การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพโดยใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

Removal of Hydrogen Sulfide from Biogas using Potassium Permanganate Impregnated Activated Carbon

เกวลิน ปฐมระวี

Kawalin Prathomravee

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering
Prince of Songkla University
2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพโดยใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

Removal of Hydrogen Sulfide from Biogas using Potassium Permanganate Impregnated Activated Carbon

เกวลิน ปฐมระวี

Kawalin Prathomravee

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering
Prince of Songkla University

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพโดยใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

ผู้เขียน นางสาวเกวลิน ปฐมระวี

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

…….....

(รองศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร)

คณะกรรมการสอบ

……ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์)

…….....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร)

…….....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

……..……..……..……

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ……..
(รองศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ……..
(นางสาวเกวลิน ปฐมระวี)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ……..

(นางสาวเกวลิน ปฐมระวี)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพโดยใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

ผู้เขียน นางสาวเกวลิน ปฐมระวี

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นพลังงานหมุนเวียนที่สะอาด เกิดจากการย่อยสลายสารชีวมวลที่เป็นสารอินทรีย์ด้วยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Bacteria) ก๊าซชีวภาพมีการปนเปื้อนของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือก๊าซไข่เน่าซึ่งเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากเป็นก๊าซที่มีกลิ่นเหม็น ส่งผลเสียต่อสุขภาพ และเกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์ งานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบชุดอุปกรณ์การกำจัด H_2S เพื่อการใช้งานในระดับครัวเรือนโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่เคลือบด้วยสารละลาย $KMnO_4$ เป็นตัวดูดซับที่บรรจุในแพ็คคอลัมน์(Packed column) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4.4 cm ความสูง 50.0 cm และความสูงในการบรรจุสารดูดซับ 40.0 cm ก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกรมีความเข้มข้นของ H_2S 1,000-1,500 ppmv ออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ ตัวแปรที่ศึกษา คือ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 4.0-8.0 L/min น้ำหนักของสารดูดซับ 25.0-100.0 g และความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์ 3.0-9.0% w/v พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการใช้ถ่านกัมมันต์ 77.0 g เคลือบด้วย $KMnO_4$ ความเข้มข้น 5.0% w/v และมีอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 L/min ด้วยการวัดผลการหมดประสิทธิภาพของสารดูดซับที่ความเข้มข้นของ H_2S ที่ทางออกมากกว่า 200 ppmv ใช้เวลาของการดำเนินการ 144 นาที วิธีการที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับที่อิ่มตัว คือ การเคลือบซ้ำด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 5.0% w/v และอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าสามารถนำสารดูดซับมาใช้ซ้ำได้เพียงครั้งเดียว ผลของงานวิจัยนี้มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้สำหรับการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพในระดับครัวเรือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นำไปสู่การออกแบบคอลัมน์สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็กที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพ 100 m^3/day

และมีดำเนินการเป็นเวลา 8 hr/day ต้องใช้คอลัมน์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.238 m และมีความสูง 0.385 m ดำเนินการที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 0.2 m^3/min โดยใช้ถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 12.897 kg ที่เคลือบด้วย $KMnO_4$ ความเข้มข้น 5.0% w/v เมื่อทำการประเมินค่าใช้จ่ายของวัสดุ สารเคมี และค่าพลังงานไฟฟ้า พบว่าในการบำบัดก๊าซชีวภาพ 1 m^3 มีค่าใช้จ่าย 23.718 บาท

Thesis Title Removal of Hydrogen Sulfide from Biogas using Potassium Permanganate ImpregnatedActivated Carbon

Author Miss Kawalin Prathomravee

Major Program Chemical Engineering

Academic Year 2015

ABSTRACT

Biogas, a clean renewable energy, produced by the breakdown of organic matter with anaerobic bacteria in the absence of oxygen. Hydrogen sulfide (H_2S) containing in biogas has the most problematic contaminants found according to malodorous gas, harmful to human health, and highly corrosive to equipment. The aim of this study is to design the hydrogen sulfide removal unit for household using potassium permanganate ($KMnO_4$) -impregnated activated carbons. The coconut shell activated carbon was a common adsorbent used in filter media containing in packed column. The laboratory scale packed column was installed at 4.4 cm inside diameter, 50.0 cm height, and 40.0 cm bed section. Biogas containing H_2S at 1,000-1,500 ppmv was derived from pig farm and fed to the system. The optimal condition of H_2S removal were investigated using response surface methodology (RSM) for the effect of biogas flow rate 4.0-8.0 L/min, adsorbent weight 25.0-100.0 g, and $KMnO_4$ concentration 3.0-9.0 %w/v. The optimum condition was achieved at activated carbon 77.0 g impregnated with 5.0% w/v $KMnO_4$ and operated at 6.0 L/min biogas flow rate. Breakthrough time of 200 ppmv outlet H_2S concentration was found at 144 minutes. The appropriate regeneration method for saturated adsorbent was found by re-impregnating with 5.0% w/v $KMnO_4$ and dried at 60°C for 12 hours. The regenerated adsorbent can be used only once and have to be replace for new one. The H_2S removal from biogas by $KMnO_4$ impreganted activated carbon in packed column system is an effective way to use for household. To desing column for small pig farm produced biogas 100 m^3/day and operated 8 hr/day. The packed column is 0.238 m diameter and 0.385 m height was achieved at

biogas flow rate 0.2 m^3/min used activated carbon 12.897 kg impregnated with 5.0% w/v $KMnO_4$. The cost of material, chemical, and energy charge is 23.718 Bath/m^3

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุนและความร่วมมือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายๆ ท่านดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ คอยชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหา การค้นคว้าข้อมูล และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา อีกทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์และรองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ กรรมการผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ทุนศิษย์ก้นกุฏิ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย

ขอขอบพระคุณเชย บัวศรี คุณภิญโญ ประทุมมณี และคุณจันทร์เพ็ญ ประทุมมณี ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องก๊าซชีวภาพ สถานที่ในการทำวิจัย และข้อมูลต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยจนสำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ พี่ๆ และเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณคุณพรพิมล แสนสุข คุณจรรยา อินทมณี และคุณสมคิด จีนาพงษ์ ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยปรับปรุงซ่อมแซมอุปกรณ์ในการทดลอง รวมทั้งคณาจารย์ บุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ตลอดจนขอขอบพระคุณทุกท่านที่มิได้กล่าวมา ณ ที่นี้ที่มีส่วนช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

เกวลิน ปฐมระวี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(7)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(13)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)	6
2.2 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide, H_2S)	7
2.3 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)	8
2.4 ความสามารถในการดูดซับ	11
2.5 การฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ	12
2.6 ปฏิกิริยาของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์กับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	13
2.7 แพคคอลัมน์ (Packed column)	13
2.8 วิธีการและการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methods and designs, RSM)	14
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	
3.1 วัสดุ	19
3.2 ก๊าซชีวภาพ	21
3.3 สารเคมี	22
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 ชุดอุปกรณ์กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ	24
3.6 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	26
3.7 วิธีการทดลอง	29
3.8 วิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	30
3.9 วิธีการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ	31
3.10 วิธีการทดลองเปรียบเทียบชนิดตัวดูดซับในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	34
3.11 วิธีการทดลองศึกษาความสามารถในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	38
4.2 ผลการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD	40
4.3 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ	49
4.4 ผลของการเปรียบเทียบชนิดตัวดูดซับในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	52
4.5 ผลของความสามารถในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ	53
4.6 การออกแบบระบบสำหรับการขยายสเกล	58
4.7 ผลประเมินทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis)	60
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการวิจัย	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลเบื้องต้นสารเคมี	69
ภาคผนวก ข การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง	78
ภาคผนวก ค ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง	88
ภาคผนวก ง การออกแบบระบบกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็ก	117
ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	121
ประวัติผู้เขียน	127

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	แสดงความแตกต่างของการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ	10
3-1	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ของ บริษัท มาซูม่า (ประเทศไทย) จำกัด	20
3-2	แสดงระดับของตัวแปรอิสระในการออกแบบการทดลอง	31
3-3	แสดงรหัสของตัวแปรที่ทำการศึกษาในการออกแบบการทดลอง	32
3-4	แสดงผลการแปลงรหัสของตัวแปรที่ทำการศึกษาในการออกแบบการทดลอง	33
4-1	แสดงผลต่างความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จากการเตรียมและจากการไทเทรต	38
4-2	แสดงผลน้ำหนักผลึกของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เกิดจากการละลายในน้ำ	39
4-3	แสดงผลของเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD	42
4-4	แสดงผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์และค่าสถิติของกระบวนการ กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ	43
4-5	แสดงผลการคำนวณค่าใช้จ่ายด้านวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ	60
4-6	แสดงผลการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการ กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ	61

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่		หน้า
2-1	แสดงอุปกรณ์ที่ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพกัดกร่อน	8
2-2	แสดงกลไกการดูดซับ	9
2-3	แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นภายในคอลัมน์ของสารดูดซับ	11
2-4	แสดงการเปลี่ยนแปลงของชั้นความเข้มข้นของสารดูดซับ	12
2-5	แสดงกระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแพคคอลัมน์	14
2-6	แสดงการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง สำหรับ N = 3 ปัจจัย ที่แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ	15
3-1	แสดงถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว	19
3-2	แสดงถ่านจากไม้ยางพารา	20
3-3	แสดง SEM Micrograph ของถ่านจากไม้ยางพารา	21
3-4	แสดงบ่อหมักก๊าซชีวภาพแบบรางจากฟาร์มแสนสุข	22
3-5	แสดงไดอะแกรมของคอลัมน์ที่ใช้กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ	24
3-6	แสดงคอลัมน์กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในการทดลอง	25
3-7	แสดงชุดอุปกรณ์กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในการทดลอง	26
3-8	แสดงการเก็บตัวอย่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ	27
3-9	แสดงอิมพิงค์เจอร์ที่บรรจุสารละลายแคดเมียมซัลไฟด์	28
3-10	แสดงวิธีการทดลอง	29
3-11	แสดงการเตรียมถ่านกัมมันต์เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	30
3-12	แสดงการฟื้นฟูสภาพโดยการนำสารดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วมาต้มด้วยน้ำเดือดแล้วจึงนำไปเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	36
3-13	แสดงการฟื้นฟูสภาพโดยการนำสารดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วมาเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยไม่ผ่านการต้ม	37
4-1	แสดงผลึกโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหลือจากการละลายในน้ำที่ความเข้มข้น 3.0-11.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร	39
4-2	แสดง Breakthrough time ที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (x_1) 6.0 ลิตรต่อนาที น้ำหนักของสารดูดซับ (x_2) 63.0 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์ (x_3) 6.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร	41

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
4-3	แสดงกราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพและน้ำหนักของสารดูดซับที่ส่งผลต่อเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ	44
4-4	แสดงกราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของสารดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ส่งผลต่อเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ	46
4-5	แสดงกราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพและความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ส่งผลต่อเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ	47
4-6	แสดงผลของอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	50
4-7	แสดงผลของน้ำหนักของสารดูดซับในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	51
4-8	แสดงผลของความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเคลือบบนถ่านกัมมันต์ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	52
4-9	แสดงผลของชนิดตัวดูดซับในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ	53
4-10	แสดงผลความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับแบบต้มไล่สารพิษก่อนนำไปเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	54
4-11	แสดงผลประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับแบบต้มไล่สารพิษก่อนเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	55
4-12	แสดงผลความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับแบบไม่ต้มไล่สารพิษก่อนเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	56
4-13	แสดงผลประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับแบบไม่ต้มไล่สารพิษก่อนเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	57
4-14	แสดงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถ่านกัมมันต์เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีการต้มและไม่ต้ม	58
4-15	แสดงคอลัมน์สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็ก	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

พลังงานถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการดำรงชีวิตของมนุษย์มาตั้งแต่สมัยโบราณ เมื่อประชากรโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องประกอบกับการพัฒนาทางด้านวิทยาการและเทคโนโลยีตลอดจนการขยายตัวทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมทำให้ความต้องการใช้พลังงานของมนุษย์มีเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จากผลการสรุปสถานการณ์พลังงานของประเทศไทยตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนกันยายน 2558 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานในช่วง 9 เดือนของปี 2558 เป็นปริมาณ 59,084 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบเพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปีก่อนร้อยละ 2.7 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) การใช้พลังงานยังคงเพิ่มขึ้นตามการเติบโตทางเศรษฐกิจแต่ปริมาณของพลังงานมีอยู่อย่างจำกัดจึงเกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงานทำให้หลายหน่วยงานรวมถึงครัวเรือนมีความพยายามในการหาพลังงานที่สะอาดและปลอดภัยเพื่อนำมาใช้ทดแทน โดยพลังงานทดแทน (Alternative energy) คือ พลังงานที่นำมาใช้แทนพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง และก๊าซธรรมชาติสามารถแบ่งตามแหล่งผลิตได้เป็น 2 ประเภท คือ พลังงานสิ้นเปลือง (Non-renewable energy) และพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) โดยพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย คือ พลังงานจากก๊าซชีวภาพ (Biogas) ซึ่งเป็นพลังงานที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้กับครัวเรือนและชุมชน (มณฑาสินี, 2555) เนื่องจากมีวิธีการผลิตก๊าซชีวภาพที่ไม่ยุ่งยากทำให้ครัวเรือนและชุมชนสามารถผลิตและนำก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์ถือเป็นเป็นการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานภายในครัวเรือนและชุมชน

ก๊าซชีวภาพเกิดจากการย่อยสลายชีวมวล (Biomass) ที่เป็นสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic bacteria) ก๊าซชีวภาพโดยทั่วไปผลิตได้จากมูลสัตว์ ของเสียจากการเกษตร บ้านเรือน และโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 50-70%ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 30-50% และก๊าซชนิดอื่นๆประมาณ 2% เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) โดยก๊าซมีเทนเป็นก๊าซเชื้อเพลิง

ชีวภาพที่เป็นองค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ ซึ่งก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเดินเครื่องยนต์ เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มหรือใช้กับตะเกียงเพื่อให้แสงสว่าง แต่จากการปนเปื้อนของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือก๊าซไข่เน่าในก๊าซชีวภาพเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ ผลผลิตของก๊าซชีวภาพจากการหมักวัตถุดิบมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นประมาณ 80-4,000 ppmv ขึ้นอยู่กับแหล่งวัตถุดิบที่นำมาหมักก๊าซชีวภาพ (Allegue et al., 2014) ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กลงโดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) ด้วยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซที่มีกลิ่นเหม็นไม่มีสี เมื่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สัมผัสกับน้ำหรือไอน้ำในอากาศจะเปลี่ยนสภาพเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่สามารถกัดกร่อนวัสดุอุปกรณ์ได้ และเมื่อเกิดการเผาไหม้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำให้เกิดตะกอนของซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะส่งผลต่อการอุดตันของอุปกรณ์ดังนั้นอุปกรณ์การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพจึงมีความจำเป็นในกรณีที่จะต้องนำก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นพลังงานทดแทน เพื่อช่วยในการลดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่จะออกมา ลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์และอันตรายต่อสุขภาพของผู้ใช้งาน

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป เช่น ระบบสครับบิง (Scrubbing) เป็นระบบที่สามารถบำบัดก๊าซมีกลิ่นที่มีความเข้มข้นสูงได้และการลงทุนก่อสร้างระบบค่อนข้างต่ำแต่จะเกิดน้ำเสียจากการใช้ระบบนี้ หรือการเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion Process) เป็นการบำบัดก๊าซมีกลิ่นโดยการเผาก๊าซเสียเพื่อออกซิไดซ์ (Oxidize) และสลายสารที่ก่อให้เกิดกลิ่น (Decompose) หรือระบบการเผาไหม้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Combustion) เป็นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ลดลงหรือระบบดูดซับ (Adsorption Process) ด้วยถ่านกัมมันต์เป็นระบบที่เหมาะกับการดูดซับก๊าซเสียที่มีความเข้มข้นของกลิ่นต่ำและเป็นระบบพื้นฐานที่ง่ายต่อการควบคุมและการบำรุงรักษา โดยถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวดูดซับสูงจึงมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการดูดซับก๊าซเสียและเป็นสารดูดซับที่มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับสารดูดซับชนิดอื่นๆ เช่น ซีโอไลท์ (Zeolites) อะลูมินา (Alumina) ซิลิกา (Silica) และถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้

จากวัตถุดิบหลายชนิดด้วยกระบวนการคาร์บอไนซ์ (Carbonization) และการกระตุ้น (Activating) ในสภาวะที่แตกต่างกันแต่ระบบดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ จึงมีการดัดแปลงถ่านกัมมันต์โดยการเคลือบด้วยสารเคมี (Chemical Impregnation) เช่น NaOH, KOH, K_2CO_3, Na_2CO_3, KI และ $KMnO_4$ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับ สารเคมีชนิด $KMnO_4$ เป็นสารออกซิไดซ์ เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว และมีราคาถูก

กระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์จะเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ โดยคอลัมน์ดูดซับที่ได้รับความนิยม คือ แพคคอลัมน์ (Packed column) เนื่องจากการสร้างและการบรรจุหรือเปลี่ยนสารดูดซับทำได้ง่ายและสามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนของสารดูดซับได้ตามต้องการ เมื่อสารดูดซับผ่านกระบวนการดูดซับแล้ว สารดูดซับจะอิ่มตัวด้วยสารถูกดูดซับ จึงต้องทำการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) เพื่อให้สามารถนำกลับไปใช้งานใหม่ได้ การฟื้นฟูสภาพทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการกระตุ้นทางเคมีหรือกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ กระบวนการกระตุ้นทำให้ถ่านกัมมันต์ที่อิ่มตัวเกิดรูพรุนสำหรับการดูดซับครั้งใหม่ กระบวนการกระตุ้นมีข้อเสีย คือ สิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจากใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นค่อนข้างสูง นอกจากนั้นยังมีกระบวนการล้างด้วยน้ำเดือด เพื่อเป็นการชะล้างสารถูกดูดซับที่อย่างกัมมันต์ หรือกระบวนการเคลือบใหม่บนถ่านกัมมันต์ด้วยสารเคมี เพื่อให้สารเคมีเกาะติดซ้ำบนผิวของถ่านกัมมันต์และสามารถนำไปใช้ในการดูดซับสารถูกดูดซับได้อีก (บุญรักษ์, 2551)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและออกแบบชุดอุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซชีวภาพชนิดแพ็คคอลัมน์ (Packed Bed Column) ด้วยกระบวนการดูดซับทางเคมีโดยใช้สารดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของชุดอุปกรณ์ ซึ่งมีเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มากที่สุดที่ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออกมีความเข้มข้นมากกว่า 200 ppmv ทำการออกแบบสภาวะการทดลองโดยคำนึงถึงความเหมาะสมกับการใช้งานในระดับครัวเรือนด้วยการใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methods, RSM) และทำการเปรียบเทียบชนิดของสารดูดซับ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์และถ่านจากไม้ยางพาราที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและศึกษาการฟื้นฟูภาพสารดูดซับกลับมาใช้ได้ใหม่ด้วยการปรับสภาพโดยทำการต้มแล้วทำการเคลือบ

ซ้ำหรือทำการเคลือบซ้ำโดยไม่ผ่านการต้มซึ่งชุดอุปกรณ์นี้จะทำให้สามารถนำก๊าซชีวภาพที่ได้ไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพที่เหมาะกับการใช้งานในระดับครัวเรือน

2) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการของชุดอุปกรณ์กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

3) เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสารดูดซับของชุดกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพให้สามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) สร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพที่เหมาะกับการใช้งานในระดับครัวเรือน

2) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของชุดกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซับทางเคมีโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ทำการศึกษา 3 ตัวแปร คือ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ น้ำหนักของสารดูดซับ และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์

3) เปรียบเทียบชนิดของสารดูดซับ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์และถ่านจากไม้ยางพาราที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

4) ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับที่ผ่านการใช้งานมาแล้วด้วย 2 กระบวนการ คือ ทำการต้มแล้วทำการเคลือบซ้ำหรือทำการเคลือบซ้ำโดยไม่ผ่านการต้ม ซึ่งแต่ละกระบวนการจะทำการฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับ 2 ครั้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1) ได้ระบบต้นแบบในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมกับการใช้งานในระดับครัวเรือน

2) ได้เรียนรู้กระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยระบบแพ็คคอลัมน์

3) ได้ก๊าซชีวภาพที่สะอาดไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ก๊าซชีวภาพ หรือ Biogas เป็นพลังงานสะอาดที่สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติหรือเกิดจากการย่อยสลายสารชีวมวล (Biomass) ที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น มูลสัตว์ ของเสียจากการเกษตร บ้านเรือน และโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Bacteria) แบคทีเรียแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methane producing bacteria) ในขั้นตอนแรกสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน จะถูกย่อยโดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กและละลายน้ำได้ จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กเป็นสารอาหาร และย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซอื่นๆเกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) (Tonkunya et al., 2013) โดยก๊าซมีเทนเป็นก๊าซเชื้อเพลิงชีวภาพที่เป็นองค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ ซึ่งก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตรให้ค่าความร้อน 21.0 เมกกะจูล และสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน เทียบเท่ากับก๊าซหุงต้ม (LPG) 0.46 กิโลกรัม น้ำมันดีเซล 0.60 ลิตร น้ำมันเตา 0.55 ลิตร พลังงานไฟฟ้า 1.2 กิโลวัตต์ชั่วโมง หรือไม้ฟืน 1.5 กิโลกรัม (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558)

ก๊าซชีวภาพมีประโยชน์ในด้านการอนุรักษ์พลังงานโดยการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันเบนซินหรือดีเซลในการเดินเครื่องยนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า สูบน้ำ หรือใช้กับเครื่องกกลูกสุกร ใช้กับอุปกรณ์ที่ต้องการความร้อนจากเชื้อเพลิงอย่างเครื่องยนต์ระบายอากาศในฟาร์มสุกร ใช้เป็นเชื้อเพลิงในตะเกียงเพื่อให้แสงสว่าง ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มแทนก๊าซแอลพีจี กากที่ผ่านการย่อยสลายแล้วสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ในสภาพปุ๋ยน้ำและปุ๋ยเม็ดเพื่อการปรับปรุงบำรุงดิน เป็นต้น และในการผลิตก๊าซชีวภาพยังเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม คือ เป็นการช่วยลดอัตราการเกิดภาวะเรือนกระจกจากการลดปริมาณการปล่อย

ก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศและเป็นการจัดการของเสียจากแหล่งต่างๆไม่ทำให้เป็นเกิดเป็นมลพิษด้วย การลดการปนเปื้อนของสารอินทรีย์เป็นการลดปัญหากลิ่นและแมลงเพื่อเป็นทำลายแหล่งเพาะพันธุ์และป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรค

2.2 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide, H_2S)

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นหนึ่งในสารประกอบที่ได้จากธาตุซัลเฟอร์มีคุณสมบัติเป็นก๊าซพิษชนิดหนึ่งที่มีฤทธิ์เป็นกรด ไม่มีสี และมีกลิ่นเหม็นคล้ายไข่เน่า จึงถูกเรียกว่าก๊าซไข่เน่า โดยมีสูตรโมเลกุล คือ H_2S มีน้ำหนักโมเลกุล 34.04 ความหนาแน่นของก๊าซ 1.21 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ 1 บรรยากาศ ซึ่งมีน้ำหนักมากกว่าอากาศทำให้เมื่อมีการรั่วก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะอยู่ต่ำกว่าอากาศ ทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เป็นก๊าซที่มีความว่องไวในการลุกติดไฟได้ง่ายมากและเกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงโดยมีอุณหภูมิที่สามารถลุกติดไฟได้เองอยู่ที่อุณหภูมิ 290 องศาเซลเซียส (ศูนย์ข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์, 2544)

ในการผลิตก๊าซชีวภาพทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่มีความเข้มข้นประมาณ 80-4,000 ppmv ขึ้นอยู่กับแหล่งวัตถุดิบที่นำมาหมักก๊าซชีวภาพ (Allegue et al., 2014) ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis) แบบไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้อากาศโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria: SRB) แบคทีเรียจะทำหน้าที่ดึงก๊าซออกซิเจนจากสารประกอบซัลเฟต (SO_4^{2-}) ทำให้ซัลไฟต์ที่อยู่ในรูปของซัลเฟตเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ สามารถแสดงดังสมการ (2-1)

$$\begin{aligned} SO_4^{2-} + \text{Organic matter} &\longrightarrow S_2^{-} + H_2O + CO_2 \\ S_2^{-} + H^{+} &\longrightarrow HS^{-} \\ HS^{-} + H^{+} &\longrightarrow H_2S \end{aligned} \qquad (2\text{-}1)$$

เมื่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพสัมผัสกับความชื้นหรือไอน้ำในอากาศเกิดปฏิกิริยาจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนเกิดเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) แสดงได้ดังสมการที่ (2-2) ซึ่งมีความสามารถในการกัดกร่อนสูงส่งผลต่ออุปกรณ์ที่มีองค์ประกอบของเหล็กหรือโลหะ เช่น เกิดการกัดกร่อนและเกิดคราบตะกรันที่ลูกสูบของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายและเป็นอันตรายต่อการใช้งาน สามารถแสดงดัง

ภาพประกอบที่ 2-1 และหากก๊าซชีวภาพเกิดการรั่วทำให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

$$H_2S + 2O_2 \longrightarrow H_2SO_4 \qquad (2\text{-}2)$$

ภาพประกอบที่ 2-1 อุปกรณ์ที่ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพกัดกร่อน

2.3 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

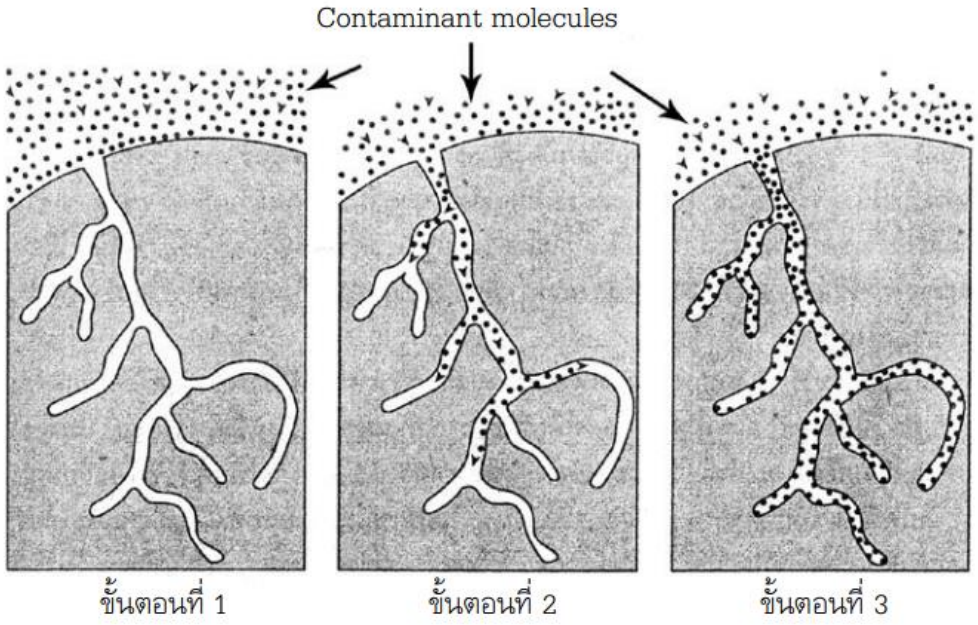
การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่โมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ไปจับกับผิวของวัตถุของแข็งที่ใช้เป็นตัวดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) โดยอาศัยหลักการความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ โดยสารดูดซับมักเป็นของแข็งที่มีลักษณะรูพรุน สารดูดซับที่นิยมใช้มีหลายชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซิลิกาเจล (Silica Gel) แอคติเวทเตดอะลูมินา (Activated Alumina) ซีโอไลต์ (Zeolites) เศษวัสดุทางการเกษตร เป็นต้น สารดูดซับแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกัน เช่น ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) ค่าเมทิลีนบลู (Methylene Blue) ความหนาแน่น (Apparent Densitry) ปริมาณเถ้า (Ash Content) ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์ (Particle Size Distribution) เป็นต้น ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณของพื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน ลักษณะการกระจายของรูพรุน และเมื่อสารดูดซับอิ่มตัวไปด้วยสารถูกดูดซับจะต้องทำการนำสารถูกดูดซับออกเพื่อทำให้สารดูดซับมีพื้นที่ว่างสำหรับการดูดซับครั้งใหม่ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ (Regeneration) (ปรารถนา, 2551)

กลไกการดูดซับ (จักรกฤษณ์, 2552) กระบวนการดูดซับเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 2-2

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแพร่ของโมเลกุลของก๊าซที่ต้องการบำบัดไปยังผิวภายนอกของสารดูดซับ เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของก๊าซที่ต้องการดูดซับกับความเข้มข้นที่ผิวของสารดูดซับ ทำให้โมเลกุลของก๊าซไหลจากที่ความเข้มข้นมากกว่าไปยังผิวของสารดูดซับซึ่งเข้มข้นน้อยกว่า

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของก๊าซเข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นในรูพรุนส่วนนี้ การเคลื่อนที่นี้ขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนของสารดูดซับ ในช่วงแรกขณะที่รูพรุน มีขนาดใหญ่ ก๊าซจะเคลื่อนที่โดยการแพร่แบบเป็นกลุ่มก้อน (Bulk Diffusion) และการชนที่เกิดขึ้นเป็นการชนกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซ เมื่อขนาดของรูพรุนเล็กลง การเคลื่อนที่ จะเปลี่ยนเป็นการแพร่แบบผิว (Surface Diffusion) การชนที่เกิดขึ้นเป็นการชนระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับผิวในรูพรุนของสารดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 โมเลกุลของก๊าซจะติดที่ผิวภายในรูพรุนของสารดูดซับ โดยเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ



ภาพประกอบที่ 2-2 กลไกการดูดซับ

ลักษณะของการดูดซับ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี จะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ โดยการดูดซับทางกายภาพจะใช้แรงดึงดูดที่ค่อนข้างอ่อนแต่การดูดซับทางเคมีจะใช้แรงดึงดูดที่แข็งแรง โดยความแตกต่างของการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 2-1

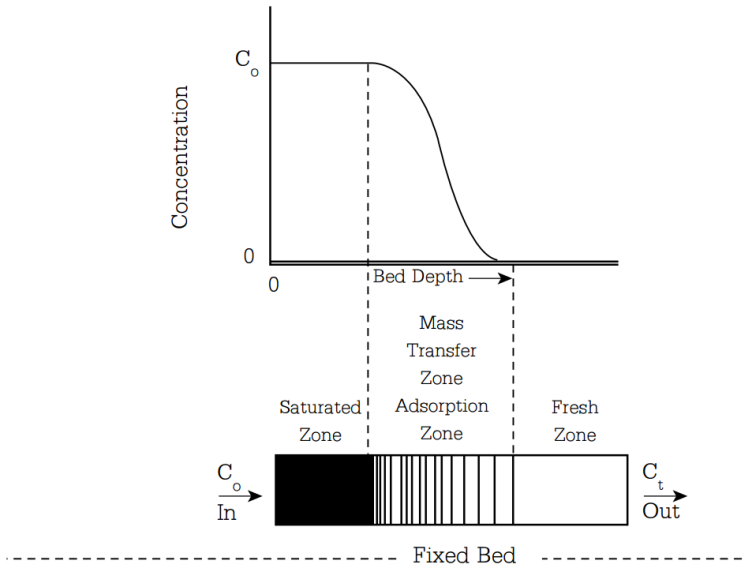
ตารางที่ 2-1 ความแตกต่างของการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)	การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)
โมเลกุลของก๊าซซึ่งเป็นสารถูกดูดซับติดอยู่กับผิวของสารดูดซับด้วยแรงดึงดูดที่ค่อนข้างอ่อน เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์	โมเลกุลของก๊าซซึ่งเป็นสารถูกดูดซับติดอยู่กับผิวของสารดูดซับด้วยการเกิดพันธะเคมี
เกิดการคายซับได้ง่าย	เกิดการคายซับได้ยาก
ไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีของสารถูกดูดซับ	เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ทำให้กระบวนการดูดซับสามารถผันกลับได้
โมเลกุลของก๊าซที่ไปจับกับสารดูดซับเรียงตัวกันแบบชั้นเดียว (Monolayer) หรือหลายชั้น (Multilayer)	โมเลกุลของก๊าซเรียงตัวบนสารดูดซับได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer)
	อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพิ่มตามอุณหภูมิ

การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับโมเลกุลของสารดูดซับ เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับ โดยการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมของสารถูกดูดซับ แล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งถูกยึดติดกับผิวของสารดูดซับด้วยพันธะทางเคมีทำให้กระบวนการดูดซับสามารถผันกลับได้ (Reversible Reaction) แต่การกำจัดสารถูกดูดซับออกจากผิวของตัวดูดซับหรือการคายซับ (Desorption) สามารถทำได้ยาก และโมเลกุลของสารถูกดูดซับสามารถเรียงตัวบนสารดูดซับได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer) เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีจะหยุดลงเมื่อผิวของสารดูดซับถูกทำปฏิกิริยาโดยทั่วถึงแล้ว

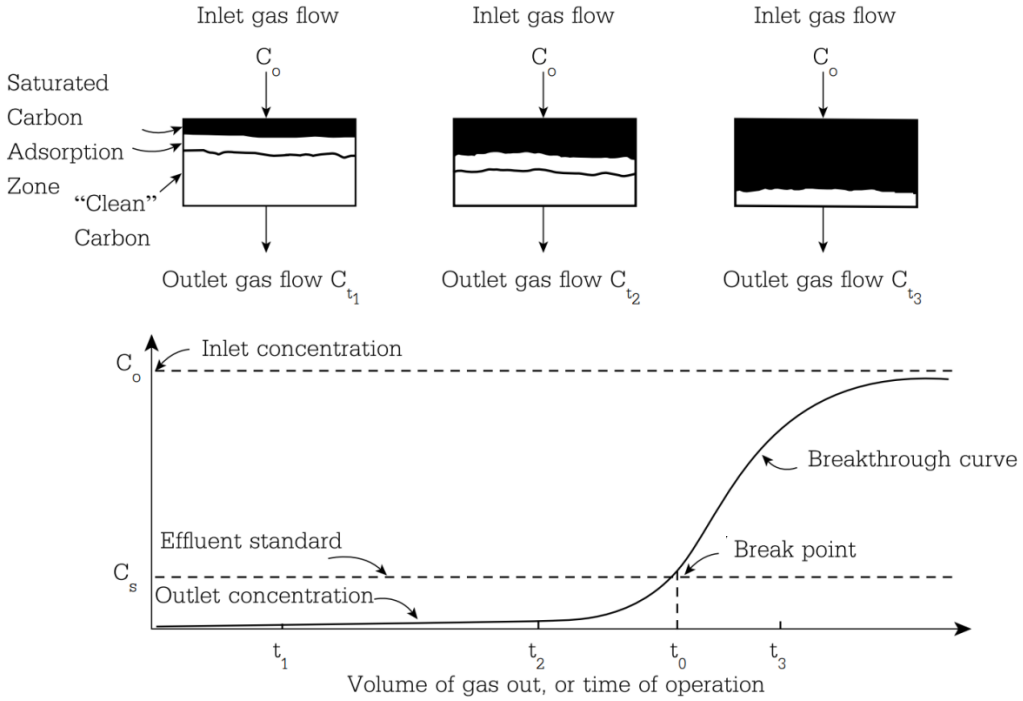
2.4 ความสามารถในการดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับมีผลมาจากความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ จากภาพประกอบที่ 2-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารดูดซับภายในคอลัมน์ โดยกระแสอากาศที่มีการปนเปื้อนของก๊าซพิษเข้าสู่คอลัมน์ทางด้านซ้ายมือและเกิดการดูดซับทำให้กระแสอากาศที่สะอาดออกจากคอลัมน์ทางด้านขวามือ จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของก๊าซพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในกระแสอากาศจะสูงสุดทางซ้ายมือแล้วค่อยๆ ลดลงไปทางขวามือ โดยส่วนที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับจากศูนย์ไปยังจุดอิ่มตัว เรียกว่า บริเวณถ่ายโอนมวลสาร (Mass Transfer Zone : MTZ) ซึ่งเป็นส่วนที่สารดูดซับกำลังเกิดปฏิกิริยาดูดซับ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องผ่านตัวกลาง จากค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่จุดเริ่มต้นของบริเวณถ่ายโอนมวลสารไปยังความเข้มข้นสูงสุด



ภาพประกอบที่ 2-3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นภายในคอลัมน์ของสารดูดซับ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ออกจากสารดูดซับกับเวลาสามารถแสดงเป็นกราฟเบรคทรู (Breakthrough Curve) โดยทำการพล็อตระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้น C/C_0 กับเวลาในการดูดซับ เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในกระแสอากาศ และ C คือ ความเข้มข้นของก๊าซพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในกระแสอากาศที่เวลาใดเวลาหนึ่งในคอลัมน์แสดงดังภาพประกอบที่ 2-4



ภาพประกอบที่ 2-4 การเปลี่ยนแปลงชั้นความเข้มข้นของสารดูดซับ

เมื่อกระแสอากาศที่ไหลออกมีความเข้มข้นของมลพิษสูงหรือเมื่อสารดูดซับเกิดการอิ่มตัว ทำให้การดูดซับเริ่มลดลง สารดูดซับควรได้รับการฟื้นสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

2.5 การฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ

การฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ (Regeneration) เป็นการทำให้ผิวของสารดูดซับมีพื้นที่ว่างสำหรับการดูดซับใหม่ โดยทำการไล่สารที่ถูกดูดซับ คือ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากสารดูดซับที่อิ่มตัวหรือถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต การฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์สามารถทำได้โดยการล้างด้วยน้ำร้อนหรือน้ำเย็น หรือการผ่านทางกรรมวิธีทางความร้อน แต่ความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังจากการฟื้นฟูมักจะลดลง เนื่องจากธาตุซัลเฟอร์มีพันธะที่แข็งแรงกับถ่านกัมมันต์ โดยการฟื้นสภาพสารดูดซับสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ สามารถกำจัดสารถูกดูดซับออกจากรูพรุนของโครงสร้างคาร์บอนได้ 100% ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซพิษสามารถกำจัดได้อย่างน้อย 30% หรือการใช้น้ำเย็นไหลผ่านเพื่อล้างสารที่เกาะบนถ่านกัมมันต์ แต่พบว่าการใช้อากาศร้อนได้ผลการฟื้นฟูที่ดีกว่าการใช้น้ำเย็นไหลผ่าน (Bagreev et al., 2001)

2.6 ปฏิกิริยาของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์กับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium Permanganate, $KMnO_4$) หรือด่างทับทิม เป็นสารเคมีที่สามารถหาได้ง่าย และมีราคาไม่แพง ถือเป็นเกลือชนิดหนึ่งซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่างอ่อน และมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิเดชัน (Oxidation) ที่รุนแรง มีลักษณะเป็นผลึกหรือเกล็ดสีม่วง สามารถละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำแล้วจะได้สารละลายสีม่วงหรือสีชมพูอมม่วง ขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้น ซึ่งมีประโยชน์ในหลายด้าน เช่น ในครัวเรือนนิยมนำมาล้างและแช่ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ประเภทต่างๆ เพื่อฆ่าเชื้อโรคและสารเคมีตกค้าง และมีการนำมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมด้วย โดยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เนื่องจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) เมื่อละลายน้ำจะเกิดการแตกตัวให้เปอร์แมงกาเนต (MnO_4^-) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) ซึ่ง MnO_4^- และ K^+ จะถูกดูดติดผิวถ่านกัมมันต์จนอิ่มตัวทำให้พื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีทั้งประจุบวกและประจุลบ จึงสามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพได้

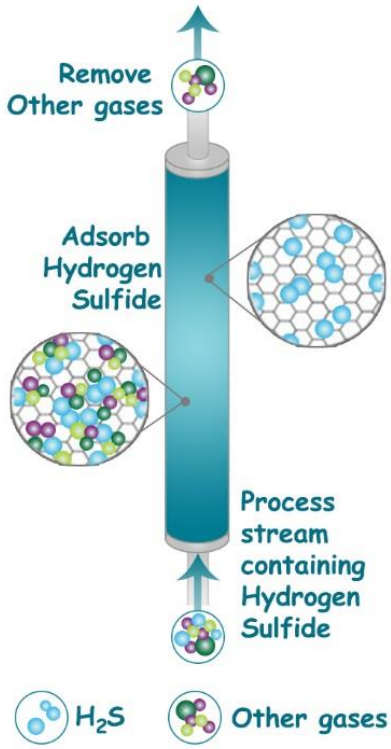
โดยปฏิกิริยาทางเคมีของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพแสดงดังสมการ (2-3) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาข้างต้น คือ ซัลเฟอร์ (S) น้ำ (H_2O) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) โดยผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเป็นของแข็งเกาะติดอยู่ที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ยกเว้นน้ำที่อยู่ในรูปของของเหลว

$$3H_2S + 2KMnO_4 \longrightarrow 3S + 2H_2O + 2KOH + 2MnO_2 \qquad (2\text{-}3)$$

2.7 แพคคอลัมน์ (Packed Column)

แพคคอลัมน์ (Packed Column) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้สารถูกดูดซับ คือ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้สัมผัสกับสารดูดซับ โดยสารดูดซับมักเป็นของแข็งที่มีลักษณะรูพรุน คือ ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพื่อทำการถ่ายโอนมวลสาร สามารถแสดงกระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแพคคอลัมน์ในภาพประกอบที่ 2-5 โดยก๊าซชีวภาพที่มีการปนเปื้อนของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะไหลเข้าทางด้านล่างและก๊าซชีวภาพที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลออกทางด้านบนของคอลัมน์ ภายในแพคคอลัมน์บรรจุด้วยวัสดุดูดซับหรือแพคเบด (Packed Bed) โดยถูกรองรับด้วยตะแกรงรองสารดูดซับ (Packing Support) ซึ่งทำ

หน้าที่เป็นตัวกระจายก๊าซ (Gas Distributor) ด้วย หากชั้นดูดซับมีความหนาน้อยจะทำให้การสูญเสียความดันในคอลัมน์ต่ำ ทำการออกแบบแพคคอลัมน์โดยคำนึงถึงการใช้งานในระดับครัวเรือน เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมของแพคขอลัมน์สำหรับการใช้งาน



ภาพประกอบที่ 2-5 กระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแพคคอลัมน์

2.8 วิธีการและการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methods, RSM)

RSM เป็นการนำวิธีการทางคณิตศาสตร์และเทคนิคทางสถิติมาศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สนใจ โดยนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองละวิเคราะห์ปัญหาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการ (Output Variable) ซึ่งเป็นผลมาจากหลายตัวแปรอิสระ (Input Variable) ข้อดีของ RSM คือ จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบโดยใช้ RSM จะมีปริมาณน้อยกว่าการออกแบบโดยทั่วไป เนื่องจาก RSM จะนำเสนอผลการทดลองจำนวนมากจากการทดลองเพียงไม่กี่ครั้งและผลการทดลองจะถูกสร้างในรูปพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) โดยความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับตัวแปรอิสระสามารถแสดงได้ดังสมการ (2-4)

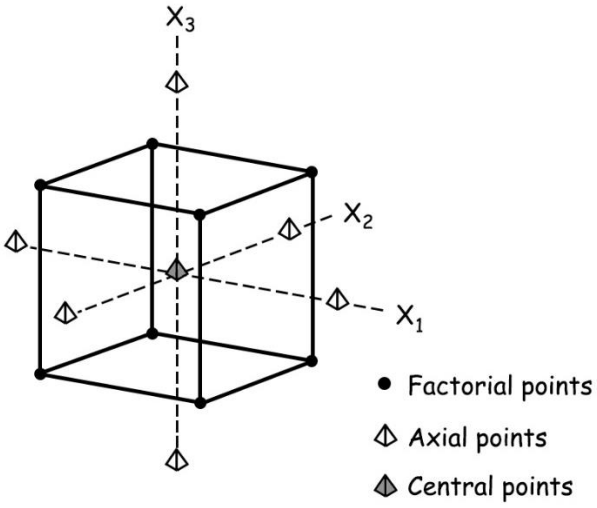
$$y = f(x_1, x_2, \ldots, x_n) + \varepsilon \qquad (2\text{-}4)$$

เมื่อ y = ผลตอบสนอง

x = ตัวแปรอิสระ

ε = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอก

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) เป็นการออกแบบการทดลองสำหรับฟิตแบบจำลองกำลังสอง (Second – order model) โดยอาศัยค่ากลางของข้อมูลจากระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองสูงสุด โดยใช้การกระจายระดับข้อมูลออกจากศูนย์กลาง ซึ่งเป็นการขยายการออกแบบ 2^N Factorial Design คือ เป็นการออกแบบการทดลองกรณีมีปัจจัย N ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น 2^N ข้อมูล ภาพประกอบที่ 2-6 แสดงการออกแบบการทดลองแบบ CCD สำหรับ N = 3 ปัจจัย ที่แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ



ภาพประกอบที่ 2-6 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง สำหรับ N = 3 ปัจจัย ที่แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

Shang และคณะ (2013) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านชาร์ซึ่งเป็นถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้แบบไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก (น้อยกว่า 700 องศาเซลเซียส) จากเศษวัสดุทางการเกษตร 3 ชนิด คือ การบูร แกลบ และไม้ไผ่ ที่นำมาทำการล้างและอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วบดให้มีขนาด 0.3-0.4 มิลลิเมตร และทำการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสในภาชนะปิด ภายใต้ปริมาณออกซิเจนที่จำกัดของบรรยากาศ โดยมีอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในการศึกษาทำการทดลองโดยใช้ถ่านชาร์เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวเป็น 850 ตารางเมตรต่อกรัม และความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็น 35.6 มิลลิกรัมต่อกรัม จากการศึกษาพบว่าถ่านชาร์จากแกลบ ถ่านชาร์จากไม้ไผ่ และถ่านชาร์จากการบูรมีพื้นที่ผิวเป็น 115.34, 58.01 และ 20.35 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์พบว่าถ่านชาร์จากแกลบ ถ่านชาร์จากไม้ไผ่ และถ่านชาร์จากการบูร สามารถดูดซับได้ 382.7, 336.7 และ 109.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังนั้น ถ่านชาร์จากแกลบสามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากที่สุด

เจษฎาและคณะ (2556) ศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพของบ้านห้วยบงโดยใช้เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่เป็นของเสียมีลักษณะผงสีส้มบรรจุ 1 กิโลกรัมลงในคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 70 เซนติเมตร และสามารถฟื้นฟูสารดูดซับจากองค์ประกอบ Fe_2S_3 ให้กลับมาเป็น Fe_2O_3 ได้ตามเดิมโดยการเปิดให้อากาศ (O_2) ผ่านระบบ นำไปทดสอบกับระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 8 ลูกบาศก์เมตร ที่มีวัตถุดิบการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนเข้าระบบเป็น 210 ppmv เมื่อผ่านชุดกำจัดแล้วปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออกของระบบเป็น 0 ppmv และนำไปทดสอบกับระบบก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักแป้งข้าวแคบ จากปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนเข้าระบบเป็น 3,570 ppmv เมื่อผ่านชุดกำจัดแล้วปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออกของระบบเป็น 20 ppmv จากการทดลองพบว่ามีค่าเฉลี่ยการกำจัดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ระหว่าง 95.23-99.43% ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าการกำจัดด้วยสนิมจากฝอยเหล็กที่มีประสิทธิภาพการกำจัดที่ 50.00-69.00%

วงศ์วิวรรธและคณะ (2555) ศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้วัสดุดูดซับ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ขี้กลึงเหล็กปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ขี้กลึงเหล็กไม่ปรับสภาพ และถ่านกัมมันต์ร่วมกับขี้กลึงเหล็กไม่ปรับสภาพ ในคอลัมน์เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร โดยบรรจุสารดูดซับสูง 10 เซนติเมตร และทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Biogas Analyzer ที่อัตราการไหล 340 มิลลิลิตรต่อนาที โดยวิเคราะห์แบบต่อเนื่อง จากการศึกษาพบว่าขี้กลึงเหล็กไม่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุด รองลงมาคือถ่านกัมมันต์ร่วมกับขี้กลึงเหล็กไม่ปรับสภาพถ่านกัมมันต์ และขี้กลึงเหล็กปรับสภาพ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 70.22, 43.61, 29.72 และ 15.37% ตามลำดับ และ Breakthrough Point ที่ระยะเวลา 140, 215, 95 และ120 นาที ตามลำดับ และปริมาณการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อปริมาตรวัสดุดูดซับเท่ากับ 2,249.68, 1,418.69, 338.34 และ 438.69 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

2.9.2 การดูดซับทางเคมี

Guo และคณะ (2007) ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มที่มีขนาด 1-2 มิลลิเมตร ทำการศึกษา 3 การทดลอง โดยทำการเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่ทำการแอกติเวทด้วยไอน้ำ มีพื้นที่ผิวเป็น 1,183 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 53 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยในการทดลองที่ 1 ใช้กะลาปาล์มทำการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากการศึกษาพบว่ามีพื้นที่ผิวเป็น 1,062 ตารางเมตรต่อกรัม และสามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 46 มิลลิกรัมต่อกรัม และในการทดลองที่ 2 ใช้กะลาปาล์ม 10 กรัม เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 30% จากนั้นทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 973 เคลวิน จากการศึกษาพบว่ามีพื้นที่ผิวเป็น 1,148 ตารางเมตรต่อกรัม และสามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 68 มิลลิกรัม/กรัม และในการทดลองที่ 3 ใช้กะลาปาล์ม 10 กรัม ทำการเคลือบด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 40 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 973 เคลวิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่ามีพื้นที่ผิวเป็น 1,014 ตารางเมตรต่อกรัมและสามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 76 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้น กะลาปาล์มที่ทำการเคลือบด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกแล้วทำการแอกติเวทด้วยไอน้ำสามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากที่สุด

Xiao และคณะ (2008) ศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านที่เคลือบด้วยโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 6% โดยจุ่มถ่านที่มีลักษณะเป็นเม็ดมีขนาดประมาณ 0.55-0.83 มิลลิเมตร ลงในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อทำการกำจัดน้ำให้หมด เนื่องจากมีการศึกษาผลของความชื้นต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากการศึกษาพบว่าถ่านมีพื้นที่ผิวเป็น 732 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรของรูพรุนชั้นในเป็น 0.23 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเป็น 0.42 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และถ่านที่เคลือบด้วยโซเดียมคาร์บอเนตมีพื้นที่ผิวเป็น 715 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรของรูพรุนชั้นในเป็น 0.22 ลูกบาศก์เซนติเมตรกรัม และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเป็น 0.41 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และจากการศึกษาการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์พบว่าการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบรรยากาศด้วยถ่าน และถ่านที่เคลือบด้วยโซเดียมคาร์บอเนตเป็น 140 และ 407 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยจากผลการศึกษาที่ความชื้นมีค่าแตกต่างกันทำให้พบว่าเมื่อความชื้นลดลงความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านและถ่านที่อิมเพรกเนตจะลดลงตามไปด้วย แสดงว่าความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แปรผันตามค่าความชื้น

Sitthikhankaew และคณะ (2011) ศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ถ่านกัมมันต์ที่มีการกระตุ้นซ้ำด้วยก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์. (KOH) โดยจุ่มถ่านกัมมันต์ลงในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์. (KOH) ความเข้มข้น 7% โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 30 นาที แล้วอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำ และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นซ้ำด้วยไอน้ำแล้วทำการเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จากการศึกษาพบว่ามีพื้นที่ผิวเป็น 1,343, 1,621, 1,037 และ 1,336 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยสามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 13.76, 27.58, 39.53 และ 84.75 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นซ้ำด้วยไอน้ำแล้วทำการเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากที่สุด

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซับทางเคมี โดยมีวัสดุ วัตถุดิบ สารเคมี และวิธีการวิจัยของแต่ละตอน ดังนี้

3.1 วัสดุ

วัสดุที่นำมาใช้เป็นสารดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ มีลักษณะเป็นของแข็งที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวดูดซับสูง ได้แก่

3.1.1 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเป็นผลิตภัณฑ์ของคาร์บอนมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำอยู่ในรูปเม็ด โครงสร้างมีรูพรุนขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวดูดซับสูง จึงมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการดูดซับก๊าซเสีย ตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากบริษัท มาซูม่า (ประเทศไทย) จำกัด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-1 และคุณสมบัติทางกายภาพแสดงในตารางที่ 3-1

ภาพประกอบที่ 3-1 ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ของบริษัท มาซูม่า (ประเทศไทย) จำกัด

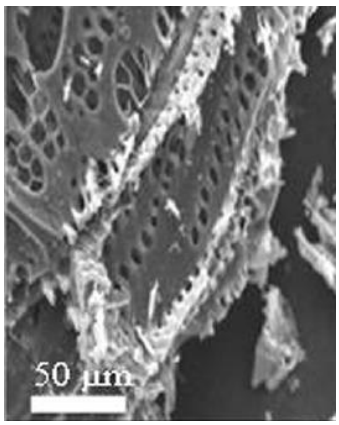
Physical Properties	Specification
Particle Size Distribution : +8 (2.36 mm)	Max 5%
(ASTM MESH/MM) 8*16 (2.36-1.18 mm)	Min 90%
(ASTM MESH/MM.) -16 (1.18 mm)	Max 5%
Apparent Density	Min 0.48 g/cc
Moisture (As Packed)	Max 8 %w/w
Ash (As Packed)	Max 3.5 %w/w
pH	9-11
Surface Area (BET)	Min 1,100 m^2/g
Iodine Number (AWWA B604)	Min 1,050 mg/g
Carbon Tetrachloride Adsorption (ASTM 3467-88)	Min 50 %w/w
Hardness Number (ASTM 3802-79)	Min 98%

3.1.2 ถ่านจากไม้ยางพารา

ถ่านจากไม้ยางพาราเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันของบริษัท แปลน อีโคเอ็นเนอร์ยี่ จำกัด ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กที่มีกำลังผลิตไฟฟ้า 5 เมกะวัตต์ ตั้งอยู่ที่ตำบลในควน อำเภอย่านตาขาว จังหวัดตรัง ตัวอย่างถ่านจากไม้ยางพารามีขนาดประมาณ 0.3-1.0 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-2

ภาพประกอบที่ 3-2 ถ่านจากไม้ยางพารา

พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของถ่านจากไม้ยางพารา วิเคราะห์ด้วย BET Surface Area โดย Shaaban ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนของถ่านจากไม้ยางพารา พบว่าถ่านจากไม้ยางพาราที่มีการให้ความร้อน 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 5.49 ตารางเมตรต่อกรัม (Shaaban, 2014) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-3



ภาพประกอบที่ 3-3 SEM Micrograph ของถ่านจากไม้ยางพารา

3.2 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายมูลสุกรจากฟาร์มแสนสุขเป็นฟาร์มขนาดเล็ก (มีจำนวนสุกรไม่เกิน 500 ตัว) ตั้งอยู่ที่ตำบลทุ่งหวัง อำเภอทุ่งหวัง จังหวัดสงขลา ในการผลิตก๊าซชีวภาพใช้บ่อหมักแบบราง (Plug Flow Anaerobic Digester) แสดงในภาพประกอบที่ 3-4 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เป็นก๊าซชีวภาพที่มีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1,000-1,500 ppmv โดยสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันเบนซินในการเดินเครื่องยนต์เพื่อใช้กับเครื่องกกลูกสุกร ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มแทนก๊าซแอลพีจี และกากที่ผ่านการย่อยสลายแล้วสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยเม็ดอินทรีย์เพื่อการปรับปรุงบำรุงดิน

ภาพประกอบที่ 3-4 บ่อหมักก๊าซชีวภาพแบบรางจากฟาร์มแสนสุข

3.3 สารเคมี

3.3.1 สารเคมีสำหรับเตรียมและวิเคราะห์สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

1) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (99%, commercial grade, ChangshaYonta Co Ltd., Chaina)

2) โซเดียมออกซาเลต (Ajax Finechem Pty Ltd., Australia)

3) กรดซัลฟูริกเข้มข้น (95%, commercial grade, Merck)

3.3.2 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์

1) สารละลายแคดเมียมซัลเฟต (Ajax Finechem Pty Ltd., Australia)

2) สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (Ajax Finechem Pty Ltd., Australia)

3) สารละลายไอโอดีน (Ajax Finechem Pty Ltd., Australia)

4) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (37%w/w, commercial grade, Merck)

5) แป้ง (Ajax Finechem Pty Ltd., Australia)

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.4.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมและศึกษาช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

1) ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 มิลลิลิตร
2) ขวดแก้วสีอำพันที่มีจุกแก้วปิดสนิท
3) เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate)
4) โถดูดความชื้น (Desiccator)
5) ปิเปต (Pipette) ขนาด 5 มิลลิลิตร
6) เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
7) บิวเรต (Burette) ขนาด 10 มิลลิลิตร
8) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
9) แท่งแก้วคนสาร (Stirring Rod)

3.4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

1) ปั๊มเก็บอากาศ (Air sampling pump) ยี่ห้อ Hailea รุ่น ACO-208 มีกำลังไฟ 25 w
2) อิมพิงเจอร์ (Impingers)
3) บิวเรต (Burette) ขนาด 50 มิลลิลิตร
4) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
5) ปิเปต (Pipette) ขนาด 5, 10 และ 25 มิลลิลิตร
6) นาฬิกาจับเวลา
7) สายยางซิลิโคน
8) ขวดเก็บตัวอย่าง 150 มิลลิลิตร

3.4.3 อุปกรณ์ที่สำหรับกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพและการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ

1) คอลัมน์ทรงกระบอกทำจากท่อพลาสติกพีวีซีใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 50 มิลลิเมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร และความสูง 50 เซนติเมตร
2) ปั๊มดูดก๊าซชีวภาพ (Air sampling pump) ยี่ห้อ Hailea รุ่น ACO-009 มีกำลังไฟ 120 วัตต์

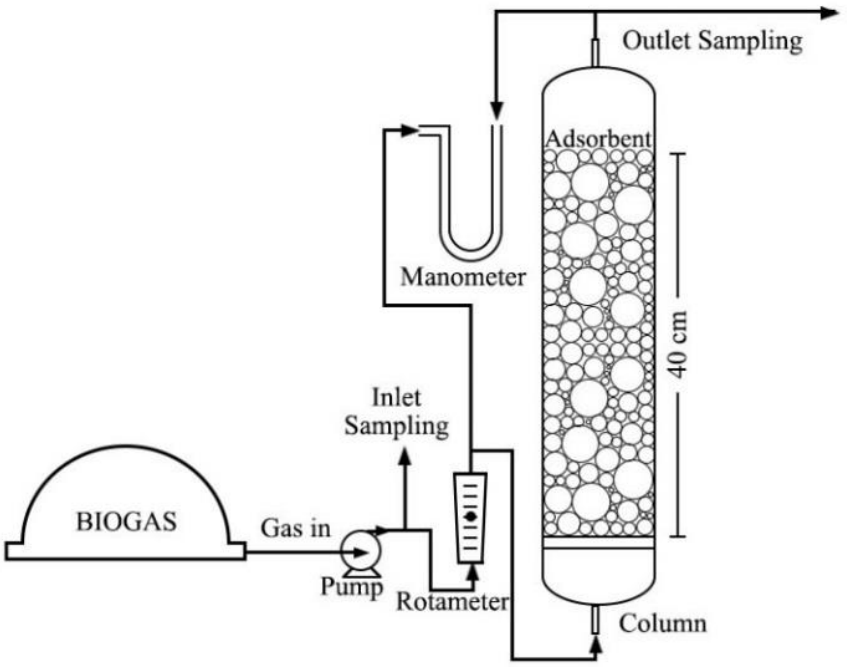
3) โรตามิเตอร์ (Rotameter) ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ

4) มานอมิเตอร์ (Manometer) มีลักษณะเป็นหลอดแก้วรูปตัวยู เป็นเครื่องมือวัดความดันที่ทางเข้าและทางออกของก๊าซชีวภาพ เพื่อทราบค่าความดันลดของระบบ

5) วาล์ว ข้อต่อชนิดหัวปลาไหลและหางปลาไหล ข้อต่อสามทาง และสายยาง

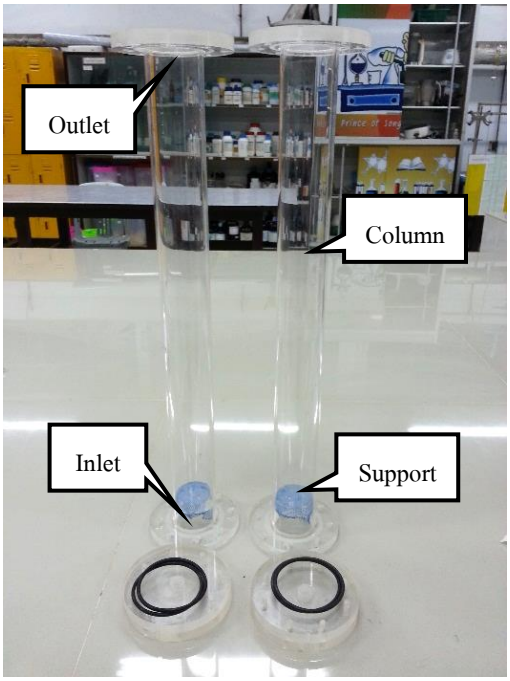
3.5 ชุดอุปกรณ์กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพใช้ชุดอุปกรณ์ชนิดแพคคอลัมน์ (Packed column) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้สารถูกดูดซับ คือ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพได้สัมผัสกับสารดูดซับ คือ ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เพื่อทำการถ่ายโอนมวลสาร ทำการออกแบบชุดอุปกรณ์กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพโดยคำนึงถึงการใช้งานในครัวเรือน ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องด้วยระบบต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ แสดงในภาพประกอบที่ 3-5

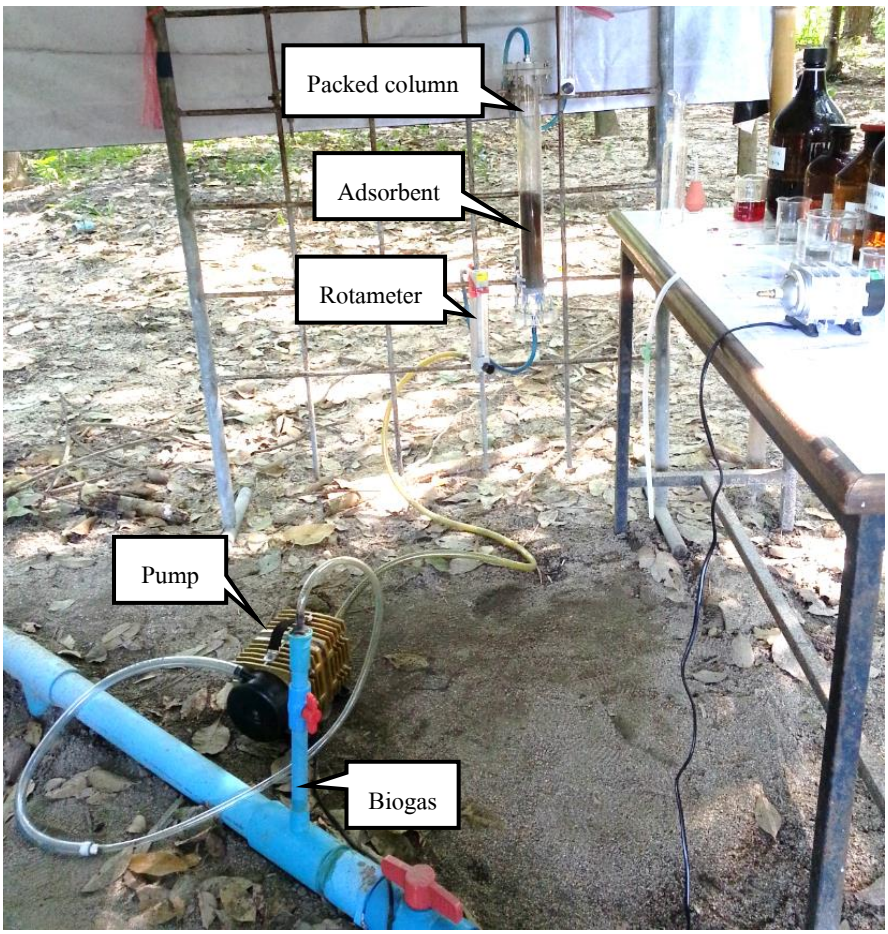


ภาพประกอบที่ 3-5 ไดอะแกรมของคอลัมน์ที่ใช้กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพจากบ่อหมักของเสียจากฟาร์มสุกรจะไหลเข้าสู่ชุดอุปกรณ์กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยการใช้ปั๊มช่วยดูดก๊าซชีวภาพผ่านเข้าโรตามิเตอร์เพื่อวัดอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่จะเข้าสู่คอลัมน์ทางด้านล่าง ซึ่งคอลัมน์ทำมาจากท่อพีวีซีใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 5.0 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4.4 เซนติเมตร ความสูง 50.0 เซนติเมตร และความสูงในการบรรจุสารดูดซับ 40.0 เซนติเมตร ส่วนล่างของคอลัมน์ติดตั้งตะแกรงที่ความสูง 10.0 เซนติเมตร แสดงดังภาพประกอบที่ 3-6 เพื่อใช้เป็นตัวรองรับน้ำหนักของสารดูดซับ คือ ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบรรจุด้วยในคอลัมน์เพื่อกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซับทางเคมี ก๊าซชีวภาพที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วจะออกทางด้านบนของคอลัมน์ โดยทำการเก็บตัวอย่างก๊าซก่อนเข้าชุดทดลองและหลังจากได้รับการบำบัด นำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำให้ทราบถึงเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ หลังจากนั้นทำการวัดความดันลด (Pressure Drop) ด้วยมานอมิเตอร์ โดยนำมานอมิเตอร์มาวัดความดันที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์ สามารถแสดงชุดอุปกรณ์กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในการทดลองดังภาพประกอบที่ 3-7



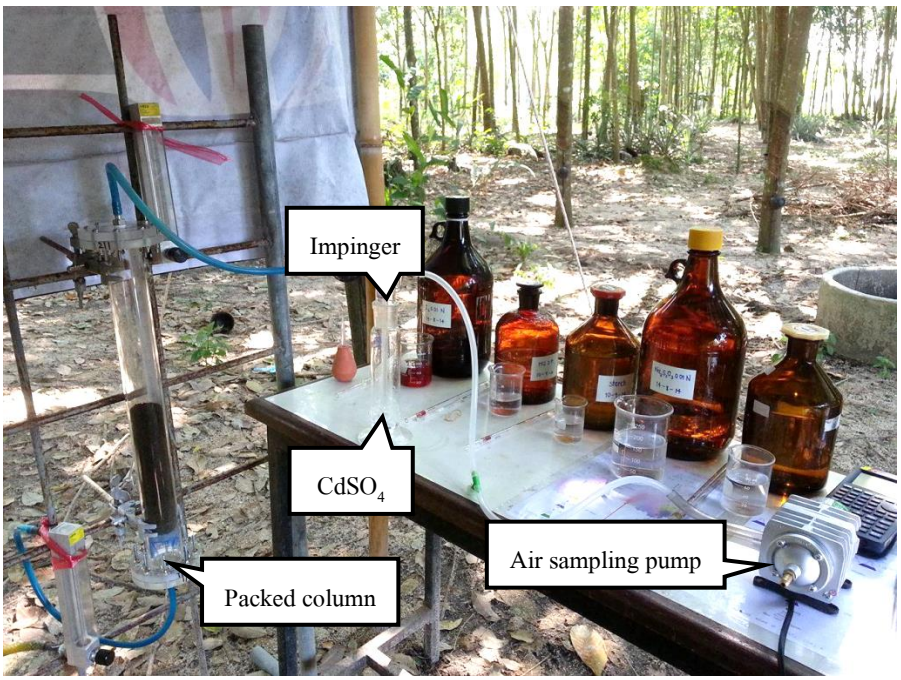
ภาพประกอบที่ 3-6 คอลัมน์กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในการทดลอง



ภาพประกอบที่ 3-7 ชุดอุปกรณ์กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในการทดลอง

3.6 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

การเก็บตัวอย่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพที่ก่อนเข้าชุดทดลองและหลังจากได้รับการบำบัดที่ทางออกของชุดทดลองโดยการดักก๊าซด้วยของเหลวในอิมพิงเจอร์ ทำการเก็บตัวอย่างด้วยการต่อสายยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 13.0 มิลลิเมตรเข้าที่ทางเข้าของอิมพิงค์เจอร์ ก่อนเข้าอิมพิงค์เจอร์ก๊าซตัวอย่างจะผ่านวาล์วเพื่อควบคุมอัตราการไหลให้เป็น 0.5 ลิตรต่อนาที ผ่านหัวกระจายก๊าซเพื่อทำให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สัมผัสกับสารละลายแคดเมียมซัลเฟต เข้าสู่อิมพิงค์เจอร์ที่บรรจุสารละลายแคดเมียมซัลเฟต 50.0 มิลลิลิตรและที่ทางออกของอิมพิงค์เจอร์ต่อเข้ากับปั๊มอากาศเพื่อใช้ในการดึงก๊าซเข้าอิมพิงเจอร์ สามารถแสดงชุดการเก็บตัวอย่างก๊าซดังภาพประกอบที่ 3-8



ภาพประกอบที่ 3-8 การเก็บตัวอย่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกดูดซึมในสารละลายแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) เกิดเป็นสารละลายแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) มีลักษณะเป็นตะกอนสีเหลืองเข้ม ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างก๊าซก่อนเข้าชุดทดลองทุกๆ 30 นาที ใช้เวลาในการเก็บ 1 นาที และเก็บตัวอย่างก๊าซหลังจากได้รับการบำบัดที่ทุกๆ 15 นาที ใช้เวลาในการเก็บ 2 นาที สามารถแสดงดังภาพประกอบที่ 3-9 แล้วจึงทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีไอโอโดเมตริก (Iodometric method) ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์แสดงดังภาคผนวก ข-2

(ก)

(ข)

ภาพประกอบที่ 3-9 อิมพิงค์เจอร์ที่บรรจุสารละลายแคดเมียมซัลไฟด์

(ก) ก่อนเข้าชุดทดลอง (ข) หลังจากการบำบัด

จากนั้นคำนวณเทียบกลับเพื่อหาปริมาณซัลไฟด์ต่อไปแสดงดังสมการที่ 3-3 และสามารถแปลงความเข้มข้นของอากาศเสียในหน่วยน้ำหนักต่อปริมาตร (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) เป็นปริมาตรต่อปริมาตร (ส่วนในล้านส่วน : ppmv) ดังสมการที่ 3-4

$$C_{H_2S} = 17.04 \times 10^3 \left(\frac{(V_{I_2} N_{I_2} - V_N N_N)_{sample} - (V_{I_2} N_{I_2} - V_N N_N)_{blank}}{V_{m(std)}} \right) \qquad (3\text{-}3)$$

$$ppmv = C_{H_2S} \times \frac{24.45}{MW} \qquad (3\text{-}4)$$

เมื่อ C_{H_2S} คือ ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

V_{I_2} คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานไอโอดีน (มิลลิลิตร)

N_{I_2} คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอโอดีน (นอร์มอล)

V_N คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)

N_N คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มอล)

$V_{m\,(std)}$ คือ ปริมาตรของก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน ที่ 1 บรรยากาศ และ 25 องศาเซลเซียส

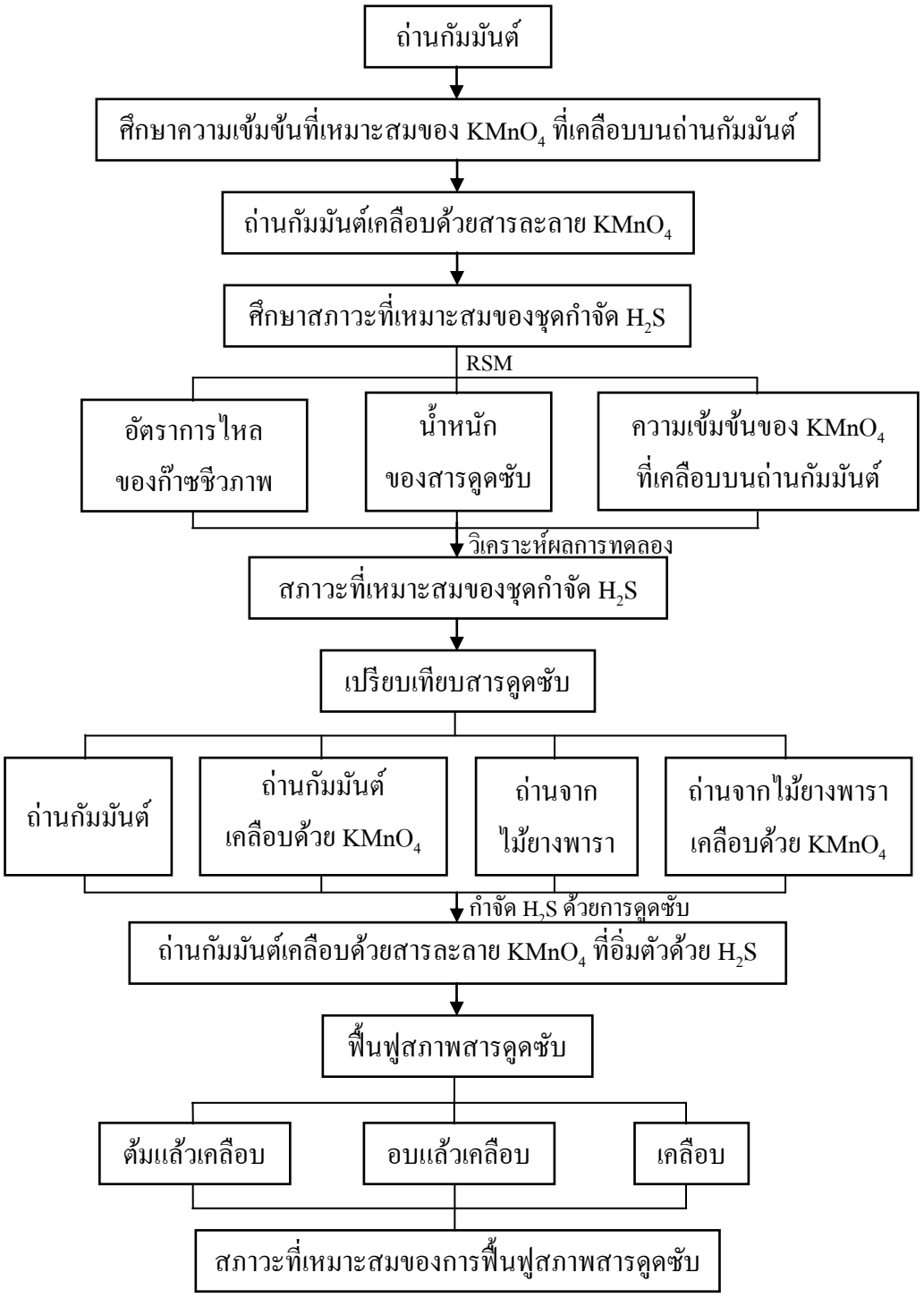
ppmv คือ หน่วยความเข้มข้นของสารมลพิษในหน่วยปริมาตรต่อปริมาตร (ppmv)

24.45 คือ ปริมาตรในหน่วยลิตรของก๊าซใดๆ 1 กรัมโมเลกุล ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ)

MW คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซมลพิษ คือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

3.7 วิธีการทดลอง

ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ มีขั้นตอนการทดลองทั้งหมดดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-10



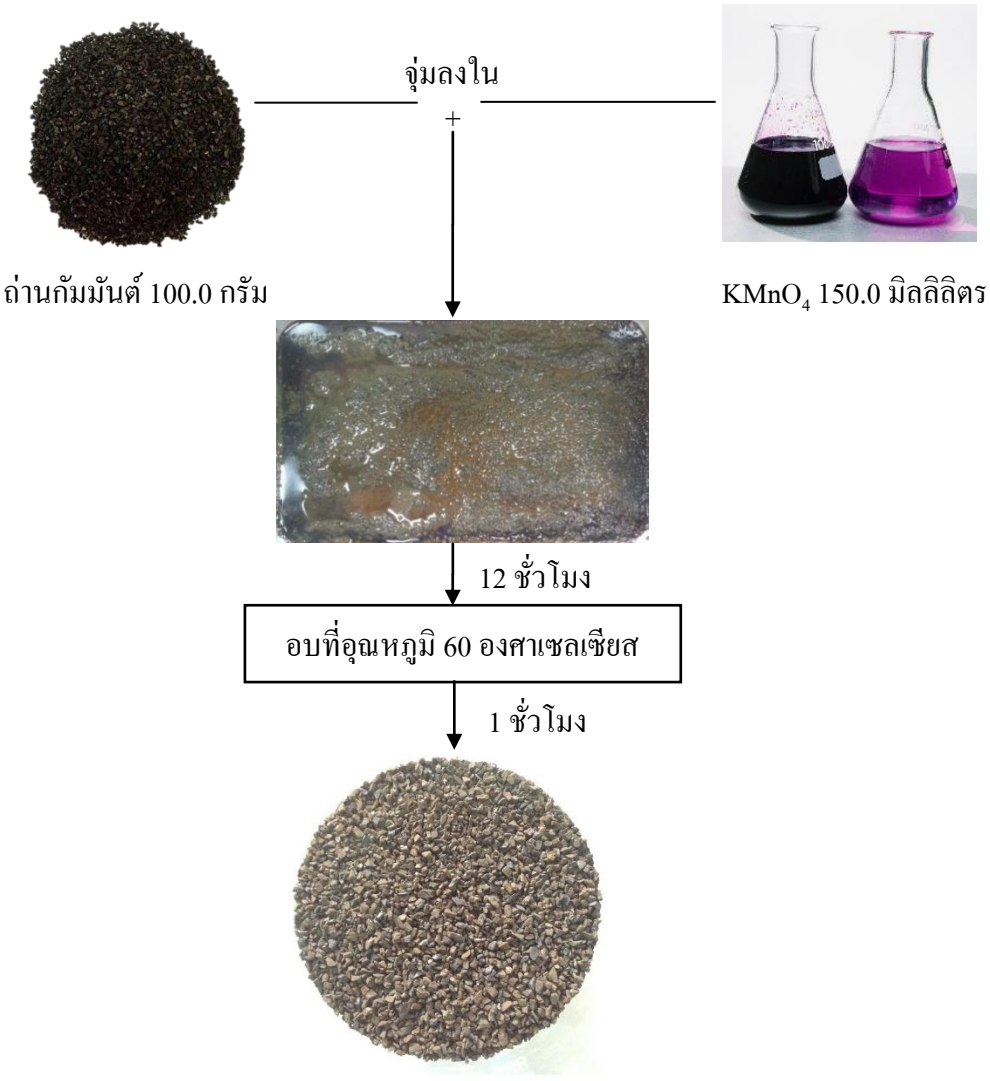
ภาพประกอบที่ 3-10 วิธีการทดลอง

3.8 วิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

3.8.1 ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

เตรียมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) ที่ความเข้มข้น 3.0-11.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และทำการศึกษาความสามารถในการละลายของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยทำการวิเคราะห์ความสามารถในการละลายของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) ด้วยวิธีการไทเทรตเพื่อนำความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมไปใช้ในการเคลือบถ่านกัมมันต์

3.8.2 เตรียมถ่านกัมมันต์เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต



ภาพประกอบที่ 3-11 การเตรียมถ่านกัมมันต์เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

นำถ่านกัมมันต์ 100.0 กรัม แช่ลงในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) ที่มีความเข้มข้น 3.0-9.0 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 150.0 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาใส่ในโถดูดความชื้น (Desiccator) เพื่อให้เหลือเฉพาะสารเคมีไม่มีความชื้นอยู่ในโมเลกุลของสารดูดซับ สารดูดซับที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

3.9 วิธีการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

3.9.1 ออกแบบการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

การหาสภาวะที่เหมาะสมของชุดกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพทำการออกแบบสภาวะการทดลองโดยคำนึงถึงการใช้งานในระดับครัวเรือนด้วยการใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methods, RSM) แบบส่วนประสมกลาง (Central composite design, CCD) ซึ่งเป็นเทคนิคการออกแบบการทดลองสำหรับการทดลองที่มีหลายตัวแปร เพื่อศึกษาเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ขั้นตอนการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM มีดังนี้

1) กำหนดตัวแปรที่จะศึกษาและช่วงของการดำเนินการ ประกอบด้วย

1.1) ตัวแปรอิสระ (Independent variable) ประกอบด้วย 3 ตัวแปร คือ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 4.0-8.0 ลิตรต่อนาที น้ำหนักของสารดูดซับ 25.0-100.0 กรัม และความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์ 3.0-9.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กำหนดให้ x แทนตัวแปรอิสระ โดยมีตัวแปรแต่ละตัวจะแบ่งเป็น 5 ระดับ และมีสัญลักษณ์แทนการออกแบบการทดลอง แสดงไว้ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ระดับของตัวแปรอิสระในการออกแบบการทดลอง

Independent variables	Factor code	Level of factors				
		-2	-1	0	1	2
Biogas flow rate (L/min)	x_1	4	5	6	7	8
Adsorbent weight (g)	x_2	25	40	63	85	100
$KMnO_4$ concentration (%w/v)	x_3	3	4	6	8	9

1.2) ตัวแปรตอบสนอง (Response) ประกอบด้วย 1 ตัวแปร คือ เวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพในแต่ละการทดลอง (Breakthrough time) กำหนดให้ y เป็นตัวแปรตาม

2) กำหนดรหัส (Code) ของตัวแปรอิสระตามช่วงการดำเนินการ เพื่อใช้ในการออกแบบสภาวะที่ใช้ในการทดลองด้วยเทคนิคของ Central Composite Design (CCD) และทำการแปลงค่ารหัสตัวแปรอิสระ (Coded variables) ผลการออกแบบการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 รหัสของตัวแปรที่ทำการศึกษาในการออกแบบการทดลอง

Run no.	Coded levels			Response
	x_1	x_2	x_3	
1	+2	0	0	y = Breakthrough time (min)
2	0	0	0	
3	0	0	-2	
4	0	0	0	
5	0	-2	0	
6	-2	0	0	
7	-1	-1	+1	
8	0	0	+2	
9	-1	-1	-1	
10	+1	-1	+1	
11	-1	+1	+1	
12	+1	+1	+1	
13	-1	+1	-1	
14	+1	+1	-1	
15	0	0	0	
16	+1	-1	-1	
17	0	+2	0	

3) แปลงรหัส (Decode) จากการกำหนดรหัส (Code) ของตัวแปรอิสระทำการแปลงค่าตัวแปรให้เป็นค่าการดำเนินการของตัวแปรอิสระ เพื่อหาค่าตัวแปรตอบสนองของกระบวนการ และจากการแปลงรหัสทำให้พบว่ามีการทำการทดลองซ้ำค่ากลาง 3 ครั้ง เป็นทดสอบเสถียรภาพของการทดลอง การแปลงรหัสของตัวแปร แสดงดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ผลการแปลงรหัสของตัวแปรที่ทำการศึกษาในการออกแบบการทดลอง

Run no.	Independent variables			Response
	Biogas flow rate (L/min)	Adsorbent Weight (g)	$KMnO_4$ concentration (%w/v)	
1	8	63	6	Breakthrough time (min)
2	6	63	6	
3	6	63	3	
4	6	63	6	
5	6	25	6	
6	4	63	6	
7	5	40	8	
8	6	63	9	
9	5	40	4	
10	7	40	8	
11	5	85	8	
12	7	85	8	
13	5	85	4	
14	7	85	4	
15	6	63	6	
16	7	40	4	
17	6	100	6	

4) สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถหาด้วย Regression analysis โดยใช้โปรแกรม Design Expert เป็นผลความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับพื้นผิวโค้ง สามารถแสดงในรูปสมการกำลังสอง (Quadratic equation) ดังแสดงในสมการที่ (3-1)

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^{n}(a_i x_i) + \sum_{i=1}^{n}(a_{ii} x_i^2) + \left[\sum_{i=1}^{n-1} \cdot \sum_{j=i+1}^{n}(a_{ij} x_i x_j)\right]_{i<j} \qquad (3\text{-}1)$$

เมื่อ x_i, x_j คือ ตัวแปรในการออกแบบการทดลอง และ a_0, a_i, a_{ii}, a_{ij} เป็นสัมประสิทธิ์ถดถอย

5) กราฟพื้นผิว (Surface plot) เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตอบสนอง โดยสร้างจากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาจากการทดลอง นำมาพล็อตเป็นกราฟพื้นผิว เพื่อนำไปหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ

6) สภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ สามารถหาได้จาก Design Expert software

3.9.2 ขั้นตอนการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

1) ติดตั้งชุดอุปกรณ์การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ ทำการบรรจุถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งเป็นสารดูดซับลงในคอลัมน์ และทำการปรับอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพตามการออกแบบสภาวะการทดลองด้วยการใช้เทคนิค RSM

2) ทำการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

3) บันทึกความดันลดของระบบทุกๆ 30 นาที

4) เก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพทั้งที่ก่อนเข้าชุดทดลองทุกๆ 30 นาที และหลังจากได้รับการบำบัดทุกๆ 15 นาที จนกว่าระบบจะมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออก 200 ppmv

5) วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีไอโอโดเมตริก (Iodometric Method) เพื่อหาความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะได้เวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ ทำการวิเคราะห์เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมกับการใช้งานในระดับครัวเรือน

3.10 วิธีการทดลองเปรียบเทียบชนิดตัวดูดซับในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมของชุดกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพแล้ว

ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับชนิดต่างๆ ได้แก่ ถ่านจากไม้ยางพารา และถ่านกัมมันต์ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ทำการทดลองด้วยสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ เพื่อให้ได้สารดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงที่สุด โดยมีขั้นตอนการทดลองเปรียบเทียบชนิดตัวดูดซับดังนี้

1) เตรียมถ่านจากไม้ยางพาราและถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยนำถ่านจากไม้ยางพาราหรือถ่านกัมมันต์จุ่มลงในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) ที่มีความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

2) ติดตั้งชุดอุปกรณ์การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยบรรจุสารดูดซับน้ำหนัก 77.0 กรัม ลงในแพคคอลัมน์ ทำการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ โดยมีอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที

3) บันทึกความดันลดของระบบทุกๆ 30 นาที

4) เก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพทั้งที่ก่อนเข้าชุดทดลองทุกๆ 30 นาที และหลังจากได้รับการบำบัดทุกๆ 15 นาที จนกว่าระบบจะมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออก 200 ppmv

5) วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีไอโอโดเมตริก (Iodometric Method) เพื่อหาความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ วิเคราะห์เวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพเพื่อให้ได้สารดูดซับที่เหมาะสมกับการใช้งานในระดับครัวเรือน

3.11 วิธีการทดลองศึกษาความสามารถในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ

การฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ (Regeneration) เป็นการทำให้สารดูดซับมีพื้นที่ว่างสำหรับการดูดซับครั้งใหม่ โดยการนำก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นสารถูกดูดซับออกจากสารดูดซับด้วย 2 กระบวนการ คือ กระบวนการที่ 1 ทำการฟื้นฟูสภาพโดยการนำสารดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วต้มด้วยน้ำเดือด เพื่อเป็นการแยกสารมลพิษออก แล้วจึงเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และกระบวนการที่ 2 ทำการฟื้นฟูสภาพโดยการนำสารดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยไม่ผ่านการต้ม จึงจะได้ถ่านกัมมันต์พร้อม

ใช้งาน ซึ่งแต่ละกระบวนการจะทำการฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับ 2 ครั้ง เพื่อให้ได้กระบวนการที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ โดยมีขั้นตอนการทดลองความสามารถในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับดังนี้

1) สารดูดซับที่ผ่านกระบวนการใช้งานแล้วทำการฟื้นฟูสภาพด้วย 2 กระบวนการ ได้แก่

- ทำการต้มในน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากถ่านกัมมันต์ สามารถแสดงดังภาพประกอบที่ 3-12 หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วเคลือบซ้ำด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ภาพประกอบที่ 3-12 การฟื้นฟูสภาพโดยการนำสารดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วต้มด้วยน้ำเดือดแล้วเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

- ทำการเคลือบซ้ำด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง โดยสามารถแสดงดังภาพประกอบที่ 3-13 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ภาพประกอบที่ 3-13 การฟื้นฟูสภาพโดยการนำสารดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยไม่ผ่านการต้ม

2) ติดตั้งชุดอุปกรณ์การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยบรรจุสารดูดซับที่ทำการฟื้นฟูสภาพแล้วลงในแพคคอลัมน์ ทำการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ โดยมีอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที

3) บันทึกความดันลดของระบบทุกๆ 30 นาที

4) เก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพทั้งที่ก่อนเข้าชุดทดลองทุกๆ 30 นาที และหลังจากได้รับการบำบัดทุกๆ 15 นาที จนกว่าระบบจะมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออก 200 ppmv

5) วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีไอโอโดเมตริก (Iodometric Method) เพื่อหาความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ วิเคราะห์เวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ เพื่อให้ได้กระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับที่เหมาะสม

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เตรียมในความเข้มข้น 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาต แสดงรายละเอียดการวิเคราะห์ดังภาคผนวก ข-1 ทำการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมออกซาเลตซึ่งเป็นสารละลายมาตรฐาน แสดงได้ดังตารางที่ 4-1 เพื่อนำความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมไปใช้ในการเคลือบถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 4-1 ผลต่างความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจากการเตรียมและจากการไทเทรต

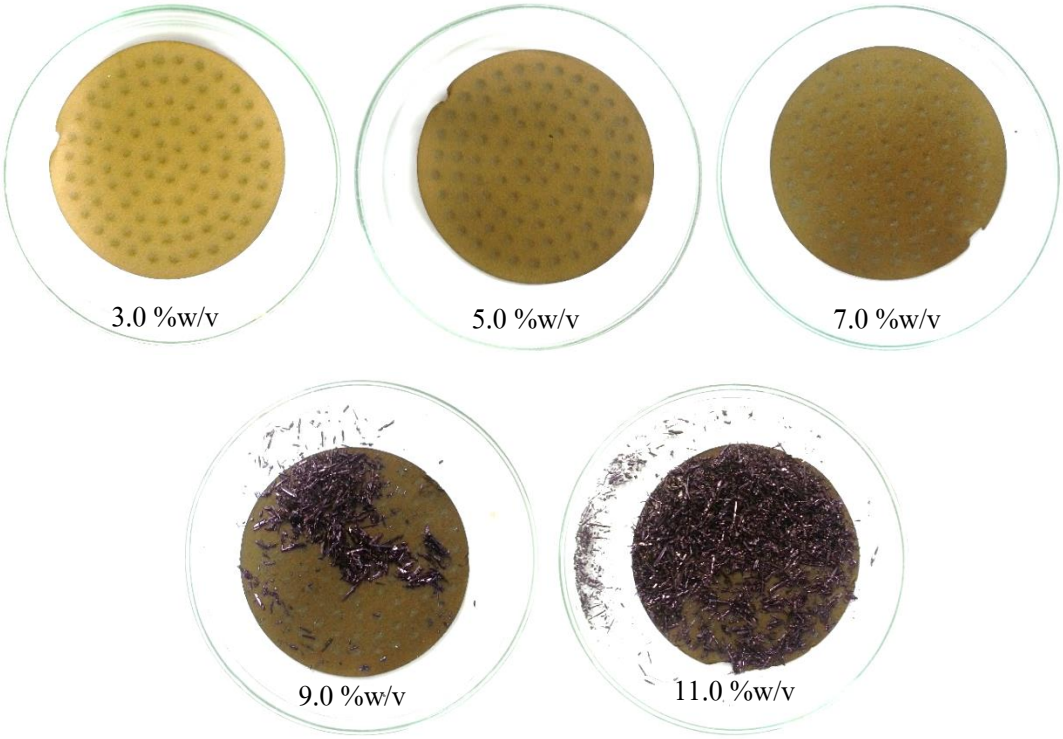
ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ จากการเตรียม (%w/v)	ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ จากการไทเทรต (%w/v)
3.0	2.89
5.0	4.84
7.0	6.64
9.0	8.23
11.0	8.80

จากผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต แสดงให้เห็นว่าผลการไทเทรตที่ความเข้มข้น 3.0-9.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นที่เตรียมไว้ เนื่องจากเป็นช่วงความเข้มข้นที่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถละลายได้เกือบทั้งหมด ซึ่งแตกต่างจากที่ความเข้มข้นที่ 11.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีผลการไทเทรตเป็น 8.80% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นผลจากความอิ่มตัวของตัวทำละลาย ทำให้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตไม่สามารถละลายได้อีกทำให้ความเข้มข้นจากการไทเทรตมีค่าแตกต่างไปจากความเข้มข้นที่เตรียมไว้มาก และจากการนำสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เตรียมไว้ในความเข้มข้นต่างๆมากรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1

(Whatman NO.1) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4-2 และภาพประกอบที่ 4-1 ซึ่งพบว่าโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตไม่สามารถละลายได้หมดที่ความเข้มข้นมากกว่า 9.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสำหรับการใช้ในการศึกษาการดูดซับก๊าซไฮโดเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพเป็น 3.0-9.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ตารางที่ 4-2 ผลน้ำหนักผลึกของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เกิดจากการละลายในน้ำ

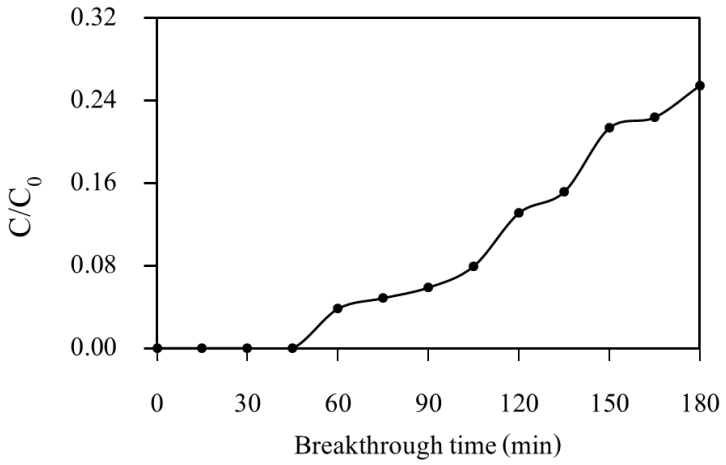
ความเข้มข้นที่เตรียมของ $KMnO_4$ (%w/v)	**ปริมาณ $KMnO_4$ ที่เหลือเฉลี่ย (g)**
3.0	0.01
5.0	0.02
7.0	0.06
9.0	1.56
11.0	4.16



ภาพประกอบที่ 4-1 ผลึกโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหลือจากการละลายในน้ำที่ความเข้มข้น 3.0-11.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

4.2 ผลการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของชุดอุปกรณ์ ซึ่งอัตราส่วนของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตต่อปริมาณสารดูดซับเป็น 1.5 มิลลิลิตรต่อกรัม ทำการออกแบบการทดลองโดยมีตัวแปรอิสระ (x) คือ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (x_1) 4.0-8.0 ลิตรต่อนาที น้ำหนักของสารดูดซับ (x_2) 25.0-100.0 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์ (x_3) 3.0-9.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง (y) คือ Breakthrough time (t_b) หรือ เวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อระบบมีความเข้มข้นที่ทางออกเป็น 200 ppmv ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ส่งกระทบต่อสุขภาพตามมาตรฐานของ OSHA โดยทำการเก็บตัวอย่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางเข้าและทางออกของชุดอุปกรณ์เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซด้วยวิธีไอโอโดเมตริก (Iodometric method) โดยที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (x_1) 6.0 ลิตรต่อนาที น้ำหนักของสารดูดซับ (x_2) 63.0 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์ (x_3) 6.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งเป็นค่ากลางของการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD โดยมีค่าความเข้มข้นที่ทางเข้าอยู่ในช่วง 1,000-1,500 ppmv พบว่าระบบมีค่า Breakthrough time เท่ากับ 137 นาที สามารถแสดงกราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) ได้ดังภาพประกอบที่ 4-2 โดยทำการพล็อตระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้น C/C_0 กับเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ และ C คือ ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพที่เวลาใดเวลาหนึ่งในคอลัมน์



ภาพประกอบที่ 4-2 Breakthrough time ที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (x_1) 6.0 ลิตรต่อนาที น้ำหนักของสารดูดซับ (x_2) 63.0 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์ (x_3) 6.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ทำการออกแบบการทดลองการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยใช้หลักการทางสถิติด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD ทำให้ได้การทดลองทั้งหมด 17 การทดลอง ผลของตัวแปรอิสระ (x) ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง (y) แสดงความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 4-3

จากข้อมูลเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตดังแสดงในตารางที่ 4-3 และ ค่า R^2 เป็นสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดที่แบบจำลองสามารถอธิบายได้และเป็นค่าที่มีความสำคัญในการพิจารณาความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ โดย R^2 ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 และควรมากกว่า 0.75 จึงเป็นค่าที่ยอมรับได้ (Seyedeh et al., 2007) โดยจากการทดลองพบว่า $R^2 = 0.817$ และสามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบสมการ Quadratic model ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อระบบมีความเข้มข้นที่ทางออกเป็น 200 ppmv (y) กับตัวแปรอิสระ (x) แสดงได้ดังสมการที่ (4-1)

$$y = 11.45x_2 - 0.06833x_2^2 \qquad (4\text{-}1)$$

เมื่อ y คือ เวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (นาที)

x_2 คือ น้ำหนักของสารดูดซับ (กรัม)

ตารางที่ 4-3 ผลของเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD

Run no.	Biogas flow rate, x_1 (L/min)	Adsorbent weight, x_2 (g)	$KMnO_4$ concentration, x_3 (%w/v)	Breakthrough time (min), y
1	8.0	63.0	6.0	116
2	6.0	63.0	6.0	137
3	6.0	63.0	3.0	149
4	6.0	63.0	6.0	134
5	6.0	25.0	6.0	3
6	4.0	63.0	6.0	107
7	5.0	40.0	8.0	5
8	6.0	63.0	9.0	126
9	5.0	40.0	4.0	4
10	7.0	40.0	8.0	4
11	5.0	85.0	8.0	99
12	7.0	85.0	8.0	91
13	5.0	85.0	4.0	112
14	7.0	85.0	4.0	101
15	6.0	63.0	6.0	118
16	7.0	40.0	4.0	4
17	6.0	100.0	6.0	128

จากสมการที่ (4-1) แสดงผลของตัวแปรต่อเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของตัวแปรแต่ละตัวสามารถวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของสมการตามหลักการ Analysis of variance (ANOVA) โดยแสดงผลของรายละเอียดไว้ดังตารางที่ 4-4

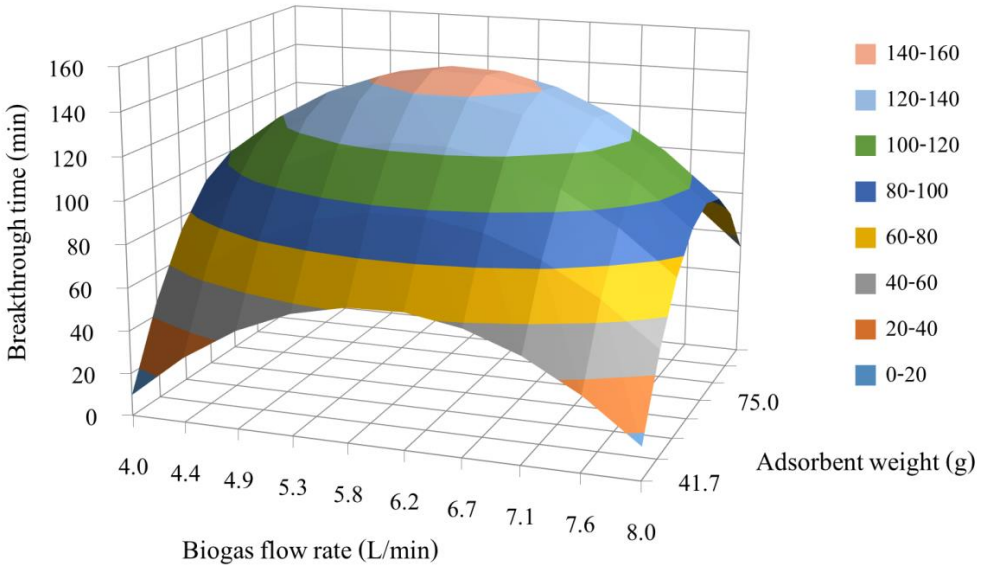
ตารางที่ 4-4 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์และค่าสถิติของกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

Term	Coefficient	Value	P value	Remarks
Constant	b0	-843.70	0.115	Not significant
Biogas flow rate	b1	154.83	0.175	Not significant
Adsorbent weight	b2	11.45	0.03541	significant
$KMnO_4$ concentration	b3	33.96	0.576	Not significant
Biogas flow rate*Biogas flow rate	b4	-12.545	0.141	Not significant
Adsorbent weight* Adsorbent weight	b5	-0.06833	0.01564	significant
$KMnO_4$concentration* $KMnO_4$concentration	b6	-2.705	0.448	Not significant
Biogas flow rate*Adsorbent weight	b7	-0.085	0.864	Not significant
Biogas flow rate* $KMnO_4$concentration	b8	0.103	0.987	Not significant
Adsorbent weight* $KMnO_4$ concentration	b9	-0.073	0.825	Not significant

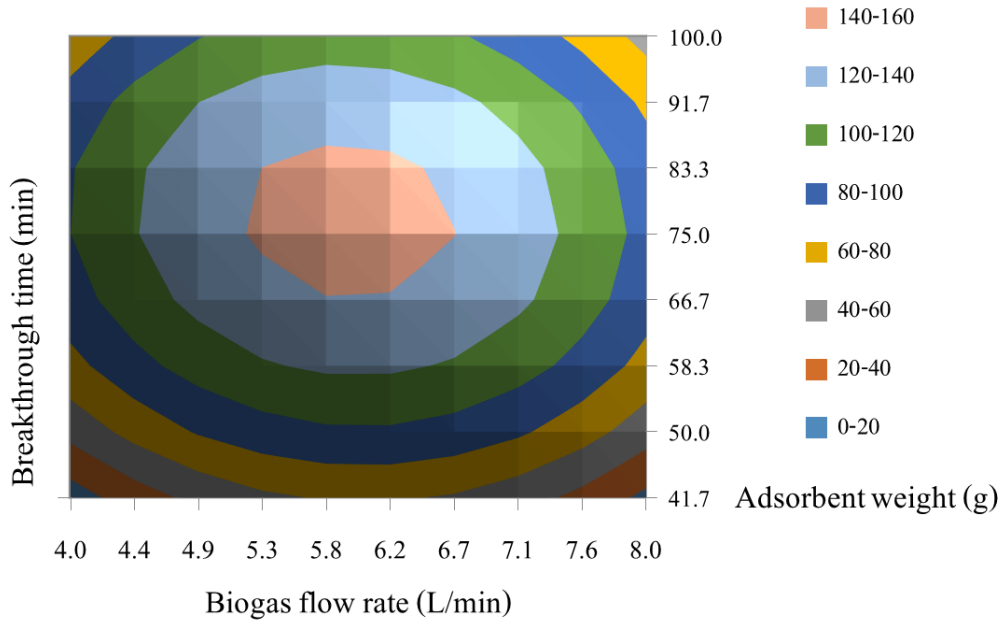
ผลของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (x) คือ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ น้ำหนักของสารดูดซับ และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์ ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง (y) คือ เวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพเมื่อระบบมีความเข้มข้นที่ทางออกเป็น 200 ppmv สามารถนำเสนอในรูปกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟ 3 มิติ (3D plot) และกราฟโครงร่าง (Contour plot) สามารถนำมาใช้ในการอธิบายและระบุผลกระทบของตัวแปรแต่ละตัว เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการดำเนินการ โดยสามารถแสดงผลของตัวแปรอิสระได้ครั้งละ 2 ตัวแปร และตัวแปรที่เหลือจะเป็นค่าคงที่ที่เป็นค่ากลาง

4.2.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพและน้ำหนักของสารดูดซับ

ผลของอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพและน้ำหนักของสารดูดซับที่ส่งผลต่อเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตคงที่ 6.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-3 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักของสารดูดซับเพิ่มขึ้นในช่วงอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 4.0-6.0 ลิตรต่อนาที และเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อน้ำหนักของสารดูดซับและอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นในช่วง 7.0-8.0 ลิตรต่อนาที ทำให้ทราบถึงอัตราส่วนของน้ำหนักสารดูดซับกับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นสารถูกดูดซับในก๊าซชีวภาพเป็น 0.0128 กิโลกรัมต่อ (ลิตรต่อนาที)



(ก)

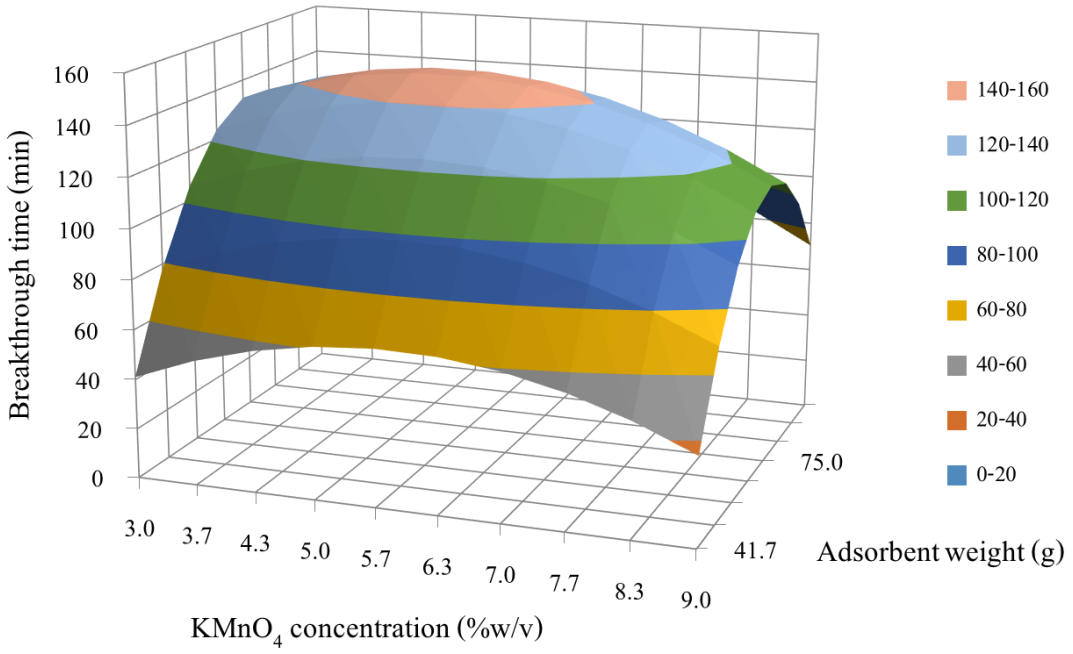


(ข)

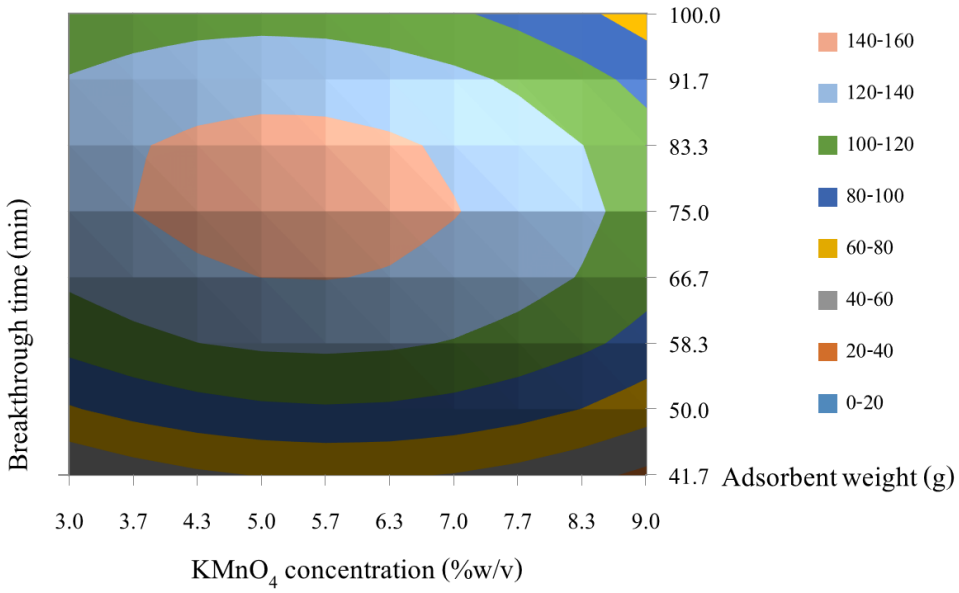
ภาพประกอบที่ 4-3 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพและน้ำหนักของสารดูดซับที่ส่งผลต่อเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

4.2.2 ผลของน้ำหนักของสารดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

ผลของน้ำหนักของสารดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ส่งผลต่อเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ ที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพคงที่ 6.0 ลิตรต่อนาที สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-4 พบว่าเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพิ่มขึ้นในช่วงน้ำหนักของสารดูดซับ 25.0-77.0 กรัมและเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและน้ำหนักของสารดูดซับเพิ่มขึ้นในช่วง 77.0-100.0 กรัม ทำให้ทราบว่าที่ความเข้มข้นสูง คือ มีปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมากทำให้สารเคมีที่เคลือบถ่านกัมมันต์ไปอุดอยู่ในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นการลดความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ



(ก)

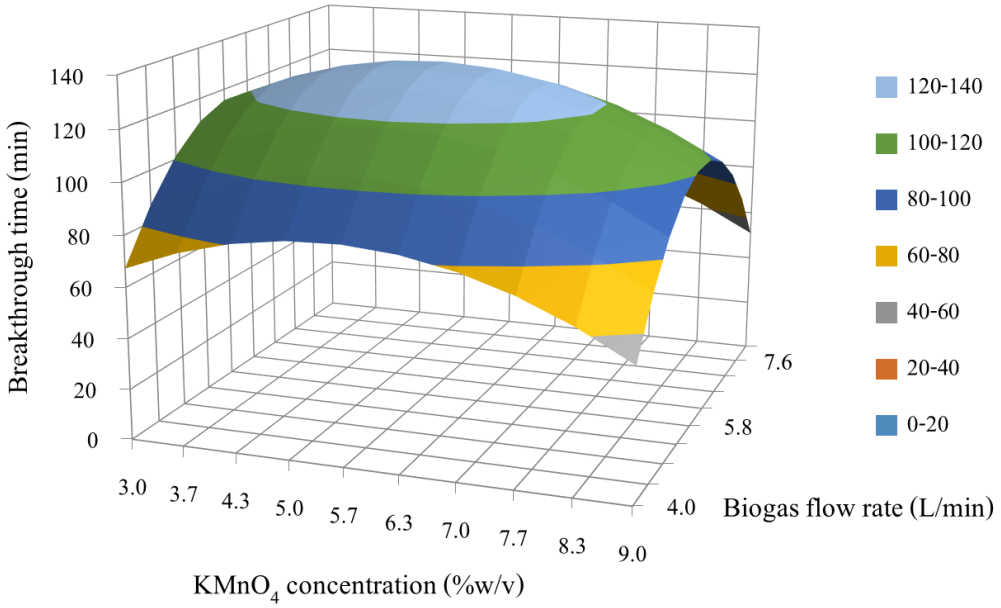


(ข)

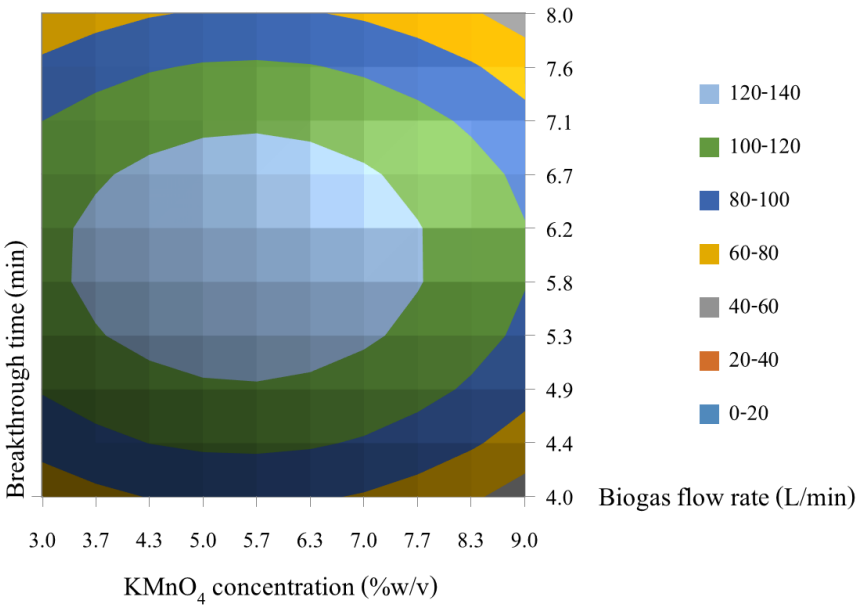
ภาพประกอบที่ 4-4 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของสารดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ส่งผลต่อเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

4.2.3 ผลของอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพและความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

ผลของอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพและความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ส่งผลต่อเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพที่น้ำหนักของสารดูดซับคงที่ 63.0 กรัม สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-5 พบว่าเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3.0-5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลของก๊าซชีวภาพและความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพิ่มขึ้นในช่วง 6.0-9.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพมีผลต่อปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าสู่ระบบไปสัมผัสกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้ทราบว่าอัตราส่วนของความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมต่ออัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่เป็น 0.83% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรต่อ (ลิตรต่อนาที)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4-5 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพและความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ส่งผลต่อเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

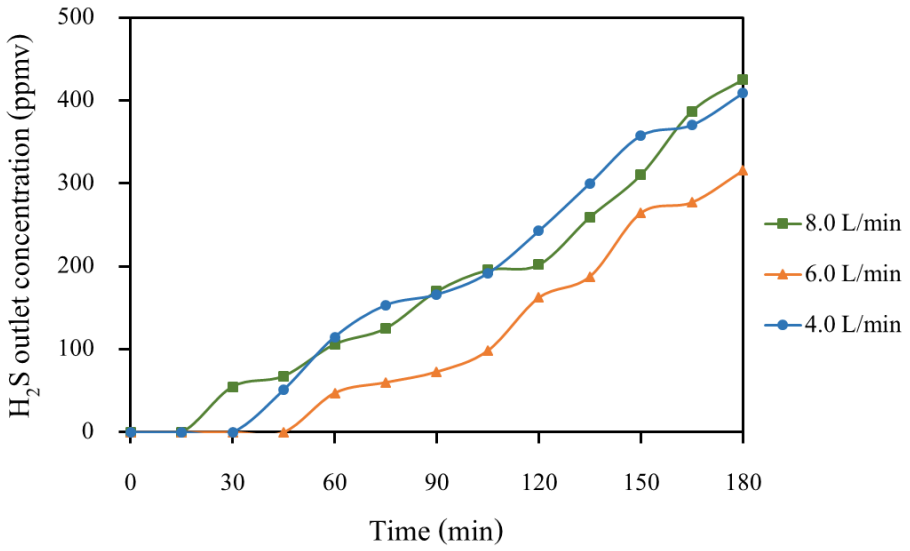
จากสมการแบบจำลองในสมการที่ 4-1 สามารถใช้ในการทำนายเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพในช่วงตัวแปรที่ทำการศึกษาตามการออกแบบการทดลองแบบ CCD โดยใช้โปรแกรม Design Expert Software ประกอบด้วยอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 4.0-8.0 ลิตรต่อนาทีน้ำหนักของสารดูดซับ 25.0-100.0 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์ 3.0-9.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ (Optimum condition) ของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ น้ำหนักของสารดูดซับ และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์จากการวิเคราะห์พบว่าสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสม คือ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที น้ำหนักของสารดูดซับ 77.0 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์ 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรโดยระบบมีเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 144 นาที และมีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพเป็น 89.91%

4.3 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

จากการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ ทำการศึกษาตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร คือ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ น้ำหนักของสารดูดซับ และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเคลือบบนถ่านกัมมันต์

4.3.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

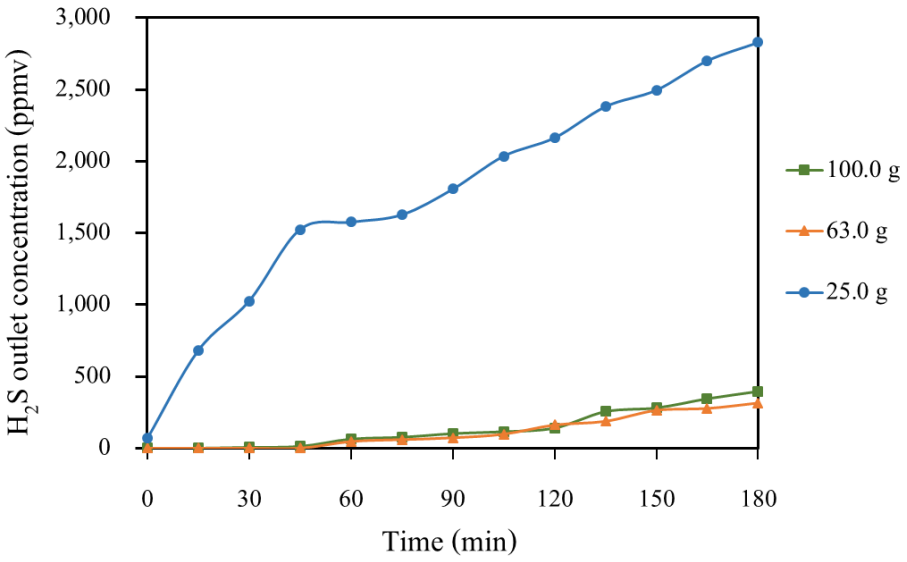
ผลของอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่ส่งผลต่อเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อระบบมีความเข้มข้นที่ทางออกเป็น 200 ppmv ในสภาวะที่น้ำหนักของสารดูดซับคงที่ 63.0 กรัมและความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตคงที่ 6.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-6 พบว่าเมื่อความเข้มข้นที่ทางออกเป็น 200 ppmv ที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 4.0 ลิตรต่อนาที ระบบมีเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นเวลา 107 นาที ที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 8.0 ลิตรต่อนาที ระบบมีเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นเวลา 116 นาที และที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที ระบบมีเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงที่สุดเป็นเวลา 137 นาที ซึ่งอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพส่งผลต่อเวลาการอยู่ในคอลัมน์ของก๊าซชีวภาพ โดยการที่ก๊าซชีวภาพอยู่ในคอลัมน์จะทำให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการสัมผัสกับพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหรือสารดูดซับทำให้เกิดการดูดซับ โดยที่อัตราการไหลต่ำและสูงเกินไปทำให้ไม่เกิดการชนกันของสาร เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของก๊าซชีวภาพส่งผลต่อแรงในการชนกันของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหรือรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยที่อัตราการไหลต่ำทำให้ก๊าซชีวภาพมีแรงชนที่น้อยเกินไปและที่อัตราการไหลสูงทำให้ก๊าซชีวภาพเคลื่อนที่เร็วเกินไป ดังนั้น เวลาที่เหมาะสมในการสัมผัสของพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ คือ 0.101 นาที



ภาพประกอบที่ 4-6 ผลของอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

4.3.2 ผลของน้ำหนักของสารดูดซับในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

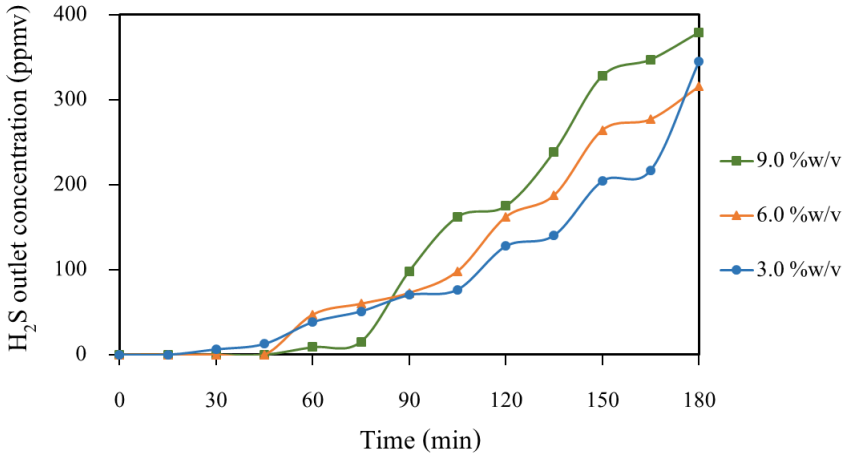
ผลของน้ำหนักของสารดูดซับที่ส่งผลต่อเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อระบบมีความเข้มข้นที่ทางออกเป็น 200 ppmv ในสภาวะที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพคงที่ 6.0 ลิตรต่อนาทีและความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตคงที่ 6.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-7 พบว่าที่น้ำหนักของสารดูดซับ 63.0 กรัมระบบมีเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงที่สุดเป็นเวลา 137 นาที แต่จากผลการออกแบบด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD พบว่าน้ำหนักของสารดูดซับที่เหมาะสมเป็น 77.0 กรัม ซึ่งจากภาพประกอบที่ 4-7 พบว่าที่น้ำหนักของสารดูดซับ 100.0 กรัม มีความสามาถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ใกล้เคียงกับที่น้ำหนักของสารดูดซับ 63.0 กรัม ดังนั้น เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดและไม่เป็นการสิ้นเปลืองจึงควรใช้สารดูดซับหนัก 77.0 กรัม



ภาพประกอบที่ 4-7 ผลของน้ำหนักของสารดูดซับในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

4.3.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเคลือบบนถ่านกัมมันต์ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ผลของความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเคลือบบนถ่านกัมมันต์ที่ส่งผลต่อเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อระบบมีความเข้มข้นที่ทางออกเป็น 200 ppmv ในสภาวะที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพคงที่ 6.0 ลิตรต่อนาทีและน้ำหนักของสารดูดซับคงที่ 63.0 กรัม สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-8 พบว่าที่ความเข้มข้น 3.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ระบบมีเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นเวลา 149 นาที และที่ความเข้มข้น 6.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ระบบมีเวลาในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นเวลา 137 นาที แต่จากผลการออกแบบด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมเป็น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมตร ทำให้ทราบถึงความสามารถของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในการเกาะติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ โดยหากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีปริมาณมากเกินไป อาจเกิดการอุดตันในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ ซึ่งเป็นการลดความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ ดังนั้น ควรใช้ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมเป็น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร



ภาพประกอบที่ 4-8 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเคลือบบนถ่านกัมมันต์ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

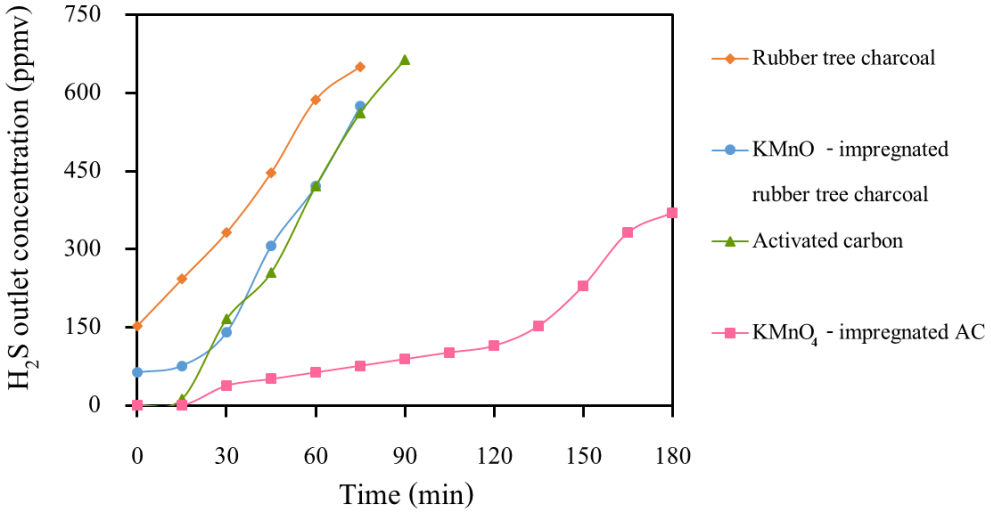
4.3.4 ผลของความดันลด

ค่าความดันลดภายในคอลัมน์ดูดซับเกิดความดันลดที่น้อย มีค่าอยู่ในช่วง 2.5-3.5 เซนติเมตรน้ำ แสดงว่าระบบสูญเสียความดันระหว่างทางเข้าและทางออกจากคอลัมน์เล็กน้อย

4.4 ผลของการเปรียบเทียบชนิดตัวดูดซับในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

จากการทดลองกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ 4 ชนิด ได้แก่ ถ่านจากไม้ยางพาราและถ่านกัมมันต์ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ทำการทดลองตามสภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที น้ำหนักของสารดูดซับ 77.0 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำการเปรียบเทียบระยะเวลาการใช้งานของตัวดูดซับแต่ละชนิดเมื่อมีค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดคือเกิน 200 ppmv นั้นหมายถึงจะต้องนำไปฟื้นฟูสภาพต่อไป โดยสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-9 พบว่าถ่านจากไม้ยางพาราไม่ผ่านเกณฑ์เมื่อเวลาผ่านไป 8 นาทีถ่านจากไม้ยางพาราเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตไม่ผ่านเกณฑ์เมื่อเวลาผ่านไป 35 นาทีถ่านกัมมันต์ไม่ผ่านเกณฑ์เมื่อเวลาผ่านไป 36 นาที และถ่านกัมมันต์เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตไม่ผ่านเกณฑ์เมื่อเวลาผ่านไป 144 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารดูดซับที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีระยะเวลาการใช้งานนานกว่าสารดูดซับที่ไม่เคลือบสารเคมี และถ่านกัมมันต์มีมีระยะเวลาการใช้งานนานกว่า

ถ่าน เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีการกระตุ้นทำให้มีปริมาณของพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนในการดูดซับมากกว่า จึงทำให้ถ่านกัมมันต์เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตระยะเวลาการใช้งานได้นานสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกับตัวดูดซับอีก 3 ชนิด



ภาพประกอบที่ 4-9 แสดงผลของชนิดตัวดูดซับในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

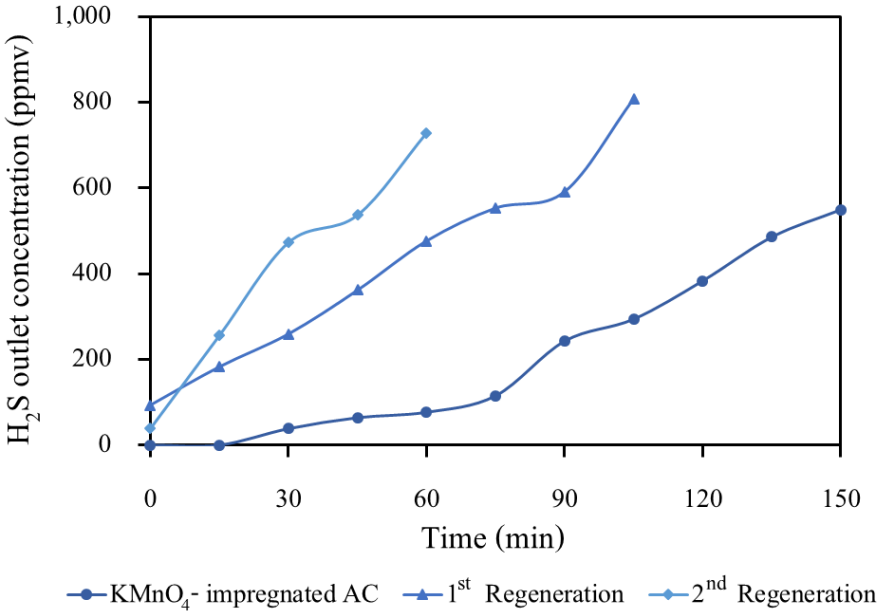
4.5 ผลของความสามารถในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ

จากการศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตซึ่งเป็นสารดูดซับทำการศึกษา 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 ทำการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับแบบต้มไล่สารพิษก่อนเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและวิธีที่ 2 ทำการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับด้วยการเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยไม่ผ่านการต้มจึงจะได้ถ่านกัมมันต์พร้อมใช้งาน

4.5.1 ผลของการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับแบบต้มไล่สารพิษก่อนเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

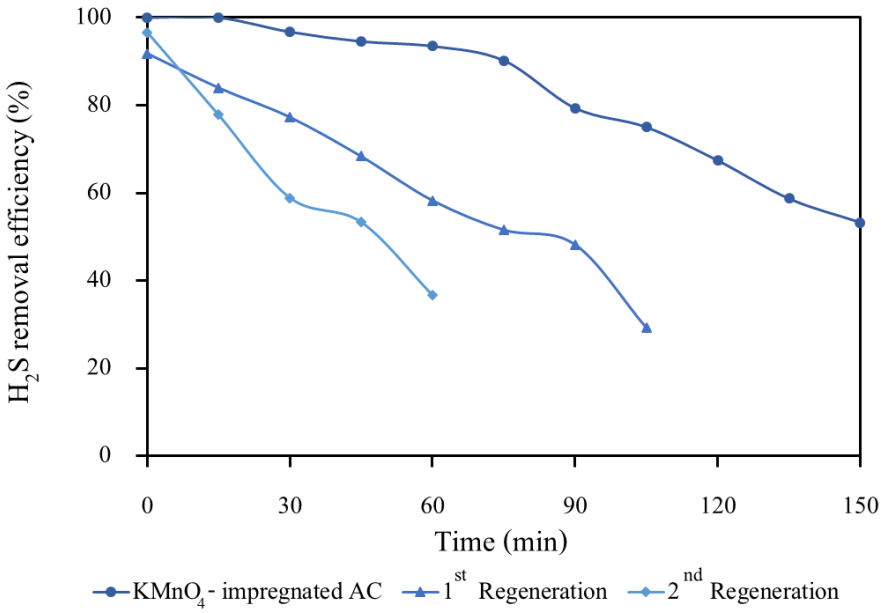
จากการทดลองการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 77.0 กรัม ด้วยการนำไปต้มในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเพื่อเป็นการไล่สารพิษออกจากสารดูดซับแล้วเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพเป็น 6.0 ลิตรต่อนาที จากผลการศึกษา

พบว่าหลังผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดคือเกิน 200 ppmv สามารถแสดงผลการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดังภาพประกอบที่ 4-10 พบว่าการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 สารดูดซับสามารถดูดซับได้ 18 นาที และเมื่อผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2 สารดูดซับสามารถดูดซับได้เพียง 11 นาที



ภาพประกอบที่ 4-10 แสดงผลความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับแบบต้มไล่สารพิษก่อนนำไปเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

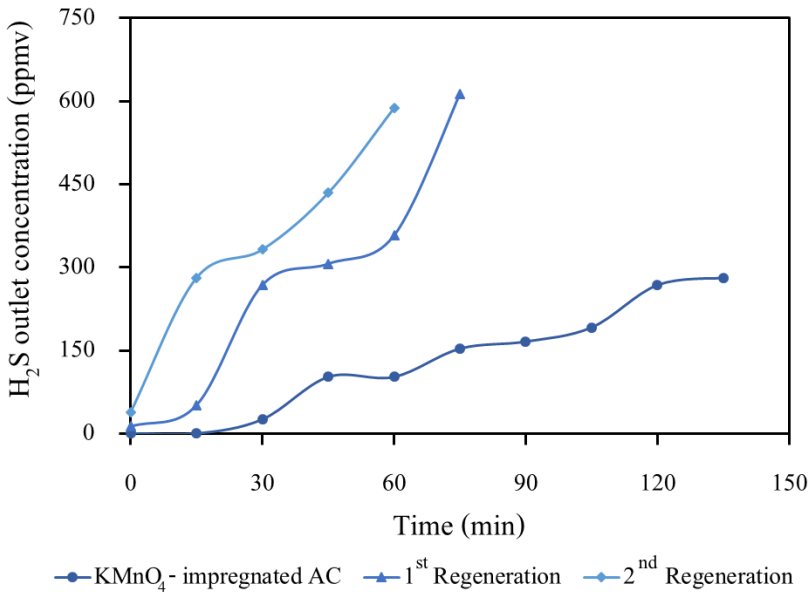
ค่าประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-11 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของการดูดซับหลังจากการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2 มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 และค่าประสิทธิภาพการใช้งานจะต้องไม่ต่ำกว่า 82.0% จึงจะทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออกของคอลัมน์มีค่าไม่เกิน 200 ppmv



ภาพประกอบที่ 4-11 แสดงผลประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับแบบต้มไล่สารพิษก่อนเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

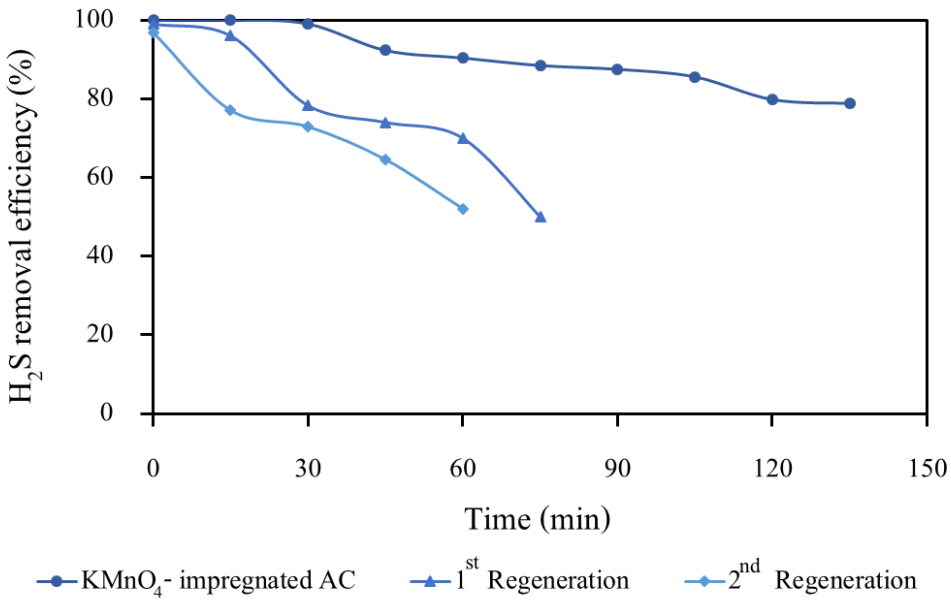
4.5.2 ผลของการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับแบบไม่ต้มไล่สารพิษก่อนเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

จากการทดลองการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 77.0 กรัม ทำการเคลือบซ้ำด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพเป็น 6.0 ลิตรต่อนาที จากผลการศึกษาพบว่าหลังผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 แสดงผลการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อมีค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดคือเกิน 200 ppmv โดยสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-12 พบว่าการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 สารดูดซับสามารถดูดซับได้ 25 นาที และเมื่อผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2 สารดูดซับสามารถดูดซับได้เพียง 13 นาที



ภาพประกอบที่ 4-12 แสดงผลความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับแบบไม่ต้มไล่สารพิษก่อนเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

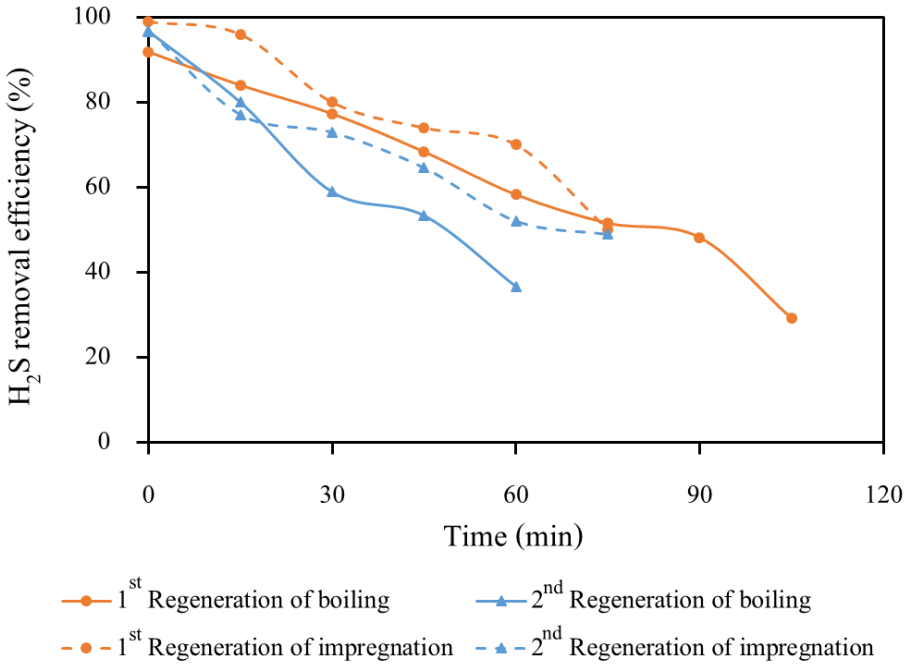
ค่าประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-13 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของการดูดซับหลังจากการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2 มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 และค่าประสิทธิภาพการใช้งานจะต้องไม่ต่ำกว่า 83.0% จึงจะทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออกของคอลัมน์มีค่าไม่เกิน 200 ppmv



ภาพประกอบที่ 4-13 แสดงผลประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับแบบไม่ต้มไล่สารพิษก่อนเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

4.5.3 ผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์แบบต้มและไม่ต้มไล่สารพิษ

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์แบบต้มและไม่ต้มไล่สารพิษสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-14 พบว่าค่าประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพแบบทำการเคลือบซ้ำโดยไม่ผ่านการต้มจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการฟื้นฟูสภาพแบบผ่านการต้ม ทั้งการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 และ 2 และค่าประสิทธิภาพการใช้งานจะต้องไม่ต่ำกว่า 80.0% จึงจะทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออกของคอลัมน์มีค่าไม่เกิน 200 ppmv



ภาพประกอบที่ 4-14 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของถ่านกัมมันต์เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหลังผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีการต้มและไม่ต้ม

4.6 การออกแบบระบบสำหรับการขยายสเกล

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการของระบบการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพที่มีอัตราการไหล 6.0 ลิตรต่อนาที ด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ 77.0 กรัมที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่เวลาประมาณ 150 นาทีระบบจะมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนที่ทางออกเป็น 200 ppmv นั้นคือ สารดูดซับหมดประสิทธิภาพต้องทำการฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับ จึงนำไปสู่การออกแบบระบบเพื่อใช้งานจริงในฟาร์มสุกรที่เป็นฟาร์มขนาดเล็ก (มีจำนวนสุกรไม่เกิน 500 ตัว) ในการผลิตก๊าซชีวภาพใช้บ่อหมักแบบราง (Plug Flow Anaerobic Digester) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ในทดลองการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ใช้คอลัมน์ทำมาจากท่อพีวีซีใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 5.0 เซนติเมตร หนา 0.3 เซนติเมตร ทำให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4.4 เซนติเมตร และมีความสูง 50.0 เซนติเมตร โดยความสูงในการบรรจุสารดูดซับ 40.0 เซนติเมตร ส่วนล่างของคอลัมน์ติดตั้งตะแกรงที่ความสูง 10.0 เซนติเมตร ทำการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสม

พบว่าระบบมีความเร็วของก๊าซชีวภาพเป็น 0.066 เมตรต่อนาทีและมีเวลาที่เหมาะสมในการเคลื่อนที่ของก๊าซชีวภาพผ่านสารดูดซับในคอลัมน์เป็น 0.101 นาที แสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$V\,(m/s) = 0.167\frac{Q\,(L/min)}{A\,(cm^2)} = 0.167\frac{6\ L/min}{15.21\ cm^2} = 0.066\ m/s$$

เมื่อ V คือ ความเร็วของก๊าซชีวภาพ (m/s)

0.167 คือ แฟคเตอร์การเปลี่ยนหน่วย

Q คือ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (L/min)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (cm^2)

$$T_r\,(min) = 0.001\frac{v\,(cm^3)}{Q\,(L/min)} = 0.001\frac{608.45\ cm^3}{6\ L/min} = 0.101\ min$$

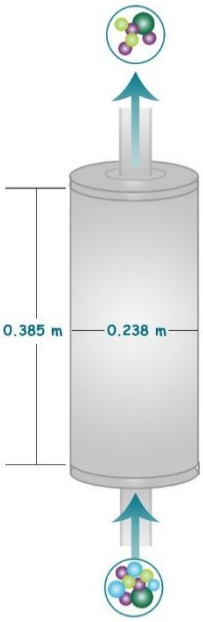
เมื่อ T_r คือ เวลาที่เหมาะสมในการเคลื่อนที่ของก๊าซชีวภาพ (min)

0.001 คือ แฟคเตอร์การเปลี่ยนหน่วย

v คือ ปริมาตรของคอลัมน์ (cm^3)

Q คือ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (L/min)

นำไปสู่การออกแบบคอลัมน์สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็กที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อวันและมีดำเนินการเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน ต้องใช้คอลัมน์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.238 เมตรและมีความสูง 0.385 เมตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-15 ดำเนินการที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 0.2 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที โดยใช้ถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 12.897 กิโลกรัม ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร



ภาพประกอบที่ 4-15 คอลัมน์สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็ก

4.7 ผลประเมินทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis)

ทำการประเมินค่าใช้จ่ายด้านวัสดุและสารเคมีโดยพิจารณาจากการออกแบบคอลัมน์สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็ก โดยใช้ถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 12.897 กิโลกรัม ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีอัตราส่วนของน้ำหนักถ่านกัมมันต์ต่อปริมาตรสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็น 100:150 คิดเป็นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.967 กิโลกรัม โดยค่าใช้จ่ายด้านวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถแสดงรายละเอียดการคำนวณดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายด้านวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

วัสดุและสารเคมี	**จำนวน (กิโลกรัม)**	**ราคา (บาท/กิโลกรัม)**	**ราคา (บาท)**
ถ่านกัมมันต์	12.897	175	2,257
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	0.967	115.56	111.75
ราคารวม	2,368.75 บาท		

ในหนึ่งวันฟาร์มสุกรสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 100 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านวัสดุและสารเคมีในการกำจัดก๊าซไฮโรเจนซัลไฟด์ 2,368.75 บาท ซึ่งคิดเป็นค่าใช้จ่าย 23.68 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ทำการประเมินค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าโดยพิจารณาจากกำลังของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วย ปั๊มเก็บอากาศ (Air sampling pump) ยี่ห้อ Hailea รุ่น ACO-009 ใช้สำหรับการดูดก๊าซชีวภาพจากบ่อหมักเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จำนวน 1 เครื่อง โดยค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถคำนวณได้ตามสมการ (4-2) ซึ่งรายละเอียดสามารถแสดงดังตารางที่ 4-6

$$Cost = W \times C \qquad (4\text{-}2)$$

เมื่อ W คือ หน่วยการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)

C คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)

ตารางที่ 4-6 ผลการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

อุปกรณ์ไฟฟ้า	จำนวน (เครื่อง)	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	ระยะเวลาการใช้งาน (ชั่วโมงต่อวัน)	หน่วยการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน)
ปั๊มเก็บอากาศ (ACO-009)	1	0.120	8	0.96
อัตราค่าใช้ไฟฟ้า	0.96 หน่วยต่อวัน			

จากตารางที่ 4-6 ค่าการคำนวนอัตราการใช้ไฟฟ้าในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพโดยใช้ปั๊มเก็บอากาศยี่ห้อ Hailea รุ่น ACO-009 มีกำลังไฟ 120 วัตต์ จำนวน 1 เครื่อง พบว่าการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นเวลา 8 ชั่วโมง คิดเป็นอัตราการใช้ไฟฟ้าได้ 0.96 หน่วยต่อวัน ซึ่งเท่ากับ 28.8 หน่วยต่อเดือน ซึ่งเมื่อพิจารณาอัตราค่าไฟฟ้ามีค่าพลังงานไฟฟ้า 3.9361 บาทต่อหน่วยและเมื่อคำนวนค่าไฟฟ้าตามสมการที่ (4-2) จะได้ 28.8 x

3.9361 = 113.36 บาทต่อเดือน ซึ่งในหนึ่งวันฟาร์มสุกรสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 100 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าในการกำจัดก๊าซไฮโรเจนซัลไฟด์ 0.038 บาทต่อลูกบาศก์เมตร โดยรายละเอียดการคำนวณสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Electical cost} = 113.36\frac{\text{bath}}{\text{month}} \text{ x } \frac{1\text{ month}}{30\text{ day}} \text{ x } \frac{1\text{ day}}{100\text{ m}^3} = 0.038\ \frac{\text{bath}}{\text{m}^3}$$

ดังนั้น เมื่อทำการประเมินค่าใช้จ่ายของวัสดุ สารเคมี และค่าพลังงานไฟฟ้า พบว่าในการบำบัดก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าใช้จ่าย 23.68+0.038 = 23.718 บาท

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซับทางเคมีโดยใช้สารดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) ซึ่งกำหนดเกณฑ์การหมดประสิทธิภาพของสารดูดซับที่ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออกมากกว่า 200 ppmv ทำการออกแบบชุดอุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซชีวภาพชนิดแพ็คคอลัมน์ (Packed bed adsorption column) และหาสภาวะที่เหมาะสมของชุดอุปกรณ์โดยคำนึงถึงความเหมาะสมกับการใช้งานในระดับครัวเรือนโดยการใช้หลักการทางสถิติด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD ในการออกแบบการทดลอง สามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ คือ การใช้อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที น้ำหนักของสารดูดซับ 77.0 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์ 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำให้ระบบหมดประสิทธิภาพเมื่อเวลาผ่านไป 144 นาที โดยระบบมีความเร็วของก๊าซชีวภาพเป็น 0.066 เมตรต่อนาทีและมีเวลาที่เหมาะสมในการเคลื่อนที่ของก๊าซชีวภาพผ่านสารดูดซับในคอลัมน์เป็น 0.101 นาที การเปรียบเทียบชนิดของสารดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์และถ่านจากไม้ยางพาราที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต พบว่าถ่านกัมมันต์เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตให้ประสิทธิภาพสูงสุด วิธีการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ที่เหมาะสม คือ วิธีการเคลือบใหม่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยสามารถใช้ซ้ำได้เพียงครั้งเดียว และทำการประเมินค่าใช้จ่ายของวัสดุ สารเคมี และค่าพลังงานไฟฟ้า พบว่าในการบำบัดก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าใช้จ่าย 23.718 บาท

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรทำการศึกษาการขยายขนาดของคอลัมน์โดยใช้ความรู้จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้เพื่อให้ได้สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

2) ศึกษาการเคลือบสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตลงบนถ่านกัมมันต์ด้วยกระเคลือบแบบแห้ง (Dry impregnation method) เพื่อทำให้สารเคมีสามารถเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้เกือบทั้งหมด อาจเกิดการตกค้างบนภาชนะที่ใช้ในการเคลือบเพียงเล็กน้อย

3) ศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยการกระตุ้นซ้ำด้วยไอน้ำ

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2558. สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย มกราคม-กันยายน 2558 [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.dede.go.th/download/ state_58/sit_57_58/frontpage_sep58%20(1).pdf. สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2558.

จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ. 2552. อุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดก๊าซและไอ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.safety-stou.com/UserFiles/File/54114-6.pdf. สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2556.

จุฑารัตน์ ชมพันธุ์. 2555. ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือก๊าซไข่เน่า ก๊าซพิษที่ไม่ควรมองข้าม [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/chemical-hazards/item/62-แก๊สไฮโดร เจนซัลไฟด์หรือแก๊สไข่เน่า-แก๊สพิษที่ไม่ควรมองข้าม. สืบค้นเมื่อ 30 สิงหาคม 2557.

เจษฎา มิ่งฉาย สร้อยรัตน์ดา สามโพธิ์ศรี ลือ เกิดสาย และประวัติ คำจีน. 2556. ก๊าซชีวภาพ: พลังงานทางเลือกเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน [ออนไลน์], แหล่งที่มา : http://www.clinictech.most.go.th/online/techlist/attachFile/2013112064401.pdf. สืบค้นเมื่อ 30 สิงหาคม 2557

บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์. 2551. ถ่านปลุกฤทธิ์! [ออนไลน์], แหล่งที่มา : http://www.neutron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=1606. สืบค้นเมื่อ 2 กรกฎาคม 2556

ปรารถนา โป่งฟ้า. 2551 Adsorption Process [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://pradthana.wordpress.com/ tag/ adsorption-process/. สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2556.

มณฑาสินี หอมหวาน. 2555. พลังงานทดแทน พลังงานทางเลือกใหม่สำหรับอนาคต [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.bu.ac.th/knowledgecenter/executive_journal/jan_mar_12/pdf/aw014.pdf. สืบค้นเมื่อ 30 สิงหาคม 2557.

วงศ์วิวรรธ ธนูศิลป์และสุนันทา เลาวัณย์ศิริ. 2557. การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพโดยใช้ถ่านกัมมันต์และเหล็ก [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://researchconference.kps.ku.ac.th/article_9/ pdf/o_sci_tech14.pdf. สืบค้นเมื่อ 30 สิงหาคม 2557.

วรพจน์ กนกกันฑพงษ์. 2554. การเพิ่มประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ในการดูดซับอลูมิเนียมและเหล็กโดยเปอร์แมงกาเนต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมกาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์ข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์. 2544. Hydrogen Sulfide [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=153. สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2556.

สุชน ตั้งทวีพิพัฒน์และคณะ. 2555. การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพสำหรับชุมชน. แก่นเกษตร. 40, ฉบับพิเศษ 2, 201-204.

สำนักวิจัย ค้นคว้าพลังงาน (สวค.) กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงานการ. 2556. ผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียฟาร์มปศุสัตว์และโรงงานอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www2. dede.go.th/km_ber/Attach/ Biogas-present.pdf. สืบค้นเมื่อ 2 กรกฎาคม 2556.

Allegue L.B. and Hinge J. 2014. Biogas upgrading Evaluation of methods for H_2S removal. Available online at http://www.teknologisk.dk/_/media/60599_Biogas%20upgrading.%20Evaluation%20of %20methods%20for%20H2S%20removal.pdf. [30 August 2014].

Alvarez L.F. 2000. Design optimization based on genetic programming. Available online at http://www.brad.ac.uk/staff/vtoropov/burgeon/thesis_luis/chapter3.pdf [20 October 2015]

Bagreev A., Rahman H., Bandosz T.J. 2001. Thermal regeneration of a spent activated carbon previously used as hydrogen sulfide adsorbent. Carbon. 39, 1319–1326.

Boudou J.P., Chehimib M., Broniekc E., Siemieniewskac T., Bimerd J. 2003. A dsorption of H_2S or SO_2 on an activated carbon cloth modified by ammonia treatment. Carbon. 41, 1999–2007.

Cal M.P., Strickler B.W., Lizzio A.A. 2000. High temperature hydrogen sulfide adsorption on activated carbon I. Effects of gas composition and metal addition. Carbon. 38, 1757–1765.

Chen H., Wang H., Xue Z., Yang L., Xiao Y., Zheng M., Lei B., et al. 2012. High hydrogen storage capacity of rice hull based porous carbon. International journal of hydrogen energy. 37, 18888-18894.

Feng W., Kwon S., Borguet E., Vidic A. 2005. Adsorption of Hydrogen Sulfide onto Activated Carbon Fibers: Effect of Pore Structure and Surface. Chemistry. Environmental Science and Technology. 39, 9744-9749.

Guo J., Luo Y., Lua A.C., Chi R., Chen Y., Bao X., Xiang S. 2007. Adsorption of hydrogen sulphide (H_2S) by activated carbons derived from oil-palm shell. Carbon. 45, 330–336.

Ortiz F.J., Aguilera P.G., Ollero P. 2014. Biogas desulfurization by adsorption on thermally treated sewage-sludge. Separation and Purification Technology. 123, 200–213.

Shaaban A., Se S., Dimin M.F., Juoi J.M., Husin M.H., Mitan N.M. 2014. Influence of heating temperature and holding time on biochars derived from rubber wood sawdust via slow pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 107, 31–39.

Shang G., Shen G., Liu L., Chen Q., Xu Z. 2013. Kinetics and mechanisms of hydrogen sulfide adsorption by biochars. Bioresource Technology. 133, 495–499

Sitthikhankaewa R., Predapitakkunb S., Kiattikomolb R., Pumhiranb S., Assabumrungrat S., Laosiripojana N., 2011. Performance of commercial and modified activated carbons for hydrogen sulfide removal from simulated biogas. IEEE first conference on clean energy and technology CET, 135-139.

Tonkunya N. and Wongwuttanasatian T. 2013. Utilization of biogas-diesel mixture as fuel in a fertilizer pelletising machine for reduction of greenhouse gas emission in small farms. Energy for Sustainable Development. 17, 240–244.

Xiao Y., Wang S., Wu D., Yuan Q. 2008. Catalytic oxidation of hydrogen sulfide over unmodified and impregnated activated carbon. Separation and Purification Technology. 59, 326–332.

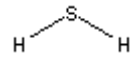
Zhonghua H. and Srinivasan M.P. 1999. Preparation of high-surface-area activated carbons from coconut shell. Microporous and Mesoporous Materials. 27, 11–18.

ภาคผนวก ก
ข้อมูลเบื้องต้นสารเคมี

ภาคผนวก ก

ข้อมูลเบื้องต้นสารเคมี

ก-1 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide)

ชื่อเคมี IUPAC	:	Hydrogen sulphide
สูตรโมเลกุล	:	H_2S
สูตรโครงสร้าง	:	
ชื่อวงศ์	:	Nonmetal hydride

<u>คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี</u> (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	:	ก๊าซและของเหลวภายใต้ความร้อน
สี	:	ไม่มีสี
กลิ่น	:	ก๊าซไข่เน่า
น้ำหนักโมเลกุล	:	34.04
จุดเดือด	:	-60.2 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง	:	-85.7 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1)	:	1.45
ความหนาแน่นไอ (อากาศ=1)	:	1.21
ข้อมูลทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ	:	สารนี้ไวต่อความชื้น

<u>อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)</u>

- สัมผัสทางหายใจ

การหายใจเข้าไปทำให้วิงเวียนศีรษะ คลื่นไส้ ถ้าได้รับสารปริมาณมากจะทำให้หมดสติหรือมีอาการโคม่า อาจทำให้เสียชีวิตได้

- สัมผัสทางผิวหนัง

การสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง

- สัมผัสถูกตา

การสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคือง โรคเยื่อบุตาอักเสบ และเยื่อตาขาวได้รับบาดเจ็บ

โดยหน่วยงาน The American National Standards Institute standard ได้แบ่งระดับผลกระทบต่อร่างกายตามระดับความเข้มข้นก๊าซที่ได้รับ และระยะเวลาสัมผัส แสดงดังตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 ผลกระทบต่อร่างกายของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Jutarut, 2555)

ระดับความเข้มข้นของ H_2S	**ระยะเวลาที่ได้รับ**	**ผลกระทบต่อร่างกาย**
10 ppmv	ขณะที่ได้สัมผัสและสูดดม	เกิดอาการระคายเคืองที่ดวงตา
50-100 ppmv	1 ชั่วโมง	จะส่งผลระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อนัยน์ตา และระบบทางเดินหายใจทำให้หายใจติดขัด
100 ppmv	2 ถึง 15 นาที	จะเกิดอาการไอ ระคายเคืองที่ดวงตา สูญเสียการรับรู้กลิ่น
	16 ถึง 30 นาที	หากมีอาการสูดดมหรือสัมผัสต่อไป จะทำระบบหายใจเริ่มติดขัด หายใจลำบากขึ้น เริ่มเจ็บที่นัยน์ตาและมีอาการมึนงงตามมา
	1 ชั่วโมง	หากมีอาการสูดดมหรือสัมผัสต่อไปจะมีอาการแสบปวดร้อนที่คอเพิ่มขึ้นมาจากอาการก่อนหน้านี้ และหากยังมีการสูดดมต่อเนื่องต่อไปจะทำให้เสียชีวิตภายในระยะเวลา 48 ชั่วโมงต่อมา
200-300 ppmv	1 ชั่วโมง	หากมีอาการสูดดมหรือสัมผัส จะส่งผลต่อระบบเนื้อเยื่อในตาและระบบหายใจอย่างรุนแรง หายใจติดขัด ปวดแสบที่ลำคอและนัยน์ตา
500-700 ppmv	30 ถึง 60 นาที	หากมีอาการสูดดมหรือสัมผัสจะทำให้สมองถูกทำลาย สูญเสียความสามารถในการสั่งการและอาจถึงขั้นเสียชีวิต
700 1000 ppmv	ช่วงเวลาสั้นๆ	หากมีอาการสูดดมหรือสัมผัสจะทำให้หมดสติอย่างรวดเร็วหยุดการหายใจและเสียชีวิต
1000 2000 ppmv	ทันทีที่ได้รับ	หากมีอาการสูดดมหรือสัมผัสจะทำให้หมดสติทันที หยุดการหายใจและเสียชีวิตในเวลาอันรวดเร็ว
หมายเหตุ	ผู้ที่หยุดหายใจในระยะเวลาสั้นอาจจะรอดชีวิตได้ ต้องนำตัวออกจากบริเวณที่ก๊าซมีระดับความเข้มข้นสูงมาสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ในเวลาอันรวดเร็ว	

การปฐมพยาบาล(First Aid)

- หายใจเข้าไป

ถ้าหายใจเข้าไปให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจติดขัดให้ออกซิเจนและช่วยรักษาร่างกายผู้ป่วยให้อบอุ่น นำส่งไปพบแพทย์

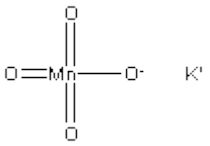
- สัมผัสถูกผิวหนัง

ถ้าสัมผัสถูกผิวหนังให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำปริมาณมาก

- สัมผัสถูกตา

ถ้าสัมผัสถูกตาให้ฉีดล้างตาทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาทีและนำส่งแพทย์

ก-2 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium Permanganate)

ชื่อเคมี IUPAC	:	Potassium permanganate
สูตรโมเลกุล	:	$KMnO_4$
สูตรโครงสร้าง	:	

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	:	ผลึก
สี	:	สีม่วง-บรอนซ์
กลิ่น	:	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	:	158.03
จุดเดือด	:	-
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง	:	240 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1)	:	2.7
ความหนาแน่นไอ (อากาศ=1)	:	-
ข้อมูลทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ	:	อุณหภูมิสลายต่ำ > 240 องศาเซลเซียส

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

- สัมผัสทางหายใจ

การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการไอ หายใจถี่รัว และการหายใจเอาสารที่มีความเข้มข้นสูงสามารถทำให้เกิดอาการน้ำท่วมปอดได้

- สัมผัสทางผิวหนัง

การสัมผัสถูกผิวหนังจะทำให้ผิวแห้งเป็นขลุยและสารละลายที่เข้มข้นจะทำให้มีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้เกิดผื่นแดง ปวด เป็นแผลไหม้อย่างรุนแรง เป็นจุดด่างสีน้ำตาลบริเวณที่สัมผัสถูกและทำให้ผิวหนังด้านขึ้น สารละลายเจือจางจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังเพียงเล็กน้อย

- สัมผัสถูกตา

การสัมผัสถูกตาสารละลายเข้มข้นจะก่อให้เกิดอาการระคายเคืองอย่างรุนแรงทำให้การมองเห็นไม่ชัด และอาจจะทำให้ตาบอดได้

- กินหรือกลืนเข้าไป

การกลืนหรือกินสารนี้ในสภาพของแข็งหรือในสภาพที่มีความเข้มข้นสูงเข้าไป จะทำให้ระบบการย่อยอาหารเกิดเป็นแผลไหม้อย่างรุนแรงและมีอาการบวมน้ำ ชีพจรเต้นเร็ว ความดันโลหิตลดต่ำลงจนทำให้หมดสติและอาจถึงแก่ความตายได้ ถ้ากลืนหรือกินสารที่มีความเข้มข้น 1% จะทำให้ลำคอไหม้ คลื่นไส้ อาเจียน และปวดท้อง ที่ความเข้มข้น 2-3% จะทำให้เป็นโรคโลหิตจาง และลำคอบวม ทำให้หายใจไม่ออก และที่ความเข้มข้น 4-5% ไตถูกทำลาย

- การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ

การสัมผัสถูกผิวหนังนานๆ จะทำให้เกิดการระคายเคือง ชั้นไขมันของผิวหนังถูกทำลายและทำให้ผิวหนังอักเสบ ทำให้เกิดอาการแพ้พิษแมงกานีสจากการหายใจเอาฝุ่นเข้าไปมากๆ เป็นอันตรายต่อประสาทส่วนกลาง เกิดอาการเชื่องช้า ง่วงนอน และแขนขาอ่อนแอไม่มีแรง

การปฐมพยาบาล (First Aid)

- สัมผัสทางหายใจ

ถ้าหายใจเข้าไปให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกไปที่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจติดขัดให้ออกซิเจนช่วย แล้วรีบนำส่งไปพบแพทย์

- สัมผัสถูกผิวหนัง

ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำปริมาณมากๆ อย่างน้อย 15 นาที พร้อมถอดเสื้อผ้าและรองเท้าออก แล้วรีบนำส่งไปพบแพทย์ทันที

ถ้าสัมผัสถูกตา ให้ฉีดล้างตาทันทีด้วยน้ำปริมาณมากๆ อย่างน้อย 15 นาที พร้อมกระพริบตาถี่ขณะทำการล้าง แล้วรีบนำส่งไปพบแพทย์ทันที

- กินหรือกลืนเข้าไป

ถ้ากินหรือกลืนเข้าไป อย่ากระตุ้นให้เกิดการอาเจียนให้ดื่มน้ำปริมาณมากๆ แล้วรีบนำส่งไปพบแพทย์ทันที

ก-3 ไอโอดีน (Iodine)

ชื่อเคมี IUPAC	:	Iodine
สูตรโมเลกุล	:	I_2
สูตรโครงสร้าง	:	I——I
ชื่อวงศ์	:	Halogen

<u>คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี</u> (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	:	ผง
สี	:	สีน้ำตาลแดง หรือเทาดำ
กลิ่น	:	ฉุน
น้ำหนักโมเลกุล	:	253.81
จุดเดือด	:	184.4 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง	:	113.5 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1)	:	4.98
ความหนาแน่นไอ (อากาศ=1)	:	-
ข้อมูลทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ	:	การระเหยโดยปริมาตร 100%

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

- สัมผัสทางหายใจ

การสัมผัสทางหายใจ มีความเป็นพิษทำให้เกิดการระคายเคืองจมูก ลำคอ และอาจเกิดแผลไหม้ได้ มีอาการปวดศีรษะ แน่นหน้าอก คลื่นไส้ และระบบไหลเวียนหยุดทำงานได้

- สัมผัสทางผิวหนัง

การสัมผัสถูกผิวหนัง จะทำให้เกิดการระคายเคืองที่ผิวหนัง และเกิดแผลไหม้บริเวณผิวส่วนที่สัมผัสกับสาร

- สัมผัสถูกตา

การสัมผัสถูกตา ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อตา และอาจเกิดแผลไหม้ได้ มีอาการน้ำตาไหล

- กินหรือกลืนเข้าไป

การกลืนหรือกินเข้าไป จะทำให้เกิดการระคายเคืองของลำคอ มีอาการปวดท้อง ท้องร่วง การรับสารโดยการกินหรือกลืนเข้าไปในปริมาณมากอาจมีอันตรายถึงแก่ชีวิตได้

- การก่อมะเร็ง ความผิดปกติ,อื่น ๆ

มีผลทำลายอวัยวะรับความรู้สึก ทางเดินอาหาร ต่อมไร้ท่อต่างๆ และเป็นอันตรายต่อทารกในครรภ์

การปฐมพยาบาล (First Aid)

- สัมผัสทางหายใจ

ถ้าหายใจเข้าไป ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่ที่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจติดขัดให้ออกซิเจนช่วย และนำส่งไปพบแพทย์

- สัมผัสถูกผิวหนัง

ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างอย่างทั่วถึงทันทีด้วยน้ำปริมาณมาก ๆ

- สัมผัสถูกตา

ให้ฉีดล้างทันทีโดยไหลผ่านอย่างน้อย 15 นาที

- กินหรือกลืนเข้าไป

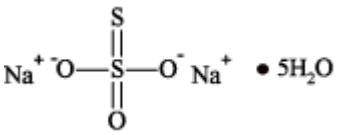
ถ้ากินหรือกลืนเข้าไป ให้เข้ารับการดูแลโดยแพทย์ทันที

ก-4 โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulphats pentahydrate)

ชื่อเคมี IUPAC : Sodium thiosulphats pentahydrate

สูตรโมเลกุล : $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$

สูตรโครงสร้าง :



คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ : ของเหลว

สี : ไม่มีสี

กลิ่น : ไม่มีกลิ่น

น้ำหนักโมเลกุล : 248.18

จุดเดือด : -

จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง : 40-45 องศาเซลเซียส

ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1) : 1.729

ความหนาแน่นไอ (อากาศ=1) : -

ข้อมูลทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ : สารนี้สามารถสลายตัวเมื่อให้ความร้อน

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

- สัมผัสทางหายใจ

การหายใจเอาไอของสารเข้าไป จะก่อให้เกิดการระคายเคืองบริเวณจมูกและทางเดินหายใจ

- สัมผัสทางผิวหนัง

การสัมผัสถูกผิวหนัง จะทำให้ระคายเคืองต่อผิวหนัง

- สัมผัสถูกตา

การสัมผัสถูกตาจะทำให้ระคายเคืองต่อตา

- กินหรือกลืนเข้าไป

การกลืนกินสารเข้าไป จะทำให้ระคายเคืองทางเดินอาการ

การปฐมพยาบาล (First Aid)

- สัมผัสทางหายใจ

ถ้าหายใจเข้าไป ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยไปที่อากาศบริสุทธิ์ ถ้าหายใจติดขัดให้ออกซิเจน ถ้าหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด นำส่งไปพบแพทย์

- สัมผัสถูกผิวหนัง

ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ถอดเสื้อผ้าออกล้างสารออกจากผิวหนังด้วยสบู่และน้ำเป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที หากยังมีอาการระคายเคืองอยู่ นำส่งไปพบแพทย์

- สัมผัสถูกตา

ถ้าสัมผัสถูกตา ให้ล้างด้วยน้ำสะอาดปริมาณมากๆ เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที เปิดเปลือกตาขึ้นขณะที่ล้าง หากยังมีอาการระคายเคืองอยู่นำส่งไปพบแพทย์

- กินหรือกลืนเข้าไป

ถ้ากลืนหรือกินสารเข้าไป ห้ามนำสิ่งใดเข้าปากผู้ป่วยที่หมดสติ หรือมีอาการชัก ถ้าผู้ป่วยยังมีสติ ให้ล้างปาก อย่าทำให้อาเจียน ให้ดื่มน้ำ 200-400 มิลลิลิตร เพื่อเจือจางสาร นำส่งไปพบแพทย์ทันที

ภาคผนวก ข
การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ภาคผนวก ข

การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ข-1 การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$)

หลักการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมออกซาเลตซึ่งเป็นสารละลายมาตรฐาน โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) สารละลายโซเดียมออกซาเลตจะถูกออกซิไดซ์ด้วยสารสะลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ใช้เป็นสารไทแทรนด์ให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในสารละลายที่เป็นกรดโดยใช้กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) เป็นอินดิเคเตอร์ ปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการ (ข-1)

$$2KMnO_4 + 5Na_2C_2O_4 + 8H_2SO_4 \longrightarrow 2MnSO_4 + 5Na_2SO_4 + K_2SO_4 + 10CO_2 + 8H_2O \quad \text{(ข-1)}$$

วิธีการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสำหรับการวิเคราะห์ความสามารถในการละลาย

1. ชั่งโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3.0, 5.0, 7.0, 9.0, และ 11.0 กรัม ละลายในน้ำกลั่นให้สารละลายมีปริมาตร 100 มิลลิลิตรเพื่อให้ได้สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรตามลำดับ
2. ต้มสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตให้เดือดนานประมาณ 15 นาที
3. บรรจุสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตลงในขวดแก้วสีอำพันที่มีจุกแก้วปิดสนิท และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 2 วัน การเก็บสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตควรเก็บในภาชนะที่เป็นแก้วทั้งหมดและเป็นภาชนะที่ป้องกันแสดงได้ เนื่องจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชั่น (Reduction) ได้ง่ายมากเมื่อสัมผัสกับสารอินทรีย์ เช่น จุกยาง เป็นต้น และแสงทำให้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสลายตัวได้
4. นำสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมาวิเคราะห์ความเข้มข้นมาตรฐาน

วิธีวิเคราะห์ความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลายสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

1. อบโซเดียมออกซาเลตให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่แล้วจึงนำมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น
2. ชั่งโซเดียมออกซาเลต 0.5 มิลลิกรัม อย่างแม่นยำ
3. ละลายในน้ำ 100 มิลลิลิตร
4. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3.5 มิลลิลิตร
5. ให้ความร้อนแก่สารละลายโซเดียมออกซาเลตจนสารละลายมีอุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส
6. ไทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตช้าๆ พร้อมกับกวนสารละลายให้ทั่วถึงอย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งสารละลายเป็นสีชมพูจางๆ คงอยู่นานอย่างน้อย 15 วินาทีถือเป็นจุดยุติโดยที่อุณหภูมิระหว่างการไทเทรตจนถึงจุดยุติไม่ควรต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส
7. ทำ blank determination โดยเริ่มทำจากข้อ 2
8. คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในหน่วยนอร์มอล (N)

$$N_{KMnO_4} = 1000.0W_{Na_2C_2O_4}/67.0V_{KMnO_4} \qquad \text{(ข-2)}$$

เมื่อ N_{KMnO_4} คือ ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (นอร์มอล)

$W_{Na_2C_2O_4}$ คือ น้ำหนักของโซเดียมออกซาเลต (กรัม)

V_{KMnO_4} คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (มิลลิลิตร)

โดยจากสมการ (ข-1) 5 โมเลกุลของโซเดียมออกซาเลตสูญเสีย 10 อิเล็กตรอน เมื่อถูกออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตนั่นคือโซเดียมออกซาเลต 1 โมเลกุล สูญเสีย 2 อิเล็กตรอนแสดงว่า น้ำหนักสมมูล (equivalent weight) ของโซเดียมออกซาเลตเท่ากับครึ่งหนึ่งของน้ำหนักโมเลกุล คือ 67.0 กรัม ดังนั้น โซเดียมออกซาเลต 6.70 มิลลิกรัมจะสมมูลกับ 1 มิลลิลิตรของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.1 นอร์มอล

9. คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจากหน่วยนอร์มอล (N) เป็นหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร (%w/v)

โดย สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.1 N = 0.02 M

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในหน่วยโมลาริตี (M)

$$M_{KMnO_4} = 0.2N_{KMnO_4} \quad \text{(ข-3)}$$

เมื่อ M_{KMnO_4} คือ ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (M)

0.2 คือ สัมประสิทธิ์ของการแปลงหน่วย (-)

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร (%w/v)

$$(\%w/v)_{KMnO_4} = 15.803M_{KMnO_4} \quad \text{(ข-4)}$$

เมื่อ $(\%w/v)_{KMnO_4}$ คือ ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)

0.158 คือ สัมประสิทธิ์ของการแปลงหน่วย (-)

ตัวอย่างการคำนวณ

1. หาค่า N_{KMnO_4}จากสมการ (ข-2)

$$N_{KMnO_4} = 1000.0W_{Na_2C_2O_4}/67.0V_{KMnO_4} \quad (ข\text{-}2)$$

เมื่อ $W_{Na_2C_2O_4}$ = น้ำหนักของโซเดียมออกซาเลต = 0.066 g

V_{KMnO_4} =ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต= 1.1 ml

แทนค่าในสมการ (ค-2) จะได้ $N_{KMnO_4} = \frac{1000*0.066g}{67.0*1.1ml}$ = 0.9 N

ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีค่าเท่ากับ 0.9 N

2. หาค่า M_{KMnO_4}จากสมการ (ข-3)

$$M_{KMnO_4} = 0.2N_{KMnO_4} \quad (ข\text{-}3)$$

เมื่อ N_{KMnO_4} = ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต = 0.9 N

แทนค่าในสมการ (ค-3) จะได้ $M_{KMnO_4} = 0.2 \times 0.9$ N = 0.18 M

ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีค่าเท่ากับ 0.18 M

3. หาค่า M_{KMnO_4}จากสมการ (ข-3)

$$(\%w/v)_{KMnO_4} = 15.803M_{KMnO_4} \quad (ข\text{-}4)$$

เมื่อ M_{KMnO_4} = ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต = 0.18 M

แทนค่าในสมการ (ข-4) จะได้ $(\%w/v)_{KMnO_4} = 15.803 \times 0.18$ M = 2.84% w/v

ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีค่าเท่ากับ 2.84% w/v

ข-2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยวิธีไอโอโดเมตริก (Iodometric Method)

หลักการวิเคราะห์

สารประกอบซัลไฟด์ที่สามารถละลายได้ด้วยกรด (Acid Soluble Sulfide) ให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) ไฮโดรเจนซัลไฟด์อิออน (HS-) และซัลไฟด์อิ-ออน (S=) โดยจะเรียกรวมกันว่า "ซัลไฟด์" โดยซัลไฟด์ที่ได้ในตัวอย่างจะทำปฏิกิริยากับไอโอดีนที่มากเกินพอแต่ทราบปริมาณที่แน่นอน (Known amount of Iodine) ที่เติมลงไปในสารละลายในสภาวะที่เป็นกรดซัลไฟด์ในสารละลายจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นซัลเฟอร์แล้วทำการไทเทรตไอโอดีนส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium Thiosulfate) เพื่อหาปริมาณของไอโอดีนส่วนที่ทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์จากนั้นคำนวณเทียบกลับเพื่อหาปริมาณซัลไฟด์ต่อไป การวิเคราะห์โดยวิธีนี้จะให้ความแม่นยำสูงในตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณซัลไฟด์ไม่น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตรแต่ต้องอยู่บนพื้นฐานที่ว่าต้องไม่มีสารแทรกสอดในตัวอย่างน้ำที่วิเคราะห์และการระเหยหนีของไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากวิธีไทเทรตแบบไอโอโดเมตริกนี้เป็นวิธีที่ดีแม่นยำถูกต้องและยังมีประโยชน์ในการปรับเทียบมาตรฐานสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ที่ใช้ในวิธีเทียบสีของ Methylene Blue ด้วยวิธีไทเทรตแบบไอโอโดเมตริกเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำที่เก็บมาจากแหล่งน้ำหรือบ่อน้ำรวมทั้งสามารถใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้งจากบ้านเรือนหรือน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ด้วยถ้าสามารถกำจัดสารแทรกสอดออกจากตัวอย่างน้ำก่อนจะทำการวิเคราะห์ได้

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) 0.135 โมลต่อลิตร

   ชั่ง $3CdSO_4 \cdot 8H_2O$ 41 กรัม ละลายในน้ำปราศจากอิออน หลังจากนั้นเติมสารละลายกรดซัลฟูริก 0.1 โมลต่อลิตร 15 มิลลิลิตร แล้วจึงปรับด้วยน้ำปราศจากอิออนให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

   <u>หมายเหตุ</u> สารละลายที่เตรียมต้องมี pH เท่ากับ 3 ± 0.1

1.1 สารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 0.1 โมลต่อลิตร

ปิเปตกรดซัลฟูริก 95 ร้อยละโดยมวล 0.56 มิลลิลิตร แล้วจึงปรับด้วยน้ำปราศจากอิออนให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

1.2 สารละลายแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) 0.067 โมลต่อลิตร

ปิเปตสารละลายแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) 0.135 โมลต่อลิตร 500 มิลลิลิตร แล้วจึงปรับด้วยน้ำปราศจากอิออนให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

2. สารละลายไอโอดีน (I_2) 0.1 นอร์มอล

ละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 24 กรัม ในน้ำปราศจากอิออน 30 มิลลิลิตร แล้วใส่ผลึกไอโอดีน 12.7 กรัม ลงในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ เขย่าให้เข้ากัน และตั้งสารละลายที่เตรียมไว้ในที่มืด 1 คืน แล้วจึงปรับด้วยน้ำปราศจากอิออนให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

2.1 สารละลายไอโอดีน (I_2) 0.01 นอร์มอล

ปิเปตสารละลายไอโอดีน 0.1 นอร์มอล 100 มิลลิลิตร แล้วจึงปรับด้วยน้ำปราศจากอิออนให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

<u>วิธีการหาค่ามาตรฐานสารละลายไอโอดีน (I_2) 0.1 นอร์มอล</u>

1. ปิเปตสารละลายไอโอดีน 10 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 3 โมลต่อลิตร 2 มิลลิลิตร
3. ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 นอร์มอล จนกระทั่งสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ 4 มิลลิลิตรไทเทรตจนกระทั่งสารละลายใสไม่มีสีถือเป็นจุดยุติ
4. คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนในหน่วยนอร์มอล

$$N_{I_2} = N_{Na_2S_2O_3} V_{Na_2S_2O_3} / V_{I_2} \qquad \text{(ข-2)}$$

เมื่อ N_{I_2} คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน(นอร์มอล)

$N_{Na_2S_2O_3}$ คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มอล)

$V_{Na_2S_2O_3}$ คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)

V_{I_2} คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน (มิลลิลิตร)

3. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) 0.1 นอร์มอล

ละลาย $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ 24.8 กรัม ในน้ำปราศจากอิออน 1 ลิตร หลังจากนั้นต้มให้เดือดและตั้งให้เย็น แล้วจึงใส่ Chloroform ($CHCl_3$) 0.4 มิลลิลิตร

<u>หมายเหตุ</u> ตั้งสารละลายที่เตรียมไว้ประมาณ 2 สัปดาห์ ก่อนนำมาใช้

3.1 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) 0.01 นอร์มอล

ปิเปตสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 นอร์มอล 100 มิลลิลิตร แล้วจึงปรับด้วยน้ำปราศจากอิออนให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

<u>วิธีการหาค่ามาตรฐานสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) 0.1 นอร์มอล</u>

1. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 0.1 นอร์มอล โดยการชั่งผลึกโพแทสเซียมไดโครเมต 2 กรัม แล้วอบที่อุณหภูมิ 180-200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงละลายในน้ำปราศจากอิออน 0.5 ลิตร
2. ชั่งผลึกโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพูขนาด 250 มิลลิลิตรละลายด้วยน้ำปราศจากอิออน 15 มิลลิลิตร
3. ปิเปต 0.1 นอร์มอลของสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 1 มิลลิลิตร
4. เติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 3 โมลต่อลิตร 2 มิลลิลิตร
5. ตั้งไว้ในที่มืด 5 นาที
6. ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตตัวอย่าง จนกระทั่งสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ 4 มิลลิลิตรไทเทรตจนกระทั่งสารละลายเป็นสีเขียวถือเป็นจุดยุติ
7. คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ในหน่วยนอร์มอล

$$N_{Na_2S_2O_3} = 2.039 W_{K_2Cr_2O_7} / V_{Na_2S_2O_3}$$

เมื่อ $N_{Na_2S_2O_3}$ คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มอล)

2.039 คือ แฟคเตอร์เปลี่ยนหน่วย

$$2.039 = \left(\frac{6 \text{ eq } I_2}{\text{mol } K_2Cr_2O_7}\right)\left(\frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}}\right)\left(\frac{1 \text{ mol}}{294.2 \text{ g } K_2Cr_2O_7}\right)\left(\frac{1 \text{ mol}}{10 \text{ aliquot factor}}\right)$$

$W_{K_2Cr_2O_7}$ คือ น้ำหนักของโพแทสเซียมไดโครเมต (กรัม)

V_{KMnO_4} คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)

4. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 3 โมลต่อลิตร

ละลายกรดไฮโดรคลอริก 37 ร้อยละโดยมวล 240 มิลลิลิตร ในน้ำปราศจากอิออน 0.5 ลิตร แล้วจึงปรับด้วยน้ำปราศจากอิออนให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

5. สารละลายน้ำแป้ง

ละลายผงแป้ง 10 กรัม ในน้ำปราศจากอิออน 100 มิลลิลิตร แล้วเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 15 กรัม กวนจนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ละลายทั้งหมด แล้วจึงปรับด้วยน้ำปราศจากอิออนให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง แล้วจึงเติมกรดอะซีติก 2 มิลลิลิตร

<u>หมายเหตุ</u> เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น เพื่อไม่ให้สารละลายเป็นด่าง

วิธีการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยวิธีไอโอโดเมตริก

1. ปิเปต 0.01 นอร์มอลของสารละลายไอโอดีน 50 มิลลิลิตรอย่างแม่นยำใส่ในขวดรูปชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 3 โมลต่อลิตร 10 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลายแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) 50 มิลลิลิตร ที่ได้จากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกดูดซึมในสารละลายแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$)
4. ตั้งไว้ในที่มืด 30 นาที
5. ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจนกระทั่งสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ 4 มิลลิลิตรไทเทรตจนกระทั่งสารละลายใสไม่มีสีถือเป็นจุดยุติ
6. คำนวณปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน ในหน่วยลิตร (L)

$$V_{m(std)} = V_m Y \frac{T_{std}}{T_m} \frac{P_{bar}}{P_{std}}$$

เมื่อ $V_{m(std)}$ คือ ปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน (ลิตร)

V_m คือ ปริมาตรก๊าซที่สภาวะการทดลอง (ลิตร)

Y คือ แฟคเตอร์การสอบเทียบเครื่องวัดปริมาตรอากาศแห้ง

T_{std} คือ อุณหภูมิมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส)

P_{std} คือ ความดันมาตรฐาน (1 บรรยากาศ)

T_m คือ อุณหภูมิที่สภาวะการทดลอง (องศาเซลเซียส)

P_{bar} คือ ความดันสภาวะการทดลอง (บรรยากาศ)

7. คำนวณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (mg/m^3)

$$C_{H_2S} = 17.04 * 10^3 \frac{(V_{IT}N_I - V_{TT}N_T)_{sample} - (V_{IT}N_I - V_{TT}N_T)_{\ blank}}{V_{m(std)}}$$

เมื่อ C_{H_2S} คือ ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$17.04*10^3$ คือ แฟคเตอร์เปลี่ยนหน่วย

$$17.04*10^3 = \left(\frac{34.07\ g\ H_2S}{1\ mol\ H_2S}\right)\left(\frac{1000\ L}{1\ m^3}\right)\left(\frac{1000\ mg}{1\ g}\right)\left(\frac{1\ L}{1000\ ml}\right)\left(\frac{1\ mol\ H_2S}{2\ eq\ H_2S}\right)$$

V_{IT} คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน (มิลลิลิตร)

V_{TT} คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (มิลลิลิตร)

N_I คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มอล)

N_T คือ ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (นอร์มอล)

8. คำนวณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากหน่วยมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (mg/m^3) เป็นหน่วยส่วนในล้านส่วน (ppmv)

$$C_{H_2S} = \frac{24.87\ C_{H_2S\ (mg/m^3)}}{MW_{H_2S}}$$

เมื่อ C_{H_2S} คือ ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ส่วนในล้านส่วน)

24.87 คือ ปริมาตรของก๊าซ 1 โมลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

MW_{H_2S} คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (34.082 กรัมต่อโมล)

ภาคผนวก ค
ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง

ภาคผนวก ค

ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง

ค-1 ผลการวิเคราะห์ช่วงความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

ตารางที่ ค-1.1 ผลความเข้มข้นของสารละลายสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจากการไทเทรตด้วยโซเดียมออกซาเลต

ความเข้มข้นที่เตรียมของ $KMnO_4$ (%w/v)	ปริมาตรของสารละลาย $KMnO_4$ (mL)	ความเข้มข้นของสารละลาย $KMnO_4$ (N)	ความเข้มข้นของสารละลาย $KMnO_4$ (%w/v)	ความเข้มข้นของสารละลาย $KMnO_4$ เฉลี่ย (%w/v)
3.0	8.3	0.90	2.83	2.89
	7.9	0.94	2.96	
5.0	5.0	1.51	4.76	4.84
	4.8	1.55	4.91	
7.0	3.7	2.01	6.35	6.64
	3.4	2.19	6.93	
9.0	2.9	2.61	8.23	8.23
	2.9	2.61	8.23	
11.0	2.8	2.69	8.49	8.80
	2.6	2.88	9.10	

ตารางที่ ค-1.2 ผลน้ำหนักผลึกของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เกิดจากการละลายในน้ำ

ความเข้มข้นที่เตรียมของ $KMnO_4$ (%w/v)	**น้ำหนักก่อนอบ** (g)	**น้ำหนักหลังอบ** (g)	**ปริมาณ $KMnO_4$ ที่เหลือ** (g)	**ปริมาณ $KMnO_4$ ที่เหลือเฉลี่ย** (g)
3.0	49.036	49.038	0.002	0.01
	46.508	46.529	0.021	
5.0	44.478	44.492	0.014	0.02
	43.296	43.319	0.023	
7.0	43.730	43.754	0.024	0.06
	42.515	42.61	0.095	
9.0	42.590	44.116	1.526	1.56
	48.004	49.599	1.595	
11.0	52.769	57.366	4.597	4.16
	41.468	45.185	3.717	

*น้ำหนักก่อนอบ = จานเพาะเชื้อ + กระดาษกรอง

ค-2 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD

ตารางที่ ค-2.1 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 8.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 63.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 1)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	17.90	8.80	1,295.26	0.00	100.00
15	-	8.80	-	0.00	100.00
30	17.60	8.40	1,371.90	54.93	96.22
45	-	8.30	-	67.70	95.34
60	17.20	8.00	1,474.09	106.02	92.70
75	-	7.85	-	125.18	91.38
90	17.00	7.50	1,525.19	169.89	88.30
105	-	7.30	-	195.44	86.54
120	17.20	7.25	1,474.09	201.83	86.10
135	-	6.80	-	259.31	82.14
150	17.30	6.40	1,448.55	310.40	78.63
165	-	5.80	-	387.05	73.35
180	16.80	5.50	1,576.28	425.37	70.71
Average			1,452.20		

ตารางที่ ค-2.2 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 6.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 63.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 2)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	18.30	8.40	1,029.57	0.00	100.00
15	-	8.40	-	0.00	100.00
30	17.30	8.40	1,285.04	0.00	100.00
45	-	8.40	-	0.00	100.00
60	17.20	8.00	1,310.59	47.26	96.19
75	-	7.90	-	60.04	95.16
90	17.90	7.80	1,131.76	72.81	94.13
105	-	7.60	-	98.36	92.06
120	17.40	7.10	1,259.49	162.23	86.91
135	-	6.90	-	187.77	84.85
150	17.30	6.30	1,285.04	264.42	78.67
165	-	6.20	-	277.19	77.64
180	16.95	5.90	1,374.46	315.51	74.54
Average			1,239.42		

ตารางที่ ค-2.3 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 6.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 63.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 3.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 3)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	17.10	8.70	1,430.66	0.00	100.00
15	-	8.70	-	0.00	100.00
30	17.00	8.65	1,456.21	6.39	99.62
45	-	8.60	-	12.77	99.24
60	16.00	8.40	1,711.69	38.32	97.71
75	-	8.30	-	51.10	96.95
90	16.10	8.15	1,686.14	70.26	95.81
105	-	8.10	-	76.64	95.42
120	15.50	7.70	1,839.42	127.74	92.37
135	-	7.60	-	140.51	91.61
150	15.60	7.10	1,813.88	204.38	87.80
165	-	7.00	-	217.15	87.04
180	15.70	6.00	1,788.33	344.89	79.41
Average			1,675.19		

ตารางที่ ค-2.4 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 6.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 63.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 4)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	18.50	8.80	1,047.45	0.00	100.00
15	-	8.80	-	0.00	100.00
30	18.30	8.80	1,098.54	0.00	100.00
45	-	8.60	-	25.55	97.72
60	18.20	8.40	1,124.09	51.10	95.43
75	-	8.30	-	63.87	94.29
90	18.65	8.15	1,009.13	83.03	92.58
105	-	8.00	-	102.19	90.86
120	18.10	7.70	1,149.64	140.51	87.44
135	-	7.20	-	204.38	81.73
150	18.00	7.00	1,175.19	229.93	79.45
165	-	6.50	-	293.80	73.74
180	17.80	6.40	1,226.28	306.57	72.59
Average			1,118.62		

ตารางที่ ค-2.5 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 6.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 25.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 5)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	17.40	22.00	1,016.79	68.98	95.32
15	-	19.60	-	682.12	53.69
30	17.00	18.25	1,118.98	1,027.01	30.28
45	-	16.30	-	1,525.19	0.00
60	14.50	16.10	1,757.67	1,576.28	0.00
75	-	15.90	-	1,627.38	0.00
90	15.60	15.20	1,476.65	1,806.21	0.00
105	-	14.30	-	2,036.14	0.00
120	14.90	13.80	1,655.48	2,163.88	0.00
135	-	12.95	-	2,381.03	0.00
150	14.60	12.50	1,732.12	2,496.00	0.00
165	-	11.70	-	2,700.38	0.00
180	15.30	11.20	1,553.29	2,828.11	0.00
Average			1,473.00		

ตารางที่ ค-2.6 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 4.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 63.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 6)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	17.60	8.50	1,226.28	0.00	100.00
15	-	8.50	-	0.00	100.00
30	17.50	8.50	1,251.83	0.00	100.00
45	-	8.10	-	51.10	96.38
60	17.45	7.60	1,264.60	114.96	91.85
75	-	7.30	-	153.29	89.13
90	16.40	7.20	1,532.85	166.06	88.23
105	-	7.00	-	191.61	86.42
120	16.50	6.60	1,507.31	242.70	82.79
135	-	6.15	-	300.18	78.72
150	16.40	5.70	1,532.85	357.67	74.64
165	-	5.60	-	370.44	73.74
180	16.30	5.30	1,558.40	408.76	71.02
Average			1,410.59		

ตารางที่ ค-2.7 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 40.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 8.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 7)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	16.70	22.20	1,269.71	51.10	96.74
15	-	20.60	-	459.86	70.62
30	15.40	19.50	1,601.83	740.88	52.67
45	-	19.00	-	868.62	44.51
60	15.60	18.40	1,550.74	1,021.90	34.72
75	-	17.85	-	1,162.41	25.74
90	15.90	16.60	1,474.09	1,481.76	5.34
105	-	15.80	-	1,686.14	0.00
120	14.80	15.30	1,755.12	1,813.88	0.00
135	-	15.10	-	1,864.97	0.00
150	15.20	14.70	1,652.93	1,967.16	0.00
165	-	14.40	-	2,043.80	0.00
180	15.20	13.95	1,652.93	2,158.77	0.00
Average			1,565.33		

ตารางที่ ค-2.8 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 6.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 63.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 9.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 8)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	16.00	8.47	1,635.04	0.00	100.00
15	-	8.47	-	0.00	100.00
30	16.30	8.47	1,558.40	0.00	100.00
45	-	8.47	-	0.00	100.00
60	16.20	8.40	1,583.95	8.94	99.43
75	-	8.35	-	15.33	99.03
90	16.55	7.70	1,494.53	98.36	93.78
105	-	7.20	-	162.23	89.75
120	16.30	7.10	1,558.40	175.00	88.94
135	-	6.60	-	238.87	84.90
150	16.10	5.90	1,609.50	328.29	79.25
165	-	5.75	-	347.45	78.04
180	16.00	5.50	1,635.04	379.38	76.02
Average			1,582.12		

ตารางที่ ค-2.9 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 40.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 4.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 9)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	16.60	22.10	1,489.42	102.19	94.20
15	-	20.50	-	510.95	71.02
30	16.30	18.90	1,566.06	919.71	47.84
45	-	17.10	-	1,379.57	21.76
60	14.20	16.70	2,102.56	1,481.76	15.96
75	-	16.00	-	1,660.59	5.82
90	15.60	15.50	1,744.90	1,788.33	0.00
105	-	14.80	-	1,967.16	0.00
120	15.80	14.20	1,693.80	2,120.45	0.00
135	-	13.80	-	2,222.64	0.00
150	15.20	13.50	1,847.09	2,299.28	0.00
165	-	13.20	-	2,375.92	0.00
180	15.00	12.80	1,898.18	2,478.11	0.00
Average			1,763.15		

ตารางที่ ค-2.10 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 7.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 40.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 8.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 10)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	15.70	21.90	1405.11	63.87	95.84
15	-	19.85	-	587.59	61.76
30	15.00	18.25	1583.95	996.35	35.15
45	-	16.30	-	1494.53	2.73
60	14.70	16.10	1660.59	1545.63	0.00
75	-	15.90	-	1596.72	0.00
90	14.30	14.90	1762.78	1852.20	0.00
105	-	14.50	-	1954.39	0.00
120	15.50	14.20	1456.21	2031.03	0.00
135	-	13.10	-	2312.05	0.00
150	15.60	12.60	1430.66	2439.79	0.00
165	-	12.50	-	2465.34	0.00
180	15.50	12.40	1456.21	2490.89	0.00
Average			1536.50		

ตารางที่ ค-2.11 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 85.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 8.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 11)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	17.70	8.60	1,182.85	0.00	100.00
15	-	8.60	-	0.00	100.00
30	17.55	8.50	1,221.17	16.61	98.71
45	-	8.40	-	29.38	97.71
60	17.00	8.00	1,361.68	80.47	93.73
75	-	7.70	-	118.80	90.74
90	17.20	7.50	1,310.59	144.34	88.75
105	-	6.80	-	233.76	81.78
120	17.50	6.50	1,233.95	272.08	78.80
135	-	6.25	-	304.02	76.31
150	16.90	5.80	1,387.23	361.50	71.83
165	-	5.20	-	438.14	65.86
180	17.30	4.90	1,285.04	476.46	62.87
Average			1,283.22		

ตารางที่ ค-2.12 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 7.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 85.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 8.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 12)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	19.95	8.73	638.69	0.00	100.00
15	-	8.73	-	0.00	100.00
30	19.30	8.73	804.75	0.00	100.00
45	-	8.50	-	29.38	96.41
60	18.90	8.10	906.94	80.47	90.18
75	-	7.80	-	118.80	85.50
90	19.65	7.20	715.33	195.44	76.15
105	-	5.80	-	374.27	54.32
120	18.20	5.70	1085.77	387.05	52.76
135	-	5.70	-	387.05	52.76
150	19.70	5.20	702.56	450.91	44.97
165	-	4.95	-	482.85	41.07
180	19.00	4.60	881.39	527.56	35.61
Average			819.35		

ตารางที่ ค-2.13 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 85.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 4.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 13)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	17.40	8.65	996.35	0.00	100.00
15	-	8.55	-	12.77	98.65
30	17.60	8.50	945.26	19.16	97.98
45	-	8.30	-	44.71	95.28
60	17.70	8.10	919.71	70.26	92.58
75	-	8.10	-	70.26	92.58
90	17.75	7.90	1124.09	95.80	89.88
105	-	7.55	-	140.51	85.16
120	17.90	6.50	868.62	274.64	71.00
135	-	6.40	-	287.41	69.65
150	17.80	6.35	894.16	293.80	68.98
165	-	5.60	-	389.60	58.86
180	17.85	5.20	881.39	440.70	53.47
Average			947.08		

ตารางที่ ค-2.14 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 7.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 85.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 4.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 14)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	17.40	8.70	1,366.79	0.00	100.00
15	-	8.70	-	0.00	100.00
30	17.70	8.70	1,290.15	0.00	100.00
45	-	8.60	-	15.33	98.94
60	17.50	8.40	1,341.25	40.88	97.18
75	-	7.80	-	117.52	91.89
90	16.70	7.80	1,545.63	117.52	91.89
105	-	6.90	-	232.48	83.95
120	16.80	6.80	1,520.08	245.26	83.07
135	-	6.70	-	258.03	82.19
150	16.95	6.50	1,481.76	283.58	80.43
165	-	6.00	-	347.45	76.02
180	16.50	5.70	1,596.72	385.77	73.38
Average			1,448.91		

ตารางที่ ค-2.15 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 6.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 63.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 15)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	16.10	8.50	1430.66	0.00	100.00
15	-	8.50	-	0.00	100.00
30	16.00	8.40	1456.21	15.33	99.02
45	-	8.35	-	21.72	98.61
60	15.60	8.10	1558.40	53.65	96.57
75	-	7.90	-	79.20	94.94
90	15.30	7.70	1635.04	104.74	93.31
105	-	7.40	-	143.07	90.86
120	15.50	6.90	1583.95	206.94	86.78
135	-	6.50	-	258.03	83.52
150	15.30	6.30	1635.04	283.58	81.89
165	-	5.70	-	360.22	76.99
180	15.20	5.20	1660.59	424.09	72.91
Average			1,565.70		

ตารางที่ ค-2.16 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 7.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 40.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 4.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 16)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	16.60	22.05	1,405.11	63.87	95.84
15	-	19.95	-	600.37	60.93
30	15.90	18.40	1,583.95	996.35	35.15
45	-	16.45	-	1,494.53	2.73
60	15.60	16.25	1,660.59	1,545.63	0.00
75	-	16.05	-	1,596.72	0.00
90	15.20	15.05	1,762.78	1,852.20	0.00
105	-	14.65	-	1,954.39	0.00
120	16.40	14.35	1,456.21	2,031.03	0.00
135	-	13.20	-	2,324.83	0.00
150	16.50	12.75	1,430.66	2,439.79	0.00
165	-	12.65	-	2,465.34	0.00
180	16.40	12.55	1,456.21	2,490.89	0.00
Average			1,536.50		

ตารางที่ ค-2.17 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 6.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 100.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที (การทดลองที่ 17)

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	18.10	8.50	1,098.54	0.00	100.00
15	-	8.50	-	0.00	100.00
30	17.30	8.45	1,302.92	6.39	99.45
45	-	8.40	-	12.77	98.90
60	18.10	8.00	1,098.54	63.87	94.51
75	-	7.90	-	76.64	93.42
90	18.30	7.70	1,047.45	102.19	91.22
105	-	7.60	-	114.96	90.13
120	18.00	7.40	1,124.09	140.51	87.93
135	-	7.20	-	255.48	78.06
150	18.20	7.10	1,073.00	281.02	75.86
165	-	7.00	-	344.89	70.38
180	16.90	6.90	1,405.11	395.99	65.99
Average			1,164.24		

ค-3 ผลของการเปรียบเทียบชนิดตัวดูดซับในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ตารางที่ ค-3.1 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านจากไม้ยางพาราน้ำหนักสารดูดซับ 77.0 กรัมและอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	13.60	6.90	1,244.17	178.83	87.76
15	-	7.10	-	153.29	89.51
30	11.90	12.30	1,678.47	788.14	46.07
Average			1,461.32		

ตารางที่ ค-3.2 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านจากไม้ยางพาราที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 77.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	17.10	8.30	1,302.92	63.87	94.74
15	-	8.20	-	76.64	93.68
30	17.80	7.40	1,124.09	178.83	85.26
45	-	4.40	-	562.05	53.68
Average			1,213.51		

ตารางที่ ค-3.3 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์น้ำหนักสารดูดซับ 77.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	16.30	7.00	1,021.90	0.00	100.00
15	-	7.80	-	12.77	99.05
30	15.60	6.60	1,200.73	166.06	87.68
45	-	5.90	-	255.48	81.04
60	15.00	4.60	1,354.02	421.53	68.72
75	-	3.50	-	562.05	58.29
90	13.20	2.70	1,813.88	664.24	50.71
Average			1,347.63		

ตารางที่ ค-3.4 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรโดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 77.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	16.30	8.30	1,302.92	0.00	100.00
15	-	8.30	-	0.00	100.00
30	16.20	8.00	1,328.47	38.32	97.32
45	-	7.90	-	51.10	96.43
60	15.50	7.80	1,507.31	63.87	95.54
75	-	7.70	-	76.64	94.64
90	15.60	7.60	1,481.76	89.42	93.75
105	-	7.50	-	102.19	92.86
120	15.70	7.40	1,456.21	114.96	91.96
135	-	7.10	-	153.29	89.29
150	15.90	6.50	1,405.11	229.93	83.93
165	-	5.70	-	332.12	76.79
180	15.40	5.40	1,532.85	370.44	74.11
Average			1,430.66		

ค-4 ผลของความสามารถในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ

ตารางที่ ค-4.1 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยสารดูดซับมีน้ำหนัก 77.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	16.70	8.30	1,200.73	0.00	100.00
15	-	8.30	-	0.00	100.00
30	16.50	8.10	1,251.83	25.55	98.13
45	-	7.90	-	51.10	96.26
60	15.90	7.80	1,405.11	63.87	95.33
75	-	7.70	-	76.64	94.39
90	16.30	7.60	1,302.92	89.42	93.46
105	-	7.50	-	102.19	92.52
120	15.50	7.40	1,507.31	114.96	91.59
135	-	7.00	-	166.06	87.85
150	15.40	6.40	1,532.85	242.70	82.24
Average			1,366.79		

ตารางที่ ค-4.2 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์แบบต้มไล่สารพิษก่อนนำไปเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ครั้งที่ 1

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	18.10	7.60	1,167.52	93.25	91.83
15	-	6.90	-	182.66	84.00
30	18.00	6.30	1,193.07	259.31	77.29
45	-	5.50	-	361.50	68.34
60	18.30	4.60	1,116.43	476.46	58.28
75	-	4.00	-	553.10	51.57
90	18.40	3.70	1,090.88	591.43	48.21
105	-	2.00	-	808.58	29.19
Average			1,141.98		

ตารางที่ ค-4.3 ผลการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์แบบต้มไล่สารพิษก่อนนำไปเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ครั้งที่ 2

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	16.30	7.70	1,193.07	38.32	96.67
15	-	6.20	-	255.48	77.79
30	16.60	4.30	1,116.43	472.63	58.92
45	-	3.80	-	536.50	53.37
60	16.50	2.30	1,141.98	728.11	36.71
Average			1,150.49		

ตารางที่ ค-4.4 ผลประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรน้ำหนักสารดูดซับ 77.0 กรัม และอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 6.0 ลิตรต่อนาที

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	14.90	7.00	1,302.92	0.00	100.00
15	-	7.00	-	0.00	100.00
30	14.80	6.80	1,328.47	25.55	98.13
45	-	6.20	-	102.19	92.50
60	14.50	6.00	1,405.11	127.74	90.63
75	-	5.90	-	140.51	89.69
90	14.40	5.80	1,430.66	153.29	88.75
105	-	5.70	-	166.06	87.81
120	14.60	5.50	1,379.57	191.61	85.94
135	-	5.00	-	255.48	81.25
150	14.80	4.90	1,328.47	268.25	80.31
Average			1,362.54		

ตารางที่ ค-4.5 ผลประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์แบบไม่ต้มไล่สารพิษก่อนนำไปเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ครั้งที่ 1

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	14.60	7.10	1,175.19	12.77	98.97
15	-	6.80	-	51.10	95.86
30	14.20	5.10	1,277.38	268.25	79.31
45	-	4.80	-	306.57	75.17
60	14.30	4.40	1,251.83	357.67	71.03
75	-	2.40	-	613.14	50.34
Average			1,234.80		

ตารางที่ ค-4.6 ผลประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์แบบไม่ต้มไล่สารพิษก่อนนำไปเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ครั้งที่ 2

เวลาของระบบ (min)	**ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.01 N** (ml)		**ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%w/v)		**ประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์** (%)
	Inlet	**Outlet**	**Inlet**	**Outlet**	
0	14.10	6.80	1,251.83	38.32	96.88
15	-	4.90	-	281.02	77.08
30	14.50	4.50	1,149.64	332.12	72.92
45	-	3.70	-	434.31	64.58
60	14.00	2.50	1,277.38	587.59	52.08
75	-	2.20	-	625.91	48.96
Average			1,226.28		

ภาคผนวก ง
การออกแบบระบบกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็ก

ภาคผนวก ง

การออกแบบระบบกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็ก

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการของระบบการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพที่มีอัตราการไหล 6.0 ลิตรต่อนาที ด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ 77.0 กรัมที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่เวลาประมาณ 150 นาทีระบบจะมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนที่ทางออกเป็น 200 ppmv นั้นคือ สารดูดซับหมดประสิทธิภาพต้องทำการฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับ จึงนำไปสู่การออกแบบระบบเพื่อใช้งานจริงในฟาร์มสุกรที่เป็นฟาร์มขนาดเล็ก (มีจำนวนสุกรไม่เกิน 500 ตัว) ในการผลิตก๊าซชีวภาพใช้บ่อหมักแบบราง (Plug Flow Anaerobic Digester) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ในทดลองการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ใช้คอลัมน์ทำมาจากท่อพีวีซีใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 5.0 เซนติเมตร หนา 0.3 เซนติเมตร ทำให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4.4 เซนติเมตร และมีความสูง 50.0 เซนติเมตร โดยความสูงในการบรรจุสารดูดซับ 40.0 เซนติเมตร ส่วนล่างของคอลัมน์ติดตั้งตะแกรงที่ความสูง 10 เซนติเมตร ทำการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสม พบว่าระบบมีความเร็วของก๊าซชีวภาพเป็น 0.066 เมตรต่อนาทีและมีเวลาที่เหมาะสมในการเคลื่อนที่ของก๊าซชีวภาพผ่านสารดูดซับในคอลัมน์เป็น 0.101 นาที

การออกแบบคอลัมน์ให้สามารถรองรับกำลังการผลิตของฟาร์มสุกรขนาดเล็กโดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อวันและดำเนินการเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน พบว่าต้องใช้คอลัมน์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.238 เมตรและมีความสูง 0.385 เมตร โดยคำนวณจากความเร็วของก๊าซชีวภาพและเวลาที่เหมาะสมในการเคลื่อนที่ของก๊าซชีวภาพผ่านสารดูดซับในคอลัมน์ แสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$V\ (m/s) = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi r^2}$$

$$r^2\ (m^2) = 0.00028 \frac{Q\ (m^3/hr)}{\pi \times V\ (m/s)}$$

เมื่อ r คือ รัศมีของคอลัมน์ (m)

0.00028 คือ แฟคเตอร์การเปลี่ยนหน่วย

Q คือ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (m^3/hr)

V คือ ความเร็วของก๊าซชีวภาพ (m/s)

$$r^2\ (m^2) = 0.00028\ \frac{100\ m^3/\ 8\ hr}{\pi\ x\ 0.066\ (m/s)} =\ \ 0.0167\ m^2$$

$$r = 0.129\ m$$

ดังนั้น คอลัมน์มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.238 เมตร

$$T_r\ (min) = \frac{v}{Q} =\ \frac{\pi r^2 h}{Q\ (m^3/hr)}$$

$$h\ (m) = 0.0167\frac{T_r\ (min)\ x\ Q\ (m^3/hr)}{\pi\ x\ r^2\ (m^2)}$$

เมื่อ h คือ ความสูงของคอลัมน์ (m)

0.0167 คือ แฟคเตอร์การเปลี่ยนหน่วย

T_r คือ เวลาที่เหมาะสมในการเคลื่อนที่ของก๊าซชีวภาพ (min)

Q คือ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (m^3/hr)

r คือ รัศมีของคอลัมน์ (m)

$$h\ (m) = 0.0167\frac{0.101\ min\ x\ \ (100\ m^3/\ 8\ hr)}{\pi\ x\ 0.0167\ m^2}$$

$$h = 0.385\ m$$

ดังนั้น คอลัมน์มีความสูง 0.238 เมตร

จากการออกแบบคอลัมน์จะได้คอลัมน์ที่ต้องใช้สารดูดซับปริมาตร 0.0201 m^3 คือ ใช้ถ่านกัมมันต์ 12.897 กิโลกรัม เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 19.346 ลิตร ที่มีความเข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แสดงว่าใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.967 กิโลกรัมแสดงการคำนวณได้ดังนี้

สารดูดซับปริมตร 0.00012 ลูกบาศก์เมตร มีน้ำหนัก 0.077 กิโลกรัม
สารดูดซับปริมตร 0.0201 ลูกบาศก์เมตร มีน้ำหนัก 12.897 กิโลกรัม

ถ่านกัมมันต์ 0.1 กิโลกรัม ใช้สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.15 ลิตร
ถ่านกัมมันต์ 12.897 กิโลกรัม ใช้สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 19.346 ลิตร

สารละลาย 0.1 ลิตร ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.005 กิโลกรัม
สารละลาย 19.346 ลิตร ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.967 กิโลกรัม

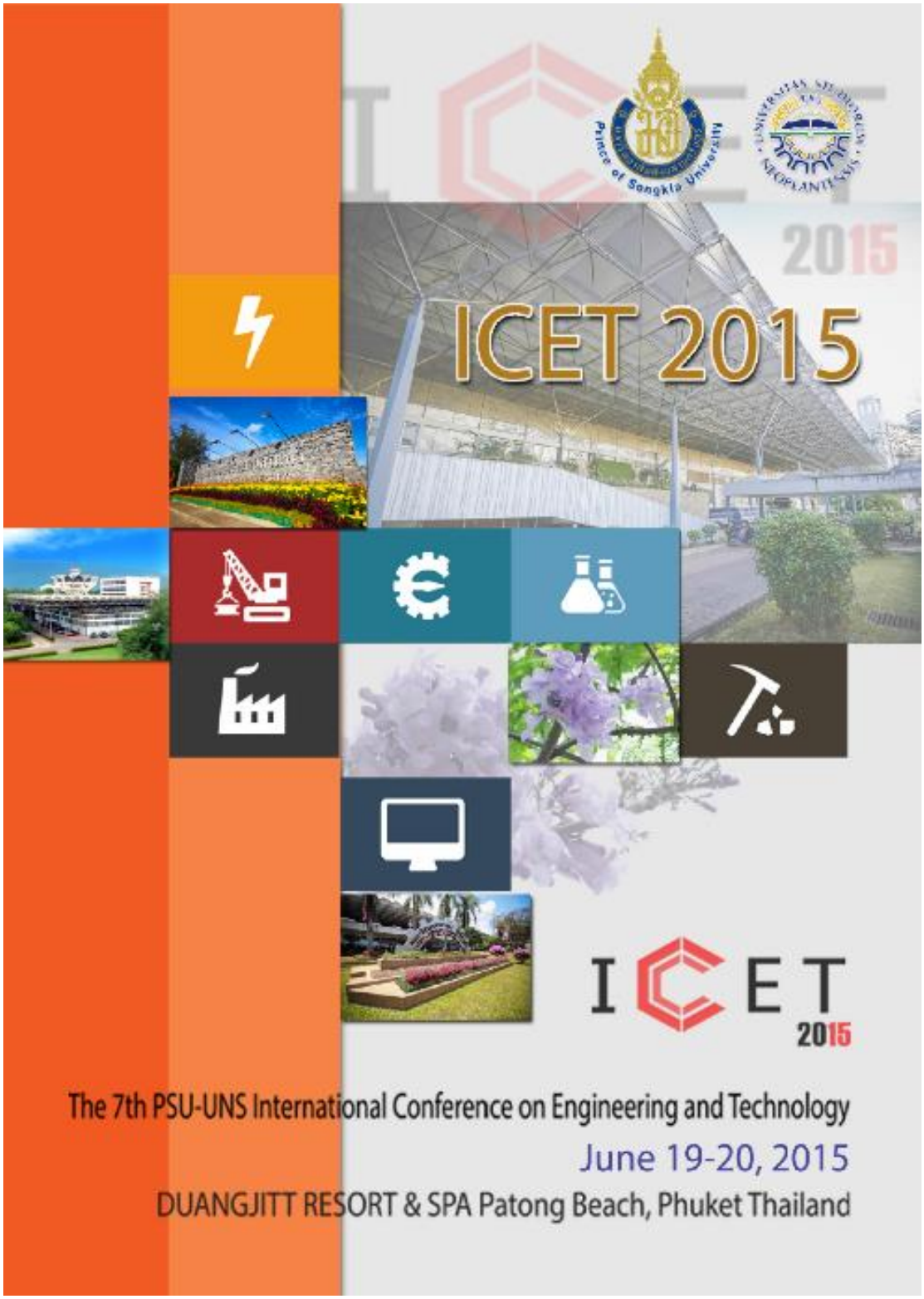
โดยถ่านกัมมันต์ 25 กิโลกรัม มีราคา 4,375 บาทและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 50 กิโลกรัม มีราคา 5,778 บาท จากการออกแบบคอลัมน์สำหรับกำลังการผลิตของฟาร์มสุกรขนาดเล็กโดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อวันและดำเนินการเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน จึงจะมีค่าใช้จ่ายของถ่านกัมมันต์ บาทและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 111.75 บาท

ถ่านกัมมันต์ 25 กิโลกรัม ราคา 4,375 บาท
ถ่านกัมมันต์ 12.897 กิโลกรัม ราคา 2,257 บาท

โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 50 กิโลกรัม ราคา 5,778 บาท
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.967 กิโลกรัม ราคา 111.75 บาท

ดังนั้น การออกแบบคอลัมน์สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็กที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อวันและดำเนินการเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน ต้องใช้คอลัมน์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.238 เมตรและมีความสูง 0.385 เมตร ดำเนินการที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 0.2 ลูกบาซก์เมตรต่อนาที โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้น 5 %โดยน้ำนักต่อปริมาตร น้ำหนัก 12.897 กิโลกรัม เมื่อทำการประเมินค่าใช้จ่ายพบว่าในการบำบัดก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าใช้จ่าย 23.75 บาท

ภาคผนวก จ
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์


ICET 2015
2015
ICET
2015
The 7th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology
June 19-20, 2015
DUANGJITT RESORT & SPA Patong Beach, Phuket Thailand

The 7th International Conference on Engineering and Technology
ICET-2015, Phuket, June19-20, 2015
Prince of Songkla University, Faculty of Engineering
Hat Yai, Songkhla, Thailand 90112

Removal of H_2S from Biogas by $KMnO_4$ Impregnated Activated Carbon

Kawalin Prathomravee[1], Wisitsree Wiyaratn[2], and Juntima Chungsiriporn[1]*
[1]Chemical Engineering Department, Engineering Faculty, Prince of Songkla University, Thailand
[2]Faculty of Industrial Education and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand
*Email of corresponding author: juntima.c@psu.ac.th

Abstract: *Biogas, a renewable energy, has the main constituents of methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2). Hydrogen sulfide (H_2S) containing in biogas has the most problematic contaminants found according to malodorous gas, harmful to human health, and highly corrosive to equipments. In this study, potassium permanganate ($KMnO_4$) -impregnated activated carbons was applied as a porous adsorbent for H_2S removal in packed column. The laboratory column with 50 cm height and 4.7 cm inner diameter was set to find for optimum condition and measure % H_2S removal efficiency. Biogas containing H_2S at 1300-2000 ppmv was pumped from anaerobic digester of pig farm and fed to the packed column. The optimum condition was achieved at 5 %w/v $KMnO_4$ concentration, 6 L/min biogas flow rate, and 77 g adsorbent weight. The packed column has breakthrough time at 144 minutes with 89.95% of H_2S removal efficiency. This H_2S treatment system has effectively performed and possibly applied for the actual use in biogas system from pig farm.*

KeyWords: ***Hydrogen sulfide / Removal / Activated carbon / Impregnation / Potassium permanganate***

1. INTRODUCTION

Currently, energy shortage is one major problem for the limited natural resources. All units including household, farmer, and agriculture attempt to find clean and safe energy to use as renewable energy. One of great interesting energy is biogas, a combustible gas, produced by anaerobic digestion which microorganisms break down biodegradable material in an absence of oxygen and low-temperature. Biogas can be substituted for liquefied petroleum gas (LPG), converted to electricity for heating piglet nurseries, hot water or lighting, reduce fertilizer costs. The main constituents of biogas are methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2), but it also contains hydrogen sulfide (H_2S) and other impurities.

Hydrogen sulfide is a flammable and colorless gas that has smells like rotten eggs and directly effected to human health. The H_2S concentration over 200 ppmv is dangerous to respiratory failure wihtin seconds and olfactory fatigue [1]. The presence of H_2S and water make biogas very corrosive to machine contacting the gas. Its strong acid could cause internal damage of equipments. Therefore, the use of H_2S removal system is required before utilizing the biogas as a type of renewable energy.

Many methods have been developed over years for H_2S removal from biogas to obtain low concentration [2]. Activated carbon is widely used as adsorbents for air purification because their high surface area. Activated carbon contains in the packed column for H_2S adsorption. This kind of adsorbentcould be improvedthe removal capacity by impregnation with chemical solution [3]. Potassium permanganate ($KMnO_4$), an oxidizing agent and fast reaction, has been applied for H_2S removal in many system.The reactionsare given in Eq.1 for the solution pH > 7.5. [4]

$$3H_2S+8KMnO_4 \rightarrow 3K_2SO_4+2H_2O+2KOH+8MnO_2 \quad (1)$$

In this study, chemical adsorptions using activated carbonbase were evaluated for their H_2S elimination efficiency from biogas. Potassium permanganate impregnated on the activated carbon was filled in packed column and studied for the effect of biogas flow rate, concentration of $KMnO_4$, and weight of adsorbent. Optimum condition at H_2S removal efficiency higher than 80% and breakthrough time of 200 ppmv outlet H_2S concentration in biogas was observed.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Materials

Granular activated coconut shell, surface area 1100 m^2/g based carbon is a commercial product purchased from Mazuma Thailand Co., Ltd. A quantity of 100 g of the activated carbon was impregnated with 150 mL of 3-9 %w/v $KMnO_4$ at room temperature for 1 hour. After that, it was dried in the oven at 60°C for 12 hours and store in a desiccator as standby.

2.2 Biogas

Biogas containing H_2S at 1300-2000 ppmv from anaerobic digester of pig farm at Thung Wang, Songkhla, Thailand.

2.3 Hydrogen sulfide removal unit

The packed bed adsorption system was designed and operated to study the removal of H_2S from biogas using the $KMnO_4$ impregnated activated carbon. A laboratory-scale apparatus was installed and run at room temperature as shown in Fig.1.

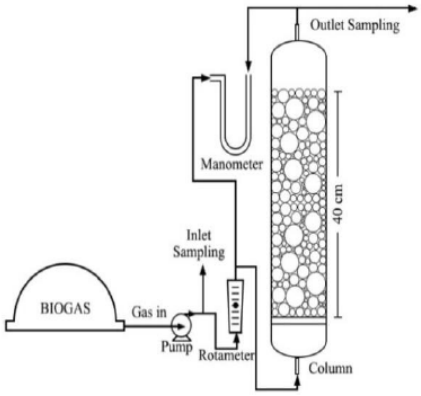


Fig.1 A schematic diagram of the H_2S adsorption unit.

Biogas containing H_2S was pumped from anaerobic digester of pig farm and fed to the bottom of the packed column. Biogas flow rate was constantly controlled by valve and measured by rotameter. The packed column is 50 cm height, 4.7 cm inner diameter, and 40 cm bed section. Pressure drop of the gas flowing through column was measure with U-tube manometer. H_2S of inlet and outlet streams were sampling during experimental passed through a midget impinger containing a cadmium sulfate ($CdSO_4$) solution which forming cadmium sulfide (CdS) as H_2S is absorbed. The concentration of H_2S was measured from amount of CdS formed by iodometric method [7]. Breakthrough time is period between the adsorbent exposure to a harmful substance breakthrough outlet H_2S concentration reach 200 ppmv. The H_2S removal efficiency was calculated according to the following equation:

$$\text{Efficiency (\%)} = \frac{[H_2S]\text{in} - [H_2S]\text{out}}{[H_2S]\text{in}} * 100$$

where $[H_2S]$in and $[H_2S]$out are inlet and outlet H_2S concentration in ppmv, respectively.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Effect of $KMnO_4$ concentration

The results of biogas treatment by H_2S removal unit according to the effect of $KMnO_4$ concentration on H_2S removal efficiency and breakthrough time at 200 ppmv outlet H_2S concentration are presented in Table 1. Flow rate of biogas and weight of adsorbent were constantly controlled at 6 L/min and 63 g, respectively. The response of H_2S removal efficiency as functions of $KMnO_4$ impregnation concentration on H_2S removal efficiency is presented as a curve in Fig.2 and the response of breakthrough time at 200 ppmv outlet H_2S concentration as functions of $KMnO_4$ impregnation concentration on breakthrough time is presented as a curve in Fig.3.

Table 1. *The effect of $KMnO_4$ concentration impregnated on activated carbon on H_2S removal efficiency and breakthrough time at 200 ppmv outlet H_2S concentration.*

Run	$KMnO_4$ conc. (%w/v)	H_2S removal efficiency (%)	Breakthrough time (min)
1	3	84.7	102
2	4	86.38	114
3	5	87.17	119
4	6	87.06	118
5	7	86.06	110
6	8	84.17	95
7	9	81.39	73

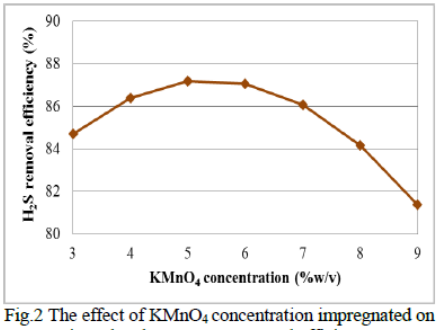


Fig.2 The effect of $KMnO_4$ concentration impregnated on activated carbon on H_2S removal efficiency at breakthrough time of 200 ppmv H_2S in biogas outlet.

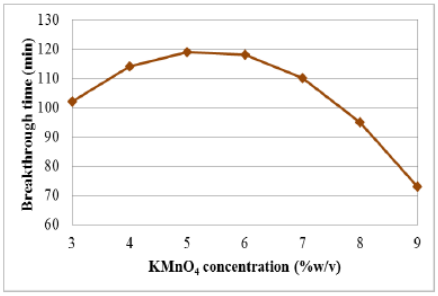


Fig.3 The effect of $KMnO_4$ concentration impregnated on activated carbon on breakthrough time of 200 ppmv H_2S in biogas outlet.

As can be seen, the maximum breakthrough time and H_2S removal efficiency were at 5 %w/v $KMnO_4$ concentration. The result indicated that breakthrough time and H_2S removal efficiency were increased by increasing $KMnO_4$ concentration in the range of 3-5 %w/v $KMnO_4$. The time and the efficiency were decreased when the concentration was increased in the range of 6-9 %w/v $KMnO_4$. This is according to the over concentration of the chemical impregnation can plugged in the pore of the activated carbon.

3.2 Effect of biogas flow rate

The results of biogas treatment by H_2S removal unit according to the effect of biogas flow rate on H_2S removal efficiency and breakthrough time at 200 ppmv outlet H_2S concentration are presented in Table 2. Concentration of $KMnO_4$ and weight of adsorbent were constantly controlled at 6 %w/v and 63 g, respectively.

Table 2. *The effect of biogas flow rate on H_2S removal efficiency and breakthrough time at 200 ppmv outlet H_2S concentration.*

Run	Biogas flow rate (L/min)	H_2S removal efficiency (%)	Breakthrough time (min)
1	4	82.43	131
2	5	86.54	126
3	6	87.06	118
4	7	83.98	107
5	8	77.31	93

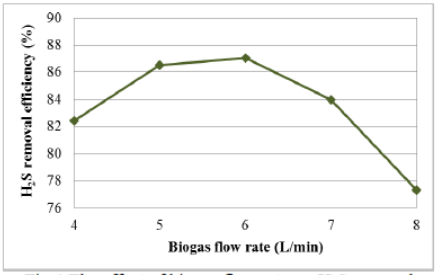


Fig.4 The effect of biogas flow rate on H_2S removal efficiency at breakthrough time of 200 ppmv H_2S in biogas outlet.

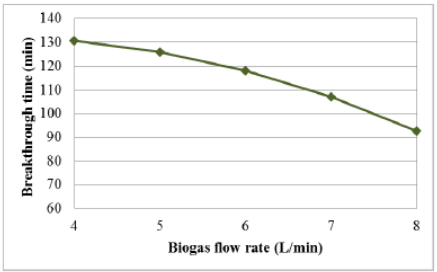


Fig.5 The effect of biogas flow rate on breakthrough time of 200 ppmv H_2S in biogas outlet.

The response of H_2S removal efficiency as functions of biogas flow rate on H_2S removal efficiency is presented as a curve in Fig.4. As can be seen, the maximum H_2S removal efficiency was at 6 L/min biogas flow rate. The result indicated that H_2S removal efficiency was increased by increasing biogas flow rate in the range of 4-6 L/min. The efficiency was decreased when the flow rate was increased in the range of 7-8 L/min. The response of breakthrough time at 200 ppmv outlet H_2S concentration as functions of biogas flow rate on breakthrough time is presented as a curve in Fig.5. As can be seen, the maximum breakthrough time was at 4 L/min biogas flow rate. The result indicated that breakthrough time was decreased by decreased biogas flow rate. Due to maximum H_2S removal efficiency different from maximum breakthrough time to choose appropriate point at 6 L/min biogas flow rate because breakthrough time different about 10 minutes but it can obtain increase gas 2 L/min. This is according to the length of time a compound is retained on a packed column. It is appropriate retention time.

3.3 Effect of adsorbent weight

The results of biogas treatment by H_2S removal unit according to the effect of adsorbent weight on H_2S removal efficiency and breakthrough time at 200 ppmv outlet H_2S concentration are presented in Table 3. Concentration of $KMnO_4$ and flow rate of biogas were constantly controlled at 6 %w/v and 6 L/min, respectively.

Table 3. *The effect of adsorbent weight on H_2S removal efficiency and breakthrough time at 200 ppmv outlet H_2S concentration.*

Run	Adsorbent weight (g)	H_2S removal efficiency (%)	Breakthrough time (min)
1	25	52.92	0
2	49	79.24	12
3	63	87.06	118
4	77	89.32	143
5	100	80.99	135

The response of H_2S removal efficiency as functions of adsorbent weight on H_2S removal efficiency is presented as a curve in Fig.6 and the response of breakthrough time at 200 ppmv outlet H_2S concentration as functions of adsorbent weight on breakthrough time is presented as a curve in Fig.7. As can be seen, the maximum breakthrough time and H_2S removal efficiency were at 77 g adsorbent weight. The result indicated that breakthrough time and H_2S removal efficiency were increased by increasing adsorbent weight in the range of 25-77 g. The time and the efficiency were decreased when the adsorbent weight was increased in 100 g. This is according to the length of time biogas contact with $KMnO_4$-impregnated activated carbon in a packed column. It is appropriate retention time.

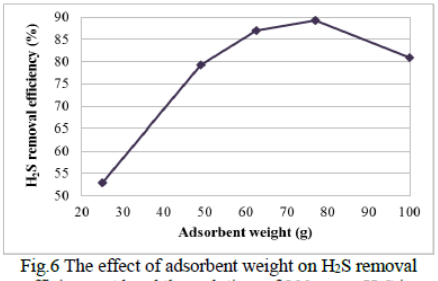


Fig.6 The effect of adsorbent weight on H_2S removal efficiency at breakthrough time of 200 ppmv H_2S in biogas outlet.

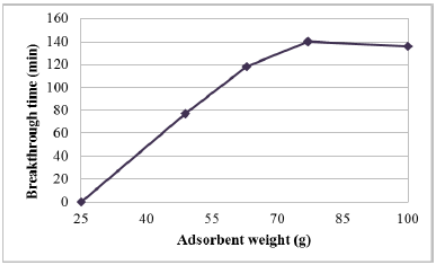


Fig.7 The effect of adsorbent weight on breakthrough time of 200 ppmv H_2S in biogas outlet.

3.4 Optimum condition

The optimization condition was achieved at 5 %w/v $KMnO_4$ concentration, 6 L/min biogas flow rate and 77 g adsorbent weight. H_2S removal efficiency is 89.95% by using constrain of outlet H_2S concentration at 200 ppmv. H_2S removal efficiency is presented in Fig. 8.

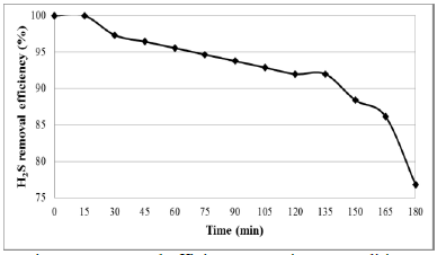


Fig.8 H_2S removal efficiency at optimum condition.

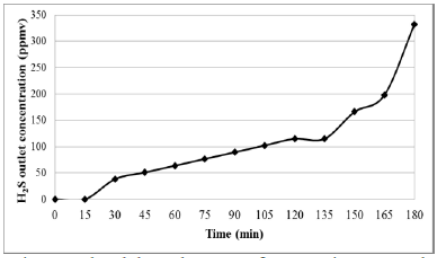


Fig.9 H_2S breakthrough curves of $KMnO_4$ impregnated activated carbon adsorption at optimum condition.

H_2S breakthrough curves for $KMnO_4$-impregnated activated carbon in packed bed column was achieved at optimum condition is presented in Fig.9. The breakthrough time measured for the adsorbent was shown at 144 minutes by using constrain of outlet H_2S concentration at 200 ppmv.

4. CONCLUSIONS

The optimum condition for the H_2S removal from biogas was achieved at 5 %w/v $KMnO_4$ concentration, 6 L/min biogas flow rate, and 77 g adsorbent weight. The packed column has the breakthrough time at 144 minutes with 89.95% of H_2S removal efficiency by using constrain of outlet H_2S concentration at 200 ppmv. This system can effectively perform for the biogas treatment by applying the impregnation on activated carbon.

5. REFERENCES

[1] Deng JF, "Hydrogen sulfide, In: Clinical Environmental Health and Toxic Exposures", 2nd edition, John B. Sullivan, Jr., Gary R. Krieger, editors, 2001, pp. 716-722.

[2] Bunyakan Charun., Chungsiriporn Juntima, Saelee Rattana, ArunrajPattama, "A comparative study on biogas cleaning by various oxidants", The 4th international conference on engineering technologies, 28-30 April 2009, Novi Sad, Serbian.

[3] Yonghou Xiao, Shudong Wang, Diyong Wu, Quan Yuan, "Experimental and simulation study of hydrogen sulfide adsorption on impregnated activated carbon under anaerobic conditions", Journal of Hazardous Materials 153, 2008, pp. 1193–1200.

[4] Fernando Cadena, Robert W. Peters, "Evaluation of Chemical Oxidizers for Hydrogen Sulfide Control", Water Pollution Control Federation, Vol. 60, No. 7 (Jul., 1988), pp. 1259-1263.

[5] JiaGuo, Ye Luo, Aik Chong Lua, Ru-an Chi, Yan-lin Chen, Xiu-ting Bao, Shou-xin Xiang, "Adsorption of hydrogen sulphide (H2S) by activated carbons derived from oil-palm shell", Carbon 45, 2007, pp. 330–336.

[6] Yonghou Xiao, Shudong Wang, Diyong Wu, Quan Yuan, "Catalytic oxidation of hydrogen sulfide over unmodified and impregnated activated carbon", Separation and Purification Technology 59, 2008. pp. 326–332.

[7] EPA Method 11, Determination of Hydrogen Sulfide Content of Fuel Gas Streams in Petroleum Refineries, CFR40, Part60, Appendix A

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวเกวลิน ปฐมระวี

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5610120048

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศิษย์ก้นกุฏิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Prathomravee. K, Wiyaratn W and Chungsiriporn. J. 2015. Removal of H_2S from Biogas by $KMnO_4$ Impregnated Activated Carbon. Proceeding of the 7^{th} International Conference on Engineering and Technology (ICET-2015), June19-20, 2015, Phuket, Thailand.