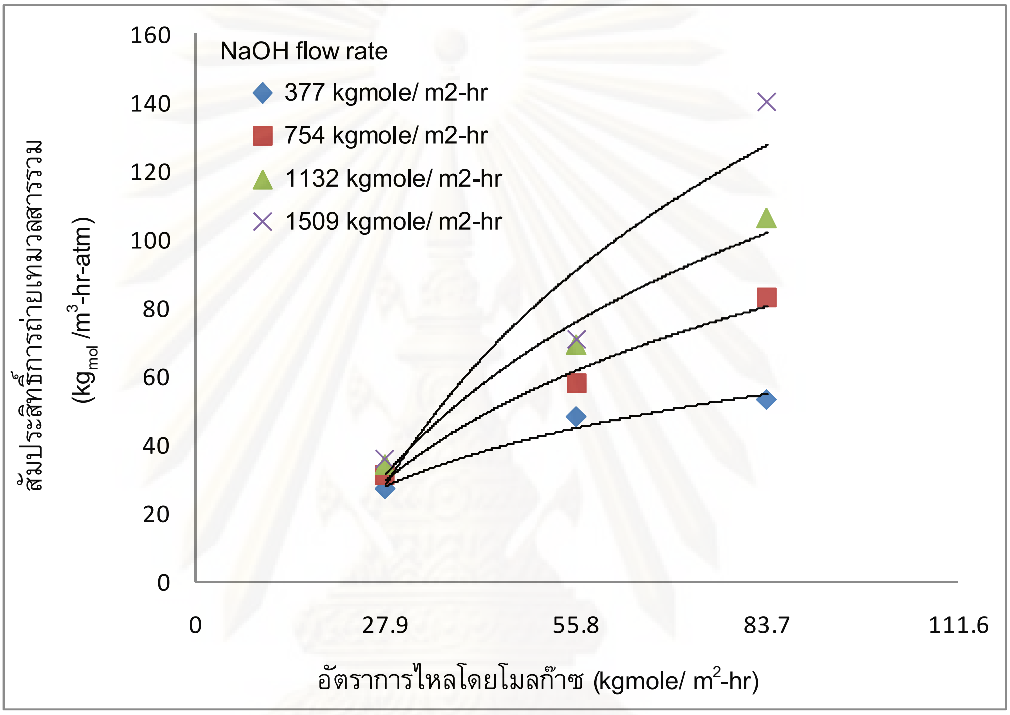


รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 4,000 ส่วนในล้านส่วน

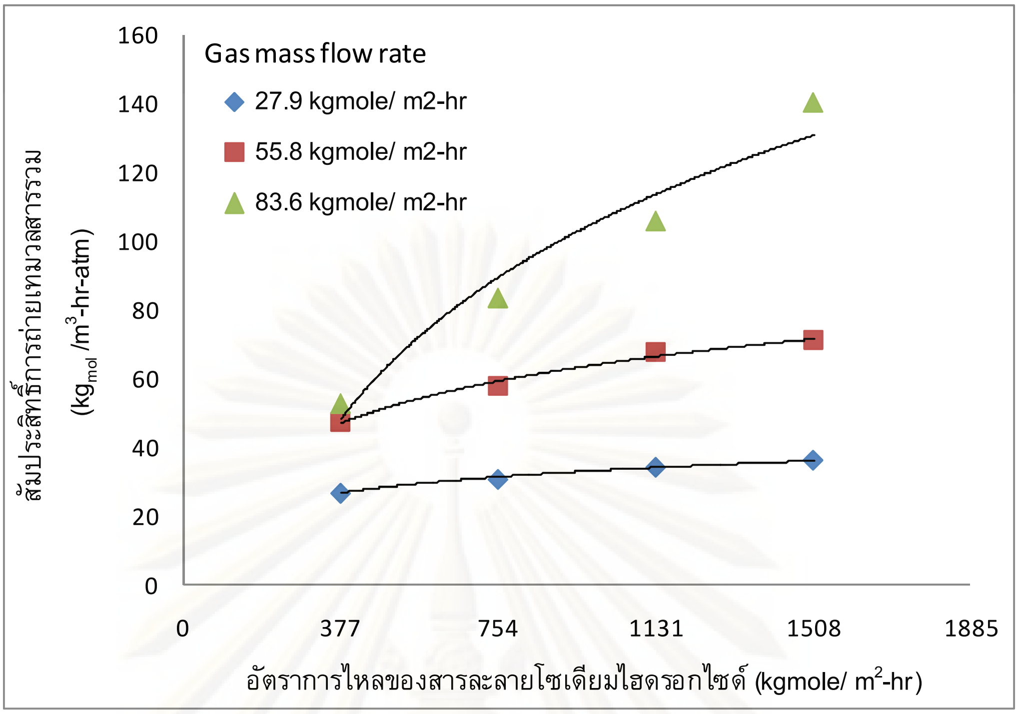
4.2.4 ผลของอัตราการไหลโดยโมลก๊าซที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

จากรูปที่ 4.33–4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับอัตราการไหลโดยโมลก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่อัตราการป้อนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 377, 754, 1,132 และ 1,509 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการไหลโดยโมลก๊าซเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเพิ่มขึ้น แต่ที่อัตราการไหลโดยโมลก๊าซต่ำๆ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่ออัตราการไหลก๊าซมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.33 โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีค่ามากสุดประมาณ 140 กิโลกรัมโมลต่อลูกบาศก์เมตร–ชั่วโมง–บรรยากาศ ที่อัตราการไหลก๊าซ 83.7 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง และอัตราการป้อนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1,509 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง จากการที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลโดยโมลก๊าซมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีค่าเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลก๊าซทำให้ความเร็วของก๊าซในแพคเบดสครับเบอร์เพิ่มมากขึ้น ความเร็วที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้เกิดลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ซึ่งลักษณะการไหลดังกล่าวทำให้ความต้านทานซองการถ่ายเทมวล (Mass transfer

resistance) ในวัฏภาคก๊าซลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมจึงเพิ่มขึ้น (สมัคร ขันเงิน, 2538) และที่อัตราการไหลโดยโมลก๊าซเข้าแพคเบดสครับเบอร์เท่ากัน แต่ใช้อัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มของของเหลวทำให้พื้นที่ผิวเปียกบนตัวกลางเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมจึงเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ ที่อัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกับอัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราการไหลโดยโมลก๊าซต่างๆ

4.2.5 ผลการศึกษาความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลและการนำไปประยุกต์ใช้

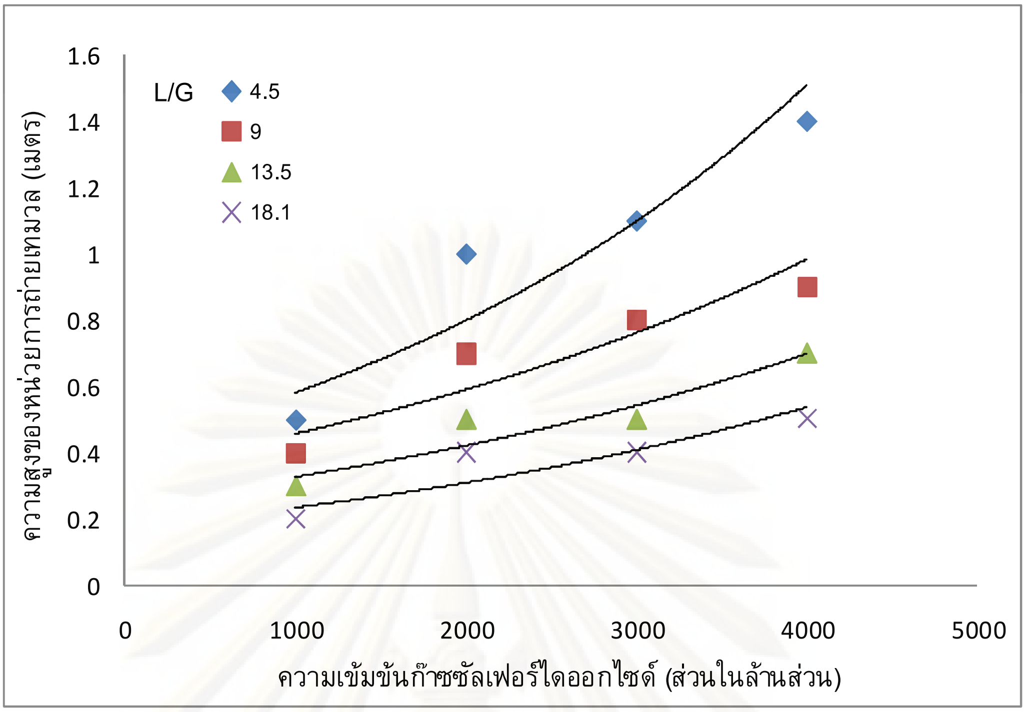
จากผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมนั้นพบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ และอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของระบบบำบัดมลพิษจะดีหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมนั้นสามารถนำไปคำนวณหาความสูงของตัวกลางได้ ความสูงของตัวกลางที่บรรจุในแพคเบดสครับเบอร์นั้นหมายถึงความกว้างและความสูงของตัวกลาง ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการแยกสารมลพิษอย่างสมบูรณ์ซึ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมจะสัมพันธ์กับความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลดังสมการ 4.6

$$H_{OG} = \frac{G}{K_G a \times P} \qquad (4.6)$$

เมื่อ H_{OG} = ความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล (Height of Transfer Unit)

G_m = อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ, กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง

P = ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลกับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล (Height of Transfer Unit) นั้นขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม หากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีค่ามาก ความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลก็จะน้อย ส่งผลให้ความสูงของตัวกลางในแพคเบดสครับเบอร์ลดลงด้วยเช่นกัน แต่ทั้งนี้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซและความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สำหรับการนำค่าความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลไปประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณความสูงของชั้นตัวกลางภายในแพคเบดสครับเบอร์สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.7

$$Z = N_{OG} \times H_{OG} \qquad (4.7)$$

เมื่อ N_{OG} = จำนวนของหน่วยการถ่ายเทมวล (Number of Transfer Unit) ที่ขึ้นกับประสิทธิภาพของฟิล์มก๊าซทั้งหมด

H_{OG} = ความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล (Height of Transfer Unit) ที่ขึ้นกับประสิทธิภาพของฟิล์มก๊าซทั้งหมด

ซึ่งค่า N_{OG} หรือจำนวนของหน่วยการถ่ายเทมวล (Number of Transfer Unit) ที่ขึ้นกับประสิทธิภาพของฟิล์มก๊าซทั้งหมดนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ 4.8

$$N_{OG} = \frac{\ln\left[\left(\frac{Y_1 - mX_2}{Y_2 - mX_2}\right)\left(1 - \frac{mG_m}{L_m}\right) + \frac{mG_m}{L_m}\right]}{1 - \frac{mG_m}{L_m}} \tag{4.8}$$

เมื่อ m = ความชันของเส้นสมดุล

G_m = อัตราไหลของก๊าซ, กิโลกรัมโมลต่อชั่วโมง

L_m = อัตราไหลของของเหลว, กิโลกรัมโมลต่อชั่วโมง

X_2 = สัดส่วนโมลของสารละลายเข้าไปในแพคเบดสครับเบอร์

Y_1 = สัดส่วนโมลของสารละลายในก๊าซที่เข้าไปในแพคเบดสครับเบอร์

Y_2 = สัดส่วนโมลของสารละลายในก๊าซที่ออกจากแพคเบดสครับเบอร์

สำหรับค่า H_{OG} สามารถหาได้จากรูปที่ 4.35 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลในช่วงขอบเขตการทดลองที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้น 1,000–4,000 ส่วนในล้านส่วน และอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ 4.5–18.1 ระบบแพคเบดสครับเบอร์สำหรับการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นจะเป็นการดูดซึมก๊าซทางเคมี (Chemical absorption) จึงทำให้ค่า m หรือความชันของเส้นสมดุลในสมการที่ 4.8 เท่ากับศูนย์ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.9

$$N_{OG} = \ln\frac{Y_1}{Y_2} \tag{4.9}$$

ตารางที่ 4.2 จำนวนของหน่วยการถ่ายเทมวลที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่าง ๆ

ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	จำนวนของหน่วยการถ่ายเทมวล (N_{OG})*
1,000	2.3
2,000	2.3
3,000	2.3
4,000	2.3
5,000	2.3

หมายเหตุ * จำนวนของหน่วยการถ่ายเทมวลที่ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 90 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและประสิทธิภาพการควบคุมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยแพคเบดสครับเบอร์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารดูดซึมที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้น อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราการไหลโดยโมลก๊าซรวมทั้งศึกษาการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับไปใช้บำบัดซ้ำ โดยสามารถสรุปผลของปัจจัยต่างๆได้ดังนี้

5.1.1 ผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้น

การศึกษาผลของความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพของแพคเบดสครับเบอร์ โดยแปรค่าความเข้มข้นก๊าซเท่ากับ 1,000, 2,000, 3,000 และ 4,000 ส่วนในล้านส่วน ที่อัตราการไหลโดยโมลก๊าซเท่ากับ 83.6 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซจะลดลง และจากการศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมพบว่า เมื่อความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีค่าลดลง แต่เมื่อความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้นมีค่ามากขึ้น ความสูงของการถ่ายเทมวลมีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ

การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ ทำได้โดยแปรค่าเท่ากับ 4.5, 9.0, 13.5 และ 18.1 จากการศึกษาพบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีค่าเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซที่เหมาะสมต่อการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้มข้น 1,000, 2,000, 3000, และ 4,000 ส่วนในล้านส่วน เท่ากับ 4.5, 13.5, 13.5 และ 18.1 ตามลำดับ และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเพิ่มขึ้น ความสูงของการถ่ายเทมวลก็จะมีค่าลดลง เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 องศาเซลเซียส) ด้วยเหตุนี้ในการนำค่าอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซไป

ใช้นั้น จำเป็นต้องเพิ่มค่าอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซให้มากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซไอเสียจริงที่ผ่านระบบแพคเบดสครับเบอร์นั้นอยู่ในช่วงประมาณ 60–100 องศาเซลเซียส

5.1.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำได้โดยแปรค่าเท่ากับ 0, 0.001, 0.003 และ 0.005 โมลต่อลิตร (พีเอชประมาณเท่ากับ 7, 8, 10 และ 10 ตามลำดับ) จากการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ความสูงในการถ่ายเทมวลนั้นจะมีค่าลดลง

5.1.4 ผลของอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ

การศึกษาผลของอัตราการไหลโดยโมลก๊าซ โดยแปรค่าเท่ากับ 27.9, 55.8 และ 83.6 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากับ 4000 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 377, 755, 1,132 และ 1,509 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 โมลต่อลิตร จากการศึกษาพบว่าที่อัตราการไหลโดยโมลก๊าซเท่ากับ 27.9, 55.8 และ 83.6 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ในช่วง 76.4–85.9, 72.3–85.3 และ 61.1–91.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ที่อัตราการไหลโดยโมลก๊าซคงที่พบว่า เมื่ออัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดก็เพิ่มขึ้นด้วย จากผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมพบว่าเมื่ออัตราการไหลโดยโมลของก๊าซเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.5 ผลของการหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับไปใช้ซ้ำ

การศึกษาความเป็นไปได้ในการหมุนเวียนสารสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับไปบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซ้ำ ทำการศึกษาที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1,000, 2,000, 3,000 และ 4,000 ส่วนในล้านส่วน อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเท่ากับ 18.1 อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซ 83.6 กิโลกรัมโมลต่อตารางเมตร–ชั่วโมง และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.005 โมลต่อลิตร จากการศึกษาพบว่าเมื่อเวลาในการเดินระบบเพื่อหมุนเวียนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับไปบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ซ้ำเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งความเข้มข้นก๊าซที่ออกจากระบบแพคเบดสครับเบอร์เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ (700 ส่วนในล้านส่วน) เมื่อเวลาเดินระบบมากกว่า 8 นาที ด้วยเหตุนี้หากต้องการเดินระบบแบบต่อเนื่องจำเป็นต้องมีการควบคุมพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ออกจากระบบแพคเบดสครับเบอร์ให้อยู่ในช่วงเป็นด่างเล็กน้อย โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าไปในระบบสารดูดซึมเพิ่มเติม

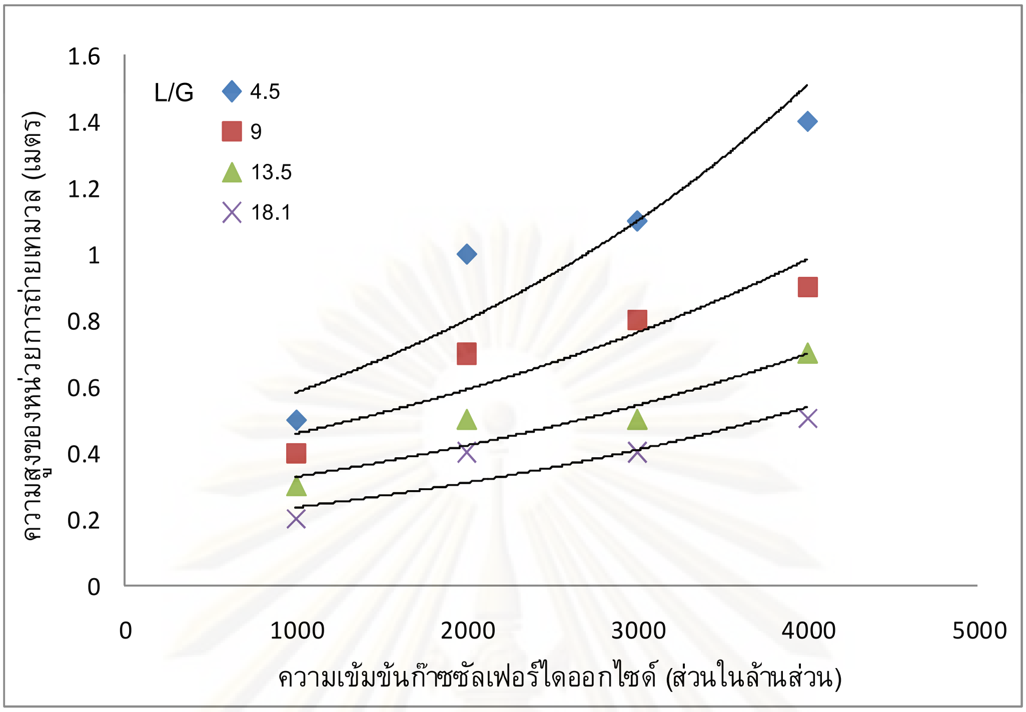
5.1.6 ผลการศึกษาความดันลดของระบบแพคเบดสครับเบอร์และพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

จากผลการศึกษาความดันลดของระบบแพคเบดสครับเบอร์ พบว่าเมื่ออัตราการไหลโดยโมลก๊าซและอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซเพิ่มขึ้น ความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อยู่ในช่วง 0–0.3 นิ้วน้ำ ส่วนผลการศึกษาพีเอชสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์พบว่า พีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ในช่วง 2–4

5.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบแพคเบดสครับเบอร์

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมนั้นสามารถนำไปคำนวณหาความสูงของตัวกลางได้ ซึ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมจะสัมพันธ์กับความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล ความสูงของตัวกลางที่บรรจุในแพคเบดสครับเบอร์นั้นหมายถึงความกว้างและความสูงของตัวกลาง ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการแยกสารมลพิษอย่างสมบูรณ์ จากผลการศึกษาสามารถสรุปตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อเป็นเกณฑ์การออกแบบระบบแพคเบดสครับเบอร์ โดยมีขอบเขตการทดลองและตัวแปรที่เหมาะสม ดังตารางที่ 5.1 สำหรับสภาวะการทดลองที่เหมาะสมนั้นจะจำแนกตามความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ค่าความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลที่ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เริ่มต้นต่าง ๆดังรูปที่ 5.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวลมวลกับความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ตารางที่ 5.1 ขอบเขตการทดลองและตัวแปรที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน

ตัวแปร	ค่า			
1. ขอบเขตการทดลอง				
- ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	1,000–4,000			
- อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ (โมล/โมล)	4.5–18.1			
- อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ (kg_{mole}/m^2–hr)	27.9–83.6			
- ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	0–0.005			
- ความสูงของชั้นตัวกลาง (เมตร)	1.5			
- ตัวกลางชนิดเฮ็ดจ์ฮ็อก (นิ้ว)	1.5			
- เส้นผ่านศูนย์กลางของแพคเบดสครับเบอร์ (เมตร)	0.15			
- อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	30			
2. สภาวะการทดลองที่เหมาะสม	L/G (โมล/โมล)	[NaOH] (โมลต่อลิตร)	H_{OG} (เมตร)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้มข้น 1,000 ส่วนในล้านส่วน	≥ 4.5	> 0.005	0.5	> 90
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้มข้น 2,000 ส่วนในล้านส่วน	≥ 13.5	> 0.005	> 0.5	> 90
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้มข้น 3,000 ส่วนในล้านส่วน	≥ 13.5	> 0.005	> 0.5	> 90
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้มข้น 4,000 ส่วนในล้านส่วน	≥ 18	> 0.005	≥ 0.6	> 90

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

110

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิของกระแสก๊าซที่เกิดจากกระบวนการผลิตมากกว่า 100 องศาเซลเซียส ควรทำการศึกษาผลของอุณหภูมิก๊าซไอเสียร่วมด้วย

5.3.2 เนื่องจากมลสารที่เกิดจากกระบวนการผลิตนั้นมีมากกว่าหนึ่งชนิดรวมทั้งมีฝุ่นละอองเกิดขึ้นด้วย ด้วยเหตุนี้จึงควรทำการศึกษาผลของฝุ่นละอองและก๊าซชนิดอื่นร่วมด้วย เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ เป็นต้น

5.3.3 พีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ออกจากระบบแพคเบดสครับเบอร์ค่อนข้างต่ำ จึงควรทำการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงระบบสารดูดซึมให้ป้อนสารเคมีโดยอัตโนมัติ

5.3.4 ควรทำการศึกษาการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แบบด่างคู่ เพื่อสามารถนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับไปใช้ได้อย่างต่อเนื่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กุลยา โอตากะ. 2545. เคมีสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

ควบคุมมลพิษ, กรม. 2552. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์: ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ [ออนไลน์]. ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. แหล่งที่มา: http://msds.pcd.go.th/pdf/2441.pdf [2552, กุมภาพันธ์ 14]

ธนิตา ทองเงา. 2551. ประสิทธิภาพการดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสครับเบอร์แบบแพคเบด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธัชชา รัมมะศักดิ์. 2538. ผลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อการเคลื่อนตัวของโลหะและธาตุในดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นพภาพร พานิช, แสงสันติ์ พานิช, วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์, วิจิตรา จงวิศาล และวราวุธ เสือดี. 2550. ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปิยะสาร ประเสริฐธรรม. 2536. หลักการออกแบบเครื่องมือแยกสาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรม. 2551. รายงานพลังงานของประเทศไทย พ.ศ.2551. กรุงเทพมหานคร. ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.

พัชว์ไล พงษ์พานิช. 2547. อัตราการกัดกร่อนอิฐเก่าจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2). วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พัสตราภรณ์ ชาติสิริวัฒนา. 2542. การถ่ายเทมวลในหอบรรจุแบบกระแสไหลตัดกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2532. การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมก๊าซ [ออนไลน์]. ในเอกสารประกอบการอบรมเรื่อง การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมมลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรม, 25-28 กรกฎาคม 2532, ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. แหล่งที่มา: http://www2.diw.go.th/km/pdf%5Cknow%5Cgas.pdf [2551, ตุลาคม 10]

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2545. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาเผาสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นอันตรายจากอุตสาหกรรม พ.ศ. 2545. ลงวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ.2545 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 119 ตอนพิเศษ 106ง เมื่อวันที่ 30 ตุลาคม พ.ศ.2545.

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2547. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนที่ระบายออกจากโรงงานผลิต ส่ง หรือจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า พ.ศ.2547. ลงวันที่ 28 กันยายน พ.ศ.2547 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 121 ตอนพิเศษ 113ง เมื่อวันที่ 7 ตุลาคม พ.ศ.2547.

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2549. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ.2549. ลงวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ.2549 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 123 ตอนพิเศษ 125ง เมื่อวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2549.

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2549. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนที่ระบายออกจากโรงงานปูนซีเมนต์ พ.ศ.2549. ลงวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ.2549 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 123 ตอนพิเศษ 125ง เมื่อวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2549.

วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์, นิตยา มหาผล และธีระ เกรอต. 2538. มลภาวะทางอากาศ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วราวุธ เสือดี. 2541. การศึกษามลภาวะทางอากาศในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. สถาบันไทยคดีศึกษา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

วิทย์ธวัช ปราการไชยวัฒน์. 2541. การดูดกลืนไนโตรเจนไดออกไซด์ในหอดูดกลืน.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สถิตย์ จุ้ยเตย. 2541. ผลของการเติมออกซิเจนต่อการดูดกลืนแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในหอดูดกลืนแบบเบดนิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมัคร ขันเงิน. 2538. การศึกษาระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้วิธีแบบเปียก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุวรรณี จรรยาพูน. 2548. เคมีสิ่งแวดล้อม 2. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ภาษาอังกฤษ

Aroonwilas, A., Tontiwachwuthikul, P. and Chakma, A. 2001. Effects of operating and design parameters on CO_2 absorption in columns with structured packings. Separation and Purification Technology 24: 403–411.

Baird, C. and Cann, M. 2005. Environmental Chemistry. 3rd ed. New York: W.H. Freeman and Company.

Berthouex, P.M. and Brown, L.C. 2002. Statistics for Environmental Engineers. 2nd ed. Boca Raton: Lewis.

Brogren, C. and Karlsson, H.T. 1997. Modeling the absorption of SO_2 in a spray scrubber using the penetration theory. Chemical Engineering Science 52(18): 3085–3099.

Chien, T.W. and Chu, H. 2000. Removal SO_2 and NO from flue gas by wet scrubber using an aqueous $NaClO_2$ solution. Hazardous Materials B80: 43–57.

Chu, H., Chien, T.W. and Li, S.Y. 2002. Simultanous absorption of SO_2 and NO from flue gas with $KMnO_4$/ NaOH solutions. the Science of the Total Environment 275: 127–136.

Colle, S., Thomas, D. and Vanderschuren, J. 2005. Process Simulation of Sulphur Dioxide Abatement with Hydrogen Peroxide Solutions in a Packed Column. Chemical Engineering Research and Design 83(A1): 81–87.

de Nevers, N. 2000. Air Pollution Control Engineering. 2nd ed. McGraw-Hill.

Ebrahimi, S., Picioreanua, C., Kleerebezema, R., Heijnena, J.J. and van Loosdrecht, M.C.M. 2003. Rate-based modelling of SO_2 absorption into aqueous $NaHCO_3/Na_2CO_3$ solutions accompanied by the desorption of CO_2. Chemical Engineering Science 58: 3589– 3600.

Foust, A.S. 1980. Principle of Unit Operation. 2nd ed. New York: John Wiley& Son.

Haq, G. and Schwela, D. 2002. Foundation Course: Air Quality management in Asia [CD-ROM]. Stockholm Environment Institute.

Kirk, R.E. and Othmer, D.F, 1983. Encyclopedia of Chemical Technology. 3rd ed. New York: John Weiley & Son.

Leva, M. 1951. Tower Packing and Packed Tower Design. London: The United State Stoneware.

Liu, Z.S., Wey, M.Y. and Lin, C.L. 2002. Simultaneous control of acid gases and PAHs using a spray dryer combined with a fabric filter using different additives. Hazardous Materials B(91): 129-141.

Majeed, J.G., Korda, B. and Bekassy-Molar, E. 1995. Comparison of the efficiencies of sulfur dioxide absorption using calcium carbonate slurry and sodium hydroxide solution in and ALT reactor. Gas Separation & Purification 9(2): 111–120.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Manyele, S.V. 2008. Toxic acid gas absorber design considerations for air pollution control in process industries. Educational Research and Review 3(4): 137–147.

Perry, R.H., Green, D.W. and Maloney, J.O. 1984. Perry's Chemical Engineer's Handbook [CD-ROM].6th ed. Malaysia: McGraw–Hill.

Richards, J.R. 2000. Control of Gaseous Emissions: Student Manual. United State Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, NC 27111.

Senol, A. 2001. Mass transfer efficiency of randomly-packed column: modeling considerations. Chemical Engineering and Processing 40: 41–48.

Srivastava, R.K., Jozewicz, W. and Singer, C. 2001. SO_2 Scrubbing Technologies: A Review. Research Triangle Park, NC 27111.

Strigle, R.F. 1994. Packed Tower Design and Application, Random and Structured Packings. 2nd ed. London: Gulf publishing.

Sultan, G.I., Hamed, A.M. and Sultan, A.A. 2002. The effect of inlet parameters on the performance of packed tower-regenerator. Renewable Energy 26: 271–283.

Thibodeaux, L.J. 1969. Continuous Crosscurrent Mass Transfer in Towers. Chemical Engineering 2:165–170.

Wang, H., Lana, G.D., and Chuang, K.T. 2004. Mass-transfer characteristics for gas-liquid reaction of H_2S and sulfuric acid in a packed column. Industrial & Engineering Chemistry Research 43: 5486–5853.

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การออกแบบแพคเบดสครับเบอร์ (Richards, 2000)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การออกแบบแพคเบดสครับเบอร์

1. การคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้ป้อนเข้าแพคเบดสครับเบอร์

$$Y_1 = HX$$

เมื่อ Y_1 คือ สัดส่วนโมลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ = 0.004

H คือ ค่าคงที่ของเฮนรี่ = 42.7 mole fraction SO_2 in air/mole fraction SO_2 in water

แทนค่าลงในสมการ

$$0.004 = 42.7 \times X_1$$

ดังนั้น $X_1 = \dfrac{0.004}{42.7}$

= 0.0000936 สัดส่วนโมล

ค่าต่ำสุดสำหรับอัตราส่วนของเหลวต่อก๊าซหาได้จากสมการดังนี้

$$Y_1 - Y_2 = \frac{L_m}{G_m}\left(X_1 - X_2\right)$$

$$\frac{L_m}{G_m} = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2}$$

$$\frac{L_m}{G_m} = \frac{0.004 - 0.00003}{0.0000936 - 0}$$

$$\frac{L_m}{G_m} = 42.4\,\frac{g.mole\ water}{g.mole\ of\ air}$$

กำหนดให้อัตราการไหลของอากาศที่เข้า $(G) = 0.6\,m^3/\min$ สามารถเปลี่ยนเป็นค่ามวลของอากาศได้โดยเปลี่ยน m^3 เป็น $gmole$

$$G_m = 0.6\frac{m^3}{\min} \times \frac{g.mole\ air}{0.024\,m^3}$$

$$= 25\,\frac{g.mole\ air}{\min}$$

$$\frac{L_m}{G_m} = 42.4\,\frac{g.mole\ water}{g.mole\ of\ air}$$

$$L_m = 42.4 \times 25 = 1060\ g.mole\ water/\min$$

ทำให้เป็นมวลน้ำของน้ำได้ดังนี้

$$L_m = 1060\,\frac{g.mole\ water}{\min} \times \frac{18\ g}{g\ mole\ water}$$

$$L_m = 19080\,\frac{g}{\min}$$

$$L_m = 19080\,\frac{g}{\min} \times \frac{1\,lb_m}{456.6\,g} \times \frac{1\ ft^3}{62.4\,lb_m} \times \frac{7.48\,gal}{ft^3}$$

$L_m = 5\ gal/\min$ = 19 ลิตรต่อนาที

2. การคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของแพคเบดสครับเบอร์

$$G_m = 25\,\frac{g.mole\ air}{\min}$$

$$L_m = 19080\,\frac{g}{\min} = 19.08\,kg/\min$$

เปลี่ยนหน่วยจาก $\frac{g.mole\ air}{\min}$ เป็น $g/\min$ ได้โดยสมมติว่าน้ำหนักโมเลกุลของก๊าซเท่ากับ $29\ g/g\ mole$

$$G_m = \left(25\,\frac{g.mole\ air}{\min}\right)\left(\frac{29\ g}{g\ mole}\right)$$

$$G_m = 725\ g/\min = 0.725\ kg/\min$$

ปรับอัตราการไหลของของเหลวเป็น 1.5 เท่าของค่าต่ำสุด จะได้

$$L_m = 19.08\,\frac{kg}{\min} \times 1.5$$

$$= 28.62\,kg/\min$$

ความหนาแน่นของอากาศและน้ำที่ 30 องศาเซลเซียส เท่ากับ

ρ_G = 1.17 kg/m^3

ρ_L = 1000 kg/m^3

คำนวณหาค่า Abscissa ได้จากสมการ

$$\left(\frac{L}{G}\right)\left(\frac{\rho_g}{\rho_L}\right)^{0.5}$$

เมื่อ L คือ อัตราการไหลโดยมวลของของเหลว ซึ่งเท่ากับ 28.62 *kg/min*

G คือ อัตราการไหลโดยมวลของก๊าซ ซึ่งเท่ากับ 0.725 *kg/min*

$$\left(\frac{28.62}{0.725}\right)\left(\frac{1.17}{1000}\right)^{0.5} = 1.35$$

จากรูปที่ ก-1 ที่ค่า Abscissa เท่ากับ 1.35 และที่เส้น Flooding จะได้ค่า K_4 ประมาณ 0.017 จากนั้นหาค่า G' ได้จากสมการ

$$G' = \sqrt{\frac{(\varepsilon)(\rho_G)(\rho_L)(g)}{(F_p)(\theta)(\mu_L)^{0.2}}}$$

เมื่อ ε คือค่าความดันลดซึ่งอ่านได้จากรูปที่ ก-1

G' คือ อัตราการไหลของอากาศต่อพื้นที่ผิวหน้าตัดของสครับเบอร์เมื่อเกิดสภาพการท่วมของของเหลว $\left(kg/s.m^2\right)$

θ คือ อัตราส่วนของความถ่วงจำเพาะของเหลวต่อความถ่วงจำเพาะน้ำ

μ_L คือ ความหนืดของของเหลว (สำหรับน้ำจะเท่ากับ 0.8 cP)

F_p คือ Packing Factor สำหรับตัวกลางชนิดเฮ็ดจ์ฮ็อก (Hedgehog) มีค่า Packing Factor (F_p) = 170 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร

ρ_L คือ ความหนาแน่นของของเหลวที่ใช้ในการดูดซึม, kg/m^3

ρ_G คือ ความหนาแน่นของกระแสก๊าซ, kg/m^3

แทนค่าต่าง ๆในสมการ จะได้ดังนี้

$$G' = \sqrt{\frac{0.017\times1.17\times1000\times9.82}{170\times1.0\times(0.8)^{0.2}}}$$

$$G' = \sqrt{\frac{195.3}{162.5}}$$

$$= \quad 1.096 \ kg/m^2.s$$

ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศต่อพื้นที่หน้าตัดของสครับเบอร์เมื่อเกิดสภาพ Flooding เท่ากับ 1.096 $kg/m^2.s$

ถ้ากำหนดให้สครับเบอร์เดินระบบที่ 60% ของ flooding จะได้ว่า

$$G'_{operating} = fG'_{flooding}$$

$$= \quad (0.60)(1.096)$$

$$= \quad 0.6576 \ kg/m^2.s$$

ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของสครับเบอร์เท่ากับ $\dfrac{G}{G'_{operating}}$

$$A = \frac{0.725\,kg/\min \times \dfrac{\min}{60\sec}}{0.6576\,kg/m^2.\sec}$$

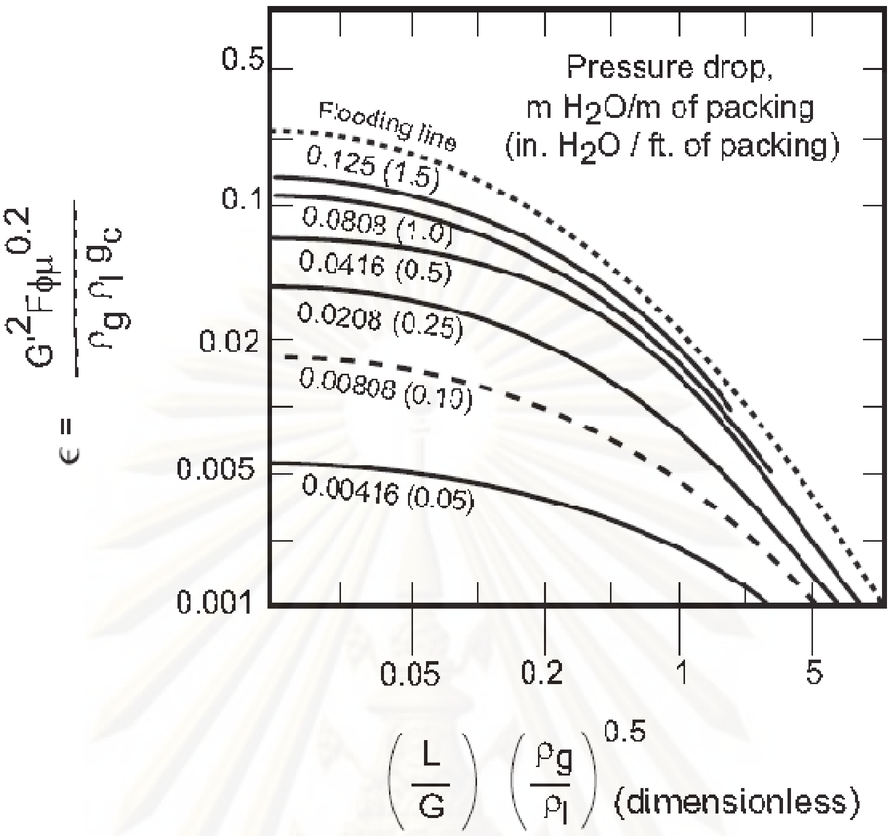
$$= 0.0184 \ m^2$$

เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของแพคเบดสครับเบอร์เป็นทรงกลม ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ

$$1.13A^{0.5} = \quad D$$

$$D \quad = \quad 0.153$$

เพราะฉะนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของแพคเบดสครับเบอร์เท่ากับ 15 เซนติเมตร



รูปที่ ก-1 ความสัมพันธ์ของความเร็วอากาศในสครับเบอร์ที่ทำให้ของเหลวไหลย้อนกลับกับความดันลด

4. การคำนวณหาความสูงของตัวกลางบรรจุในสครับเบอร์ (Height of Packing)

จากสมการ $Z = H_{OG} \times N_{OG}$

เมื่อ H_{OG} คือ ความสูงของ Transfer Units เมื่อพิจารณาในส่วนของก๊าซ, เมตร

N_{OG} คือ จำนวนของ Transfer Units เมื่อพิจารณาในส่วนของก๊าซ

Z คือ ความสูงของตัวกลาง, เมตร

โดยค่า N_{OG} หาได้จากสมการดังนี้

$$N_{OG} = \frac{\ln\left[\left(\frac{Y_1 - mX_2}{Y_2 - mX_2}\right)\left(1 - \frac{mG_m}{L_m}\right) + \frac{mG_m}{L_m}\right]}{1 - \frac{mG_m}{L_m}}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$N_{OG} = \frac{\ln\left[\left(\frac{0.004}{0.0002}\right)\left(1-\frac{0\times 0.025}{1.59}\right)+\frac{0\times 0.025}{1.59}\right]}{1-\frac{0\times 0.025}{1.59}}$$

$$N_{OG} = \ln 20$$
$$N_{OG} = 3$$

ค่า H_{OG} สำหรับคู่ของก๊าซที่ต้องการบำบัดกับสารดูดซึม (SO_2-NaOH) ของตัวกลางที่เป็นพลาสติกอยู่ในช่วง 0.21–0.61 เมตร (นพภาพร พานิช และคณะ, 2551) ดังนั้นความสูงของตัวกลาง

$$Z = H_{OG} \times N_{OG}$$
$$Z = 0.35 \times 3$$
$$= 1.05$$

ดังนั้นความสูงของตัวกลางประมาณ 1 เมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (สมัคร ขันเงิน, 2538)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

จากสมการ $$K_G a = \frac{N}{V\ \Delta P_{\log-mean}}$$

เมื่อ N = จำนวนโมลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกดูดซึมในแพคเบดสครับเบอร์

โดย N คำนวณได้จาก $$N = \frac{(y_{in} - y_{out}) \times Gas\ \ flow\ rate}{22.4 \times 10^6}$$

เมื่อ y_{in} คือ ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เข้าแพคเบดสครับเบอร์

y_{out} คือ ความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากแพคเบดสครับเบอร์

หน่วยของ $N = kg - mol / hr$

V = ปริมาตรของแพคเบดสครับเบอร์ที่บรรจุตัวกลาง (ลูกบาศก์เมตร)

$$V = \left(\frac{\pi}{4} \times 0.15^2 \right) \times height\ of\ \ packing\ media$$

$$V = \left(\frac{\pi}{4} \times 0.15^2 \right) \times 1.5 = 0.026\ \ m^3$$

$\Delta P_{\log-mean}$ คือ ความดันย่อยแบบ log-mean ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ทางเข้าและทางออกของแพคเบดสครับเบอร์ โดยความดันย่อย $P_i = y_i P$ ทำการทดลองที่ความดัน 1 บรรยากาศ ดังนั้น $P_i = y_i$

ดังนั้น $$P_{\log-mean} = \frac{\left(y_{in} - y_{out}\right) \times 10^{-6}}{\ln \frac{\left(y_{in}\right) \times 10^{-6}}{\left(y_{out}\right) \times 10^{-6}}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

เงื่อนไขที่ใช้

- ความเข้มข้นของ SO_2 ทางเข้าแพคเบดสครับเบอร์	=	4000	ส่วนในล้านส่วน
- ความเข้มข้นของ SO_2 ทางออกแพคเบดสครับเบอร์	=	200	ส่วนในล้านส่วน
- อัตราการไหลก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	=	36	m^3 / hr
- เส้นผ่านศูนย์กลางของแพคเบดสครับเบอร์	=	0.15	เมตร
- ความสูงของตัวกลางบรรจุ	=	1.5	เมตร
- ความดันภายในแพคเบดสครับเบอร์	=	1.0	atm

$$N = \frac{(4000 - 200) \times 36}{22.4 \times 10^6}$$

$= 6 \times 10^{-3}$

$$V = \left(\frac{\pi}{4} \times 0.15^2 \right) \times 1.0$$

$= 0.026\ m^3$

$$P_{\log-mean} = \frac{\left(4000 - 200\right) \times 10^{-6}}{\ln \frac{\left(4000\right) \times 10^{-6}}{\left(200\right) \times 10^{-6}}}$$

$= 1.27 \times 10^{-3}$ atm

ดังนั้น $K_G a = \frac{6 \times 10^{-3}}{(0.026 \times 1.27 \times 10^{-3})}$

$= 181\ kg - mol / hr.m^3.atm$

ภาคผนวก ค

เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (Material Safety Data Sheet)

1.1 การบ่งชี้เคมีภัณฑ์ (Chemical Identification)

ชื่อเคมี IUPAC : Sulfur Dioxide

ชื่อเคมีทั่วไป : Sulfur Dioxide, anhydrous, 99.9%

ชื่อพ้องอื่นๆ : Sulfur oxide; Sulfur oxide; Sulfurous anhydride

สูตรโมเลกุล : SO_2 สูตรโครงสร้าง O=S=O

รหัส IMO :

รหัส UN/ID NO. : 1079

1.2 การใช้ประโยชน์ (Uses)

ใช้เป็นสารทำให้สารลอยตัว, ในกระบวนการผลิตอาหาร, ใช้เป็นสารจับตะกั่ว และในการรีไซเคิล

1.3 ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษ (Standard and Toxicity)

LC_{50} : 6602 / 1 ชั่วโมง mg/m^3

IDLH(ppm) : 100 ppm

PEL-TWA : 5 ppm

TLV-TWA : 2 ppm

TLV-STEL : 5 ppm

1.4 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ : เป็นก๊าซภายใต้สภาวะที่มีความดัน

สี : ไม่มีสี

กลิ่น : ฉุนเฉพาะตัว

น้ำหนักโมเลกุล : 64

จุดเดือด : -10 $^{\circ}C$

จุดหลอมเหลว : -76 $^{\circ}C$

ความถ่วงจำเพาะ : 1.4

ความดันไอ : 2538 mm.Hg ที่ 21 $^{\circ}C$

ความหนาแน่นไอ : 2.3

ความสามารถในการละลายน้ำ : 23 g/ 100 ml ที่ 0 $^{\circ}C$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แฟคเตอร์แปลงหน่วย 1 ppm : 2.62 mg/ m^3

1.5 อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ	- การหายใจเข้าไป จะก่อให้เป็นพิษ เกิดอาการบวมน้ำ (Edema)ในทางเดินหายใจ ไอของสารจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการน้ำท่วมปอด ซึ่งอาการนี้สามารถเกิดได้ตั้งแต่สัมผัสกับสาร 1 – 2 ชั่วโมง และอาจทำให้ตายได้
สัมผัสทางผิวหนัง	- การสัมผัสถูกผิวหนัง การสัมผัสกับไอระเหยของสารที่มีความเข้มข้นสูง จะทำให้เกิดแผลไหม้
กินหรือกลืนเข้าไป	- การกินหรือกลืนเข้าไป จะทำให้เกิดแผลไหม้ในหลอดอาหารและกระเพาะอาหาร
สัมผัสถูกตา	- การสัมผัสถูกตา ทำให้เกิดการระคายเคือง เกิดแผลไหม้และอาจทำลายดวงตาได้
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติ,อื่น ๆ	- จะมีผลกระทบต่อระบบในร่างกาย ทำให้การหายใจถูกกดกระสับกระส่าย อึดอัด

1.6 ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

- สารที่เข้ากันไม่ได้

เบส แอมโมเนีย โลหะ โลหะออกไซด์ ฮาโลเจน สารประกอบ ฮาโลเจน ฮาโลเจนออกไซด์ ไฮไดรด์ ไนโตรเจนออกไซด์ เอไซด์ คาร์ไบด์ อะเซติไลด์ สารออกซิไดซ์ อัลคีน เอมีน เอทิลีนออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซิงด์ไดเอทิล

- เป็นอันตรายเมื่อทำปฏิกิริยากับโลหะต่าง ๆ
- สารนี้สามารถทำปฏิกิริยาได้กับ ฮาโลเจน ลิเธียมไนเตรท โพแทสเซียมคลอเรต เมททิลอะเซททิไลด์ และโซเดียมไฮไดร ภายใต้สภาพที่มีความชื้นเกิดเป็นโลหะที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและโลหะออกไซด์ได้

1.7 การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

- จุดวาบไฟ : ไม่เกิดการเผาไหม้

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มี ไอระเหยหนักกว่าอากาศ จึงใช้น้ำกำจัดไอระเหย เพื่อลดอุณหภูมิของถังบรรจุด้วยน้ำและป้องกันไม่ให้น้ำที่ใช้ดับเพลิงแล้ว ไหลลงสู่แหล่งน้ำบนดินหรือใต้ดิน ดังนั้นสารดับเพลิงควรใช้สารดับเพลิงที่เหมาะสมกับวัสดุที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง โดยให้

สวมใส่อุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดมีถังอากาศในตัว (SCBA) และชุดป้องกันสารเคมีให้ใช้น้ำฉีดเป็นฝอยเพื่อหล่อเย็นภาชนะบรรจุที่ถูกเพลิงไหม้

1.8 การเก็บรักษา/ สถานที่เก็บ/ เคลื่อนย้าย/ ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิดเมื่อไม่ได้ใช้งาน
- เก็บในที่ที่เย็นและอากาศถ่ายเทได้ดี
- เก็บห่างจากแสงอาทิตย์
- เก็บภายใต้ความดันและจัดให้มีวาล์วควบคุมความดัน
- เก็บห่างจากสารที่ไหม้ไฟได้และแหล่งเกิดประกายไฟ
- อย่าหายใจเอาไอระเหยของสารนี้เข้าไป
- หลีกเลี่ยงการสัมผัสกับผิวหนังและตา
- เข้าได้เฉพาะบุคคลที่ได้รับอนุญาต
- ชื่อทางการขนส่ง : Sulphur Dioxide
- ประเภทอันตราย : 2.3
- รหัส UN : 1079
- ประเภทการบรรจุหีบห่อ : กลุ่ม II

1.9 การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- วิธีการปฏิบัติเมื่อเกิดอุบัติเหตุกรณีรั่วไหล ให้เคลื่อนย้ายแหล่งของการจุดติดไฟทั้งหมดออกไป
- ให้สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันช่วยหายใจชนิดมีถังอากาศในตัว
- ใช้การฉีดน้ำเป็นฝอยเพื่อลดการเกิดไอระเหย
- ให้เคลื่อนย้ายภาชนะบรรจุสารออกไปอยู่ในบริเวณที่ปลอดภัย

1.10 การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป	ถ้าหายใจเข้าไป ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกไปที่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ ให้ความอบอุ่นแก่ร่างกายผู้ป่วยและจัดให้ผู้ป่วยอยู่ในท่าที่สบาย พร้อมถอดเสื้อผ้าที่เปรอะเปื้อนสารเคมีออก ล้างทำความสะอาดเสื้อผ้าด้วยน้ำอย่างน้อย 20 นาที นำส่งไปพบแพทย์
กินหรือกลืนเข้าไป	ถ้ากลืนกินหรือเข้าไป ให้ผู้ป่วยบ้วนล้างปากด้วยน้ำ ให้ผู้ป่วยดื่มน้ำ 200 – 300 มล. นำส่งไปพบแพทย์ทันที
สัมผัสถูกผิวหนัง	ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ทำการล้างหรืออาบน้ำ นำส่งไปพบแพทย์ทันที
สัมผัสถูกตา	ถ้าสัมผัสถูกตา ให้ฉีดล้างตาทันทีด้วยน้ำปริมาณมาก ๆ อย่างน้อย 20 นาที โดยการถ่างเปลือกตาให้น้ำไหล ผ่าน นำส่งไปพบแพทย์ทันที

ภาคผนวก ง
วิธีวิเคราะห์หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีวิเคราะห์หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

1. สารเคมีและอุปกรณ์

1.1 สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต ($HKC_8H_4O_4$)

นำโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลตชนิดรีเอเจนต์เกรดอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 120^{0}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำมาชั่งให้ได้น้ำหนักของสารที่แน่นอนประมาณ 0.408 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร

1.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เตรียมความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังตารางที่ ง-1

ตารางที่ ง การเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องการ (โมลต่อลิตร)	น้ำหนัก โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ชั่ง (กรัม)	ปริมาตรสารละลาย (ลิตร)
0.001	20	500
0.003	60	
0.005	100	

2. วิธีการทดลอง

การไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

นำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมได้ในข้อ 2 นำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิ ตามวิธีการดังนี้

1. บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในบิวเรตต์ และบันทึกระดับของสารละลายบนสเกลก่อนทำการไทเทรต

2. ปิเปตสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 ลบ.ซม. แล้วเติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนลงไป 2- 3 หยด เขย่าสารละลายให้ผสมกันจนที่ได้แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากบิวเรต จนได้สารละลายสีชมพูอ่อน บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต

3. คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตัวแปรต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-1 ผลการศึกษาเบื้องต้นของผลของอัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซและความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การทดลองที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนบำบัด (ส่วนในล้านส่วน) นาทีที่						ซัลเฟอร์ไดออกไซด์หลังบำบัด (ส่วนในล้านส่วน) นาทีที่						ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
					1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
1	4003	83.6	22.7	0	4000	4002	4010	3992	4010	4003	60	59	59	57	59	59	98.5
2	3974			0.01	3871	3933	3971	3973	4121	3974	20	19	21	18	19	19	99.5
3	3911			0.02	3911	3891	3901	3931	3921	3911	14	15	14	14	14	14	99.6
4	3995			0.03	3981	3971	3981	4021	4022	3995	13	12	13	12	12	12	99.7
5	4069		45.1	0	4011	4011	4102	4120	4102	4069	22	22	21	21	21	21	99.5
6	4013			0.01	4041	3989	3981	4021	4034	4013	8	7	7	7	7	7	99.8
7	3941			0.02	3891	3902	3934	3988	3992	3941	5	6	5	5	5	5	99.9
8	4025			0.03	3981	4021	4081	4011	4031	4025	4	4	3	4	3	4	99.9
9	4045		67.7	0	4021	4082	4021	4082	4021	4045	7	6	6	6	4	6	99.9
10	4053			0.01	3981	3951	4108	4123	4101	4053	6	5	5	5	4	5	99.9
11	4031			0.02	4091	4011	4021	4011	4022	4031	4	3	3	3	3	3	99.9
12	4020			0.03	4181	3983	3998	3960	3979	4020	1	0	1	1	1	1	100.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

136

ตารางที่ จ-2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตัวแปรต่างๆ

การทดลองที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	(kg_{mole}/m^2-hr)	ของเหลวต่อก๊าซ	(โมลต่อลิตร)	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนบำบัด (ส่วนในล้านส่วน)						ซัลเฟอร์ไดออกไซด์หลังบำบัด (ส่วนในล้านส่วน)						ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
					นาทีที่						นาทีที่						
					1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
1	975			0	985	983	975	961	972	975	111	109	109	109	109	109	88.8
2	1041		4.5	0.001	1031	1041	1061	1031	1042	1041	93	91	91	91	91	91	91.2
3	975			0.003	977	970	981	979	970	975	75	73	73	73	73	73	92.5
4	986			0.005	981	980	982	989	998	986	67	65	65	65	65	65	93.4
5	981			0	982	982	981	980	981	981	101	95	97	97	97	97	90.1
6	1049		9.0	0.001	1060	1050	1042	1040	1051	1049	89	87	87	87	87	87	91.7
7	982			0.003	982	981	980	981	984	982	77	76	76	76	76	76	92.2
8	1017	83.6		0.005	1021	1018	1009	1017	1021	1017	48	47	47	47	47	47	95.4
9	976			0	985	982	970	972	969	976	42	41	41	41	41	41	95.8
10	1172		13.5	0.001	1179	1167	1169	1174	1172	1172	34	33	33	33	33	33	97.2
11	997			0.003	980	995	998	987	1027	997	22	21	21	21	21	21	97.9
12	1091			0.005	1119	1089	1021	1128	1098	1091	16	14	14	14	14	14	98.7
13	1016			0	1026	1025	1017	1016	998	1016	21	22	21	22	21	21	97.9
14	1129		18.1	0.001	1130	1121	1140	1127	1129	1129	15	14	14	14	14	14	98.7
15	1121			0.003	1134	1130	1106	1103	1131	1121	10	10	9	9	9	9	99.2
16	1184			0.005	1217	1184	1172	1189	1160	1184	7	5	5	5	5	5	99.5

137

ตารางที่ จ ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตัวแปรต่างๆ (ต่อ)

การทดลองที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนบำบัด (ส่วนในล้านส่วน) นาทีที่ 1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์หลังบำบัด (ส่วนในล้านส่วน) นาทีที่ 1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
17	2017	83.6	4.5	0	2021	2015	2017	2014	2016	2017	630	627	629	626	628	628	68.9
18	2107			0.001	2109	2105	2112	2108	2103	2107	538	534	536	536	536	536	74.6
19	1957			0.003	1969	1960	1959	1949	1947	1957	501	497	497	497	495	497	74.6
20	1851			0.005	1860	1859	1849	1841	1845	1851	464	463	462	462	461	462	75.0
21	2021		9.0	0	2031	2025	2011	2023	2017	2021	323	321	321	321	321	321	84.1
22	2175			0.001	2181	2179	2174	2172	2171	2175	332	331	331	331	331	331	84.8
23	1921			0.003	1921	1921	1923	1921	1921	1921	293	291	291	291	291	291	84.8
24	2097			0.005	2094	2098	2097	2097	2097	2097	317	315	315	315	315	315	85.0
25	2105		13.5	0	2108	2098	2109	2104	2105	2105	173	171	171	171	171	171	91.9
26	2191			0.001	2204	2189	2191	2182	2191	2191	175	174	174	174	174	174	92.1
27	2021			0.003	2031	2029	2019	2014	2013	2021	157	156	156	156	156	156	92.3
28	1971			0.005	1961	1978	1973	1971	1972	1971	143	142	142	142	142	142	92.8
29	2175		18.1	0	2186	2151	2168	2179	2190	2175	101	97	98	98	98	98	95.5
30	2217			0.001	2249	2118	2227	2249	2240	2217	65	63	64	64	64	64	97.1
31	2097			0.003	2109	2116	2087	2086	2089	2097	51	49	49	49	49	49	97.6
32	2011			0.005	2021	2031	2010	1976	2019	2011	44	44	43	43	43	43	97.8

138

ตารางที่ จ ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตัวแปรต่างๆ (ต่อ)

การทดลองที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของ ของเหลวต่อก๊าซ	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนบำบัด (ส่วนในล้านส่วน) นาทีที่						ซัลเฟอร์ไดออกไซด์หลังบำบัด (ส่วนในล้านส่วน) นาทีที่						ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
					1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
33	3045	83.6	4.5	0	3051	3045	3039	3045	3046	3045	1197	1179	1189	1186	1195	1189	60.9
34	2957			0.001	2972	2957	2949	2949	2957	2957	1092	1091	1091	1091	1091	1091	63.1
35	3175			0.003	3217	3198	3132	3165	3161	3175	979	978	978	978	978	978	69.2
36	3011			0.005	2981	2989	2910	3013	3160	3011	927	928	926	926	925	926	69.2
37	3049		9.0	0	3068	3059	3041	3017	3059	3049	719	718	718	718	718	718	76.4
38	2987			0.001	3216	2980	2890	2877	2971	2987	623	621	621	621	621	621	79.2
39	3125			0.003	3134	3121	3172	3213	2987	3125	592	591	591	592	591	591	81.1
40	3027			0.005	3109	3083	2979	2985	2978	3027	526	525	525	526	525	525	82.6
41	3076		13.5	0	3108	3209	2957	3025	3081	3076	387	385	385	385	385	385	87.5
42	2968			0.001	3021	2961	2976	2925	2958	2968	273	271	271	271	271	271	90.9
43	3097			0.003	3155	3078	3055	3041	3157	3097	201	197	198	198	198	198	93.6
44	3102			0.005	3209	3228	3108	2976	2989	3102	167	171	167	169	169	169	94.6
45	3037		18.1	0	3058	3027	3065	2984	3049	3037	219	217	218	216	214	217	92.9
46	3138			0.001	3204	3109	3047	3144	3187	3138	149	148	148	148	148	148	95.3
47	3157			0.003	3209	3105	3122	3129	3221	3157	134	132	132	132	132	132	95.8
48	3045			0.005	3129	3182	3102	2932	2881	3045	93	92	92	92	92	92	97.0

139

ตารางที่ จ ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตัวแปรต่างๆ (ต่อ)

การทดลองที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนบำบัด (ส่วนในล้านส่วน) นาทีที่ 1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์หลังบำบัด (ส่วนในล้านส่วน) นาทีที่ 1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
49	3940			0	3921	3936	3986	3939	3919	3940	2126	2124	2124	2124	2124	2124	46.1
50	4120		4.5	0.001	4117	4117	4129	4124	4112	4120	1920	1917	1914	1913	1910	1915	53.5
51	4129			0.003	4140	4129	4130	4121	4123	4129	1771	1775	1773	1774	1775	1774	57.0
52	3917			0.005	3910	3918	3915	3919	3921	3917	1509	1507	1507	1507	1507	1507	61.5
53	3975			0	3979	3978	3975	3980	3965	3975	1246	1244	1244	1244	1244	1244	68.7
54	4179		9.0	0.001	4181	4179	4176	4178	4179	4179	987	985	986	985	984	985	76.4
55	4180			0.003	4191	4179	4164	4184	4180	4180	959	953	942	946	945	949	77.3
56	3947			0.005	3942	3947	3949	3947	3948	3947	883	881	882	882	882	882	77.7
57	4026	83.6		0	4042	4031	4019	4028	4011	4026	623	621	621	621	621	621	84.6
58	4196		13.5	0.001	4201	4193	4197	4195	4196	4196	635	634	634	634	634	634	84.9
59	4125			0.003	4131	4124	4125	4122	4121	4125	601	595	597	597	597	597	85.5
60	3981			0.005	3983	3947	3951	4012	4011	3981	574	573	573	573	573	573	85.6
61	4108			0	4124	4108	4110	4098	4102	4108	432	431	431	431	431	431	89.5
62	4121		18.1	0.001	4119	4124	4128	4124	4108	4121	355	354	354	354	354	354	91.4
63	4208			0.003	4212	4209	4208	4205	4204	4208	353	351	351	351	351	351	91.6
64	4070			0.005	4089	4080	4049	4061	4070	4070	322	320	320	320	320	320	92.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

140

ภาคผนวก ฉ
ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม
และความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล

การทดลองที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลก๊าซ (ลิตรต่อนาที)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ (โมล/โมล)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	น้ำหนักโดยโมลของก๊าซ kg_{mole}/hr	น้ำหนักโดยโมลของของเหลว kg_{mole}/hr	อัตราการไหลของก๊าซ kg_{mole}/m^2-hr	อัตราการไหลของของเหลว kg_{mole}/m^2-hr	สัมประสิทธิ์การถ่ายเมวลสสารรวม kg_{mole}/m^3-hr	ความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล H_{OG} (m)
1	975	600	4.5	0	1.48	6.7	83.6	377	135	0.6
2	1041			0.001		6.7	83.6	377	151	0.6
3	975			0.003		6.7	83.6	377	160	0.5
4	986			0.005		6.7	83.6	377	168	0.5
5	981		9.0	0		13.3	83.6	755	143	0.6
6	1049			0.001		13.3	83.6	755	154	0.5
7	982			0.003		13.3	83.6	755	158	0.5
8	1017			0.005		13.3	83.6	755	190	0.4
9	976		13.5	0		20.0	83.6	1132	196	0.4
10	1172			0.001		20.0	83.6	1132	221	0.4
11	997			0.003		20.0	83.6	1132	239	0.3
12	1091			0.005		20.0	83.6	1132	269	0.3
13	1016		18.1	0		26.7	83.6	1510	240	0.3
14	1129			0.001		26.7	83.6	1510	271	0.3
15	1121			0.003		26.7	83.6	1510	298	0.3
16	1184			0.005		26.7	83.6	1510	338	0.2

142

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล (ต่อ)

การทดลองที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลก๊าซ (ลิตรต่อนาที)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ (โมล/โมล)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	น้ำหนักโดยโมลของก๊าซ kg_{mole}/hr	น้ำหนักโดยโมลของของเหลว kg_{mole}/hr	อัตราการไหลของก๊าซ $kg_{mole}/m^2\text{-}hr$	อัตราการไหลของของเหลว $kg_{mole}/m^2\text{-}hr$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเมวลสสารรวม $kg_{mole}/m^3\text{-}hr$	ความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล H_{OG} (m)
17	2017	600	4.5	0	1.48	6.7	83.6	377	72	1.2
18	2107			0.001		6.7	83.6	377	85	1.0
19	1957			0.003		6.7	83.6	377	85	1.0
20	1851			0.005		6.7	83.6	377	86	1.0
21	2021		9.0	0		13.3	83.6	755	114	0.7
22	2175			0.001		13.3	83.6	755	116	0.7
23	1921			0.003		13.3	83.6	755	117	0.7
24	2097			0.005		13.3	83.6	755	117	0.7
25	2105		13.5	0		20.0	83.6	1132	155	0.5
26	2191			0.001		20.0	83.6	1132	157	0.5
27	2021			0.003		20.0	83.6	1132	158	0.5
28	1971			0.005		20.0	83.6	1132	163	0.5
29	2175		18.1	0		26.7	83.6	1510	192	0.4
30	2217			0.001		26.7	83.6	1510	219	0.4
31	2097			0.003		26.7	83.6	1510	232	0.4
32	2011			0.005		26.7	83.6	1510	238	0.4

143

ตารางที่ ฉ ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล (ต่อ)

การทดลองที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลก๊าซ (ลิตรต่อนาที)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ (โมล/โมล)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	น้ำหนักโดยโมลของก๊าซ kg_{mole}/hr	น้ำหนักโดยโมลของของเหลว kg_{mole}/hr	อัตราการไหลของก๊าซ $kg_{mole}/m^2\text{-}hr$	อัตราการไหลของของเหลว $kg_{mole}/m^2\text{-}hr$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเมวลสสารรวม $kg_{mole}/m^3\text{-}hr$	ความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล H_{OG} (m)
33	3045	600	4.5	0	1.48	6.7	83.6	377	58	1.4
34	2957			0.001		6.7	83.6	377	62	1.3
35	3175			0.003		6.7	83.6	377	73	1.1
36	3011			0.005		6.7	83.6	377	73	1.1
37	3049		9.0	0		13.3	83.6	755	89	0.9
38	2987			0.001		13.3	83.6	755	97	0.9
39	3125			0.003		13.3	83.6	755	103	0.8
40	3027			0.005		13.3	83.6	755	108	0.8
41	3076		13.5	0		20.0	83.6	1132	128	0.7
42	2968			0.001		20.0	83.6	1132	148	0.6
43	3097			0.003		20.0	83.6	1132	170	0.5
44	3102			0.005		20.0	83.6	1132	180	0.5
45	3037		18.1	0		26.7	83.6	1510	163	0.5
46	3138			0.001		26.7	83.6	1510	189	0.4
47	3157			0.003		26.7	83.6	1510	196	0.4
48	3045			0.005		26.7	83.6	1510	216	0.4

144

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล (ต่อ)

การทดลองที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลก๊าซ (ลิตรต่อนาที)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ (โมล/โมล)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	น้ำหนักโดยโมลของก๊าซ kg_{mole}/hr	น้ำหนักโดยโมลของของเหลว kg_{mole}/hr	อัตราการไหลของก๊าซ $kg_{mole}/m^2\text{-}hr$	อัตราการไหลของของเหลว $kg_{mole}/m^2\text{-}hr$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเมวลสสารรวม $kg_{mole}/m^3\text{-}hr$	ความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล H_{OG} (m)
49	3940	600	4.5	0	1.48	6.7	83.6	377	38	2.2
50	4120			0.001		6.7	83.6	377	47	1.8
51	4129			0.003		6.7	83.6	377	52	1.6
52	3917			0.005		6.7	83.6	377	59	1.4
53	3975		9.0	0		13.3	83.6	755	72	1.2
54	4179			0.001		13.3	83.6	755	89	0.9
55	4180			0.003		13.3	83.6	755	92	0.9
56	3947			0.005		13.3	83.6	755	93	0.9
57	4026		13.5	0		20.0	83.6	1132	116	0.7
58	4196			0.001		20.0	83.6	1132	117	0.7
59	4125			0.003		20.0	83.6	1132	119	0.7
60	3981			0.005		20.0	83.6	1132	120	0.7
61	4108		18.1	0		26.7	83.6	1510	139	0.6
62	4121			0.001		26.7	83.6	1510	152	0.6
63	4208			0.003		26.7	83.6	1510	153	0.5
64	4070			0.005		26.7	83.6	1510	157	0.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

145

ตารางที่ ฉ ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมและความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล (ต่อ)

การทดลองที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลก๊าซ (ลิตรต่อนาที)	อัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ลิตรต่อนาที)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	น้ำหนักโดยโมลของก๊าซ kg_{mole}/hr	น้ำหนักโดยโมลของของเหลว kg_{mole}/hr	อัตราการไหลของก๊าซ $kg_{mole}/m^2\text{-}hr$	อัตราการไหลของของเหลว $kg_{mole}/m^2\text{-}hr$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเมวลสสารรวม $kgmole/m^2\text{-}hr$	ความสูงของหน่วยการถ่ายเทมวล H_{OG} (m)
65	3857	200	2	0.005	0.49	6.7	27.8	377	27	1.0
66	3951		4			13.3		755	31	0.9
67	3871		6			20.0		1132	34	0.8
68	3860		8			26.7		1510	36	0.8
69	3921	400	2		0.98	6.7	55.7	377	48	1.2
70	3876		4			13.3		755	58	1.0
71	3925		6			20.0		1132	68	0.8
72	3981		8			26.7		1510	71	0.8
73	3897	600	2		1.48	6.7	83.6	377	53	1.6
74	4075		4			13.3		755	83	1.0
75	3951		6			20.0		1132	106	0.8
76	4024		8			26.7		1510	140	0.6

146

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

ผลการศึกษาค่าพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช ผลการศึกษาพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)	อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)		ค่าความเป็นกรด-ด่าง	
					Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
1	1,000	83.6	4.5	0	975	109	7	2
2				0.001	1041	91	9	3
3				0.003	975	73	10	3
4				0.005	986	65	10	3
5			9.0	0	981	97	7	2
6				0.001	1049	87	9	2
7				0.003	982	76	10	3
8				0.005	1017	47	10	4
9			13.5	0	976	41	7	2
10				0.001	1172	33	9	3
11				0.003	997	21	10	4
12				0.005	1091	14	10	4
13			18.1	0	1016	21	7	2
14				0.001	1129	14	9	3
15				0.003	1121	9	10	3
16				0.005	1184	5	10	4

148

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช ผลการศึกษาพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ต่อ)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)	อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)		ค่าความเป็นกรด-ด่าง	
					Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
17	2,000	83.6	4.5	0	2017	628	7	2
18				0.001	2107	536	9	3
19				0.003	1957	497	10	3
20				0.005	1851	462	10	3
21			9.0	0	2021	321	7	2
22				0.001	2175	331	9	3
23				0.003	1921	291	10	3
24				0.005	2097	315	10	3
25			13.5	0	2105	171	7	2
26				0.001	2191	174	9	2
27				0.003	2021	156	10	3
28				0.005	1971	142	10	3
29			18.1	0	2175	98	7	2
30				0.001	2217	64	9	3
31				0.003	2097	49	10	3
32				0.005	2011	43	10	4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช ผลการศึกษาพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ต่อ)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)	อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)		ค่าความเป็นกรด-ด่าง	
					Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
33	3,000	83.6	4.5	0	3045	1189	7	2
34				0.001	2957	1091	9	3
35				0.003	3175	978	10	3
36				0.005	3011	928	10	3
37			9.0	0	3049	718	7	2
38				0.001	2987	621	9	3
39				0.003	3125	591	10	3
40				0.005	3027	525	10	4
41			13.5	0	3076	385	7	2
42				0.001	2986	271	9	3
43				0.003	3097	198	10	3
44				0.005	3102	169	10	4
45			18.1	0	3037	217	7	2
46				0.001	3138	148	9	2
47				0.003	3157	132	10	3
48				0.005	3045	92	10	4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

150

ตารางที่ ช ผลการศึกษาพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ต่อ)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)	อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)		ค่าความเป็นกรด-ด่าง	
					Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
49	4,000	83.6	4.5	0	3940	2124	7	2
50				0.001	4120	1915	9	3
51				0.003	4129	1774	10	3
52				0.005	3917	1507	10	3
53			9.0	0	3975	1244	7	2
54				0.001	4179	985	9	3
55				0.003	4180	945	10	3
56				0.005	3947	949	10	4
57			13.5	0	4026	882	7	2
58				0.001	4198	621	9	3
59				0.003	4125	634	10	3
60				0.005	3981	597	10	4
61			18.1	0	4108	573	7	2
62				0.001	4121	431	9	3
63				0.003	4208	354	10	4
64				0.005	4070	351	10	4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

151

ตารางที่ ซ ผลการศึกษาพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ต่อ)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)	อัตราการไหลโดยโมลของก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	อัตราการไหลของสารละลาย (LPM)	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)		ค่าพีเอช	
					Inlet	Outlet	ก่อน	หลัง
65	4,000	27.9	0.005	2	3857	911	10	3
66				4	3951	753	10	3
67				6	3871	611	10	3
68				8	3860	546	10	3
59		55.8	0.005	2	3921	1086	10	2
70				4	3876	811	10	3
71				6	3925	631	10	4
72				8	3981	587	10	3
73		83.6	0.005	2	3897	1514	10	3
74				4	4075	912	10	4
75				6	3951	591	10	4
76				8	4024	324	10	3

152

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ซ
ผลการศึกษาความดันลดภายในระบบแพคเบดสครับเบอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ ผลการศึกษาความดันลดภายในระบบแพคเบดสครับเบอร์

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)	อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	ความดันลด (นิ้วน้ำ)
1	1,000	83.6	4.5	0	0.1
2				0.001	0
3				0.003	0.1
4				0.005	0
5			9.0	0	0.2
6				0.001	0.3
7				0.003	0.2
8				0.005	0.2
9			13.5	0	0.3
10				0.001	0.2
11				0.003	0.2
12				0.005	0.2
13			18.1	0	0.2
14				0.001	0.2
15				0.003	0.2
16				0.005	0.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

154

ตารางที่ ซ ผลการศึกษาความดันลดภายในระบบแพคเบดสครับเบอร์ (ต่อ)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)	อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	ความดันลด (นิ้วน้ำ)
17	2,000	83.6	4.5	0	0.1
18				0.001	0.1
19				0.003	0.1
20				0.005	0.1
21			9.0	0	0.1
22				0.001	0.1
23				0.003	0.1
24				0.005	0.1
25			13.5	0	0.2
26				0.001	0.2
27				0.003	0.2
28				0.005	0.2
29			18.1	0	0.2
30				0.001	0.2
31				0.003	0.2
32				0.005	0.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

155

ตารางที่ ซ ผลการศึกษาความดันลดภายในระบบแพคเบดสครับเบอร์ (ต่อ)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)	อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	ความดันลด (นิ้วน้ำ)
33	3,000	83.6	4.5	0	0.1
34				0.001	0.1
35				0.003	0.1
36				0.005	0.1
37			9.0	0	0.2
38				0.001	0.2
39				0.003	0.2
40				0.005	0.2
41			13.5	0	0.3
42				0.001	0.3
43				0.003	0.2
44				0.005	0.2
45			18.1	0	0.3
46				0.001	0.3
47				0.003	0.3
48				0.005	0.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

156

ตารางที่ ซ ผลการศึกษาความดันลดภายในระบบแพคเบดสครับเบอร์ (ต่อ)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)	อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	ความดันลด (นิ้วน้ำ)
49	4,000	83.6	4.5	0	0.1
50				0.001	0.1
51				0.003	0.1
52				0.005	0.1
53			9.0	0	0.2
54				0.001	0.2
55				0.003	0.2
56				0.005	0.2
57			13.5	0	0.3
58				0.001	0.3
59				0.003	0.2
60				0.005	0.2
61			18.1	0	0.3
62				0.001	0.3
63				0.003	0.3
64				0.005	0.3

157

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ ผลการศึกษาความดันลดภายในระบบแพคเบดสครับเบอร์ (ต่อ)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ppm)	อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	อัตราการไหลสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (kg_{mole}/m^2-hr)	ความดันลด (นิ้วน้ำ)
65	4,000	27.9	18.1	377	0
66				755	0
67				1,132	0
68				1,509	0.1
59		55.8	18.1	377	0
70				755	0.1
71				1,132	0.1
72				1,509	0.2
73		83.6	18.1	377	0.1
74				755	0.2
75				1,132	0.3
76				1,509	0.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

158

ภาคผนวก ฌ

ผลการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ณ ผลการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การทดลองที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของ ของเหลวต่อก๊าซ	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	KHP		ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)			[NaOH] (Molar)
					นน.ที่ชั่ง	[KHP]	เริ่มต้น	ยุติ	ใช้	
1	975	83.6	4.5	0						
2	1041			0.001	0.408	0.001	0	27.4	27.4	0.00091
3	975			0.003	0.408	0.001	27.5	36.1	8.6	0.00291
4	986			0.005	0.408	0.001	36.1	41.2	5.1	0.00490
5	981		9.0	0					0	
6	1049			0.001	0.408	0.001	0	27.4	27.4	0.00091
7	982			0.003	0.408	0.001	27.5	36.1	8.6	0.00291
8	1017			0.005	0.408	0.001	36.1	41.2	5.1	0.00490
9	976		13.5	0					0	
10	1172			0.001	0.408	0.001	0	27.4	27.4	0.00091
11	997			0.003	0.408	0.001	27.5	36.1	8.6	0.00291
12	1091			0.005	0.408	0.001	36.1	41.2	5.1	0.00490
13	1016		18.1	0					0	
14	1129			0.001	0.408	0.001	0	27.4	27.4	0.00091
15	1121			0.003	0.408	0.001	27.5	36.1	8.6	0.00291
16	1184			0.005	0.408	0.001	36.1	41.2	5.1	0.00490

160

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฌ ผลการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ต่อ)

การทดลองที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	KHP		ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)			[NaOH] (Molar)
					นน.ที่ชั่ง	[KHP]	เริ่มต้น	ยุติ	ใช้	
17	2017	83.6	4.5	0						
18	2107			0.001	0.408	0.001	0	26.9	26.9	0.00093
19	1957			0.003	0.408	0.001	26.9	34.9	8	0.00313
20	1851			0.005	0.408	0.001	34.9	39.8	4.9	0.00510
21	2021		9.0	0					0	
22	2175			0.001	0.408	0.001	0	26.9	26.9	0.00093
23	1921			0.003	0.408	0.001	26.9	34.9	8	0.00313
24	2097			0.005	0.408	0.001	34.9	39.8	4.9	0.00510
25	2105		13.5	0					0	
26	2191			0.001	0.408	0.001	0	26.9	26.9	0.00093
27	2021			0.003	0.408	0.001	26.9	34.9	8	0.00313
28	1971			0.005	0.408	0.001	34.9	39.8	4.9	0.00510
29	2175		18.1	0					0	
30	2217			0.001	0.408	0.001	0	26.9	26.9	0.00093
31	2097			0.003	0.408	0.001	26.9	34.9	8	0.00313
32	2011			0.005	0.408	0.001	34.9	39.8	4.9	0.00510

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

161

ตารางที่ ฌ ผลการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ต่อ)

การทดลองที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	KHP		ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)			[NaOH] (Molar)
					นน.ที่ชั่ง	[KHP]	เริ่มต้น	ยุติ	ใช้	
33	3045	83.6	4.5	0						
34	2957			0.001	0.408	0.001	0	27	27	0.00093
35	3175			0.003	0.408	0.001	10	17.7	7.7	0.00325
36	3011			0.005	0.408	0.001	20	24.8	4.8	0.00521
37	3049		9.0	0						
38	2987			0.001	0.408	0.001	0	27	27	0.00093
39	3125			0.003	0.408	0.001	10	17.7	7.7	0.00325
40	3027			0.005	0.408	0.001	20	24.8	4.8	0.00521
41	3076		13.5	0						
42	2968			0.001	0.408	0.001	0	27	27	0.00093
43	3097			0.003	0.408	0.001	10	17.7	7.7	0.00325
44	3102			0.005	0.408	0.001	20	24.8	4.8	0.00521
45	3037		18.1	0						
46	3138			0.001	0.408	0.001	0	27	27	0.00093
47	3157			0.003	0.408	0.001	10	17.7	7.7	0.00325
48	3045			0.005	0.408	0.001	20	24.8	4.8	0.00521

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

162

ตารางที่ ฌ ผลการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ต่อ)

การทดลองที่	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	อัตราการไหลโดยโมลก๊าซ (kg_{mole}/m^2-hr)	อัตราส่วนโดยโมลของของเหลวต่อก๊าซ	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	KHP		ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)			[NaOH] (Molar)
					นน.ที่ชั่ง	[KHP]	เริ่มต้น	ยุติ	ใช้	
49	3940	83.6	4.5	0						
50	4120			0.001	0.408	0.001	0	26	26	0.00096
51	4129			0.003	0.408	0.001	0	8.5	8.5	0.00294
52	3917			0.005	0.408	0.001	15	20.2	5.2	0.00481
53	3975		9.0	0						
54	4179			0.001	0.408	0.001	0	26	26	0.00096
55	4180			0.003	0.408	0.001	0	8.5	8.5	0.00294
56	3947			0.005	0.408	0.001	15	20.2	5.2	0.00481
57	4026		13.5	0						
58	4196			0.001	0.408	0.001	0	26	26	0.00096
59	4125			0.003	0.408	0.001	0	8.5	8.5	0.00294
60	3981			0.005	0.408	0.001	15	20.2	5.2	0.00481
61	4108		18.1	0						
62	4121			0.001	0.408	0.001	0	26	26	0.00096
63	4208			0.003	0.408	0.001	0	8.5	8.5	0.00294
64	4070			0.005	0.408	0.001	15	20.2	5.2	0.00481

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

163

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอานนท์ สิทธิเวช เกิดเมื่อวันที่ 17 ธันวาคม พ.ศ.2527 ที่จังหวัดกระบี่ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย