



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

ชุดกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์สำหรับทำความสะอาดแก๊สชีวภาพเพื่อใช้งานใน
ครัวเรือนโดยการดูดซึมทางเคมีด้วยสารละลายไอออนคีเลต

**Hydrogen Sulfide Removal Unit for Biogas Cleaning for Household Application
by Chemical Absorption with Iron Chelate Solution**

คณะผู้วิจัย

รศ. ดร. จรัญ บุญกาญจน์	หัวหน้าโครงการ
ดร. รัตนา แซ่หลี	ผู้ร่วมงานวิจัย
นางสาว สุดารัตน์ ถิ่นจะนะ	ผู้ช่วยวิจัย
นางสาวพรพิมล แสนสุข	ผู้ช่วยวิจัย

งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2556
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทคัดย่อ

แก๊สชีวภาพเป็นพลังงานหมุนเวียนและยั่งยืนที่เกิดจากการหมักแบบไร้อากาศของสารอินทรีย์ แก๊สชีวภาพสามารถใช้เป็นแก๊สหุงต้มแทนแก๊สหุงต้มที่ผลิตจากแก๊สธรรมชาติในครัวเรือนได้ โดยต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สชีวภาพให้เหมาะสมและปลอดภัยต่อการใช้งาน การกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในแก๊สชีวภาพเป็นขั้นตอนสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สชีวภาพเพราะ H_2S เป็นแก๊สที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ มีคุณสมบัติการกัดกร่อนสูง และมีกลิ่นเหม็นที่ไม่พึงประสงค์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดกำจัด H_2S สำหรับใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สชีวภาพเพื่อใช้เป็นแก๊สหุงต้มในครัวเรือน โดยใช้กระบวนการดูดซึมทางเคมีด้วยสารละลาย Fe(III)EDTA ในคอลัมน์บรรจุ ผลการศึกษาพบว่าคอลัมน์บรรจุรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ความสูง 50 cm ที่บรรจุด้วยวัสดุบรรจุชนิด Raschig ring ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm และสารละลาย Fe(III)EDTA ปริมาตร 350 mL เป็นชุดกำจัด H_2S ที่เหมาะสมกับการใช้งานดังกล่าว โดยเมื่อดำเนินการภายใต้สภาวะที่เหมาะสมคืออัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ 5 L/min ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1 mol/L ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL และความเข้มข้นของแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพที่ทางเข้าหอดูดซึมเท่ากับ 1000 ppm พบว่าอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ยังคงสามารถควบคุมความเข้มข้นของ H_2S ในแก๊สชีวภาพที่ทางออกได้ต่ำกว่า 200 ppm คือ 8 hr และเมื่อทำการฟื้นฟูสภาพของสารละลาย Fe(III)EDTA โดยการเติมอากาศในอัตรา 5 l/min เป็นเวลา 12 hr ก็จะสามารถใช้งานชุดกำจัดไฮโดรซัลไฟด์ดังกล่าวได้โดยให้ประสิทธิภาพเท่ากับการใช้สารละลาย Fe(III)EDTA ใหม่สดจึงสามารถสรุปได้ว่าชุดกำจัดแก๊ส H_2S ที่พัฒนาขึ้นนี้มีศักยภาพในการนำไปใช้งานจริงเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแก๊สชีวภาพสำหรับการใช้งานในระดับครัวเรือนได้

Abstract

Biogas is a renewable and sustainable energy source that produced from anaerobic fermentation of organic matter. It can be use as a natural gas substitute for cooking purpose in households, however, up-grading or purifying of biogas for health and environmental concern is necessary. The removal of hydrogen sulfide (H_2S) from biogas is an important step of biogas up-grading since H_2S is hazardous to human health, high corrosive and strong un-pleasant smell. The aim of this research is to develop the H_2S removal unit for up-grading of biogas using as cooking gas in households. The chemical absorption process using Fe(III)EDTA as an absorbent was employed. The H_2S removal unit comprises of a 5 cm diameter cylinder column, 50 cm height containing packing media of 1.5 diameter and Fe(III)EDTA solution of 350 mL were found suitable for this purpose. The results shown that at the optimum conditions, biogas flow rate of 5 L/min, Fe(III)EDTA concentration and volume of 1 mol/L and 350 L, respectively, and inlet H_2S concentration in biogas of 1000 ppm, the life time of Fe(III)EDTA that can control the outlet H_2S concentration at 200 ppm or less is 8 hr. The spent Fe(III)EDTA solution can simply be regenerated by bubbling air at flow rate of 5 L/min for 12 hr. The regenerated Fe(III)EDTA solution gave the same H_2S removal efficiency as the fresh one. Thus, it can be concluded that the H_2S removal unit developed in this work has a high potential to use as a biogas up-grading mean for household utilization.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ จัดสรรให้กับมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2556 ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ วิเคราะห์ สารานุกรมโปท และขอขอบคุณ ภักดีฟาร์ม ต.แพรกหา อ.ควนขนุน จ. พัทลุง ที่ให้ความอนุเคราะห์แก๊สชีวภาพ สถานที่ ในการทดลองและทดสอบชุดกำจัด H_2S รวมทั้งคอยอำนวยความสะดวกในการดำเนินการศึกษาทดลองแก่คณะผู้วิจัยอย่างดียิ่งจนทำให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

บทคัดย่อ	2
Abstract	3
กิตติกรรมประกาศ	4
สารบัญ	5
บทที่ 1 บทนำ	6
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	6
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	7
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	7
1.4 ขอบเขตการวิจัย	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร	8
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	8
2.2 การตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 วิธีการวิจัยและผลการวิจัย	22
3.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดแก๊ส H ₂ S โดยการดูดซับด้วยสารละลาย Fe(III)EDTA ในคอลัมน์บรรจุสำหรับการใช้งานในระดับครัวเรือน	22
3.2 วิธีการทดลอง	24
3.3 ผลการทดลองและการอภิปราย	29
3.3.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดแก๊ส H ₂ S ด้วยสารละลาย Fe(III)EDTA	29
3.3.2 การศึกษาการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA	35
3.3.3 การทดสอบการใช้งานจริงของชุดกำจัด H ₂ S โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนการกำจัด H ₂ S และในขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพของสารละลาย Fe(III)EDTA	38
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย	40
บรรณานุกรม	41
ภาคผนวก	43

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ในปัจจุบันได้มีการผลิตแก๊สชีวภาพจากฟาร์มสุกร และเดินท่อไปใช้งานตามบ้านเรือนเพิ่มมากขึ้นในทุกภูมิภาคของประเทศ รวมทั้งในพื้นที่ภาคใต้ เช่น ที่ ต. ควนทอง อ. ขนอม จ. นครศรีธรรมราช และ ใน ต. แพรกหา อ. ควนขนุน จ. พัทลุง และในขณะเดียวกัน มีชุมชนทั้งในระดับครัวเรือน และในระดับโรงเรียน ในหลายๆ ชุมชน ทั่วประเทศที่มีการผลิตแก๊สชีวภาพใช้ตามครัวเรือน และโรงเรียน เช่น ที่ อ. สะทิงพระ และ อ. กระแสสินธุ์ ในจังหวัดสงขลา เป็นต้น ประกอบกับในอนาคต ที่รัฐบาลมีนโยบายที่จะปล่อยให้ราคาของแก๊ส LPG ลอยตัวตามราคาของตลาดโลก ก็จะทำให้ภาคประชาชนหันมาใช้แก๊สชีวภาพในครัวเรือนมากขึ้น ปัญหา อุปสรรค ที่สำคัญของการใช้แก๊สชีวภาพในระดับครัวเรือน คือการอุดตันของเตาแก๊สหุงต้มอันเนื่องจากตะกอนที่เกิดจากการเผาไหม้ของแก๊สชีวภาพที่ปนเปื้อนด้วย H_2S ซึ่งทำให้อายุการใช้งานของเตาแก๊สหุงต้มลดลง และนอกจากนี้แล้วการปนเปื้อนด้วย H_2S ในระดับตั้งแต่ 300 ถึง มากกว่า 1500 ppm ที่พบในแก๊สชีวภาพที่ผลิตจากฟาร์มสุกร และ ที่ผลิตจากเศษอาหารตามครัวเรือนจะเป็นค่าที่สูงกว่ามาตรฐานความเข้มข้นของ H_2S ในระดับความปลอดภัยต่อสุขภาพที่กำหนดโดย OSHA โดยมาตรฐานความเข้มข้นของ H_2S ในระดับความปลอดภัยต่อสุขภาพที่กำหนดโดย OSHA (Occupational Safety and Health Administration) ค่า TWA ถ้าสัมผัสในช่วง 8 ชั่วโมง ต้องมีค่าไม่เกิน 10 ppm สัมผัสในระยะ 1 ชั่วโมง ต้องมีค่าไม่เกิน 300 ppm ถ้าความเข้มข้น 600 ppm สัมผัสในเวลา 30 นาที ทำให้ตายได้ การใช้แก๊สชีวภาพในระดับครัวเรือนที่ไม่มีการกำจัด H_2S ออกก่อนจะทำให้ผู้ใช้แก๊สมีความเสี่ยงต่อปัญหาสุขภาพที่เกิดจาก H_2S โดยตรง และเสี่ยงต่อสุขภาพจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของ H_2S เช่น S_2O อีกด้วย การพัฒนาชุดกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพสำหรับการใช้งานในครัวเรือน ที่ใช้งานได้ง่าย และมีค่าใช้จ่ายในการสร้าง ติดตั้ง ค่าดำเนินการที่ต่ำเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อรองรับการขยายตัวของการใช้แก๊สชีวภาพในระดับครัวเรือนที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

จรัญ และ คณะ (2553) ได้พัฒนาชุดกำจัด H_2S สำหรับการใช้งานในครัวเรือนโดยกระบวนการดูดซับทางเคมี โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่อิมเพกเนตด้วยสารละลายโปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เป็นสารดูดซับ ซึ่งพบว่าสามารถใช้งานได้ดี อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวก็ยังสามารถพัฒนาให้ดีขึ้นได้ในอีกหลายแนวทาง แนวทางหนึ่งที่นักวิจัยนำมาเป็นหัวข้อในการวิจัยในที่นี้คือการพัฒนาชุดกำจัด H_2S สำหรับการใช้งานในครัวเรือนโดยกระบวนการดูดซับทางเคมีโดยใช้สารละลายที่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ง่าย คือ คีเลทไอรอน (Fe(III)EDTA) (Rattana *et al.* 2009; จรัญ และ คณะ (2554)) เพื่อพัฒนาชุดกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพสำหรับการใช้งานในครัวเรือน การที่สารละลาย Fe(III)EDTA สามารถฟื้นฟูสภาพได้ง่ายโดยการใช้อากาศนั้นจะทำให้ชุดกำจัด H_2S มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในครัวเรือนมากขึ้นเพราะไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนสารดูดซับแต่สามารถทำการฟื้นฟูสภาพหลังจากการใช้งานได้ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ถูกลง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาชุดกำจัด H_2S ที่เหมาะสมสำหรับใช้กับครัวเรือนโดยการดูดซับทางเคมีด้วยสารละลายคีเลทไอรอน (Fe(III)EDTA)

1.2.2 เพื่อทดสอบชุดกำจัด H_2S ที่พัฒนาขึ้นกับครัวเรือนที่ใช้แก๊สชีวภาพ

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.3.1 ได้วิธีการทางเคมีสำหรับกำจัด H_2S จากแก๊สชีวภาพที่ใช้งานในระดับครัวเรือน

1.3.2 ได้ระบบต้นแบบของระบบกำจัด H_2S ที่เหมาะกับการใช้งานในระดับครัวเรือน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้มีขอบเขตเพื่อพัฒนาชุดกำจัด H_2S ที่เหมาะสมสำหรับใช้กับครัวเรือนโดยการดูดซับทางเคมี โดยใช้สารละลาย Fe(III)EDTA เป็นสารดูดซับ โดยมีขอบเขตของการศึกษาคือ ขนาดของระบบ ความเข้มข้นของสารดูดซับ และสถานะที่เหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับในระบบที่พัฒนาขึ้น และทำการทดลองใช้ระบบกับครัวเรือนเพื่อเก็บข้อมูลระยะยาว

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 แก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพ (Biogas) คือแก๊สที่เกิดตามธรรมชาติจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้อากาศ องค์ประกอบหลักของแก๊สชีวภาพคือ แก๊สมีเทน (CH_4) ประมาณ 60-70 % แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 28-38 % และแก๊สอื่นๆ เช่น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และ ไนโตรเจน (N_2) เป็นต้น ประเภทของแก๊สชีวภาพอาจแบ่งได้ตามลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาผลิต ได้แก่แก๊สชีวภาพจากมูลสุกร แก๊สชีวภาพจากขยะมูลฝอย และแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรม เป็นต้น ในปัจจุบันแก๊สชีวภาพที่ผลิตมากที่สุดคือแก๊สชีวภาพจากมูลสุกร และทางภาครัฐได้สนับสนุนและส่งเสริมให้มีการผลิตแก๊สชีวภาพจากขยะมูลฝอยและจากน้ำเสียของภาคอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยกลุ่มของอุตสาหกรรมที่มีการผลิตแก๊สชีวภาพในปัจจุบันได้แก่ กลุ่มอุตสาหกรรมเป็้งมันสำปะหลัง กลุ่มอุตสาหกรรมสุราและเบียร์ กลุ่มอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร กลุ่มอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม และ อุตสาหกรรมน้ำตาล เป็นต้น แก๊สชีวภาพที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปต่างๆ ได้เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า และใช้ในการเผาไหม้เพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง เช่น ใช้เป็นแก๊สหุงต้มสำหรับการปรุงอาหารในครัวเรือน ใช้กับเตาอบหรือเครื่องอบแห้ง และใช้กับอุปกรณ์ให้ความอบอุ่นแก่ลูกสุกรในฟาร์มสุกร เป็นต้น

2.1.2 แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide, H_2S)

แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือ “แก๊สไข่เน่า” จัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบซัลเฟอร์ระเหยง่าย (volatile sulfur compound, VSCs) แม้ว่าแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จะปนเปื้อนอยู่ในแก๊สชีวภาพในปริมาณน้อย (0.2-1%) แต่เมื่อรวมตัวกับความชื้นแล้วจะมีคุณสมบัติการกัดกร่อนที่รุนแรงมาก ทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนของอุปกรณ์เครื่องจักรและยังผลต่อสุขภาพของ

ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องได้ โดยมาตรฐานความเข้มข้นของ H₂S ในระดับความปลอดภัยต่อสุขภาพที่กำหนดโดย OSHA (Occupational Safety and Health Administration) ค่า TWA (สัมผัสในช่วง 8 ชั่วโมง) คือต้องมีค่าไม่เกิน 10 ppm สัมผัสในระยะ 1 ชั่วโมง ต้องมีค่าไม่เกิน 300 ppm ถ้าความเข้มข้น 600 ppm สัมผัสในเวลา 30 นาที ทำให้ตายได้ ส่วนมาตรฐานของแก๊สชีวภาพที่สามารถนำไปใช้ในเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าคือจะต้องมี H₂S ปนเปื้อนอยู่ไม่เกิน 100-200 ppm โดยทั่วไปการกำจัด H₂S สามารถทำได้ทั้งวิธีทางเคมีและวิธีทางชีวภาพ โดยกระบวนการทางชีวภาพมีข้อจำกัดเมื่อใช้กับแก๊สที่มี H₂S ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง ส่วนกระบวนการกำจัด H₂S โดยกระบวนการทางเคมีมีข้อจำกัดในเรื่องของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ จึงต้องเลือกใช้สารเคมีที่เหมาะสมที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาและมีต้องมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ

2.1.3 เทคโนโลยีการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบเปียก

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นแก๊สพิษที่มีกลิ่นเหม็นและมีสถานะเป็นกรด ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นแก๊สที่ปล่อยจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น โรงกลั่นปิโตรเลียม โรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ กระบวนการผลิตอาหาร กระบวนการผลิตแก๊สธรรมชาติ อุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง และ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ยังผลิตขึ้นในระหว่างกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยไม่ใช้อากาศและในระหว่างการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมบางประเภทเช่น อุตสาหกรรมกระดาษและผลิตภัณฑ์ที่มีรสเปรี้ยว (sour products) หรือในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและโรงงานผลิตแก๊สธรรมชาติบริสุทธิ์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ปล่อยสู่บรรยากาศจากแหล่งผลิตต่างๆเหล่านี้สามารถนำไปสู่มลพิษทางอากาศที่รุนแรงและเป็นอันตรายต่อการเป็นอยู่ของประชาชนทั่วไปและผู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ เหล่านี้ได้ กระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพื่อบำบัดก๊าซหรืออากาศก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ หรือเป็นกระบวนการที่สำคัญในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สเช่น แก๊สธรรมชาติ และแก๊สชีวภาพ เป็นต้น

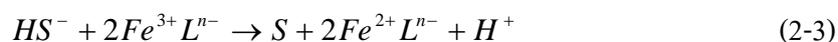
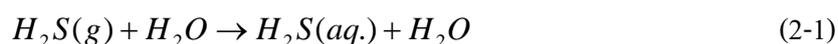
กระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์มีอยู่ในหลายรูปแบบทั้ง กระบวนการแบบแห้ง (dry process) กระบวนการกึ่งแห้ง (semi-dry process) และกระบวนการแบบเปียก ในระหว่างกระบวนการทั้งสามรูปแบบนี้กระบวนการแบบเปียกจัดเป็นเทคโนโลยีหลักและเป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถใช้บำบัดกับก๊าซได้ในปริมาณมากๆ ระบบมีความเสถียรสูง และสามารถแยกธาตุซัลเฟอร์กลับคืนมาได้ง่ายกว่าในกระบวนการแบบแห้ง (Yu et al., (2014))

กระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบเปียกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ วิธีเรคติซอล (rectisol method) วิธีเมททิลไดเอทานอลเอมีน (methyldiethanolamine (MDEA) method) วิธีโพล์

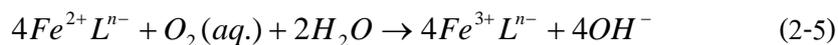
เอทธิลีนไกลคอลไดเมทิลอีเทอร์ (poly-ethylene glycol dimethyl ether (NHD) method) วิธีสเตอร์ทฟอร์ด (Stretford method) และ วิธีคีเลทไอออน (Chelate iron method) จากวิธีการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยกระบวนการแบบเปียกทั้งหมดนี้วิธีคีเลทไอออนเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด และถือได้ว่าเป็นตัวแทนของกระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบเปียกที่ใช้ของเหลวเป็นแคตะลิสต์ (liquid oxidation catalyst process) ที่เรียกย่อๆ ในอุตสาหกรรมว่ากระบวนการโลแคท (LO-CAT process) (Yu et al., (2014))

กระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบเปียกโดยวิธีคีเลทไอออน

การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีคีเลทไอออน เป็นวิธีการที่เร็ว ปลอดภัย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และมีข้อดีคือไม่มีสารพิษและมีการสูญเสียของปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยคีเลทไอออนประกอบด้วยการดูดซึมทางเคมีของไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยคีเลทไอออนแสดงดังสมการ (2-1) ถึง (2-3) (Yu et al., (2014))



เมื่อ n แสดงประจุของสารอินทรีย์ลิแกนด์ L เนื่องจากแอกทีฟคีเลทไอออนถูกเปลี่ยนเป็นอินแอกทีฟคีเลทไอออน ซึ่งจะต้องถูกฟื้นฟูสภาพกลับไปอยู่ในรูปเฟอร์ริกโดยการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในของเหลว การฟื้นฟูสภาพของอินแอกทีฟคีเลทไอออนแสดงดังสมการที่ (2-4) และ (2-5)



เมื่อพิจารณาจากกลศาสตร์ของปฏิกิริยา สมการที่ (2-3) และ สมการที่ (2-5) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่สมการที่ (2-1) และ สมการที่ (2-4) เกิดขึ้นช้ากว่าจึงเป็นปฏิกิริยาที่เป็นขั้นตอนควบคุมของกระบวนการคีเลทไอออน ขั้นตอนควบคุมในกระบวนการดูดซึมของไฮโดรเจนและออกซิเจนในน้ำควบคุมด้วยความต้านทานในวัฏภาคแก๊สซึ่งสามารถลดความต้านทานในขั้นตอนนี้ได้โดยการเพิ่มความปั่นป่วนของระบบ อย่างไรก็ตามขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพของคีเลทไอออนเป็นขั้นตอนที่สำคัญและขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของออกซิเจนซึ่งละลายน้ำได้ต่ำทำให้ความเร็วในการฟื้นฟูสภาพและประสิทธิภาพในการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำลง กระบวนการฟื้นฟูสภาพจะดำเนินการในแพคคอลัมน์ ถึงพ่นฝอย หอพ่นฝอย ถึงเติมอากาศ และสามารถใช่วิธีการไฟฟ้าเคมี (electrochemical method) เพื่อเพิ่มความเร็วในการฟื้นฟูสภาพคีเลทไอออน ได้อีกด้วย

จากสมการ (2-1)-(2-5) จะเห็นได้ว่า ลิแกนด์ L รวมกับเหล็กเป็นสารละลายคีโอรอนซึ่งไม่มีส่วนในการเกิดปฏิกิริยาและไม่ปรากฏอยู่ในปฏิกิริยารวม สารคีเลทที่เติมลงไปทำหน้าที่เป็นผู้ให้และเป็นผู้รับอิเล็กตรอนและทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยารวมให้เกิดเร็วขึ้น และช่วยให้เหล็กละลายในน้ำทำให้เกิดสารละลายของเหล็กได้ ลิแกนด์ที่ใช้มีอยู่หลายชนิด เช่น ไนตริโลไตรอะซีติกแอซิด (nitrilotriacetic acid, NTA), เอททิลีนไดอะมีนเตตระอะซีติกแอซิด (ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA), อิมิโนไดอะซีเตต (imino diacetate, IDA), ไดเอททิลีนไตรเอมีนเพนตะอะซีติกแอซิด (diethylenetriamine penta acetic acid, DTPA) และไซโคลเฮกเซนไดอะมีนเตตระอะซีติกแอซิด (cyclohexanediamine tetraacetic acid, CDTA) เป็นต้น ลิแกนด์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ใน chelated-iron process จะต้องเป็นลิแกนด์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ ที่มีราคาไม่แพง ทำให้เกิดพิษน้อยที่สุด และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม นอกจากชนิดของลิแกนด์ที่ใช้แล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ chelated-iron process ได้แก่ pH, ปริมาณของออกซิเจน และ สารเติมเพื่อช่วยให้ลิแกนด์เสถียร pH ที่เหมาะสมที่ป้องกันไม่เกิด ตะกอนของ $Fe(OH)_2$ และ $Fe(OH)_3$ ก็ต้องใช้ pH ที่เป็นด่างปานกลาง (pH= 9-10.5) ในขณะที่ปริมาณออกซิเจนจะต้องไม่มากเกินไปเพราะออกซิเจนที่มากเกินไปจะไปทำปฏิกิริยากับลิแกนด์ทำให้ปริมาณของคีเลทลดลง ดังนั้นในบางครั้งจึงต้องเติมสารช่วยเพิ่มความเสถียรของลิแกนด์ด้วย

2.2 การตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง

Yu et al., (2014) ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของคีเลทไอรอนจากการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์อย่างรวดเร็วโดยใช้ปฏิกิริยาแบบไฟฟ้าเคมีร่วมกับอิเล็กโทรดทรงกระบอกที่หมุนได้ สารละลายคีเลทไอรอนที่ใช้ในการศึกษาได้จากสารละลายที่ผ่านการใช้งานในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ของโรงงานเคมี มีค่า pH 8.52 อุณหภูมิ 21 °C ศักย์สมดุล (equilibrium potential) เท่ากับ -127 mV ความเข้มข้นของ $Fe^{3+} L^n^-$ และ $Fe^{2+} L^n^-$ เท่ากับ 0.016 และ 0.046 mol/L ตามลำดับ ฟิโนลแคะดิสต์ถูกเติมลงในสารละลายคีเลทไอรอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยความเร็วรอบในการหมุนของอิเล็กโทรด ความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage) อัตราการป้อนของเหลว และ อัตราการป้อนอากาศเข้าสู่ปฏิกิริยา

ผลของความเร็วยรอบในการหมุนของอิเล็กโทรด

การเพิ่มความเร็วยรอบในการหมุนของอิเล็กโทรดทำให้ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพของคีเลทไอรอนเพิ่มขึ้นทั้งนี้เพราะที่ความเร็วยรอบต่ำๆ ฟองอากาศในสารละลายและฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมียึดติดกับพื้นผิวของอิเล็กโทรดได้ง่าย ซึ่งจะไปลดพื้นที่ผิว

สำหรับการเกิดปฏิกิริยาของอิเล็กโตรดทำให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีลดลง เมื่อความเร็วรอบของอิเล็กโตรดสูงขึ้นการยึดติดของฟองอากาศบนอิเล็กโตรดเกิดขึ้นได้ยากและที่ความเร็วรอบที่สูงเกิดการปั่นป่วนของสารละลายสูงเป็นการลดความหนาของฟิล์มสำหรับการแพร่ทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นได้อย่างรวดเร็วปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจึงเกิดขึ้นได้ดี อีกทั้งความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของอิเล็กโตรดที่ความเร็วรอบสูงๆยังทำให้ออกซิเจนละลายได้มากขึ้น ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของอิเล็กโตรดจึงเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วรอบสูงเกินไปจะทำให้เวลาการสัมผัสระหว่างอิเล็กโตรดกับอิเล็กโตรดลดลงปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ทำให้ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพสารละลายอิเล็กโตรดลดลง จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของอิเล็กโตรดสูงสุดเท่ากับ 84.9% โดยจะเกิดขึ้นเมื่อใช้ความเร็วรอบของอิเล็กโตรดเท่ากับ 180 rpm ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่ากรณีที่ใช้อิเล็กโตรดอยู่นิ่งถึง 1.6 เท่า

ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ออัตราการฟื้นฟูสภาพ

อัตราการฟื้นฟูสภาพของอิเล็กโตรดขึ้นกับความต่างศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากการเพิ่มความเข้มหรือความหนาแน่นของกระแส (current density) อย่างรวดเร็วที่สภาวะเริ่มต้นของการเพิ่มความต่างศักย์เป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี การเพิ่มความต่างศักย์จึงทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการฟื้นฟูของอิเล็กโตรดได้ทั้งในกรณีที่ใช้อิเล็กโตรดที่อยู่กับที่และอิเล็กโตรดที่มีการหมุน แต่ที่ความต่างศักย์เดียวกันการใช้อิเล็กโตรดที่หมุนจะให้ประสิทธิภาพของการฟื้นฟูสภาพของอิเล็กโตรดสูงกว่ากรณีของอิเล็กโตรดที่อยู่นิ่ง อย่างไรก็ตามผลการศึกษาพบว่าอัตราการฟื้นฟูสภาพของอิเล็กโตรดจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 4V โดยให้ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพสูงสุดเท่ากับ 84.8% การเพิ่มความต่างศักย์สูงกว่า 4V จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้อีกเพียงเล็กน้อยและเป็นการเพิ่มอย่างช้า จึงสรุปได้ว่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูสภาพอิเล็กโตรดคือ 4 V ประสิทธิภาพที่ได้เท่ากับ 84.8 ซึ่งสูงกว่าการฟื้นฟูสภาพแบบเดิมที่ไม่ใช้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่มีประสิทธิภาพเพียง 45.3 % อย่างชัดเจน

ผลของอัตราการไหลของอากาศต่อประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพอิเล็กโตรด

ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของอิเล็กโตรดเพิ่มขึ้นกับอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนละลายในสารละลายจะช่วยเร่งอัตราการฟื้นฟูสภาพให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศถึงค่าหนึ่งประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพจะเริ่มคงตัว ทั้งนี้เพราะการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศที่สูงเกินไปจะลดเวลาการสัมผัสระหว่างอากาศ

กับสารละลายทำให้การถ่ายโอนมวลระหว่างแก๊สและของเหลวลดลง ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่า อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ $2 \text{ m}^3/\text{h}$ เป็นอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูสภาพคิเลทไอรอนในปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีที่ดำเนินการที่ใช้ความเร็วรอบของอิเล็กโตรด 180 rpm ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4 V และอัตราการไหลของสารละลาย 80 L/h โดยให้ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของคิเลทไอรอนเท่ากับ 84.8%

ผลของอัตราการไหลขาเข้าของของเหลวต่อประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพคิเลทไอรอน

ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของสารละลายจะลดลงกับอัตราการไหลขาเข้าที่เพิ่มขึ้นในสองช่วงคือ การเพิ่มอัตราการไหลในช่วงอัตราการไหลในช่วงที่น้อยกว่า 80 L/hr ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพจะลดลงอย่างช้าๆ แต่ถ้าเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวเข้าสู่สูงกว่า 80 L/h พบว่า ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพจะลดลงอย่างรวดเร็วทั้งนี้เพราะการเพิ่มอัตราการไหลขาเข้าของของเหลวเป็นการลดระยะเวลาที่ของเหลวอยู่ในปฏิกรณ์จึงทำให้ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพลดลง จากการศึกษานี้พบว่าสำหรับปฏิกรณ์ที่ดำเนินการที่ใช้อัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าเท่ากับ $2 \text{ m}^3/\text{h}$ ใช้ความเร็วรอบของอิเล็กโตรด 180 rpm และความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 4 V อัตราการไหลขาเข้าของสารละลายที่เหมาะสมคือ 80 L/h โดยให้ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพของคิเลทไอรอนเท่ากับ 84.6% ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าการฟื้นฟูสภาพโดยการเติมอากาศแบบเดิมถึง 1.6 เท่า

Krischan, et al.(2012) ศึกษาการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพโดยการดูดซึมและออกซิเดชันด้วยอัลคาไลน์ (alkaline oxidative scrubbing) ที่ประกอบด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) โซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate, NaHCO_3) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2) โดยทำการศึกษาทั้งในปฏิกรณ์ชนิดถังกวนแบบแบทช์ หอดูดซึมแบบต่อเนื่องขนาดห้องปฏิบัติการ และ หอดูดซึมขนาดอุตสาหกรรมสำหรับการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพที่แหล่งผลิต

การศึกษาในปฏิกรณ์ชนิดถังกวนแบบแบทช์ ปริมาตรขนาด 6.9 ลิตร ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊ส 50% (v/v) ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊ส 1040 ppmv ความเข้มข้นของ NaHCO_3 ในของเหลว 0-90 kg/m^3 ความเข้มข้นของ NaOH 0.15 kg/m^3 ความเข้มข้นของ H_2O_2 0.15 kg/m^3 ที่อุณหภูมิห้องความดันบรรยากาศ ($T=298 \text{ K}, P \approx 10^5 \text{ Pa}$) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของ pH และ redox potential ต่อการดูดซึมไฮโดรเจนซัลไฟด์และ

คาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งศึกษาผลของความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) และไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) ต่ออายุของสารละลาย

การศึกษาในหอคูดซิมขนาดห้องปฏิบัติการดำเนินการในหอคูดซิมแบบแพคคอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 m ความสูงของเบด 0.4 m พื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุ (surface area ของ packing material) $300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ โดยใช้แก๊สผสมเช่นเดียวกับกรณีของปฏิกรณ์แบบแบทช์ ป้อนเข้าสู่หอคูดซิมแบบแพคคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล $0.48 \text{ m}^3/\text{h}$ แก๊สที่ผ่านจากหอคูดซิมจะถูกเผาทิ้ง สารคูดซิมที่ประกอบด้วย $NaHCO_3$ และ H_2O_2 ในน้ำจะถูกปั๊มไหลเวียนในระบบด้วยอัตราการไหล $0.02 \text{ m}^3/\text{h}$ หอคูดซิมดำเนินการที่อุณหภูมิห้องความดันบรรยากาศ ($T=298 \text{ K}, P \approx 10^5 \text{ Pa}$) วัตถุประสงค์ของการศึกษาการคูดซิมด้วยหอคูดซิมขนาดห้องปฏิบัติการแบบต่อเนื่องนี้เพื่อหาตัวแปรควบคุมของกระบวนการที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุดโดยใช้สารเคมีน้อยที่สุด โดยที่สถานะเริ่มต้นของระบบใช้ความเข้มข้นของ $NaHCO_3$ เท่ากับ 80 kg/m^3 ค่าความนำไฟฟ้า 0.45 mS/cm ความเข้มข้นของ $NaHCO_3$ ที่ใช้เป็นค่าที่ได้จากการศึกษาในปฏิกรณ์แบบแบทช์และจำเป็นต้องมีการเติม $NaOH$ เนื่องจากสามารถควบคุม pH ให้คงที่ได้ตลอดระยะเวลา 8 ชั่วโมงที่ทดลองด้วยสารละลาย $NaHCO_3$ ที่เติมลงไปได้ และทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ H_2O_2 ต่อประสิทธิภาพการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยทำการเติม H_2O_2 เป็นช่วงๆ ในปริมาณที่แตกต่างกันให้มีความเข้มข้นของ H_2O_2 ในสารคูดซิมอยู่ช่วง $0.1-1.4 \text{ kg/m}^3$

การศึกษาในหอคูดซิมขนาดอุตสาหกรรม เป็นการขยายขนาดหอคูดซิมเพื่อรองรับการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อัตรา $180 \text{ m}^3/\text{h}$ เกณฑ์ที่ใช้ในการขยายขนาดพิจารณาจากตัวแปรดำเนินการที่สำคัญๆ คือ เวลาที่แก๊สอยู่ในระบบ (residence time) อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของแก๊สต่ออัตราการไหลของของเหลว อัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหอคูดซิมต่อความสูงของหอ และพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุบรรจุ สถานะสำหรับการดำเนินการของหอคูดซิมขนาดอุตสาหกรรมประกอบด้วย อัตราการไหลของแก๊ส $180 \text{ m}^3/\text{h}$ อัตราการไหลของของเหลว $7.9 \text{ m}^3/\text{h}$ เส้นผ่าศูนย์กลางของหอคูดซิม 0.71 m . ความสูงของหอ 3 m . พื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุ $300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ $30-50\%$ (v/v) และ $\leq 3000 \text{ ppmv}$ ตามลำดับ หอคูดซิมดำเนินการที่อุณหภูมิห้องความดันบรรยากาศ ($T=298 \text{ K}, P \approx 10^5 \text{ Pa}$)

จากผลการศึกษาในปฏิกรณ์ถังกวนแบบแบทช์และหอคูดซิมขนาดห้องปฏิบัติการ สรุปได้ว่าการคูดซิมไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถเกิดขึ้นได้ในช่วง pH 6.1 ถึง 8.2 การเพิ่มความเข้มข้นของ $NaHCO_3$ เพื่อปรับ pH ทำให้อัตราการคูดซิมไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นและลดปริมาณของเบสที่ใช้ลง และตลอดช่วงที่ H_2O_2 มีปริมาณสูงพอจะมีค่า redox potential สูงกว่า 100 mV และจะลดลงต่ำกว่า 0 เมื่อความเข้มข้นของ H_2O_2 ลดลง และเมื่อเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วของ redox potential

ถึง 90 mV แสดงว่าความเข้มข้นของ H_2O_2 ไม่เพียงพอสำหรับการดูดซึมไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังนั้นจึงต้องควบคุม pH ให้สูงกว่า 6.1 และควบคุมค่า redox potential ให้สูงกว่า 100 mV ตลอดเวลา ซึ่งสามารถทำได้โดยการเติมสารละลายบิฟเฟออร์ $NaHCO_3$ ที่มีค่าความนำไฟฟ้า 45 mS/cm โดยจะให้ pH สูงกว่า 7.7 ตลอดเวลา และจะต้องเติม H_2O_2 ลงไปในสารดูดซึมที่ช่วงเวลาต่างๆในปริมาณที่ต่างกันในพื้นที่ที่ redox potential ลดลงต่ำกว่า 100 mV ด้วยการควบคุมสารดูดซึมที่สภาวะดังกล่าวพบว่าระบบสามารถดูดซึมไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 100% ตลอดเวลา และผลการศึกษาในหอดูดซึมขนาดอุตสาหกรรมพบว่าให้ประสิทธิภาพในการดูดซึมไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยเฉลี่ยสูงถึง 97 % โดย H_2O_2 ถูกใช้ไปในอัตรา 4.8 mol H_2O_2 /mol H_2S ซึ่งสูงกว่าผลที่ได้จากการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการที่อัตราการใช้ H_2O_2 อยู่ในช่วง 1.2-2.9 H_2O_2 /mol H_2S และสูงกว่าความต้องการสูงสุดตามทฤษฎีคือ 4.0 H_2O_2 /mol H_2S อัตราการใช้ H_2O_2 ที่สูงนี้เป็นเพราะ H_2O_2 ในสารดูดซึมสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอื่นๆที่อยู่ในแก๊สชีวภาพได้

Karimi, et al., (2010) ศึกษาตัวแปรที่ผลต่อจลพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการดูดซึมและการฟื้นฟูสภาพสำหรับกระบวนการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายเกลือไอรอนในปฏิกรณ์แบบแอริลท์ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายเกลือไอรอนที่มีลักษณะเป็นออโตเซอคูเลชัน (Autocirculation) โดยให้ความสำคัญกับวิธีการที่จะวัดค่าพารามิเตอร์สำหรับการศึกษาจลพลศาสตร์ของปฏิกิริยา และวิธีการที่จะประยุกต์ใช้แบบจำลองในการอธิบายผลการทดลอง โดยผลการศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่ยืนยันว่าปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพของไอรอนเกลือเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของออกซิเจน แต่อันดับปฏิกิริยาในกระบวนการดูดซึมเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ คีเลทไอรอน(II) มีค่าที่แตกต่างกันออกไป เป็นปฏิกิริยาอันดับ 0.536, 1.0 และ 2 ขึ้นอยู่กับการแปรเปลี่ยนของ pH และ ความเข้มข้นของคีเลทไอรอน การศึกษานี้ได้หาสมการอัตราสำหรับคีเลทไอรอน และ พัฒนาแบบจำลองสำหรับการทำนายผลการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์กับเวลา พบว่าผลการทดลองในปฏิกรณ์ระดับห้องปฏิบัติการให้ผลสอดคล้องกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และมีผลสรุปจากการศึกษาที่สำคัญๆ คือ ปฏิกิริยาการดูดซึมของไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยคีเลทไอรอน (III) เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์และความเข้มข้นของคีเลทไอรอน (III) ปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพของคีเลทไอรอน (II) เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและปฏิกิริยาอันดับสองเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของออกซิเจนและความเข้มข้นของคีเลทไอรอน (II) ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นของคีเลทไอรอนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1000 ถึง 4000 ppm และผลของแบบจำลองด้วยโปรแกรม Autosweet ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลอง

Zhang and Tong (2006) ศึกษาการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายคิวปริกคลอไรด์ ($CuCl_2$) ซึ่งคิวปริกไอออน ($CuCl_2^-$) สามารถกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้อยู่ในรูปของ CuS ซึ่งสามารถนำคิวปริกไอออนกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนในอากาศ สารดูดซับที่ศึกษาประกอบด้วยคิวปริกคลอไรด์ความเข้มข้น 160 g/L และโซเดียมคลอไรด์ 120 g/L การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ดำเนินการแบบต่อเนื่องในหอดูดซับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 mm และการฟื้นฟูสภาพของคิวปริกไอออนโดยการออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนดำเนินการในคอลัมน์แบบบับเบิล (bubble column) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm หอดูดซับจะต้องทำงานอย่างต่อเนื่องส่วนปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันสามารถดำเนินการแบบไม่ต่อเนื่องได้ การเก็บตัวอย่างแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในกระแสดำเนินการโดยการดูดซับในสารละลายซิงค์อะซิเตต (Zinc acetate) ที่เติมสารละลายไอโอดีน 0.1 mol/L ส่วนความเข้มข้นของคิวปริกไอออนวัดด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical method)

การศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายคิวปริกคลอไรด์

แก๊สผสมของไฮโดรเจนซัลไฟด์ และ อากาศ ถูกป้อนเข้าสู่หอดูดซับด้วยอัตราการไหล 0.7 m^3/h และ 700 m^3/h ตามลำดับ อัตราส่วนของของเหลวต่อแก๊ส (liquid-gas ratio (L/G) ที่ใช้เท่ากับ 2 และ 3 L/m^3 ความเข้มข้นของคิวปริกไอออน ($CuCl_2^-$) อยู่ในช่วง 5-18 g/L ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ($500-3000$) $\times 10^{-6}$ ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 100% ตลอดช่วงของความเข้มข้นและ L/G ratio ที่ศึกษาและที่ความเข้มข้นของคิวปริกไอออนเท่ากับ 18 g/L สามารถบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ 3000×10^{-6} ได้อย่างสมบูรณ์แม้ว่า L/G จะต่ำกว่า 2 L/m^3 การเกิดขึ้นของ H^+ พร้อมๆกับการเกิดของตะกอน CuS จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงเนื่องจาก H^+ จะขัดขวางหรือทำให้ปฏิกิริยาการละลายของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำเกิดได้ช้าลงดังสมการ (2-6) ถึง (2-9)

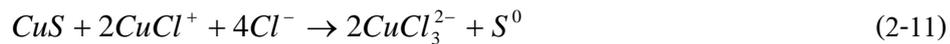
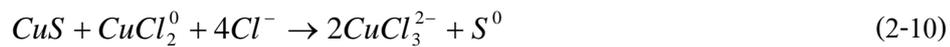


สารคอมเพล็กซ์ของคิวปริก (cupric complexes) ที่อยู่ในสารดูดซับสามารถอยู่ในรูปของคิวปริกไอออน $CuCl_3^-$, $CuCl_4^{2-}$ และ $CuCl_2^0$ ในขณะที่สารคอมเพล็กซ์ของคิวปรัส (cuprous

complexes) จะอยู่ในรูปของ $CuCl$, $CuCl_2^-$, $CuCl_3^{2-}$, $Cu_2Cl_4^{2-}$ ที่เกิดขึ้นพร้อมกับคลอไรด์อิสระ (free Cl^-)

การชะละลายคิวปริกซัลไฟด์ (CuS) ด้วยคิวปริกไอออน (cupric ion)

การละลายของ CuS ในสารละลายคิวปริกคลอไรด์แสดงได้ดังสมการ



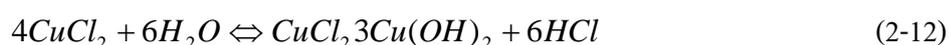
การทดลองเพื่อศึกษาการชะละลายของ CuS ในสารละลายคิวปริกคลอไรด์ดำเนินการในบับเบิลคอลัมน์ (bubble column) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm ที่มีใบกวน และชุดให้ความร้อน ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ผลของการกวน ผลของความเข้มข้นของกรด ผลของความเข้มข้นคิวปริกรวมเริ่มต้น และผลของอุณหภูมิ

ผลของการกวนผสม

จากการแปรเปลี่ยนความเร็วรอบในการกวนในช่วง 100-400 rpm พบว่าอัตราการกวนไม่มีผลต่อการละลายของ CuS ซึ่งเป็นการแสดงในเบื้องต้นว่าการแพร่ของสปีชีของคิวปริกข้ามพื้นผิวสัมผัสระหว่างของแข็งกับของเหลวไม่ได้เป็นขั้นตอนควบคุมการชะละลาย

ผลของความเข้มข้นของกรด

สถานะที่ศึกษาคืออุณหภูมิ 80 °C ความเร็วรอบ 200 rpm ความเข้มข้นรวมของคิวปริกเริ่มต้น 1.5 mol/L ความเข้มข้นเริ่มต้นของคิวปริกซัลไฟด์ 0.1 mol/L และความเข้มข้นรวมของคลอไรด์ 6.0 mol/L ความเข้มข้นของ H^+ แปรเปลี่ยนในช่วง 0.02-0.3 mol/L ผลการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นของ H^+ สูงกว่า 0.1 mol/L มีผลต่อการชะละลายของคิวปริกซัลไฟด์น้อย แต่ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.1 mol/L จะเกิดตะกอนของสารประกอบทองแดง ดังสมการ (2-12) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมค่าต่ำสุดของความเข้มข้นของ H^+ ให้เหมาะสมเพื่อป้องกันการเกิดตะกอนของสรประกอบทองแดงดังกล่าว



ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของคิวปริกรวม

ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของคิวปริกรวม $Cu(II)$ ในช่วง 0.5-2.0 mol/l ส่งผลทำให้อัตราการชะละลายของคิวปริกซัลไฟด์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่การเพิ่มความ

เข้มข้นเริ่มต้นของ $Cu(II)$ สูงกว่า 2.0 mol/L จะไม่สามารถเพิ่มอัตราการชะละลายได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่นๆแล้วสปีชีร์ของคิวพริกในสารละลายเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการชะละลายคิวพริกซัลไฟด์ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นอันดับ 1.5 เมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของ $Cu(II)$

ผลของอุณหภูมิ

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการชะละลายของคิวพริกซัลไฟด์โดยแปรเปลี่ยนอุณหภูมิในช่วง 293 ถึง 353 K พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ได้แปรผันแบบเชิงเส้นกับอุณหภูมิ และเมื่อนำผลการทดลองมาหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาโดยใช้แบบจำลอง Shrinking core สำหรับปฏิกิริยาเคมีที่มีปฏิกิริยาบนพื้นผิวเป็นขั้นตอนควบคุมจะได้ ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 35.16 kJ/mol

การฟื้นฟูสภาพของคิวพริก (cupric) จากคิวพริส (cuprous)

ขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพของคิวพริกจากคิวพริสเป็นขั้นตอนที่สำคัญ โดยออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับคิวพริสเปลี่ยนเป็นคิวพริกตามสมการ (2-13)



ปฏิกิริยาการฟื้นฟูสภาพของคิวพริก $CuCl_2^0$ ตามสมการ (2-13) จะเกิดขึ้นเร็วกว่าการเกิดของคิวพริส ($CuCl_3^{2-}$) ในปฏิกิริยาการชะละลายของคิวพริกซัลไฟด์ดังสมการ (2-10) และ (2-11) ดังนั้นการฟื้นฟูสภาพของคิวพริกไอออนจากคิวพริสไอออนจึงเกิดขึ้นพร้อมกับการออกซิเดชันของคิวพริกซัลไฟด์อย่างต่อเนื่อง

Piché *et al.* (2005) ศึกษาการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายเกลือของเหล็กที่อยู่ในรูปของของ trans-1,2-diaminocyclohexanetetraacetate (CDTA) ในคอลัมน์บรรจุขนาดห้องปฏิบัติการ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ปนเปื้อนในอากาศจากโรงงานผลิตกระดาษซึ่งมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระดับที่ไม่สูงมากนัก ตัวแปรดำเนินการที่ศึกษามี 6 ตัวแปรได้แก่ ความเป็นกรด่างในช่วง pH= 8.5-10.5 ความเข้มข้นไอออนิกของสารละลาย (solution's ionic strength) เท่ากับ 0.01-0.1 mol/L อัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายเท่ากับ 1.73-5.19 kg/m²s อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส 0.19-0.57 kg/m²s ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางเข้าของระบบ 100-400 μmol/L ความเข้มข้นของ CDTA เท่ากับ 0-2000 mol/L ผลการศึกษาพบว่า pH เป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์มากที่สุด ในขณะที่ความเข้มข้นไอออนิกของสารละลายและความเข้มข้นของ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในช่วงที่ศึกษามีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยมาก ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้น กับอัตราการไหลของสารละลายที่สูงขึ้นและลดลงกับการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊ส ความเข้มข้นของ CDTA เท่ากับ 2000 mol/L ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการสารละลายที่ pH 9.5-10.5 ประมาณ 25%

McManus and Martell (1997) ศึกษาความเสถียรของลิแกนด์ในถังปฏิกรณ์ขนาด 1000 cm³ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของลิแกนด์ต่อเหล็กต่าง ๆ ปฏิกริยาคำเนินการที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ อัตราการไหลของ H₂S เท่ากับ 2.0 mL/min ความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 18 mmol/L เติมออกซิเจนด้วยอัตรา 1 L/min อัตราการไหลหมุนเวียนของสารดูดซึมเท่ากับ 80 mL/min โดยควบคุม pH คงที่ในช่วง 7-8 ผลการศึกษาพบว่าลิแกนด์ NTA มีครึ่งชีวิตสูงสุดเมื่อเทียบกับลิแกนด์ตัวอื่น ๆ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความเสถียรของไอออนคีเลต โดยการเติมสารจำพวก สารต้านการเกิดออกซิเดชัน (antioxidants) บัฟเฟอร์ (buffers) และสารจับอนุมูลอิสระ (free radical scavengers) ผลการศึกษาพบว่ามีสาร (agents) หลายชนิดโดยเฉพาะแอนไอออนของไทโอซัลเฟต (thiosulfate anion) แอนไอออนของไทโอไซยาเนต (thiocyanate anions) และบิวทานอล (t-butanol) เพิ่มความเสถียรของ NTA ได้ดี

Piché and Larachi (2006) ศึกษาผลของสารอิเล็กโทรไลต์คือ NaCl, LiCl และ Na₂SO₄ ต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วย iron(III) trans-1,2-diaminocyclohexane-tetraacetate (Fe(III)CDTA) ที่ 25 °C ผลการทดลองพบว่าสารทั้งสามตัวช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกริยา ยกตัวอย่างเช่น อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ภายใน 10 นาที เพิ่มขึ้นจาก 10% เป็น 40% เมื่อมี NaCl ผสมอยู่ในสารละลาย 0.01 mol/L นอกจากนี้ยังพบว่า Na⁺ และ Li⁺ มีอิทธิพลต่อ activity coefficients เท่ากัน

Sunda and Huntsman (2003) ศึกษาผลของอุณหภูมิ, ค่า pH และ แสง ต่อค่าคงที่การแตกตัว (dissociation constant) ของ Fe-EDTA ในน้ำทะเล ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของ pH ทำให้ค่าคงที่การแตกตัวที่สถานะสมดุลของ Fe-EDTA เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ EDTA-hydroxy chelates [FeEDTA(OH)²⁻] แสงก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าคงที่การแตกตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน อุณหภูมิที่ลดลงจาก 20 °C เป็น 10 °C ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ของการแยกตัวในที่มืดแต่จะ ทำให้เพิ่มขึ้นในสถานะที่มีแสง

Eng *et al.* (2000) ศึกษาการสลายตัวของ acetylacetonate ในตัวเร่งปฏิกิริยาไอรอนคีเลตของปฏิกิริยาออกซิเดชันไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไปเป็น S_8 จากผลการศึกษาพบว่า ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา acetylacetonate สลายตัวเป็น acetate และ acetone. ผู้วิจัยได้นำเสนอกลไกการสลายตัวของ acetylacetonate โดยอธิบายว่าการสลายตัวของลิแกนด์ เกิดจากไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เข้าไปทำปฏิกิริยาตรงอะตอมคาร์บอนของหมู่คาร์บอนิลทำให้เกิดการแตกของพันธะ

Rattana *et al.* (2009) ศึกษาการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ ซึ่งผลิตจากน้ำเสียของโรงงานน้ำยางชั้นซึ่งมีความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกสูง จึงทำให้มีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพสูง (15,000-26,000 ppm) ในการทดลองใช้สารละลาย Fe(III)EDTA เป็นสารดูดซับเพื่อกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้หลอดดูดซับชนิดคอลัมน์บรรจุที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เมตร สูง 2.2 เมตร จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ย 97% ตลอดระยะเวลาดำเนินการ 6 ชั่วโมง เมื่อดำเนินการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมของ ความเข้มข้นและอัตราการไหลของสารละลาย Fe(III)EDTA นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของแก๊สมิเทนในแก๊สชีวภาพก่อนและหลังกระบวนการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สชีวภาพลดลง

Cecile *et al.* (2001) จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยการใช้สารละลายคีเลตไอรอนที่ประกอบด้วย chelating agent และโลหะไอออนโพลีวาเลนต์ (polyvalent metal ions) โดยให้เกิดการสัมผัสระหว่างแก๊สกับสารเคมีที่เตรียมได้ และสามารถส่งสารเคมีที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ไปทำการฟื้นฟูสภาพ

Claude *et al.* (1990) จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ และนำซัลเฟอร์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ โดยนำแก๊สที่ปนเปื้อนไฮโดรเจนซัลไฟด์ มาสัมผัสกับสารละลายของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีส่วนประกอบของโลหะที่มีประจุที่เป็นสภาวะออกซิเดชันของสารคีเลต ที่สามารถออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้กลายเป็นธาตุซัลเฟอร์ และทำให้สารคีเลตไอรอนกลายเป็นสภาวะรีดิว (reducing state) ธาตุซัลเฟอร์จะถูกแยกออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ ส่วนสารคีเลตไอรอนที่ถูกรีดิวจะสามารถฟื้นฟูสภาพด้วยออกซิเจนจากอากาศ จึงสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการได้อย่างต่อเนื่อง

จรัญ และ คณะ (2553) ศึกษาการกำจัด H_2S จากแก๊สชีวภาพโดยใช้กระบวนการดูดซับทางเคมีโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่อิมเพกเนทด้วยสารละลายโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสารดูดซับ พบว่าชุดกำจัด H_2S ที่บรรจุด้วยสารดูดซับดังกล่าวสามารถใช้งานได้ดีโดยมีประสิทธิภาพการกำจัด H_2S เริ่มต้นเท่ากับ 100% และสามารถใช้งานได้เป็นเวลา 1 เดือน ก่อนที่ประสิทธิภาพจะลดลงเหลือประมาณ 80%ซึ่งจะต้องนำถ่านกัมมันต์ไปอิมเพกเนทด้วยสารละลายโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนตซ้ำ และจากการการศึกษาการใช้ซ้ำของถ่านกัมมันต์พบว่าสามารถนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใช้ซ้ำได้อย่างน้อย 4-5 ครั้งโดยที่ระบบยังคงให้ประสิทธิภาพในการกำจัด H_2S สูงกว่า 80%

จรัญ และ คณะ (2554) ศึกษาการกำจัด H_2S จากแก๊สชีวภาพจากฟาร์มสุกรโดยใช้กระบวนการดูดซับทางเคมีด้วยสารละลาย $Fe(III)EDTA$ ในหอดูดซึมแบบแพค พบว่าการใช้ความเข้มข้นของ $Fe(III)EDTA$ ที่เหมาะสมจะสามารถกำจัด H_2S ในแก๊สชีวภาพจากฟาร์มสุกรได้ 100% และสามารถทำการฟื้นฟูสภาพสารละลาย $Fe(III)EDTA$ ได้โดยการเติมอากาศเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ของระบบมีค่าคงตัวตลอดเวลา

บทที่ 3

วิธีการวิจัยและผลการวิจัย

3.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด H_2S โดยการดูดซับด้วยสารละลาย Fe(III)EDTA ในคอลัมน์บรรจุสำหรับการใช้งานในระดับครัวเรือน

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด H_2S โดยการดูดซับด้วยสารละลาย Fe(III)EDTA ในคอลัมน์บรรจุสำหรับการใช้งานในระดับครัวเรือน มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการของคอลัมน์บรรจุคือ อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA และปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S โดยมีรายละเอียดของชุดทดลองและสภาวะการทดลองที่ใช้ดังนี้

3.1.1 คอลัมน์บรรจุและการทำงานของคอลัมน์บรรจุในการกำจัด H_2S จากแก๊สชีวภาพ

คอลัมน์บรรจุสำหรับการทดลองการกำจัด H_2S จากแก๊สชีวภาพสำหรับใช้กับครัวเรือน โดยการดูดซับด้วยสารละลาย Fe(III)EDTA มีลักษณะเป็นคอลัมน์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความสูง 50 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1 ภายในคอลัมน์ถูกบรรจุด้วยวัสดุบรรจุชนิด Raschig ring ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตรและสารละลาย Fe(III)EDTA ตามความสูงของวัสดุบรรจุและปริมาตรของสารละลายที่กำหนด แก๊สชีวภาพที่ปนเปื้อนด้วย H_2S จะถูกป้อนเข้าทางบนของคอลัมน์ผ่านท่อ นำแก๊สและตัวกระจายแก๊สและแพร่กระจายเข้าไปในสารละลาย Fe(III)EDTA ที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ วัสดุบรรจุเป็นตัวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสระหว่างแก๊สชีวภาพกับสารละลาย Fe(III)EDTA แก๊ส H_2S ที่ปนเปื้อนอยู่ในแก๊สชีวภาพจะทำปฏิกิริยากับสารละลาย Fe(III)EDTA และแก๊สชีวภาพที่ผ่านการกำจัด H_2S แล้วจะไหลออกจากคอลัมน์ทางท่อทางออกของแก๊สซึ่งอยู่บริเวณด้านบนของคอลัมน์

เมื่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ของระบบลดลง ความเข้มข้นของแก๊ส H_2S ที่ทางออกของคอลัมน์เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของแก๊ส H_2S ที่ทางออกของคอลัมน์เท่ากับ 200 ppm ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของ H_2S ที่สูงสุดที่ปลอดภัยต่อการใช้งาน จะต้องหยุดการป้อนแก๊สชีวภาพเข้าสู่ระบบและทำการฟื้นฟูสภาพของสารละลาย Fe(III)EDTA โดยการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบผ่านทางท่อ นำแก๊สแทนการป้อนแก๊สชีวภาพ เพื่อให้ออกซิเจนในอากาศเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลาย

Fe(II)EDTA เพื่อเปลี่ยนเป็น Fe(III)EDTA ซึ่งจะต้องทำการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบด้วยอัตราและระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้การฟื้นฟูสภาพของสารละลาย Fe(III)EDTA เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ สารละลาย Fe(III)EDTA ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วจะสามารถนำมาใช้งานใหม่ได้

3.1.2 การออกแบบสภาวะการทดลอง การสร้างแบบจำลอง และการหาสภาวะที่เหมาะสมจากแบบจำลอง

การออกแบบสภาวะการทดลองทำโดยใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) โดยทำการกำหนดตัวแปรที่จะศึกษา คือ อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA และปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA เทคนิค RSM เป็นเครื่องมือสำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ โดยใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบการทดลองอย่างเหมาะสม สำหรับการทดลองที่มีหลายตัวแปร RSM จะช่วยในการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยไม่จำเป็นต้องทำการทดลองในทุกความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดที่เป็นไปได้ การออกแบบการทดลองโดยใช้ RSM มีขั้นตอน ดังนี้

1. กำหนดตัวแปรที่จะศึกษาซึ่งประกอบด้วย

1.1 ตัวแปรอิสระ ประกอบด้วย

X_1 คือ อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ เท่ากับ 4-8 L/min ซึ่งเป็นช่วงอัตราการไหลที่ใช้ในการป้อนแก๊สชีวภาพเข้าสู่เตาแก๊สหุงต้ม

X_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA เท่ากับ 0.25-1.2 mol/L

X_3 คือ ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA เท่ากับ 150-400 ml

1.2 ตัวแปรตาม ประกอบด้วย

t คือ อายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ยังสามารถควบคุมเข้มข้นของแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพที่ทางออกของคอลัมน์บรรจุได้เท่ากับ 200 ppm หรือต่ำกว่า

2. การออกแบบการทดลองด้วยวิธีของพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) โดยใช้เทคนิค CCD จากจำนวนของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่กำหนดในข้อที่ 1 จะได้สภาวะการทดลองทั้งหมดจำนวน 17 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.1

3. การสร้างแบบจำลอง ซึ่งทำโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 3 ตัวแปร โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาหาแบบจำลองโดยการทำ Multiple Regression Analysis แบบจำลองที่ได้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นโค้ง (Quadratic Equation) ดังสมการที่ (3-1)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \left(\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \right)_{i < j} \quad (3-1)$$

เมื่อ β_0 β_i β_{ii} และ β_{ij} คือสัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้น แบบกำลังสอง และ สัมประสิทธิ์เชิงซ้อน ตามลำดับ

4. นำสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลองไปหาค่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับ กำจัดแก๊ส H_2S ด้วยเทคนิค optimization และนำสถานะที่เหมาะสมไปทำการทดลองซ้ำ เพื่อ ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบค่าของตัวแปรตามที่ทำนายจากแบบจำลอง กับค่าที่วัดได้จากการทดลอง

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อการกำจัด H_2S ด้วย สารละลาย Fe(III)EDTA ในคอลัมน์บรรจุ

การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อการกำจัด H_2S ด้วยสารละลาย Fe(III)EDTA ใน คอลัมน์บรรจุสำหรับใช้กับคริวเรื่อน นี้มีขั้นตอนและวิธีการที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. สร้างคอลัมน์ดูดซึม ขนาดต้นแบบที่เหมาะสมกับการใช้งานในคริวเรื่อนคือ ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความสูง 50 เซนติเมตร แสดงดังภาพประกอบที่ 1
2. บรรจุวัสดุบรรจุชนิด Raschig ring ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ลงในคอลัมน์ บรรจุ
3. เตรียมสารละลายสารละลาย Fe(III)-EDTA ให้มีความเข้มข้นและปริมาณตามต้องการ และเติมสารละลาย Fe(III)EDTA ลงในคอลัมน์บรรจุและปิดฝาด้านบนของคอลัมน์ให้สนิทก่อนนำคอลัมน์ไปเชื่อมต่อกับระบบแก๊สชีวภาพสำหรับการใช้งานกับคริวเรื่อน (ติดตั้งทดสอบที่คริวเรื่อนซึ่งใช้แก๊สชีวภาพจากฟาร์มสุกร ที่ อ. ควนขนุน จ. พัทลุง)
4. ป้อนแก๊สชีวภาพ เข้าสู่คอลัมน์ดูดซึมทางท่อนำแก๊สเข้าของคอลัมน์ แก๊สชีวภาพจะถูก กระจายด้วยหัวกระจายแก๊สเข้าไปสัมผัสกับสารละลาย Fe(III)EDTA ที่บรรจุอยู่ใน คอลัมน์ แก๊สชีวภาพที่ผ่านการกำจัด H_2S แล้วจะออกจากคอลัมน์ทางด้านบน
5. ทำเก็บตัวอย่างแก๊สชีวภาพที่ทางเข้าและที่ทางออกของคอลัมน์ดูดซึมทุกๆ 30 นาที นำ ตัวอย่างแก๊สชีวภาพมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ H_2S ที่ทางเข้าและที่ทางออกของ ระบบ เพื่อหา อายุการใช้งานของคอลัมน์ดูดซึมที่ยังคงสามารถใช้งานเพื่อกำจัด H_2S ได้ ตามต้องการคือความเข้มข้นของ H_2S ที่ทางออกต้องไม่สูงกว่า 200 ppm และ ทำการ คำนวณหาประสิทธิภาพของระบบที่เวลาต่างๆได้ตามสมการ (3-2)

$$RE = \left[\frac{[H_2S]_{in} - [H_2S]_{out}}{[H_2S]_{in}} \times 100 \right] \quad (3-2)$$

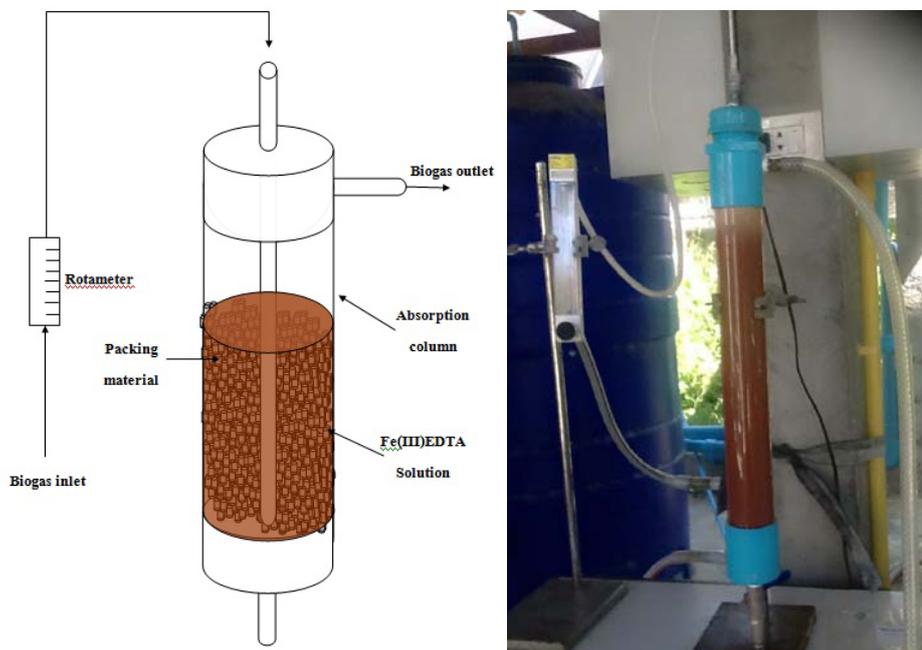
เมื่อ RE = ร้อยละของประสิทธิภาพการกำจัด H_2S

$[H_2S]_{in}$ = ความเข้มข้นของ H_2S ในแก๊สชีวภาพที่ท่อทางเข้าของระบบ

$[H_2S]_{out}$ = ความเข้มข้นของ H_2S ในแก๊สชีวภาพที่ท่อทางออกของระบบ

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทดลองสำหรับศึกษาการกำจัดแก๊ส H_2S ด้วยสารละลายไอรอนคีเลทในคอลัมน์บรรจุ ที่ความเข้มข้นของ H_2S ในแก๊สชีวภาพเฉลี่ย 1000 ppm ซึ่งเป็นช่วงความเข้มข้นจริงที่พบในแก๊สชีวภาพที่ผลิตจากฟาร์มสุกร

การทดลอง	อัตราการไหลของแก๊ส (L/min)	ความเข้มข้นของสารละลายไอรอนคีเลท (mol/L)	ปริมาตรของสารละลายไอรอนคีเลท (mL)	Response
1	5	0.50	350	t (อายุการใช้ งานของ สารละลาย Fe(II)EDTA ที่ยังสามารถ ควบคุม เข้มข้นของ แก๊ส H_2S ใน แก๊สชีวภาพ ที่ทางออก ของคอลัมน์ บรรจุได้ เท่ากับ 200 ppm หรือต่ำ กว่า)
2	7	1.00	350	
3	7	1.00	200	
4	6	0.75	275	
5	5	1.00	350	
6	6	0.75	275	
7	4	0.75	275	
8	6	0.25	275	
9	5	0.50	200	
10	6	0.75	150	
11	6	0.75	400	
12	7	0.50	200	
13	7	0.50	350	
14	6	1.20	275	
15	8	0.75	275	
16	5	1.00	200	
17	6	0.75	275	



ภาพประกอบที่ 3-1 แสดงชุดทดลองกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพติดตั้งใช้งานที่ครัวเรือน

3.2.2. การศึกษาการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA ในคอลัมน์บรรจุ

การศึกษาการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA ในงานวิจัยนี้ทำโดยการเติมอากาศลงในสารละลาย Fe(III)EDTA ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 mol/L ที่ผ่านการใช้งานในการกำจัดแก๊ส H₂S มาแล้ว โดยทำการศึกษาถึงผลของอัตราการเติมอากาศ และเวลาที่เหมาะสมในการเติมอากาศซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 1 ถึง 6 L/min และเวลาที่ใช้ในการเติมอากาศเปลี่ยนแปลงในช่วง 1-6 ชั่วโมง สภาวะการทดลองเพื่อฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA แสดงดังตารางที่ 3.2 สารละลาย Fe(III)EDTA ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่สภาวะต่างๆที่กำหนดจะถูกนำไปทำทดสอบความสามารถในการกำจัดแก๊ส H₂S โดยทำการกำจัดแก๊ส H₂S ในแก๊สชีวภาพที่อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ 5 L/min ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1 mol/L และปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมอากาศสำหรับการฟื้นฟูสภาพ Fe(III)EDTA และเวลาที่ใช้ในการเติมอากาศ กับอายุการใช้งานของคอลัมน์ดูดซึมที่ยังสามารถกำจัด H₂S ได้ตามต้องการคือความเข้มข้นของ H₂S ที่ทางออกของคอลัมน์ต้องไม่สูงกว่า 200 ppm ชุดทดลองเพื่อศึกษาการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ทำการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบแทนการป้อนแก๊สชีวภาพ แสดงดังภาพประกอบที่ 3-2



ภาพประกอบที่ 3-2 แสดงชุดทดลองกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพในขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA

ตารางที่ 3.2 แสดงสถานะการศึกษาการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA

Exp. No.	Q_{air} (L/min), X_4	Time (feed air) hr, X_5	Optimum Response
1	1	1	X_6
2	3	1	
3	5	1	
4	6	1	
5	X_6	1	X_7
6	X_6	6	
7	X_6	9	
8	X_6	12	

3.2.3 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างแก๊ส

การเก็บตัวอย่าง

ชุดเก็บตัวอย่างแก๊สที่ใช้แสดงดังภาพประกอบที่ 3-3 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้



ภาพประกอบที่ 3-3 แสดงชุดเก็บตัวอย่างแก๊ส H_2S

1. อิมพิงค์เจอร์ เป็นขวดแก้วที่ประกอบด้วยท่อทางเข้า ท่อทางออก และหัวกระจายแก๊ส ภายในขวดแก้วบรรจุสารละลาย $CdSO_4$ ปริมาตร 25 ml โดยแก๊สตัวอย่างจะไหลเข้าท่อทางเข้าของอิมพิงค์เจอร์ผ่านหัวกระจายแก๊ส เพื่อให้แก๊สกระจายตัวผ่านสารละลาย $CdSO_4$ ซึ่งทำหน้าที่ดูดซึม H_2S ที่อยู่ในแก๊สให้อยู่สารละลาย $CdSO_4$ ในรูปของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ซึ่งเป็นตะกอนสีเหลืองเข้มหลังจากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ H_2S ด้วยวิธี Iodometric Method โดยการไทเทรตด้วยสารละลาย 0.1 N $Na_2S_2O_3$
2. ปัมป์เก็บตัวอย่างแก๊ส (Gas sampling pump) ใช้ดูดแก๊สจากท่อแก๊สที่ทางเข้าและที่ทางออกของคอลัมน์บรรจุ เพื่อส่งแก๊สตัวอย่างเข้าสู่ Impinger ปัมป์เก็บอากาศสามารถปรับอัตราการไหลของแก๊สตัวอย่างและกำหนดระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างได้ตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ H_2S ในแก๊ส 3
3. สายยางซิลิโคน ใช้เป็นท่อทางไหลของแก๊สตัวอย่างที่ต่อระหว่างท่อเก็บตัวอย่างของคอลัมน์บรรจุกับชุดเก็บตัวอย่าง

วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

การวัดค่าความเข้มข้นของ H_2S ในกระแสแก๊ส ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Iodometric (APHA-AWWA, WPCF,1971)

การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัด H_2S

เมื่อทราบความเข้มข้นแก๊ส H_2S ที่ทางเข้าและที่ทางออกของคอลัมน์บรรจุ ก็จะสามารถหาประสิทธิภาพในการกำจัด H_2S ของคอลัมน์ได้ โดยประสิทธิภาพการกำจัด คำนวณได้จากสมการที่ (3-2)

3.3 ผลการทดลองและการอภิปราย

ผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ (Q_{H_2S}) ความเข้มข้นของ Fe(III)EDTA ([Fe(III)EDTA]) ที่มีต่ออายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA (Time, t) เพื่อกำจัดแก๊ส H_2S จากแก๊สชีวภาพที่มีความเข้มข้น H_2S ในแก๊สชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 1000 ± 200 ppm และกำหนดให้ความเข้มข้นเฉลี่ยของ H_2S ที่ทางออกของคอลัมน์จะต้องไม่เกิน 200 ppm ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3 และสามารถอธิบายผลของแต่ละตัวแปรได้ดังนี้

3.3.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดแก๊ส H_2S ด้วยสารละลาย Fe(III)EDTA

การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัด H_2S ในแก๊สชีวภาพด้วยสารละลาย Fe(III)EDTA จากข้อมูลผลการทดลองที่ออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค Response Surface Methodology (RSM) จะต้องดำเนินการใน 3 ขั้นตอน คือ การสร้างจากแบบจำลองคณิตศาสตร์จากชุดข้อมูล การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมโดยการทำ optimization จากแบบจำลองที่สร้างขึ้น และการตรวจสอบสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

3.3.1.1 การหา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกำจัดแก๊ส H_2S

จากข้อมูลอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ยังสามารถควบคุมเข้มข้นของแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพที่ทางออกของคอลัมน์บรรจุได้เท่ากับ 200 ppm หรือต่ำกว่า (t) ที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 3.3 สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t กับตัวแปรตามที่ทำการศึกษา คือ อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ (X_1) ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA (X_2) และปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA (X_3) โดยใช้โปรแกรม Design Expert Software จะได้แบบจำลองของสมการทาง

คณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้ในรูปแบบสมการ Quadratic model ดังสมการที่ (3-3)

$$t = 7.15 - 1.13 X_1 - 8.56 X_2 + 0.013 X_3 + 10.46 X_2^2 \quad (3-3)$$

เมื่อ t = อายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ยังสามารถควบคุมเข้มข้นของแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพที่ทางออกของคอลัมน์บรรจุได้เท่ากับ 200 ppm หรือต่ำกว่า

X_1 = อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ (4-8 L/min)

X_2 = ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA (0.25-1.2 mol/L) และ

X_3 = ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA (150-400 ml)

จากสมการที่ (3-3) สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรบ่งบอกถึงความสำคัญของตัวแปรนั้นต่ออายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ใช้ในการกำจัดแก๊ส H_2S กล่าวคือหากสัมประสิทธิ์ของตัวแปรใดมีค่าสูงกว่าตัวแปรอื่น (ไม่คิดเครื่องหมายบวกหรือลบ ซึ่งเครื่องหมายแสดงถึงผลของตัวแปรอิสระที่แปรผันตรงหรือแปรผกผันกับตัวแปรตาม ตามลำดับ) แสดงถึงตัวแปรนั้นมีผลต่ออายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA มากกว่าค่าอื่นๆ จากแบบจำลองสมการที่ได้อยู่ซึ่งรูปแบบสมการกำลังสอง (Quadratic Equation) ที่ประกอบด้วยเทอมผลของตัวแปรเชิงเส้น (X_1) (X_2) และ (X_3) เทอมของตัวแปรกำลังสอง X_2^2 และค่าสัมประสิทธิ์จัดตามสมการที่ (3-3) นั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนด้วยวิธี ANOVA ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 แสดงผลการทดลองกำจัดแก๊ส H₂S จากแก๊สชีวภาพด้วยสารละลาย Fe(III)EDTA ที่สภาวะการทดลองต่างๆที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD

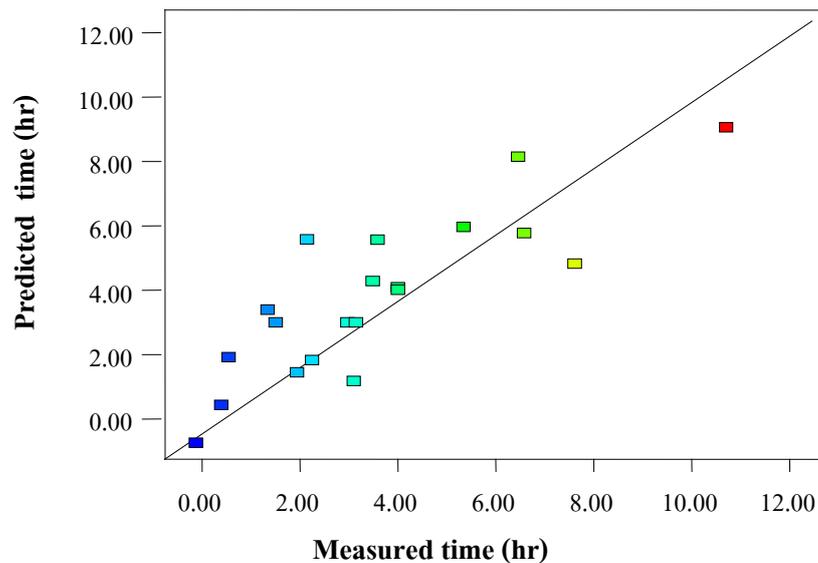
Exp	Q _{H₂S} , L/min	[Fe(III)EDTA], mol/L	V _{Fe(III)EDTA} , mL	Column Utilization Time, (CUT, hr)
1	5	0.45	350	4.50
2	7	1.00	350	2.70
3	7	1.00	200	1.92
4	6	0.75	275	3.75
5	5	1.00	350	6.88
6	6	0.75	275	3.50
7	4	0.75	275	4.10
8	6	0.25	275	1.15
9	5	0.45	200	2.80
10	6	0.75	150	3.63
11	6	0.75	400	8.00
12	7	0.45	200	0.50
13	7	0.45	350	2.50
14	6	1.20	275	11.00
15	8	0.75	275	1.00
16	5	1.00	200	5.72
17	6	0.75	275	2.08

ตารางที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองสำหรับการกำจัดแก๊ส H₂S

Source of Variation	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-value	P-value Prob > F	Remarks
Model	90.27	4	22.57	8.69	0.0008	significant
X_1	21.56	1	21.56	8.30	0.0114	
X_2	49.16	1	49.16	18.92	0.0006	
X_3	13.35	1	13.35	5.14	0.0386	
X_2^2	9.65	1	9.65	3.71	0.0731	
Residual	38.97	15	2.60			
Lack of Fit	37.44	13	2.88			
Pure Error	1.52	2	0.76			
Correlation Total	129.23	19				
R^2	0.70		Adjusted R^2	0.62		

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองดังที่แสดงในตารางที่ 3.4 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ใช้ในการกำจัดแก๊ส H₂S กับตัวแปรดำเนินการต่างๆภายใต้ช่วงของการดำเนินงานที่กำหนดได้เป็นอย่างดี ดังจะเห็นได้จากค่า P-value ของทั้ง X_1 , X_2 และ X_3 มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรดำเนินการทั้ง 3 ตัวแปร มีผลต่ออายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ใช้ในการกำจัดแก๊ส H₂S อย่างมีนัยสำคัญและสมการแบบจำลองดังกล่าวมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation) $R^2 = 0.70$ ซึ่งค่า R^2 เป็นค่าสถิติที่แสดงถึงสัดส่วนหรือร้อยละของความผิดพลาดที่แบบจำลองสามารถอธิบายได้จากสมการการประมาณและเป็นค่าที่มีความสำคัญในการพิจารณาความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีความสำคัญอีกค่าหนึ่ง กล่าวคือค่า R^2 ที่ดีควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ส่วนค่า R^2_{adj} หากมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 แสดงว่าแต่ละเทอมในแบบจำลองที่ได้มีส่วนส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดแก๊ส H₂S ทั้งหมด โดยจากการทดลองพบว่า R^2 และ R^2_{adj} เท่ากับ 0.70 และ 0.62 ตามลำดับ จากการทดลองค่า R^2_{adj} มีค่าต่ำกว่า R^2 เนื่องจากได้จากการปรับค่าผลการทดลองและค่าจากแบบจำลองให้มีความสัมพันธ์กันมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์ดังกล่าวและ เมื่อเปรียบเทียบค่าการทำนายอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ใช้

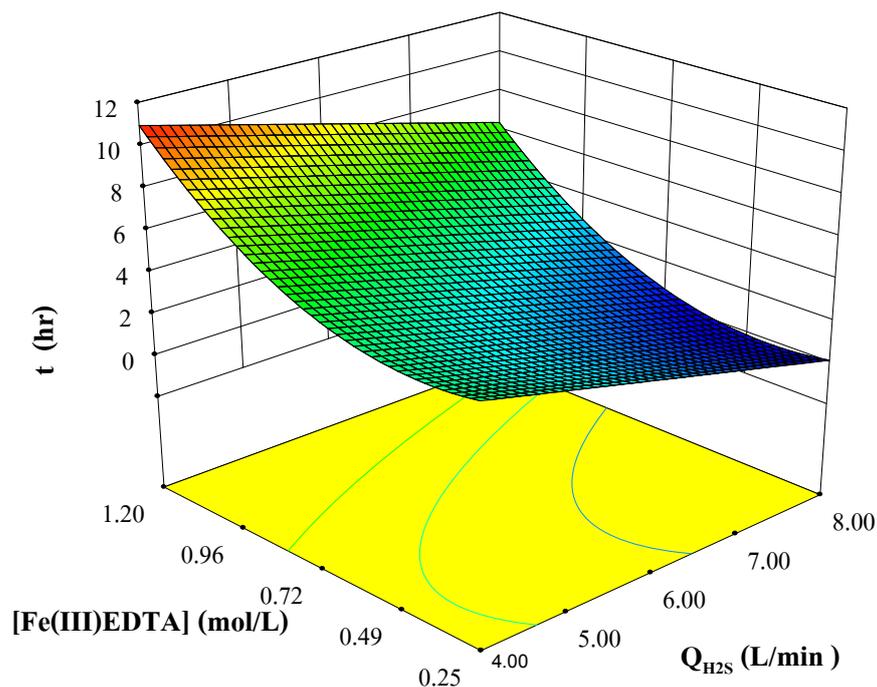
ในการกำจัดแก๊ส H_2S ของแบบจำลองสมการเส้นโค้งกับค่าที่ได้จากผลการทดลองจริงพบว่าแตกต่างกันเพียงร้อยละ 8.04 เท่านั้น ดังแสดงเปรียบเทียบในภาพประกอบที่ 3-3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองกระจายตัวรอบเส้นที่แสดงความสอดคล้องในระดับที่ยอมรับได้ ($R^2 = 0.70$) แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถใช้ทำนายระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดแก๊ส H_2S ในช่วงตัวแปรที่ศึกษาได้ การกระจายตัวของผลการทดลองและแบบจำลองห่างจากเส้นทแยงมุมสาเหตุหนึ่งมาจากการทดลองในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้แก๊สชีวภาพที่ใช้ในงานจริงที่ไม่สามารถควบคุมความเข้มข้นของ H_2S ในแก๊สชีวภาพที่ทางเข้าให้คงที่ได้ตลอดเวลา โดยมีค่าแปรเปลี่ยนในช่วง 400-1000 ppm อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากข้อมูลการทดลองในสถานะที่ใช้งานจริงนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการกำจัดแก๊ส H_2S ในสถานะที่ใช้งานจริงในระดับคร่าวๆได้



ภาพประกอบที่ 3-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของสารละลาย $Fe(III)EDTA$ ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.3.1.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ (X_1) และความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA (X_2) ต่ออายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA

ผลของอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ (X_1) และความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA (X_2) ต่ออายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA (t) ที่ใช้ในการกำจัดแก๊ส H_2S สามารถแสดงในรูปของกราฟพื้นผิวตอบสนองได้ดังภาพประกอบที่ 3-5 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของแก๊สชีวภาพสูงขึ้น อายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ลดลงซึ่งเป็นตามข้อเท็จจริงที่เมื่ออัตราการไหลของแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นปริมาณของ H_2S ที่เข้าสู่คอลัมน์ดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วยในขณะที่ปริมาณและความเข้มข้นของ Fe(III)EDTA เท่าเดิมดังนั้นอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ในคอลัมน์ดูดซับจึงลดลง ซึ่งจะตรงกันข้ามกับการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ทำให้อายุการใช้งานของคอลัมน์เพิ่มขึ้น และมีการเพิ่มขึ้นในลักษณะที่มีนัยสำคัญมากกว่าดังแสดงด้วยสัมประสิทธิ์ของเทอม X_2 และ เทอม X_2^2 ที่มีค่าสูงกว่าของเทอม X_1 มาก



ภาพประกอบที่ 3-5 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA (X_2) และอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ (X_1) ที่มีผลต่ออายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA

3.3.1.3 สภาพที่เหมาะสมสำหรับการกำจัด H_2S

จากสมการแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ใช้ในการกำจัดแก๊ส H_2S ดังแสดงด้วยสมการ (3-3) สามารถวิเคราะห์หาผลเฉลยของสภาพที่เหมาะสมได้โดยใช้โปรแกรม Design Expert Software ซึ่งจะหาค่าที่ดีที่สุดที่ทำให้ผลการตอบสนองพื้นผิวสูงสุด และสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสภาวะการดำเนินการของตัวแปรที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วย อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ (X_1) ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA (X_2) และปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA (X_3) จากการวิเคราะห์ด้วยแนวทางข้างต้น พบว่าสภาพที่เหมาะสม (Optimum Condition) ในการกำจัดแก๊ส H_2S คือ อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ 5 L/min ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1 mol/L และปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL โดยความเข้มข้นของแก๊ส H_2S ที่ทางเข้าหอคูดซิมมีค่าไม่เกิน 1000 ppm จากการทำนายด้วยสมการแบบจำลองสามารถทำนายอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ใช้ในการกำจัดแก๊ส H_2S ที่สภาวะดังกล่าวได้นาน 7.95 hr.

3.3.1.4 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

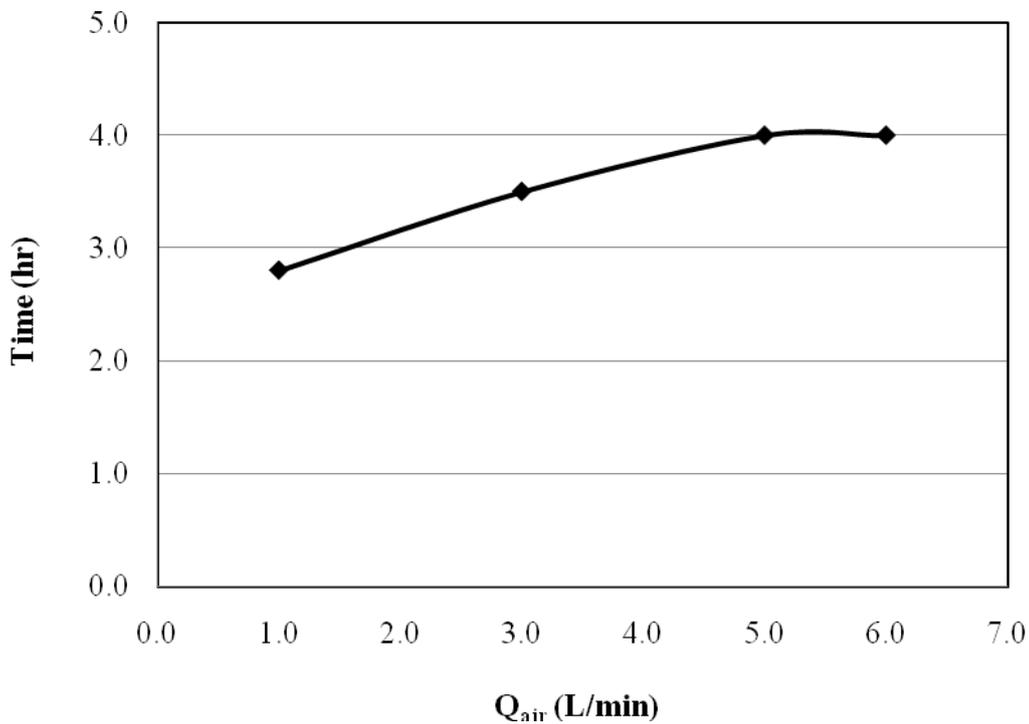
การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองดำเนินการ โดยทำการทดลองกำจัดแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากแบบจำลองคืออัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ 5 L/min ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1 mol/L ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL และความเข้มข้นของแก๊ส H_2S ที่ทางเข้าหอคูดซิมเท่ากับ 1000 ppm พบว่าอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ในการกำจัดแก๊ส H_2S โดยที่ความเข้มข้นของ H_2S ที่ทางออกของหอคูดซิมเท่ากับ 200 ppm คือ 8 hr ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ทำนายจากแบบจำลองคือ 7.95 hr แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้สามารถใช้ในการทำนายผลการกำจัด H_2S จากแก๊สชีวภาพได้ดี

3.3.2 การศึกษาการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA

การศึกษาการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจน ทำโดยการเติมอากาศลงในสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ผ่านการใช้งานกำจัด H_2S มาแล้ว ตัวแปรที่ศึกษาในการฟื้นฟูสภาพของสารละลาย Fe(III)EDTA ประกอบด้วยอัตราการไหลของอากาศ และเวลาที่ใช้ในการเติมอากาศ โดยมีสภาวะการทดลองและวิธีการทดลองดังที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.2.2 และมีผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องดังนี้

3.3.2.1 ผลของอัตราการไหลของอากาศในการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA

จากการทดลองนำสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ผ่านการใช้งานกำจัดแก๊ส H₂S (ที่สภาวะที่เหมาะสม: อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ 5 L/min ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1 mol/L และปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL) มาศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศต่อการฟื้นฟูสภาพของสารละลาย Fe(III)EDTA โดยใช้ป้อนอากาศป้อนอากาศเข้าไปในสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ผ่านการใช้งานแล้ว และทำการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 1 ถึง 6 L/min โดยควบคุมเวลาที่ป้อนอากาศในทุกอัตราการไหลให้คงที่ที่ 1 hr แล้วนำสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วไปทดสอบการกำจัดแก๊ส H₂S ที่สภาวะเดิมเพื่อหาอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ใช้ในการกำจัดแก๊ส H₂S ที่สภาวะดังกล่าว จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA กับอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-6 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มสูงขึ้นในช่วงตั้งแต่ 1-5 L/min ส่งผลให้อายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ใช้ในการกำจัดแก๊ส H₂S มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แต่จะเริ่มคงที่ที่อัตราการไหลของอากาศสูงกว่าหรือเท่ากับ 5 L/min แสดงว่าที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 5 L/min นั้นมีปริมาณของออกซิเจนที่ถูกดูดซึมและเข้าทำปฏิกิริยากับ Fe(II)EDTA อย่างเพียงพอและสามารถฟื้นฟูสภาพของสารละลาย Fe(III)EDTA ได้อย่างสมบูรณ์ การเติมอากาศด้วยอัตราการไหลที่สูงขึ้นไม่ได้เพิ่มการดูดซึมของออกซิเจนเพราะที่อัตราการไหลของอากาศสูงๆ แม้ว่าจะมีปริมาณของออกซิเจนเข้าสู่ระบบมากขึ้น แต่เวลาที่อากาศอยู่ในคอลัมน์และเวลาที่ออกซิเจนสัมผัสกับสารละลาย Fe(III)EDTA จะน้อยลง อีกทั้งความสามารถในการละลายของออกซิเจนมีค่าจำกัดดังนั้นการเพิ่มอัตราการไหลมากกว่า 5 L/min จึงไม่มีผลต่อการฟื้นฟูสภาพของ Fe(III)EDTA แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้จึงเลือกอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 5 L/min เป็นอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเป็นอัตราการไหลเดียวกับสภาวะที่เหมาะสมในการป้อนแก๊สชีวภาพเข้าสู่ระบบในขั้นตอนการกำจัดแก๊ส H₂S

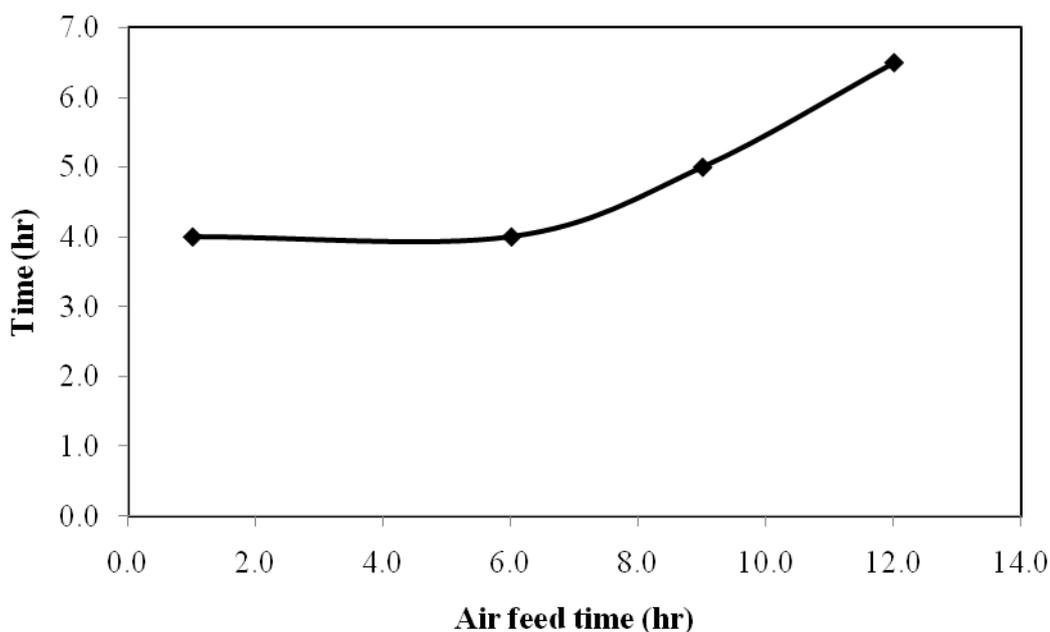


ภาพประกอบที่ 3-6 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ใช้ในการกำจัดแก๊ส H₂S กับอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA

3.2.2.2 ผลของเวลาในการเติมอากาศต่อการฟื้นฟูสภาพของสารละลาย Fe(III)EDTA

จากการทดลองนำสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ผ่านการใช้งานกำจัดแก๊ส H₂S (ที่สภาวะที่เหมาะสม: อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ 5 L/min ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1 mol/L และปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL) มาศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการเติมอากาศต่อการฟื้นฟูสภาพของสารละลาย Fe(III)EDTA โดยใช้ป้อนอากาศป้อนอากาศเข้าไปในสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ผ่านการใช้งานแล้ว และทำการแปรเปลี่ยนเวลาที่ใช้ตั้งแต่ 1 ถึง 12 hr โดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศในทุกการทดลองให้คงที่ที่ 5 L/min แล้วนำสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วไปทดสอบการกำจัดแก๊ส H₂S ที่สภาวะเดิมเพื่อหาอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA สำหรับการกำจัดแก๊ส H₂S ที่สภาวะดังกล่าว จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA กับเวลาที่ใช้ในการป้อนอากาศสำหรับการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA ดังแสดงในภาพประกอบที่ 6 พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 5 L/min การเพิ่มเวลาในการเติมอากาศจะทำให้การฟื้นฟูสภาพของ

Fe(III)EDTA เกิดขึ้นดีขึ้นดังแสดงได้ด้วยการเพิ่มขึ้นของอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA กับเวลาที่ใช้ในการเติมอากาศอย่างชัดเจนในภาพประกอบที่ 3-7

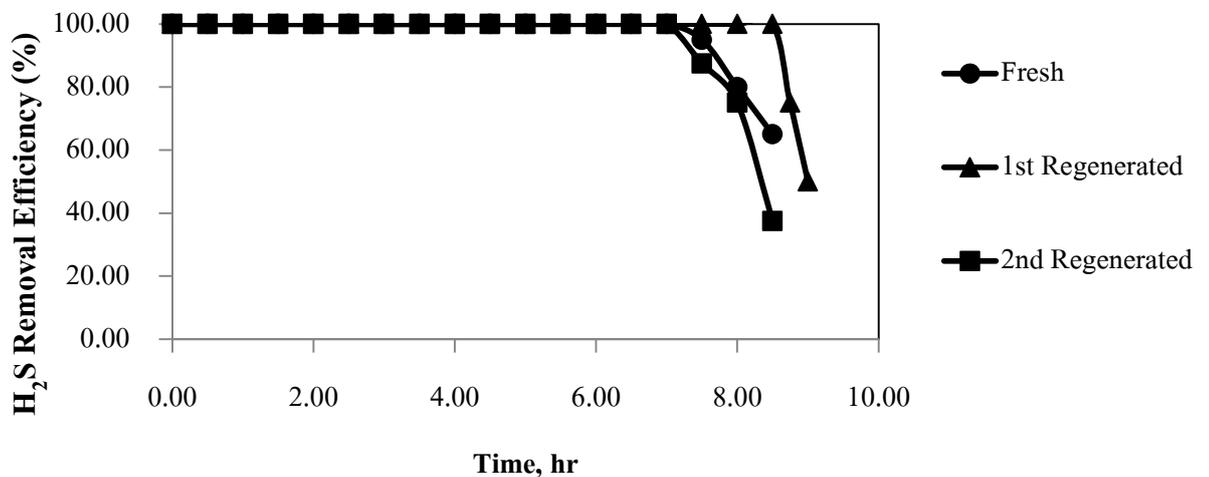


ภาพประกอบที่ 3-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของสารละลาย Fe(III)EDTA สำหรับการกำจัดแก๊ส H_2S กับเวลาในการเติมอากาศสำหรับการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA

3.3.3 การทดสอบการใช้งานจริงของชุดกำจัด H_2S โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองทั้งในขั้นตอนการกำจัด H_2S และในขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพของสารละลาย Fe(III)EDTA

การทดสอบการใช้งานจริงของชุดกำจัด H_2S โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ 5 L/min ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1 mol/L และใช้สภาวะการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ อัตรา

การไหลของอากาศ 5 L/min และระยะเวลาในการป้อนอากาศ 12 hr ได้ดำเนินการที่ครัวเรือนที่ฟาร์มสุกรใน อ.ควนขนุน จังหวัดพัทลุง โดยใช้ชุดกำจัดกำจัด H₂S ที่พัฒนาขึ้นเพื่อทำความสะอาดแก๊สชีวภาพอย่างต่อเนื่องและทำการการวัดประสิทธิภาพของชุดกำจัด H₂S ที่เวลาต่างๆจนกระทั่งสารละลาย Fe(III)EDTA ของชุดกำจัด H₂S นั้นไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป (ความเข้มข้นของ H₂S ที่ทางออกของชุดกำจัดสูงกว่า 200 ppm) จึงนำสารละลาย Fe(III)EDTA ของชุดกำจัด H₂S มาทำการฟื้นฟูสภาพและนำกลับไปใช้ใหม่ซึ่งเป็นการจำลองสภาพการใช้งานจริง ได้ผลการทดสอบดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-8



ภาพประกอบที่ 3-8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส H₂S กับเวลา เปรียบเทียบระหว่างการใช้สารละลาย Fe(III)EDTA ใหม่สด (Fresh)กับสารละลาย Fe(III)EDTA ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 (1 st Regenerated) และ ครั้งที่ 2 (2 nd Regenerated)

จากภาพประกอบที่ 3-8 พบว่าชุดกำจัดแก๊ส H₂S มีประสิทธิภาพเริ่มต้นในการกำจัด H₂S เท่ากับ 100% และเมื่อทดสอบใช้งานชุดกำจัดแก๊ส H₂S อย่างต่อเนื่องพบว่าหลังจากการใช้งานชุดกำจัด H₂S ไปแล้วประมาณ 8 ชั่วโมงประสิทธิภาพของชุดกำจัด H₂S ลดลงถึงระดับที่ไม่สามารถใช้งานได้อีก จะต้องทำการฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA ของชุดกำจัดแก๊ส H₂S ใหม่ โดยการเติมอากาศเข้าสู่คอลัมน์ดูดซึมแทนการป้อนแก๊สชีวภาพ โดยในการทดสอบการใช้งานชุดกำจัดแก๊ส H₂S นี้ได้ทำการใช้งานและฟื้นฟูสภาพสารละลาย Fe(III)EDTA เพื่อใช้ชุดกำจัดแก๊ส H₂S ซ้ำอีก 2 ครั้ง พบว่าชุดกำจัดแก๊ส H₂S ที่ใช้สารละลาย Fe(III)EDTA ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ให้ประสิทธิภาพการกำจัด H₂S ใกล้เคียงกับการใช้สารละลาย Fe(III)EDTA ใหม่สด

บทที่ 4

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการกำจัด H_2S ในแก๊สชีวภาพโดยกระบวนการดูดซับทางเคมีด้วยสารละลาย $Fe(III)EDTA$ ในคอลัมน์บรรจุขนาดเล็กสำหรับการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพเพื่อใช้งานในระดับครัวเรือน พบว่าคอลัมน์บรรจุรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความสูง 50 เซนติเมตร ที่บรรจุด้วยวัสดุบรรจุชนิด Raschig ring ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตรและสารละลาย $Fe(III)EDTA$ ปริมาตร 350 mL เป็นชุดกำจัด H_2S ที่เหมาะสมกับการใช้งานดังกล่าว โดยเมื่อดำเนินการภายใต้สภาวะที่เหมาะสมคืออัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ 5 L/min ความเข้มข้นของสารละลาย $Fe(III)EDTA$ 1 mol/L ปริมาตรของสารละลาย $Fe(III)EDTA$ 350 mL และความเข้มข้นของแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพที่ทางเข้าหอดูดซับเท่ากับ 1000 ppm พบว่าอายุการใช้งานของสารละลาย $Fe(III)EDTA$ ที่ยังคงสามารถควบคุมความเข้มข้นของ H_2S ในแก๊สชีวภาพที่ทางออกได้ต่ำกว่า 200 ppm คือ 8 hr และสามารถทำการฟื้นฟูสภาพของสารละลาย $Fe(III)EDTA$ ได้โดยการเติมอากาศในอัตรา 5 l/min เป็นเวลา 12 hr ก็จะสามารถใช้งานชุดกำจัดไฮโดรซัลไฟด์ดังกล่าวได้ โดยให้ประสิทธิภาพเท่ากับการใช้สารละลาย $Fe(III)EDTA$ ใหม่สด

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าชุดกำจัดแก๊ส H_2S สำหรับทำความสะอาดแก๊สชีวภาพที่พัฒนาขึ้นนี้มีศักยภาพในการนำไปใช้งานจริงในการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพสำหรับการใช้งานในระดับครัวเรือนโดยมีการลงทุนในการจัดหาคอลัมน์บรรจุและสารละลาย $Fe(III)EDTA$ เพียงครั้งเดียว แต่สามารถใช้งานชุดกำจัดแก๊ส H_2S ได้เป็นระยะเวลานานโดยการเติมอากาศเพื่อฟื้นฟูสภาพสารละลาย $Fe(III)EDTA$ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ชุดเติมอากาศที่ใช้เติมอากาศสำหรับตู้ปลาที่มีจำหน่ายในท้องตลาดและสามารถเติมอากาศได้ในระหว่างที่ไม่ใช้งานชุดดังกล่าว (เช่นในช่วงเวลากลางคืน) ซึ่งผู้ใช้งานแก๊สชีวภาพในระดับครัวเรือนสามารถดำเนินการได้เอง

บรรณานุกรม

- APHA, AWWA and WPCF. 1985. Standard Methods for The Examination of Water and Waste. 6th ed. Washington, DC, US.
- Cecile, B., Christian, S., and Thierry, H. 2001. Method and Apparatus for Treating Hydrogen Sulfide Containing Gas by Recirculating Reduced Catalyst Solution. PATENT ABSTRACTS OF JAPAN. JP 2001-025640.
- Chen , L., Huang, J., and Yang, C.L. 2001. Absorption of H₂S in NaOCl Caustic a Aqueous Solution. Environmental Progress, 20(3): 175-181.
- Claude, D., Patrice, L., and Jacques, Q. 1999. High Pressure Recovery Method for Sulfur. PATENT ABSTRACTS OF JAPAN. JP. 11-246206
- Karimi, A., Tavassoli, A., Nassernejad, B. 2010. Kinetic Studies and Reactor Modeling of Single Step H₂S Removal using Chelated Iron Solution. Chemical Engineering Research and Design, 88: 748-756
- Krischan, J., Makaruk, M., and Harasek. 2012. Design and Scale-up an Oxidative Scrubbing Process for the Selective Removal of Hydrogen Sulfide from Biogas. Journal of Hazardous Materials, 215-216:49-56
- McManus, D., and Martell, A.E. 1997. The Evolution Chemistry and Applications of Chelated Iron Hydrogen Sulfide Removal and Oxidation Processes. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. 117: 289-297.
- Piche', S., Ribeiro, N., Bacaoui, A., and Larachi. 2005. Assessment of a Redox Alkaline/iron-chelate Absorption Process for the Removal of Dilute Hydrogen Sulfide in Air Emissions. Chemical Engineering Science 60: 6452-6461.
- Piche', S. and Larachi, F. 2006a. Dynamics of pH on the Oxidation of HS⁻ with Iron(III)Chelates in Anoxic Conditions. Chemical Engineering Science. 61: 7673-7683
- Saelle, R., Chungsiriporn, J., Intamane, J., and Bunyakan, C. 2009. Removal of H₂S in Biogas from Concentrated Latex Industry with Iron(III)chelate in Packed Column. Songklanakarin J. Sci. Technol. 31(2): 195-203
- Sunda and Huntsman (2003). Effect of pH, light, and temperature on Fe-EDTA chelation and Fe hydrolysis in seawater Marine Chemistry 84 (2003) 35- 47.

- Yu, Y., Liu, Y., and Qi, G. 2014. Rapid Regeneration of Chelated Iron Desulfurization Solution Using Electrochemical Reactor with Rotating Cylindrical Electrodes. Chinese Journal of Chemical Engineering. 22(2):136-140
- Zhang, J., and Tong, Z. 2006. H₂S Removal with Cupric Chloride for Producing Sulfur. Chinese Journal of Chemical Engineering. 14(6):810-813
- จรัญ บุญกาญจน์ และ คณะ. 2553. จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันและการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต. รายงานวิจัย. งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2552. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- จรัญ บุญกาญจน์ และ คณะ. 2554. ระบบกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพสำหรับฟาร์มสุกร. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 9. 2-3 พฤษภาคม 2554. โรงแรมเมอร์ลิน บีช รีสอร์ท จ. ภูเก็ต

ภาคผนวก: ก

ข้อมูลผลการทดลองสำหรับการหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัด H_2S ด้วย
สารละลาย $Fe(III)EDTA$

การทดลองที่ 1:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 0.5 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 800 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100
30	0	100
60	0	100
90	0	100
120	0	100
150	50	93.75
180	50	93.75
210	100	87.5
240	150	81.25
270	200	75
300	350	56.25

การทดลองที่ 2:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 7 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 400 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	50	87.50
90	60	85.00
120	75	81.25
150	100	75.00
162	200	50.00
180	350	12.50

การทดลองที่ 3:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 7 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 200 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 600 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	0	100.00
90	100	83.33
115	200	66.67
120	220	63.33

การทดลองที่ 4:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 6 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 0.75 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 275 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 400 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100
30	0	100
60	0	100
90	0	100
120	0	100
150	0	100
180	25	93.75
210	150	62.5
225	200	50
240	300	25

การทดลองที่ 5:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 800 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	0	100.00
90	0	100.00
120	0	100.00
150	0	100.00
180	0	100.00
210	0	100.00
240	0	100.00
270	0	100.00
300	25	96.88
330	50	93.75
360	100	87.50
390	125	84.38
413	200	75.00
420	350	56.25

การทดลองที่ 6:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 6 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 0.75 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 275 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 500 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100
30	0	100
60	0	100
90	0	100
120	0	100
150	0	100
180	50	90
210	200	60

การทดลองที่ 7:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 4 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 0.75 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 275 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 600 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	0	100.00
90	0	100.00
120	25	95.83
150	25	95.83
180	50	91.67
210	50	91.67
240	150	75.00
246	200	66.67
270	400	33.33

การทดลองที่ 8:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 6 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 0.25 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 275 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 600 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	100	83.33
60	150	75.00
69	200	66.67
90	325	45.83

การทดลองที่ 9:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 0.50 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 200 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 400 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100
30	0	100
60	0	100
90	0	100
120	5	98.75
150	50	87.5
168	200	50
180	300	25

การทดลองที่ 10:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 6 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 0.75 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 150 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 800 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100
30	0	100
60	0	100
90	0	100
120	0	100
150	0	100
180	50	93.75
210	150	81.25
217.5	200	75
240	350	56.25

การทดลองที่ 11:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 6 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 0.75 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 400 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 800 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100
30	0	100
60	0	100
90	0	100
120	0	100
150	0	100
180	25	96.875
240	25	96.875
300	50	93.75
360	50	93.75
420	100	87.5
480	200	75
540	350	56.25

การทดลองที่ 12:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 7 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 0.50 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 200 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 800 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	100	87.50
30	200	75.00
60	350	56.25
90	500	37.50

การทดลองที่ 13:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 7 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 0.50 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 1000 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	10	99.00
60	25	97.50
90	50	95.00
120	150	85.00
150	200	80.00
180	500	50.00

การทดลองที่ 14:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 6 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.20 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 275 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 800 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100
30	0	100
60	0	100
90	0	100
120	5	99.38
150	5	99.38
180	25	96.88
240	25	96.88
300	40	95.00
360	50	93.75
420	50	93.75
480	100	87.50
540	125	84.38
600	150	81.25
660	200	75.00
720	350	56.25

การทดลองที่ 15:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 8 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 0.75 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 275 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 400 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	50	87.5
30	150	62.5
60	200	50
90	250	37.5
120	350	12.5

การทดลองที่ 16:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 200 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 1000 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100
30	0	100
60	0	100
90	0	100
120	0	100
150	0	100
180	25	97.5
240	50	95
300	150	85
343	200	80
360	220	78
420	350	65

การทดลองที่ 17:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 6 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 0.75 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 200 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 800 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100
30	0	100
60	0	100
90	16	98
120	120	85
125	200	75
150	600	25

ภาคผนวก: ข

ข้อมูลผลการทดลองสำหรับการศึกษาริณฟูสภาพ สารละลาย Fe(III)EDTA

การทดลองที่ 1:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 1000 ppm

อัตราการไหลของอากาศ 1 L/min

ระยะเวลาในการป้อนอากาศ 1 hr

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	0	100.00
90	0	100.00
120	0	100.00
150	50	95.00
168	200	80.00
180	300	70.00
210	500	50.00

การทดลองที่ 2:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 1000 ppm

อัตราการไหลของอากาศ 3 L/min

ระยะเวลาในการป้อนอากาศ 1 hr

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	0	100.00
90	0	100.00
120	50	95.00
180	150	85.00
210	200	80.00
240	500	50.00

การทดลองที่ 3:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 1000 ppm

อัตราการไหลของอากาศ 5 L/min

ระยะเวลาในการป้อนอากาศ 1 hr

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	0	100.00
90	0	100.00
120	0	100.00
150	0	100.00
180	0	100.00
210	50	95.00
240	200	80.00
270	500	50.00

การทดลองที่ 4:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 1000 ppm

อัตราการไหลของอากาศ 6 L/min

ระยะเวลาในการป้อนอากาศ 1 hr

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	0	100.00
90	0	100.00
120	0	100.00
150	0	100.00
180	0	100.00
210	0	100.00
240	200	80.00
270	400	60.00

การทดลองที่ 5:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 1000 ppm

อัตราการไหลของอากาศ 5 L/min

ระยะเวลาในการป้อนอากาศ 1 hr

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	0	100.00
90	0	100.00
120	0	100.00
150	0	100.00
180	0	100.00
210	50	95.00
240	200	80.00
270	500	50.00

การทดลองที่ 6:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 1000 ppm

อัตราการไหลของอากาศ 5 L/min

ระยะเวลาในการป้อนอากาศ 6 hr

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	0	100.00
90	0	100.00
120	0	100.00
150	0	100.00
180	0	100.00
210	25	97.50
240	200	80.00
270	500	50.00

การทดลองที่ 7:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 1000 ppm

อัตราการไหลของอากาศ 5 L/min

ระยะเวลาในการป้อนอากาศ 9 hr

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	0	100.00
90	0	100.00
120	0	100.00
150	0	100.00
180	0	100.00
210	25	97.50
240	50	95.00
270	150	85.00
300	200	80.00
330	300	70.00
360	500	50.00

การทดลองที่ 8:

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min

ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL

ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ 1000 ppm

อัตราการไหลของอากาศ 5 L/min

ระยะเวลาในการป้อนอากาศ 12 hr

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	0	100.00
90	0	100.00
120	0	100.00
150	0	100.00
180	0	100.00
210	0	100.00
240	0	100.00
270	0	100.00
300	0	100.00
330	0	100.00
360	50	95.00
390	200	80.00
420	400	60.00

ภาคผนวก: ก

ข้อมูลผลการทดลองสำหรับการทดสอบการใช้งานจริงของชุดกำจัด H_2S โดยใช้สถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนการกำจัด H_2S และในขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพของสารละลาย $Fe(III)EDTA$

การทดลองที่ 1: Fresh Fe(III)EDTA

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL อัตราการไหลของอากาศ 5 L/min

ระยะเวลาในการป้อนอากาศ 12 hr ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ

1000 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	0	100.00
90	0	100.00
120	0	100.00
150	0	100.00
180	0	100.00
210	0	100.00
240	0	100.00
270	0	100.00
300	0	100.00
330	0	100.00
360	0	100.00
390	0	100.00
420	0	100.00
450	50	95.00
480	200	80.00
510	350	65.00

การทดลองที่ 2: 1 st Regeneration

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL อัตราการไหลของอากาศ 5 L/min

ระยะเวลาในการป้อนอากาศ 12 hr ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ

1000 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	0	100.00
90	0	100.00
120	0	100.00
150	0	100.00
180	0	100.00
210	0	100.00
240	0	100.00
270	0	100.00
300	0	100.00
330	0	100.00
360	0	100.00
390	0	100.00
420	0	100.00
450	0	100.00
480	0	100.00
510	0	100.00
525	200	75.00
540	400	50.00

การทดลองที่ 3: 2 nd Regeneration

สภาวะการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส 5 L/min ความเข้มข้นของสารละลาย Fe(III)EDTA 1.0 mol/L

ปริมาตรของสารละลาย Fe(III)EDTA 350 mL อัตราการไหลของอากาศ 5 L/min

ระยะเวลาในการป้อนอากาศ 12 hr ความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพ

1000 ppm

Time (min)	[H ₂ S]outlet (ppm)	%RE_H ₂ S
0	0	100.00
30	0	100.00
60	0	100.00
90	0	100.00
120	0	100.00
150	0	100.00
180	0	100.00
210	0	100.00
240	0	100.00
270	0	100.00
300	0	100.00
330	0	100.00
360	0	100.00
390	0	100.00
420	0	100.00
450	100	87.50
480	200	75.00
510	500	37.50

ภาคผนวก: ง

บทความวิชาการส่งเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง

**การปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพเพื่อใช้งานในครัวเรือนโดยการดูดซึมทางเคมีด้วย
สารละลายคัลเซียมไฮดรอกไซด์**

