



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายเหล็กคีเลต
และการถ่ายโอนมวลในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิต

Kinetics of H_2S Removal Using Iron Chelate Solution and Mass Transfer in
an Auto-Circulating Reactor

นามผู้วิจัย นายเกียรติประชา ศรีคำเป้า

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์สุนันท์ ลิ้มตระกูล, D.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์เทอดไทย วัฒนธรรม, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อภิญา ควงจันทร์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มตาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายเหล็กคีเลท
และการถ่ายโอนมวลในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ

Kinetics of H_2S Removal Using Iron Chelate Solution
and Mass Transfer in an Auto-Circulating Reactor

โดย

นายเกียรติประชา ศรีคำเป้า

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เกียรติประพา ศรีคำเป้า 2554: จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
ด้วยสารละลายเหล็กคีเลทและการถ่ายโอนมวลในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชา
วิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สุนันท์ ลิ้มตระกูล,
D.Sc. 114 หน้า

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายเหล็กคีเลทประกอบด้วยสองขั้นตอน คือ
ปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคีเลท ปฏิกรณ์
แบบหมุนเวียนอัตโนมัติจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในกรณีนี้เนื่องจากสามารถผนวกปฏิกิริยาทั้ง
สองขั้นตอนในปฏิกรณ์ตัวเดียวกัน โดยข้อมูลทางจลนศาสตร์และการถ่ายโอนมวลเป็นสิ่งสำคัญใน
การออกแบบและทำนายสมรรถนะของปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพ
สูงสุดของปฏิกรณ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซ
ไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคีเลท รวมไปถึงการถ่ายโอนมวลใน
ปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ โดยที่ข้อมูลอัตราจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาได้จากการทดลองใน
ปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อไม่พิจารณาและพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวลพร้อมทั้ง
ศึกษาในปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ พบว่าอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัด
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคีเลทคือ $-r_1 = 15.76C_{H_2S}C_{Fe^{3+}}$
และ $-r_2 = 0.16C_{O_2}C_{Fe^{2+}}^2$ ตามลำดับ สุดท้ายทำการศึกษาข้อมูลการถ่ายโอนมวลในปฏิกรณ์แบบ
หมุนเวียนอัตโนมัติ พบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวในไรเซอร์มีค่าเท่ากับ 93.4
ซึ่งสูงกว่าพื้นที่ในดาวน์คัมเมอร์ที่มีค่าเท่ากับ 20.6 เมตร²/เมตร³ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอน
มวลมีค่าเท่ากับ 2.64×10^{-5} และ 1.13×10^{-5} เมตร/วินาที ในส่วนของไรเซอร์และดาวน์คัมเมอร์
ตามลำดับ

Kiatpracha Srikumbao 2011: Kinetics of H₂S Removal Using Iron Chelate Solution and Mass Transfer in an Auto-Circulating Reactor. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Sunun Limtrakul, D.Sc. 114 pages.

The H₂S removal process via iron chelate solution consists of two steps, the removal reaction step and the regeneration reaction step. An auto-circulating reactor is appropriate for H₂S removal due to the advantage in combining two steps of reactions in a single reactor. Kinetics and mass transfer information of this system is important for reactor design and prediction of the performance of an auto-circulating reactor. Experimental studies of kinetics for H₂S removal and chelate regeneration reactions and mass transfer parameters in an auto-circulating reactor were carried out. The intrinsic kinetics rates of both reactions were obtained in a semi-batch stirred reactor with and without mass transfer considerations. In addition, the rate was also studied in an auto-circulating reactor. The results show that the intrinsic kinetics rates are $-r_1 = 15.76 C_{H_2S} C_{Fe^{3+}}$ and $-r_2 = 0.16 C_{O_2} C_{Fe^{2+}}^2$ for removal and regeneration reactions, respectively. Finally, the studies of mass transfer parameters in an auto-circulating reactor suggest that the interfacial area of 93.4 m²/m³ in the riser is higher than the area of 20.6 m²/m³ in the downcomer. The mass transfer coefficients in the riser and the downcomer are 2.64×10^{-5} and 1.13×10^{-5} , respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยวิศวกรรมเคมีเรื่องจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายเหล็กคลอไรด์และการถ่ายโอนมวลในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ การดำเนินงานของงานวิจัยนี้สามารถดำเนินไปด้วยดี ทางผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านต่างๆ เกี่ยวกับการดำเนินโครงการ ดังนี้

รศ.ดร.สุนันท์ ลิ้มตระกูล อาจารย์ผู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัย ทฤษฎี และทางด้านปฏิบัติ

รศ.ดร.เทอดไทย วัฒนธรรม และ Prof. Dr. P.A. Ramachandran อาจารย์ผู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัย ทฤษฎี และทางด้านปฏิบัติ

ประธานการสอบ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก และคณะกรรมการคุมสอบที่ได้สละเวลาอันมีค่ามานั่งฟังการรายงาน พร้อมด้วยคำติชมต่างๆ ล้วนแต่มีประโยชน์ทั้งสิ้น

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และศูนย์ความเป็นเลิศด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หน่วยงานที่สนับสนุนทุนวิจัย

นางสาวปทุมทอง รัตนมาลัย และนายปริญญา คงพรหม นิสิตปริญญาเอก ที่ให้คำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัย

ครอบครัวศรีคำเบา ที่คอยให้กำลังใจ คอยดูแล เลี้ยงดูและอยู่เคียงข้างตลอด เมื่อข้าพเจ้าประสบกับปัญหาและอุปสรรคต่างๆ

ทางผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้ด้วย

เกียรติประชา ศรีคำเบา

พฤษภาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(10)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	48
สรุป	78
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	79
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง	83
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณและข้อมูลอุปกรณ์	104
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	114

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ช่วงของการเกิดปฏิกิริยาและสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สอดคล้อง	21
2	ค่าคงที่จลนศาสตร์ธรรมชาติปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เคยมีผู้นำเสนอ	24
3	ค่าคงที่จลนศาสตร์ธรรมชาติปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทที่เคยมีผู้นำเสนอ	24
4	กรณีศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	32
5	สถานะในการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	33
6	สถานะการทดลองของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท ในถังปฏิกรณ์แบบกวนกึ่งเฉพาะงวด โดยความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนแตกต่างกัน	34
7	สถานะการทดลองกรณีศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติ	36
8	คุณสมบัติทางกายภาพของสาร	37
9	สถานะการทดลองกรณีศึกษาตัวแปรของการถ่ายโอนมวล	47
10	ค่าคงที่ของอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของทุกกรณีศึกษา	71
	ค่าตัวแปรการถ่ายโอนมวลจากการคำนวณ	77

ตารางผนวกที่

1	ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าและขาออก ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กคีเลท ความเป็นกรดต่างในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อเนื่อง 16 ชั่วโมง ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ	84
2	ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าและขาออก ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ โดยใช้สารปรับความเป็นกรดต่างต่างชนิด	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
3 ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กคลอไรด์ ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ โดยใช้สารปรับความเป็นกรดต่างชนิด	87
4 ความเป็นกรดต่าง ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ โดยใช้สารปรับความเป็นกรดต่างชนิด	88
5 ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าและขาออก ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซัลเฟต ปรับความเป็นกรดต่าง โดยใช้ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นแตกต่างกัน	89
6 ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กคลอไรด์ ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซัลเฟต ปรับความเป็นกรดต่าง โดยใช้ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นแตกต่างกัน	90
7 ความเป็นกรดต่าง ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซัลเฟตปรับความเป็นกรดต่าง โดยใช้ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นแตกต่างกัน	91
8 ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าและขาออก ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะวงด โดยใช้ความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนแตกต่างกัน	92
9 ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กคลอไรด์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะวงด โดยใช้ความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนแตกต่างกัน	93
10 ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กคลอไรด์ของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คลอไรด์ ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะวงด โดยใช้ความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนแตกต่างกัน	94
11 ความเข้มข้นสารละลายเหล็กคลอไรด์และความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะวงด	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
12 ความเข้มข้นสารละลายเหล็กคีเลทและความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท ในปฏิกิริยาดังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวด	96
13 ความเข้มข้นสารละลายเหล็กคีเลทและความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ โดยความเข้มข้นสารละลายเหล็กเริ่มต้น 19.76 โมล/ม ³	97
14 ความเข้มข้นสารละลายเหล็กคีเลทและความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ โดยความเข้มข้นสารละลายเหล็กเริ่มต้น 18.60 โมล/ม ³	98
15 ความเข้มข้นสารละลายเหล็กคีเลทและความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ โดยความเข้มข้นสารละลายเหล็กเริ่มต้น 9.95 โมล/ม ³	99
16 ความเข้มข้นสารละลายเหล็กคีเลทและความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ โดยความเข้มข้นสารละลายเหล็กเริ่มต้น 8.52 โมล/ม ³	100
17 แสดงการควบคุมของเฟสก๊าซและเฟสของเหลวของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในปฏิกิริยาดังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวด	106

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างอะตอมของไฮโดรเจนซัลไฟด์	7
2 การประยุกต์ปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติเพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	12
3 ทฤษฎีสองฟิล์มสำหรับการถ่ายโอนมวลระหว่างก๊าซกับของเหลว	13
4 ทฤษฎีสองฟิล์มสำหรับการถ่ายโอนมวลระหว่างก๊าซกับของเหลว โดยมีปฏิกิริยาในเฟสของของเหลว	14
5 การเกิดปฏิกิริยาอย่างทันทีทันใด และความเข้มข้นของสาร B มีค่าต่ำ	16
6 การเกิดปฏิกิริยาอย่างทันทีทันใด และความเข้มข้นของสาร B มีค่าสูง	16
7 การเกิดปฏิกิริยาเกิดเร็วในฟิล์มของของเหลวและความเข้มข้นของสาร B ต่ำ	17
8 ปฏิกิริยาเกิดเร็วในฟิล์มของของเหลว	18
9 ปฏิกิริยาเกิดแบบปานกลางในฟิล์มของเหลว และในส่วนหนึ่งของของเหลว ที่ความเข้มข้นสาร B มีค่าต่ำ	18
10 ปฏิกิริยาเกิดแบบปานกลางในฟิล์มของเหลวและในส่วนหนึ่งของของเหลวที่ความเข้มข้นสาร B มีค่าสูง	19
11 ปฏิกิริยาเกิดช้าในของเหลว	19
12 ปฏิกิริยาเกิดช้าในของเหลวและไม่มีความต้านทานของการถ่ายโอนมวล	20
13 กราฟแสดงแสดงค่าเอนฮานเมนต์เฟคเตอร์สำหรับปฏิกิริยาของของไหลซึ่งสัมพันธ์กับค่าอัตราโมดูลัสและค่าเอนฮานเมนต์เฟคเตอร์อนันต์	22
14 ระบบปฏิกรณ์กวนแบบกึ่งเฉพาะงวด	26
15 ระบบปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติสำหรับกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	28
16 หัวกระจายก๊าซ (sparger) ที่ใช้ในปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ	28
17 ถังปฏิกรณ์หมุนเวียนอัตโนมัติที่ใช้ในการทดลอง	49
18 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อเนื่อง 16 ชั่วโมงด้วยสารละลายเหล็กคลอไรด์โดยใช้ Tris-(hydroxymethyl) aminomethane เป็นสารปรับความเป็นกรดต่างในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
19	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเหล็ก (3+) คีเลทในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อเนื่อง 16 ชั่วโมง ด้วยสารละลายเหล็กคีเลท โดยใช้ Tris (hydroxymethyl) aminomethane เป็นสารปรับความเป็นกรดต่างในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ
20	การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่างของสารละลายในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อเนื่อง 16 ชั่วโมง ด้วยสารละลายเหล็กคีเลทโดยใช้ Tris (hydroxymethyl) aminomethane เป็นสารปรับความเป็นกรดต่างในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ
21	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายเหล็กคีเลทสำหรับสารปรับความเป็นกรดต่างต่างชนิด ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ
22	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) คีเลทสำหรับสารปรับความเป็นกรดต่างต่างชนิด ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ ซึ่งความเป็นกรดต่างเริ่มต้นเท่ากับ 7.8
23	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่างของสารละลายเหล็กคีเลทโดยสารปรับความเป็นกรดต่างต่างชนิด ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ
24	การเปรียบเทียบราคาของสารปรับความเป็นกรดต่างต่อปริมาณการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
25	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายเหล็กคีเลทสำหรับสารปรับความเป็นกรดต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซัลเฟตที่ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ
26	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) คีเลทสำหรับสารปรับความเป็นกรดต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซัลเฟตที่ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
27	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่างของสารละลายเหล็กคีเลท สำหรับสารปรับความเป็นกรดต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซัลเฟต ที่ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ	57
28	การเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคีเลท สำหรับความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนต่างกัน ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวด	58
29	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) และ (2+) คีเลทในปฏิกรณ์ ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดสำหรับปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	60
30	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)$ และ $C_{H_2S} C_{Fe^{3+}}$ สำหรับการหาค่าคงที่ อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ใน ปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อไม่พิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล	61
31	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right) (a_1 C_{H_2S}^*)^{-1} D_{H_2S}^{-0.5}$ และ $C_{Fe^{3+}}^{0.5}$ สำหรับ การหาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถัง ปฏิกรณ์กวนแบบกึ่งเฉพาะงวด เมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล	62
32	การเปรียบเทียบระหว่างค่าเอนฮานเมนต์ฟเลคเตอร์กับค่าอัตราโมดูลัสสำหรับ ปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	63
33	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right) (a_1 C_{H_2S}^*)^{-1} D_{H_2S}^{-0.5}$ และ $C_{Fe^{3+}}^{0.5}$ สำหรับ การหาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถัง ปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล	64
34	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) และ (2+) คีเลทในปฏิกรณ์ ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดสำหรับปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
35 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)$ และ $C_{O_2} C_{Fe^{2+}}^2$ สำหรับการหาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทในปฏิกิริยารีดอกซ์แบบกึ่งเฉพาะจงเมื่อไม่พิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล	66
36 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right) (a_2 C_{O_2}^*)^{-1} D_{O_2}^{-0.5}$ และ $C_{Fe^{2+}}$ สำหรับการหาค่าคงที่จลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทในปฏิกิริยารีดอกซ์แบบกึ่งเฉพาะจง เมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล	67
37 การเปรียบเทียบระหว่างค่าเอนฮานเมนต์ฟลักเตอร์กับค่าฮัททาโมดูลัสสำหรับปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท	68
38 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right) (a_2 C_{O_2}^*)^{-1} D_{O_2}^{-0.5}$ และ $C_{Fe^{2+}}$ สำหรับการหาค่าคงที่จลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทในปฏิกิริยารีดอกซ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล	69
39 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)$ กับ $\sqrt{k_1 D_{H_2S} C_{Fe^{3+}}^* C_{H_2S}}$ เพื่อหาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวในไรเซอร์ของถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ	72
40 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)$ กับ $\sqrt{k_2 D_{O_2} C_{Fe^{2+}}^2 C_{O_2}^*}$ เพื่อหาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวในคาน้ำคัมเมอร์ของถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ	73
41 การเปรียบเทียบระหว่างค่าเอนฮานเมนต์ฟลักเตอร์กับค่าฮัททาโมดูลัสสำหรับการหาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
42 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)$ กับ $a_1 C_{H_2S}^* \left(1 + \frac{D_{Fe^{3+}} C_{Fe^{3+}}}{v_1 D_{H_2S} C_{H_2S}} \right)$ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในโรเตอร์ของถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิตี	75
43 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)$ กับ $a_2 C_{O_2}^* \left(1 + \frac{D_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}}{v_2 D_{O_2} C_{O_2}} \right)$ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในคาน้ำคัมเมอร์ของถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิตี	76
44 การเปรียบเทียบระหว่างค่าเอนธานเมนท์เฟลคเตอร์กับค่าเอนธานเมนท์เฟลคเตอร์อนันต์สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล	77
ภาพผนวกที่	
1 การหาสัดส่วนปริมาตรของเหลวในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวด	109
2 การหาสัดส่วนปริมาตรของเหลวในถังปฏิกรณ์แบบอัดโนมิตี	110
3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรโนลด์กับตัวเลขกำลัง	111
4 ชุดอุปกรณ์สำหรับเจือจางก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	113
5 ถังผสมก๊าซ	113

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	=	พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลว, เมตร ² /เมตร ³
A_d	=	พื้นที่หน้าตัดของส่วนควาน์คัมเมอร์, เมตร ²
A_r	=	พื้นที่หน้าตัดของส่วนไรเซอร์, เมตร ²
$C_{Fe^{3+}}$	=	ความเข้มข้นของเหล็ก (3+) คีเลทในของเหลว, โมล/เมตร ³
$C_{Fe^{2+}}$	=	ความเข้มข้นของเหล็ก (2+) คีเลทในของเหลว, โมล/เมตร ³
C_{O_2}	=	ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในของเหลว, โมล/เมตร ³
C_{H_2S}	=	ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในของเหลว, โมล/เมตร ³
D_j	=	ค่าสภาพการแพร่ของสาร j, เมตร ² /วินาที
d_B	=	เส้นผ่านศูนย์กลางฟองก๊าซ, เมตร
E	=	ค่าเอนฮานเมนต์เฟคเตอร์
H_j	=	ค่าคงที่ของเฮนรีของสาร j, กิโลพาสคาล เมตร ³ /โมล
k_1	=	ค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติปฏิกิริยากำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์, เมตร ³ /โมล วินาที
k_2	=	ค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาพื้นสภาพสารละลายเหล็กคีเลท, เมตร ⁶ /โมล ² วินาที
$k_{j,L}$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในของเหลวของสาร j, เมตร/วินาที
M_H	=	ค่าฮัททาโมดูลัส
P	=	ความดัน, พาสคาล
p_j	=	ความดันย่อยของสาร j, พาสคาล
P_w/V	=	กำลังการกวนจำเพาะ, วัตต์/เมตร ³
U_G	=	ความเร็วก๊าซในท่อเปล่า, เมตร/วินาที
R_l	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมของปฏิกิริยากำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์, โมล/เมตร ³ วินาที

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

R_2	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมของปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) กิโลท, โมล/เมตร ³ วินาที
r_1	=	อัตราการจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์, โมล/เมตร ³ วินาที
r_2	=	อัตราการจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) กิโลท, โมล/เมตร ³ วินาที
ε_L	=	สัดส่วนปริมาตรของเหลว

เครื่องหมายข้างล่าง

i	=	บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว
A	=	สารตั้งต้นในเฟสก๊าซ
B	=	สารตั้งต้นในเฟสของเหลว
G	=	เฟสก๊าซ
L	=	เฟสของเหลว
S	=	เฟสของแข็ง
AQ	=	สารละลาย
1	=	ปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
2	=	ปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) กิโลท

จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายเหล็กคีเลท และการถ่ายโอนมวลในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ

Kinetics of H_2S Removal Using Iron Chelate Solution and Mass Transfer in an Auto-Circulating Reactor

คำนำ

ก๊าซชีวภาพที่ได้จากกระบวนการบำบัดของเสียแบบไร้อากาศเป็นก๊าซผสมที่ประกอบด้วย มีเทน ร้อยละ 55-60 คาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 39-44 และอื่นๆ ประมาณร้อยละ 1 อันได้แก่ ก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์และไอน้ำ (Schomaker *et al.*, 2000) ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้เป็นแหล่ง พลังงานทดแทนได้ ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการนำก๊าซดังกล่าวนี้มาใช้เป็นพลังงานทดแทน ทั้งในภาคเกษตรกรรมโดยเฉพาะการเลี้ยงสุกรและภาคอุตสาหกรรม โดยมีการผลิตและใช้ก๊าซ ชีวภาพในโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรประเภทแป้งมันสำปะหลัง สุรา เบียร์ และได้เริ่ม มีการนำก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบมูลฝอยมาใช้ด้วย การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน เช่น ใช้สำหรับหุงต้มในระดับครัวเรือน จนถึง ระดับอุตสาหกรรมคือใช้กับหัวเผา หม้อไอน้ำ หรือนำก๊าซชีวภาพไปใช้ผลิตไฟฟ้าโดยใช้เป็น เชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ซึ่งนิยมใช้กันมากในฟาร์มเลี้ยงสุกรขนาดใหญ่ แต่การนำก๊าซชีวภาพมาใช้ อย่างมีประสิทธิภาพหรือนำมาใช้ก็ยังยั้งยืนในทางปฏิบัติยังคงมีปัญหา โดยเฉพาะปัญหาการกัด กร่อนของเครื่องยนต์ ท่อนำก๊าซ หรืออุปกรณ์ใช้ก๊าซ ซึ่งเกิดจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ผสมอยู่ใน องค์ประกอบ แม้ว่าจะมีปริมาณน้อยมากแต่เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าว ทำให้ต้อง เสียค่าใช้จ่ายสูงในการเปลี่ยนเครื่องยนต์และอุปกรณ์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพ จึงจำเป็นต้องกำจัดก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากระบบก่อนนำไปใช้งาน เพื่อยืดอายุเครื่องยนต์และอุปกรณ์ที่ใช้ก๊าซ ชีวภาพและลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีอยู่หลายวิธี เช่น การกำจัดด้วยกระบวนการคลอส เป็น การเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้อยู่ในรูปซัลเฟอร์ โดยประสิทธิภาพของกระบวนการจะขึ้นอยู่กับจำนวนถังปฏิกรณ์ ดังนั้นจึงต้องใช้ถังปฏิกรณ์จำนวนมากเพื่อจะได้ประสิทธิภาพสูงแต่ สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย การกำจัดโดยใช้สารเคมีดูดซับเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้มากเพราะเป็นวิธีที่ง่าย

สารเคมีที่ใช้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผสมกับ โซเดียมไฮเปอร์คลอไรด์ (NaOCl) เนื่องจาก ราคาไม่สูงและหาซื้อง่ายและสามารถกำจัดได้ดี แต่ต้องใช้สารเคมีในปริมาณมากและไม่สามารถฟื้นฟูสภาพน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้ต้องปล่อยสารเคมีที่เสื่อมสภาพทิ้งซึ่งถ้ามีปริมาณสูงก็จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัด วิธีหนึ่งที่น่าสนใจ คือ กระบวนการโลแคท (Lo-Cat process) ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายเหล็กคีเลท (Hardison, 1985) วิธีกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยกระบวนการโลแคทนี้สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดมากกว่า 98% โดยจะใช้ สารละลายเหล็ก (3+) คีเลทหรือสารละลายเชิงซ้อนเหล็กอีดีทีเอ (Fe^{3+} EDTA) ในการกำจัดและสามารถนำสารละลายกลับมาใช้ใหม่ได้ ในกระบวนการโลแคทจะใช้เหล็ก (3+) คีเลททำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ แล้วกลายเป็นเหล็ก (2+) คีเลท โดยในขั้นตอนนี้จะเกิดตะกอนของกำมะถันในสารละลายจากนั้นเหล็ก (2+) คีเลทจะสามารถฟื้นฟูสภาพโดยทำปฏิกิริยากับอากาศแล้วกลายเป็นเหล็ก (3+) คีเลทที่จะใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เหมือนเดิม ซึ่งข้อดีของกระบวนการนี้คือไม่จำกัดความเข้มข้นและปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และสามารถฟื้นฟูสภาพสารเคมีได้ รวมไปถึงได้ผลิตภัณฑ์เป็นกำมะถันที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย

ถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ (auto-circulating reactor) เป็นถังปฏิกรณ์แบบก๊าซ-ลิฟต์ชนิดหนึ่งที่ถูกประยุกต์ใช้กับกระบวนการโลแคท โดยถังปฏิกรณ์ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก (Chisti, 1989) ได้แก่ ไรเซอร์ (riser) คือ ส่วนที่ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำปฏิกิริยากับสารละลายเหล็ก (3+) คีเลท โดยที่สารละลายจะเปลี่ยนเป็นเหล็ก (2+) คีเลทและก๊าซที่ถูกบำบัดแล้วจะถูกแยกออกจากระบบที่ส่วนแยกก๊าซกับของเหลว (gas-liquid separator) จากนั้นสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท จะไหลต่อเข้าไปในส่วนดาวน์คัมเมอร์ (downcomer) โดยไหลเข้าด้านบนเพื่อฟื้นฟูสภาพด้วยอากาศซึ่งป้อนเข้าด้านล่าง สารละลายเปลี่ยนเป็นสารละลายเหล็ก (3+) คีเลท โดยสารละลายนี้จะวนซ้ำเข้าทางส่วนล่างไรเซอร์เพื่อทำปฏิกิริยาใหม่อีกครั้ง ของเหลวจะเกิดการหมุนเวียนในถังปฏิกรณ์ระหว่างไรเซอร์และดาวน์คัมเมอร์ โดยใช้หลักความหนาแน่นที่แตกต่างกันของของเหลวเนื่องจากการป้อนก๊าซในไรเซอร์จะทำให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรสูงและการป้อนอากาศในดาวน์คัมเมอร์จะทำให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรต่ำ ซึ่งปฏิกรณ์ชนิดนี้สามารถทำปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และฟื้นฟูสภาพของสารละลายได้พร้อมกัน

ในการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยกระบวนการโลแคทโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติที่ออกแบบขึ้น (Limtrakul *et al.*, 2005) พบว่ายังมีปัญหาเกี่ยวกับการฟื้นฟู

สภาพสารละลายหลักคือเลทกลับมาใช้ใหม่ไม่สมบูรณ์ ทำให้สารละลายหลัก (2+) คือเลทพื้นสภาพเป็นสารละลายหลัก (3+) คือเลทได้ไม่เพียงพอกับปริมาณที่ใช้ไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงตามเวลาเนื่องจากสารละลายเสื่อมสภาพลงเรื่อยๆ จึงเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายที่จะต้องเปลี่ยนสารละลายใหม่ ต่อมาได้มีการศึกษาต่อโดยทำการปรับความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลายในระบบ (Janjaturaphan *et al.*, 2009) เพื่อช่วยให้ระบบมีสภาวะเหมาะสมในการทำปฏิกิริยา พบว่าปริมาณหลัก (3+) คือเลทยังคงลดลงกับเวลาแต่สามารถยืดเวลาการใช้สารละลายได้อีกระยะเวลาหนึ่ง รวมไปถึงราคาของสารปรับความเป็นกรดด่างมีราคาแพง ทำให้ต้นทุนของการดำเนินการสูง จากปัญหาดังกล่าวการออกแบบถึงปฏิกรณ์ให้ส่วนทำปฏิกิริยาการจัดและส่วนฟื้นฟูสภาพเหมาะสมกันจึงเป็นสิ่งจำเป็นยิ่ง เพื่อให้ระบบดำเนินการได้ในสภาวะคงตัวและลดต้นทุนการดำเนินงาน ซึ่งการออกแบบปฏิกรณ์ให้เหมาะสมจำเป็นต้องมีข้อมูลจลนศาสตร์และข้อมูลการถ่ายโอนมวลของสารในถังปฏิกรณ์

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารปรับความเป็นกรดด่างต่อประสิทธิภาพการจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา รวมไปถึงการถ่ายโอนมวลในถังปฏิกรณ์ ซึ่งถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นถังปฏิกรณ์ของเหลวและก๊าซ ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาและการถ่ายโอนมวลระหว่างก๊าซและของเหลวมีความซับซ้อน ทำให้ต้องทราบจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาและตัวแปรการถ่ายโอนมวล เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิตีให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

วัตถุประสงค์

การศึกษาด้านศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยสารละลายเหล็กคีเลตและปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคีเลต และการศึกษาการถ่ายโอนมวลในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ
2. ศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยสารละลายเหล็กคีเลตและปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคีเลต
3. ศึกษาการถ่ายโอนมวลของถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติที่ทำปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยสารละลายเหล็กคีเลตและปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคีเลต

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารปรับความเป็นกรดต่าง และความเป็นกรดต่างเริ่มต้นของสารละลายเหล็กคีเลตก่อนทำปฏิกิริยาที่มีต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
2. ศึกษาผลความเร็วรอบของใบกวนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคีเลตในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวด (semi-batch stirred tank reactor)
3. ศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคีเลตในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวด เพื่อหาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติ (Intrinsic kinetic rate constant) เมื่อไม่พิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

4. ศึกษาจนศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายหลักคิเลทในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะวงค์ เพื่อหาค่าคงที่อัตราจนศาสตร์-ธรรมชาติ เมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

5. ศึกษาจนศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายหลักคิเลทในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ เพื่อหาค่าคงที่อัตราจนศาสตร์-ธรรมชาติ เมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

6. เปรียบเทียบค่าคงที่อัตราจนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายหลักคิเลทที่ศึกษาในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะวงค์และในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ และศึกษาอิทธิพลของการถ่ายโอนมวลต่อการหาค่าคงที่อัตราจนศาสตร์ธรรมชาติ

7. ศึกษาตัวแปรการถ่ายโอนมวลในไรเซอร์และคาน์คัมเมอร์ของถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถหาสารปรับความเป็นกรดด่างที่มีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูง โดยราคาของสารต่อประสิทธิภาพการกำจัดต่ำ เพื่อประหยัดต้นทุนในการดำเนินการ

2. ค่าคงที่อัตราจนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายหลักคิเลท รวมถึงข้อมูลของการถ่ายโอนมวลในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติที่ได้จากการศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการออกแบบและการทำนายสมรรถนะในปฏิกรณ์

3. สามารถประเมินหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยสารละลายหลักคิเลทเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

การตรวจเอกสาร

1. ก๊าซชีวภาพ

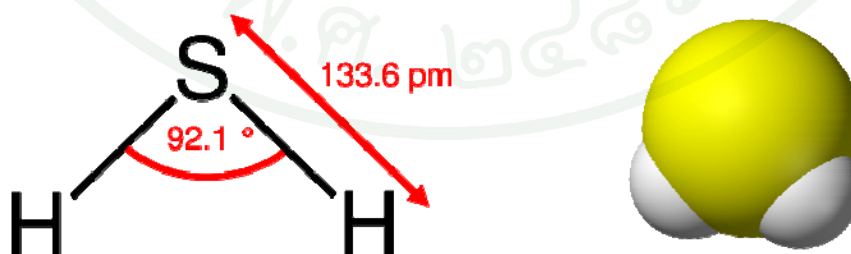
ปัจจุบันการเลี้ยงสัตว์ภายในประเทศเจริญเติบโตและพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลจากการเลี้ยงสัตว์ได้ก่อให้เกิดปัญหาของเสียและน้ำเน่าจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จากฟาร์มสุกร กำลังเป็นปัญหาที่ทำให้สภาพแวดล้อมเสื่อมโทรม และปัญหานี้นับวันจะทวีความรุนแรงมากขึ้น ก๊าซชีวภาพเป็นเทคโนโลยีรูปแบบหนึ่งซึ่งเกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์ ได้ประยุกต์นำไปใช้ประโยชน์ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์เป็นเวลานานมาแล้ว โดยได้รับการส่งเสริมจากหน่วยงานราชการ หลายแห่ง แต่การใช้ประโยชน์ดังกล่าวยังมีปัญหาและข้อจำกัดอยู่ ทั้งนี้เพราะขาดการศึกษา วิจัยและส่งเสริมกันอย่างจริงจังและต่อเนื่อง อีกทั้งระบบก๊าซชีวภาพที่มีการก่อสร้าง ในอดีตเป็นชนิดที่ออกแบบเพื่อใช้ประโยชน์ของก๊าซโดยใช้มูลสัตว์เพียงส่วนหนึ่งของฟาร์มเท่านั้น รวมทั้งการทำงานของระบบยังมีปัญหาทางเทคนิคหลายด้าน ปัจจุบันจึงได้ มีการประยุกต์เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพไปใช้ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ โดยเน้นการบำบัดของเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์และการรักษาสภาพแวดล้อม นอกเหนือไปจากการใช้ประโยชน์ของของเสียและก๊าซเพียงอย่างเดียว

ก๊าซชีวภาพ (biogas) คือ ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายอินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นมีเทน ร้อยละ 55-60 คาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 39-44 และอื่นๆ ประมาณร้อยละ 1 อันได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และไอน้ำ (Schomaker *et al.*, 2000) และจะพบว่าก๊าซมีเทนซึ่งมีมากที่สุด มีคุณสมบัติไม่มีสีไม่มีกลิ่นและติดไฟได้ แต่ก๊าซชีวภาพจะมีกลิ่นเหม็นนั้นเกิดจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือก๊าซไข่เน่า เมื่อเราจุดไฟกลิ่นเหม็นจะหายไป

2. ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่ปนเปื้อนในก๊าซชีวภาพนั้นมีคุณสมบัติเป็นก๊าซพิษ มีกลิ่นเฉพาะตัวคล้ายไข่เน่าโดยโครงสร้างอะตอมแสดงในภาพที่ 1 ความเข้มข้นต่ำสุดที่ยังคงได้กลิ่นคือ 0.13 ส่วนในล้านส่วน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 20 ส่วนในล้านส่วน จะเริ่มทำให้เกิดความระคายเคืองที่ของดวงตาและบริเวณทางเดินหายใจ ซึ่งอาการจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นและเวลาที่ได้รับสารเพิ่มมากขึ้น อาการระคายเคืองและกลิ่นของก๊าซไข่เน่า มักเป็นสัญญาณแรกที่แสดงว่า

ได้รับไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าสู่ร่างกาย ความเข้มข้นของสารนี้ในระดับที่สูงกว่า 150 ส่วนในล้านส่วนจะส่งผลให้ระบบประสาทรับกลืนเป็นอัมพาต การได้รับสารที่มีความเข้มข้นปานกลาง (250 ส่วนในล้านส่วน) เป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดอาการปอดบวมน้ำ ในระดับความเข้มข้นมากกว่า 500 ส่วนในล้านส่วน จะเกิดอาการเซื่องซึม เวียนศีรษะ ปวดศีรษะ เดินเซไปเซมา ภายในไม่กี่นาที การได้รับสารอย่างเฉียบพลันที่ความเข้มข้น มากกว่า 700 ส่วนในล้านส่วนจะทำให้เกิดการหมดสติอย่างทันที ในระดับความเข้มข้นที่ 1000-2000 ส่วนในล้านส่วน จะถูกดูดซึมผ่านทางปอด และเข้าสู่กระแสเลือด เกิดอาการหายใจเร็วและแรงกว่าปกติในช่วงเริ่มต้น และตามมาด้วยอาการฟูบอย่างรวดเร็วจนหยุดหายใจ ในระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะทำให้ศูนย์กลางการหายใจเป็นอัมพาต เมื่อความเข้มข้นถึง 5000 ส่วนในล้านส่วน จะทำให้เสียชีวิตอย่างเฉียบพลัน โดยทั่วไปแล้วการตายเฉียบพลันที่เกิดขึ้นจากภาวะขาดอากาศหายใจสามารถเกิดขึ้นได้ทุกเมื่อ ถ้ามีความเข้มข้นถึง 1000 ส่วนในล้านส่วนหรือมากกว่านั้น การได้รับแอลกอฮอล์หรือการบริโภคแอลกอฮอล์อาจเพิ่มผลกระทบที่เป็นพิษได้ (นิรนาม, 2011) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อสัมผัสกับน้ำหรือไอน้ำจะเปลี่ยนสภาพเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ซึ่งเป็นสาเหตุของกรดหรือไอกรดที่สามารถกัดกร่อนโลหะและวัสดุอุปกรณ์ เช่นในขณะนี้การใช้ก๊าซชีวภาพในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้ในฟาร์มสุกร โดยมีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพไม่เพียงพอ พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง มีอายุการใช้งานสั้นเพียง 2-3 เดือน ต้องเปลี่ยนเครื่องใหม่เสมอ นอกจากนั้นการเผาไหม้ของไฮโดรเจนซัลไฟด์ยังก่อให้เกิดไอของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide, SO_2) ฟูกระจาย ซึ่งเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบให้เร็วที่สุดจึงเป็นผลดีต่ออุปกรณ์ และเครื่องยนต์ที่ใช้งานก๊าซชีวภาพ เป็นการเพิ่มความปลอดภัย รวมทั้งลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย



ภาพที่ 1 โครงสร้างอะตอมของไฮโดรเจนซัลไฟด์

ที่มา: นิรนาม (2011)

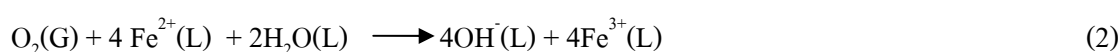
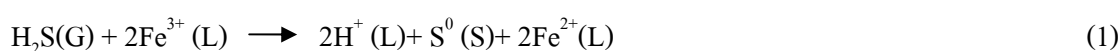
3. วิธีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพ

วิธีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพที่นิยมมีหลายวิธี โดยมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน เช่น การกำจัดโดยวิธีดูดซับแห้ง ด้วยเศษเหล็ก ถ่านคาร์บอน molecular sieve (Kapdi *et al.*, 2006) วิธีนี้เหมาะกับก๊าซที่มีปริมาณน้อย สำหรับวิธีดูดซับด้วยเศษเหล็ก เศษเหล็กจะเปลี่ยนก๊าซ H_2S เป็นเหล็กซัลไฟด์เกาะบนเศษเหล็ก และเมื่อเศษเหล็กมีเหล็กซัลไฟด์เต็มแล้ว จะต้องมีการฟื้นฟูสภาพด้วยอากาศแต่อายุการใช้งานจะสั้น การถ่ายเศษเหล็กเข้าและออกจะทำให้เกิดฝุ่นสารพิษ นอกจากนี้ประสิทธิภาพการกำจัดวิธีนี้ยังขึ้นกับปริมาณความชื้นในก๊าซด้วย การใช้ถ่านคาร์บอน และ Molecular sieve เป็นตัวดูดซับต้องมีค่าใช้จ่ายในการดูดซับ และค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสภาพสูง ปัจจุบันได้มีการใช้ระบบดูดซับด้วยเมมเบรน (Membrane Adsorption) ระบบนี้จะต้องใช้เมมเบรนที่เป็นโพลีเมอร์ชนิดไม่มีขั้วที่ผลิตจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาสูง ระบบมีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานสูงเนื่องจากต้องใช้แรงดันเพื่อให้ก๊าซผ่านเมมเบรน ต้องมีการบำบัดก๊าซขึ้นต้นก่อนส่งเข้าระบบ เนื่องจากการเจือปนของอนุภาคของแข็งจะทำให้เมมเบรนแตกร้าวได้ นอกจากนี้ได้นำวิธี Biofiltration ในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยผ่านเข้าสู่ปฏิกรณ์ที่มีตัวกรอง (filter media) เช่น ถ่านหิน สารประกอบอินทรีย์ และดินเป็นต้น ซึ่งบรรจุจุลินทรีย์ อันมีหน้าที่ย่อยสลายไฮโดรเจนซัลไฟด์ แต่กระบวนการนี้มีข้อจำกัดคือ ยากต่อการควบคุมกระบวนการเติบโตของแบคทีเรียในกระบวนการ ตลอดจนมีการเกิดการอุดตันในชั้นตัวกรองด้วย วิธีการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์หลักที่สำคัญอีกกลุ่มหนึ่งคือการดูดซึมด้วยของเหลว เช่น เอมีน สารละลายเอมีนที่ใช้ดูดซึมแล้วจะถูกนำไปฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อนแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกทิ้งไปสู่บรรยากาศ ซึ่งจะทำให้เป็นมลพิษ (Fortuny *et al.*, 2007) อีกกระบวนการหนึ่งเป็นการดูดซึมด้วยสารละลายด่าง วิธีนี้เป็นวิธีง่ายและใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในโรงฟาร์มสุกรในประเทศไทย ทำให้ได้ก๊าซมีค่าความร้อนสูงขึ้น จุดอ่อนของวิธีนี้คือ ต้องใช้ปริมาณน้ำและด่างมาก เนื่องจากไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ และยังปล่อยของเสียในรูปเกลือซัลไฟด์และคาร์บอเนตไปกับน้ำทิ้ง ซึ่งหากมีมากจะสูงกว่ามาตรฐานของซัลไฟด์ที่จะมีได้ในน้ำทิ้ง และก่อให้เกิดคาร์บอเนตปริมาณมากมาย ทำให้น้ำทิ้งมีความกระด้างสูงมาก หากมีมากในอนาคตจะเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ วิธีการกำจัดที่มีผู้นิยมใช้อีกวิธีคือการดูดซึมด้วยน้ำ วิธีนี้นอกจากจะกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้วยังกำจัด CO_2 ได้ด้วย วิธีนี้จะเหมาะก๊าซความดันสูง และต้องใช้น้ำปริมาณมาก จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง และมีการกัดกร่อนเครื่องอัดก๊าซด้วย นอกจากนี้ยังมีกระบวนการเคล้าส (Clause process) ซึ่งมีข้อดี คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของกำมะถันที่ไม่เป็นอันตราย และยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้

เงินลงทุนสูง นอกจากนี้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของกระบวนการเคล้าส จะขึ้นอยู่กับจำนวนปฏิกรณ์ที่ใช้ในการกำจัด ซึ่งถ้าต้องการให้กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 97 เปอร์เซ็นต์ต้องใช้ปฏิกรณ์ถึง 3 ตัว (NagI, 1997) วิธีหนึ่งที่น่าสนใจ คือกระบวนการออกซิเดชันในของเหลว (Liquid-phase oxidation) แบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่กระบวนการสเตรทฟอร์ด (Stretford) และกระบวนการโลแคท (Lo-Cat) ทั้งสองกระบวนการจะเปลี่ยนไฮโดรเจนซัลไฟด์ไปเป็นกำมะถันแข็งโดยปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) แต่ทั้ง 2 วิธีจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน ในกระบวนการสเตรทฟอร์ด (Stretford) ใช้วานาเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นสารที่มีอันตราย และเกิดปฏิกิริยาช้ำ นอกจากนี้กำมะถันที่ได้ต้องไปผ่านกระบวนการล้าง เนื่องจากปนเปื้อนด้วยวานาเดียม จึงทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากขึ้น ส่วนกระบวนการโลแคทนั้น จะใช้สารละลายเชิงซ้อนเหล็ก-อีดีทีเอ (Fe[III]-EDTA) หรือที่เรียกกันว่าเหล็กคีเลท (Chelate Iron) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งให้กำมะถันที่ได้ไม่เป็นอันตราย และปฏิกิริยานี้ยังเกิดเร็วอีกด้วย โดยที่สามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้สูงถึง 98 % (Kohl and Neilson, 1997, Limtrakul *et al.*, 2005) ณ สถานะการเดินเครื่องที่อุณหภูมิบรรยากาศ

4. กระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ด้วยกระบวนการโลแคท (Lo-Cat process)

กระบวนการโลแคท (Hardison, 1985) คือ กระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) แล้วเปลี่ยนสภาพไปเป็นกำมะถันในสถานะของแข็ง ในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีนี้จะใช้ สารละลายของเหล็ก (3+) คีเลท (Fe³⁺ EDTA) เป็นตัวทำปฏิกิริยาเพื่อกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้กลายเป็นกำมะถัน และเมื่อเหล็ก (3+) คีเลททำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้วจะกลายเป็น เหล็ก (2+) คีเลท (Fe²⁺ EDTA) ดังนั้นจึงมีการทำการนำเหล็ก (2+) คีเลทมาเปลี่ยนรูปให้กลายเป็นเหล็ก(3+)คีเลทใหม่ โดยเหล็ก (2+) คีเลททำปฏิกิริยากับอากาศก็จะเปลี่ยนเป็นเหล็ก (3+) คีเลทกลับมาใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดังเดิม โดยประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีกระบวนการโลแคทนี้จะสูงถึง 98 % (Limtrakul *et al.*, 2005) และยังสามารถทำการนำเหล็ก (2+) คีเลทมาเปลี่ยนรูปให้กลายเป็นเหล็ก (3+) คีเลทได้ถึง 79% (Limtrakul *et al.*, 2005) ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์



ปฏิกิริยาที่ (1) คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับเหล็ก (3+) คิเลท โดยเหล็ก (3+) คิเลทจะไปรับอิเล็กตรอนจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้วกลายเป็นเหล็ก (2+) คิเลท และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อเสียอิเล็กตรอนไปก็จะแตกตัวกลายเป็นไฮโดรเนียมไอออน (H^+) และกำมะถันในรูปของแข็ง

ปฏิกิริยาที่ (2) คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงการนำเหล็ก(2+)คิเลทมาเปลี่ยนรูปเป็นเหล็ก (3+) คิเลทเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้อากาศเป็นตัวรีดิวซ์ โดยเหล็ก (2+) คิเลทจะเสียอิเล็กตรอนให้กับออกซิเจนในอากาศและน้ำแล้วกลายเป็นเหล็ก (3+) คิเลท และไฮดรอกไซด์ไอออน

คุณสมบัติทางกายภาพกำมะถันที่ได้จากกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีกระบวนการโลแคทพบว่ามีความหนาแน่นขนาดเล็กมากโดยจะอยู่ร่วมกับของเหลวในระบบเป็นแบบโคลนน้ำ (Slurry) และใช้เวลาในการตกตะกอนนาน

5. เครื่องปฏิกรณ์หมุนเวียนอัตโนมัติ (Auto-circulating reactor)

ปฏิกรณ์ชนิดนี้มีลักษณะและหลักการทำงานคล้ายกับปฏิกรณ์ก๊าซลิฟท์ (Gas-Lift Reactor) ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก (Chisti, 1989) ได้แก่ ไรเซอร์ (riser), ส่วนแยกก๊าซและของเหลว (gas-liquid separator) และดาวน์คัมเมอร์ (downcomer) โดยที่ของเหลวจะเกิดการหมุนวนในเครื่องระหว่างไรเซอร์และดาวน์คัมเมอร์โดยใช้หลักความหนาแน่นที่แตกต่างกันของของไหล โดยทั่วไปแล้วจะให้สายก๊าซเข้าข้างล่างของเครื่องที่ตัวเครื่องที่ไรเซอร์

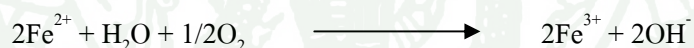
ในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีกระบวนการโลแคทนี้จะประกอบไปด้วยสายก๊าซ 2 สาย ได้แก่ สายก๊าซที่ประกอบไปด้วยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และสายของอากาศ ดังนั้นจึงใช้ปฏิกรณ์ก๊าซลิฟท์แบบธรรมดาที่ให้ก๊าซเข้าทางไรเซอร์ทางเดียวไม่ได้เพราะว่าในกระบวนการกำจัดประกอบไปด้วยสายก๊าซ 2 สาย จึงได้มีการปรับปรุงเครื่องมือเพื่อให้เหมาะสมกับการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีนี้แสดงดังภาพที่ 2 โดยให้ก๊าซที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ต้องการกำจัดเข้าทางไรเซอร์ข้างล่างของเครื่อง ซึ่งในไรเซอร์เป็นที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และเหล็ก (3+) คิเลทและเหล็ก (3+) คิเลทที่เปลี่ยนเป็นเหล็ก (2+) คิเลทจะไหลเข้าดาวน์คัมเมอร์ซึ่งให้อากาศที่เป็นตัวที่ทำให้เหล็ก (2+) คิเลทกลายเป็นเหล็ก (3+) คิเลทแล้วไหลวนเข้าไปทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อีกครั้งในไรเซอร์ ดังนั้นปฏิกิริยาทั้ง 2

คือ ปฏิกิริยาที่เป็นการเปลี่ยนรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้กลายเป็นกำมะถันและปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปของเหล็ก (2+) ที่เลทให้กลายเป็นเหล็ก (3+) ที่เลทจะเกิดขึ้นในตัวเครื่องเดียวกัน ดังสมการต่อไปนี้

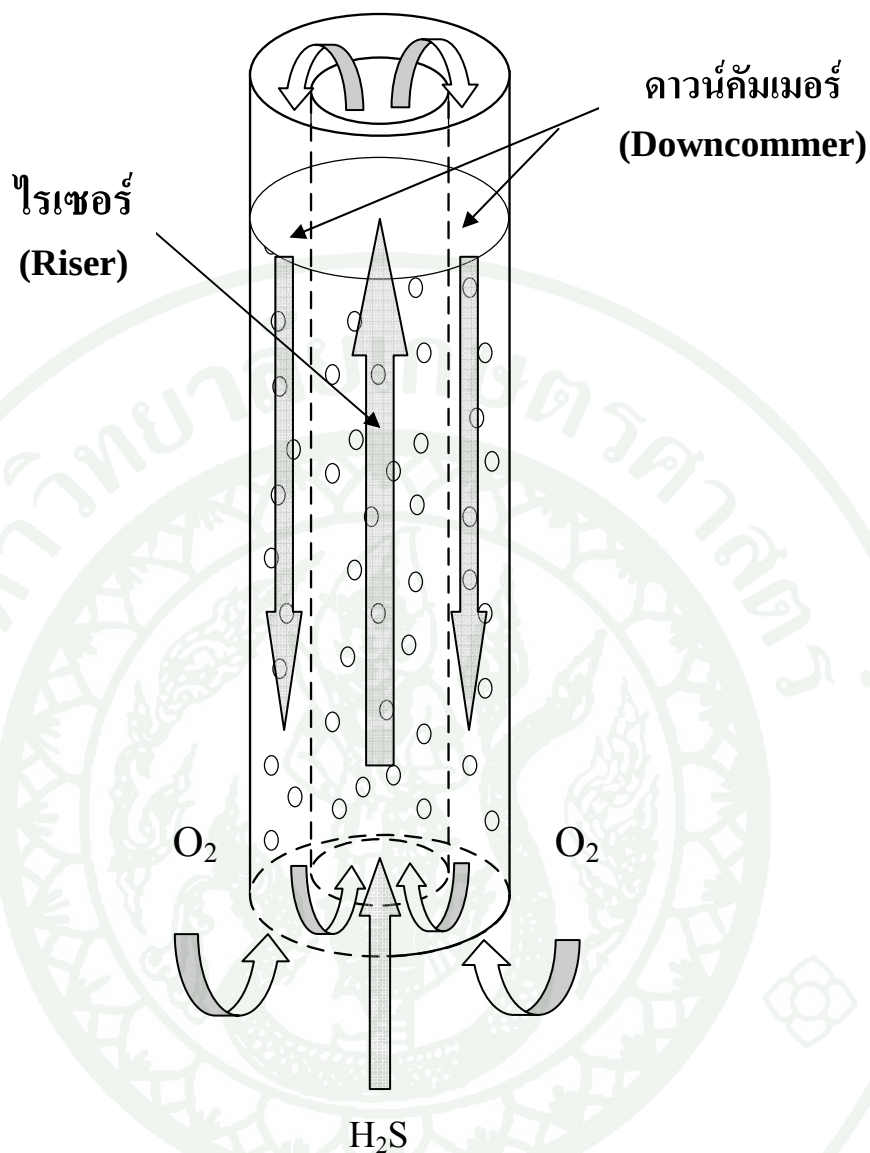
ปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ปฏิกิริยารีดอกซ์)



ปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน)



จากการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีกระบวนการไหลเวียนด้วยถังปฏิกรณ์หมุนเวียนอัตโนมัติ (Auto-circulating reactor) พบว่าอัตราการไหลของก๊าซในตัวโรเตอร์จะมีปริมาณมากกว่าอัตราการไหลก๊าซในตัวดาวน์คัมเมอร์ทำให้ความหนาแน่นของของเหลวในตัวโรเตอร์และดาวน์คัมเมอร์มีค่าต่างกันโดยที่ความหนาแน่นในตัวดาวน์คัมเมอร์จะมีค่ามากกว่าความหนาแน่นในตัวโรเตอร์ ด้วยหลักการนี้ทำให้ของเหลวในเครื่องเกิดการหมุนวนในถังได้เอง โดยที่ไม่ต้องใช้ปั๊มช่วยในการทำให้ของเหลวไหลวนในถัง ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการดำเนินการได้



ภาพที่ 2 การประยุกต์ปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติเพื่อใช้ในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

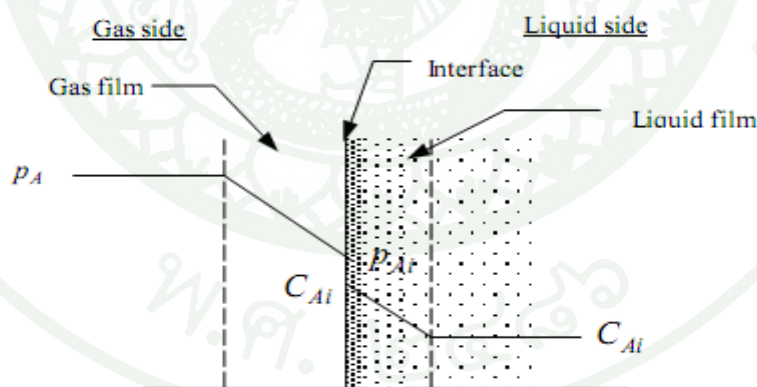
6. สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกับของเหลว

ปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกับของเหลว ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อองค์ประกอบของก๊าซละลายในของเหลว แล้วทำปฏิกิริยากับของเหลว ปฏิกิริยาของก๊าซกับของเหลว ส่วนมากใช้ในงานที่ต้องการแยกก๊าซที่ไม่ต้องการออกหรือในงานที่ต้องการผลิตก๊าซใหม่ทั้งในวัฏภาคก๊าซและของเหลว อาทิ การแยก

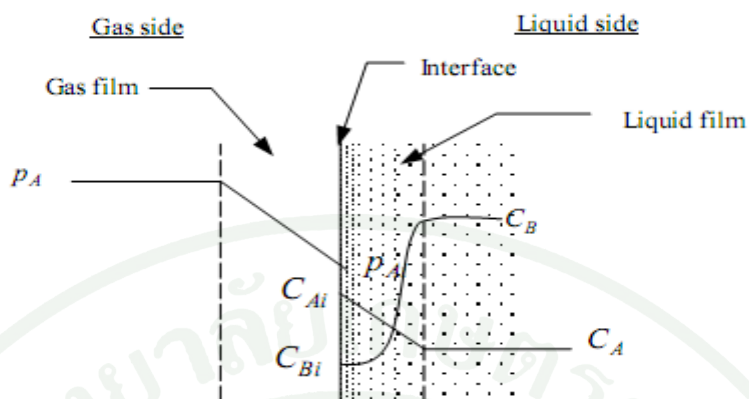
CO₂ ด้วยสารละลายต่างซึ่งเป็นการประยุกต์ปฏิกิริยาเคมีช่วยเร่งการดูดซึม เรียกว่า การดูดซึมทางเคมี (Chemical absorption or reaction absorption)

ในปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกับของเหลว การแพร่และปฏิกิริยาขององค์ประกอบก๊าซกับของเหลวเกิดขึ้นพร้อมกันโดยสามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม (Two-film theory) ซึ่งเสนอโดย Levenspiel (1999) ทฤษฎีนี้สมมติว่ามีฟิล์มเกิดขึ้นในเฟสของเหลว และก๊าซ ซึ่งก๊าซจะเกิดการถ่ายโอนมวลเข้าไปยังเฟสของเหลวดังแสดงในภาพที่ 3 และเกิดปฏิกิริยาในเฟสของเหลว โดยอาจเกิดปฏิกิริยาในฟิล์มหรือในของเหลวดังแสดงในภาพที่ 4

ที่บริเวณฟิล์มด้านของเหลวใกล้ผิวสัมผัสของก๊าซกับของเหลว การกระจายความเข้มข้นของสารองค์ประกอบขึ้นอยู่กับอัตราเร็วสัมพัทธ์ของการแพร่กับปฏิกิริยา ในที่นี้อธิบายอัตราปฏิกิริยารวมในกรณีต่างๆพร้อมทั้งสมการอัตราเร็วปฏิกิริยารวม ในดังปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกับของเหลว การสัมผัสของก๊าซกับของเหลวและพลวัตของไหล (Fluid dynamics) ในแต่ละวัฏภาคเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ การออกแบบขั้นพื้นฐานของเครื่องปฏิกรณ์ประเภทนี้ โดยสมมุติให้ลักษณะพลวัตของไหลเป็นแบบอุดมคติ



ภาพที่ 3 ทฤษฎีสองฟิล์มสำหรับการถ่ายโอนมวลระหว่างก๊าซกับของเหลว



ภาพที่ 4 ทฤษฎีสองฟิล์มสำหรับการถ่ายโอนมวลระหว่างก๊าซกับของเหลว โดยมีปฏิกิริยาในเฟสของของเหลว

ปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกับของเหลว



กลไกของปฏิกิริยาเกิดขึ้น โดยที่องค์ประกอบของก๊าซ A ละลายในของเหลวใกล้กับผิวสัมผัสก๊าซ-ของเหลว แล้วแพร่เข้าไปในของเหลว ระหว่างที่แพร่ก็ทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบของของเหลว B ดังนั้นในปฏิกิริยาระหว่างก๊าซกับของเหลวนี้ จึงมีอิทธิพลของการแพร่ต่ออัตราเร็วปฏิกิริยารวมด้วย

การวิเคราะห์ปฏิกิริยาก๊าซ-ของเหลว โดยมากใช้แบบจำลองของ ทฤษฎีฟิล์มของไหล (fluid film theory) ซึ่งสมมุติว่าที่ผิวสัมผัสก๊าซ-ของเหลว เกิดฟิล์มของไหลขึ้นทั้งสองด้านของก๊าซกับของเหลว การถ่ายโอนมวลที่ฟิล์มของไหลเกิดขึ้นโดยการแพร่แบบโมเลกุล (molecular diffusion) และที่ผิวสัมผัสก๊าซ-ของเหลว ความดันย่อย A ในเฟสของก๊าซ (p_{Ai}) กับความเข้มข้นของ A ในเฟสของของเหลว (C_{Ai}) อยู่ในสถานะสมดุลกัน

นอกจากทฤษฎีฟิล์มของไหลแล้ว ยังมี Penetration theory และ Surface renewal theory ซึ่งพยายามนำปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงเข้ามาคิดในแบบจำลอง อย่างไรก็ตามอัตราเร็วของการดูดซึม (absorption rate) ที่คำนวณได้จาก ทฤษฎีฟิล์มของไหลกับ Penetration-surface renewal theory แตกต่างกันไม่มากนัก ดังนั้นเพื่อความสะดวกในที่นี้ใช้ทฤษฎีฟิล์มของไหลวิเคราะห์ปฏิกิริยา

Levenspiel (1999) ได้แสดงสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate Equation) โดยตั้งสมมติฐานว่าก๊าซละลายเข้าไปในของเหลว และของเหลวจะไม่มีถ่ายโอนมวลเข้าไปในก๊าซ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

อัตราการถ่ายโอนมวลระหว่างก๊าซกับของเหลวในกรณีที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังนี้

$$-r_A''' = \frac{1}{\frac{1}{k_{AG}a} + \frac{H_A}{k_{AL}a}} (p_A - H_A C_A) \quad (4)$$

เมื่อ $\frac{1}{k_{AG}a}$ คือ ความต้านทานในฟิล์มของก๊าซ

$\frac{1}{k_{AL}a}$ คือ ความต้านทานในฟิล์มของเหลว

อัตราการถ่ายโอนมวลระหว่างก๊าซกับของเหลวในกรณีที่มีการเกิดปฏิกิริยา สามารถแสดงได้ดังนี้

$$-r_A''' = \frac{1}{\frac{1}{k_{AG}a} + \frac{H_A}{k_{AL}aE} + \frac{H_A}{kC_B\varepsilon_L}} P_A \quad (5)$$

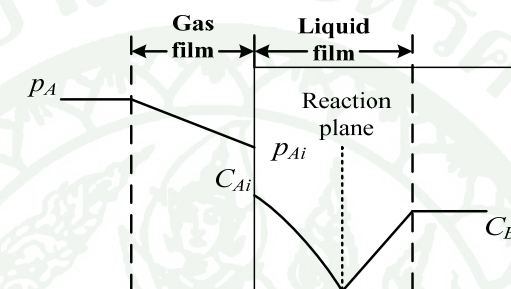
เมื่อ $\frac{1}{kC_B\varepsilon_L}$ คือ ความต้านทานในส่วนของการเกิดปฏิกิริยา

E คือ ค่าเอนฮานซ์เมนต์แฟกเตอร์ ในฟิล์มส่วนของของเหลว

$$\left[\begin{array}{c} \text{ค่าเอนฮานซ์เมนต์แฟกเตอร์ในฟิล์ม} \\ \text{ของของเหลว} \end{array} \right], E = \left[\begin{array}{c} \text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร A} \\ \text{ที่เกิดขึ้นจริง} \\ \hline \text{อัตราการถ่ายโอนมวล} \end{array} \right] \quad (6)$$

การเกิดปฏิกิริยาแบ่งได้ 8 กรณีดังต่อไปนี้

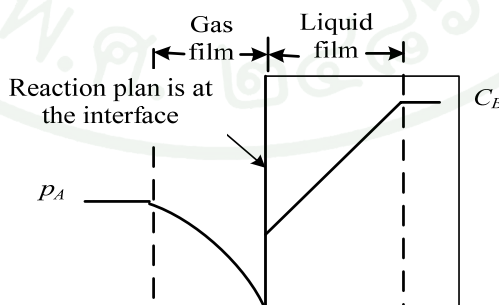
กรณีที่ 1 ปฏิกิริยาเกิดอย่างทันทีทันใด และความเข้มข้นของสาร B มีค่าต่ำ (Instantaneous reaction with low C_B) ในกรณีนี้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้น ณ จุดที่สาร A และสาร B มาสัมผัสกัน และเนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ทำให้สาร A หดภายในฟิล์มไม่แพร่เข้าสู่ส่วนของเหลวดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเกิดปฏิกิริยาอย่างทันทีทันใด และความเข้มข้นของสาร B มีค่าต่ำ

ดังนั้นสมการที่ใช้แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังนี้

$$-r_A'' = \frac{\frac{D_B}{D_A} \frac{C_B}{b} + \frac{P_A}{H_A}}{\frac{1}{H_A k_{AG}} + \frac{1}{k_{AL}}} \quad (7)$$



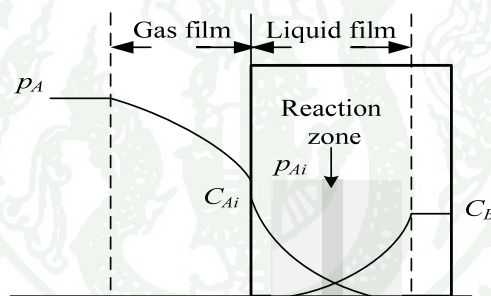
ภาพที่ 6 การเกิดปฏิกิริยาอย่างทันทีทันใด และความเข้มข้นของสาร B มีค่าสูง

กรณีที่ 2 ปฏิกิริยาเกิดอย่างทันทีทันใด และค่าความเข้มข้นของสาร B (C_B) มีค่าสูง (Instantaneous reaction with high C_B) ในกรณีนี้คล้ายกับกรณีที่ 1 แตกต่างคือ ความเข้มข้นของสาร B มีค่าสูง ทำให้ค่าความต้านทานในส่วนของการแพร่สามารถละทิ้งได้ดังแสดงในภาพที่ 6

ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับค่าความต้านทานในฟิล์มของก๊าซเท่านั้น โดยสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ

$$-r_A'' = p_A k_{AG} \quad (8)$$

กรณีที่ 3 ปฏิกิริยาเกิดเร็วในฟิล์มของของเหลว และค่าความเข้มข้นของสาร B (C_B) มีค่าต่ำ (Fast reaction in liquid film with low C_B) จากปฏิกิริยาเกิดเร็วทำให้บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาจะอยู่ภายในฟิล์มของของเหลว ดังนั้นสาร A จะไม่แพร่เข้าไปในส่วนของการแพร่ดังแสดงในภาพที่ 7

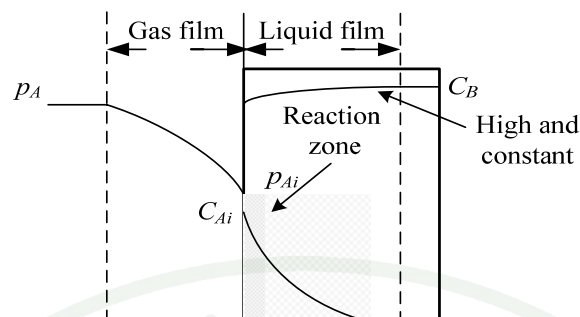


ภาพที่ 7 การเกิดปฏิกิริยาเกิดเร็วในฟิล์มของของเหลวและความเข้มข้นของสาร B ต่ำ

โดยสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ

$$-r_A''' = \frac{1}{\frac{1}{k_{AG}} + \frac{H_A}{k_{AL} a E}} p_A \quad (9)$$

กรณีที่ 4 ปฏิกิริยาเกิดเร็วในฟิล์มของของเหลว และค่าความเข้มข้นของ B (C_B) มีค่าสูง (Fast reaction in liquid film with high C_B) กรณีนี้คล้ายกับกรณีที่ 3 แตกต่างคือ ความเข้มข้นสาร B สูงทำให้ค่าความเข้มข้นของสาร B มีค่าเกือบคงที่ตลอดการถ่ายโอนมวลดังแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งทำให้ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบ ปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order)

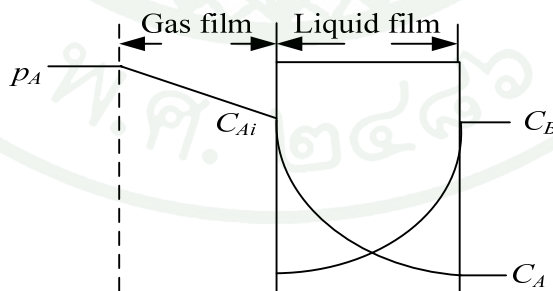


ภาพที่ 8 ปฏิกิริยาเกิดเร็วในฟิล์มของของเหลว

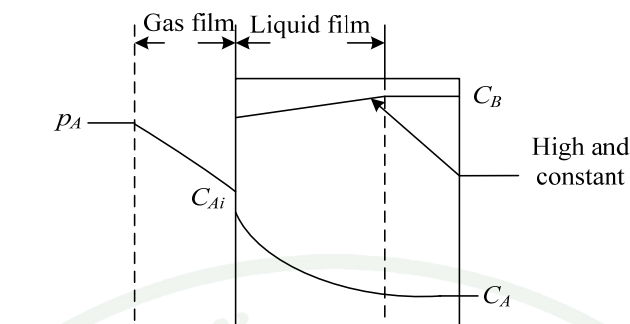
โดยสมการแสดงการอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ

$$-r_A^m = \frac{1}{\frac{1}{k_{AG}a} + \frac{H_A}{a\sqrt{D_A k C_B}}} p_A \quad (10)$$

กรณีที่ 5 และ 6 ปฏิกิริยาเกิดแบบปานกลางในฟิล์มของเหลว และในส่วนหนึ่งของเหลว (Intermediate rate with reaction in the film and in the main body of liquid) กรณีนี้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นทำให้สาร A เกิดการแพร่เข้าสู่ส่วนของเหลวทำให้ค่าความต้านทานในของเหลวมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาคือ โดยในภาพที่ 9 แสดงการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของสาร B มีค่าต่ำ และภาพที่ 10 แสดงการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของสาร B มีค่าสูง



ภาพที่ 9 ปฏิกิริยาเกิดแบบปานกลางในฟิล์มของเหลว และในส่วนหนึ่งของเหลวที่ความเข้มข้นสาร B มีค่าต่ำ



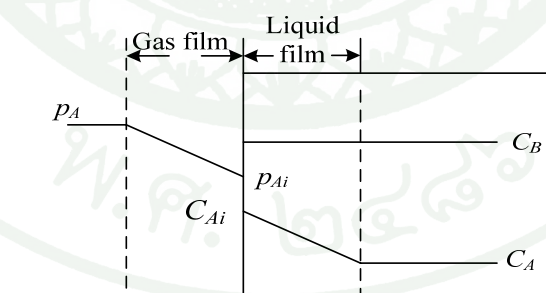
ภาพที่ 10 ปฏิกิริยาเกิดแบบปานกลางในฟิล์มของเหลว และในส่วนของของเหลวที่ความเข้มข้นสาร B มีค่าสูง

ดังสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังนี้

$$-r_A''' = \frac{1}{\frac{1}{k_{AG}} + \frac{H_A}{k_{AL}aE} + \frac{H_A}{kC_B\varepsilon_L}} p_A \quad (11)$$

กรณีที่ 7 ปฏิกิริยาเกิดช้าในของเหลว (Slow reaction in main body but with film resistanc)

กรณีนี้การเกิดปฏิกิริยาจะเกิดในส่วนของของเหลว เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาช้าดังแสดงในภาพที่ 11

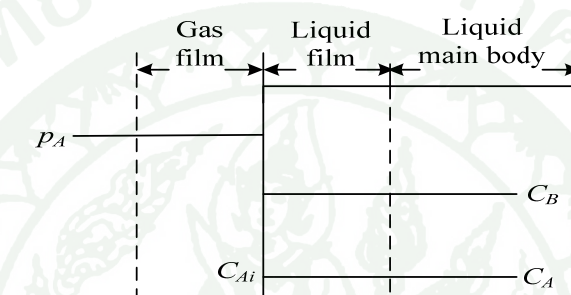


ภาพที่ 11 ปฏิกิริยาเกิดช้าในของเหลว

ดังนั้นสมการที่แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ

$$-r_A''' = \frac{1}{\frac{1}{k_{AG}} + \frac{H_A}{k_{AL}aE} + \frac{H_A}{kC_B\varepsilon_L}} p_A \quad (12)$$

กรณีที่ 8 ปฏิกิริยาเกิดช้าและไม่มีความต้านทานของการถ่ายโอนมวล (Slow reaction, no mass transfer resistance) ในกรณีนี้ค่าความต้านทานในการถ่ายโอนมวลทั้งหมดสามารถละทิ้งได้ ดังแสดงในภาพที่ 12 ผลก็คืออัตราการถ่ายโอนมวลจะขึ้นกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่านั้น



ภาพที่ 12 ปฏิกิริยาเกิดช้าในของเหลว และไม่มีความต้านทานของการถ่ายโอนมวล

ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังนี้

$$-r_A''' = k\varepsilon_L C_A C_B \quad (13)$$

ค่าอัตราโมดูลัสสามารถหาค่าได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเร็วหรือช้า โดยสมมุติฐานว่าไม่มีความต้านทานในเฟสก๊าซ

$$M_H^2 = \frac{\text{การเปลี่ยนแปลงสูงสุดของสารที่เป็นไปได้ในฟิล์ม}}{\text{การถ่ายโอนมวลสูงสุดที่เป็นไปได้ในฟิล์ม}}$$

$$= \frac{\frac{kC_{Ai}C_Bx_0}{D_A}}{x_0C_{Ai}} = \frac{kD_AC_B}{k_{AL}^2} \quad (14)$$

โดยที่ x_0 คือ ระยะการเกิดปฏิกิริยาในฟิล์มของของเหลวเทียบกับฝั่งพื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว

D_A คือ ค่าสภาพการแพร่ของสาร A

k_{AL} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในของเหลว

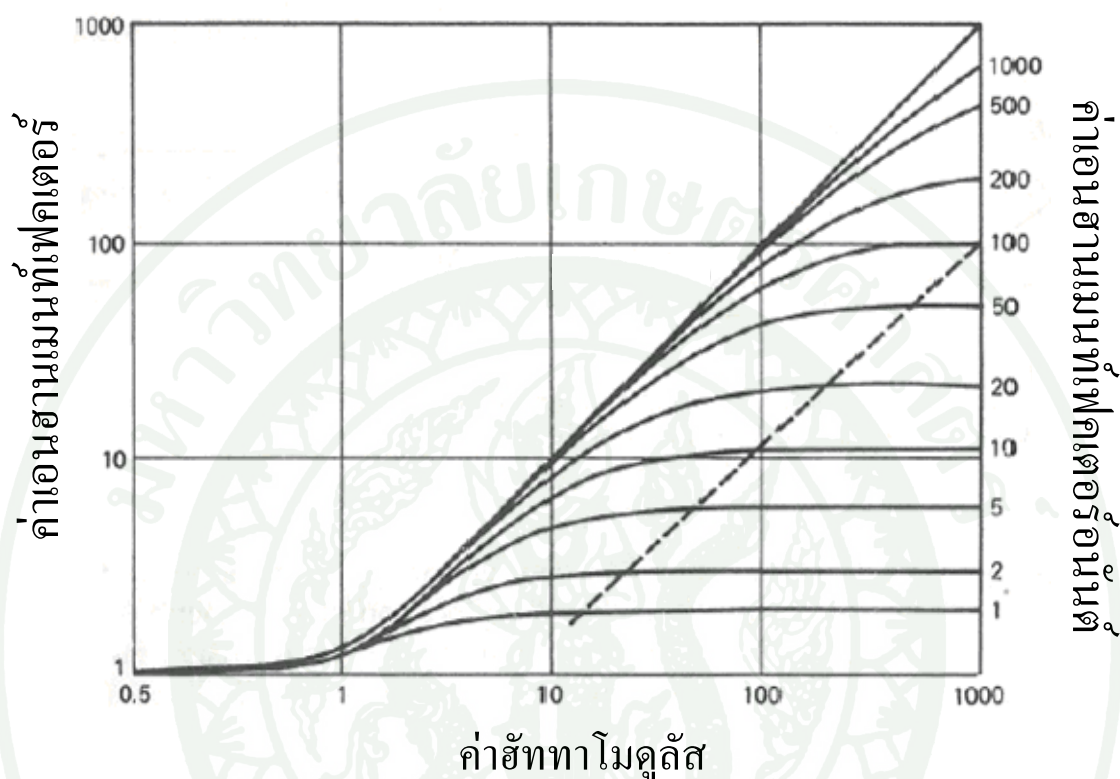
ถ้า $M_H \gg 1$ ปฏิกิริยาจะเกิดที่ฟิล์มของเหลวและอัตราการถ่ายโอนมวลเป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยา แต่ถ้า $M_H \ll 1$ ปฏิกิริยาจะไม่เกิดที่ฟิล์มของเหลว ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาในของเหลวจะเป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบว่า

1. ถ้า $M_H > 2$ ปฏิกิริยาจะเกิดที่ฟิล์ม ดังกรณีที่ 1, 2, 3, 4
2. ถ้า $0.02 < M_H < 2$ ปฏิกิริยาเกิดแบบปานกลางในฟิล์มของเหลว และในส่วนของของเหลว ดังกรณีที่ 5, 6, 7
3. ถ้า $M_H < 0.02$ ปฏิกิริยาเกิดช้า ดังกรณีที่ 8

ตารางที่ 1 ช่วงของการเกิดปฏิกิริยาและสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สอดคล้อง

ช่วงการเกิดปฏิกิริยา	สถานะ	สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา
ช้ามาก ๆ / ปฏิกิริยาควบคุม	$k_L a C_A^* \gg r_A$ $M_H \ll 1$	$R_A = r_A$
ช้า/ การถ่ายโอนมวลควบคุม	$k_L a C_A^* \ll r_A$ $M_H \ll 1$	$R_A = k_L a C_A^*$
เร็ว-เสมือนอันดับเอ็ม	$1 < M_H < E_i - 1$	$E = M_H$
เร็วอันดับเอ็ม	$M_H \approx E_i - 1$	สมการเชิงตัวเลข
ทันทีทันใด	$M_H \gg E_i - 1$	$E = E_i$

ภาพที่ 13 แสดงค่าเอนฮานเมนต์แฟกเตอร์สำหรับปฏิกิริยาของของไหลซึ่งสัมพันธ์กับค่าฮัททาโมดูลัสและค่าเอนฮานเมนต์แฟกเตอร์อันดับของช่วงการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ (Krevelens *et al.*, 1954)



ภาพที่ 13 กราฟแสดงค่าเอนฮานเมนต์แฟกเตอร์สำหรับปฏิกิริยาของของไหลซึ่งสัมพันธ์กับค่าฮัททาโมดูลัสและค่าเอนฮานเมนต์แฟกเตอร์อันดับ

7. ข้อมูลทางด้านจลนศาสตร์

ปฏิกิริยารีดอกซ์ของก๊าซไฮโดรซัลไฟด์กับสารละลายเหล็กคีเลท (Chelate Iron) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นไปสมการดังนี้



โดยที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยทั่วไปได้เคยมีผู้นำเสนอว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์และความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) คีเลท (Deberry *et al.*, 1993) คือ

$$-r_1 = k_1 C_{H_2S} C_{Fe^{3+}} \quad (16)$$

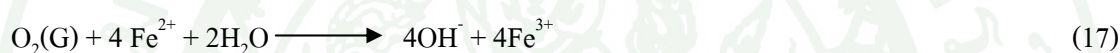
เมื่อ $-r_1$ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งคือ
อัตราการหายไปของไฮโดรเจนซัลไฟด์

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเคมีของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

C_{H_2S} คือ ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

$C_{Fe^{3+}}$ คือ ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก(III)

การเกิดปฏิกิริยาฟอสฟอไรเซชันของสารละลายเหล็ก (2+) คือเหล็ก โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตาม
สมการดังนี้



ในอดีตเคยมีผู้เสนอว่าอัตราเคมีของปฏิกิริยาการฟอสฟอไรเซชันของสารละลายเหล็ก (2+) คือเหล็กเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งกับความเข้มข้นของออกซิเจนและอันดับสองกับความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (2+) คือเหล็ก (Demmink *et al.*, 1997) คือ

$$-r_2 = k_2 C_{O_2} C_{Fe^{2+}}^2 \quad (18)$$

เมื่อ $-r_2$ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการฟอสฟอไรเซชันของสารละลายเหล็ก (2+) คือเหล็ก ซึ่งคืออัตราการหายไปของออกซิเจน

k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเคมีของปฏิกิริยาการฟอสฟอไรเซชันของสารละลายเหล็ก (2+) คือเหล็ก

C_{O_2} คือ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน

$C_{Fe^{2+}}$ คือ ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก(II)

ตารางที่ 2 ค่าคงที่จลนศาสตร์ธรรมชาติปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เคยมีผู้นำเสนอ

อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการ กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	ค่าคงที่จลนศาสตร์ ธรรมชาติ (k_1) (เมตร ³ /โมล วินาที)	ผู้เสนอ
$-r_1 = k_1 C_{H_2S} C_{Fe^{3+}}$	16.82	(Karimi <i>et al.</i> , 2008)
$-r_1 = k_1 C_{H_2S} C_{Fe^{3+}}$	9	(Deberry, 1993)

ตารางที่ 3 ค่าคงที่จลนศาสตร์ธรรมชาติปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) ที่เคยมีผู้เสนอ

อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการ พ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) ที่เคยมี	ค่าคงที่จลนศาสตร์ ธรรมชาติ (k_2) (เมตร ⁶ /โมล ² วินาที)	ผู้เสนอ
$-r_2 = k_2 C_{O_2} C_{Fe^{2+}}^2$	0.016	(Karimi <i>et al.</i> , 2008)
$-r_2 = k_2 C_{O_2} C_{Fe^{2+}}^2$	0.007 - 0.0015	(Demmink <i>et al.</i> , 1997)
$-r_2 = k_2 C_{O_2} C_{Fe^{2+}}^2$	0.122 - 0.0225	(Harm <i>et al.</i> , 1993)

7. ข้อมูลทางด้านการถ่ายโอนมวล

ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซและของเหลว พารามิเตอร์ที่จำต้องรู้ก็คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลด้านของเหลว และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว ซึ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลด้านก๊าซ ส่วนมากจะไม่ค่อยคำนึงถึง จากทฤษฎีของการดูดซึมทางเคมี สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลด้านของเหลว และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซ

และของเหลวได้ โดยมีผู้ศึกษาค่าตัวแปรนี้แต่ละระบบ เนื่องจากค่าสองค่านี้ขึ้นอยู่กับสถานะของระบบและรูปทรงของปฏิกรณ์

Nikov *et al.* (2008) ได้ศึกษาตัวแปรของการถ่ายโอนมวลในฟิล์มของของเหลวปฏิกรณ์แบบกวน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (19)

$$k_L a = 0.014 \left(\frac{P_w}{V} \right)^{0.35} U_g^{0.4} \quad (19)$$

โดยที่ $\left(\frac{P_w}{V} \right)$ คือ กำลังการกวนจำเพาะ (Specific mixing power)

U_g คือ ความเร็วของก๊าซในท่อเปล่า (Superficial gas velocity)

ส่วนในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโน้มติมีผู้นำเสนอตัวแปรการถ่ายโอนมวลในฟิล์มของเหลวตั้งสมการ (Karimi *et al.*, 2007)

$$k_L a = 0.1107 \left[1 + \frac{A_d}{A_r} \right]^{-2} U_G^{0.8979} \quad (20)$$

โดยที่ A_d และ A_r คือ พื้นที่หน้าตัดตามขวางของคาน้ำกัมเมอร์และโรเตอร์ตามลำดับ โดยพื้นที่สัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวสามารถหาได้จากสมการ (21)

$$a = \frac{6(1 - \varepsilon_L)}{d_B} \quad (21)$$

โดยที่ d_B คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองก๊าซ และ

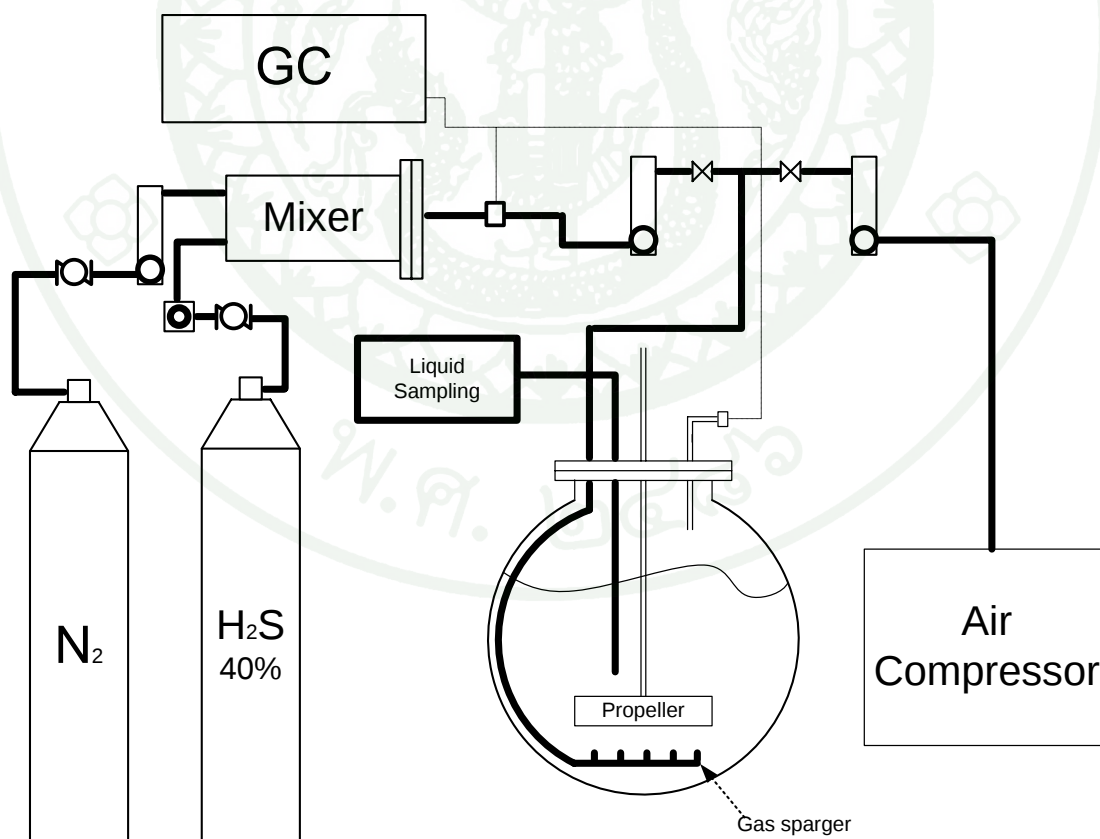
ε_L คือ สัดส่วนปริมาตรของเหลว (Liquid fraction)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ระบบปฏิกรณ์กวนแบบกึ่งเฉพาะงวด

ระบบปฏิกรณ์กวนแบบกึ่งเฉพาะงวดแสดงดังภาพที่ 14 ที่ใช้ศึกษาเพื่อหาค่าคงที่อัตรา จลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพ สารละลายเหล็ก (2+) คีเลท ระบบประกอบด้วยถังแก้วก้นกลมปริมาตร 2 ลิตร มีฝาแก้วที่ปิดโดยใช้วาล์วคลิปรัดฝากับถัง ใช้ใบกวนที่มอเตอร์สามารถปรับความเร็วได้ ซึ่งใบกวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ภายในถังแก้วประกอบด้วยหัวพ่นก๊าซ 5 รู เส้นผ่านศูนย์กลางรูเป็น 0.001 เมตร และท่อเก็บตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 เมตร จำนวนสองท่อ

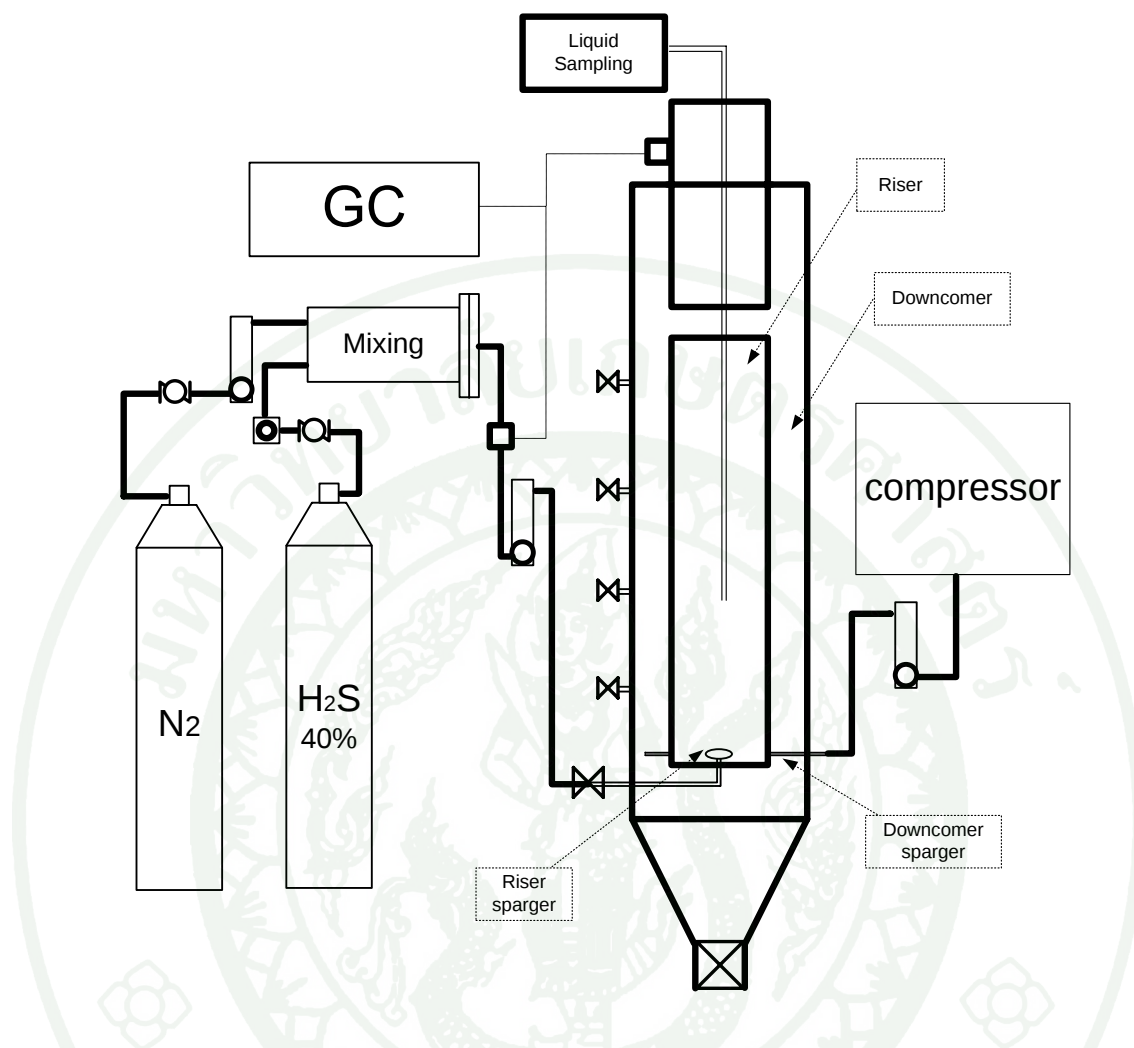


ภาพที่ 14 ระบบปฏิกรณ์กวนแบบกึ่งเฉพาะงวด

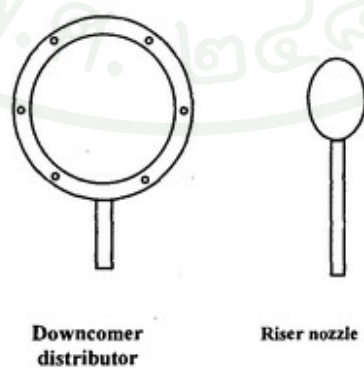
ระบบมีการเติมสารละลายเหล็ก (3+) คีเลท ตามความเข้มข้นที่ต้องการแบบเฉพาะงวด (Batch) ในปฏิกรณ์แบบกวน ส่วนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากถังก๊าซที่เข้มข้น 40% โดยโมล จะไหลผ่านวาล์วปรับอัตราการไหล (Metering valve) และวาล์วป้องกันการไหลย้อนกลับ (Cheek valve) จากนั้นจะไหลเข้าสู่ถังผสมก๊าซเพื่อทำการเจือจางก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ โดยในการทดลองจะปรับอัตราการไหล รวมทั้งความดันของก๊าซไนโตรเจน และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เหมาะสม เพื่อให้ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.3% โดยโมล ก่อนป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบกวน (รายละเอียดชุดอุปกรณ์เจือจางก๊าซแสดงในภาคผนวก ข) เก็บตัวอย่างการทดลองตามเวลาที่ต้องการ จากนั้นทำการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (3+) คีเลท ที่เปลี่ยนเป็นสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท ให้กลายเป็นสารละลายเหล็ก (3+) คีเลทอีกครั้ง โดยปิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ แล้วพ่นอากาศจากเครื่องอัดอากาศเข้าไปในถังปฏิกรณ์แบบกวน เก็บตัวอย่างการทดลองตามเวลาที่ต้องการเช่นกัน

2. ระบบปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ

ระบบปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติสำหรับการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แสดงดังภาพที่ 15 ซึ่งประกอบด้วยปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ โดยมีส่วนประกอบหลัก คือ ไรเซอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.108 เมตร สูง 0.80 เมตร และส่วนของดาวน์คัมเมอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร สูง 1.10 เมตร ในไรเซอร์จะประกอบด้วยหัวกระจายก๊าซ (Sparger) และในดาวน์คัมเมอร์จะมีท่อพ่นก๊าซที่มีลักษณะเป็นวงแหวนสามารถแสดงดังภาพที่ 16 การทำงานของระบบจะเริ่มจากการเติมสารละลายเหล็ก (3+) คีเลท ที่เตรียมไว้ตามความเข้มข้นที่ต้องการลงไปแบบเฉพาะงวดในปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.3% โดยโมล ถูกป้อนเข้าสู่ส่วนล่างของไรเซอร์ (รายละเอียดชุดอุปกรณ์เจือจางก๊าซแสดงในภาคผนวก ข) สำหรับในดาวน์คัมเมอร์ป้อนด้วยอากาศจากเครื่องอัดอากาศเพื่อใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคีเลท สารละลายเหล็กในถังปฏิกรณ์จะหมุนเวียนอยู่ในระบบ เนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างกันในไรเซอร์และดาวน์คัมเมอร์ เก็บตัวอย่างการทดลองตามเวลาที่ต้องการ



ภาพที่ 15 ระบบปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ



ภาพที่ 16 หัวกระจายก๊าซ (sparger) ที่ใช้ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ

3. เครื่องมือวิเคราะห์และเครื่องมือวัด

3.1 การวิเคราะห์ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรซัลไฟด์วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Gas Chromatography รุ่น Shimadzu GC 14 โดยมีชนิดหัววัดเป็นแบบ Flame Photometric Detector และมี Pack column ชนิด Gaskuropack 54 60/80 mesh Teflon tube 0.025x1.5 m โดยมีการวิเคราะห์ก๊าซมาตรฐาน 5 ตัวอย่างที่มีช่วงความเข้มข้นครอบคลุมความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานในการคำนวณความเข้มข้นของก๊าซจากตัวอย่างการทดลอง

3.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กคิเลทรวม (เหล็ก (3+) คิเลทและเหล็ก (2+) คิเลท)

ปริมาณเหล็กรวมซึ่งประกอบด้วยเหล็ก (3+) คิเลทและเหล็ก (2+) คิเลท สามารถวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption รุ่น Varian Spectra AA 300/400 โดยมีการเตรียมสารละลายมาตรฐาน 5 ตัวอย่างเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานเช่นกันในการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายจากตัวอย่างการทดลอง

3.3 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (2+) คิเลท

ความเข้มข้นของเหล็ก (2+) คิเลทวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV – spectrophotometer รุ่น Shimadzu UV 160 U โดยต้องเตรียมสารละลายมาตรฐาน 5 ตัวอย่างเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานในการคำนวณเช่นกัน

3.4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลาย

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลาย โดยใช้วิธี Azide modification method มีรายละเอียดในภาคผนวก ก

3.5 การวัดความเป็นกรดต่างของสารละลาย

ความเป็นกรดต่างของสารละลาย วัดโดยใช้เครื่อง pH tester รุ่น Oakton pH tester 20

วิธีการ

1. การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

นำสารหลักกิโลเมตรละลายด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้น 10 โมลต่อลูกบาศก์เมตร จากนั้นปรับค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ แล้วนำสารละลายที่เตรียมได้เทใส่ในถังปฏิกรณ์ที่ต้องการศึกษา ป้อนก๊าซผสมที่มีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.3 % โดยโมล ด้วยอัตราการไหล 37 ลิตรต่อนาที (ความเร็วก๊าซเทียบกับท่อเปล่า 0.06 เมตร/วินาที) เข้าทางส่วนล่างของปฏิกรณ์ในส่วนไรเซอร์ ส่วนของควาน์ทัมเมอร์ป้อนอากาศจากเครื่องอัดอากาศด้วยอัตราการไหล 7 ลิตรต่อนาที (ความเร็วก๊าซเทียบกับท่อเปล่า 0.01 เมตร/วินาที) โดยทำการเก็บตัวอย่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และตัวอย่างสารละลายหลักกิโลเมตรที่เวลาต่างๆ นำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารและความเป็นกรดต่างของระบบ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน ในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดังต่อไปนี้

1.1 การทดลองการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้สารละลายหลักกิโลเมตร โดยสาร $\text{NH}_3\text{C}(\text{CH}_2\text{CO})_3$ (Tris-(hydroxymethyl) aminomethane) เป็นสารปรับความเป็นกรดต่าง ซึ่งทดลองต่อเนื่อง 16 ชั่วโมง

1.2 ผลของสารปรับความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

1.3 ผลของความเป็นกรดต่างเริ่มต้นต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรท (NaOH with Sodium Citrate) เป็นสารปรับความเป็นกรดต่าง

รายละเอียดของแต่ละกรณีศึกษาแสดงในตารางที่ 4 และสถานะของการทดลองแสดงในตารางที่ 5



ตารางที่ 4 กรณีศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

กรณีศึกษา	ชนิดสารปรับความเป็นกรดต่าง	ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้น
การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	Tris-(hydroxymethyl) aminomethane	7.8
การศึกษาผลของชนิดของตัวปรับความเป็นกรดต่าง	1.Tris-(hydroxymethyl) aminomethane	7.8
	2.โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	7.8
	3.โซเดียมไฮดรอกไซด์	7.8
	4.โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซัลเฟต (อัตราส่วน 1:1)	7.8
การศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้น	โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซัลเฟต (อัตราส่วน 1:1)	8.1
		8.0
		7.8
		7.7

ตารางที่ 5 สภาวะในการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ส่วน	สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ	สัญลักษณ์	ค่า
ไรเซอร์	ความเร็วก๊าซขาเข้าเทียบกับท่อเปล่า (เมตร/วินาที)	U_{g,H_2S}	0.06
	ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้า % โดยโมล	C_{H_2S}	0.3 %
	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็กคิเลท (โมล/ม ³) (แบบเฉพาะจงดและยังไม่เกิดปฏิกิริยา)	$C_{Fe^{3+}}$	10
ดาวน์คัมเมอร์	ความเร็วก๊าซขาเข้าเทียบกับท่อเปล่า (เมตร/วินาที)	U_{g,O_2}	0.01
	ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนขาเข้า % โดยโมล	C_{O_2}	21 %
	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็กคิเลท (โมล/ม ³) (แบบเฉพาะจงดและยังไม่เกิดปฏิกิริยา)	$C_{Fe^{3+}}$	10

2. การศึกษาผลของความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพเหล็กคิเลท ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวด

การทดลองส่วนนี้จะทำการทดลองในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดดังแสดงในภาพที่ 30 โดยใช้สารละลายเหล็กคิเลทความเข้มข้น 10 โมลต่อลูกบาศก์เมตร ปรับความเป็นกรดด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรท (1:1) ให้เท่ากับ 8.0 เทาใส่ถังปฏิกรณ์แบบเฉพาะงวด จากนั้นป้อนก๊าซผสมที่มีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.3 % โดยโมล ที่ส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ สภาวะการทดลองแสดงดังตารางที่ 6 ซึ่งการทดลองทำการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ของใบกวนที่ความเร็ว 100, 200, 300, 400 และ 500 รอบต่อนาที โดยทำการเก็บตัวอย่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และตัวอย่างสารละลายเหล็กคิเลทที่เวลาต่างๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสาร จากนั้นทำการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คิเลทให้เปลี่ยนกลับเป็นสารละลายเหล็ก (3+) คิเลทอีกครั้งโดยปัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ แล้วพ่นอากาศจากเครื่องอัดอากาศเข้าไปในถังปฏิกรณ์ โดยปรับความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนที่ความเร็ว 400 และ 500 รอบต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างการทดลองตามเวลาที่ต้องการเช่นกัน

ตารางที่ 6 สภาวะการทดลองของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คิเลท ในถังปฏิกรณ์กวนแบบกึ่งเฉพาะงวด โดยความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนแตกต่างกัน

สภาวะการทดลองอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ	สัญลักษณ์	ค่า
ความเร็วก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าเทียบกับท่อเปล่า (เมตร/วินาที)	U_{G,H_2S}	0.01
ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้า % โดยโมล	C_{H_2S}	0.3 %
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็ก (3+) คิเลท (โมล/ม ³)	$C_{Fe^{3+}}$	9.97
ความเร็วก๊าซออกซิเจนเข้าเทียบกับท่อเปล่า (เมตร/วินาที)	U_{G,O_2}	0.01
ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนเข้า % โดยโมล	C_{O_2}	21 %
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็ก (2+) คิเลท (โมล/ม ³)	$C_{Fe^{2+}}$	9.75

3. การทดลองเพื่อศึกษาจลนศาสตร์

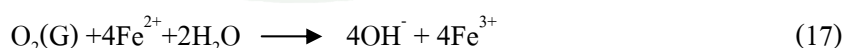
ขั้นตอนการเตรียมสารละลายและการทดลองทำเช่นเดียวกับการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ กล่าวคือ เตรียมสารละลายเหล็กคิเลทให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ ปรับสภาพความเป็นกรดค้างในระบบด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียม-ซิเตรท เพื่อให้ได้ความเป็นกรดค้างเริ่มต้นเท่ากับ 8.0 การศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทดลองโดยการป้อนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้น 0.3 % โดยโมลเข้าทางด้านล่างของปฏิกรณ์ที่ศึกษา ส่วนการศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพของสารละลายเหล็กคิเลทที่ใช้แล้วจะป้อนอากาศอัดจากเครื่องอัดอากาศ ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และตัวอย่างสารละลายเหล็กคิเลทที่เวลาต่างๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสาร โดยการทดลองแยกเป็นกรณีศึกษาแสดงในตารางที่ 7 และคุณสมบัติทางกายภาพของสารแสดงในตารางที่ 8 การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์กับสารละลายเหล็กคิเลทจะเป็นดังสมการ



โดยทั่วไปได้มีผู้เสนอว่าอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์และความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) คิเลท (Deberry *et al.*, 1993) คือ

$$-r_1 = k_1 C_{\text{H}_2\text{S}} C_{\text{Fe}^{3+}} \quad (16)$$

การเกิดปฏิกิริยาฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คิเลท โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามสมการ



อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คิเลท เคยมีผู้เสนอว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งกับความเข้มข้นของออกซิเจนและอันดับสองกับความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (2+) คิเลท (Demmink *et al.*, 1997) คือ

$$-r_2 = k_2 C_{\text{O}_2} C_{\text{Fe}^{2+}}^2 \quad (18)$$

ตารางที่ 7 สภาวะการทดลองกรณีศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติ

สภาวะการทดลอง	สัญลักษณ์	กรณีศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติ					
		กรณีที่1	กรณีที่2	กรณีที่3	กรณีที่4	กรณีที่5	กรณีที่6
ความเร็วก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าเทียบกับท่อเปล่า (เมตร/วินาที)	U_{G,H_2S}	0.01	-	0.01	-	0.06	-
ความเร็วอากาศเข้าเทียบกับท่อเปล่า (เมตร/วินาที)	U_{G,O_2}	-	0.01	-	0.01	-	0.01
ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้า % โดยโมล	C_{H_2S}	0.3 %	-	0.3 %	-	0.3 %	-
ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนในอากาศเข้า % โดยโมล	C_{O_2}	-	21%	-	21%	-	21%
ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) กิโลกรัมเริ่มต้น (โมล/เมตร ³)	$C_{Fe^{3+}}$	9.95	-	9.95	-	19.76	-
ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (2+) กิโลกรัมเริ่มต้น (โมล/เมตร ³)	$C_{Fe^{2+}}$	-	9.75	-	9.75	-	18.60
สัดส่วนปริมาตรของเหลว	ε_L	0.9410	0.9410	0.9410	0.9410	0.9375	0.9820
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อก๊าซ (เมตร)	d_B	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06
กำลังการกวนจำเพาะ (วัตต์/เมตร ³)	P/V	10.7	10.7	10.7	10.7	-	-
อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดตามขวางของคาน้ำคัมเมอร์ต่อโรเตอร์	A_d/A_r	-	-	-	-	1	1

ตารางที่ 7 (ต่อ)

- หมายเหตุ กรณีที่1 ปฏิบัติการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อไม่พิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล
- กรณีที่2 ปฏิบัติการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อไม่พิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล
- กรณีที่3 ปฏิบัติการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล
- กรณีที่4 ปฏิบัติการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล
- กรณีที่5 ปฏิบัติการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล
- กรณีที่6 ปฏิบัติการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

ตารางที่ 8 คุณสมบัติทางกายภาพของสาร

คุณสมบัติทางกายภาพของสาร	สัญลักษณ์	ค่า	อ้างอิง
ค่าเอนรีของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (กิโกลาตคาล เมตร ³ /โมล)	H_{H_2S}	1.95	(Deberry, 1993)
ค่าเอนรีของก๊าซออกซิเจน (กิโกลาตคาล เมตร ³ /โมล)	H_{O_2}	120.55	(Demmink, 1997)
ค่าสภาพการแพร่ของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (เมตร ² /วินาที)	D_{H_2S}	1.44×10^{-9}	(Wubs, 1994)
ค่าสภาพการแพร่ของก๊าซออกซิเจน (เมตร ² /วินาที)	D_{O_2}	2.25×10^{-9}	(Demmink, 1997)
ค่าสภาพการแพร่ของสารละลายเหล็ก (3+) คีเลท (เมตร ² /วินาที)	$D_{Fe^{3+}}$	0.54×10^{-9}	(Wubs, 1994)
ค่าสภาพการแพร่ของสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท (เมตร ² /วินาที)	$D_{Fe^{2+}}$	0.54×10^{-9}	(Wubs, 1994)

3.1 การทดลองเพื่อศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติในปฏิกิริยาดังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อไม่พิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

ในการศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติในปฏิกิริยาดังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดนี้มีข้อสมมุติฐานว่าระบบมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ส่งผลให้การถ่ายโอนมวลมีค่าน้อยมาก ทำให้อัตราการเกิดของปฏิกิริยาโดยรวมขึ้นอยู่กับอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติเพียงอย่างเดียว ซึ่งการลดลงของสารละลายเหล็ก (3+) ที่เลทกับเวลาในเฟสของเหลว (Liquid phase) เท่ากับอัตราการหายไปของเหล็ก (3+) ที่เลทอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยา สมการการดุลมวลของเหล็ก (3+) ที่เลทในปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในปฏิกิริยาดังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดแสดงดังสมการ (22)

$$\frac{\varepsilon_{L,I}}{v_I} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right) = (-R_I) \quad (22)$$

โดยที่ $\varepsilon_{L,I}$ คือ สัดส่วนปริมาตรของเหลวของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์, $\frac{V_L}{V_R}$
 $-R_I$ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
 ซึ่งคืออัตราการรวมของการหายไปของไฮโดรเจนซัลไฟด์
 t คือ เวลาการเกิดปฏิกิริยา
 v_I คือ สัมประสิทธิ์ปริมาตรสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ดังสมการ (15)

เมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมขึ้นอยู่กับอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติเพียงอย่างเดียว

$$-R_I = r_I = k_I C_{H_2S} C_{Fe^{3+}} \quad (23)$$

ดังนั้นสมการ (22) สามารถเขียนในรูป

$$\frac{\varepsilon_{L,I}}{v_I} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right) = k_I C_{H_2S} C_{Fe^{3+}} \quad (24)$$

ส่วนสมการการคูณมวลของเหล็ก (2+) ที่เลขของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพของสารละลายเหล็ก (2+) ที่เลขในปฏิกิริยาดังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดแสดงดังสมการ (25)

$$\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right) = (-R_2) \quad (25)$$

โดยที่ $\varepsilon_{L,2}$ คือ สัดส่วนปริมาตรของเหลวของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) ที่เลข
 $-R_2$ คือ อัตราการเกิดของปฏิกิริยาโดยรวมของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) ที่เลข ซึ่งคืออัตรารวมของการหายไปของออกซิเจน
 v_2 คือ สัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพของสารละลายเหล็ก (2+) ที่เลข ดังสมการ (17)

เนื่องจากระบบไม่คิดผลของอัตราการถ่ายโอนมวลสมการ (25) สามารถเขียนได้ในสมการ (26)

$$\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right) = k_2 C_{O_2} C_{Fe^{2+}}^2 \quad (26)$$

โดยค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) ที่เลขสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์

ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)$ กับ $C_{H_2S} C_{Fe^{3+}}$ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)$ กับ $C_{O_2} C_{Fe^{2+}}^2$ ตามลำดับ

3.2 การทดลองเพื่อศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติในปฏิกิริยาดังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

ในการหาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติ ในปฏิกิริยาดังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวด เมื่อมีข้อสมมุติฐานว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมมีผลของการถ่ายโอนมวลและอัตราการเกิดปฏิกิริยาจลนศาสตร์ธรรมชาติ ส่งผลทำให้ต้องพิจารณาอิทธิพลของทั้งสองส่วน อัตราการ

เกิดปฏิกิริยาโดยรวมของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท สามารถเขียนได้ในดังสมการ

สำหรับปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$-R_1 = k_{H_2S,L} a_1 C_{H_2S}^* E_1 \quad (27ก)$$

สำหรับปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท

$$-R_2 = k_{O_2,L} a_2 C_{O_2}^* E_2 \quad (27ข)$$

โดยที่ $k_{H_2S,L}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในของเหลว

$k_{O_2,L}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของก๊าซออกซิเจนในของเหลว

$C_{H_2S}^*$ คือ ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่พื้นสัมผัสของเหลว

$C_{O_2}^*$ คือ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่พื้นสัมผัสของเหลว

a_1 คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของก๊าซและของเหลวของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

a_2 คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของก๊าซและของเหลวของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพของสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท

E_1 คือ ค่าเอนฮานเมนต์เฟลคเตอร์ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

E_2 คือ ค่าเอนฮานเมนต์เฟลคเตอร์ของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพของสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท

ดังนั้นเมื่อคิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมที่พิจารณาผลของการถ่ายโอนมวลแล้ว สมการการควบคุมมวลของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพของสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทในสมการ (22) และ (25) จะได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังสมการ (28)

สำหรับปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$\frac{\varepsilon_{L,I}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right) = k_{H_2S,L} a_1 C_{H_2S}^* E_1 \quad (28ก)$$

สำหรับปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท

$$\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right) = k_{O_2,L} a_2 C_{O_2}^* E_2 \quad (28ข)$$

E_1 และ E_2 สามารถคำนวณได้จากการจัดรูปของสมการ (28) เป็นดังสมการ

สำหรับปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$E_1 = \frac{\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)}{k_{H_2S,L} a_1 C_{H_2S}^*} \quad (29ก)$$

สำหรับปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท

$$E_2 = \frac{\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)}{k_{O_2,L} a_2 C_{O_2}^*} \quad (29ข)$$

ถ้าการทดลองอยู่ในช่วงของปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่ง (Pseudo first order) ค่าเอนธานเมนท์เฟลเตอร์และค่าอัตราโมดูลัสจะมีค่าใกล้เคียงกัน

$$E \cong M_H \quad (30)$$

ซึ่งค่าอัตราโมดูลัสของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทแสดงในสมการ (31)

สำหรับปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$M_{H,1} = \frac{\sqrt{k_1 C_{Fe^{3+}} D_{H_2S}}}{k_{H_2S,L}} \quad (31ก)$$

สำหรับปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท

$$M_{H,2} = \frac{\sqrt{k_2 C_{Fe^{2+}}^2 D_{O_2}}}{k_{O_2,L}} \quad (31ข)$$

โดยที่ D_{H_2S} คือ ค่าสภาพการแพร่ (Diffusivity) ของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

D_{O_2} คือ ค่าสภาพการแพร่ของก๊าซออกซิเจน

ดังนั้นจากสมการ (28) (30) และ (31) ค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท สามารถหาได้ในสมการ (32)

สำหรับปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right) = \sqrt{k_1 C_{Fe^{3+}} D_{H_2S}} (a_1 C_{H_2S}^*) \quad (32ก)$$

สำหรับปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท

$$\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right) = \sqrt{k_2 C_{Fe^{2+}}^2 D_{O_2}} (a_2 C_{O_2}^*) \quad (32ข)$$

ซึ่งค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทสามารถหาได้จากความชันของกราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right) (a_1 C_{H_2S}^*)^{-1} D_{H_2S}^{-0.5}$ กับ $C_{Fe^{3+}}^{0.5}$ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right) (a_2 C_{O_2}^*)^{-1} D_{O_2}^{-0.5}$ กับ $C_{Fe^{2+}}$ ตามลำดับ

โดยตัวแปรของการถ่ายโอนมวลสำหรับปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดที่เคยมีผู้เสนอไว้แสดงดังสมการ (33) และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวสามารถคำนวณได้จากสมการ (34) ซึ่งค่าตัวแปรของการถ่ายโอนมวลนี้สามารถใช้ในการตรวจสอบช่วงของการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาทั้งสองได้

$$k_L a = 0.014 \left(\frac{P_w}{V} \right)^{0.35} U_G^{0.4} \quad (33)$$

โดยที่ $\left(\frac{P_w}{V}\right)$ คือ กำลังการกวนจำเพาะ

U_G คือ ความเร็วของก๊าซในท่อเปล่า

$$a = \frac{6(1-\varepsilon_L)}{d_B} \quad (34)$$

โดยที่ d_B คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองก๊าซ

ε_L คือ สัดส่วนปริมาตรของเหลว (Liquid fraction)

3.3 การทดลองเพื่อศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติ ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน
อัตโนมัติเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

ในการศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล การทดลองนี้จะแยกพิจารณาส่วนของไรเซอร์และส่วนของคานคัมเมอร์ออกจากกัน โดยทำให้ของเหลวในปฏิกรณ์ไม่หมุนเวียนในระบบ เหตุผลเนื่องจากปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในถังปฏิกรณ์ชนิดนี้ ซึ่งไม่สามารถพิจารณาอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาทั้งสองส่วนได้ จึงพิจารณาส่วนของไรเซอร์และส่วนของคานคัมเมอร์เป็นถังปฏิกรณ์แบบกึ่งเฉพาะจง เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายเหล็กคัลเลทในส่วนของไรเซอร์และส่วนของคานคัมเมอร์นั้นเปลี่ยนแปลงตามความสูงของถังปฏิกรณ์ ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายเหล็กคัลเลทในทั้งสองส่วนจะใช้ความเข้มข้นเฉลี่ย โดยการทดลองนี้ตั้งข้อสมมุติฐานว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมมีผลของการถ่ายโอนมวลและอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติ จึงสามารถใช้กระบวนการหาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติเดียวกับการทดลองเพื่อศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะจงเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล โดยค่าของตัวแปรของการถ่ายโอนมวลจะเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทดลองและชนิดของถังปฏิกรณ์ ดังนั้นในการศึกษากรณีนี้ใช้ค่าของตัวแปรของการถ่ายโอนมวลที่เคยมีผู้เสนอตั้งสมการ (35) โดยพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวสามารถใช้สมการ (34)

$$k_L a = 0.1107 \left[1 + \frac{A_d}{A_r} \right]^{-2} U_G^{0.8979} \quad (35)$$

โดยที่ A_d คือ พื้นที่หน้าตัดตามขวางของส่วนคาน้ำคัมเมอร์

A_r คือ พื้นที่หน้าตัดตามขวางของส่วนไรเซอร์

4. การทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรการถ่ายโอนมวล

การทดลองใช้สารละลายเหล็กกลีเซอที่มีความเข้มข้นที่ต้องการ โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายให้ได้ 8.0 ด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรท (NaOH with Sodium Citrate) เติมสารละลายที่เตรียมได้ในส่วนไรเซอร์ของถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิตี ที่ทำการปิดทางเข้าของของเหลวที่จะไหลเข้าไรเซอร์จากส่วนของคาน้ำคัมเมอร์ ทำให้ระบบไม่มีการหมุนเวียนของของเหลวในระบบ จากนั้นป้อนก๊าซผสมที่มีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.3% โดยโมล เข้าสู่ไรเซอร์ ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซและตัวอย่างสารละลายตามเวลา แล้วนำไปวิเคราะห์ทางเคมี หลังจากการทำปฏิกิริยากำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เสร็จสิ้น จะนำสารละลายเหล็กกลีเซอที่เสื่อมสภาพเทใส่ส่วนของคาน้ำคัมเมอร์ที่ไม่มีการไหลเวียนของของเหลวเช่นกัน แล้วทำการฟื้นฟูสภาพด้วยการป้อนอากาศจากเครื่องอัดอากาศเข้าคาน้ำคัมเมอร์ ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายตามเวลา แล้วนำไปวิเคราะห์ตามกระบวนการของตัวอย่างแต่ละชนิดเช่นกัน โดยสภาวะการทดลองกรณีศึกษาตัวแปรของการถ่ายโอนมวลแต่ละกรณีแสดงดังตารางที่ 9

4.1 การทดลองเพื่อศึกษาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลว ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิตี

การศึกษาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลว (a) ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิตี เมื่อไม่ให้มีการหมุนเวียนของของเหลวในระบบ ดังนั้นจึงสามารถพิจารณา ระบบได้เช่นเดียวกับการทดลองส่วนก่อนหน้านี้ (หัวข้อ 3.3) แต่ค่าตัวแปรต่างๆ ได้มาจากการทดลอง ซึ่งทำการทดลองให้สภาวะของระบบเกิดปฏิกิริยาในช่วงปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่ง

(Pseudo first order regime) ดังนั้นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็กคิเลทสามารถคำนวณได้จากสมการ (32)

สำหรับปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right) = a_1 \sqrt{k_1 C_{Fe^{3+}} D_{H_2S}} (C_{H_2S}^*) \quad (32ก)$$

สำหรับปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คิเลท

$$\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right) = a_2 \sqrt{k_2 C_{Fe^{2+}}^2 D_{O_2}} (C_{O_2}^*) \quad (32ข)$$

สามารถใช้หาพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวในส่วนของโรเตอร์และส่วน

ดาวน์คัมเมอร์ โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)$ กับ $\sqrt{k_1 D_{H_2S} C_{Fe^{3+}}} C_{H_2S}^*$

และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)$ กับ $\sqrt{k_2 D_{O_2} C_{Fe^{2+}}^2} C_{O_2}^*$ ตามลำดับ

4.2 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ในปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิตี

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (k_L) ในปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิตี ซึ่งไม่ให้มีการหมุนเวียนของของเหลวในระบบจึงสามารถพิจารณาระบบเช่นเดียวกับการทดลองส่วนก่อนหน้า (หัวข้อ 1.3.3) โดยทำการทดลองให้สถานะของระบบเกิดปฏิกิริยาในช่วงเกิดปฏิกิริยาทันทีทันใด (Instantaneous reaction) ซึ่งในสถานะนี้ค่าเอนธานเมนท์เฟลคเตอร์จะมีค่าประมาณค่าเอนธานเมนท์เฟลคเตอร์อนันต์

$$E \cong E_i \quad (36)$$

ซึ่งค่าเอนธานเมนท์เฟลคเตอร์อนันต์ (E_i) แสดงได้ดังสมการ

สำหรับปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$E_{i,1} = 1 + \frac{D_{Fe^{3+}} C_{Fe^{3+}}}{v_1 D_{H_2S} C_{H_2S}} \quad (37ก)$$

สำหรับปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท

$$E_{i,2} = 1 + \frac{D_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}}{v_2 D_{O_2} C_{O_2}} \quad (37ข)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (k_L) สามารถคำนวณได้จากสมการ (38) ซึ่งได้จากการแทนสมการ (36) และ (37) ในสมการ (27)

สำหรับปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right) = k_{H_2S,L} a_1 C_{H_2S}^* \left(1 + \frac{D_{Fe^{3+}} C_{Fe^{3+}}}{v_1 D_{H_2S} C_{H_2S}} \right) \quad (38ก)$$

สำหรับปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท

$$\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right) = k_{O_2,L} a_2 C_{O_2}^* \left(1 + \frac{D_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}}{v_2 D_{O_2} C_{O_2}} \right) \quad (38ข)$$

โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)$ กับ $a_1 C_{H_2S}^* \left(1 + \frac{D_{Fe^{3+}} C_{Fe^{3+}}}{v_1 D_{H_2S} C_{H_2S}} \right)$

สำหรับหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในไรเซอร์และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

$\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)$ กับ $a_2 C_{O_2}^* \left(1 + \frac{D_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}}{v_2 D_{O_2} C_{O_2}} \right)$ สำหรับหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลใน

คาน้ำคัมเมอร์

ตารางที่ 9 สภาวะการทดลองกรณีศึกษาตัวแปรของการถ่ายโอนมวล

สภาวะ		กรณีศึกษา			
		กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
ความเร็วก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าเทียบกับท่อเปล่า (เมตร/วินาที)	U_{G,H_2S}	0.06	-	0.06	-
ความเร็วอากาศเข้าเทียบกับท่อเปล่า (เมตร/วินาที)	U_{G,O_2}	-	0.01	-	0.01
ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในอากาศเข้า % โดยโมล	C_{H_2S}	0.3%	-	0.3%	-
ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนในอากาศเข้า % โดยโมล	C_{O_2}	-	21%	-	21%
ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) กิโลกรัมเริ่มต้น (โมล/เมตร ³)	$C_{Fe^{3+}}$	9.95	-	19.70	-
ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (2+) กิโลกรัมเริ่มต้น (โมล/เมตร ³)	$C_{Fe^{2+}}$	-	8.52	-	18.60
สัดส่วนปริมาตรของเหลว	ε_L	0.9375	0.9820	0.9375	0.9820
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อก๊าซ (เมตร)	d_B	0.004	0.006	0.004	0.006
อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดตามขวางของดาวน์คัมเมอร์ต่อไรเซอร์	A_d/A_r	1	1	1	1

หมายเหตุ กรณีที่ 1 ทดลองเพื่อศึกษาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวในส่วนไรเซอร์ของปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ

กรณีที่ 2 ทดลองเพื่อศึกษาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวในส่วนดาวน์คัมเมอร์ของปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ

กรณีที่ 3 ทดลองเพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลระหว่างก๊าซและของเหลวในส่วนไรเซอร์ของปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ

กรณีที่ 4 ทดลองเพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลระหว่างก๊าซและของเหลวในส่วนดาวน์คัมเมอร์ของปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ

ผลและวิจารณ์

1. การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เป็นองค์ประกอบในก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกรนั้นมีความเข้มข้นประมาณ 0.15-0.3 % โดยโมล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองที่ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.3 % โดยโมลในก๊าซผสม ซึ่งป้อนเข้าถังปฏิกรณ์เพื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายเหล็กคิเลท ในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยผลการทดลองแสดงดังนี้

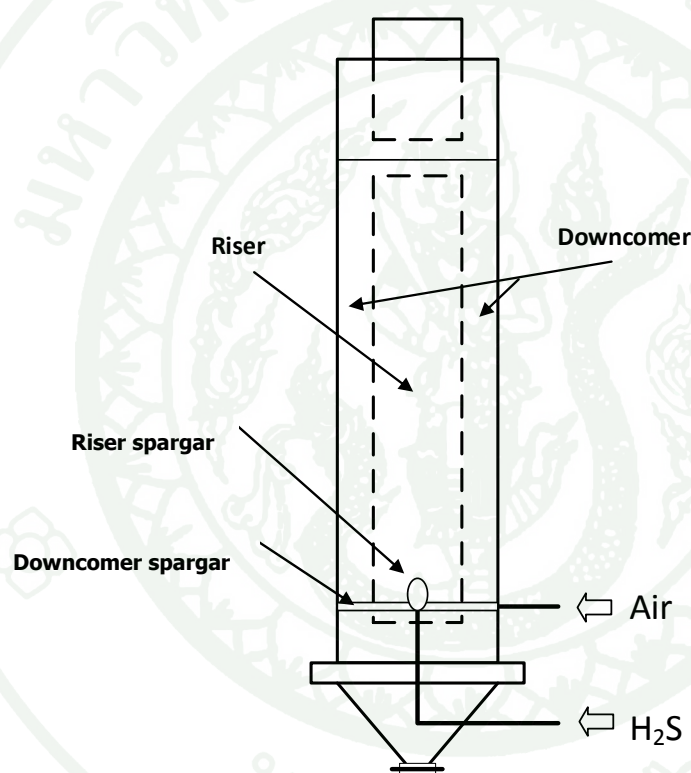
1.1 การทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้สารละลายเหล็กคิเลทในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้สารละลายเหล็กคิเลทในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติแสดงในภาพที่ 17 โดยประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์คำนวณจากสมการ (39)

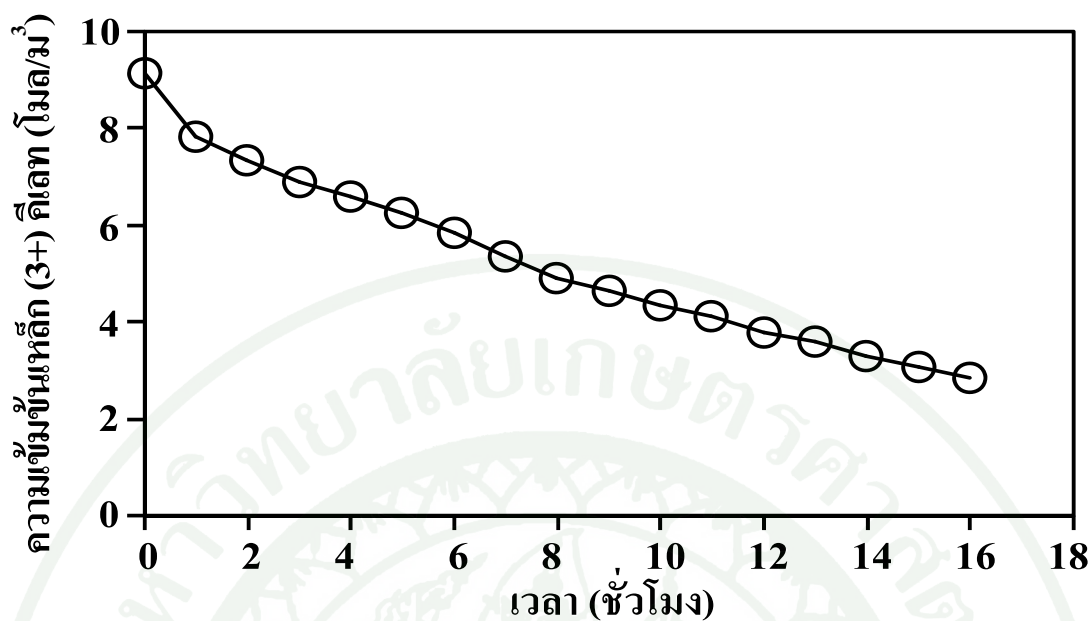
$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด} &= \frac{\text{ความเข้มข้นก๊าซขาเข้า} - \text{ความเข้มข้นก๊าซขาออก}}{\text{ความเข้มข้นก๊าซขาเข้า}} \times 100 \\ \text{ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์} & \\ (\%) & \end{aligned} \quad (39)$$

การทดลองของประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติตามเวลาและมีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคิเลทในส่วนควาน์คัมเมอร์ไม่สมบูรณ์แสดงดังภาพที่ 18 ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กที่สามารถทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีน้อยลงดังแสดงในภาพที่ 19 ส่งผลให้ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาในเฟสของของเหลวมีมากขึ้น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในเฟสของก๊าซจึงละลายเข้าไปในเฟสของของเหลวได้น้อยลง ส่งผลให้ก๊าซ

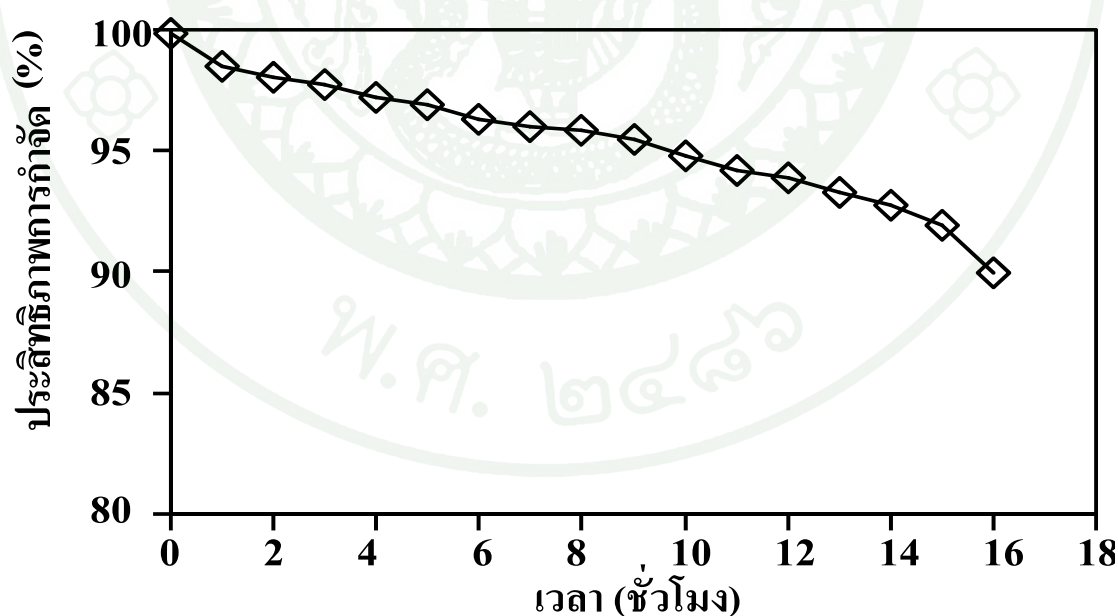
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ไม่ละลายถูกปล่อยออกจากระบบมากขึ้น เมื่อนำมาคิดประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ตามสมการ (39) จึงมีค่าน้อยลงตามเวลา ส่วนความเป็นกรดต่าง (pH) ของระบบลดลงตามเวลาดังแสดงในภาพที่ 20 เนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพของเหล็กไม่สมบูรณ์ ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาในเฟสของเหลวมีมากขึ้น และเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อละลายในสารละลายจะมีคุณสมบัติเป็นกรด เมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้ความเป็นกรดของระบบเพิ่มขึ้น ความเป็นกรดต่างของระบบจึงลดลงตามเวลา



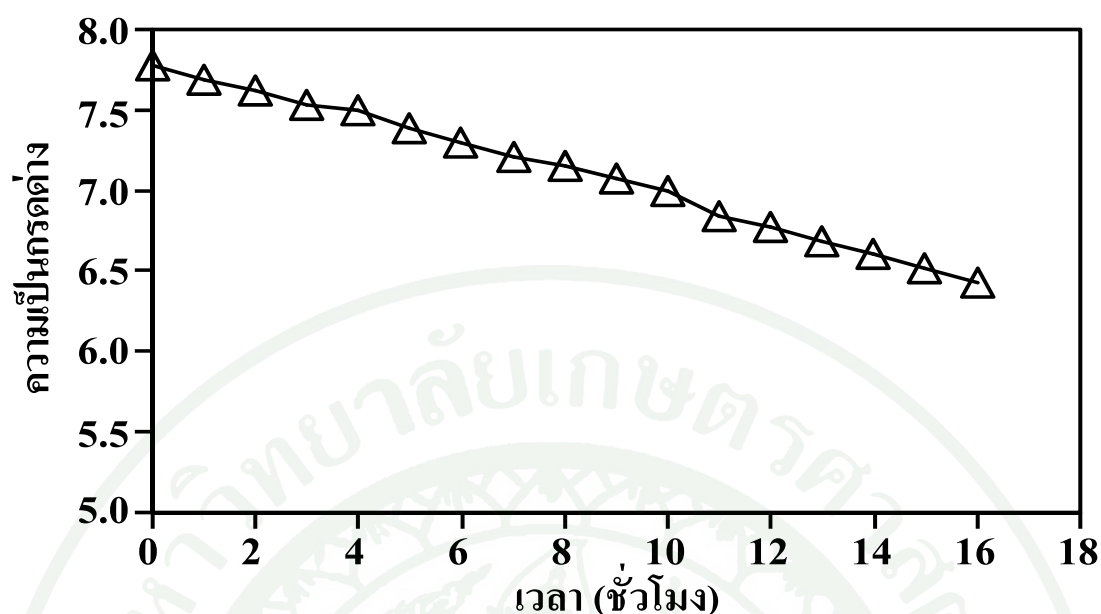
ภาพที่ 17 ถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัตที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อเนื่อง 16 ชั่วโมง ด้วยสารละลายหลักคีเลทโดยใช้ Tris (hydroxymethyl) aminomethane เป็นสารปรับความเป็นกรดต่างในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ



ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของหลัก (3+) คีเลทในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อเนื่อง 16 ชั่วโมง ด้วยสารละลายหลักคีเลท โดยใช้ Tris (hydroxymethyl) aminomethane เป็นสารปรับความเป็นกรดต่างในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ

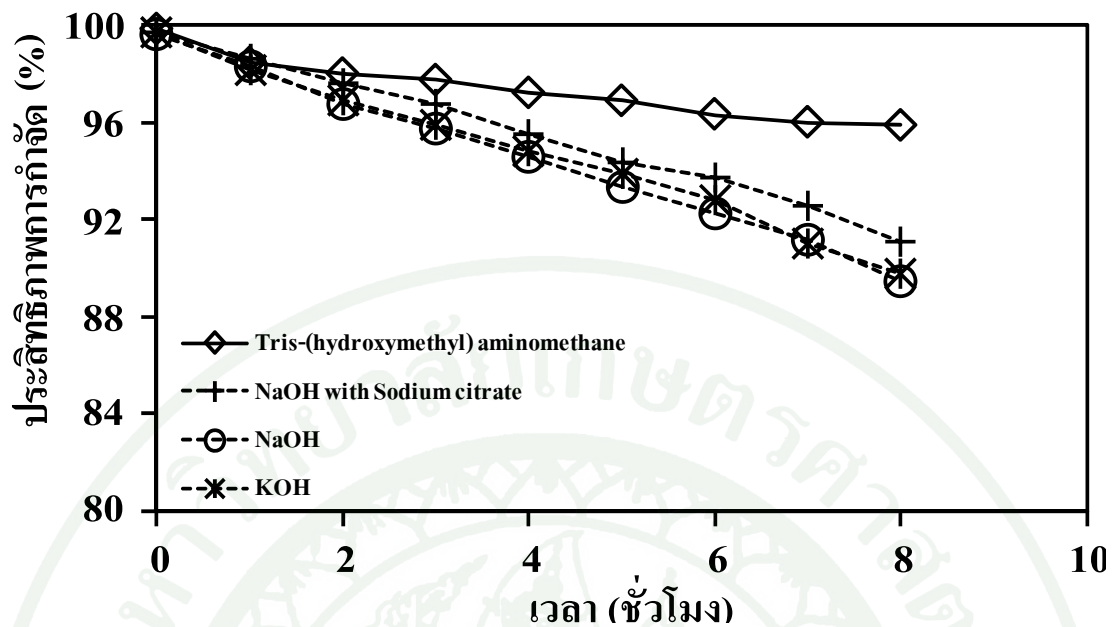


ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่างของสารละลายในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อเนื่อง 16 ชั่วโมง ด้วยสารละลายเหล็กคิเลทโดยใช้ Tris (hydroxymethyl) aminomethane เป็นสารปรับความเป็นกรดต่างในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ

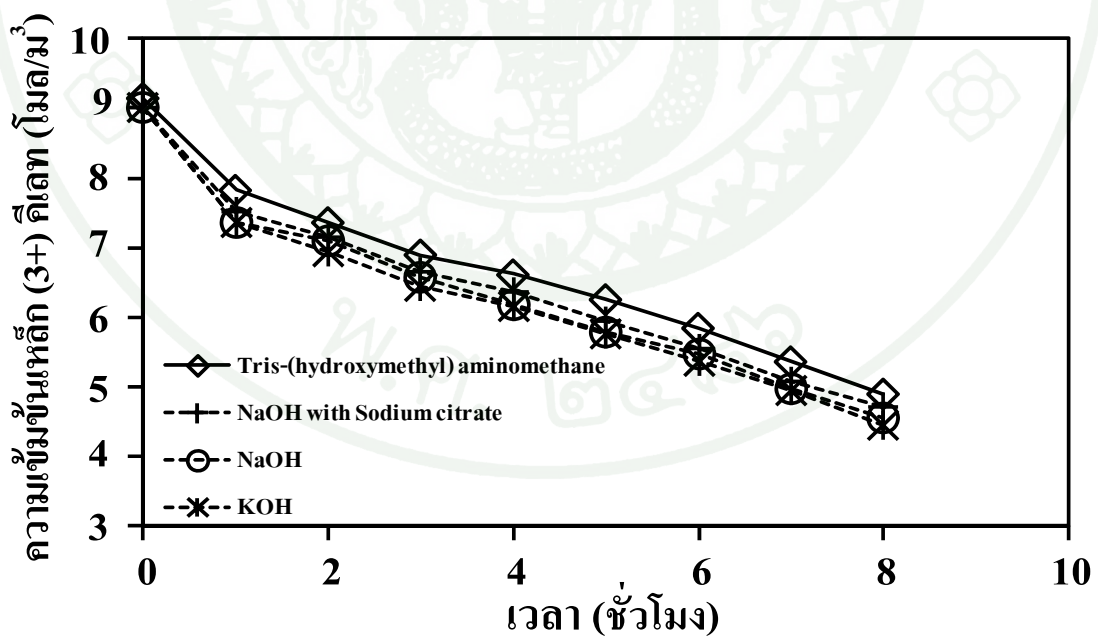
1.2 ผลของสารปรับความเป็นกรดต่างต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

เนื่องจากสารปรับความเป็นกรดต่าง (pH) ที่ใช้อยู่เดิมมีราคาสูง จึงไม่เหมาะกับการใช้งานในสถานะจริงของฟาร์มสุกรที่ต้องใช้สารในปริมาณมาก เพราะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกสารปรับความเป็นกรดต่างชนิดอื่นที่มีราคาถูกโดยประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงหรือสูงกว่าสารปรับความเป็นกรดต่างชนิดเดิม งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ใช้สารปรับความเป็นกรดต่างของสารละลายเหล็กคิเลทต่างชนิด และมีราคาแตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบกับสาร Tris (hydroxymethyl) aminomethane ซึ่งเป็นสารปรับความเป็นกรดต่างที่ใช้อยู่เดิม โดยสารปรับความเป็นกรดต่างที่ศึกษาคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรท (NaOH with Sodium Citrate) โดยสถานะในการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งความเป็นกรดต่างเริ่มต้นของสารละลายเหล็กคิเลทจะถูกปรับให้เท่ากับ 7.8 เช่นเดียวกันทุกกรณีศึกษาด้วยสารปรับความเป็นกรดต่างต่างชนิดกัน โดยผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 21, 22 และ 23 ภาพที่ 21 แสดงให้เห็นว่าสาร Tris (hydroxymethyl) aminomethane ซึ่งเป็นสารปรับความเป็นกรดต่างชนิดเดิมเมื่อใช้เป็นสารปรับ

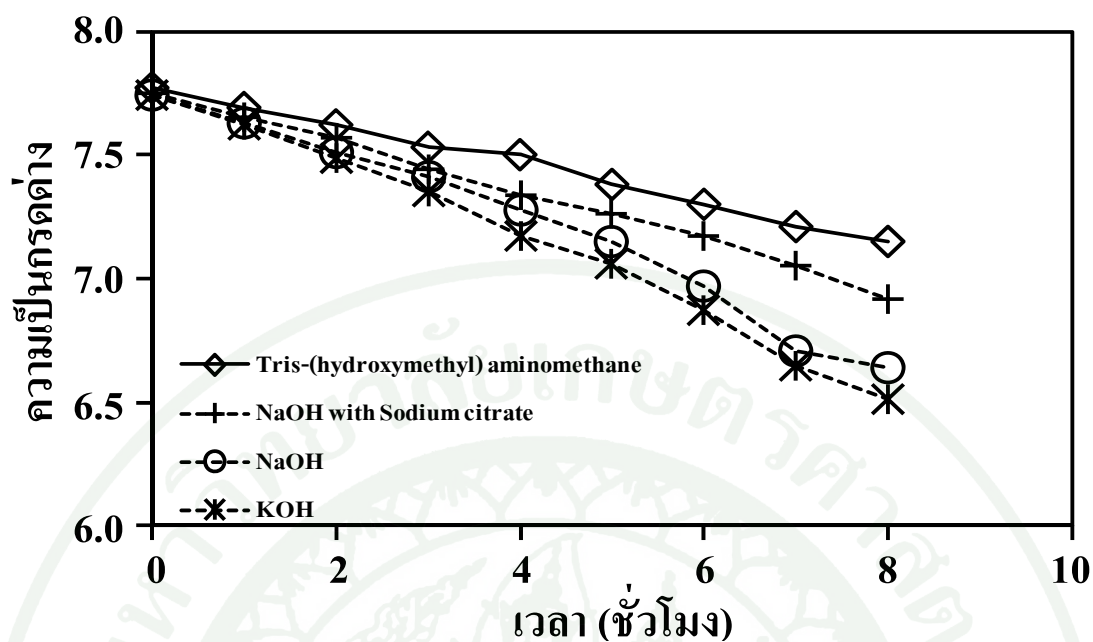
ความเป็นกรดต่างของสารละลายหลักคือเลขในระบบให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุด รองลงมาคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรท โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับ โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพคล้ายคลึงกัน แต่เมื่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรทจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงขึ้นแต่ยังต่ำกว่าประสิทธิภาพของสารปรับความเป็นกรดต่างชนิดเดิม จากภาพที่ 22 พบว่าความเข้มข้นของหลัก (3+) ที่เลขในระบบ ยังคงลดลงตามเวลาทุกกรณีศึกษา เนื่องจากการฟื้นฟูสภาพของหลักคือเลขในส่วนของการคัมเมอร์ไม่สมบูรณ์ ภาพที่ 23 แสดงการลดลงของความเป็นกรดต่างของสารละลายหลักซึ่งใช้สารปรับความเป็นกรดต่างชนิดกันในระบบ ซึ่งสารละลายหลักที่ใช้สาร Tris (hydroxymethyl) aminomethane ปรับความเป็นกรดต่างจะลดลงช้าที่สุด รองลงมาคือใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรท โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับ จากผลการทดลองทุกกรณีศึกษาพบว่าสารปรับความเป็นกรดต่างชนิดเดิม คือ Tris (hydroxymethyl) aminomethane ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด แต่เมื่อนำมาคิดราคาต่อปริมาณการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ดังแสดงในภาพ 24 พบว่าสารปรับความเป็นกรดต่างชนิดเดิมมีราคาต่อปริมาณการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุด เนื่องจากสารเคมีมีราคาแพง ซึ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรทจะคุ้มทุนกว่าเพราะราคาถูกกว่ามากและประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรทเหมาะสมที่จะใช้เป็นสารปรับความกรดต่างในสถานะการดำเนินงานจริง



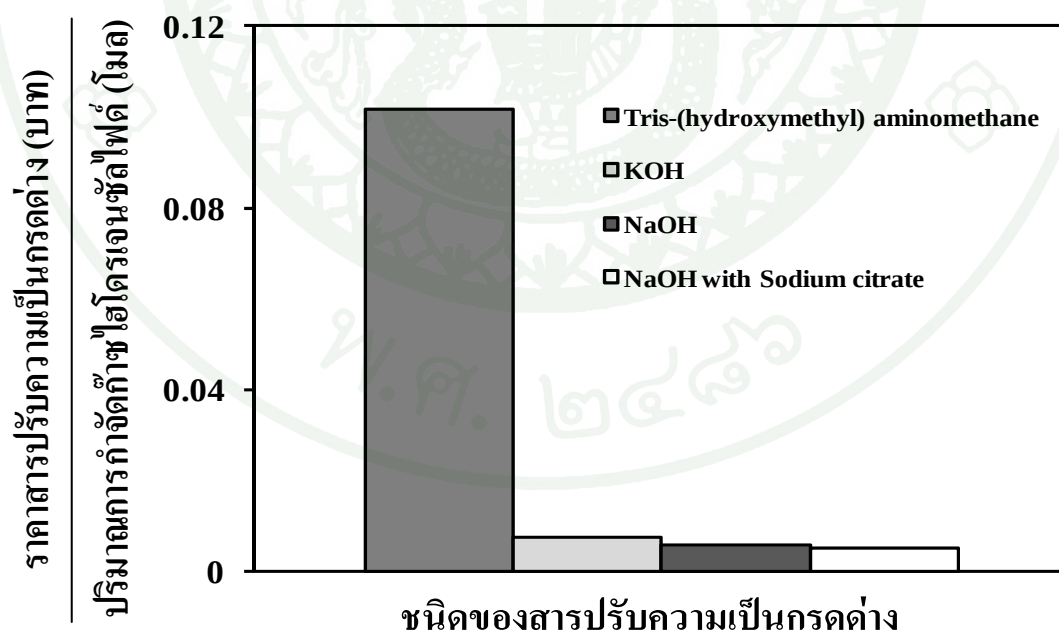
ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายหลักเกลือสำหรับสารปรับความเป็นกรดต่างชนิด ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ



ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายหลัก (3+) คีเลทสำหรับสารปรับความเป็นกรดต่างชนิด ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ ซึ่งความเป็นกรดต่ำเริ่มต้นเท่ากับ 7.8



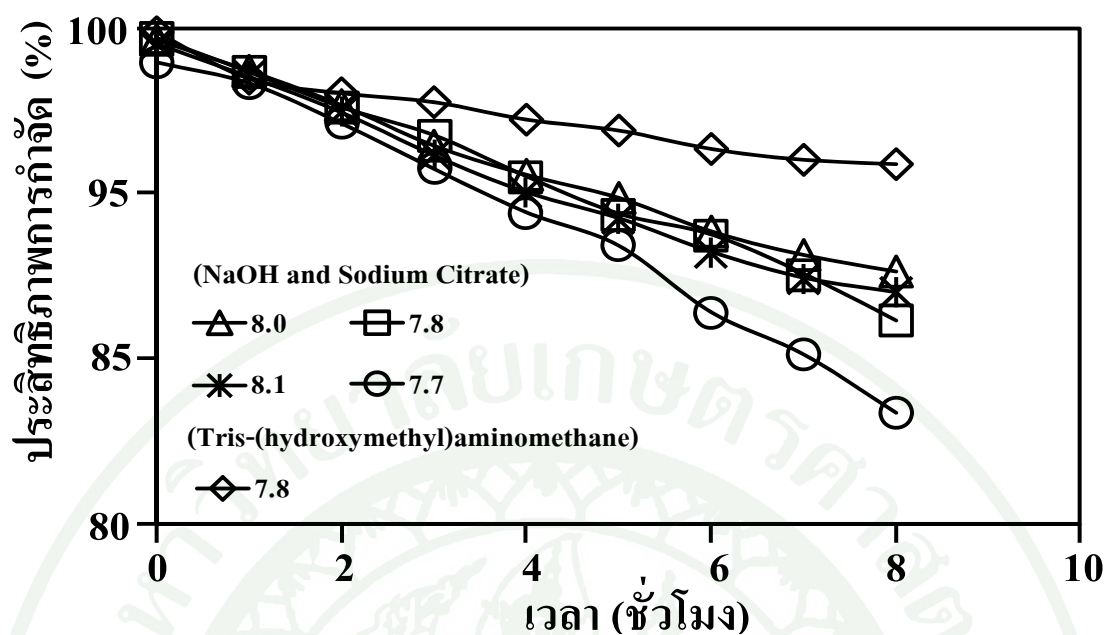
ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่างของสารละลายหลักเกลือโดยสาร
ปรับความเป็นกรดต่างชนิด ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ



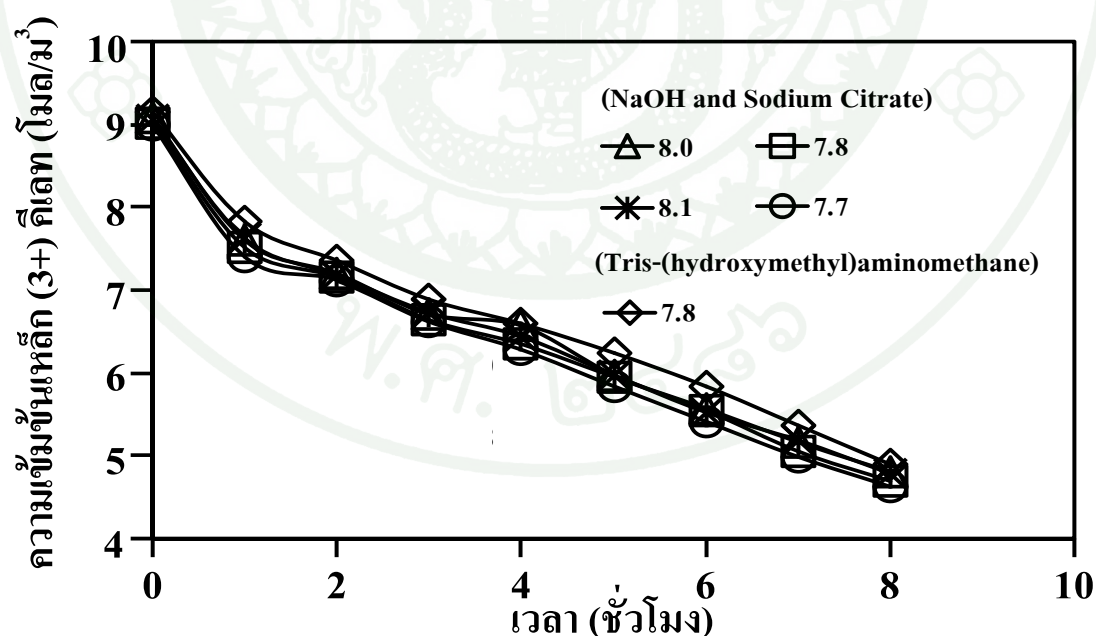
ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบราคาของสารปรับความเป็นกรดต่างต่อปริมาณการกำจัดก๊าซ
ไฮโดรเจนซัลไฟด์

1.3 ผลของความเป็นกรดต่างเริ่มต้นต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรทเป็นสารปรับความเป็นกรดต่าง

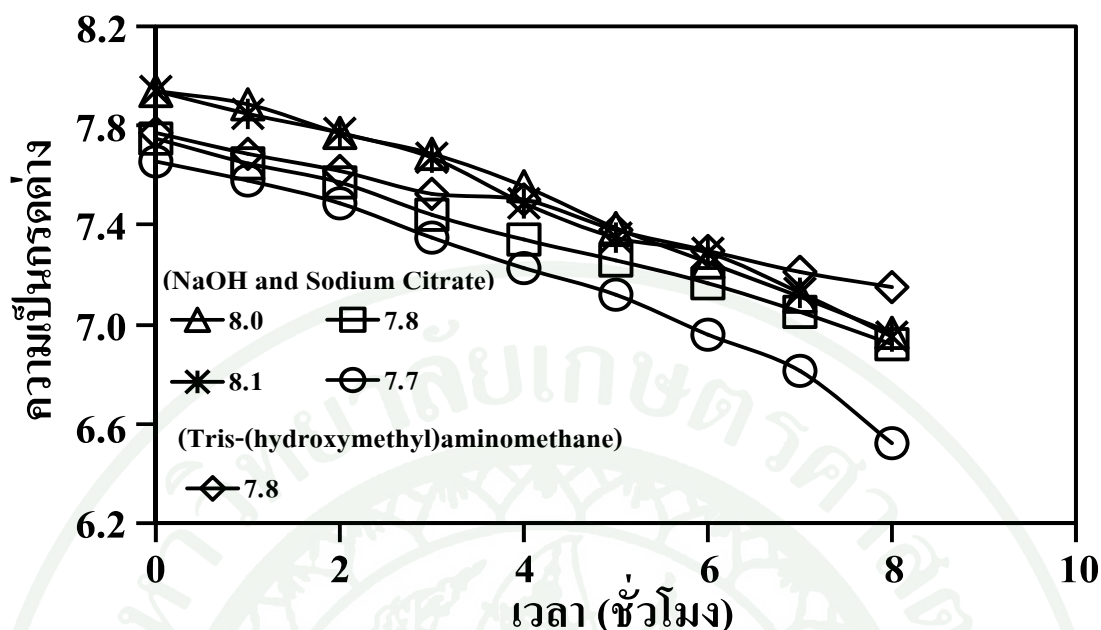
การทดลองเพื่อศึกษาความเป็นกรดต่างเริ่มต้นของสารละลายเหล็กคิเลท โดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรท (NaOH with Sodium Citrate) เป็นสารปรับความเป็นกรดต่าง ซึ่งทำการทดลองที่ความเป็นกรดต่างเริ่มต้น 8.1, 8.0, 7.8 และ 7.7 ตามลำดับ โดยสภาวะการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 25 26 และ 27 พบว่า เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรท ปรับความเป็นกรดต่างเริ่มต้นให้มีค่าสูง ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะสูง แต่ที่ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นที่ 8.1 และ 8.0 จะให้ผลที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญแสดงดังภาพที่ 25 แต่ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นที่ 8.1 เมื่อทำการทดลองความเป็นกรดต่างจะลดลงใกล้เคียงกับความเป็นกรดต่างเริ่มต้นที่ 8.0 ตามเวลา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเป็นกรดต่างให้สูงกว่า 8.0 แล้วเริ่มการทดลองความเป็นกรดต่างก็จะลดลงใกล้เคียงกับความเป็นกรดต่างเริ่มต้นที่ 8.0 ตามเวลาแสดงดังภาพที่ 27 ส่วนความเป็นกรดต่างเริ่มต้นที่ 7.8 และ 7.7 จะให้ประสิทธิภาพและความเป็นกรดต่างต่ำลงตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) คิเลทลดลงตามเวลาเช่นกันแสดงดังภาพที่ 26 เนื่องจากการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคิเลทไม่สมบูรณ์ ซึ่งที่ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นที่มีค่าสูงความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) คิเลทจะลดลงช้ากว่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นที่มีค่าต่ำ แต่ที่ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นที่ 8.1 และ 8.0 แตกต่างกันไม่มากนัก จากผลการทดลองทั้งสามส่วนแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเป็นกรดต่างเริ่มต้นให้มีค่าสูงจะเป็นผลดีกับระบบแต่ไม่ควรเกิน 8.0 เพราะจะส่งผลต่อระบบในแนวโน้มเดียวกัน จึงเป็นการสิ้นเปลืองสารที่ใช้ ดังนั้นสรุปได้ว่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นที่เหมาะสม สำหรับการใส่สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรทเป็นตัวปรับความเป็นกรดต่างคือ 8.0



ภาพที่ 25 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายเกลือคีเลตสำหรับสารปรับความเป็นกรดต่างชนิดกัน โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรตที่ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ



ภาพที่ 26 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) คีเลตสำหรับสารปรับความเป็นกรดต่างชนิดกัน โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรตที่ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ

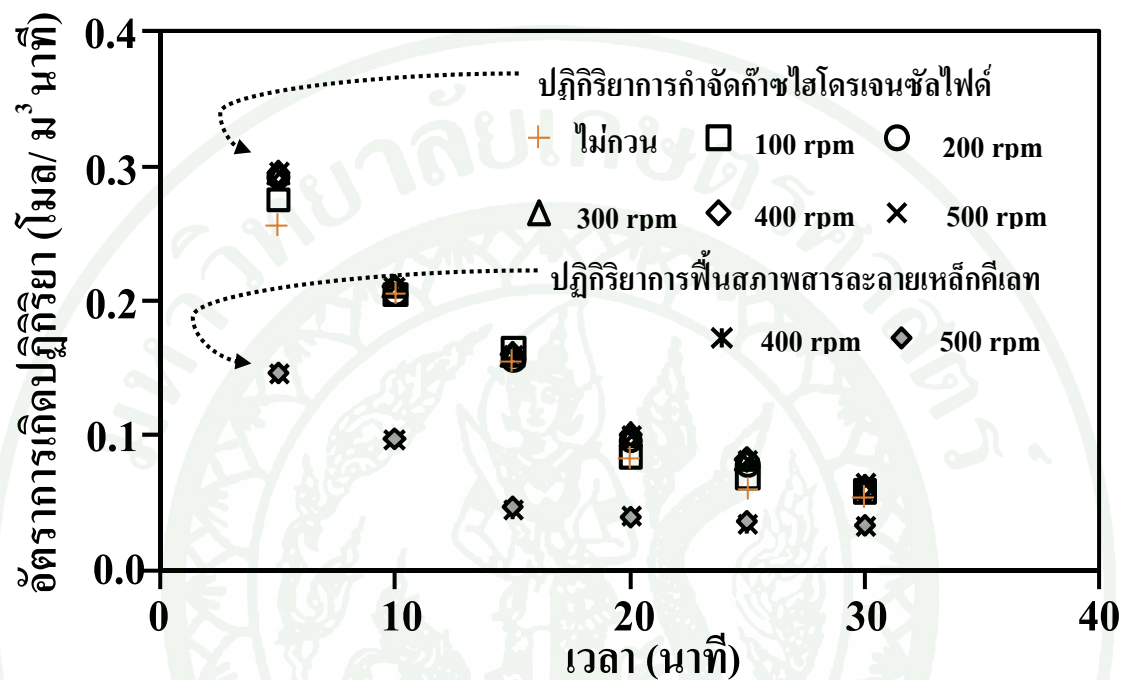


ภาพที่ 27 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่างของสารละลายบัฟเฟอร์สำหรับสารปรับความเป็นกรดต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรท ที่ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ

1.4 ผลของความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพเหล็ก (2+) คีเลท ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวด

ผลการทดลองความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถังปฏิกรณ์แบบกึ่งเฉพาะงวด พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงตามเวลาทุกกรณีศึกษา และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนจาก 0 ไป 100 รอบต่อนาที และ 100 ไป 200 รอบต่อนาที อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์สูงขึ้นที่ความเร็วรอบ 300, 400 และ 500 รอบต่อนาที พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์ให้สูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะไม่แตกต่าง ส่วนผลการทดลองความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาฟื้นฟูสภาพเหล็ก (2+) คีเลท ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวน 400 และ 500 รอบต่อนาที พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์ให้สูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะไม่แตกต่างเช่นกัน ดังนั้นความเร็วรอบที่เลือกใช้ในการทดลองต่อไปจะ

เลือก 500 รอบต่อนาทีสำหรับปฏิกิริยาทั้งสอง เพื่อให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายโอนมวล แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยานั้นเพียงอย่างเดียวของทั้งสองปฏิกิริยา



ภาพที่ 28 การเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็กคัลเลท สำหรับความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนต่างกัน ในถังปฏิกรณ์กวนแบบกึ่งเฉพาะงวด

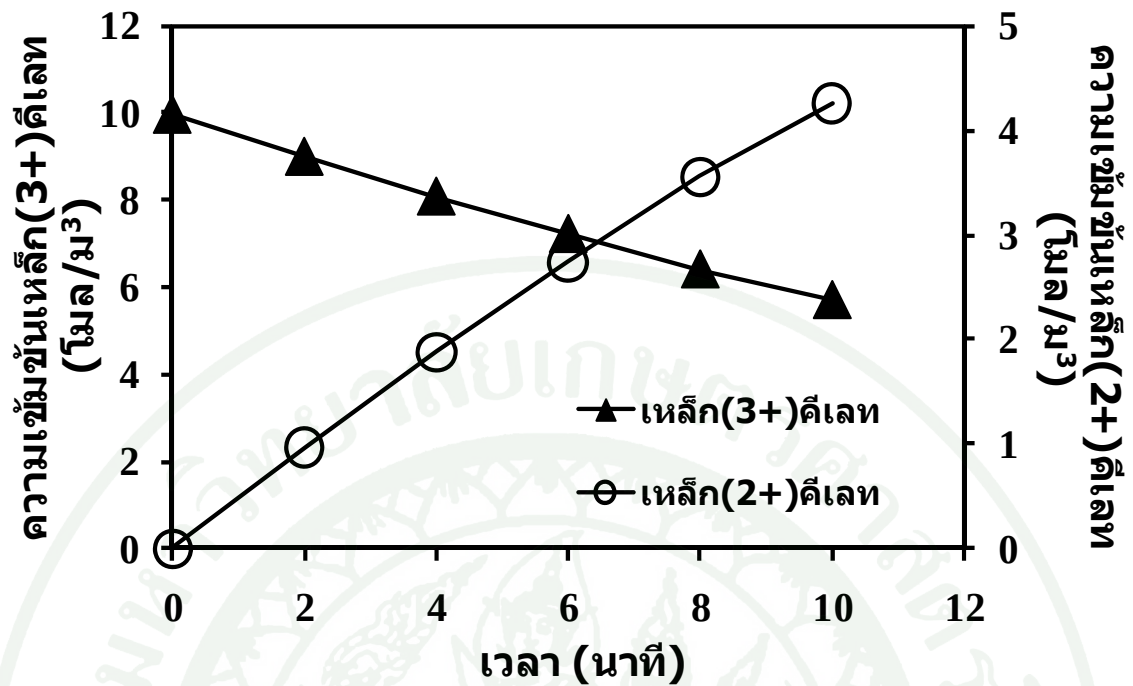
2. ผลการศึกษาจลนศาสตร์

จากการศึกษาการจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ พบว่ายังมีปัญหาเกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคิเลทในส่วนดาวน์คัมเมอร์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการจัดในส่วนไรเซอร์ลดลงตามเวลาเนื่องจากสารละลายเสื่อมสภาพลงเรื่อย ๆ จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนสารละลายใหม่ จากปัญหาดังกล่าวการออกแบบไรเซอร์และดาวน์คัมเมอร์ให้เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากถังปฏิกรณ์ที่ออกแบบมีหลายเฟส ซึ่งกลไกในแต่ละส่วนจะแตกต่างกันมากขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาและวิธีสัมผัสกันระหว่างก๊าซและของเหลว โดยสิ่งสำคัญในการออกแบบได้แก่ข้อมูลทางจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาและข้อมูลการถ่ายโอนมวล ดังนั้นจึงทำการทดลองเพื่อหาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคิเลทในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดและถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ

2.1 ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

2.1.1 ผลการศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อไม่พิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

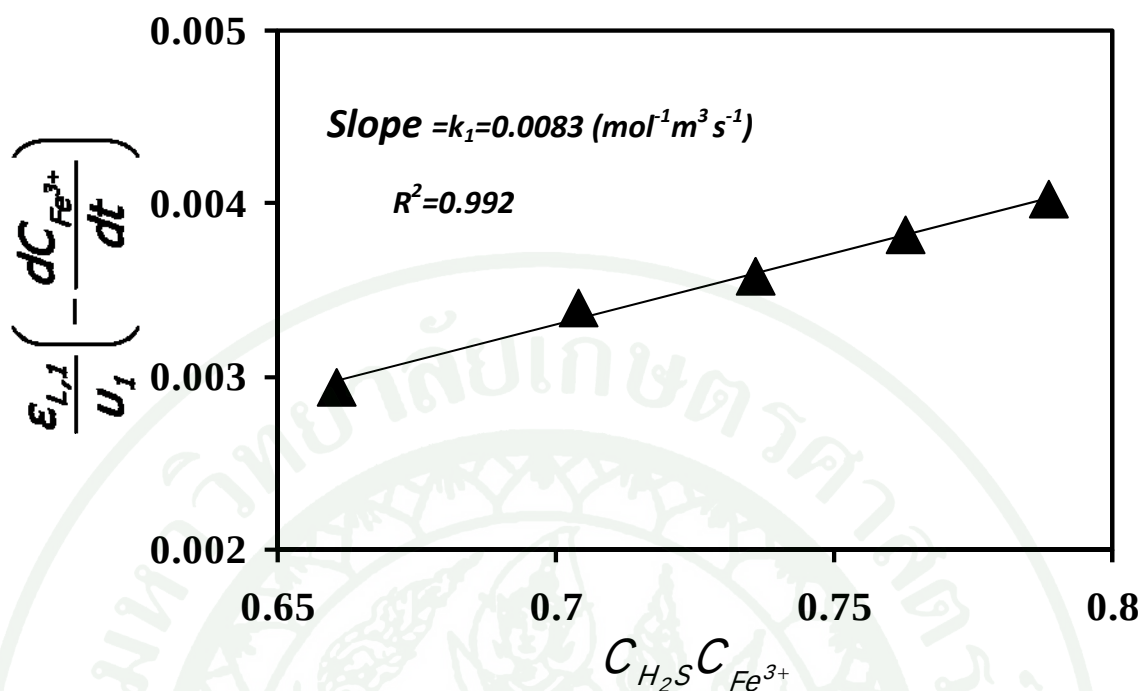
การศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดในกรณีนี้มีข้อสมมุติฐานว่าระบบมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้การถ่ายโอนมวลมีค่าน้อยจนทำให้อัตราการเกิดของปฏิกิริยาโดยรวมขึ้นอยู่กับอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) และ (2+) คิเลทในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดสำหรับปฏิกิริยาการจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แสดงดังภาพที่ 29 ซึ่งความเข้มข้นของเหล็ก (3+) คิเลทลดลงตามเวลา ขณะที่ความเข้มข้นของเหล็ก (2+) คิเลทเพิ่มขึ้นตามเวลา ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) คิเลทในถังปฏิกรณ์ลดลงทำให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถทำปฏิกิริยาได้น้อยลง ดังนั้นความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายในเฟสของของเหลวจึงมากขึ้น



ภาพที่ 29 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) และ (2+) คีเลทในถังปฏิกรณ์ กวนแบบกึ่งเฉพาะงวดสำหรับปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จากสมการดุลมวลในสมการ 24 โดยภาพที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ของ $\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_l} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)$ กับ $C_{H_2S} C_{Fe^{3+}}$ พบว่ากราฟเป็นเส้นตรง ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นทั้งสองจริง ความชันของกราฟบ่งบอกค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0083 ม³ / โมล วินาที สมการของอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถแสดงได้ในสมการ

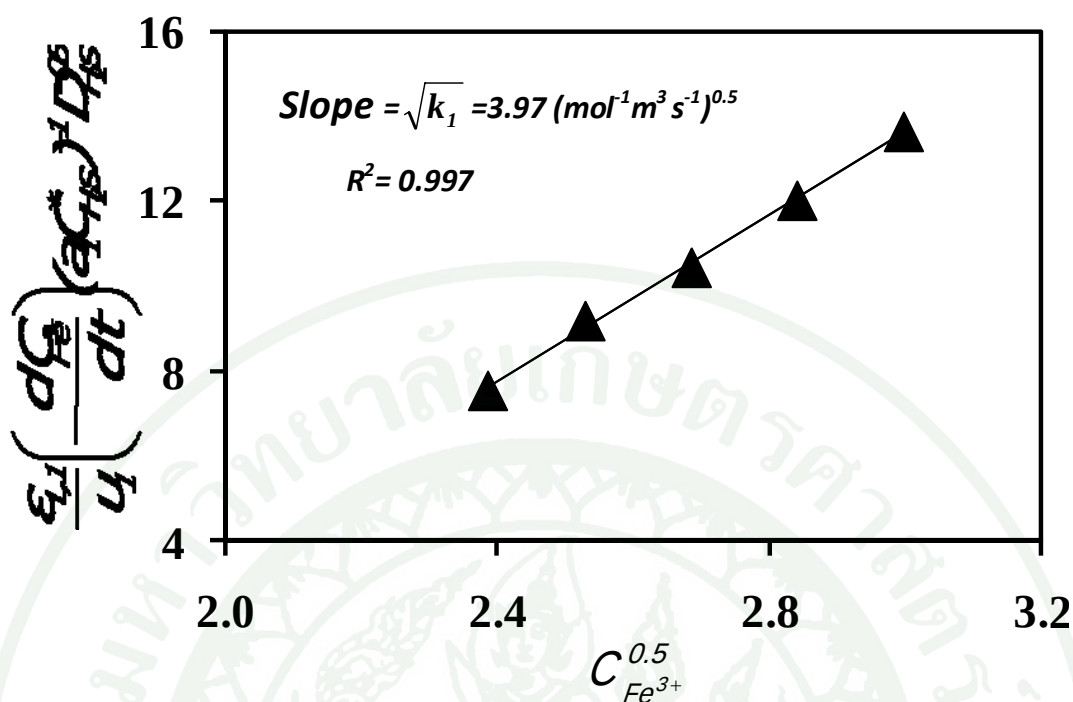
$$-r_l \text{ (โมล / ม³ วินาที)} = 0.0083 \text{ (ม³ / โมล วินาที)} C_{H_2S} \text{ (โมล / ม³)} C_{Fe^{3+}} \text{ (โมล / ม³)} \quad (41)$$



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\epsilon_{L,1}}{u_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)$ และ $C_{H_2S} C_{Fe^{3+}}$ สำหรับการหาค่าคงที่อัตรา
จลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถังปฏิกรณ์กวน
แบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อไม่พิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

2.1.2 ผลการศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

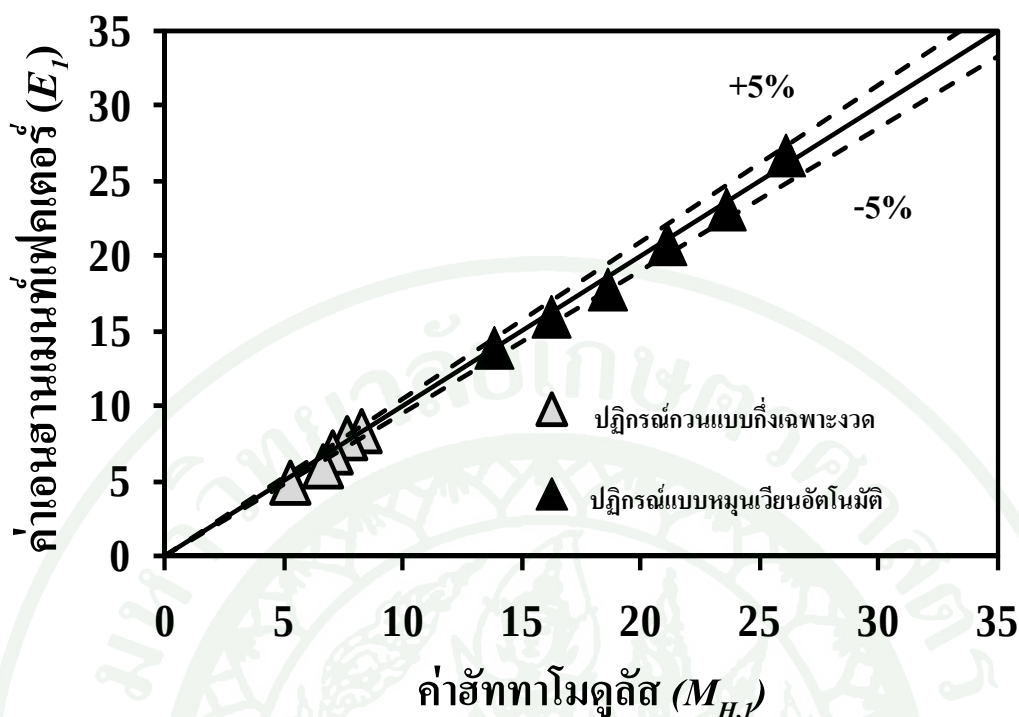
สถานะการทดลองนี้ตั้งสมมุติฐานว่าปฏิกิริยาเกิดในช่วงปฏิกิริยาเสมือนอันดับ
หนึ่ง และพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล ดังนั้นสมการ (32ก) สามารถใช้คำนวณค่าคงที่อัตรา
จลนศาสตร์ธรรมชาติได้ ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแสดงในตารางที่ 4 และ 5 และข้อมูลการ
ทดลองส่วนนี้ใช้ข้อมูลเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ (หัวข้อ 2.1.1) โดยจากภาพที่ 31 แสดง
ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\epsilon_{L,1}}{u_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right) (a_1 C_{H_2S}^*)^{-1} D_{H_2S}^{-0.5}$ กับ $C_{Fe^{3+}}^{0.5}$ ซึ่งกราฟเป็นเส้นตรง ดังนั้น
ข้อเสนอว่าอันดับของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งกับความเข้มข้นของ
ไฮโดรเจนซัลไฟด์และสารละลายเหล็ก (3+) ก็เลทจึงมีความเหมาะสม ความชันมีค่าเท่ากับ 3.97
 $m^{1.5} / โมล^{0.5} วินาที^{0.5}$ ซึ่งคือค่า $\sqrt{k_1}$ ดังนั้นค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัด
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีค่าเท่ากับ 15.76 $m^3 / โมล วินาที$



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{r_L}{v_L} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right) (a_1 C_{H_2S}^*)^{-1} D_{H_2S}^{-0.5}$ และ $C_{Fe^{3+}}^{0.5}$ สำหรับการหาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถังปฏิกรณ์กวนแบบกึ่งเฉพาะงวด เมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

หลังจากนั้นทำการตรวจสอบช่วงของการเกิดปฏิกิริยาโดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอนฮานเมนต์เฟลคเตอร์กับค่าฮัททาโมดูลัสแสดงดังภาพที่ 32 ซึ่งค่าเอนฮานเมนต์เฟลคเตอร์คำนวณได้จากสมการที่ (29ก) ส่วนค่าฮัททาโมดูลัสคำนวณจากสมการที่ (31ก) โดยใช้ค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติที่ได้จากความชันของกราฟที่แสดงในภาพที่ 31 พบว่าค่าเอนฮานเมนต์เฟลคเตอร์กับค่าฮัททาโมดูลัสใกล้เคียงกัน ดังนั้นสมมุติฐานช่วงของการเกิดปฏิกิริยาถูกต้อง สมการของอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$-r_L \text{ (โมล / ม}^3 \text{ วินาที)} = 15.76 \text{ (ม}^3 \text{ / โมล วินาที)} C_{H_2S} \text{ (โมล / ม}^3) C_{Fe^{3+}} \text{ (โมล / ม}^3) \quad (42)$$



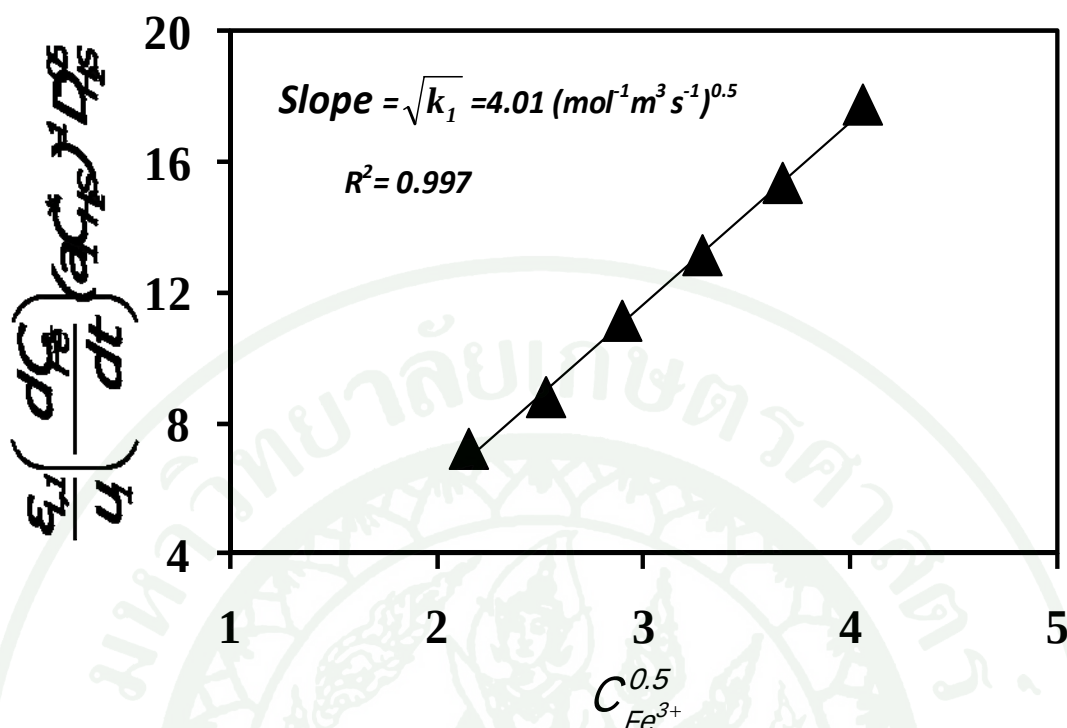
ภาพที่ 32 การเปรียบเทียบระหว่างค่าอนฮานเมนทเฟลคเตอร์กับค่าฮททาโมดูลัสสำหรับปฏิกิริยากำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

2.1.3 ผลการศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยากำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

การทดลองนี้ทำในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ แต่ทำการกั้นไม่ให้ของเหลวในระบบหมุนเวียน ทำให้ของเหลวส่วนไรเซอร์ไม่สามารถไหลเข้าดาวน์คัมเมอร์และของเหลวในดาวน์คัมเมอร์ไม่สามารถไหลเข้าส่วนไรเซอร์ได้ ดังนั้นส่วนไรเซอร์ที่ทำการทดลองเปรียบเสมือนปฏิกิริยกวนแบบเฉพาะวง และความเข้มข้นของสารละลายในระบบใช้ค่าเฉลี่ยในการคำนวณ ในการทดลองนี้ตั้งสมมุติฐานให้ปฏิกิริยาเกิดในช่วงปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่ง ดังนั้นสมการ (32ก) สามารถใช้การคำนวณค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติได้ โดยสร้างกราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,I}}{v_I} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right) (a_I C_{H_2S}^*)^{-1} D_{H_2S}^{-0.5}$ กับ $C_{Fe^{3+}}^{0.5}$ แสดงในภาพที่ 33 ซึ่งตัว

แปรที่ใช้ในการคำนวณแสดงในตารางที่ และ 5



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{r_l}{v_l} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right) (a_1 C_{H_2S}^*)^{-1} D_{H_2S}^{-0.5}$ และ $C_{Fe^{3+}}^{0.5}$ สำหรับการหาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิตเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

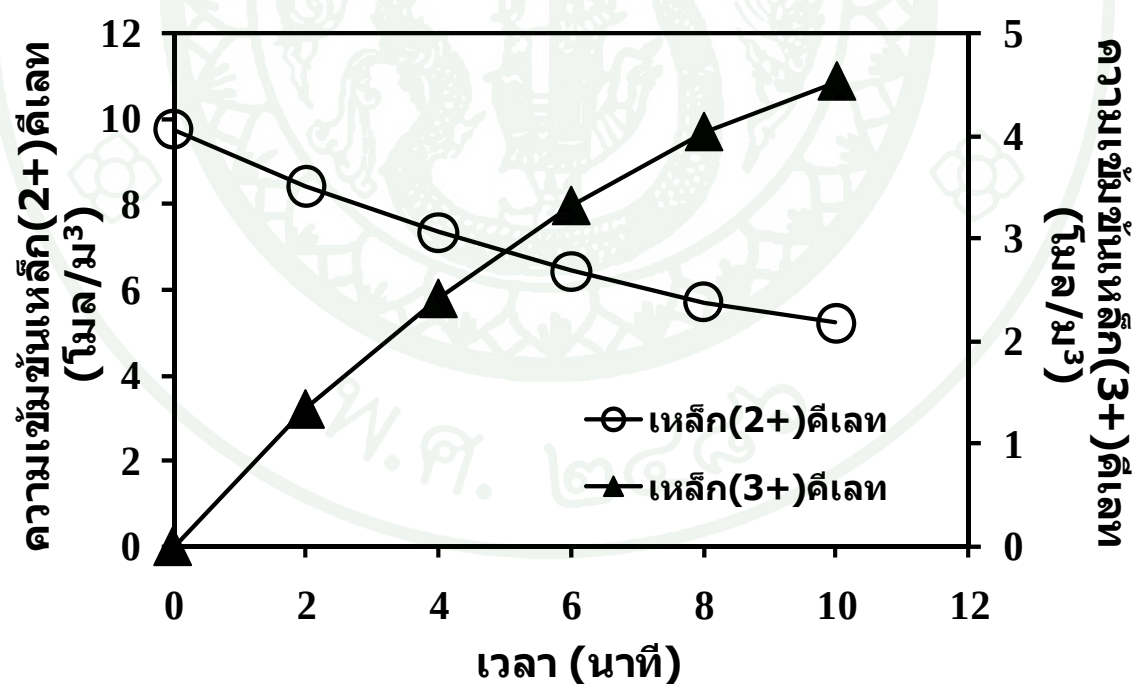
จากกราฟในภาพที่ 33 พบว่ากราฟเป็นเส้นตรงดังนั้นข้อเสนอที่ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นทั้งสองเป็นจริง และความชันมีค่าเท่ากับ $4.01 \text{ m}^{1.5} / \text{โมล}^{0.5} \text{ วินาที}^{0.5}$ ซึ่งเป็นค่ารากที่สองของค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติ ดังนั้นค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติดังกล่าวมีค่าเท่ากับ $16.01 \text{ m}^3 / \text{โมล วินาที}$ จากนั้นตรวจสอบช่วงของการเกิดปฏิกิริยาโดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอนฮานเมนต์เฟลเตอร์กับค่าอัตราโมดูลัสซึ่งผลแสดงในภาพที่ 32 พบว่าค่าของตัวเลขทั้งสองแตกต่างกันไม่มาก ดังนั้นสมมุติฐานของการเกิดปฏิกิริยาเป็นช่วงเสมือนอันดับหนึ่งเป็นจริง สมการของอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$-r_l \text{ (โมล / m}^3 \text{ วินาที)} = 16.01 \text{ (m}^3 / \text{โมล วินาที)} C_{H_2S} \text{ (โมล / m}^3) C_{Fe^{3+}} \text{ (โมล / m}^3) \quad (43)$$

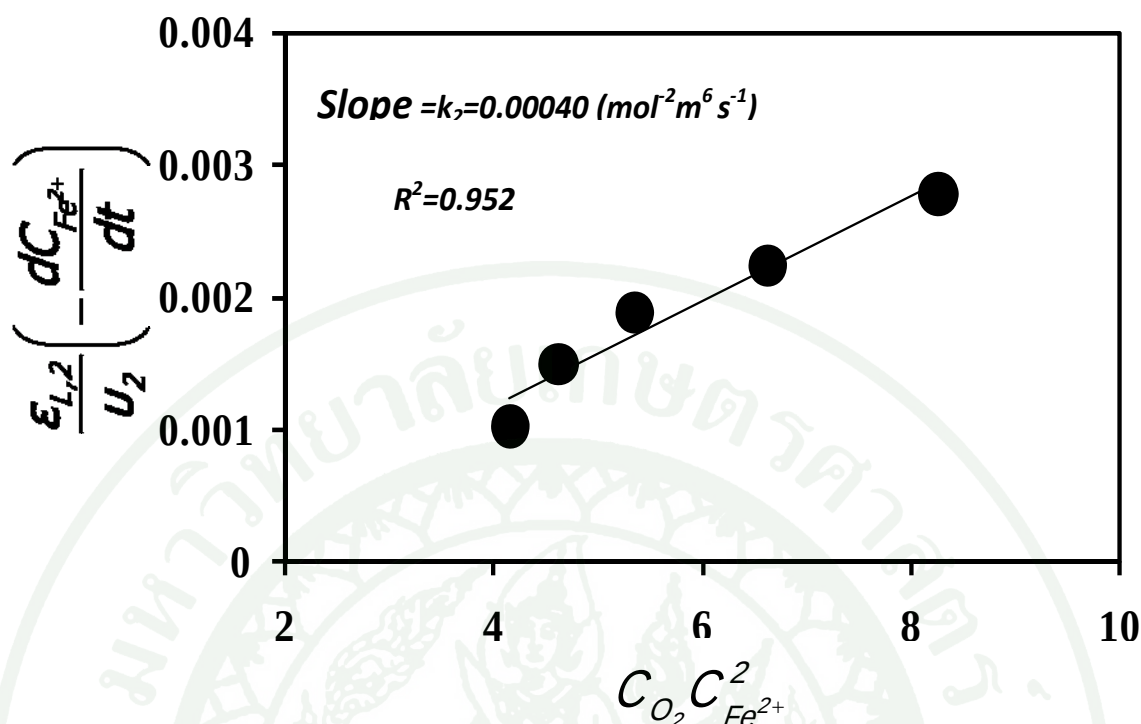
2.2 ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคีเลต

2.2.1 ผลการศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลตในปฏิกิริยารีดอกซ์แบบกึ่งเฉพาะจงเมื่อไม่พิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

สารละลายเหล็กคีเลตที่ใช้แล้ว (เหล็ก(2+)คีเลต) ถูกนำมาศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคีเลตในปฏิกิริยารีดอกซ์แบบกึ่งเฉพาะจง ซึ่งระบบมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ และมีสมมุติฐานว่าผลของการถ่ายโอนมวลไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวม สมการการดูดมวลในสมการ (26) สามารถนำมาใช้ได้ จากการทดลองพบว่าเหล็ก (2+) คีเลตที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะเปลี่ยนเป็นเหล็ก (3+) คีเลต ดังสมการการเกิดปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคีเลต ส่งผลให้เหล็ก (2+) คีเลตลดลง ส่วนเหล็ก (3+) คีเลตเพิ่มขึ้นตามเวลา แสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (3+) และ (2+) คีเลตในถังปฏิกรณ์กวนแบบกึ่งเฉพาะจงสำหรับปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลต



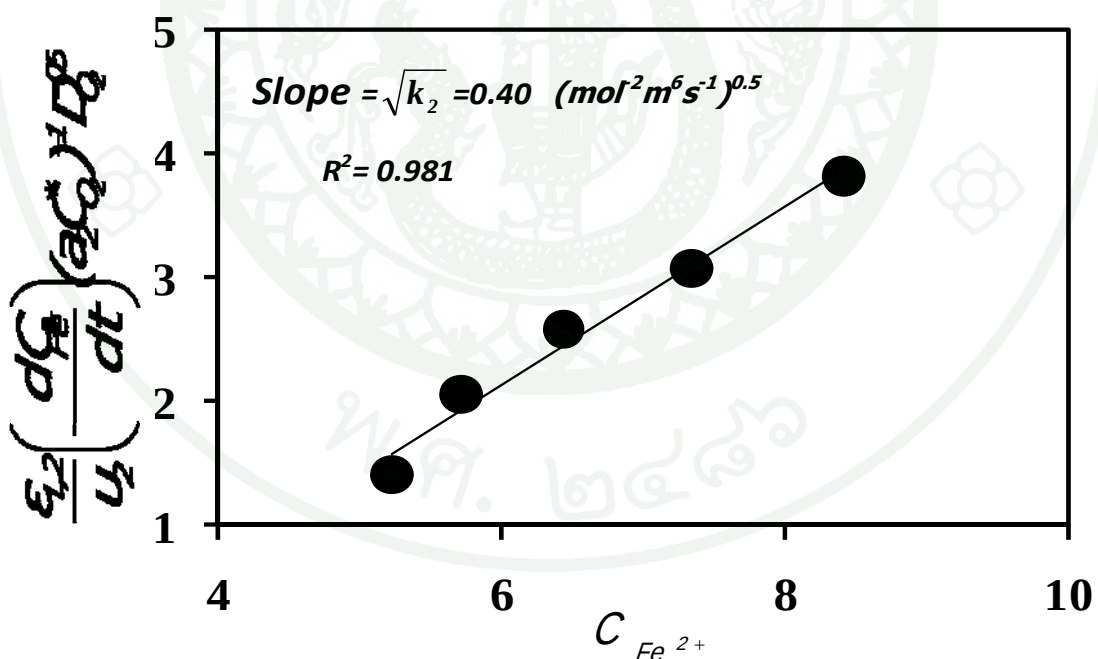
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\epsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)$ และ $C_{O_2} C_{Fe^{2+}}^2$ สำหรับการหาค่าคงที่อัตรา
จลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการพื้นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทในถัง
ปฏิกรณ์กวนแบบกึ่งเฉพาะวงเมื่อไม่พิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

เมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยารวมขึ้นกับอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติเพียงอย่างเดียว
ดังนั้นสมการ (26) สามารถคำนวณหาค่าคงที่ของอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติได้โดยการสร้างกราฟ
ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\epsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)$ กับ $C_{O_2} C_{Fe^{2+}}^2$ ดังแสดงในภาพที่ 35 พบว่ากราฟเป็น
เส้นตรงบ่งบอกถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งกับความเข้มข้นของออกซิเจนและ
อันดับสองกับความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทตามที่เสนอมา ความชันของกราฟคือ
ค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการพื้นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท ซึ่งมีค่า
เท่ากับ 0.0004 ม⁶ / โมล² วินาที ดังนั้นสมการอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการพื้น
สภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$-r_2 \text{ (โมล / ม}^3 \text{ วินาที)} = 0.0004 \text{ (ม}^6 \text{ / โมล}^2 \text{ วินาที)} C_{O_2} \text{ (โมล / ม}^3 \text{)} C_{Fe^{2+}}^2 \text{ (โมล}^2 \text{ / ม}^6 \text{)} \quad (44)$$

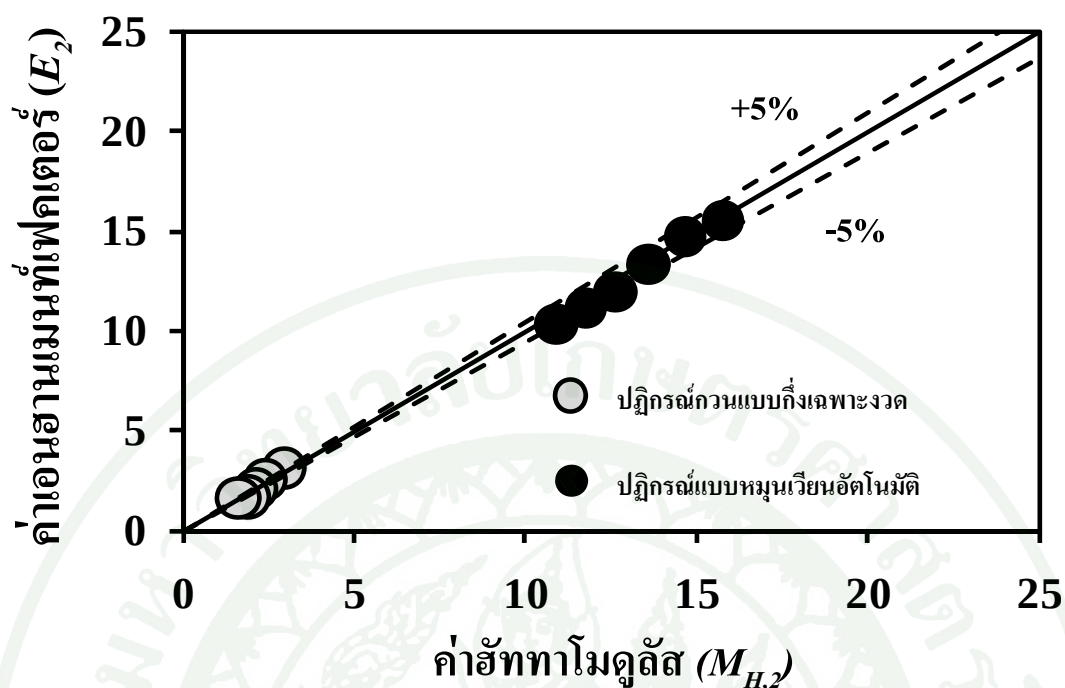
2.2.2 ผลการศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) ที่เลท ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

การทดลองในส่วนนี้พิจารณาผลของการถ่ายโอนมวลและพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วงปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่ง ค่าตัวแปรในการคำนวณค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) ที่เลทในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดแสดงในตารางที่ 4 และ 5 โดยค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็กที่เลทได้จากค่ากำลังสองของความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right) (a_2 C_{O_2}^*)^{-1} D_{O_2}^{-0.5}$ กับ $C_{Fe^{2+}}$ ตามสมการ (32ข) แสดงดังภาพที่ 36 พบว่ากราฟเป็นเส้นตรงดังนั้นอันดับของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เสนอไว้เป็นจริง ซึ่งกำลังสองของความชันมีค่าเท่ากับ $0.16 \text{ ม}^6 / \text{โมล}^2 \text{ วินาที}$



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right) (a_2 C_{O_2}^*)^{-1} D_{O_2}^{-0.5}$ และ $C_{Fe^{2+}}$ สำหรับการหา

ค่าคงที่จลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการพ่นสภาพสารละลายเหล็ก (2+) ที่เลทในถังปฏิกรณ์กวนแบบกึ่งเฉพาะงวด เมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล



ภาพที่ 37 การเปรียบเทียบระหว่างค่าเอนฮานเมนต์เฟลเตอร์กับค่าอัตราโมดูลัสสำหรับปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลท

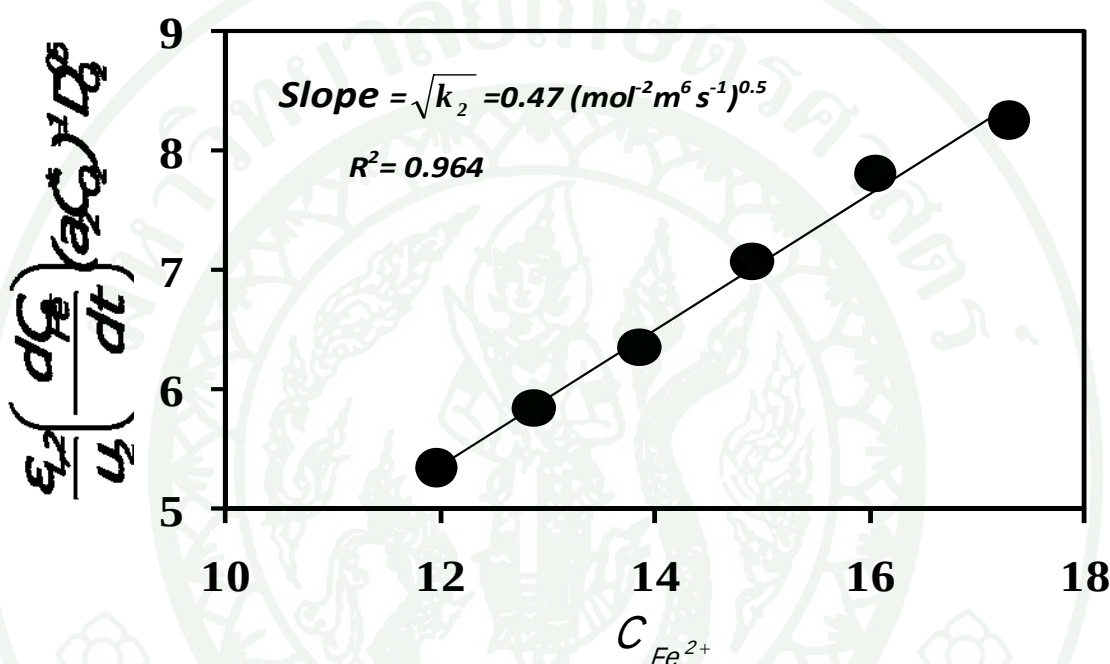
จากภาพที่ 37 แสดงให้เห็นว่าค่าเอนฮานเมนต์เฟลเตอร์และค่าอัตราโมดูลัสมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นปฏิกิริยาของระบบจะเกิดในช่วงปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่ง สมการอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$-r_2 \text{ (โมล / ม}^3 \text{ วินาที)} = 0.16 \text{ (ม}^6 \text{ / โมล}^2 \text{ วินาที)} C_{O_2} \text{ (โมล / ม}^3) C_{Fe^{2+}}^2 \text{ (โมล}^2 \text{ / ม}^3) \quad (45)$$

2.2.3 ผลการศึกษาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทในปฏิกิริยาแบบหมุนเวียนอัตโนมัติโดยพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

สารละลายเหล็กที่ใช้แล้วจะถูกทำการฟื้นฟูสภาพด้วยอากาศในส่วนของดาวนัคัมเมอร์ในถังปฏิกิริยาแบบหมุนเวียนอัตโนมัติ ระบบจะถูกพิจารณาแบบกึ่งเฉพาะจงวด ความเข้มข้นของของเหลวในระบบใช้ความเข้มข้นเฉลี่ยตามความสูง และตั้งสมมุติฐานว่าปฏิกิริยาในระบบเกิด

ในช่วงเสมือนอันดับหนึ่ง โดยการหาค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมดาได้จากค่ากำลังสองของความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right) (a_2 C_{O_2}^*)^{-1} D_{O_2}^{-0.5}$ กับ $C_{Fe^{2+}}$ จากภาพที่ 38 พบว่ากราฟเป็นเส้นตรงดังนั้นข้อเสนออันดับของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นจริง ซึ่งกำลังสองของความชันมีค่าเท่ากับ $0.22 \text{ ม}^6 / \text{โมล}^2 \text{ วินาที}$



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right) (a_2 C_{O_2}^*)^{-1} D_{O_2}^{-0.5}$ และ $C_{Fe^{2+}}$ สำหรับการหาค่าคงที่จลนศาสตร์ธรรมดาของปฏิกิริยาการฟอสฟอไรเซชันของสารละลายเหล็ก (2+) ที่เลขในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัลเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวล

เมื่อทราบค่าคงที่อัตราจลนศาสตร์ธรรมดา จะทำการตรวจสอบช่วงของการเกิดปฏิกิริยา โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอนธานเมนต์เฟลเตอร์กับค่าตัวเลขอัตราโมดูลัสพบว่าค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในภาพที่ 37 ดังนั้นปฏิกิริยาของระบบจะเกิดในช่วงปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งจริง สมการอัตราจลนศาสตร์ธรรมดาของปฏิกิริยาการฟอสฟอไรเซชันของสารละลายเหล็ก (2+) ที่เลขสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$-r_2 \text{ (โมล / ม}^3 \text{ วินาที)} = 0.22 \text{ (ม}^6 / \text{โมล}^2 \text{ วินาที)} C_{O_2} \text{ (โมล / ม}^3) C_{Fe^{2+}}^2 \text{ (โมล}^2 / \text{ม}^6) \quad (46)$$

2.3 สรุปผลการศึกษาลงศาสตร์

ค่าคงที่อัตราลงศาสตร์ธรรมชาติที่คำนวณได้จากกรณีต่างๆ รวบรวมไว้ในตารางที่ 10 ค่าคงที่อัตราลงศาสตร์ธรรมชาติของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คีเลทเมื่อไม่พิจารณาผลของการถ่ายโอนมวลมีค่าต่ำกว่ากรณีพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวลในระบบ โดยค่าคงที่อัตราลงศาสตร์ธรรมชาติที่ทดลองในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวลได้ตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวลเช่นกัน พบว่าค่าคงที่ที่ได้จากทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าความแตกต่างอยู่ในช่วง 2.1% สำหรับปฏิกิริยาการกำจัด และ 38.1% สำหรับปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพ อย่างไรก็ตาม ค่าคงที่อัตราลงศาสตร์ธรรมชาติที่คำนวณได้จากกรณีศึกษาในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดที่พิจารณาผลของการถ่ายโอนมวลมีความน่าเชื่อถือมากกว่าเพราะพฤติกรรมภายในถังปฏิกรณ์ชนิดนี้ใกล้เคียงกับสภาวะการผสมแบบสมบูรณ์ซึ่งเป็นสมมุติฐานของถังปฏิกรณ์แบบเฉพาะงวด และเนื่องจากพฤติกรรมการไหลของก๊าซในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติอาจไม่ใกล้เคียงกับสภาวะการผสมแบบสมบูรณ์เนื่องจากเกรเดียนต์ของความเข้มข้นตามแนวแกนมีค่าสูง ดังนั้นสมมุติฐานว่าพฤติกรรมการไหลในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติเป็นแบบผสมอย่างสมบูรณ์จึงมีความสมเหตุสมผลน้อยกว่า อย่างไรก็ตามในการคำนวณต่างๆ ในกรณีนี้ใช้ค่าความเข้มข้นเฉลี่ย นอกจากนี้ค่าคงที่อัตราลงศาสตร์ธรรมชาติที่คำนวณได้จากทั้งสองกรณีมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับค่าที่มีการรายงานก่อนหน้านี้ (Karimi *et al.*, 2008) ซึ่งค่าความแตกต่างอาจเกิดจากการใช้สารปรับความเป็นกรดต่างชนิดกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าคงที่อัตราลงศาสตร์ธรรมชาติที่ทดลองในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อพิจารณาผลของการถ่ายโอนมวลเป็นค่าที่ถูกต้องที่สุดสำหรับปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคีเลทในงานวิจัยนี้

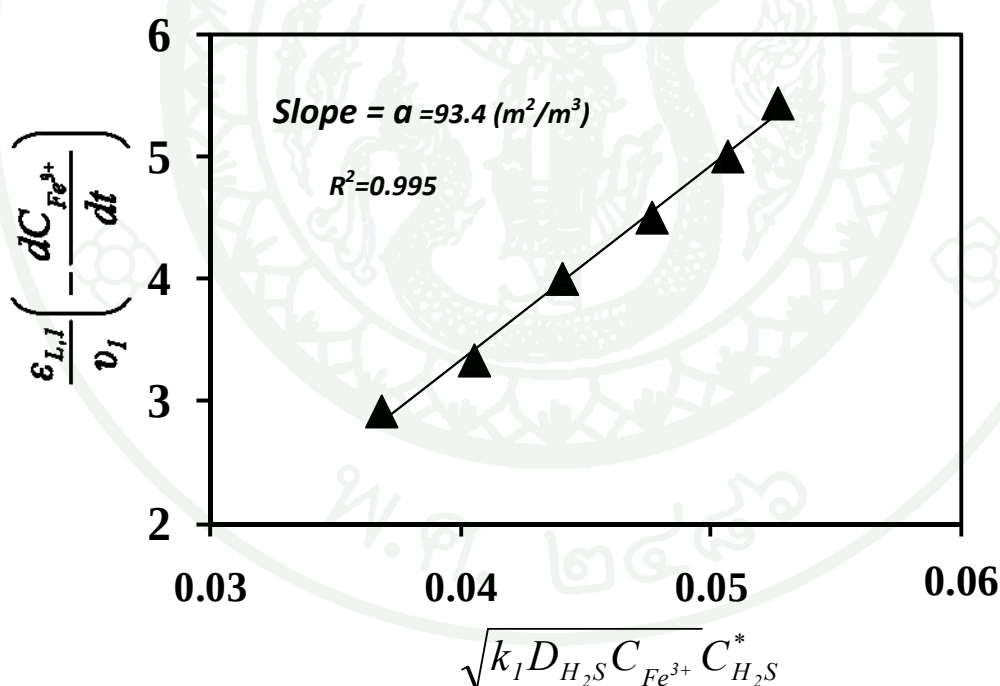
ตารางที่ 10 ค่าคงที่ของอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติของทุกกรณีศึกษา

กรณีศึกษา	ค่าคงที่ของอัตราจลนศาสตร์ธรรมชาติ			
	ปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (โมล ⁻¹ ม ³ วินาที ⁻¹)	% ความแตกต่าง	ปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพ สารละลายเหล็กคีเลท (โมล ⁻² ม ⁶ วินาที ⁻¹)	% ความแตกต่าง
ปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อไม่พิจารณาผลของการ ถ่ายโอนมวล	0.0083	99.9	0.00033	99.8
ปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะงวดเมื่อพิจารณาผลของการ ถ่ายโอนมวล	15.76	0	0.16	0
ถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติเมื่อพิจารณาผลของการ ถ่ายโอนมวล	16.10	2.1	0.22	38.1
ค่าจากการตรวจเอกสาร (Karimi <i>et al.</i> , 2008)	16.82	-	0.017	-

3. ผลการศึกษาค่าตัวแปรของการถ่ายโอนมวล

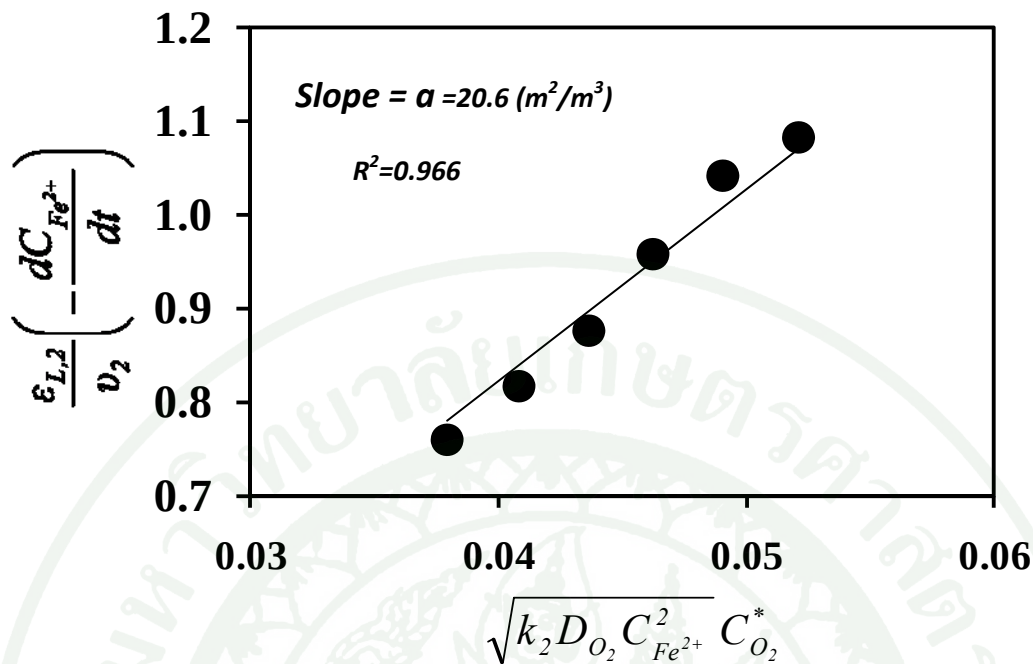
3.1 พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว

ตัวแปรการถ่ายโอนมวลคำนวณจากผลการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิตีเมื่อไม่พิจารณาการถ่ายโอนมวลในเฟสก๊าซ ปฏิกริยาการกำจัดและการฟื้นฟูสภาพสมมุติให้ดำเนินการภายใต้สภาวะปฏิกริยาเสมือนอันดับหนึ่ง ดังนั้นสมการ (32) สามารถใช้หาพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวในส่วนของไรเซอร์และส่วนดาวน์คัมเมอร์ โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,1}}{\nu_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)$ กับ $\sqrt{k_1 D_{H_2S} C_{Fe^{3+}}} C_{H_2S}^*$ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{\nu_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)$ กับ $\sqrt{k_2 D_{O_2} C_{Fe^{2+}}} C_{O_2}^*$ ตามลำดับ ซึ่งความชันของกราฟทั้งสองบ่งบอกค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว



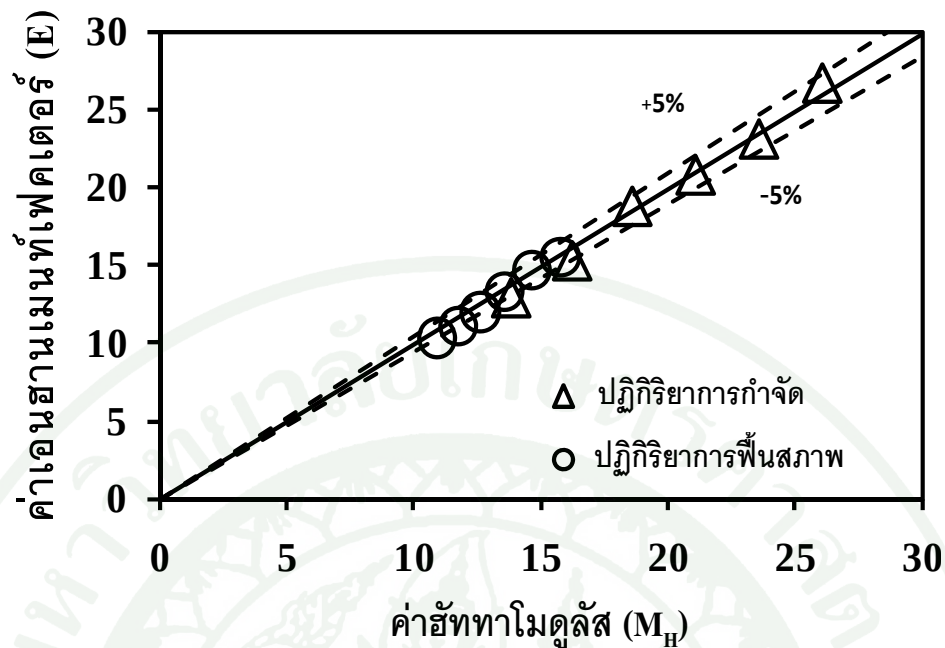
ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,1}}{\nu_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)$ กับ $\sqrt{k_1 D_{H_2S} C_{Fe^{3+}}} C_{H_2S}^*$ เพื่อหาค่าพื้นที่

ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวในไรเซอร์ของถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิตี



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\epsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)$ กับ $\sqrt{k_2 D_{O_2} C_{Fe^{2+}}^2 C_{O_2}^*}$ เพื่อหาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวในคาน้ำคัมเมอร์ของถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิตี

จากภาพที่ 39 ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\epsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)$ กับ $\sqrt{k_1 D_{H_2S} C_{Fe^{3+}} C_{H_2S}^*}$ มีค่าเท่ากับ 93.4 เมตร²/เมตร³ ซึ่งคือค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวในไรเซอร์ของถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิตี ส่วนภาพที่ 40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\epsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)$ กับ $\sqrt{k_2 D_{O_2} C_{Fe^{2+}}^2 C_{O_2}^*}$ มีความชันเท่ากับ 20.6 เมตร²/เมตร³ ซึ่งคือพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวในคาน้ำคัมเมอร์ของถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิตี หลังจากนั้นทำการตรวจสอบช่วงของการเกิดปฏิกิริยา โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอนธานเม้นท์เฟลคเตอร์กับค่าตัวเลขฮัททาโมดูลัสของทั้งสองปฏิกิริยา พบว่าค่าเอนธานเม้นท์เฟลคเตอร์กับค่าตัวเลขฮัททาโมดูลัสของทั้งสองปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในภาพที่ 41 ดังนั้นปฏิกิริยาของระบบเกิดในช่วงปฏิกิริยาเสมือนอันดับหนึ่งจริง



ภาพที่ 41 การเปรียบเทียบระหว่างค่าเอนฮานเมนต์เฟลคเตอร์กับค่าอัตราโมดูลัสสำหรับการหาพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว

3.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในส่วนของโรเซอร์และคานันัมเมอร์หาโดยใช้สมการ (38) โดยสมมติว่าปฏิกิริยาทั้งสองดำเนินการในช่วงปฏิกิริยาเร็วทันทีทันใด โดยสร้างกราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,1}}{\nu_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)$ กับ $a_1 C_{H_2S}^* \left(1 + \frac{D_{Fe^{3+}} C_{Fe^{3+}}}{\nu_1 D_{H_2S} C_{H_2S}} \right)$ และกราฟความสัมพันธ์

ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{\nu_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)$ กับ $a_2 C_{O_2}^* \left(1 + \frac{D_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}}{\nu_2 D_{O_2} C_{O_2}} \right)$ ตามลำดับ ซึ่งความชันของกราฟทั้งสองบ่ง

บอกค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ภาพที่ 42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,1}}{\nu_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)$

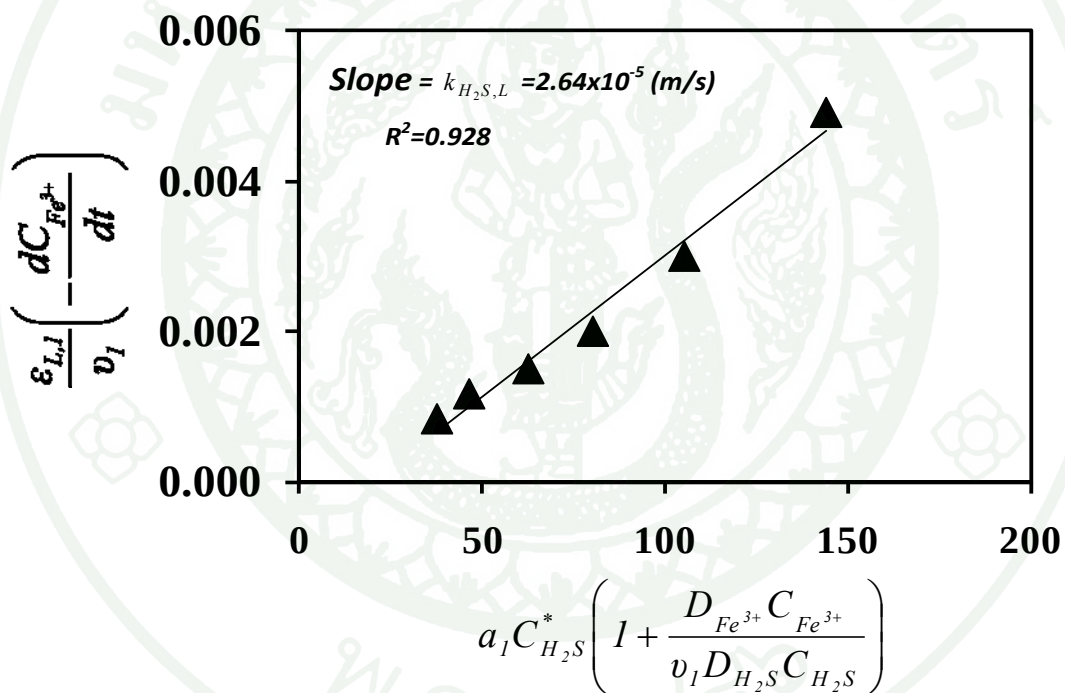
กับ $a_1 C_{H_2S}^* \left(1 + \frac{D_{Fe^{3+}} C_{Fe^{3+}}}{\nu_1 D_{H_2S} C_{H_2S}} \right)$ พบว่ามีค่าความชันเท่ากับ 2.64×10^{-5} เมตร/วินาที ซึ่งคือค่า

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในโรเซอร์ของถึงปฏิกิริยาแบบหมุนเวียนอัดโนมิติ ส่วนภาพที่ 43

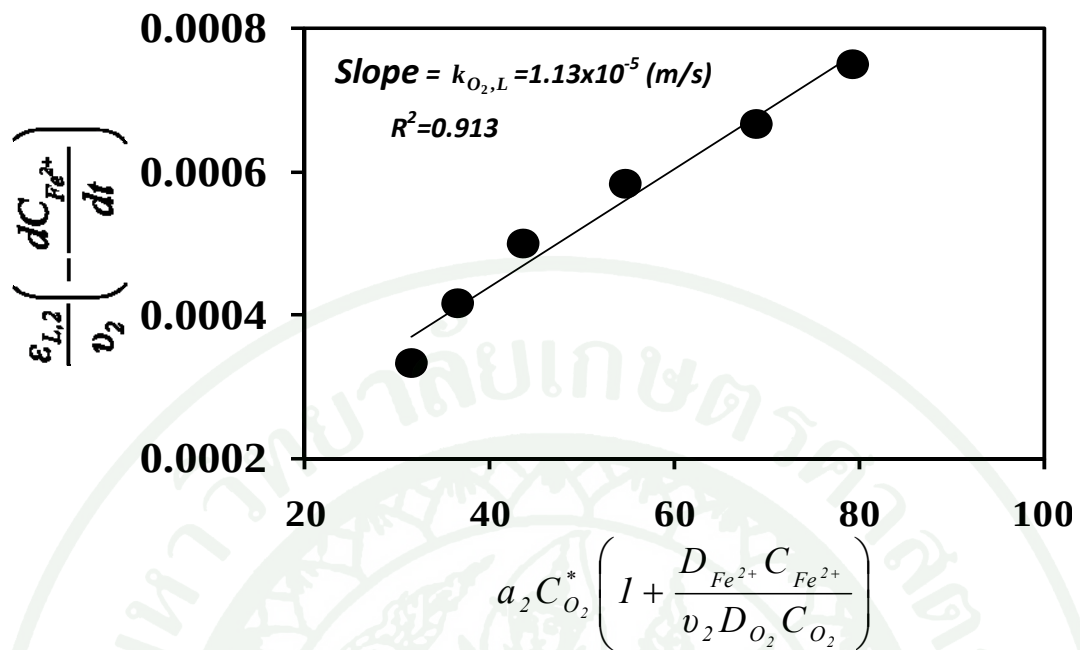
แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\varepsilon_{L,2}}{\nu_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)$ กับ $a_2 C_{O_2}^* \left(1 + \frac{D_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}}{\nu_2 D_{O_2} C_{O_2}} \right)$ มีความชันเท่ากับ

1.13×10^{-5} เมตร/วินาที คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในคานันัมเมอร์ของถึงปฏิกิริยาแบบ

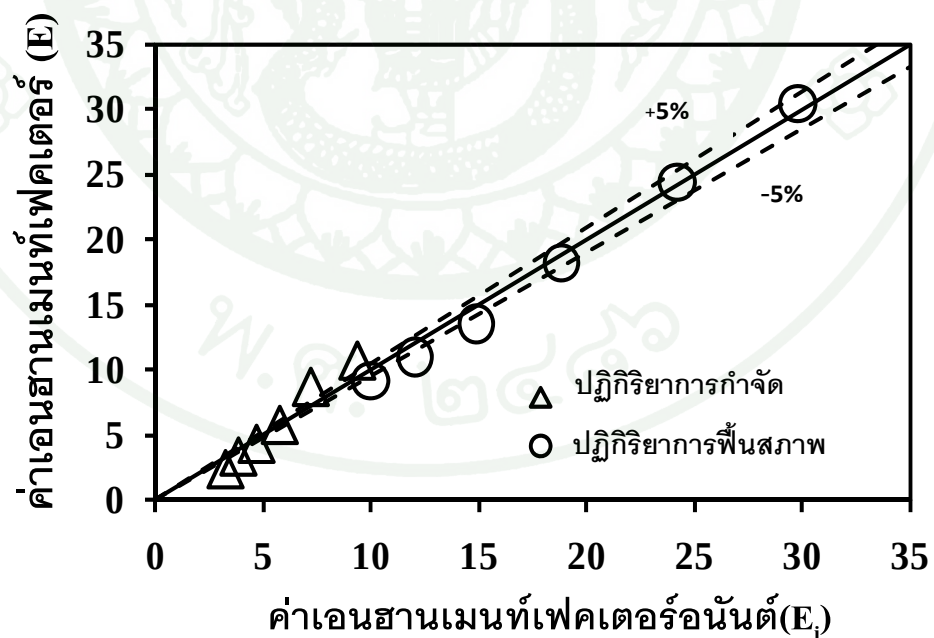
หมุนเวียนอัตโนมัติ หลังจากทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลแล้วทำการตรวจสอบช่วงของการเกิดปฏิกิริยาโดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอนฮานเมนต์ฟลักเตอร์และค่าเอนฮานเมนต์ฟลักเตอร์อนันต์ (สมการ (37)) แสดงในภาพที่ 44 พบว่าค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองปฏิกิริยา ดังนั้นสมมุติฐานช่วงการเกิดปฏิกิริยาที่เสนอมีความสมเหตุสมผล ผลการทดลองการหาค่าตัวแปรการถ่ายโอนมวลแสดงดังตารางที่ 11 ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของการทดลองนี้กับค่าที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์จากการตรวจเอกสารมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน (Karimi *et al.*, 2007) ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่คำนวณโดยพื้นที่การทดลองนี้ในส่วนของโรเชอร์มีค่าสูงกว่าค่าในส่วนคานันคัมเมอร์เพราะป้อนก๊าซเข้าส่วนของโรเชอร์ด้วยอัตราที่สูงกว่า



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\epsilon_{L,1}}{v_1} \left(-\frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} \right)$ กับ $a_1 C_{H_2S}^* \left(1 + \frac{D_{Fe^{3+}} C_{Fe^{3+}}}{v_1 D_{H_2S} C_{H_2S}} \right)$ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในโรเชอร์ของถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\epsilon_{L,2}}{v_2} \left(-\frac{dC_{Fe^{2+}}}{dt} \right)$ กับ $a_2 C_{O_2}^* \left(1 + \frac{D_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}}{v_2 D_{O_2} C_{O_2}} \right)$ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในคาน้ำคัมเมอร์ของถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิต



ภาพที่ 44 การเปรียบเทียบระหว่างค่าเอนฮานเมนต์เฟลเตอร์กับค่าเอนฮานเมนต์เฟลเตอร์อนันต์สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

ตารางที่ 11 ค่าตัวแปรการถ่ายโอนมวลจากการคำนวณ

ส่วนของ ถังปฏิกรณ์	แหล่งที่มา	ตัวแปรของการถ่ายโอนมวล	
		พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง ก๊าซและของเหลว (เมตร ² /เมตร ³)	สัมประสิทธิ์ การถ่ายโอนมวล (เมตร/วินาที)
ไรเซอร์	ค่าจากการทดลอง	93.40	2.64×10^{-5}
	ค่าจากการตรวจเอกสาร (Eq. (34))	93.75	2.36×10^{-5} (Karimi <i>et al.</i> , 2007)
ดาวน์คัมเมอร์	ค่าจากการทดลอง	20.60	1.13×10^{-5}
	ค่าจากการตรวจเอกสาร (Eq. (34))	18.00	2.15×10^{-5} (Karimi <i>et al.</i> , 2007)

สรุป

ผลการวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายเหล็กคิเลทในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติลดลงตามเวลา และมีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็กคิเลทในส่วนดาวน์คัมเมอร์ไม่สมบูรณ์
2. กระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรท (NaOH with Sodium Citrate) เป็นสารปรับความเป็นกรดต่าง ได้ประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่ากรณีใช้สารปรับความเป็นกรดต่างชนิดเดิม (Tris (hydroxymethyl) aminomethane) แต่เมื่อนำมาคิดราคาต่อประสิทธิภาพการกำจัด พบว่าสารความเป็นกรดต่าง Tris (hydroxymethyl) aminomethane มีราคาต่อปริมาณการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงที่สุด เนื่องจากสารเคมีมีราคาแพงมาก ดังนั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรท (NaOH with Sodium Citrate) ซึ่งมีราคาต่อปริมาณการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำที่สุด จะคุ้มทุนกว่าเพราะราคาถูกกว่ามากและประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้
3. จลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพจะเขียนได้ในสูตร $-r_1 = 15.76C_{H_2S}C_{Fe^{3+}}$ และ $-r_2 = 0.16C_{O_2}C_{Fe^{2+}}^2$ ตามลำดับ
4. ในการศึกษาข้อมูลการถ่ายโอนมวลในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติพบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวในไรเซอร์และดาวน์คัมเมอร์มีค่าเท่ากับ 93.4 เมตร²/เมตร³ และ 20.6 เมตร²/เมตร³ ตามลำดับ และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในไรเซอร์และดาวน์คัมเมอร์มีค่าเท่ากับ 2.64×10^{-5} เมตร/วินาที และ 1.13×10^{-5} เมตร/วินาที ตามลำดับ ซึ่งค่าตัวแปรการถ่ายโอนมวลทั้งสองค่าที่คำนวณโดยพื้นที่การทดลองนี้ในส่วนของไรเซอร์มีค่าสูงกว่าค่าในส่วนดาวน์คัมเมอร์เพราะป้อนก๊าซเข้าส่วนของไรเซอร์ด้วยอัตราที่สูงกว่า

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

บริษัท Sigma-Aldrich. 2547. เอกสารข้อมูลความปลอดภัย ปี 2547. แหล่งที่มา:

<http://www.chemtrack.org/MSDSSG/Trf/msdst/msdst7783-06-4.html>, 28 กันยายน 2553

Bird, R.B., W.R. Stewart and E.N. Lightfoot. 1960. **Transport Phenomena.**, John Wiley and Sons, Inc., Singapore.

Cabodi, A.J., H.R. Van, L.C. Hardison. 1982. First commercial test is success for catalytic hydrogen sulfide oxydation process. **Oil & Gas J.** 5: 107-110

Chisti, M.Y. 1989. **Airlift Bioreactors.**, Elsevier Science Publishers: New York.

DeBerry, D.W. 1993. Rates and mechanism of reaction of hydrogen sulfide with Iron chelates. **Topical Report; Gas ResearchInstitute:** Des Plaines, IL, USA.

Demmink, J. F. and A.A.C.M. Beenackers. 1997. Oxidation of ferrous nitrilotriacetic acid with oxygen: A model for oxygen mass transfer parallel to reaction kinetic. **Ind. Eng. Chem. Res.** 36: 1989-2005.

Fortuny, M., J.A. Baeza, X. Gamisans, C. Casas, J. Lafuente, M. A. Deshusses and D. Gabriel. 2008. Biological sweetening of energy gases mimics in biotrickling filters. **Chemosphere. J.** 71: 10-17.

Hardison, L. C. 1985. Go from hydrogen sulfide to sulfur in one unit. **Hydrocarb. Process.** 64: 70-71.

Janjaturaphan, S., S. Limtrakul, T. Vatanatham, Solution regeneration in a hydrogen sulfide removal process, **the 47th Kasetsart University Annual Conference**, March 3-5, 2009.

Boudon, J.C., 1997. Hydrogen sulfide removal by Lo-Cat process. **Hydrocarbon Processing**. April 1997: 57-62

Kapdi, S.S., V.K. Vijay, S.K. Rajesh and Rajendra Prasad. 2006. Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context. **Renewable Energy** 30: 1195-1202.

Karimi A., A.J. Jolodar, A.A. RajabPour, H.R. Bakhtiary. 2007. Mass transfer study in autocirculation reactor for H₂S removal of acid gas steams. **Petroleum & coal** 49: 1337-7027.

_____, A. Tavassoli, B. Nassernejad. 2010. Kinetic studies and reactor modeling of single step H₂S removal using chelate iron solution. **Chem. Eng. Res. Des.** 88: 784-756.

Kohl, A.L. and R. Nielsen. 1997. **Gas purification**, 5th edition. Gulf Professional Publishing.

Krevelen, V.D.W. and P.J. Hoftijzer. 1948. Kinetics of gas-liquid reactions part I. General theory. *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas* **67**: 563-586.

Levenspiel, O. 1999. **Chemical Reaction Engineering**, 3rd edition, Wiley Eastern University, New York.

Limtrakul, S., S. Rojanamatin, T. Vatanatham and P.A. Ramachandran. 2005. Auto-circulation for Hydrogen Sulfide Removal. **Ind. Eng. Chem. Res.** 44: 6115-6122.

Martinov M., F. Gancel, P. Jacques, I. nikov, S. Vlaev. 2008. Surfactant effect on aeration performance of stirred tank reactors. **Chem. Eng. Technol.** 10: 1491-1500.

- Martell, R., R.J. Motekaitis, D. Chen, R.D. Hancock, and D. McManus. 1996. Selection of new Fe(III)/Fe(II) chelating agents as catalysts for the oxidation of hydrogen sulfide to sulfur by Air. **Can. J. Chem.** 74: 1872-1879
- Nagl, G. 1997. Controlling hydrogen sulfide emission. **Chemical Engineering** 104: 125-1310.
- Saelee, R. 2010. **The Removal of Hydrogen Sulfide in Biogas from Concentrated Latex Industry with Iron(III) Chelate in Packed Column.** M.E. Thesis, Prince of Songkla University.
- Schomaker, A., H. Boerboom and Visser, A. 2000. **Anaerobic digestion of agro-industrial wastes: information network. Project FAIR-CT96-2083.** 1-31.
- Yuan W. and T.J. Bandosz. 2007. Removal of hydrogen sulfide from biogas on sludge-derived adsorbents. **Fuel. J.** 86: 2736–2746.
- Wilke, C. R., and P. Chang. 1955. Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions. **AIChE J.** 1: 264-270.
- Wubs H.J. and A.A.C.M. Beenackers. 1993. Kinetics of the oxidation of ferrous Chelates of EDTA and HEDTA in aqueous solution. **Ind. Eng. Chem. Res.** 32: 2580-2594.
- _____ and _____ 1994. Kinetics of H₂S absorption into aqueous ferric solution of EDTA and HEDTA. **AIChE. J.** 40: 433-444.





ตารางผนวกที่ 1 ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าและขาออก ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก
คลอไรด์ ความเข้มข้นของเหล็กคลอไรด์ ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อเนื่อง 16 ชั่วโมง ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ppm)		ประสิทธิภาพการกำจัด ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	ความเข้มข้นของเหล็กคลอไรด์ (โมล/ม ³)			ความเข้มข้นของสารละลายเหล็ก คลอไรด์
	ขาเข้า	ขาออก		เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	
0	2995.77	3.89	99.87	9.96	0.81	9.15	7.77
1	3008.12	46.33	98.46	9.99	2.17	7.82	7.69
2	2983.43	59.07	98.02	9.97	2.61	7.36	7.62
3	3000.03	67.50	97.75	9.99	3.10	6.89	7.53
4	2999.29	83.38	97.22	9.99	3.38	6.61	7.50
5	3006.84	93.51	96.89	9.94	3.69	6.25	7.38
6	2999.22	110.07	96.33	9.96	4.12	5.84	7.30
7	3001.09	120.04	96.00	9.99	4.63	5.36	7.21
8	2981.60	123.14	95.87	9.96	5.06	4.89	7.15
9	3000.47	136.52	95.45	9.96	5.31	4.64	7.07
10	3007.92	156.71	94.79	9.94	5.58	4.36	7.00
11	3007.32	173.52	94.23	9.99	5.87	4.13	6.84

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ppm)		ประสิทธิภาพการกำจัด ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	ความเข้มข้นของเหล็กคีเลท (โมล/ม ³)			ความเป็นกรดต่าง
	ขาเข้า	ขาออก		เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	
12	3012.43	184.06	93.89	9.97	6.19	3.79	6.77
13	3009.37	201.33	93.31	10.01	6.40	3.61	6.68
14	3010.94	217.99	92.76	9.99	6.70	3.29	6.61
15	2999.82	241.79	91.94	9.99	6.94	3.05	6.52
16	3000.69	300.07	90.00	9.97	7.15	2.82	6.43

หมายเหตุ ppm หนึ่งส่วนในล้านส่วน

ตารางผนวกที่ 2 ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าและขาออก ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน
อัตโนมัติ โดยใช้สารปรับความเป็นกรดต่างชนิด

เวลา (ชั่วโมง)	โพแตสเซียมไฮดรอกไซด์			โซเดียม ไฮดรอกไซด์			โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรท		
	ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์		ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์		ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์		ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
	(ppm)			(ppm)			(ppm)		
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก			
0	3000.39	8.40	99.72	2993.80	9.88	99.67	3001.81	9.31	99.69
1	3007.06	56.53	98.12	2999.29	50.69	98.31	3000.59	40.21	98.66
2	3006.16	93.49	96.89	3000.96	97.23	96.76	3007.36	72.48	97.59
3	3000.00	123.90	95.87	2999.38	128.07	95.73	3005.33	97.97	96.74
4	2992.38	155.90	94.79	3004.24	163.13	94.57	2999.78	135.29	95.49
5	3004.37	183.57	93.89	2995.64	198.91	93.36	3006.81	169.58	94.36
6	3004.85	217.55	92.76	2999.13	231.23	92.29	3007.43	188.57	93.73
7	3006.14	270.55	91.00	3000.02	264.60	91.18	3008.45	224.43	92.54
8	2999.29	308.03	89.73	3000.59	315.66	89.48	3006.61	266.99	91.12

ตารางผนวกที่ 3 ความเข้มข้นของสารละลายหลักคัลเลท ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมิต โดยใช้สารปรับความเป็นกรดต่างชนิด

เวลา (ชั่วโมง)	โพแตสเซียมไฮดรอกไซด์			โซเดียมไฮดรอกไซด์			โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซิเตรท		
	ความเข้มข้นของหลักคัลเลท			ความเข้มข้นของหลักคัลเลท			ความเข้มข้นของหลักคัลเลท		
	(โมล/ม ³)			(โมล/ม ³)			(โมล/ม ³)		
	หลักรวม	หลัก (2+)	หลัก (3+)	หลักรวม	หลัก (2+)	หลัก (3+)	หลักรวม	หลัก (2+)	หลัก (3+)
0	9.96	0.95	9.00	9.99	0.99	9.00	9.99	0.98	9.02
1	9.99	2.65	7.35	9.94	2.58	7.36	9.96	2.44	7.52
2	9.96	3.01	6.95	9.96	2.87	7.09	9.96	2.80	7.15
3	9.96	3.51	6.45	9.99	3.42	6.57	9.94	3.29	6.65
4	9.94	3.79	6.15	9.96	3.79	6.17	9.99	3.65	6.35
5	9.99	4.25	5.75	9.96	4.18	5.78	9.97	4.03	5.95
6	9.97	4.62	5.36	9.94	4.47	5.47	10.01	4.46	5.55
7	10.01	5.06	4.95	9.99	5.04	4.95	9.99	4.94	5.05
8	9.99	5.56	4.43	9.97	5.43	4.55	9.99	5.29	4.70

ตารางผนวกที่ 4 ความเป็นกรดต่าง ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ โดยใช้สารปรับความเป็นกรดต่างชนิด

เวลา (ชั่วโมง)	โพแตสเซียมไฮดรอกไซด์	โซเดียมไฮดรอกไซด์	โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสม โซเดียมซิทเรท
	ความเป็นกรดต่าง	ความเป็นกรดต่าง	ความเป็นกรดต่าง
0	7.74	7.74	7.75
1	7.62	7.63	7.65
2	7.49	7.51	7.57
3	7.35	7.41	7.44
4	7.17	7.28	7.34
5	7.06	7.15	7.26
6	6.87	6.97	7.17
7	6.65	6.71	7.05
8	6.51	6.64	6.92

ตารางผนวกที่ 5 ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าและขาออก ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน
อัตโนมัติใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซัลไฟด์เพื่อปรับความเป็นกรดต่าง โดยใช้ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นแตกต่างกัน

เวลา (ชั่วโมง)	ความเป็นกรดต่างเริ่มต้น 7.7			ความเป็นกรดต่างเริ่มต้น 7.8			ความเป็นกรดต่างเริ่มต้น 8.0			ความเป็นกรดต่างเริ่มต้น 8.1		
	ความเข้มข้นก๊าซ		ประสิทธิภาพการ กำจัดก๊าซ	ความเข้มข้นก๊าซ		ประสิทธิภาพการ กำจัดก๊าซ	ความเข้มข้นก๊าซ		ประสิทธิภาพการ กำจัดก๊าซ	ความเข้มข้นก๊าซ		ประสิทธิภาพการ กำจัดก๊าซ
	ไฮโดรเจนซัลไฟด์			ไฮโดรเจนซัลไฟด์			ไฮโดรเจนซัลไฟด์			ไฮโดรเจนซัลไฟด์		
	(ppm)		ไฮโดรเจนซัลไฟด์	(ppm)		ไฮโดรเจนซัลไฟด์	(ppm)		ไฮโดรเจนซัลไฟด์	(ppm)		ไฮโดรเจนซัลไฟด์
	ขาเข้า	ขาออก		ขาเข้า	ขาออก		ขาเข้า	ขาออก		ขาเข้า	ขาออก	
0	3000.00	30.90	98.97	3000.00	9.30	99.69	3000.00	10.20	99.66	3000.00	13.80	99.54
1	3001.23	49.82	98.34	2998.77	40.18	98.66	2999.33	38.39	98.72	3004.87	44.17	98.53
2	3003.24	86.49	97.12	3005.54	72.43	97.59	3002.97	69.67	97.68	2996.27	76.40	97.45
3	3003.18	127.94	95.74	3003.51	97.91	96.74	2999.10	106.47	96.45	2999.75	115.79	96.14
4	2998.39	167.31	94.42	2997.97	135.21	95.49	2999.94	132.90	95.57	3000.65	149.43	95.02
5	2999.99	197.70	93.41	3004.99	169.48	94.36	2998.70	153.83	94.87	3001.21	173.17	94.23
6	2999.15	258.23	91.39	3005.62	188.45	93.73	2998.17	184.39	93.85	2995.64	203.40	93.21
7	2998.28	296.53	90.11	3006.63	224.29	92.54	3000.23	205.82	93.14	2999.78	227.38	92.42
8	3000.49	349.86	88.34	3004.80	266.83	91.12	2999.71	220.78	92.64	3000.40	240.63	91.98

ตารางผนวกที่ 6 ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กคีเลท ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซिटเรทปรับความเป็นกรดต่างโดยใช้ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นแตกต่างกัน

เวลา (ชั่วโมง)	ความเป็นกรดต่างเริ่มต้น 7.7			ความเป็นกรดต่างเริ่มต้น 7.8			ความเป็นกรดต่างเริ่มต้น 8.0			ความเป็นกรดต่างเริ่มต้น 8.1		
	ความเข้มข้นของเหล็กคีเลท			ความเข้มข้นของเหล็กคีเลท			ความเข้มข้นของเหล็กคีเลท			ความเข้มข้นของเหล็กคีเลท		
	(โมล/ม ³)			(โมล/ม ³)			(โมล/ม ³)			(โมล/ม ³)		
	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)
0	9.96	0.96	9.00	9.99	0.98	9.02	9.99	0.91	9.08	9.98	0.91	9.07
1	9.94	2.54	7.40	9.96	2.44	7.52	9.94	2.34	7.60	9.99	2.37	7.62
2	9.99	2.71	7.28	9.96	2.80	7.15	9.96	2.75	7.21	9.96	2.77	7.19
3	9.97	3.07	6.90	9.94	3.29	6.65	9.99	3.27	6.72	9.96	3.23	6.73
4	10.01	3.43	6.58	9.99	3.65	6.35	9.96	3.38	6.57	9.94	3.49	6.45
5	9.99	3.70	6.29	9.97	4.03	5.95	9.96	3.99	5.97	9.99	4.02	5.97
6	9.99	3.92	6.07	10.01	4.46	5.55	9.94	4.37	5.57	9.97	4.45	5.52
7	9.97	4.11	5.86	9.99	4.94	5.05	9.99	4.83	5.16	10.01	4.83	5.18
8	9.98	4.36	5.62	9.99	5.29	4.70	9.97	5.17	4.80	9.99	5.21	4.78

ตารางผนวกที่ 7 ความเป็นกรดต่าง ในถังปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัตโนมัติ ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมซัลเฟต ปรับความเป็นกรดต่าง โดยใช้ความเป็นกรดต่างเริ่มต้นแตกต่างกัน

เวลา (ชั่วโมง)	ความเป็นกรดต่าง เริ่มต้น 7.7	ความเป็นกรดต่าง เริ่มต้น 7.8	ความเป็นกรดต่าง เริ่มต้น 8.0	ความเป็นกรดต่าง เริ่มต้น 8.1
	ความเป็นกรดต่าง	ความเป็นกรดต่าง	ความเป็นกรดต่าง	ความเป็นกรดต่าง
0	7.66	7.75	7.94	7.94
1	7.58	7.65	7.89	7.85
2	7.49	7.57	7.77	7.77
3	7.35	7.44	7.69	7.67
4	7.23	7.34	7.56	7.49
5	7.12	7.26	7.39	7.35
6	6.96	7.17	7.25	7.29
7	6.81	7.05	7.11	7.13
8	6.52	6.92	6.97	6.95

ตารางผนวกที่ 8 ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้าและขาออก ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในถังปฏิกรณ์กวนแบบกึ่งเฉพาะ
 งด โดยใช้ความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนแตกต่างกัน

ความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวน																			
		-			100 รอบต่อนาที			200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที			500 รอบต่อนาที		
เวลา (นาท)	ความเข้มข้นก๊าซ			ความเข้มข้นก๊าซ			ความเข้มข้นก๊าซ			ความเข้มข้นก๊าซ			ความเข้มข้นก๊าซ			ความเข้มข้นก๊าซ			
	ไฮโดรเจนซัลไฟด์			ไฮโดรเจนซัลไฟด์			ไฮโดรเจนซัลไฟด์			ไฮโดรเจนซัลไฟด์			ไฮโดรเจนซัลไฟด์			ไฮโดรเจนซัลไฟด์			
	η_{H_2S}			η_{H_2S}			η_{H_2S}			η_{H_2S}			η_{H_2S}			η_{H_2S}			
	(ppm)			(ppm)			(ppm)			(ppm)			(ppm)			(ppm)			
ขาเข้า		ขาออก		ขาเข้า		ขาออก		ขาเข้า		ขาออก		ขาเข้า		ขาออก		ขาเข้า		ขาออก	
0	3000.00	-	-	3000.00	-	-	3000.00	-	-	3000.00	-	-	3000.00	-	-	3000.00	-	-	
5	3000.00	1071.57	64.28	3000.00	1014.06	66.20	3000.00	985.30	67.16	3000.00	960.38	67.99	3000.00	958.47	68.05	3000.00	958.47	68.05	
10	3000.00	1200.00	60.00	3000.00	1180.83	60.64	3000.00	1180.83	60.64	3000.00	1161.66	61.28	3000.00	1163.58	61.21	3000.00	1161.66	61.28	
15	3000.00	1592.97	46.90	3000.00	1571.88	47.60	3000.00	1380.19	53.99	3000.00	1361.02	54.63	3000.00	1359.11	54.70	3000.00	1353.35	54.89	
20	3000.00	1997.44	33.42	3000.00	1991.69	33.61	3000.00	1800.00	40.00	3000.00	1777.00	40.77	3000.00	1778.91	40.70	3000.00	1775.08	40.83	
25	3000.00	2377.00	20.77	3000.00	2363.58	21.21	3000.00	2171.88	27.60	3000.00	2089.46	30.35	3000.00	2091.37	30.29	3000.00	2093.29	30.22	
30	3000.00	2681.79	10.61	3000.00	2674.12	10.86	3000.00	2495.85	16.81	3000.00	2484.35	17.19	3000.00	2482.43	17.25	3000.00	2478.59	17.38	

หมายเหตุ η_{H_2S} ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ตารางผนวกที่ 9 ความเข้มข้นของสารละลายเหล็กคิเลทของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในปฏิกิริยั้งกวนแบบกึ่งเฉพาะงวด โดยใช้ความเร็วรอบมอเตอร์ไบกวนแตกต่างกัน

เวลา (นาที)	ความเร็วรอบมอเตอร์ไบกวน																	
	-			100 รอบต่อนาที			200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที			500 รอบต่อนาที		
	ความเข้มข้นของ เหล็กคิเลทเฉลี่ย			ความเข้มข้นของ เหล็กคิเลทเฉลี่ย			ความเข้มข้นของ เหล็กคิเลทเฉลี่ย			ความเข้มข้นของ เหล็กคิเลทเฉลี่ย			ความเข้มข้นของ เหล็กคิเลทเฉลี่ย			ความเข้มข้นของ เหล็กคิเลทเฉลี่ย		
	(โมล/ม ³)			(โมล/ม ³)			(โมล/ม ³)			(โมล/ม ³)			(โมล/ม ³)			(โมล/ม ³)		
	เหล็ก รวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	เหล็ก รวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	เหล็ก รวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	เหล็ก รวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	เหล็ก รวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	เหล็ก รวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)
0	9.95	-	-	9.95	-	-	9.97	-	-	9.97	-	-	9.96	-	-	9.96	-	-
5	9.95	2.55	7.40	9.95	2.75	7.20	9.97	2.92	7.05	9.97	2.95	7.02	9.96	2.94	7.02	9.96	2.94	7.02
10	9.95	4.60	5.35	9.95	4.80	5.15	9.97	4.97	5.00	9.97	5.06	4.91	9.96	5.05	4.91	9.96	5.05	4.91
15	9.95	6.15	3.80	9.95	6.45	3.50	9.97	6.54	3.43	9.97	6.66	3.31	9.96	6.65	3.31	9.96	6.65	3.31
20	9.95	6.98	2.97	9.95	7.31	2.64	9.97	7.51	2.46	9.97	7.67	2.30	9.96	7.66	2.30	9.96	7.67	2.29
25	9.95	7.59	2.36	9.95	8.01	1.94	9.97	8.30	1.67	9.97	8.50	1.47	9.96	8.49	1.47	9.96	8.49	1.47
30	9.95	8.12	1.83	9.95	8.60	1.35	9.97	8.90	1.07	9.97	9.13	0.84	9.96	9.12	0.84	9.96	9.12	0.84

ตารางผนวกที่ 10 ความเข้มข้นของสารละลายหลักคิเลทของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายหลัก (2+) คิเลท ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาจะวอด โดยใช้ความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวนแตกต่างกัน

เวลา (นาที)	ความเร็วรอบมอเตอร์ใบกวน					
	400 รอบต่อนาที			500 รอบต่อนาที		
	ความเข้มข้นของหลักคิเลทเฉลี่ย			ความเข้มข้นของหลักคิเลทเฉลี่ย		
	(โมล/ม ³)			(โมล/ม ³)		
	หลักรวม	หลัก (2+)	หลัก (3+)	หลักรวม	หลัก (2+)	หลัก (3+)
0	9.95	9.75	0.20	9.94	9.76	0.18
5	9.95	6.82	3.13	9.94	6.82	3.12
10	9.95	4.85	5.10	9.94	4.85	5.09
15	9.95	3.92	6.03	9.94	3.90	6.04
20	9.95	3.08	6.87	9.94	3.09	6.85
25	9.95	2.37	7.58	9.94	2.36	7.58
30	9.95	1.70	8.25	9.94	1.69	8.25

ตารางผนวกที่ 11 ความเข้มข้นสารละลายเหล็กคัลเลทและความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในถังปฏิกรณ์กวนแบบกึ่งเฉพาะงวด

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของเหล็กคัลเลทตำแหน่งที่ 1 (โมล/ม ³)			ความเข้มข้นของเหล็กคัลเลทตำแหน่งที่ 2 (โมล/ม ³)			ความเข้มข้นของ เหล็ก (3+) คัลเลทเฉลี่ย (โมล/ม ³)	ความเข้มข้นก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ppm)	
	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)		ขาเข้า	ขาออก
0	9.95	-	9.95	9.95	-	9.95	9.95	-	-
2	9.95	1.63	8.96	9.95	1.44	9.01	8.98	3000.00	822.36
4	9.95	2.76	7.94	9.95	2.46	8.2	8.07	3000.00	989.14
6	9.95	3.80	6.91	9.95	3.22	7.52	7.21	3000.00	1188.50
8	9.95	4.60	5.89	9.95	3.85	6.93	6.40	3000.00	1416.61
10	9.95	5.20	4.91	9.95	4.22	6.55	5.69	3000.00	1596.81

ตารางผนวกที่ 12 ความเข้มข้นสารละลายเหล็กคิเลทและความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คิเลท ในถังปฏิกรณ์
กวนแบบกึ่งเฉพาจะวด

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของเหล็กคิเลทตำแหน่งที่ 1 (โมล/ม ³)			ความเข้มข้นของเหล็กคิเลทตำแหน่งที่ 2 (โมล/ม ³)			ความเข้มข้นของ เหล็ก (2+) คิเลทเฉลี่ย (โมล/ม ³)	ก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่ใน สถานะละลาย	
	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)		(มิลลิกรัม)	(โมล/ม ³)
0	9.95	9.75	0.20	9.95	9.75	0.2	9.75	-	-
2	9.95	8.32	1.63	9.95	8.51	1.44	8.41	2.3	0.072
4	9.95	7.19	2.76	9.95	7.49	2.46	7.34	2.6	0.081
6	9.95	6.15	3.80	9.95	6.73	3.22	6.44	2.9	0.091
8	9.95	5.35	4.60	9.95	6.1	3.85	5.72	3.5	0.111
10	9.95	4.75	5.20	9.95	5.73	4.22	5.22	4.2	0.130

ตารางผนวกที่ 13 ความเข้มข้นสารละลายเหล็กคิเลทและความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในถังปฏิกรณ์แบบ หมุนเวียนอัดโน้มติ โดยความเข้มข้นสารละลายเหล็กเริ่มต้น 19.76 โมล/ม³

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของเหล็กคิเลทตำแหน่งที่ 1 (โมล/ม ³)			ความเข้มข้นของเหล็กคิเลทตำแหน่งที่ 2 (โมล/ม ³)			ความเข้มข้นของ เหล็ก (3+) คิเลทเฉลี่ย (โมล/ม ³)	ความเข้มข้นก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ppm)	
	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)		ขาเข้า	ขาออก
0	19.76	-	19.76	19.76	-	19.76	19.76	3000.00	-
5	19.76	4.01	15.75	19.76	2.51	17.25	16.50	3000.00	1650.00
10	19.76	7.32	12.44	19.76	5.2	14.56	13.51	2995.00	1755.00
15	19.76	10.03	9.73	19.76	7.89	11.87	10.81	2995.00	1845.00
20	19.76	12.67	7.09	19.76	10.05	9.71	8.40	2997.00	1935.00
25	19.76	14.19	5.57	19.76	12.53	7.23	6.41	2997.00	2040.00
30	19.76	15.57	4.19	19.76	14.65	5.11	4.65	2997.00	2175.00

ตารางผนวกที่ 14 ความเข้มข้นสารละลายเหล็กคิเลทและความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คิเลท ในถัง ปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ โดยความเข้มข้นสารละลายเหล็กเริ่มต้น 18.60 โมล/ม³

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของเหล็กคิเลทตำแหน่งที่ 1 (โมล/ม ³)			ความเข้มข้นของเหล็กคิเลทตำแหน่งที่ 2 (โมล/ม ³)			ความเข้มข้นของ เหล็ก (2+) คิเลทเฉลี่ย (โมล/ม ³)	ก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่ใน สถานะ (มิลลิกรัม) (โมล/ม ³)	
	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)			
0	19.80	18.60	1.20	19.80	18.60	1.20	18.60	-	-
5	19.80	16.89	2.91	19.80	17.71	2.87	17.30	5.08	0.159
10	19.80	14.81	4.99	19.80	17.29	4.95	16.05	5.16	0.161
15	19.80	12.63	7.17	19.80	17.17	7.13	14.90	5.24	0.164
20	19.80	11.45	8.35	19.80	16.25	8.31	13.85	5.32	0.166
25	19.80	10.21	9.59	19.80	15.53	9.55	12.87	5.35	0.167
30	19.80	8.77	11.03	19.80	15.15	10.99	11.96	5.35	0.167

ตารางผนวกที่ 15 ความเข้มข้นสารละลายเหล็กคิเลทและความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในถังปฏิกรณ์แบบ หมุนเวียนอัดโนมัติ โดยความเข้มข้นสารละลายเหล็กเริ่มต้น 9.95 โมล/ม³

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของเหล็กคิเลทตำแหน่งที่ 1 (โมล/ม ³)			ความเข้มข้นของเหล็กคิเลทตำแหน่งที่ 2 (โมล/ม ³)			ความเข้มข้นของ เหล็ก (3+) คิเลทเฉลี่ย (โมล/ม ³)	ความเข้มข้นก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ppm)	
	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)		ขาเข้า	ขาออก
0	9.95	-	9.95	9.95	-	9.95	9.95	-	-
5	9.95	3.94	6.01	9.95	1.94	8.01	7.01	3000.00	1650.00
10	9.95	5.66	4.29	9.95	3.82	6.13	5.21	3000.00	1755.00
15	9.95	6.37	3.58	9.95	5.53	4.42	4.00	2999.00	1845.00
20	9.95	7.35	2.60	9.95	6.31	3.64	3.12	2999.00	1935.00
25	9.95	7.85	2.10	9.95	7.23	2.72	2.41	2995.00	2040.00
30	9.95	8.34	1.61	9.95	7.74	2.21	1.91	2995.00	2175.00

ตารางผนวกที่ 16 ความเข้มข้นสารละลายเหล็กคิเลทและความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ของปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพสารละลายเหล็ก (2+) คิเลท ในถัง ปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอัดโนมัติ โดยความเข้มข้นสารละลายเหล็กเริ่มต้น 8.52 โมล/ม³

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของเหล็กคิเลทตำแหน่งที่ 1 (โมล/ม ³)			ความเข้มข้นของเหล็กคิเลทตำแหน่งที่ 2 (โมล/ม ³)			ความเข้มข้นของ เหล็ก (2+) คิเลทเฉลี่ย (โมล/ม ³)	ก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่ใน สารละลาย	
	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)	เหล็กรวม	เหล็ก (2+)	เหล็ก (3+)		(Mg)	(โมล/ม ³)
0	9.90	8.52	1.38	9.90	8.52	1.38	8.52	-	-
5	9.90	6.83	3.07	9.90	7.99	1.91	7.41	3.65	0.114
10	9.90	5.99	3.91	9.90	7.61	2.29	6.80	3.83	0.120
15	9.90	5.15	4.75	9.90	7.07	2.83	6.11	4.00	0.125
20	9.90	4.64	5.26	9.90	6.4	3.5	5.52	4.18	0.131
25	9.90	4.06	5.84	9.90	6.14	3.76	5.10	4.36	0.136
30	9.90	3.87	6.03	9.90	5.35	4.55	4.61	4.53	0.142

วิธีวิเคราะห์สารละลายตัวอย่าง

1. วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ปริมาณเหล็กรวมด้วยเครื่อง Atomic Absorption รุ่น Varian Spectra AA 300/400

1.1 เตรียมสารละลายเหล็กมาตรฐานเข้มข้น 1000 ppm

1.2 ปิเปตสารละลายในข้อ 1.1 มา 0.5 mL ใส่ในขวดปริมาตรปรับปริมาตรด้วยน้ำดีไอ เป็น 10 mL จะได้ความเข้มข้น 50 ppm, ปิเปตสารละลายในข้อ 1.1 มา 1 mL ใส่ในขวดปริมาตรปรับปริมาตรด้วยน้ำดีไอเป็น 10 mL จะได้ความเข้มข้น 100 ppm, ปิเปตสารละลายในข้อ 1.1 มา 1.5 mL ใส่ในขวดปริมาตรปรับปริมาตรด้วยน้ำดีไอเป็น 10 mL จะได้ความเข้มข้น 150 ppm, ปิเปตสารละลายในข้อ 1.1 มา 2 mL ใส่ในขวดปริมาตรปรับปริมาตรด้วยน้ำดีไอเป็น 10 mL จะได้ความเข้มข้น 200 ppm, ปิเปตสารละลายในข้อ 1.1 มา 2.5 mL ใส่ในขวดปริมาตรปรับปริมาตรด้วยน้ำดีไอเป็น 10 mL จะได้ความเข้มข้น 250 ppm

1.3 นำสารละลายมาตรฐานที่เตรียมไว้คือ 50, 100, 150, 200, 250 ppm มาวัดค่า absorbance โดยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer

1.4 สร้าง standard curve ระหว่างค่า absorbance กับความเข้มข้นของเหล็ก

2. วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก (2+) ที่เลทด้วยเครื่อง UV – spectrophotometer รุ่น Shimadzu UV 160 U

2.1 สารละลายมาตรฐานเหล็ก ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 0.01 mg/mL (10ppm): ชั่ง $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 0.0702g โดยชั่งให้มีค่าผิดพลาดไม่เกิน 0.0002g ใส่ลงใน volumetric flask ขนาด 1 ลิตรละลายในน้ำดีไอประมาณ 50mL ที่มีกรดกำมะถันเข้มข้นผสมอยู่ 1-2 mL ปรับปริมาตรให้ถึงขีดที่กำหนด แล้วผสมให้เข้ากัน

2.2 1,10-Phenanthroline solution: ละลาย 1,10-Phenanthroline monohydrate 0.1g ในน้ำกลั่นประมาณ 100mL อุ่นเบา ๆ หากไม่ละลาย แต่ละ mL ของสารละลายนี้จะเพียงพอต่อปริมาณ

ของเหล็กไม่เกิน 0.09 mg อย่าเตรียมสารละลายเกินกว่าที่ต้องการใช้ หากสารละลายที่เตรียมไว้มีสีคล้ำขึ้น ให้ทิ้งสารละลายนั้นไป

2.3 Sodium acetate ($\text{NaOAc} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$): 1.2 M ละลาย $\text{NaOAc} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 16g ในน้ำกลั่น 100 mL

2.4 ปิเปตสารละลายมาตรฐานเหล็ก 2, 4, 6, 8 และ 10 mL ลงใน volumetric flask ขนาด 100mL 5 ใบ

2.5 เติมน้ำดีไอประมาณ 50 mL ลงใน volumetric flask ขนาด 100 mL อีกใบหนึ่ง เพื่อใช้เป็น blank

2.6 สำหรับ volumetric flask แต่ละใบ ให้เติมสารละลายต่อไปนี้ลงไป

- สารละลาย 1,10-Phenanthroline 10 mL
- สารละลาย Sodium acetate 10 mL

2.7 เจือจางสารละลายทั้งหมดด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดปริมาตร 100 mL แล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที

2.8 นำสารละลายมาตรฐานไปวัดค่า absorbance โดยใช้เครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นที่ 508 nm เพื่อสร้าง calibration curve

3. วิธี Azide Modification

วิธีการปริมาณออกซิเจนละลายที่นิยมใช้กัน คือ วิธี Azide Modification เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้หาปริมาณออกซิเจนละลายได้ดีในน้ำเกือบทุกชนิด ซึ่งมีหลักการ คือ ออกซิเจนจะออกซิไดส์ Mn^{+2} ไปเป็น Mn^{+4} ภายใต้อุณหภูมิเป็นด่าง Mn^{+4} นี้ สามารถจะออกซิไดส์ I^- ไปเป็น I_2 อีตระภายใต้สภาวะที่เป็นกรด นั่นคือปริมาณของ I_2 อีตระที่ถูกขับออกมาจะสมมูลกับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำตอนเริ่มต้นและวัดได้โดยการไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐาน โซเดียมไธโอซัลเฟต มีขั้นตอนการหาค่าออกซิเจนที่ละลายโดยสารละลายด้วยวิธี Azide Modification ดังนี้

3.1 เก็บสารละลายตัวอย่างใส่ขวดเก็บตัวอย่างเทน้ำหล่อไว้บริเวณจุกขวดตัวอย่าง

3.2 เปิดจุกเติมสารละลาย Manganese Sulfate (MnSO_4) 1 ml. โดยขณะเติมให้ปลายปิเปตอยู่ใต้ผิวสารละลายตัวอย่าง

3.3 เติมสารละลาย Alkali-iodide-azide (AIA) 1 ml. โดยขณะเติมให้ปลายปิเปต อยู่ใต้ผิวสารละลายตัวอย่าง

3.4 ปิดจุกโดยอย่าให้มีฟองอากาศภายในขวด คว่ำขวดไปมาหลายๆ ครั้งเพื่อให้สารผสมกัน

3.5 ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนจนได้ปริมาณสารละลายใสเกินครึ่งหนึ่งของขวด

3.6 เติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 1 ml. โดยให้กรดค่อยๆ ไหลลงไปข้างๆ ขวด

3.7 ปิดจุกคว่ำขวดขึ้นลงหลายครั้งจนกระทั่งตะกอนละลายหมด

3.8 ตวงสารละลายที่ได้มาปริมาตร 200 ml.

3.9 นำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.025 N โดยสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเข้มเป็นสีเหลืองอ่อน

3.10 เติมน้ำแบ่ง 2-3 หยด จะได้สารละลายสีน้ำเงินเข้ม

3.11 ไทเทรตต่อจนกระทั่งสีน้ำเงินหายไป ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ไปจะเทียบเท่ากับปริมาณออกซิเจนที่ละลายในสารละลายตัวอย่างโดยมีหน่วยเป็น mg/l



1. การหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้า

$$p_{H_2S} = (1atm + \rho gh) \times 0.003$$

$$10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 1 \text{ atm}$$

$$0.04 \text{ mH}_2\text{O} = 0.004 \text{ atm}$$

$$H_2S \text{ 3000 ppm} = 0.3\% \text{ โดยโมล}$$

$$p_{H_2S} = (1atm + 0.004atm) \times 0.003$$

$$p_{H_2S} = 0.003012atm$$

$$C_{H_2S,l} = \frac{p_{H_2S}}{H}$$

$$C_{H_2S,l} = \frac{0.003012 * 101.325kPa}{1.95kPa * m^3 / mol}$$

$$C_{H_2S} = 0.1565 mol / m^3$$

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออก

$$p_{H_2S} = (1atm) \times 0.000825$$

$$p_{H_2S} = 0.000825atm$$

$$C_{H_2S,l} = \frac{p_{H_2S}}{H}$$

$$C_{H_2S,l} = \frac{0.000825 * 101.325kPa}{1.95kPa * m^3 / mol}$$

$$C_{H_2S,l} = 0.0429 mol / m^3$$

2. สมการการดุลมวลของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$F_g (Y_{Ain} - Y_{Aout}) = -\frac{V_L}{v} \frac{dC_B}{dt} = (-R_A)V_R$$

$$F_{gin} - F_{gout} = -\frac{V_L}{v} \frac{dC_B}{dt} = (-R_A)V_R$$

$$F_{H_2S,in} - F_{H_2S,out} = -\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} = (-R_1)$$

ตารางผนวกที่ 17 แสดงการดุลมวลของเฟสก๊าซและเฟสของเหลวของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาะวง

การดุลมวลของปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์		
เวลา (นาทีก)	เฟสก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่หายไป (10^{-3} โมล/นาทีก)	เฟสของเหลว เหล็ก (3+) คีเลทที่หายไป (10^{-3} โมล/นาทีก)
0	0	0
2	0.36	0.48
4	0.34	0.43
6	0.31	0.38
8	0.27	0.35
10	0.25	0.28

2.1 การคำนวณของก๊าซ

$$P_{\text{total}} = (1\text{atm} + 0.004\text{atm})$$

$$R = 8.206 \times 10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$T = 298\text{K}$$

$$\dot{V}_G = 3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$b = 2$$

$$P_{\text{total}} \dot{V} = n_{\text{total}} RT$$

$$n_{\text{total}} = \frac{P_{\text{total}} \dot{V}}{RT}$$

$$n_{\text{total}} = \frac{(1.004\text{atm})(3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1})}{(8.206 \times 10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})(298\text{K})}$$

$$n_{\text{total}} = 0.1488 \text{ mol} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$\therefore F_{\text{gin}} = 0.1488 \text{ mol} \cdot \text{min}^{-1} \times 0.003 \text{ mol} / \text{mol}$$

$$\therefore F_{\text{gin}} = 0.0004465 \text{ mol} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$n_{\text{total}} = \frac{P_{\text{total}} V}{RT}$$

$$n_{\text{total}} = \frac{(1\text{atm})(3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1})}{(8.206 \times 10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})(298\text{K})}$$

$$n_{\text{total}} = \frac{(1\text{atm})(3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1})}{(8.206 \times 10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})(298\text{K})}$$

$$n_{\text{total}} = 0.1442 \text{ mol} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$\therefore F_{\text{gout}} = 0.1442 \text{ mol} \cdot \text{min}^{-1} \times 0.00085 \text{ mol} / \text{mol}$$

$$\therefore F_{\text{out}} = 0.000123 \text{ mol} \cdot \text{min}^{-1}$$

การหายไปของไฮโดรเจนซัลไฟด์เนื่องจากการทำปฏิกิริยา

$$\begin{aligned} F_{H_2S, \text{in}} - F_{H_2S, \text{out}} &= 0.0004465 - 0.000123 \\ &= 0.00032 \text{ mol/min} \end{aligned}$$

2.2 การคำนวณของของเหลว

ความเข้มข้นของตัวอย่างของเหลวตำแหน่งที่ 1 = 8.96 โมล/ม³

ความเข้มข้นของตัวอย่างของเหลวตำแหน่งที่ 2 = 9.01 โมล/ม³

ความเข้มข้นเฉลี่ยของตัวอย่างของเหลว

$$C_{Fe^{3+}, \text{ln}} = \frac{C_{Fe^{3+}, 2} - C_{Fe^{3+}, 1}}{\ln \frac{C_{Fe^{3+}, 2}}{C_{Fe^{3+}, 1}}}$$

$$C_{Fe^{3+}, \text{ln}} = \frac{9.01 - 8.96}{\ln \frac{9.01}{8.96}}$$

$$C_{Fe^{3+}, \text{ln}} = 8.98$$

$$C_{Fe^{3+}, \text{initial}} = 9.95$$

การหายไปของเหล็ก (3+) กิโลกรัม เนื่องจากการทำปฏิกิริยา = $-\frac{V_L}{b} \frac{dC_B}{dt}$

$$\begin{aligned} &= \frac{2 \times 10^{-3}}{2} \frac{(9.95 - 8.98)}{2} \\ &= 0.48 \times 10^{-3} \text{ โมล/วินาที} \end{aligned}$$

3. การหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวม

จากสมการการควบคุมมวลของของเหลวในระบบปฏิกิริยาแบบเฉพาจะวด

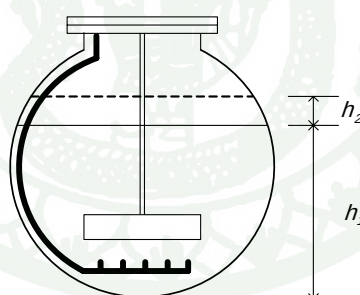
$$-\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} = (-R_1)$$

$$-\frac{\varepsilon_{L,1}}{v_1} \frac{dC_{Fe^{3+}}}{dt} = \frac{0.941}{2} \frac{(9.95 - 8.98)}{2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{ min}} = 0.241 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{ min}}$$

$$(-R_1) = 0.241 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{ min}}$$

4. การหาสัดส่วนปริมาตรของเหลว

4.1 การหาสัดส่วนปริมาตรของเหลวในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาจะวด



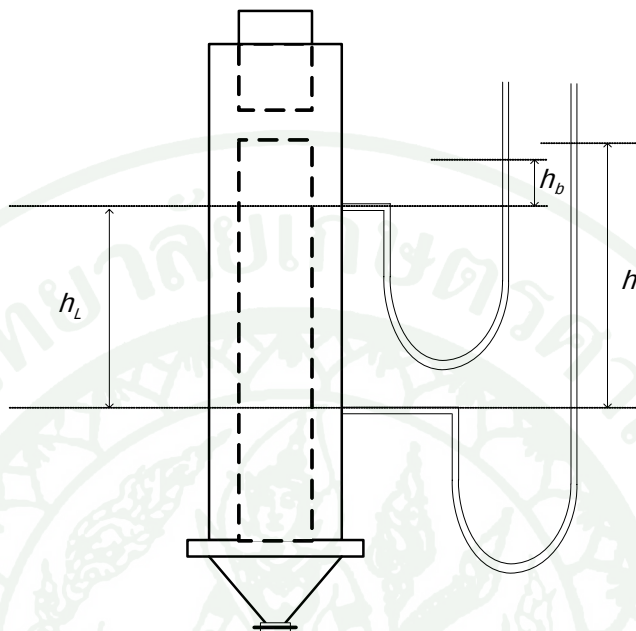
ภาพผนวกที่ 1 การหาสัดส่วนปริมาตรของเหลวในปฏิกรณ์ถังกวนแบบกึ่งเฉพาจะวด

ความสูงของของเหลวเมื่อไม่พ่นก๊าซ = h_1

ความสูงของของเหลวเมื่อไม่พ่นก๊าซ = $h_1 + h_2$

$$\varepsilon_L = 1 - \frac{h_1}{h_1 + h_2}$$

4.2 การหาสัดส่วนปริมาตรของเหลวในถังปฏิกรณ์แบบอัดโนมัติ



ภาพผนวกที่ 2 การหาสัดส่วนปริมาตรของเหลวในถังปฏิกรณ์แบบอัดโนมัติ

วัดโดยหาความดันตกคร่อมแสดงดัง

$$\varepsilon_L = \frac{h_a - h_b}{h_L}$$

โดยค่า h_L h_L และ h_L คือ ความสูงของของเหลว

5. การคำนวณค่ากำลังการกวนจำเพาะ

P = กำลังการกวน (W)

D = ขนาดใบกวน (m)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล ($kg\ m^{-3}$)

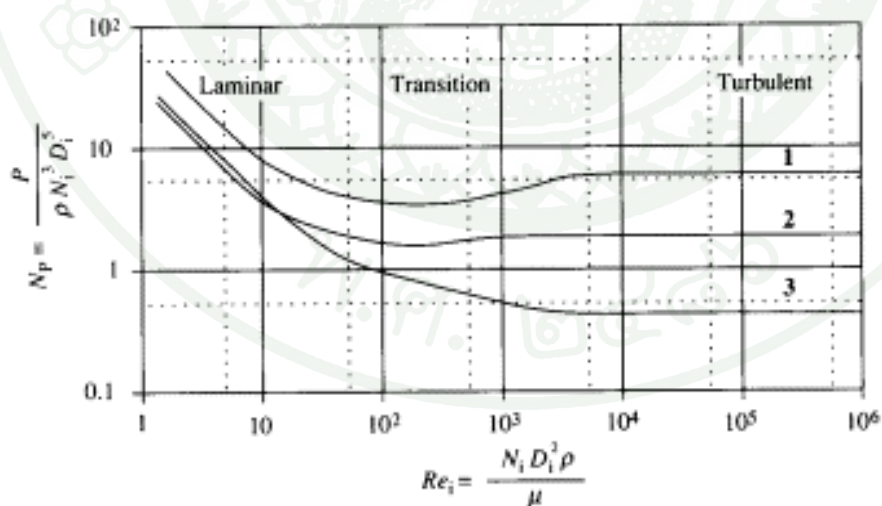
N = จำนวนรอบต่อเวลา (s^{-1})

μ = ความหนืดของของไหล ($Ns\ m^{-2}$)

N_{Re} = ตัวเลขเรโน = $\frac{\rho ND^2}{\mu}$

$$N_{Re} = \frac{\rho ND^2}{\mu} = \frac{1000 \left(\frac{500}{60} \right) (0.0025)^2}{1 \times 10^{-3}} = 20833$$

$$N_{Re} = 20833 \approx 2.0 \times 10^4$$



ภาพผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรโนกับตัวเลขกำลัง

ดังนั้น $N_p=0.15$

$$P=N_p \rho N^3 D^5 = (0.15)(1000)(500/60)^3 (0.05)^5 = 0.027 \text{ W}$$

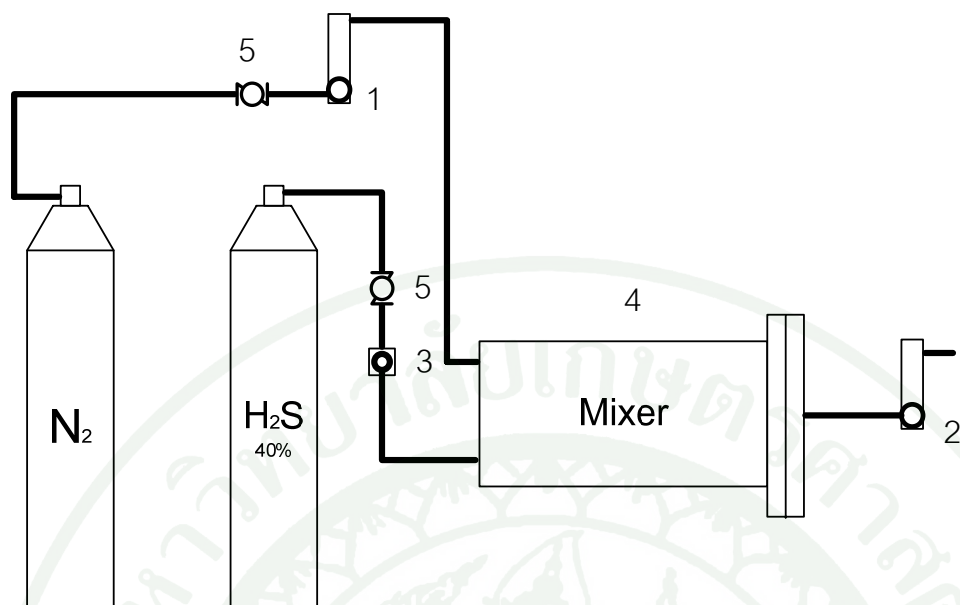
ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ 2 ลิตร

$$\text{ดังนั้น } \frac{P}{V} = \frac{0.027}{0.002} = 10.78 \text{ W / m}^3$$

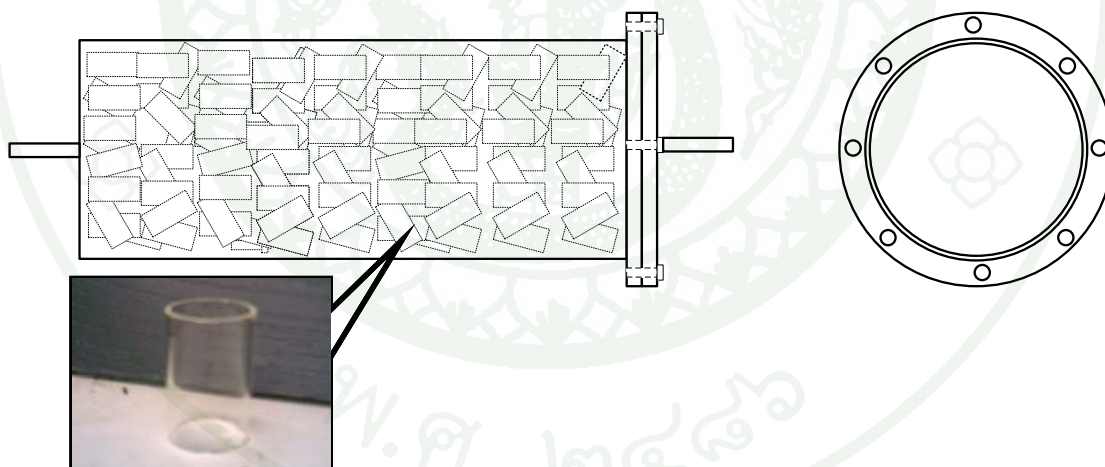
6. ชุดอุปกรณ์สำหรับเชื้อเพลิงก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์บรรจุห่อความเข้มข้น 40 % โดยโมล จากบริษัทไทยอินดัสเทรียส แก๊ส จำกัด (มหาชน) เชื้อเพลิงด้วยก๊าซไนโตรเจนบรรจุห่อจากบริษัทไทยอินดัสเทรียส แก๊ส จำกัด (มหาชน) ให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซผสมตามต้องการโดยใช้ชุดอุปกรณ์สำหรับเชื้อเพลิงก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ดังภาพที่ 14 ซึ่งมีรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. มาตรวัดอัตราการไหลช่วง 0 ถึง 40 สำหรับวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน
2. มาตรวัดอัตราการไหลช่วง 0 ถึง 60 สำหรับวัดอัตราการไหลของก๊าซผสมที่มีความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.3 % โดยโมล ก่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์
3. วาล์วปรับอัตราการไหล (Metering Valve) สำหรับปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนการผสม
4. ถังสำหรับผสมก๊าซซึ่งภายในบรรจุด้วยท่อแก้วสั้น ดังภาพที่ 15
5. วาล์วป้องกันการไหลย้อนกลับของก๊าซ (Check Valve)



ภาพผนวกที่ 4 ชุดอุปกรณ์สำหรับเจือจางก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์



ภาพผนวกที่ 5 ถังผสมก๊าซ

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายเกียรติประชา ศรีคำเป้า
เกิดวันที่	17 กรกฎาคม พ.ศ. 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดเชียงราย
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์