



การศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันและกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วย
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

**Kinetics of the Oxidation and Removal of Hydrogen sulfide by Potassium
Permanganate**

ปัทมา อรุณราช

Pattama Arunraj

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**

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันและกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วย
 โพลีเอทิลีนเพอร์เมอกรานต์

ผู้เขียน นางสาวปัทมา อรุณราช

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรัญ บุญกาญจน์)

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกฤษฎิธา รัตนวิไล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรัญ บุญกาญจน์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันและกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วย
 โปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต
 ผู้เขียน นางสาวปัทมา อรุณราช
 สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
 ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในแก๊สชีวภาพ ในแก๊สธรรมชาติ หรือในอากาศจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นประเด็นเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เพราะการปนเปื้อนของ H_2S ในแก๊สหรือในอากาศนอกจากจะก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ พืช และสัตว์แล้ว H_2S ยังก่อให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงต่ออุปกรณ์และเครื่องจักรที่สัมผัส H_2S อีกด้วย แหล่งกำเนิดของ H_2S ที่พบบ่อย เช่น แก๊สที่เกิดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ แก๊สที่ปล่อยออกสู่อากาศจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีสารซัลเฟอร์ในกระบวนการ เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมโรงแยกแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น กระบวนการออกซิเดชันทางเคมีเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถทำได้ง่ายและมีต้นทุนในการดำเนินการไม่สูง โปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) เป็นสารออกซิเดนต์ที่มีราคาถูกและมีรายงานการนำ $KMnO_4$ ไปใช้ในการกำจัด H_2S แต่ข้อมูลจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย $KMnO_4$ ยังไม่เคยมีรายงานไว้ ขอบเขตของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 เป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย $KMnO_4$ แบบแบทช์ โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบด้วย pH ความเข้มข้นของ H_2S ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ และอุณหภูมิในแต่ละชุดการทดลองทำการวัดความเข้มข้นของ H_2S ที่เวลาต่าง ๆ แล้ววิเคราะห์จลนพลศาสตร์ด้วยวิธีอัตราเริ่มต้น ผลการทดลองพบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ มีค่าอันดับปฏิกิริยารวมเท่ากับ 2.02 โดยมีค่าอันดับปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ เท่ากับ 1.01 และ 0.92 ตามลำดับ สมการกฏอัตราซึ่งรวมผลของความเข้มข้น ผลของอุณหภูมิ และ ผลของ pH ที่มีต่อปฏิกิริยา แสดงดังสมการ

$$-r_{H_2S} = \left(3.68 \times 10^{-6} \exp \left(\frac{-43,237}{RT} \right) \right) \times \left[(6.40 \times 10^{-4} (\exp (pH)^{0.83}) + 0.62) \right] C_{H_2S}^{1.1} C_{KMnO_4}^{0.92}$$

ข้อมูลจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ ได้ตรวจสอบกับผลการทดลองเพื่อเป็นการรับรองว่าจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบการกำจัด H_2S ที่เหมาะสมได้

ตอนที่ 2 ของการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัด H₂S โดยการดูดซับร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยสารละลาย KMnO₄ ในคอลัมน์บรรจุ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ความเข้มข้นของ H₂S (x₁) ความเข้มข้นของ KMnO₄ (x₂) และอัตราการใช้ของเหลวต่ออากาศ (L/G ratio: x₃) ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด H₂S พบว่า ความเข้มข้นของ H₂S เป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด H₂S มากที่สุด รองลงมา คือ ความเข้มข้นของ KMnO₄ และ L/G ratio ตามลำดับ

ผลการศึกษาได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด H₂S กับตัวแปรที่ศึกษา ดังสมการ

$$Y = 73.36 - 0.013x_1 + 0.019x_2 + 1.858x_3 + 4.426 \times 10^{-6}x_1x_2 + 0.00091x_1x_3 - 0.0016x_2x_3$$

เทคนิค RSM ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้เพื่อออกแบบการทดลองและหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัด H₂S ด้วยสารละลาย KMnO₄ ในคอลัมน์บรรจุ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของ H₂S เท่ากับ 1232 ppm ความเข้มข้นของ KMnO₄ เท่ากับ 200 mg/L และ L/G ratio เท่ากับ 20 ml/L ซึ่งเมื่อนำผลการศึกษาจากทั้งสองส่วน ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัด H₂S ในอากาศเสียจำลอง และในแก๊สชีวภาพจริง สามารถสรุปได้ว่าการใช้คอลัมน์บรรจุร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้ KMnO₄ เป็นกระบวนการที่มีความเป็นไปได้สูง

Thesis Title	Kinetics of the Oxidation and Removal of Hydrogen sulfide by Potassium permanganate
Author	Miss Pattama Arunraj
Major Program	Chemical Engineering
Academic Year	2008

ABSTRACT

The removal of H₂S from industrial gases or biogas is a great concern in environmental technology because this gas is extremely hazardous to human health and corrosion besides its strong unpleasant smell. H₂S is released from the anaerobic treatment system of the wastewater treatment plant and from the effluent gas of some industries such as petrochemical and natural gas refineries. Chemical oxidation process is an alternative method that can be easily operated and considered as a cheap process. Potassium permanganate (KMnO₄) is considered as a cheap oxidant and has been applied for H₂S removal. Unfortunately, the kinetics data of H₂S oxidation by KMnO₄ are not available. This research can be classified into two parts. The first part was focused on the study of the reaction kinetics for the oxidation of H₂S by KMnO₄ in the batch experiments. The direct permanganate oxidation of H₂S solution was investigated at various initial H₂S and KMnO₄ concentration, pH and temperature. The H₂S concentration time profile was measured for each run. Analysis of the kinetics data was performed by using an initial rate method. The result show that the oxidation of H₂S by KMnO₄ were 2.02 order overall and were 1.1 and 0.92 order with respect H₂S and KMnO₄, respectively. Additionally, the reaction rate including the influence of the reactant concentrations, the reaction temperature and the pH on the reaction is proposed as given below.

$$-r_{H_2S} = \left(3.68 \times 10^{-6} \exp \left(\frac{-43,237}{RT} \right) \right) \times \left[(6.40 \times 10^{-4} (\exp (pH)^{0.83}) + 0.62) \right] C_{H_2S}^{1.1} C_{KMnO_4}^{0.92}$$

The reaction rate equation and the kinetics information on the oxidative reaction of KMnO₄ with H₂S is warranted for the optimization of H₂S removal system design and the modeling of H₂S treatment process.

The second part of this research was emphasized on the investigation of the H₂S removal from gas stream by an absorption and an oxidation reaction with KMnO₄ in the packed

column. The effects of the liquid to gas ratio (L/G ratio), the H₂S concentration and the KMnO₄ concentration on the H₂S removal efficiency have been investigated. The results indicate that the effects of these parameters on H₂S removal efficiency ranking from high to less important are the H₂S concentration, the KMnO₄ concentration and the L/G ratio. The empirical equation related the H₂S removal efficiency and these operating parameters were proposed as shown below and it can be used to predict the H₂S removal efficiency at any interest L/G ratio and H₂S and KMnO₄ concentration.

$$Y = 73.36 - 0.013x_1 + 0.019x_2 + 1.858x_3 + 4.426 \times 10^{-6} x_1x_2 + 0.00091x_1x_3 - 0.0016x_2x_3$$

The technique of RSM was applied to determine the optimum condition for H₂S removal and it was found that the optimum conditions for H₂S removal by oxidation with KMnO₄ in packed column are H₂S concentration of 1323 ppm, KMnO₄ concentration of 200 ppm and L/G ratio of 20 ml/L. Moreover, the H₂S removal from both synthesis gas and the actual biogas using these optimum conditions has been verified. Finally, it can be concluded that the H₂S removal from biogas using the packed column and the oxidation reaction by KMnO₄ is possible.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากการสนับสนุน และได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายๆท่าน ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จรัญ บุญกาญจน์ ที่ได้กรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาช่วยเหลือให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ อย่างดียิ่ง รวมทั้งให้กำลังใจและการแก้ปัญหาตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร กรรมการที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำในระหว่างการทำทดลอง รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลือพงษ์ แก้วศรีจันทร์ กรรมการผู้แทนคณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนวิไล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ กรรมการผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ตามลำดับ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่จัดสรรเงินทุนสำหรับการวิจัย และ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่และเครื่องมือในการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ครู อาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนอบรมสั่งสอนผู้จัดทำ จนมีความรู้และความสามารถในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้กำลังใจและกำลังใจในการศึกษาจนผู้จัดทำมีการศึกษาจนถึงระดับปริญญาโท จึงมีโอกาสดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณกัลปมิตรทุกท่าน โดยเฉพาะพี่รัตนา แซ่หลี่ นักศึกษาระดับปริญญาเอกที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนบางส่วนจากทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จึงขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้มา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีความดีอยู่บ้าง ผู้จัดทำขอขอบให้ท่านทั้งหลายที่ได้กล่าวถึงแล้วข้างต้น ส่วนความบกพร่องที่อาจจะเกิดขึ้น ผู้จัดทำขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

ปีทมา อรุณราช

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(13)
รายการภาพประกอบ	(21)
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	3
2. ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 แหล่งของการเกิด H_2S และปัญหาที่พบของ H_2S	4
2.2 คุณสมบัติของสารประกอบซัลไฟด์	6
2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ H_2S	6
2.3 การควบคุมและกำจัด H_2S	9
2.3.1 วิธีการกำจัด H_2S ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ	9
2.3.2 วิธีการกำจัด H_2S ด้วยกระบวนการทางเคมี	10
2.3.2.1 การใช้วัสดุดูดซับ	10
2.3.2.2 การใช้ของเหลวดูดซึม	11
2.4 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมี	14
2.4.1 การออกแบบปฏิกรณ์	14
2.4.2 นิยามอัตราเร็วและสมการอัตราเร็วปฏิกิริยา	15
2.4.3 กฎอัตราเร็วปฏิกิริยา	15
2.4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราเร็วปฏิกิริยาเคมี	16
2.4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลอัตราเร็วปฏิกิริยาจากข้อมูลการทดลอง	17
2.4.5.1 การวิเคราะห์อัตราเร็วปฏิกิริยาด้วยวิธีดิฟเฟอเรนเชียล	17

(Differential Method of Rate Analysis)

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.4.5.2	18
การวิเคราะห์อัตราเร็วปฏิกิริยาด้วยวิธีปริพันธ์ (Integral Method of Rate Analysis)	
2.4.5.3	18
การวิเคราะห์อัตราเร็วปฏิกิริยาด้วยวิธีครึ่งชีวิต (Half life Method of Rate Analysis)	
2.4.5.4	19
การวิเคราะห์อัตราเร็วปฏิกิริยาด้วยวิธีอัตราเริ่มต้น (Initial Rate Method of Rate Analysis)	
2.4.5.5	20
การวิเคราะห์อัตราเร็วปฏิกิริยาด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป POLYMATH 5.1	
2.5	20
การดูดซึมแก๊ส	
2.5.1	20
การถ่ายเทมวลแก๊สคู่ของเหลว	
2.5.2	22
การเลือกประเภทปฏิกรณ์สำหรับการดูดซึมแก๊ส	
2.5.3	23
ประเภทของคอลัมน์บรรจุ	
คอลัมน์บรรจุที่มีการไหลแบบสวนทาง (Countercurrent)	23
คอลัมน์บรรจุที่มีการไหลแบบขวาง (Crossflow)	25
คอลัมน์บรรจุที่มีการไหลแบบทิศทางเดียวกัน (Co-current)	26
2.5.4	28
วัสดุบรรจุ	
2.5.5	29
การสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว	
2.5.6	29
ความดันตกและอัตราการไหลจำกัด	
2.5.7	31
การควบคุมมวลในคอลัมน์บรรจุ	
2.5.8	32
อัตราการดูดซึมในคอลัมน์บรรจุ	
2.5.8.1	33
การดูดซึมทางกายภาพ	
2.5.8.2	33
การดูดซึมด้วยปฏิกิริยาเคมี	
2.6	33
เทคนิคพื้นผิวผลตอบสนอง Response Surface Methodology	
2.7	36
ขีดจำกัดความเข้มข้นของ H ₂ S ขีดจำกัดในบรรยากาศ	
2.8	36
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า	
2.9	ข้อสรุปข้อมูลจากการค้นคว้า	40
3.	วิธีการดำเนินการวิจัย	41
3.1	สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลองของการศึกษาจนผลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S และ $KMnO_4$ ในปฏิกรณ์แบบแบทช์	41
3.1.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	41
3.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง	42
3.1.3	วิธีการทดลองและการออกแบบการทดลอง	42
3.1.3	การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง	47
3.2	สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลองของการศึกษาการกำจัด H_2S ด้วยคอลัมน์บรรจุร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันในระดับห้องปฏิบัติการ	48
3.2.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	48
3.2.2	อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง	48
3.2.3	วิธีการทดลองและการออกแบบการทดลอง	51
3.2.4	การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง	54
3.3	สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลองของการศึกษาการบำบัด H_2S จากแก๊สชีวภาพด้วยคอลัมน์บรรจุร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันในฟาร์มสุกร	56
4.	ผลการทดลองและวิจารณ์	59
4.1	การศึกษาจนผลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S และ $KMnO_4$ ในปฏิกรณ์แบบแบทช์	59
4.1.1	ผลของความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ ต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S และ $KMnO_4$	59
4.1.2	ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S และ $KMnO_4$	62
4.1.3	ผลของ pH ต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S และ $KMnO_4$	65

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4.1.4	การทดสอบความน่าเชื่อถือของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S ด้วย $KMnO_4$	66
4.2	การศึกษาการกำจัด H_2S ด้วยคอลัมน์บรรจุร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันในระดับห้องปฏิบัติการ	68
4.2.1	ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ด้วยสารละลาย $KMnO_4$ ในคอลัมน์บรรจุ	68
4.2.1.1	ผลของความเข้มข้น $KMnO_4$ ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ในคอลัมน์บรรจุ	68
4.2.1.2	ผลของความเข้มข้น H_2S ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ในคอลัมน์บรรจุ	69
4.2.1.3	ผลของ L/G ratio ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ในคอลัมน์บรรจุ	71
4.2.2	ผลของสภาวะดำเนินการต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ด้วย $KMnO_4$ ในคอลัมน์บรรจุ	72
4.2.3	พื้นผิวตอบสนองต่อผลตัวแปรดำเนินการต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S	75
4.2.3.1	ผลของความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$	76
4.2.3.2	ผลของ L/G และความเข้มข้นของ $KMnO_4$	77
4.2.3.3	ผลของ L/G และความเข้มข้นของ H_2S	78
4.2.4	การหาค่าสภาวะดำเนินการที่เหมาะสม	80
4.2.6	การทดสอบสภาวะดำเนินการที่เหมาะสม	81
4.3	การกำจัดแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพจากฟาร์มสุกรโดยใช้สารละลาย $KMnO_4$ ในคอลัมน์บรรจุ	82
4.3.1	ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ด้วยน้ำโดยใช้คอลัมน์บรรจุ	82

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า	
4.3.2	ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแก๊ส H ₂ S ด้วย สารละลาย KMnO ₄ โดยใช้คอลัมน์บรรจุ	83
4.3.3	ผลการวิเคราะห์แก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สชีวภาพก่อนและหลังการกำจัด H ₂ S ด้วย GC	84
5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ		85
5.1	บทสรุป	85
5.2	ข้อเสนอแนะ	87
บรรณานุกรม		88
ภาคผนวก		92
ก.	ข้อมูลเบื้องต้นของสารเคมี	92
ข.	ผลการทดลอง	96
ค.	กราฟมาตรฐานของแมงกานีส	122
ง.	การเตรียมสารเคมีและวิเคราะห์สารตัวอย่าง	124
จ.	การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม POLYMATH 5.0	131
ฉ.	การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Regression	136
ช.	ตัวอย่างการคำนวณพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์	141
ประวัติผู้เขียน		143

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ความสามารถในการละลายน้ำของไฮโดรเจนซัลไฟด์	9
2-2	คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับ	11
2-3	สารเคมีที่นิยมใช้ในการกำจัดแก๊ส H ₂ S เชิงพาณิชย์	13
3-1	ศึกษาผลของความเข้มข้นของ H ₂ S ต่ออัตราปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 303.15 K สำหรับที่ pH 7	44
3-2	ศึกษาผลของความเข้มข้นของ KMnO ₄ ต่ออัตราปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 303.15 K สำหรับที่ pH 7	44
3-3	ศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราปฏิกิริยาที่ pH 7	45
3-4	ศึกษาผลของ pH ต่ออัตราปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 303.15 K	45
3-5	ผลการทดลองโดยการออกแบบด้วยวิธี RSM แบบ CCD เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้น H ₂ S ผลของความเข้มข้น KMnO ₄ และผลของสัดส่วนอัตราการไหลของของเหลวต่อแก๊ส ในการกำจัด H ₂ S ด้วย KMnO ₄ ในคอลัมน์บรรจุ	52
3-6	แสดงสถานะต่างๆ ที่ออกแบบด้วยเทคนิค RSM สำหรับศึกษาการกำจัด H ₂ S ด้วย KMnO ₄ ในคอลัมน์บรรจุ	53
3-7	สถานะของการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแก๊ส H ₂ S จากแก๊สชีวภาพ โดยควบคุมอัตราการไหลของแก๊สคงที่ที่ 5L/min และอัตราการไหลของสารดูดซึม 50 L/hr.	58
4-1	แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของ H ₂ S เมื่อทำการศึกษาความเข้มข้นของ H ₂ S และ KMnO ₄	61
4-2	แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของ H ₂ S เมื่อทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ	63
4-3	แสดงค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	63
4-4	แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของ H ₂ S เมื่อทำการศึกษาผลของ pH	65
4-5	การเปรียบเทียบค่าอัตราการปฏิกิริยาที่ได้วัดจากการทดลองกับการคำนวณ	67
4-6	แสดงประสิทธิภาพการกำจัด H ₂ S ด้วยคอลัมน์บรรจุที่สถานะต่าง ๆ ตาม RSM	72

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-7 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีรูปแบบสมการแบบ (Linear interaction)	73
4-8 ฟังก์ชันเป้าหมาย และขอบเขตในการหาสถานะที่เหมาะสมเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัด H ₂ S	80
4-9 แสดงสถานะดำเนินการที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการกำจัด H ₂ S สูงสุด ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Essential regression	81
4-10 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 1264 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลของแก๊ส H ₂ S 1 l/min ความเข้มข้น KMnO ₄ 200 mg/l ที่อัตราการไหล 20 ml/l และ L/G ratio 15 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	81
4-11 ผลการวัดปริมาณแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	84
ก-1 ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของแมงกานีส (Mn) ที่ 25°C	95
ข-1.1 ข้อมูลความเข้มข้นของ H ₂ S และ KMnO ₄ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H ₂ S และ KMnO ₄ เท่ากับ 2.94 mM และ 1.90 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7	97
ข-1.2 ข้อมูลความเข้มข้นของ H ₂ S และ KMnO ₄ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H ₂ S และ KMnO ₄ เท่ากับ 4.41 mM และ 1.90 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7	97
ข-1.3 ข้อมูลความเข้มข้นของ H ₂ S และ KMnO ₄ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H ₂ S และ KMnO ₄ เท่ากับ 5.88 mM และ 1.90 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7	98
ข-1.4 ข้อมูลความเข้มข้นของ H ₂ S และ KMnO ₄ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H ₂ S และ KMnO ₄ เท่ากับ 10.29 mM และ 1.90 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7	98
ข-1.5 ข้อมูลความเข้มข้นของ H ₂ S และ KMnO ₄ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H ₂ S และ KMnO ₄ เท่ากับ 2.94 mM และ 1.27 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7	99

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-1.6	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H_2S และ $KMnO_4$ เท่ากับ 2.94 mM และ 2.53 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7	99
ข-1.7	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H_2S และ $KMnO_4$ เท่ากับ 2.94 mM และ 3.80 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7	100
ข-1.8	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H_2S และ $KMnO_4$ เท่ากับ 2.94 mM และ 5.06 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7	100
ข-1.9	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H_2S และ $KMnO_4$ เท่ากับ 2.94 mM และ 1.90 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7	101
ข-1.10	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H_2S และ $KMnO_4$ เท่ากับ 2.94 mM และ 1.90 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 308.15 K และ pH 7	101
ข-1.11	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H_2S และ $KMnO_4$ เท่ากับ 2.94 mM และ 1.90 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 313.15 K และ pH 7	102
ข-1.12	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H_2S และ $KMnO_4$ เท่ากับ 2.94 mM และ 1.90 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 323.15 K และ pH 7	102
ข-1.13	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H_2S และ $KMnO_4$ เท่ากับ 2.94 mM และ 1.90 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 323.15 K และ pH 5	103
ข-1.14	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H_2S และ $KMnO_4$ เท่ากับ 2.94 mM และ 1.90 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 5	103

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-1.15	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H_2S และ $KMnO_4$ เท่ากับ 2.94 mM และ 1.90 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 9	104
ข-1.16	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลา เมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น H_2S และ $KMnO_4$ เท่ากับ 2.94 mM และ 1.90 mM ตามลำดับ อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 11	104
ข-1.17	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S เท่ากับ 5.42 mM ความเข้มข้นเริ่มต้น $KMnO_4$ เท่ากับ 2.21 mM อุณหภูมิ 315.15 K และ pH 5.5	105
ข-1.18	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S เท่ากับ 7.35 mM ความเข้มข้นเริ่มต้น $KMnO_4$ เท่ากับ 1.35 mM อุณหภูมิ 308.15 K และ pH 6	105
ข-1.19	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S เท่ากับ 6.47 mM ความเข้มข้นเริ่มต้น $KMnO_4$ เท่ากับ 1.14 mM อุณหภูมิ 318.15 K และ pH 8	106
ข-1.20	ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S เท่ากับ 6.47 mM ความเข้มข้นเริ่มต้น $KMnO_4$ เท่ากับ 1.14 mM อุณหภูมิ 318.15 K และ pH 8	106

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-1.21	ข้อมูลความเข้มข้นของ H ₂ S และ KMnO ₄ กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H ₂ S ด้วย KMnO ₄ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ H ₂ S เท่ากับ 6.47 mM ความเข้มข้นเริ่มต้น KMnO ₄ เท่ากับ 1.14 mM อุณหภูมิ 318.15 K และ pH 8	107
ข-2.1	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 2828 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 200 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	108
ข-2.2	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 1644 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 4 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 2.5 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 600 mg/l ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 10 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	108
ข-2.3	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 2856 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 2.5 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 1100 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	109
ข-2.4	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 4111 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 600 mg/l ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 10 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	109
ข-2.5	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 1636 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 1 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 600 mg/l ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 20 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	110

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-2.6	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 2870 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 1100 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	110
ข-2.7	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 1543 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 2 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 1600 mg/l ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 20 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	111
ข-2.8	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 3680 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 1600 mg/l ที่อัตราการไหล 20 ml/min และ L/G ratio 20 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	111
ข-2.9	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 2811 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 1100 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	112
ข-2.10	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 2586 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 2000 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	112
ข-2.11	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 4236 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 1600 mg/l ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 10 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	113

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-2.12	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 1740 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 4 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 2.5 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 1600 mg/l ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 10 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	113
ข-2.13	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 2796 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 1100 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	114
ข-2.14	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 667 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 1 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 1100 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	114
ข-2.15	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 2652 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 1100 mg/l ที่อัตราการไหล 20 ml/min และ L/G ratio 10 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	115
ข-2.16	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 4071 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 600 mg/l ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 20 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	115
ข-2.17	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 2712 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 1100 mg/l ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 20 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	116

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-2.18	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 4839 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 2.5 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 1100 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	116
ข-2.19	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 2816 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 1600 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	117
ข-2.20	แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H ₂ S ก่อนกำจัด 1644 ppm อัตราการไหลของ N ₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H ₂ S 1 l/min ความเข้มข้นของ KMnO ₄ 1100 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง	117
ข-3.1	แสดงผลการกำจัด H ₂ S ของการทดลองที่ 1	118
ข-3.2	แสดงผลการกำจัด H ₂ S ของการทดลองที่ 2	119
ข-3.3	แสดงผลการกำจัด H ₂ S ของการทดลองที่ 3	120
ข-3.4	แสดงผลการกำจัด H ₂ S ของการทดลองที่ 3	121
ข-3.5	ผลการวัดปริมาณแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	121

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
2-1 ภาพตัดขวางของท่อระบายน้ำเสีย แสดงการเกิดแก๊ส H ₂ S จากน้ำเสียที่อยู่ในสภาพ anaerobic และการเกิดกรดซัลฟูริกที่ผนังด้านบนของท่อ ซึ่งทำให้เกิด sewer crown corrosion	5
2-2 แสดงระดับความเข้มข้นของ H ₂ S ที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์	6
2-3 คุณลักษณะอันตรายของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์	7
2-4 ผลของ pH ที่มีต่อการเปลี่ยนรูปของ H ₂ S	8
2-5 กระบวนการดูดซึมแก๊ส	12
2-6 ทฤษฎีสองฟิล์มสำหรับการถ่ายโอนมวลระหว่างแก๊สและของเหลว	21
2-7 การไหลทิศทางแบบสวนทางภายในคอลัมน์บรรจุ	24
2-8 แสดงทิศทางการไหลเข้าและออกของกระแสแก๊ส ของเหลว สำหรับการไหลแบบสวนทางของคอลัมน์บรรจุ	25
2-9 แสดงการไหลแบบไหลขวาง	26
2-10 แสดงการไหลแบบทิศทางเดียวกันภายในคอลัมน์บรรจุ	27
2-11 วัสดุบรรจุทั่วไป	28
2-12 ความดันลดในคอลัมน์บรรจุระบบอากาศน้ำ	30
2-13 แผนภาพคุณสมบัติของคอลัมน์บรรจุ	31
3-1 แสดงชุดอุปกรณ์การทดลองปฏิกิริยาแบบแบทช์	42
3-2 แสดงชุดอุปกรณ์การทดลองปฏิกิริยาแบบแบทช์ในห้องปฏิบัติการ	43
3-3 แสดงชุดอุปกรณ์การทดลองคอลัมน์บรรจุสำหรับกำจัด H ₂ S ด้วยสารละลาย KMnO ₄	48
3-4 แสดงชุดการทดลองของคอลัมน์บรรจุที่ใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ	50
3-5 แสดงเครื่อง UV-Spectrophotometer	51
3-6 แสดงชุดเก็บตัวอย่างแก๊ส H ₂ S	55
3-7 แสดงอุปกรณ์ Calibrater	55
3-8 แสดงชุดการทดลองของคอลัมน์บรรจุที่ใช้สำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ	57

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4-1 กราฟแสดงความเข้มข้นของ H_2S กับเวลา เมื่อศึกษาผลความเข้มข้นของ H_2S โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ $KMnO_4$ เท่ากับ 1.90 mM อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7	60
4-2 กราฟแสดงความเข้มข้นของ H_2S กับเวลา เมื่อศึกษาผลความเข้มข้นของ $KMnO_4$ โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S เท่ากับ 2.94 mM อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7	60
4-3 กราฟแสดงความเข้มข้นของ H_2S ลดลงกับเวลา ที่อุณหภูมิช่วง 303.15 ถึง 323.15 K เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S เท่ากับ 2.94 mM และความเข้มข้นเริ่มต้นของ $KMnO_4$ เท่ากับ 1.89 mM และ pH เท่ากับ 7	62
4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย $KMnO_4$	64
4-5 กราฟแสดงความเข้มข้นของ H_2S กับเวลาในช่วง pH 5 ถึง 11 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S 2.94 mM ความเข้มข้นเริ่มต้นของ $KMnO_4$ เท่ากับ 1.89 mM และอุณหภูมิ 303.15 K	65
4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่วัดได้จากการทดลอง กับค่าที่ได้จากการคำนวณสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย $KMnO_4$ ที่สภาวะต่าง ๆ	67
4-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด H_2S กับความเข้มข้นของ $KMnO_4$	68
4-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด H_2S กับความเข้มข้นของ H_2S	70
4-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด H_2S กับ L/G ratio	71
4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง Linear interaction	74
4-11 กราฟพื้นผิวระหว่างผลของความเข้มข้นของ H_2S และ ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S	76

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4-12 กราฟพื้นผิวระหว่างผลของของ L/G และ ความเข้มข้นของ KMnO_4 ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S	77
4-13 กราฟพื้นผิวระหว่างผลของของ L/G และ ความเข้มข้นของ H_2S ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S	78
4-14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัด H_2S จากแก๊สชีวภาพโดยใช้ น้ำเป็นสารดูดซึม ความเข้มข้นของ H_2S ในแก๊สชีวภาพเท่ากับ 1240 ppm สัดส่วนอัตราการไหลของน้ำและของอากาศ 0.2 L gas/L liq. และเวลา	82
4-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด H_2S เมื่อใช้สารละลาย KMnO_4 ในสัดส่วนความเข้มข้น (mg/L) ต่างๆ	83
ก-1 แสดงกราฟมาตรฐานของแมงกานีส	123

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือ “แก๊สไข่เน่า” จัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบซัลเฟอร์ระเหยง่าย (Volatile Sulfur Compounds, VSCs) (Moosavi *et al.*, 2005) H_2S สามารถพบได้ในแหล่งต่างๆ เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ โดยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้อากาศ และในอุตสาหกรรมซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง โดย H_2S ที่ถูกปล่อยสู่บรรยากาศจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นซัลเฟต (SO_4^{2-}) ซึ่งเมื่อรวมตัวกับไอน้ำหรือฝนจะก่อให้เกิดไอน้ำหรือฝนที่มีฤทธิ์เป็นกรดที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการดำรงชีพของคนสัตว์และพืชโดยตรง นอกจากนี้แหล่งดังกล่าวแล้วในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภทได้ทำการผลิตแก๊สชีวภาพจากระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน (Renewable energy) เพื่อลดต้นทุนการผลิตของโรงงาน แต่แก๊สชีวภาพที่ผลิตได้จะมี H_2S ปนเปื้อนอยู่ด้วย H_2S ที่ปนเปื้อนอยู่ในแก๊สชีวภาพสามารถทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนของอุปกรณ์เครื่องจักรและยังผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องได้ โดยมาตรฐานความเข้มข้นของ H_2S ในระดับความปลอดภัยต่อสุขภาพที่กำหนดโดย OSHA (Occupational Safety and Health Administration, 1990) ในช่วงระยะเวลาสัมผัส 8 ชั่วโมง ความเข้มข้นของ H_2S ต้องมีค่าไม่เกิน 10 ppm ในช่วงระยะเวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง ต้องมีค่าไม่เกิน 300 ppm ถ้าสัมผัส H_2S ที่ความเข้มข้น 600 ppm ในช่วงเวลาเพียง 30 นาที ก็จะสามารถทำให้ถึงแก่ชีวิตได้ ส่วนมาตรฐานของแก๊สชีวภาพที่สามารถนำไปใช้ในเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า (Electric power generator) ก็จะต้องมี H_2S ปนเปื้อนอยู่ไม่เกิน 100-200 ppm

จากปัญหาการปนเปื้อนของ H_2S ในบรรยากาศและการปนเปื้อนของ H_2S ในแก๊สชีวภาพจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาหาเทคนิคที่สามารถกำจัด H_2S จากอากาศและจากแก๊สชีวภาพที่มีประสิทธิภาพและมีต้นทุนการดำเนินการที่ไม่สูงมาก โดยทั่วไปการกำจัด H_2S สามารถทำได้ทั้งวิธีทางเคมีและวิธีทางชีวภาพ Paglla and Faveri (2000) ได้ศึกษาการกำจัด H_2S จากกระแสแก๊สโดยใช้กระบวนการทางเคมีร่วมกับกระบวนการทางชีวภาพ กล่าวคือมีทั้งขั้นตอนการดูดซับด้วยสารเคมี

คือ สารละลายเฟอร์ริกและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแบคทีเรียชนิด Thiobacillus ferrooxidation พบว่ากระบวนการทางชีวภาพมีข้อจำกัดเมื่อใช้กับแก๊สที่มี H_2S ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง และจากการศึกษาโดย (Gao *et al.*, 2000) พบว่าการกำจัด H_2S จากอากาศ โดยใช้กระบวนการทางชีวภาพนั้นมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงกว่ากระบวนการทางเคมีประมาณ 18% และต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมากกว่าการใช้กระบวนการทางเคมีถึง 1 เท่าตัว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการกำจัด H_2S ด้วยวิธีการทางเคมี โดยระบบการกำจัด H_2S ที่เลือกศึกษาในงานวิจัยนี้เป็น ระบบหอดูดซึม (Absorber) ชนิดคอลัมน์บรรจุ (Packed column) ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) เป็นสารออกซิแดนต์ (Oxidant) เพราะเป็นกระบวนการที่สามารถดำเนินการได้ง่ายและมีต้นทุนการดำเนินการไม่สูง แต่ปัญหาของการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันดังกล่าวยังขาดความเข้าใจในจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S ด้วย $KMnO_4$ ซึ่งข้อมูลจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยามีความสำคัญในเลือกใช้ความเข้มข้นและปริมาณของ $KMnO_4$ ที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในหอดูดซึมต่อไป การวิจัยนี้จะนำไปสู่คำตอบทั้งในแง่จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาและการใช้หอดูดซึมร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันในการกำจัด H_2S จากกระแสแก๊สได้ในที่สุด นอกจากนี้แล้วยังเชื่อได้ว่ากระบวนการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อบำบัดแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพที่ผลิตจากน้ำเสียหรือของเสียจากอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ ในปฏิกรณ์แบบแบทช์ (Batch reactor)

1.2.2 เพื่อศึกษาการกำจัด H_2S โดยใช้คอลัมน์บรรจุร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันในระดับห้องปฏิบัติการ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันและการกำจัด H_2S ด้วย $KMnO_4$ ซึ่งมีขอบเขตการวิจัยนี้ดังนี้

1.3.1 ทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ ในปฏิกรณ์แบบแบทช์และนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์หากฎอัตราของปฏิกิริยา

1.3.2 ทดลองการกำจัด H_2S ด้วยสารละลาย $KMnO_4$ ในปฏิกรณ์ชนิดคอลัมน์บรรจุและการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการของคอลัมน์บรรจุโดยใช้เทคนิค RSM ในการออกแบบการทดลอง

1.3.3 ทดลองการกำจัด H_2S ในแก๊สชีวภาพจากฟาร์มสุกรด้วยสารละลาย $KMnO_4$ โดยใช้คอลัมน์บรรจุ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทราบข้อมูลจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาระหว่าง H_2S กับ $KMnO_4$

1.4.2 สามารถนำข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ไปประยุกต์ใช้กับหอดูดซึมเพื่อควบคุมประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ให้คงที่

1.4.3 ทราบแนวทางในการดำเนินการเพื่อกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากกระแสแก๊สในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการขยายขนาดกระบวนการกำจัด H_2S ในกระแสแก๊สชีวภาพระดับอุตสาหกรรม

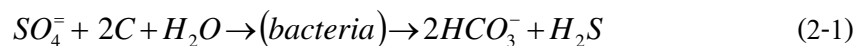
1.4.4 ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมในการกำจัด H_2S ด้วยสารละลาย $KMnO_4$ โดยใช้คอลัมน์บรรจุร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน

บทที่ 2

ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แหล่งของการเกิด H₂S และผลกระทบของ H₂S

แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) เป็นที่รู้จักกันในชื่อของแก๊สไข่เน่า โดยแก๊สชนิดนี้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบซัลเฟอร์ระเหยง่าย (Volatile Sulfur Compound, VSCs) (Moosavi *et al.*, 2005) แก๊ส H₂S เกิดขึ้นจากหลายกระบวนการหรือจากหลายแหล่ง H₂S ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตกระแสไฟฟ้า H₂S เกิดขึ้นจากกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น การย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic) เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ โดยมีกระบวนการที่เกี่ยวข้อง คือ สารอินทรีย์จำพวกโปรตีนที่มีธาตุซัลเฟอร์ (S) เป็นส่วนประกอบจะถูกย่อยสลายเป็น H₂S โดยกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีการใช้ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria) ซึ่งแสดงตามปฏิกิริยาในสมการที่ (2-1) โดยมีการใช้ออกซิเจนในสารประกอบซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายและผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ H₂S ซึ่งเป็นแก๊สที่มีกลิ่นเหม็น



ถ้าความเข้มข้นของ H₂S ในแก๊สชีวภาพสูงกว่า 100 ppm ขึ้นไปแก๊สชีวภาพจะมีคุณสมบัติในการกัดกร่อนสูงทำให้เกิดการผุกร่อนต่อตัวระบบและอุปกรณ์ส่วนประกอบต่างๆของระบบผลิตกระแสไฟฟ้า (Generator) หรือเครื่องจักรอื่นๆที่ใช้แก๊สชีวภาพนั้นได้ การกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาที่แก๊ส H₂S ถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนทำให้เกิดเป็นกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ดังแสดงในสมการที่ (2-2) ตัวอย่างของการกัดกร่อนที่เกิดจาก H₂S สามารถพบได้ในท่อส่งน้ำเสียดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-1 ซึ่งแสดงการเกิดแก๊ส H₂S จากน้ำเสียที่อยู่ในสภาพ Anaerobic และการเกิดกรดซัลฟิวริกภายในท่อ และทำให้เกิดการกัดกร่อน (Thistlethwayte, 1972)



2.2 คุณสมบัติของสารประกอบซัลไฟด์

2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ H₂S

แก๊ส H₂S เป็นแก๊สที่ไม่มีสี แต่มีกลิ่นเหม็นคล้ายไข่เน่า มีน้ำหนักมากกว่าอากาศเล็กน้อย แก๊ส H₂S เป็นแก๊สที่มีอันตรายต่อมนุษย์ ในกรณีที่มีอยู่ในปริมาณไม่มากจะก่อให้เกิดอาการปวดหัว คลื่นไส้ ระคายเคืองตา ส่วนในกรณีที่มีความเข้มข้นสูง อาจทำให้ขบวนการหายใจหยุดชะงัก หมดสติและ อาจถึงชีวิตได้ ระดับความเข้มข้นของแก๊ส H₂S ที่ก่อให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์แสดงรายละเอียดในภาพประกอบที่ 2-2



ภาพประกอบที่ 2-2 แสดงระดับความเข้มข้นของ H₂S ที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์

(Sub committees On Hydrogen Sulfide, Division of Medical Sciences National Research Council, Washington, D.C. 1979)

นอกจากนี้แล้ว H₂S ยังเป็นแก๊สที่สามารถทำให้เกิดการระเบิดได้ ถ้ามีความเข้มข้นในอากาศตั้งแต่ 4.3 ถึง 45.0 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-3

Chemical Formula H₂S

General Properties

- Irritant and poisonous volatile compound
- Rotten egg odor in small concentration
- Exposure for 1.5 to 2 minutes at 0.01% impair sense of smell
- Odor not evident at high concentration
- Colorless
- Flammable

Specific Gravity (compound to air = 10); 1,19

Physiological Effects

- Impair sense of smell rapidly as concentration
- Death in few minutes at 0.2%
- Exposure to 0.07% to 0.1% rapidly cause acute poisoning
- Paralyze respiratory center

Maximum Safe 15 Minute Exposure: 20 ppm (OSHA)

Explosive Range, percent by volume in air

- Lower Explosive Limit: 4.5
- Upper Explosive Limit: 45.0

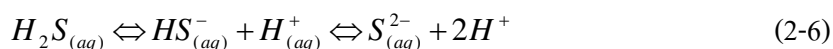
Likely Location of Highest Concentration

- Near bottom of confined space, but may be higher if air is heated and highly humid
- Areas of turbulence in collection system
- Low-lying flat sewers

Most common Source Sewer gas or sludge gas resulting from wastewater or waste constituents that have undergone anaerobic decomposition

ภาพประกอบที่ 2-3 คุณลักษณะอันตรายของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Bowker, 1989)

Pfaffin *et al.* (1992) รายงานว่าการละลายน้ำของ H₂S เป็นไปตามสมดุลของการละลาย โดยสามารถแบ่งการละลายของซัลไฟด์ได้เป็น 3 รูปแบบ คือ H₂S, HS⁻ และ S²⁻ ดังสมการที่ (2-6)



และการแตกตัวของ H_2S ขึ้นกับค่าคงที่การแตกตัวดังอธิบายด้วยสมการ (2-7) ถึง (2-10)



$$K_1 = \frac{C_{HS^-} - C_{H^+}}{C_{H_2S}} = 10^{-7} \text{ ที่อุณหภูมิ } 25^\circ\text{C} \quad (2-8)$$

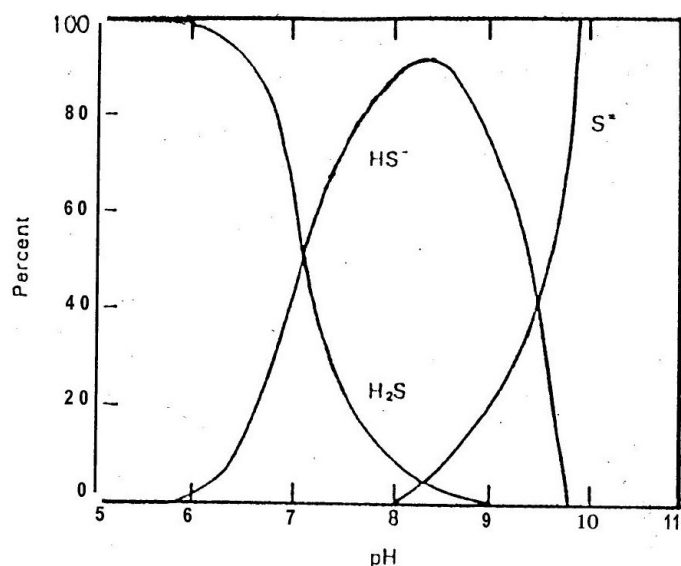


$$K_2 = \frac{C_{S^{2-}} - C_{H^+}}{C_{HS^-}} = 10^{-12.96} \text{ ที่อุณหภูมิ } 25^\circ\text{C} \quad (2-10)$$

โดยที่ K_1 = ค่าคงที่ของการแตกตัวของโปรตรอนตัวแรก, mol/m^3

K_2 = ค่าคงที่ของการแตกตัวของโปรตรอนตัวที่สอง, mol/m^3

ทั้งนี้ปริมาณของ H_2S , HS^- และ S^{2-} ในสมการข้างต้นนี้จะขึ้นอยู่กับ pH ของระบบ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-4



ภาพประกอบที่ 2-4 ผลของ pH ที่มีต่อการเปลี่ยนรูปของ H_2S (Bowker, 1989)

จากภาพประกอบที่ 2-4 แสดงให้เห็นว่าที่ pH สูงกว่าหรือเท่ากับ 8 ซัลไฟด์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ HS^- และ S^{2-} และมี H_2S อยู่ น้อยมาก ถ้า pH น้อยกว่าหรือเท่ากับ 7 พบว่าจะมี H_2S มากพอที่จะทำให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่น แก๊ส H_2S มีความสามารถในการละลายน้ำจำกัด ความสามารถในการละลายน้ำสูงสุดของ H_2S ที่อุณหภูมิปกติคือ 3,000-4,000 mg/l (ไพศาล, 2549) และความสามารถในการละลายน้ำของแก๊ส H_2S ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 2-1 ซึ่ง จะเห็นได้ว่าความสามารถในการละลายน้ำของ H_2S ลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น

ตารางที่ 2-1 ความสามารถในการละลายน้ำของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Piscarczyk, 1982)

Temperature °C	Solubility mg./day
0	0
5	6,648
10	5,646
15	4,810
20	4,150
25	3,618
30	3,175
35	2,806
40	2,491
50	2,221

2.3 การควบคุมและการกำจัด H_2S

ปัจจุบันกระบวนการควบคุมและกำจัดแก๊ส H_2S มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี สามารถแบ่งตามกระบวนการที่ใช้ออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ กระบวนการทางชีวภาพ และกระบวนการทางเคมี

2.3.1 การกำจัดแก๊ส H_2S ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

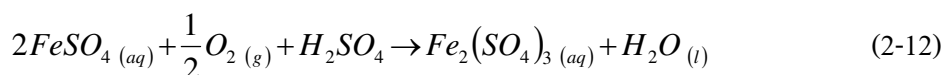
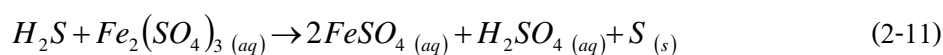
เป็นการกำจัดแก๊ส H_2S โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เปลี่ยนแก๊ส H_2S ให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษต่ำ ในที่นี้สามารถแบ่งจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดซัลไฟด์ออกเป็น 2 กลุ่ม

2.3.1.1 จุลินทรีย์ที่กำจัดซัลไฟด์โดยตรง

เชื้อจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถออกซิไดซ์แก๊ส H_2S ให้กลายเป็นกำมะถันได้โดยตรง และขับกำมะถันออกจากเซลล์ ตัวอย่างของเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้คือ จุลินทรีย์ในตระกูล *Thiobacillus* sp. เช่น *Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus thioautotrophicus* และ *Thiobacillus denitrificans* เป็นต้น

2.3.1.2 จุลินทรีย์ที่กำจัดซัลไฟด์ทางอ้อม

การกำจัดซัลไฟด์โดยจุลินทรีย์ทางอ้อมเป็นการกำจัด H_2S โดยจุลินทรีย์ที่สามารถใช้สารประกอบสารอนินทรีย์เหล็กเป็นแหล่งพลังงานในการดำรงชีพ เช่น การออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์ไรต์ให้กลายเป็นเหล็กเฟอร์ริกแล้วส่งอิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันผ่านลูกโซ่การขนส่งอิเล็กตรอนไปยังออกซิเจน ซึ่งเหล็กเฟอร์ริกที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับแก๊ส H_2S ดังแสดงในสมการที่ (2-11) และ (2-12)



ถึงแม้ว่าวิธีทางชีวภาพมีข้อดีของการช่วยลดปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดและปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม แต่วิธีดังกล่าวไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้กำจัดแก๊ส H_2S ที่เป็นพิษสูงและมีปริมาณมาก นอกจากนี้แล้วข้อเสียของกระบวนการทางชีวภาพคือกระบวนการนี้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงกว่ากระบวนการทางเคมีประมาณ 18% และใช้พื้นที่ในการติดตั้งมากกว่าประมาณ 1 เท่าตัว (Gao *et al*, 2001) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกการกำจัดแก๊ส H_2S ด้วยวิธีทางเคมี

2.3.2 วิธีการกำจัด H_2S ด้วยกระบวนการทางเคมี

เป็นการกำจัดแก๊ส H_2S โดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการเปลี่ยนรูป H_2S ให้อยู่ในรูปแบบอื่น เพื่อง่ายสำหรับการกำจัดซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง คือ

2.3.2.1 การใช้วัสดุดูดซับ (Absorption Material)

เป็นการแยกแก๊สมลพิษออกจากกระแสแก๊สด้วยวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับสูง แก๊สมลพิษหรือสารระเหยจะถูกดูดติดบนผิวของวัสดุแข็งที่เรียกว่า วัสดุดูดซับ (Adsorbent) กระบวนการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับเชิงกายภาพ (Physical adsorption) คือ การที่โมเลกุลของแก๊สเกาะติดอยู่ที่ผิวของวัสดุดูดซับด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (Van der Waals) การดูดซับเชิงกายภาพ เป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ และการดูดซับเชิงเคมี คือ การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างวัสดุดูดซับกับ โมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับด้วยแรงพันธะระหว่างโมเลกุล เป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้เพราะเมื่อโมเลกุลหลุดจากการถูกดูดซับ

โครงสร้างทางเคมีจะเปลี่ยนแปลงไป (Joseph and Beachler, 1981) คุณภาพของการดูดซับขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของแข็ง อุณหภูมิ ความดัน และสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารดูดซับ สารดูดซับที่นิยมใช้ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon), ซิลิกาเจล (Silica gel), อะลูมินากัมมันต์ (Activated alumina) และโมเลกุลาสีฟ (Molecular sieve) เป็นต้น คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับเหล่านี้แสดงดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับ (Japanese Standard Association, 1993)

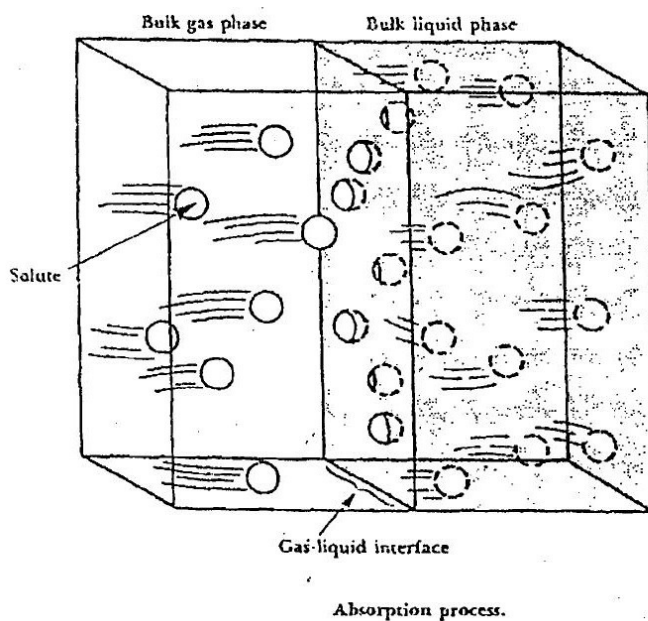
Absorbent	Internal Porosity (%)	Surface Area (m ² /g)	Pore Volume (cm ³ /g)	Bulk Density (g/cm ³)	Mean Pore Diameter (nm)
Activated carbon	55-75	600-1600	0.80-1.20	0.35-0.50	150-200
Activated alumina	30-40	200-300	0.29-0.37	0.90-1.00	180-200*
Molecular sieves	40-55	600-700	0.27-0.38	0.80	30-90
Silica gel	70	750	0.40	0.70	220

* The 150-200 nanometer average is for the micropores only ; since 95% of the surface area is associated with them

ข้อจำกัดของการใช้วัสดุดูดซับ คือ ความยุ่งยากสำหรับการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดนี้งานวิจัยได้เลือกวิธีการใช้ของเหลวดูดซึมแทนการดูดซับที่เป็นของแข็ง

2.3.2.2 การใช้ของเหลวดูดซึม (Liquid absorption)

การดูดซึมแก๊สด้วยของเหลวเป็นวิธีการอาศัยความเข้มข้นที่แตกต่างกันระหว่างความเข้มข้นของแก๊สและของของเหลว เป็นตัวผลักดันให้เกิดการเคลื่อนที่ของแก๊สพิชที่มีความเข้มข้นสูงไปยังของเหลว การเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมทำได้โดยใช้สารเคมีเติมลงไปในของเหลวเพื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สที่ละลายในของเหลว ประสิทธิภาพของการดูดซึมขึ้นอยู่กับ ชนิดของของเหลว ระยะเวลาในการสัมผัส พื้นที่ผิวสัมผัส ความปั่นป่วนภายในหอสัมผัสและสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย กระบวนการดูดซึมแก๊สด้วยของเหลวดูดซึมแสดงดังภาพประกอบที่



ภาพประกอบที่ 2-5 กระบวนการดูดซึมแก๊ส (Joseph and Beachler, 1981)

กระบวนการดูดซึม H_2S ด้วยวิธีการทางเคมีมีการศึกษาและรายงานไว้หลายระบบ ได้แก่ Katz (1959) ได้รวบรวมกระบวนการกำจัดแก๊ส H_2S ด้วยวิธีการดูดซึมไว้หลายกระบวนการ ดังนี้

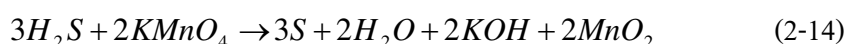
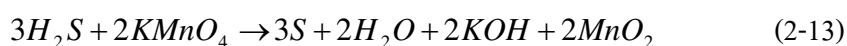
1. Aqueous Amine Process เป็นการกำจัดแก๊ส H_2S โดยใช้สารเอมีนเป็นตัวดูดซึม เช่น Monoethanolamine (MEA), Diethanolamine (DEA), Triethanolamine (TEA) และ Methyl-ethanolamine (MDEA) ในรูปสารละลาย
2. Sea-board Process เป็นการกำจัด H_2S โดยใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต
3. Hot Potassium Carbonate Process เป็นการกำจัดแก๊ส H_2S โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต
4. Thylox Process เป็นการกำจัด H_2S โดยใช้สารเคมีจำพวก Aqueous sodium หรือสารละลาย Ammonium thioarsenate กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้เฉพาะ เนื่องจากสารเคมีที่ใช้มีราคาแพง
5. Shell Process เป็นการกำจัด H_2S โดยใช้สารเคมีจำพวก Aqueous tripotassium phosphate solution
6. Phenolase Process วิธีนี้ประสิทธิภาพต่ำจึงไม่นิยมใช้

7. Stretford Process เป็นการกำจัด H_2S โดยใช้สารจำพวก Quinine solution ภายหลังทำปฏิกิริยาจะได้ Hydroquinone และ ผงกำมะถันทั้งนี้สารเคมีที่นิยมใช้ในการกำจัด H_2S เชิงพาณิชย์ดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 สารเคมีที่นิยมใช้ในการกำจัดแก๊ส H_2S เชิงพาณิชย์ (Perry and Chiton, 1973)

Solute	Solvent	Reagent	Degree of commercial		
			High	Moderate	Low
H_2S	Water	-	x		
		Monoethanolamine	x		
		Diethanolamine	x		
		Triethanolamine			x
		Diaminoisopropane			x
		Methyl diethanolamine			x
		$NaOC_6H_5$			x
		K_2CO_3, Na_2CO_3	x		
		NH_3		x	
		$NaOH, KOH$		x	
		K_2HPO_4, K_3PO_4		x	

งานวิจัยนี้จึงสนใจการกำจัด H_2S ด้วยวิธีการทางเคมีใช้ของเหลวดูดซึม โดยระบบการกำจัด H_2S ที่เลือกศึกษาในงานวิจัยนี้เป็น ระบบหอดูดซึม (Absorber) ชนิดคอลัมน์บรรจุร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) เป็นสารออกซิแดนต์ (Oxidant) ทำหน้าที่เป็นของเหลวดูดซึม สาเหตุที่เลือกใช้เพราะเป็นสารเคมีที่หาได้ง่ายและมีราคาไม่แพง Pisarczyk and Rossi (1982) ปฏิกิริยาของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ ขึ้นอยู่กับค่า pH ของปฏิกิริยา แสดงสมการปฏิกิริยาเคมีที่สภาวะกรด และเบส ดังสมการที่ (2-13) และ (2-14) ตามลำดับ



2.4 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมี

2.4.1 การออกแบบปฏิกิริยา

การออกแบบและควบคุมเครื่องปฏิกรณ์นั้นไม่เพียงแต่ประกอบด้วยความเข้าใจด้านกระบวนการทางกายภาพ เช่น อัตราการถ่ายเทมวลหรืออัตราการถ่ายเทความร้อนเท่านั้นแต่ต้องเข้าใจด้านกระบวนการเคมี เช่น จลนพลศาสตร์เคมีเป็นวิชาที่ว่าด้วยอัตราเร็วและกลไกของการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีหนึ่งไปเป็นอีกสารเคมีหนึ่ง อัตราเร็วปฏิกิริยามีหน่วยเป็นมวลสารทำปฏิกิริยาที่สูญหายไป หรือมวลของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลา ส่วนกลไกหมายถึงกระบวนการทางกายภาพทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับโมเลกุลของปฏิกิริยาไม่ว่าเกิดขึ้นพร้อมกันหรือเกิดขึ้นตามลำดับ ปกติแล้วการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไม่จำเป็นต้องทราบกลไกของปฏิกิริยาแต่สิ่งที่จำเป็น คือ อัตราเร็วของปฏิกิริยา (Rate of reaction) ที่มีผลต่อการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ โดยการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เริ่มต้นจากการเขียนสมการสมดุลมวลและพลังงานของชนิดเครื่องปฏิกรณ์ที่เลือกก่อน ซึ่งในสมการสมดุลมวลและพลังงานแยกออกเป็น 2 เทอม เทอมหนึ่งเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอัตราการถ่ายเทมวลหรืออัตราการถ่ายเทความร้อน ส่วนอีกเทอมหนึ่งเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอัตราเร็วปฏิกิริยาเคมี (วิโรจน์, 2544)

โดยอัตราเร็วปฏิกิริยามีหน่วยเป็นมวลของสารทำปฏิกิริยาที่สูญหายไปหรือมวลผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลา อัตราเร็วทางเคมีได้มาจากการทดลองเพียงอย่างเดียว ซึ่งไม่สามารถอาศัยการคาดคะเนได้ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วย ธรรมชาติของสารตั้งต้น (Reactant) และผลิตภัณฑ์ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิ และอิทธิพลของสารจากภายนอก เช่น ตัวเร่ง (Catalysts) หรือตัวขัดขวางปฏิกิริยา (Inhibitors) ถ้ามีการแยกอัตราเร็วทางกายภาพออกจากอัตราเร็วทางเคมีก็สามารถนำอัตราเร็วทางเคมีไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบปฏิกรณ์ในรูปแบบใดๆ ก็ได้

อัตราเร็วของปฏิกิริยานั้นไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่วิเคราะห์ได้จากข้อมูลการทดลองในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามอัตราเร็วปฏิกิริยานั้นมีอิทธิพลของอัตราการถ่ายเทมวลหรือความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นอัตราเร็วปฏิกิริยาเพื่อใช้สำหรับการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นั้นจะต้องวิเคราะห์จากเครื่องปฏิกรณ์ในห้องปฏิบัติการที่ออกแบบอย่างดี ซึ่งสามารถตัดอิทธิพลของอัตราการถ่ายเทมวลหรือความร้อนของมวลออกไปได้ กล่าวคือเครื่องปฏิกรณ์ระดับห้องปฏิบัติการต้องควบคุมให้ความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาหรือผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิเท่ากันทุกจุดในเครื่องปฏิกรณ์และให้การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยาเท่านั้น การทดลองศึกษาหาอัตราเร็วปฏิกิริยาจึงนิยมทำการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนหรือแบตช์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และปริมาตรคงที่

2.4.2 นิยามอัตราเร็วปฏิกิริยา

อัตราเร็วปฏิกิริยาเอกพันธ์ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงเชิงมวลหรือจำนวนโมล เนื่องจากปฏิกิริยาของสารทำปฏิกิริยาหรือผลิตภัณฑ์ต่อเวลาต่อปริมาตรของสารผสมในปฏิกิริยา ตามนิยามที่กล่าวมา ถ้าให้ i เป็นสารชนิด (Species) ใดๆ ในปฏิกิริยา อัตราเร็วปฏิกิริยาของสาร i สามารถแสดงได้ดังสมการ (2-15)

$$r_i = \frac{1}{V} \frac{dn_i}{dt} = \frac{dC_i}{dt} \quad (2-15)$$

โดยที่ n_i (-) = จำนวนโมลของสาร i

C_i (mol.dm⁻³) = ความเข้มข้นของสาร i

ในกรณีที่สาร i เป็นสารทำปฏิกิริยา อัตราเร็วปฏิกิริยา r_i มีค่าเป็นลบซึ่งแสดงถึงอัตราการสูญเสียไปของสารทำปฏิกิริยา ถ้าสาร i เป็นผลิตภัณฑ์ อัตราเร็วปฏิกิริยา r_i มีค่าเป็นบวกซึ่งแสดงถึงอัตราการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ ในกรณีที่สัมประสิทธิ์ปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric coefficient) ของสารทำปฏิกิริยาและของผลิตภัณฑ์ไม่เท่ากัน อัตราเร็วปฏิกิริยาของสารทำปฏิกิริยาและของผลิตภัณฑ์มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ปริมาณสัมพันธ์ และเปลี่ยนไปเมื่อมีการใช้สารทำปฏิกิริยาหรือผลิตภัณฑ์เป็นเกณฑ์ เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous reaction) ดังสมการที่ (2-16)



โดยที่ A, B เรียกว่า สารทำปฏิกิริยา (Reactant) ส่วน C, D เรียกว่า ผลิตภัณฑ์ (Product) และเรียกสารผสมของทั้งสารทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ว่า สารผสม (Reaction mixture) อัตราเร็วปฏิกิริยาของสารองค์ประกอบใดๆ หาได้จากสัมประสิทธิ์ของสารองค์ประกอบนั้นๆ ดังสมการที่ (2-17)

$$\frac{-r_A}{a} = \frac{-r_B}{b} = \frac{r_C}{c} = \frac{r_D}{d} \quad (2-17)$$

ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าถ้าค่าสัมประสิทธิ์ (Stoichiometric coefficient) a, b, c และ d ของสารองค์ประกอบมีค่าเปลี่ยนแปลงไป อัตราเร็วปฏิกิริยาขององค์ประกอบนั้นก็เปลี่ยนไปด้วย

2.4.3 กฎอัตราเร็วปฏิกิริยา (Rate law)

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยามีความเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของสารทำปฏิกิริยาซึ่งมักแสดงด้วยสมการของผลคูณระหว่างความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาที่ยกกำลังด้วยอันดับของปฏิกิริยากับค่าคงที่ของกฎอัตรา ดังสมการที่ (2-18)

$$-r_A = \frac{-dC_A}{dt} = kC_A^\alpha C_B^\beta \quad (2-18)$$

โดยที่ α เป็นอันดับของปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับ A และ β เป็นอันดับของปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับ B และค่า k คือค่าคงที่ปฏิกิริยา (Rate constant) ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาแต่ขึ้นกับอุณหภูมิ และผลรวมของ $\alpha + \beta$ คืออันดับรวมของปฏิกิริยา อันดับปฏิกิริยาไม่จำเป็นต้องเป็นเลขจำนวนเต็ม โดยอาจจะเป็นเศษส่วนหรือ 0 ก็ได้

2.4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราเร็วปฏิกิริยาเคมี

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่ของปฏิกิริยา ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ปฏิกิริยากับอุณหภูมิจะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังแสดงในสมการที่ (2-19)

$$k = Ae^{-E/RT} \quad (2-19)$$

โดยที่ A = แฟกเตอร์ความถี่ (Frequency factor) (-)
 Ea = พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$)
 R = ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ (Gas constant = $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
 T = อุณหภูมิ (K)

เมื่อแทนค่า k จากสมการที่ (2-19) ลงในสมการที่ (2-18) จะได้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาแสดงในสมการที่ (2-20)

$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = Ae^{-E/RT} C_A^\alpha C_B^\beta \quad (2-20)$$

จากสมการที่ (2-19) ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Ea) นั้นคำนวณได้โดยการเปลี่ยนรูปสมการที่ (2-19) ให้เป็นสมการเชิงเส้นตรงดังสมการที่ (2-21)

$$\ln k = \ln A - Ea/RT \quad (2-21)$$

เมื่อทำการทดลองเพื่อวัดค่าคงที่ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ จะได้กราฟเส้นตรงซึ่งมีความชัน (Slope) เท่ากับ Ea/R จากความชันนี้สามารถนำไปหาค่า Ea ได้ เมื่อทราบค่า Ea ก็จะสามารถคำนวณหาค่า A ได้จากสมการที่ (2-18) ค่า Ea แสดงถึงความไวของปฏิกิริยาต่ออุณหภูมิกล่าวคือปฏิกิริยาที่มีค่า Ea สูงจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากกว่าปฏิกิริยาที่มีค่า Ea ต่ำๆ

2.4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลอัตราเร็วปฏิกิริยาจากข้อมูลการทดลอง

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยามีความสำคัญต่อการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นจึงมีการเสนอทฤษฎีต่างๆ เพื่ออธิบายอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยา เช่น ทฤษฎีการชนระหว่างโมเลกุลและทฤษฎีทรานซิชันสเตท เป็นต้น แต่ในทางปฏิบัติการได้มาซึ่งข้อมูลอัตราเร็วปฏิกิริยา เช่น ค่าคงที่ปฏิกิริยาและอันดับปฏิกิริยาจะได้อาจจากการทดลองเพียงอย่างเดียว การวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวจะนิยมดำเนินการในปฏิกรณ์แบบแบตช์ ร่วมกับเทคนิคการตรวจวัดข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็น ได้แก่ ความเข้มข้น ความดัน และปริมาตร ที่เวลาต่างๆ ข้อมูลที่ได้จากปฏิกรณ์แบบแบตช์จัดเป็นข้อมูลที่ได้รับภายใต้สภาวะไม่คงตัว และสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าคงที่ปฏิกิริยาและอันดับของปฏิกิริยาได้โดยใช้วิธีต่างๆ เช่น วิธีแบบอนุพันธ์ (Differential method) วิธีปริพันธ์ (Integral method) วิธีแบบครึ่งชีวิต (Method of half life) วิธีแบบอัตราเริ่มต้น (Method of initial rate) วิธีแบบถดถอยเชิงเส้น (Linear regression method) และวิธีแบบใช้โปรแกรม Polymath

2.4.5.1 การวิเคราะห์อัตราปฏิกิริยาด้วยวิธีดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Method of Rate Analysis)

วิธีการนี้เหมาะสำหรับอัตราเร็วปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาเพียงชนิดเดียว ตัวอย่างเช่น สาร A เกิดปฏิกิริยาเป็นผลิตภัณฑ์ P ดังสมการที่ (2-22)



สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาในรูปทั่วไปของสาร A ได้ ดังสมการที่ (2-23)

$$-r_A = kC_A^\alpha \quad (2-23)$$

และจากการคูณมวลของปฏิกรณ์แบตช์ เมื่อทราบความเข้มข้นของสาร A ที่เวลาต่างๆ สามารถหาอัตราการหายไปของสาร A ได้ ดังสมการ (2-24)

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} \quad (2-24)$$

เมื่อนำสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาจากสมการ (2-23) แทนลงในสมการที่ (2-24) ได้สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาในรูปทั่วไป ดังสมการที่ (2-25)

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A^\alpha \quad (2-25)$$

เมื่อใส่ค่าลอการิทึมของสมการที่ (2-25) สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบดิฟเฟอเรนเชียลได้ ดังสมการที่ (2-26)

$$\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right) = \ln k_A + \alpha \ln C_A \quad (2-26)$$

จากสมการที่ (2-26) เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right)$ กับ $\ln C_A$ จะสามารถหาค่า α หรืออันดับปฏิกิริยา และค่า k ได้จากความชันและจุดตัดแกน $\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right)$ ตามลำดับ

2.4.5.2 การวิเคราะห์อัตราด้วยวิธีปริพันธ์ (Integral Method of Rate Analysis)

วิธีการวิเคราะห์นี้เหมาะสำหรับใช้หาค่าคงที่ปฏิกิริยาเมื่อทราบอันดับปฏิกิริยาแล้ว โดยเริ่มต้นทำการสมมติอันดับปฏิกิริยาของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เช่น

ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็น



และถ้าสมมติให้อันดับปฏิกิริยาเป็น 1 สมการปฏิกิริยาสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2-27)

$$-r_A = \frac{-dC_A}{dt} = k_1 C_A \quad (2-27)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ (2-27) จะได้ดังสมการที่ (2-28)

$$-\ln\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right) = k_1 t \quad (2-28)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (2-28) สามารถพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\frac{C_{A0}}{C_A}$ กับ t และถ้ากราฟที่ได้เป็นเส้นตรงแสดงว่าอันดับปฏิกิริยาที่สมมติตรงกับอันดับของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ถ้ากราฟที่ได้ไม่เป็นเส้นตรงก็ให้ทำการสมมติอันดับปฏิกิริยาใหม่ ปัญหาของวิธีนี้จะพบเมื่อกราฟของอันดับปฏิกิริยาที่สมมติมีความเป็นเส้นตรงใกล้เคียงกัน

2.4.5.3 การวิเคราะห์อัตราด้วยวิธีครึ่งชีวิต (Half life Method of Rate Analysis)

ครึ่งชีวิตของปฏิกิริยา (Half life of a reaction, $t_{1/2}$) ที่เป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นเริ่มต้นสามารถนำมาหาค่าอันดับปฏิกิริยาและค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้ ครึ่งชีวิตปฏิกิริยา คือ เวลาที่ใช้ในการทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความเข้มข้นของสารตั้งต้นเริ่มต้น จากสมการทั่วไปของสมการที่สารทำปฏิกิริยาเพียงตัวเดียวที่แสดงดังสมการที่ (2-29)

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k_A C_A^\alpha \quad (2-29)$$

ถ้าสมมติให้ $\alpha = 0$ จะสามารถเขียนสมการ (2-29) ใหม่ได้เป็น

$$C_{A0} - C_A = k_0 t \quad (2-30)$$

จากนิยามของความเข้มข้นที่ครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2-31)

$$C_A(t_{1/2}) = \frac{1}{2} C_{A0} \quad (2-31)$$

แทนค่า C_A จากสมการที่ (2-31) ลงในสมการที่ (2-30) จะสามารถเขียนสมการ (2-30) ให้อยู่ในรูปของเวลาครึ่งชีวิต $t_{1/2}$ ได้ดังสมการที่ (2-32)

$$t_{1/2} = \frac{C_{A0}}{2k_0} \quad (2-32)$$

จากสมการที่ (2-32) เมื่อหาค่าลอการิทึมของสมการก็จะสามารถหาค่าคงที่ปฏิกิริยา k ในกรณีที่มีค่า α มีค่าใดๆ สามารถเขียนรูปทั่วไปของเวลาครึ่งชีวิตได้ดังแสดงในสมการที่ (2-33)

$$t_{1/2} = \frac{2^{\alpha-1} - 1}{k(\alpha - 1)} \left(\frac{1}{C_{A0}^{\alpha-1}} \right) \quad (2-33)$$

และเมื่อหาค่าลอการิทึมของสมการที่ (2-33) ผลที่ได้แสดงดังสมการที่ (2-34)

$$\ln t_{1/2} = \ln \frac{2^{\alpha-1} - 1}{k(\alpha - 1)} + (1 - \alpha) \ln C_{A0} \quad (2-34)$$

จากสมการที่ (2-34) เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $t_{1/2}$ กับ $\ln C_{A0}$ ได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1 - \alpha$ ซึ่งจะช่วยให้ทราบอันดับปฏิกิริยา α และค่าคงที่ปฏิกิริยา k ได้ วิธีการนี้ให้ผลการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือได้ ถ้าเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาหลายๆ ค่า ซึ่งเป็นผลทำให้เส้นเปลี่ยนค่าได้ง่าย

2.4.5.4 การวิเคราะห์อัตราด้วยวิธีอัตราเริ่มต้น (Initial Rates Method of Rate Analysis)

วิธีการนี้ต้องการข้อมูลการทดลองชุดหนึ่งซึ่งประกอบด้วย การทดลองหลายๆ การทดลอง ที่ใช้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น C_{A0} ต่างๆ กัน และหาอัตราเริ่มต้น $-r_{A0}$ ของแต่ละการทดลอง โดย $-r_{A0}$ สามารถหาได้จากค่าดิฟเฟอเรนเชียลของข้อมูลเทียบกับเวลา ที่เวลาเท่ากับศูนย์วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีอัตราเริ่มต้นนี้จะสามารถหลีกเลี่ยงผลของการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์นี้เพื่อหาอันดับปฏิกิริยาและค่าคงที่ของปฏิกิริยา ซึ่งเริ่มจากการนำข้อมูลความเข้มข้นกับเวลาที่ได้มาพิตโพลีโนเมียลด้วยโปรแกรม Polymath 5.1 โดยเลือกดีกรี n ที่ให้ R^2 มากที่สุด จะได้สมการโพลีโนเมียลระหว่างความเข้มข้นกับเวลา และเมื่อกำหนดให้เวลาเท่ากับศูนย์ก็จะสามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น $\left. \frac{dC}{dt} \right|_{t=0}$ ของแต่ละการทดลองได้ เมื่อทราบอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นก็สามารถคำนวณหาค่าคงที่และอันดับปฏิกิริยาได้

โดยเริ่มจากการนำข้อมูลอัตราเริ่มต้นของปฏิกิริยาที่ได้กับความเข้มข้นของสารเริ่มต้นที่ได้ป้อนลงในโปรแกรม Polymath 5.1 และกำหนดแบบจำลองของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยา วิเคราะห์ข้อมูลแบบไม่เชิงเส้น (Non linear regression) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นก็จะสามารถหาสมการอัตราปฏิกิริยาได้ โดยเกณฑ์ที่ใช้ คือค่าช่วงความน่าเชื่อถือ 95% และความแปรปรวน (Variance) มีค่าน้อยกว่าค่าของพารามิเตอร์ที่คำนวณได้แสดงว่าแบบจำลองนั้นสามารถอธิบายอัตราเร็วปฏิกิริยาได้ดี

2.4.5.5 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Polymath 5.1

เนื่องจากโปรแกรม Polymath 5.1 เป็นโปรแกรมที่ใช้งานง่ายสามารถวิเคราะห์ข้อมูลแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น การกำหนดอันดับปฏิกิริยาหรือค่าคงที่ปฏิกิริยาทำได้อย่างง่ายดายด้วย Polymath 5.1 เพียงแต่ใส่ผลการทดลองในโปรแกรม แล้วกำหนดแบบจำลองของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยา จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาที่ต้องการ โปรแกรมนี้มีการคำนวณช่วงความน่าเชื่อถือ 95 % และความแปรปรวน (Variance) ดังนั้นจึงช่วยในการตัดสินใจว่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้นั้นเป็นค่าที่เหมาะสมหรือไม่

2.5 การดูดซึมแก๊ส (Gas absorption)

2.5.1 การถ่ายเทมวลแก๊สสู่ของเหลว

การถ่ายเทมวลโดยการแพร่หรือการพาเกิดขึ้นเมื่อมีเกรเดียนต์ความเข้มข้นเฉลี่ยในแต่ละวัฏภาค ซึ่งไม่ได้อยู่ในสภาวะสมดุลกัน ทำให้เกิดการปรับเข้าสู่สภาวะสมดุลของความเข้มข้น ซึ่งจุดนี้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สและของเหลวอุดมคติได้จากกฎของเรอ์ท์ (Raoult's law) ดังสมการที่ (2-35) และ (2-36) ตามลำดับ (Welty, 1984)

สำหรับของเหลวอุดมคติ

$$P_A = x_A P_A' \quad (2-35)$$

เมื่อ P_A = ความดันย่อยขององค์ประกอบ A

x_A = เศษส่วนโมล A ในวัฏภาคของเหลว

P_A' = ความดันไอ A

และสำหรับแก๊สอุดมคติ

$$P_A = y_A P_A' \quad (2-36)$$

เมื่อ P_A = ความดันย่อยขององค์ประกอบ A
 y_A = เศษส่วนโมล A ในวัฏภาคของเหลว
 P_A' = ความดันไอ A

การถ่ายเทมวลของแก๊สไปยังของเหลวสามารถอธิบายโดยใช้ทฤษฎีสองความต้านทาน (Two resistance theory) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ (Welty,1984)

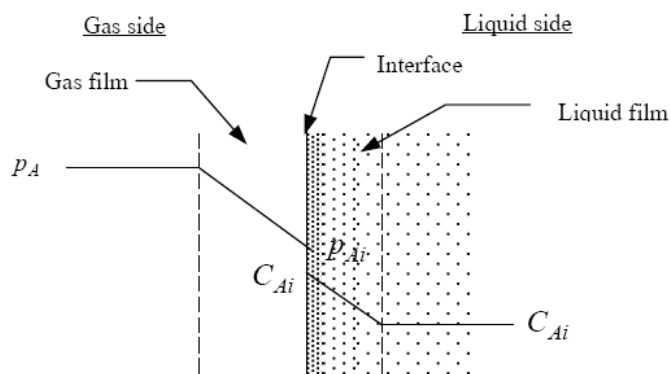
1. การถ่ายเทมวลจากวัฏภาคแก๊สไปยังผิวสัมผัสของแก๊ส
2. การถ่ายเทข้ามผิวสัมผัสไปยังฟิล์มของเหลว
3. การถ่ายเทจากฟิล์มของเหลวเข้าไปยังวัฏภาคของเหลว

ทฤษฎีนี้ได้อ้างสมมติฐานดังนี้ คือ

1. มีฟิล์มสองชั้นอยู่ที่แต่ละข้างของผิวสัมผัส (ฟิล์มด้านแก๊สและฟิล์มด้านของเหลว) และอัตราการถ่ายเทมวลถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ผ่านฟิล์มของแก๊สและของเหลว
2. ความต้านทานในการถ่ายเทมวลข้ามผิวสัมผัสมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความต้านทานของฟิล์มแก๊สและของเหลว

ขั้นตอนในการถ่ายเทมวลจากแก๊สสู่ของเหลวมากขึ้นได้แสดงดังภาพประกอบที่

2-6



ภาพประกอบที่ 2-6 ทฤษฎีสองฟิล์มสำหรับการถ่ายโอนมวลระหว่างแก๊สและของเหลว

2.5.2 การเลือกประเภทปฏิกรณ์สำหรับการดูดซึมแก๊ส

กระบวนการดูดซึมแก๊สโดยใช้สารตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือสารละลาย สารที่ใช้เป็นสารดูดซึม ส่วนมากใช้เป็นของเหลว เช่น น้ำ สารละลายจำพวกกรด เบส ในการเลือกสารดูดซึมจะพิจารณาจากความสามารถในการดูดซึมแก๊สที่ต้องการ ต้องเป็นสารที่ระเหยได้น้อย ไม่เกิดฟอง ไม่ติดไฟ ไม่กัดกร่อน ไม่เป็นพิษ มีค่าความหนืดต่ำและราคาไม่แพง ซึ่งสารดูดซึมที่ใช้ในกระบวนการอาจถูกนำมาใช้ใหม่อีกครั้งเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดและในการดำเนินการ (Welty, 1984) แบ่งประเภทของหอสัมผัสตามลักษณะของการดูดซึมแก๊สไว้เป็น 4 แบบดังนี้

2.5.2.1 แบบสเปรย์คอลัมน์ (Spray column)

เป็นหอสัมผัสที่มีการป้อนของเหลวผ่านหัวฉีด (Nozzle) เป็นละอองฝอยตกลงมาในขณะที่แก๊สไหลสวนทางสัมผัสละอองของเหลว เพื่อทำปฏิกิริยากับละอองของเหลว ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ต้องใช้ความดันลดของแก๊สน้อย และใช้แรงดันหัวฉีดสเปรย์มาก เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ละอองของเหลวที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาหลุดออกนอกเครื่องปฏิกรณ์ หอสัมผัสชนิดนี้เหมาะสำหรับแก๊สที่ละลายได้ดีมาก

2.5.2.2 แบบบับเบิลคอลัมน์ (Bubble Column)

เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ป้อนแก๊สเข้าทางด้านล่างในรูปฟองละเอียดที่ภายในเครื่องมือของเหลวบรรจุอยู่ ฟองที่มีขนาดเล็กช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของแก๊สให้สัมผัสกับของเหลวมากขึ้น การถ่ายเทมวลจะเกิดขึ้นในระหว่างการเกิดฟอง และขณะที่ฟองลอยขึ้นผ่านของเหลว ทำให้ความต้านทานเฟสของเหลวลดลง หอสัมผัสชนิดนี้เหมาะสำหรับการถ่ายเทมวลที่เฟสของเหลวเป็นตัวควบคุมการถ่ายเทมวล จึงเหมาะกับปฏิกิริยาที่เกิดช้า

2.5.2.3 Plate Tower

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่นิยมใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในกระบวนการกลั่นประกอบด้วยแผ่น (Plate) หรือ ถาด (Tray) จัดเรียงซ้อนกันในแนวตั้ง ลักษณะของแผ่นที่ใช้กันมาก คือ แบบบับเบิล และแบบตะแกรง โดยของเหลวจะไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของปฏิกรณ์ โดยผ่านแผ่นซึ่งอยู่ลดหลั่น และแก๊สไหลจากด้านล่างผ่านรูเล็กๆ ของแผ่นตะแกรงหรือแผ่นบับเบิล เกิดเป็นฟองแก๊สผ่านชั้นของเหลว การถ่ายเทมวลจะเกิดขึ้นในชั้นและเหนือชั้นของเหลว

2.5.2.4 Packed Column

เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์บรรจุนี้ มีหลักการป้อนลักษณะไหลตามทางหรือไหลสวนทางกันของแก๊สและของเหลวที่ไหลผ่านวัสดุบรรจุที่เป็นของแข็งที่ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มพื้นที่สัมผัสทำให้เกิดฟิล์มบาง ซึ่งวัสดุบรรจุไม่ทำปฏิกิริยากับเฟสแก๊สและของเหลว เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้เหมาะสำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

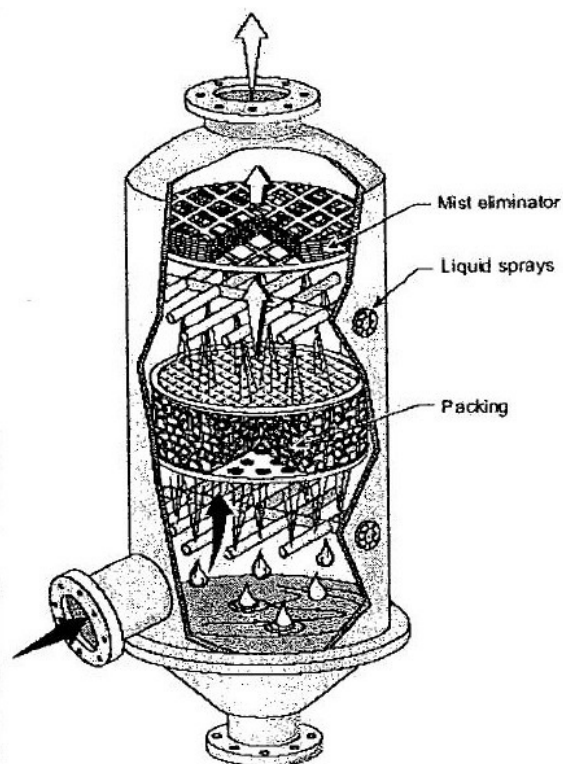
การศึกษาการดูดซึมแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้คอลัมน์บรรจุเนื่องจาก KMnO_4 เป็นสารออกซิเดนต์ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ได้สูง ปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และการออกแบบคอลัมน์ทำได้ง่าย สามารถใช้กับของเหลวที่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนสูง วัสดุบรรจุหาง่ายราคาไม่สูง

2.5.3 ประเภทของคอลัมน์บรรจุ

คอลัมน์บรรจุเมื่อแบ่งตามชนิดของการไหล แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

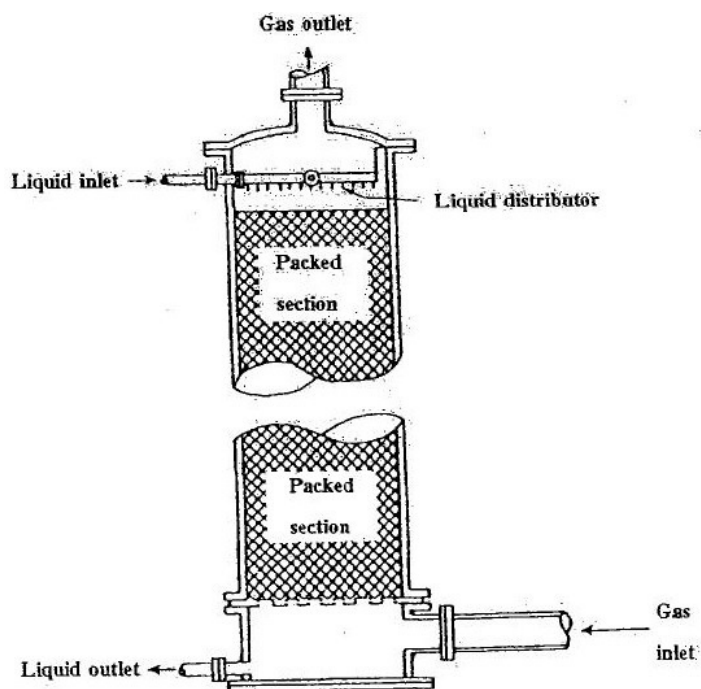
คอลัมน์บรรจุที่มีการไหลแบบสวนทาง (Countercurrent)

การดูดซึมแก๊สที่มีการไหลแบบสวนทางสามารถแสดงดังภาพประกอบที่ 2-8 โดยมีหลักการทำงานดังนี้คือ ป้อนเฟสแก๊สที่มีสารปนเปื้อนหรือริชแก๊ส (Rich gas) เข้าทางด้านล่างคอลัมน์ ผ่านอุปกรณ์กระจายแก๊ส (Gas distributor) ซึ่งอยู่ใต้วัสดุบรรจุ และไหลผ่านช่องว่างของวัสดุบรรจุขึ้นทางด้านบนของคอลัมน์ วัสดุบรรจุทำให้ทิศทางการไหลของแก๊สเกิดการเปลี่ยนแปลงที่หลากหลาย และป้อนเฟสของเหลวซึ่งเป็นตัวทำละลายบริสุทธิ์หรือสารละลายเจือจางของตัวทำละลาย เรียกว่า Weak liquor เข้าทางบนของคอลัมน์ผ่านอุปกรณ์กระจาย ซึ่งอาจใช้ชุดท่อเจาะรูหัวฉีดหรือถาดกระจายเพื่อช่วยในการกระจายของเหลว โดยเฟสของเหลวมีทิศทางการไหลสวนทางกับเฟสแก๊สผ่านช่องว่างของวัสดุบรรจุ



ภาพประกอบที่ 2-7 การไหลทิศทางแบบสวนทางภายในคอลัมน์บรรจุ
(Joseph and David, 1998)

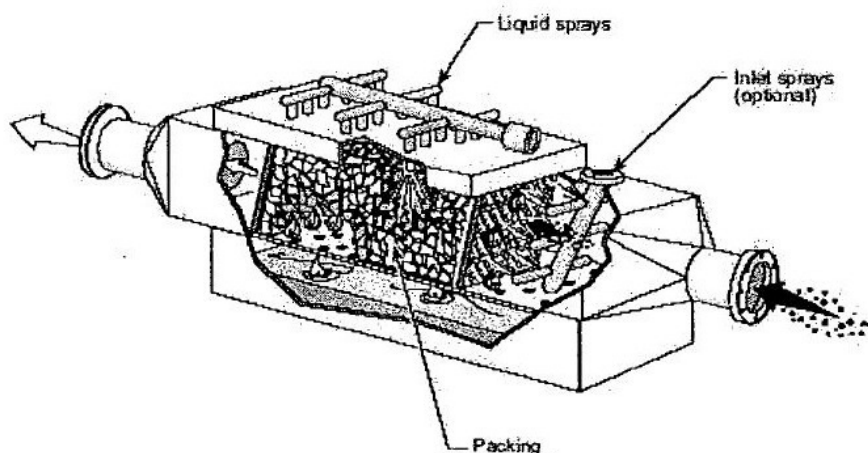
การดำเนินการในอุดมคติของเหลวจะสร้างฟิล์มบางๆ ทั่วพื้นผิวของวัสดุบรรจุซึ่งจะช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างของเหลวและแก๊ส ความแตกต่างของความเข้มข้นทำให้สารปนเปื้อนหรือตัวละลายที่อยู่ในรีซเก๊สถูกดูดซึมโดยของเหลวที่ป้อนเข้าคอลัมน์ ทำให้สารปนเปื้อนที่อยู่ในรีซเก๊สลดลงและไหลออกทางด้านบนคอลัมน์ เรียกว่า แก๊สเจือจาง (Lean gas) ส่วนของเหลวที่ดูดซึมสารปนเปื้อนเข้ามาจะมีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนมากขึ้นและไหลลงด้านล่างของคอลัมน์ เรียกว่า ของเหลวเข้มข้น (Strong liquor) แสดงดังภาพประกอบที่ 2- 8



ภาพประกอบที่ 2-8 แสดงทิศทางการไหลเข้าและออกของกระแสแก๊ส ของเหลว สำหรับการไหลแบบสวนทางของคอลัมน์บรรจุ (McCabe *et al*, 1993)

คอลัมน์บรรจุที่มีการไหลแบบไหลขวาง (Crossflow)

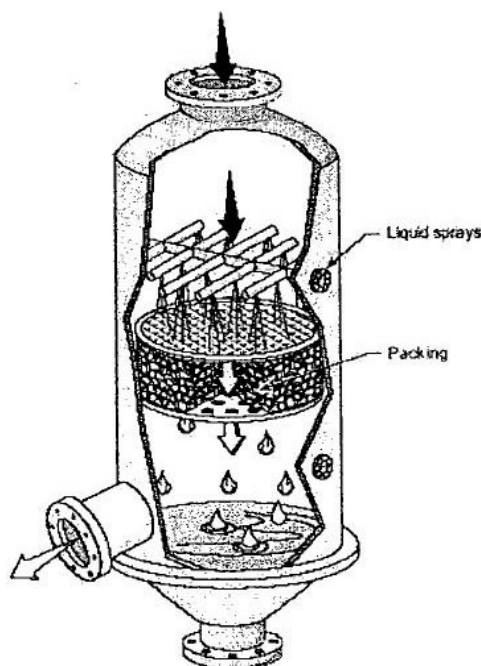
การดูดซึมแก๊สที่มีการไหลขวางแสดงดังภาพที่ 2-9 ทิศทางการไหลของกระแสแก๊สและของเหลวจะตั้งฉากกัน โดยกระแสของเหลวจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของคอลัมน์ไหลผ่านวัสดุบรรจุลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์ ขณะที่กระแสของแก๊สจะถูกปล่อยเข้าสู่คอลัมน์บรรจุในแนวนอน การไหลแบบนี้เหมาะสำหรับการกำจัดกระแสแก๊สที่มีความเข้มข้นของแข็งสูง ซึ่งไม่เหมาะกับงานวิจัยครั้งนี้



ภาพประกอบที่ 2-9 แสดงการไหลแบบไหลขวาง (Joseph and David,1998)

คอลัมน์บรรจุที่มีทิศทางการไหลแบบทิศทางเดียวกัน (Co-current)

กระบวนการดูดซึมแก๊สที่มีการไหลทิศทางเดียวแสดงดังภาพประกอบที่ 2-11 ทั้งกระแสของแก๊สและของเหลวจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนและไหลลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์บรรจุ โดยขณะที่ของเหลวไหลผ่านวัสดุบรรจุจะสร้างฟิล์มเคลือบที่ผิวของวัสดุบรรจุ ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสแก๊สและของเหลวเพิ่มขึ้น ในส่วนบนของคอลัมน์บรรจุของเหลวสามารถดูดซึมสารปนเปื้อนในกระแสแก๊สได้มาก ทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงเนื่องจากมีความแตกต่างความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่อยู่ในเฟสแก๊สและของเหลวสูง และความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างเฟสจะค่อยๆ ลดลงในบริเวณส่วนล่างของคอลัมน์บรรจุเป็นผลให้ในส่วนล่างสุดของคอลัมน์บรรจุมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำ การไหลทิศทางแบบนี้สามารถดำเนินการได้ที่อัตราการไหลของแก๊สและของเหลวสูง เพราะไม่มีขีดจำกัดของการท่วม การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดของทิศทางการไหลแบบแนวเดียวกัน ทำได้โดยการเพิ่มความเร็วของกระแสแก๊สและของเหลว แต่อาจทำให้ระยะเวลาการสัมผัสของเฟสแก๊สและเฟสของเหลวลดลง



ภาพประกอบที่ 2-10 แสดงการไหลแบบทิศทางเดียวกันภายในคอลัมน์บรรจุ

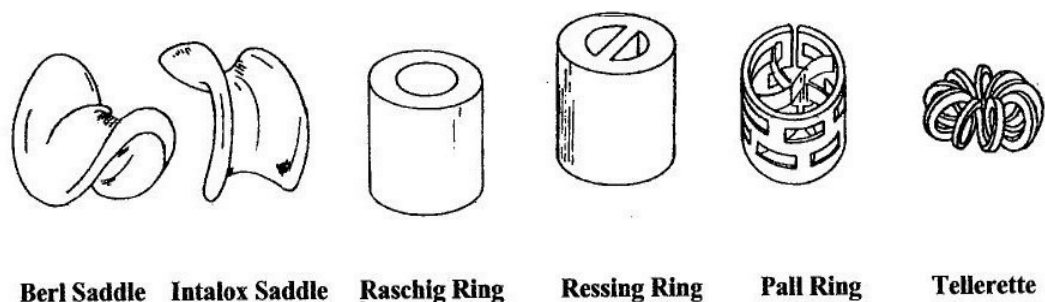
(Joseph and Davi, 1998)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกการไหลแบบสวนทางกันภายในคอลัมน์บรรจุสำหรับการกำจัด H_2S ด้วย $KMnO_4$ ในคอลัมน์บรรจุ

อุปกรณ์คอลัมน์บรรจุ (Packed column) ประกอบด้วยคอลัมน์ทรงกระบอก มีอุปกรณ์เพื่อช่วยในการกระจายแก๊ส (Gas distributor) อยู่ด้านล่าง อุปกรณ์กระจายของเหลว (Liquid distributor) เป็นอุปกรณ์สำคัญอีกชนิดหนึ่ง ทำหน้าที่ให้ของเหลวไหลกระจายทั่วทั้งคอลัมน์และสามารถสร้างฟิล์มเคลือบทั่วผิวของวัสดุบรรจุ อุปกรณ์กระจายของเหลวทั่วไปมีหลายลักษณะสำหรับการวิจัยได้เลือกแบบท่อเจาะรูติดตั้งส่วนบนของคอลัมน์ตามลำดับ ภายในคอลัมน์บรรจุด้วยของแข็ง เรียกว่า วัสดุบรรจุ (Packing) ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยา ไม่ก่กร่อน และราคาถูก เช่น ดินเผา พอร์เซเลน พลาสติกต่างๆ เป็นต้น วัสดุบรรจุทำหน้าที่ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสแก๊สและเฟสของเหลว ทำให้เกิดความปั่นป่วน (Turbulent) ภายในเฟสแก๊สและของเหลว และทำให้เฟสแก๊สมีระยะเวลาภายในคอลัมน์ (Residence time) เพียงพอในการสัมผัสกับเฟสของเหลว เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารระหว่างเฟสได้ดี ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง

2.5.4 วัสดุบรรจุ (Packing)

วัสดุบรรจุสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ ชนิดแบบเทสุ่มไปในท่อ ชนิดที่จัดเรียงด้วยมือ และชนิดที่มีโครงสร้างหรือลำดับที่แน่นอน โดยวัสดุบรรจุที่นิยมใช้กันทั่วไปแสดงดังภาพประกอบที่ 2-11 (ชาคริต, 2544)



ภาพประกอบที่ 2-11 วัสดุบรรจุทั่วไป (Joseph and David, 1998)

นอกจากชนิดอุปกรณ์ที่เลือกใช้แล้วยังมีพารามิเตอร์ดำเนินการพื้นฐานที่สำคัญ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโดยกระบวนการดูดซึม คือ ความสามารถในการละลายของสารปนเปื้อน สารปนเปื้อนที่สามารถละลายในสารดูดซึมได้สูงจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงและในช่วงสภาวะการดำเนินการที่หลากหลาย พารามิเตอร์ที่สำคัญมีดังนี้

- ความเร็วแก๊ส (Gas velocity) ความเร็วแก๊สทำให้เกิดการผสมและปั่นป่วนระหว่างเฟสได้ดี อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของแก๊สต้องไม่เร็วเกินไป จนเกิดภาวะท่วม (Flooding)

- อัตราการไหลของเหลว (Liquid flow rate) โดยปกติแล้วการเพิ่มอัตราการไหลของเหลว จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีขึ้น แต่ของอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงขึ้นด้วย ดังนั้นในการดำเนินการต้องพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสม

- ขนาดของวัสดุบรรจุ (Packing size) วัสดุบรรจุขนาดเล็กให้พื้นที่ผิวสัมผัสสูงช่วยให้เพิ่มการดูดซึมแก๊ส แต่ช่องว่างระหว่างวัสดุบรรจุลดลงทำให้ความดันตกภายในคอลัมน์บรรจุเพิ่มขึ้น

- ความสูงของคอลัมน์บรรจุ (Packing height) คอลัมน์บรรจุที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดและระยะเวลาในการสัมผัสมากขึ้นเป็นผลทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดสูง แต่ความดันลดและค่าใช้จ่ายสูงขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อต้องการเพิ่มพื้นที่ผิวและระยะเวลาในการสัมผัสส่วนใหญ่พิจารณาจากชนิดและขนาดของวัสดุบรรจุมากกว่า

2.5.5 การสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว

สำหรับแนวคิดอุดมคติเมื่อของเหลวไหลผ่านวัสดุบรรจุลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์ จะเกิดฟิล์มบางๆ เคลือบทั่วผิวของวัสดุบรรจุ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วฟิล์มมีแนวโน้มที่จะหนาขึ้นหรือบางลงในบางแห่ง และของเหลวมีการรวมตัวกันเป็นกระแสดังกล่าว ไหลเป็นวิธีเฉพาะตำแหน่งผ่านวัสดุบรรจุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราการไหลต่ำ พื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุจำนวนมากอาจแห้งหรือปกคลุมด้วยฟิล์มของเหลวที่อยู่หนึ่ง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Liquid channeling และทำนองเดียวกัน เมื่ออัตราการไหลของแก๊สต่ำ กระแสแก๊สไม่สามารถไหลกระจายทั่วคอลัมน์แต่จะเลือกเคลื่อนที่ผ่านในทิศทางที่มีความต้านทานการไหลน้อย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Gas channeling

ปรากฏการณ์ Channeling ที่เกิดขึ้นเป็นเหตุผลสำคัญของการมีสมรรถนะต่ำของคอลัมน์บรรจุขนาดใหญ่และเกิดได้ง่ายในคอลัมน์บรรจุแบบเรียงตัว สามารถลดปรากฏการณ์นี้ได้ โดยการให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์มีขนาดใหญ่กว่า 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุบรรจุ หากอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อขนาดวัสดุบรรจุมีขนาดน้อยกว่า 8 เท่าทำให้ของเหลวและแก๊สมีแนวโน้มที่จะไหลออกนอกวัสดุบรรจุโดยไหลตามผนังของคอลัมน์ ดังนั้นอุปกรณ์ช่วยในการกระจายตัวเริ่มต้นสำหรับของเหลวและแก๊ส (Distributor) มีส่วนสำคัญต่อสมรรถนะของคอลัมน์ และถึงแม้จะมีอุปกรณ์กระจายตัวเริ่มต้นที่ดีก็ตาม ระหว่างกลางเชกชั้นของวัสดุบรรจุทุกๆ ความสูง 5-10 เมตร ของคอลัมน์จะต้องมีอุปกรณ์เพื่อช่วยกระจายตัวซ้ำ (Redistributor) เพื่อให้กระแสแก๊สและของเหลวกลับมาไหลกระจายทั่วคอลัมน์เพื่อให้คอลัมน์บรรจุมีประสิทธิภาพ

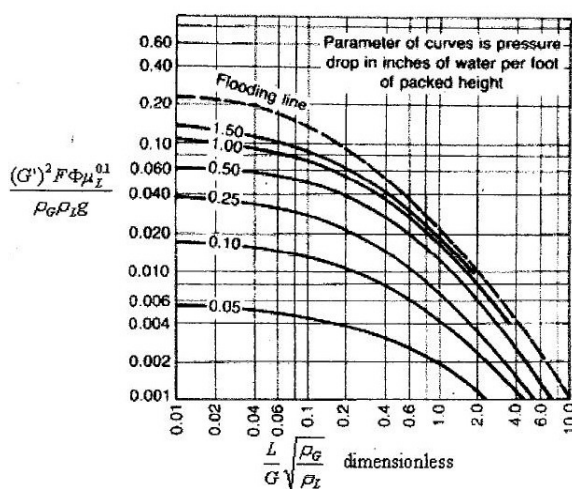
2.5.6 ความดันลดและอัตราการไหลจำกัด

ความดันลดต่อหน่วยชั้นของวัสดุบรรจุจะเกิดความเสียดทานของของไหล (Fluid friction) ความดันลดแสดงดังภาพประกอบที่ 2-13 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดในแกนลอการิทึมและอัตราการไหลของแก๊ส แสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อวัสดุบรรจุแห้งกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันประมาณ 1.8 หากวัสดุบรรจุมีกระแสของของเหลวไหลผ่านด้วยอัตราการไหลของเหลวคงตัว อัตราการไหลของแก๊สตอนเริ่มต้นจะเป็น

เส้นขนานกับเส้นวัสดุบรรจุแห้ง และความดันลดลงสูงกว่าความดันลดเมื่อวัสดุบรรจุแห้ง เนื่องมาจากของเหลวในคอลัมน์จะลดปริมาณช่องว่างในการไหลของแก๊สลง อย่างไรก็ตามแฟร็กชันว่างไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของแก๊ส ที่ความเร็วแก๊สปานกลางเส้นความดันลดของวัสดุบรรจุที่ของเหลวไหลผ่านจะเริ่มชันขึ้น เพราะว่าแก๊สเริ่มขัดขวางการไหลของของเหลวและปริมาณของเหลวคงค้าง (Liquid holdup) สูงขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊ส จุดที่ของเหลวคงค้างเริ่มเพิ่มขึ้นพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของความชันของเส้นความดันลด จุดนี้เรียกว่าจุดโหลดคั่ง (Loading point)

เมื่อเพิ่มความเร็วแก๊สต่อไป ความดันลดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเส้นเกือบเป็นแนวชัน หากพิจารณาที่อัตราการไหลของแก๊สค่าหนึ่ง การเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวก็จะให้ผลเช่นเดียวกัน เมื่อความดันลดมีค่าประมาณ 2-3 นิ้วน้ำต่อตารางฟุตของวัสดุบรรจุ (150-250 มิลลิเมตรน้ำต่อเมตรวัสดุบรรจุ) ในบางบริเวณของคอลัมน์บรรจุเริ่มกลายเป็นเฟสต่อเนื่องและจะถึงจุดท่วม (Flooding point) ของเหลวจะสะสมอย่างรวดเร็วและจะเต็มไปด้วยของเหลวตลอดคอลัมน์

ดังนั้นความเร็วแก๊สและของเหลวที่ใช้ในการดำเนินการในคอลัมน์ต้องต่ำกว่าความเร็วในการท่วม อย่างไรก็ตามเมื่อถึงจุดท่วมพื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุจะเปียกหมด ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและแก๊สสูงสุด การลดความเร็วของแก๊สและของเหลวจะแปรผันโดยตรงการลดอัตราการถ่ายโอนมวลเป็นผลทำให้ความดันลดลดลง จึงต้องเลือกความเร็วที่เหมาะสมสำหรับดำเนินการ โดยทั่วไปความเร็วดำเนินการถูกเลือกที่ 60-80% ของความเร็วที่สภาวะการท่วม

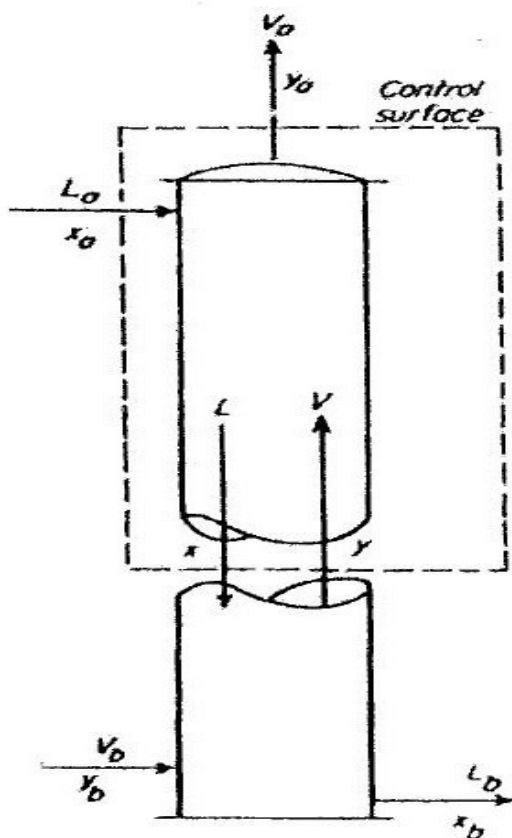


ภาพประกอบที่ 2-12 ความดันลดในคอลัมน์บรรจุระบบอากาศ-น้ำ บรรจุ Intalox saddles

ขนาด 1 นิ้ว (McCabe et al., 1993)

2.5.7 การควบคุมมวลในคอลัมน์บรรจุ

คอลัมน์บรรจุเป็นอุปกรณ์สัมผัสแบบคิฟเฟอเรนเชียล โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะต่อเนื่องจากปลายข้างหนึ่งไปสู่ปลายอีกข้างหนึ่งของอุปกรณ์ อัตราการไหลเชิงโมลและความเข้มข้นของส่วนใดๆ แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 2-13



ภาพประกอบที่ 2-13 แผนภาพควบคุมมวลของคอลัมน์บรรจุ (McCabe et al., 1993)

การควบคุมมวลในปริมาตรควบคุม (Control volume) ตามกรอบเส้นประอธิบายได้ดังนี้

$$\text{การควบคุมมวลรวม} \quad L_a + V = L + V_a \quad (2-37)$$

$$\text{ดุลส่วนประกอบ A} \quad L_a X_a + V_y = Lx + V_a y_a \quad (2-38)$$

เมื่อ G คือ อัตราการไหลเชิงโมลของเฟสแก๊ส และ L คือ อัตราการไหลเชิงโมลของเฟสของเหลวที่จุดเดียวกันของคอลัมน์

การคูณมวลทั้งหมดของคอลัมน์บรรจุอธิบายได้เป็น

$$\text{การคูณมวลรวม} \quad L_a + V_b = L_b + V_a \quad (2-39)$$

$$\text{คูณส่วนประกอบ A} \quad L_a X_a + V_b y_b = L_b x_b + V_a y_a \quad (2-40)$$

2.5.8 อัตราการดูดซึมในคอลัมน์บรรจุ

อัตราการดูดซึมแก๊สสามารถแสดงได้ 4 รูปแบบ โดยใช้สัมประสิทธิ์เฉพาะ (Individual coefficient) หรือสัมประสิทธิ์รวม (Overall coefficient) ที่มีฐานจากเฟสแก๊สหรือของเหลว ดังสมการที่ (2-41) ถึง (2-44) สัมประสิทธิ์เชิงปริมาตรใช้ในการคำนวณโดยส่วนใหญ่ เพราะว่าเป็นการยากที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ต่อหน่วยพื้นที่ และวัตถุประสงค์ในการออกแบบโดยทั่วไปจะคำนวณหาปริมาตรทั้งหมด สำหรับการพิจารณาการแพร่ทิศทางเดียว (One-way diffusion) ถูกตัดออกเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา และการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของเหลวและแก๊สถูกละเลย สมการนี้ใช้ได้เฉพาะแก๊สเจือจาง แต่สำหรับสารผสมที่มีความเข้มข้นสูงถึง 10% อาจมีความผิดพลาดเล็กน้อย (ชาคริต, 2542)

อัตราการดูดซึมของปริมาตรของคอลัมน์บรรจุ หาได้จากสมการใดสมการหนึ่งต่อไปนี้

อัตราการดูดซึมโดยใช้สัมประสิทธิ์เฉพาะของเฟสแก๊ส

$$r = k_y a (y - y_i) \quad (2-41)$$

อัตราการดูดซึมโดยใช้สัมประสิทธิ์เฉพาะของเฟสของเหลว

$$r = k_x a (x - x_i) \quad (2-42)$$

อัตราการดูดซึมโดยใช้สัมประสิทธิ์รวมของเฟสแก๊ส

$$r = K_y a (y - y^*) \quad (2-43)$$

อัตราการดูดซึมโดยใช้สัมประสิทธิ์รวมของเฟสของเหลว

$$r = K_x a (x^* - x) \quad (2-44)$$

เมื่อ r คือ อัตราการดูดซึมต่อหน่วยปริมาตร ($\text{kmol/m}^3\text{-h}$)

y และ x คือ แฟรกชันเชิงโมลของส่วนประกอบที่ถูกดูดซึมในเฟสแก๊สและของเหลว

ตามลำดับ

y^* คือ ความเข้มข้นสมดุลที่สอดคล้องกับองค์ประกอบของเฟสของเหลว

x^* คือ ความเข้มข้นสมดุลที่สอดคล้องกับองค์ประกอบของเฟสของแก๊ส

y_i คือ โมลแฟรกชันของตัวละลายในแก๊สที่ระหว่างเฟสแก๊สและของเหลว

x_i คือ โมลแฟรกชันของตัวละลายในของเหลวที่ระหว่างเฟสแก๊สและของเหลว

- $k_y a$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนเชิงปริมาตรเฉพาะเฟสสำหรับเฟสแก๊ส
($\text{kmol/m}^3\text{-h-atm}$)
- $k_x a$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนเชิงปริมาตรเฉพาะเฟสสำหรับเฟสของเหลว (1/h)
- $K_y a$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนเชิงปริมาตรทั้งหมดสำหรับเฟสแก๊ส
($\text{kmol/m}^3\text{-h-atm}$)
- $K_x a$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนเชิงปริมาตรทั้งหมดสำหรับเฟสของเหลว (1/h)

2.5.8.1 การดูดซึมทางกายภาพ (Physical absorption)

การดูดซึมทางกายภาพขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของกระแสแก๊สและของเหลวดูดซึม เช่น ความหนาแน่น (Density) ความหนืด (Viscosity) การแพร่ (Diffusivity) และความสามารถในการละลาย (Solubility) เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิดและขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยทั่วไปแล้วที่อุณหภูมิต่ำประสิทธิภาพการดูดซึมแก๊สดีกว่าที่อุณหภูมิสูงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมได้ด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสแก๊สและของเหลว การลดอัตราการใช้ของแก๊สต่ออัตราการใช้ของสารดูดซึม (G/L ratio) และการเพิ่มสารมลพิษในกระแสแก๊ส

2.5.8.2 การดูดซึมด้วยปฏิกิริยาเคมี (Absorption with chemical reaction)

การดูดซึมแล้วตามด้วยปฏิกิริยาเคมีในเฟสของเหลว ข้อดีของการดูดซึมนี้ คือ การเพิ่มของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้เลือกการดูดซึมชนิดนี้ในการกำจัด H_2S

2.6 Response Surface Methodology (RSM)

งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิค RSM มาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อการศึกษาตัวแปรดำเนินการต่างๆ ตามหลักสถิติ โดยมีรายละเอียดและประโยชน์ของเทคนิค RSM ดังนี้

2.6.1 ความหมายของ RSM

RSM คือ การรวบรวมข้อมูลทางสถิติและเทคนิคทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนา การเพิ่มประสิทธิภาพ และการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการ ซึ่ง RSM ประกอบด้วยกลุ่มของตัวแปรตามหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติ โดยจะใช้หลักการเหล่านี้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดย RSM ประกอบขึ้นมาจากผลของตัวแปรอิสระซึ่งอาจมีเพียงตัวเดียวหรือหลายตัว สำหรับการวิเคราะห์ของตัวแปรอิสระที่ได้จาก

ผลการทดลองนั้นจะถูกนำมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของผลตอบสนองในรูปแบบของพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) โดยความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองที่ได้กับข้อมูลดิบแสดงดังสมการที่ (2-45)

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (2-45)$$

เมื่อ y คือ ผลตอบสนอง (Response) ที่เกิดขึ้น
 f คือ ฟังก์ชันการทำงานที่ตัวแปรที่ยังไม่ทราบต่อผลตอบสนอง
 x_1, x_2, \dots, x_n คือ ตัวแปรอิสระ ซึ่งจะถูกรู้จักว่า ตัวแปรธรรมชาติด้วย
 n คือ จำนวนของตัวแปรอิสระ
 ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดมาจากแหล่งต่างๆ ซึ่งไม่สามารถถูกรวบรวมเอาไว้ใน f ได้ ซึ่งแหล่งที่ว่่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบ เช่น ค่าการวัดผิดพลาด โดยที่จะถูกคาดคะเนด้วยค่า ε ซึ่งมีการกระจายตัวด้วยค่าเฉลี่ยศูนย์และค่าความแปรปรวน

2.6.2 การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM

ในการออกแบบการทดลองมีขั้นตอนตามรายละเอียดดังนี้

1. การกำหนดตัวแปรที่จะศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ในกระบวนการทางเคมีและทางชีวเคมีสามารถได้รับผลกระทบจากกระบวนการต่างๆ มากมาย เพราะเป็นไปไม่ได้ที่จะระบุผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้จากทุกตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความจำเป็นในการเลือกตัวแปรบางตัวที่สร้างผลกระทบได้โดยตรงออกมา การคัดเลือกโดยการทดลองนั้นมีความสำคัญในการระบุตัวแปรอิสระ โดยหลังจากทำการระบุตัวแปรสำคัญต่างๆ แล้วจะสามารถกำหนดทิศทางการพัฒนารูปแบบขึ้นซึ่งจะสามารถระบุระดับความสำคัญของตัวแปรต่างๆ ขึ้นมาได้ การระบุความสำคัญของตัวแปรต่างๆ นั้นมีความสำคัญเพราะความสำเร็จของกระบวนการหาจุดที่เหมาะสมนั้นเกี่ยวข้องกับสิ่งนี้โดยตรง ซึ่งความผิดพลาดในการระบุระดับความสำคัญนั้นส่งผลถึงความผิดพลาดในการระบุจุดที่เหมาะสมได้

2. กำหนดรหัส (Code) ของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการออกแบบสถานะที่ใช้ในการทดลองโดยวิธีการ Central Composite Design (CCD) และทำการแปลงค่ารหัสตัวแปรอิสระ (Coded variables) ที่ได้ออกแบบไว้เป็นตัวแปรเดิมโดยใช้สมการที่ (2-46) ซึ่งในการดำเนินการนี้จะต้องทราบถึงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระที่สนใจศึกษา ก่อนที่จะทำการแปลงค่ารหัส

$$X = \left[\begin{array}{c} x - \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} \\ \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} \end{array} \right] \quad (2-46)$$

เมื่อ	X	คือ	coded variables
	x	คือ	ตัวแปรอิสระ
	x_{\max}	คือ	ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระ
	x_{\min}	คือ	ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระ

3. ทำการทดลองตามสภาวะการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ด้วยใช้เทคนิค RSM และการแปลงรหัสของตัวแปรอิสระแต่ละตัว เพื่อให้ได้มาซึ่งผลตอบสนองของแต่ละการทดลอง จนครบตามจำนวนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

4. แสดงผลของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่ได้จากการทดลองในรูปผลตอบสนองและทำการหาแบบจำลองในรูป Surface plot โดยใช้โปรแกรม Regression Analysis ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะอยู่ในรูปแบบสมการกำลังสอง (Quadratic equation) ดังแสดงได้ในสมการที่ (2-47)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \left[\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \right]_{i < j} \quad (2-47)$$

เมื่อ β_0 , β_i , β_{ii} และ β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้นและแบบกำลังสอง และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน ตามลำดับ

2.6.3 ประโยชน์ของเทคนิค RSM

เทคนิค RSM มีประโยชน์มากถ้าเปรียบเทียบกันระหว่างการทำค่าที่เหมาะสมในการทดลองโดยวิธีดั้งเดิมกับ RSM โดยข้อได้เปรียบที่สำคัญ คือ จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบโดยใช้ RSM นั้นมีจำนวนที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการออกแบบการทดลองแบบดั้งเดิม เพราะ RSM นั้นจะนำเสนอข้อมูลจำนวนมากจากการทดลองเพียงไม่กี่ครั้ง ซึ่งต่างจากการทดลองในแบบดั้งเดิมที่จะใช้จำนวนการทดลองที่มากกว่าเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของระบบ และเทคนิค RSM มีความเป็นไปได้ที่จะเจอผลกระทบที่มีลักษณะเป็น Interactive effect จากตัวแปรอิสระ โดยเฉพาะกระบวนการทางชีวเคมี นอกจากนี้ สมการแบบจำลองอย่างง่ายของ RSM จะเพิ่มความเข้าใจต่อผลที่เกิดจากการผสมกันของตัวแปรอิสระต่างๆ เมื่อสังเกตสมการผ่านการทดลองต่างๆ ก็จะพบว่าข้อมูลของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่ได้กับผลตอบสนองนั้นมีความสอดคล้องกัน จึงกล่าวได้ว่า RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวเคมี

2.7 จำกัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ไปในบรรยากาศ

The Occupational Safety and Health Administration (OSHA) กำหนดค่าเฉลี่ยการเก็บตัวอย่างที่ 8 ชั่วโมง มีค่าไม่เกิน 200 ppm และมีค่าสูงสุดในการทำงานวันละไม่เกิน 8 ชั่วโมง สัปดาห์ละ 40 ชั่วโมง คือ 50 ppm

National Institutes of Occupational Safety and Health (NIOSH) กำหนดค่าเฉลี่ยการเก็บตัวอย่างที่ 8 ชั่วโมง มีค่าไม่เกิน 10 ppm และค่าสูงสุดในการทำงานวันละไม่เกิน 8 ชั่วโมง สัปดาห์ละ 40 ชั่วโมง คือ 50 ppm

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันและกำจัด H_2S ด้วย $KMnO_4$ ได้ทำการศึกษาเอกสารงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทดลอง การเลือกสารที่ต้องการศึกษา การเลือกพารามิเตอร์สำหรับศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเลือกอุปกรณ์ในการบำบัด H_2S ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Moosavi *et al.* (2005) ทำการศึกษาการกำจัด H_2S ในระบบหอดูดซึมชนิด Packed column ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยสารออกซิเดนต์ที่เลือกศึกษาคือ $NaOCl$, H_2O_2 และ $KMnO_4$ พบว่าที่สภาวะความเป็นกรดจะใช้อัตราส่วนความเข้มข้นของ H_2O_2 ต่อความเข้มข้นของ H_2S น้อยที่สุด ซึ่งระบบหอดูดซึมชนิดนี้ให้ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S มากกว่า 99.5%

Bunyakan *et al.* (2004) ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Methyl ethyl ketone (MEK) ด้วย $KMnO_4$ โดยสภาวะที่ศึกษาคือ อุณหภูมิคงตัว สภาวะกรด-ด่างคงที่ และมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ พบว่าอันดับปฏิกิริยารวมเท่ากับ 1.7 ซึ่งอันดับปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับ MEK และ $KMnO_4$ มีค่า 1.25, 0.45 ตามลำดับ โดยอัตราปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิ และยังศึกษาเปรียบเทียบความสามารถการใช้ $KMnO_4$ กับ $NaOCl$ ในการออกซิไดซ์ MEK ซึ่งพบว่า $KMnO_4$ สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ MEK ได้เร็วกว่าการใช้ $NaOCl$

Damm *et al.* (2002) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชัน Methyl tert-butyl ether (MTBE) ด้วย $KMnO_4$ จากข้อมูลการทดลองพบว่าปฏิกิริยาเป็นอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับ MTBE และ $KMnO_4$ ทำให้มีค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาอันดับรวมคือ 1.426×10^{-6} L/mg/h และพบว่าปัจจัยของสภาวะกรด-ด่างไม่มีผลต่ออัตราปฏิกิริยา

Khan *et al.* (2007) ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง Thiourea กับ KMnO_4 พบว่าในสภาวะกรดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรวดเร็วทำให้เกิด MnO_2 เป็น intermediate ซึ่งมีสัดส่วนปริมาณสัมพันธ์ระหว่าง Thiourea กับ MnO_2 เป็น 2:1 และผลการศึกษา ยังพบว่าค่า k_{obs} จะแปรผันตรงกับสภาวะความเป็นกรดของสารละลาย อุณหภูมิและความเข้มข้นของ Thiourea แต่ไม่แปรผันกับความเข้มข้น KMnO_4

จันทิมา และคณะ (2005) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ปนเปื้อนในแก๊สชีวภาพด้วยอุปกรณ์ Wet scrubber โดยใช้หลักการการดูดซึมร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) , โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ น้ำ (H_2O) เป็นสารออกซิเดนต์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์และสัดส่วนอัตราการไหลของของเหลวต่อแก๊ส L/G ratio พบว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOCl และอัตราส่วน L/G ratio จะแปรผันตรงกับประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์แม้การใช้ NaOCl จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัด H_2S สูงแต่ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานวิจัยเพราะมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงและพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด H_2S ของหอดูดซึมชนิดนี้ประมาณ 94%

Huang *et al.* (2002) ศึกษาจลนพลศาสตร์และกลไกของการออกซิเดชันของ เตตระคลอโรเอทิลีน (PCE) กับ KMnO_4 โดยทำการศึกษาที่สภาวะ pH คงที่ อุณหภูมิคงตัว และสารละลายไม่มีการระเหย พบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับ PCE และ KMnO_4 และมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ $9.3 \pm 0.9 \text{ kcal/mol}$ และค่าคงที่กฎอัตราปฏิกิริยารวมมีค่าเท่ากับ $0.035 \pm 0.004 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ ที่ 20°C พบว่าในช่วง pH 3-10 และความแรงไอออนิกประมาณ 0.2 M ไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแต่สภาวะความเป็นกรดและเบสมิผลต่อ Reaction pathway คือสภาวะความเป็นกรดสารละลายเตตระคลอโรเอทิลีน (PCE) มีแนวโน้มที่เกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และคลอไรด์ ภายใต้สภาวะเป็นกลาง (pH 7) และที่สภาวะความเป็นเบส (pH 10) จะเกิดการ Hydroxylation ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็น Oxalic acid และคลอไรด์ที่เกิดขึ้นเท่ากับอัตราการออกซิเดชันของ PCE นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการสลายตัวของ PCE จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพิ่มขึ้น

Yan and Schwarth (1999) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการออกซิเดชันของ Tetrachloroethylene (PCE), Trichloroethylene(TCE), 1,1-Dichloroethylene(DCE), Cis-dichloroethylene และ Trans-dichloroethylene ด้วย KMnO_4 พบว่ากระบวนการสลายตัวให้ค่าคงที่อัตราสำหรับปฏิกิริยามีค่าอยู่ในช่วง 4.5×10^{-5} ถึง 0.03 S^{-1} อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อหมู่แทนที่คลอไรด์ในโครงสร้างสารประกอบน้อยลงและ ในกรณีหมู่แทนที่คลอไรด์มีจำนวนเท่ากัน Dichloroethylene (DCE) พบว่าความว่องไวการเกิดปฏิกิริยาของ Trans-DCE ($k_{\text{obs}} = 30 \times$

10^{-3}S^{-1}) เร็วกว่า cis-DCE ($k_{\text{obs}} = 0.9 \times 10^{-3}\text{S}^{-1}$) เนื่องจาก Cis มีผลของความเกาะกันในโครงสร้างสารประกอบเข้ามาเกี่ยวข้อง นอกจากนี้พบว่า MnO_2 ที่เกิดขึ้นในระหว่างทำปฏิกิริยาจะทำหน้าที่เป็น Autocatalytic ช่วยให้อัตราการสลายของสารประกอบคลอไรด์อื่นเพิ่มขึ้น

Hood *et al.* (2000) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาระหว่าง Perchloroethylene (PCE) กับ KMnO_4 โดยให้ความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมากเกินพอ (5 ถึง 30 g/l) พบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง PCE กับ KMnO_4 เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับ PCE และ KMnO_4 และมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยารวมเท่ากับ $2.45 \pm 0.65 \text{ M}^{-1}$

Huang *et al.* (2001) ศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบคลอไรด์อื่น ด้วย KMnO_4 สารประกอบคลอไรด์อื่นที่ศึกษาได้แก่ Trichloroethylene(TCE), Dichloroethylene (DCE), Cis-dichloroethylene, Trans-dichloroethylene และ Vinyl chloride โดยศึกษาที่ pH เท่ากับ 7 และความแรงไอออนิกเป็น 0.05 M ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงตัวและมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับ KMnO_4 และสารประกอบคลอไรด์อื่น ยกเว้น ไวนิลคลอไรด์ และมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ 20°C เป็น $0.035 \pm 0.004 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$, $1.52 \pm 0.05 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$, $2.1 \pm 0.2 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$, $48.6 \pm 0.9 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ สำหรับ TCE, cis-DCE, 1,1-DCE และ Trans-DCE ตามลำดับ โดยมีพลังงานกระตุ้นอยู่ในช่วง 5.8 – 9.3 kcal mol⁻¹ และเอนโทรปี (ΔS°) ในช่วง -33 ถึง -36 kcal mol⁻¹K⁻¹ สำหรับกรณีของ Vinyl chloride เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่สองเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราปฏิกิริยาและเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่มีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ $7.9 \pm 1 \text{ kcal mol}^{-1}$ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบคลอไรด์อื่นเป็นส่วนผกผันกับจำนวนของหมู่แทนที่คลอไรด์ในสารประกอบ

Zhaohui (2003) ได้ทำการศึกษาการกำจัด Trichloroethylene (TCE) ที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารออกซิเดนต์ชนิด KMnO_4 ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ในระบบ Continuous stirred batch reactor (CSBR) สารลดแรงตึงผิวที่ใช้คือ Hexadecyltrimethylammonium (HDTMA) bromide, Sodium dodecyl sulfate (SDS) และ Octylphenol ethylene oxide (Triton X-100) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวในกลุ่ม Cationic, Anionic และ Nonionic ตามลำดับ โดยค่าวิกฤติในการเกิดไมเซลล์ (Critical Micell Concentration, CMC) ของสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ข้างต้นมีค่า 0.9, 8.2 และ 0.22-0.24 mM ตามลำดับ พบว่าเมื่อมีการใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมในการเกิดปฏิกิริยาจะได้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา k_{obs} เป็น $0.56 - 0.58 \text{ min}^{-1}$ มากกว่ากรณีไม่มีการใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับปฏิกิริยาซึ่งมีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา k_{obs} เท่ากับ $0.08-0.19 \text{ min}^{-1}$ ซึ่งจะได้ว่าการใช้ KMnO_4 ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวด้วยชนิดและความเข้มข้นเหมาะสมจะสามารถเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้

Pagella and Faveri. (2000) ศึกษาการกำจัด H_2S ออกจากกระแสแก๊สโดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน โดยทำการปล่อยกระแสแก๊สให้ดูดซึมด้วยสารละลายเฟอร์ริกและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแบคทีเรียชนิด *Thiobacillus ferrooxidant* และทำการศึกษาจนพบผลศาสตร์ในปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟีกเบคและหอดูดซึมแบบฟอง พบว่าการปฏิกิริยาออกซิเดชันทางชีวภาพให้ผลดีแต่ประสิทธิภาพลดลงเมื่อตะกอนซัลเฟอร์ได้เกิดขึ้น ถ้าระบบมีสภาวะความเป็นกรดต่ำยังผลทำให้การกำจัด H_2S ลดลง

Yoshiharu *et al.* (1987) จดสิทธิบัตรเลขที่ JP 62-091225 ได้ศึกษาวิธีการกำจัดสารที่มีกลิ่น เช่น H_2S , SO_2 , NO_x และ Methyl mercaptan โดยใช้ Air-purifying agent ซึ่งเตรียมจากกระดาษเส้นใย (Mineral fiber paper) นำมาจุ่มในสารละลาย $KMnO_4$ แล้วนำไปอบแห้ง หลังจากนั้นบรรจุในคอลัมน์โดยทำการผ่านอากาศที่ปนเปื้อนด้วยสารดังกล่าวข้างต้นพบว่าทำให้อากาศมีการปนเปื้อนน้อยลง

Yoshiro *et al.* (1982) จดสิทธิบัตรเลขที่ JP 57-171421 ได้ศึกษาการกำจัดสารประกอบที่มีกลิ่นเหม็นเช่น H_2S , NH_3 , Acetaldehyde พร้อมกันโดยเลือกใช้สารละลาย Acidic permanganate salt เป็นของเหลวดูดซึมซึ่งจะช่วยลดการอุดตันของหัวฉีด (Nozzle) สารที่มีกลิ่นดังกล่าวถูกดูดซึมและถูกกำจัดโดยที่สารมีฤทธิ์เป็นเบส (NH_3) เกิดปฏิกิริยาสะเทิน ส่วนสารที่มีฤทธิ์เป็นกรด (H_2S) และกลาง (Acetaldehyde) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับของเหลวดูดซึม

Takashi *et al.* (2007) จดสิทธิบัตรเลขที่ JP 2007-000702 ศึกษาอุปกรณ์และของเหลวดูดซึมเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ H_2S โดยของเหลวดูดซึมที่ใช้ประกอบด้วยสารพวกฟอสเฟตที่มีความสามารถการละลายน้ำได้ดี ข้อดีของกระบวนการนี้คือสามารถลดพลังงานสำหรับการแยกสารที่ต้องการกำจัดออกจากของเหลวที่ใช้ดูดซึมและยังสามารถนำของเหลวที่ผ่านการดูดซึมกลับมาใช้ใหม่ได้

Tomio *et al.* (1995) จดสิทธิบัตรเลขที่ JP 07-258665 ได้ทำการกำจัด CO_2 และ H_2S ที่มีอยู่ในน้ำมันหนักหรือการเผาไหม้ถ่านหินโดยได้เลือกใช้สารกลุ่มเอมีนเป็นของเหลวดูดซึมในการกำจัด กระบวนการนี้สามารถนำของเหลวที่ใช้ดูดซึมนำกลับมาใช้ใหม่ได้

Seyedeh *et al.* (2007) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเอนไซม์ที่ใช้เป็นสารอาหารให้กับ *Bacillus clausii* และเสนอเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มการผลิตเอนไซม์ โดยปัจจัยที่ศึกษามี 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นซูโครส ความเข้มข้นของยีสต์สกัด และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต ปัจจัยเหล่านี้ถูกนำไปใช้ทดลองเบื้องต้น โดยใช้แผนการทดลองออกแบบด้วยวิธี Central composite design, CCD พื้นผิวตอบสนองทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ คือ $Y = 928.37 + 132.33x_1 - 348.16x_2 - 104.28x_3 - 110.12x_1^2 - 189.29x_3^2$ ซึ่งจะได้ค่าที่

เหมาะสมที่สุดของการผลิตเอโนไซม์ ความเข้มข้นซูโครส คือ 11 gL^{-1} ความเข้มข้นของยีสต์สกัด 5 gL^{-1} ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรด 5.2 gL^{-1}

I.W.A. Tan *et al.* (2007) ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วย CCD เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียม Activated carbon ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิสำหรับการกระตุ้น ระยะเวลาการกระตุ้น และอัตราส่วน KOH : char ต่อการดูดซับ Methyl blue แต่ผู้ทำวิจัยต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียม Activated carbon จึงนำไปสู่การวิเคราะห์การทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method of Process Optimization) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ คือ สภาวะอุณหภูมิประมาณ $816 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ระยะเวลาในการกระตุ้นประมาณ 1 ชั่วโมง และต้องใช้อัตราส่วน KOH:char เท่ากับ 3.9

2.9 ข้อสรุปข้อมูลจากการค้นคว้า

แม้ว่าจะมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ใช้ KMnO_4 เป็นสารออกซิเดนต์ แต่ยังไม่มียางานการศึกษาการออกซิเดชัน H_2S ด้วย KMnO_4 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยานี้โดยปัจจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ ความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิ และสำหรับการใช้ KMnO_4 พบว่าได้มีการศึกษาอิทธิพลของ pH ด้วย เนื่องจากความแตกต่างค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของ KMnO_4 ที่สภาวะเบสให้ค่ามากกว่าที่สภาวะกรด ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เพิ่มการศึกษาอิทธิพลของ pH ต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย KMnO_4 ผลจากการศึกษาจะแสดงในรูปแบบของสมการกฏอัตราซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการกำจัด H_2S ในปฏิกรณ์ต่างๆ ได้ สำหรับปฏิกรณ์ที่เลือกใช้ในการกำจัด H_2S คือ คอลัมน์บรรจุ โดยสัดส่วนอัตราการไหลของสารละลายต่อแก๊ส ความเข้มข้นของ H_2S และความเข้มข้นของ KMnO_4 มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S เพื่อให้ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ครอบคลุมทั้งหมดของตัวแปรนั้น อาจต้องทำการทดลองจำนวนมาก งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ โดยการออกแบบการทดลองแบบ CCD ซึ่งจะหาค่าตอบสนองแบบพื้นผิว RSM จากค่าการตอบสนองจะแสดงอยู่ในรูปสมการแบบจำลองและนำไปสู่การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด H_2S โดยใช้สารละลาย KMnO_4 ในคอลัมน์บรรจุได้

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

สารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลอง วิธีการเก็บตัวอย่าง วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง และแผนการดำเนินการทดลอง ขึ้นอยู่กับขอบเขตของการศึกษาซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ตอน คือ 1) การศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S และ $KMnO_4$ ในปฏิกรณ์แบบแบทช์ 2) การศึกษาการกำจัด H_2S ด้วยคอลัมน์บรรจุร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันในระดับห้องปฏิบัติการ และ 3) การศึกษาการกำจัด H_2S ในแก๊สชีวภาพด้วย $KMnO_4$ ในคอลัมน์บรรจุสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลอง วิธีการเก็บตัวอย่าง วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง และแผนการดำเนินการทดลอง ของแต่ละการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

3.1 สารเคมี อุปกรณ์ วิธีการทดลองของการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S และ $KMnO_4$ ในปฏิกรณ์แบบแบทช์

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย H_2S

- แก๊ส H_2S 40% ในแก๊ส N_2 (บริษัท Thai Industrial Gas)

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย $KMnO_4$

- 99% $KMnO_4$ (บริษัท Merck, AR grade)
- น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

สารเคมีที่ใช้เก็บตัวอย่าง

- สารเคมีสำหรับเก็บตัวอย่างสารละลาย H_2S
- ซิงค์อะซิเตต Zinc acetate (99.5%, VWR)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ Sodium hydroxide, NaOH (99%, Lab Scan)

สารเคมีสำหรับเก็บตัวอย่างสารละลาย $KMnO_4$

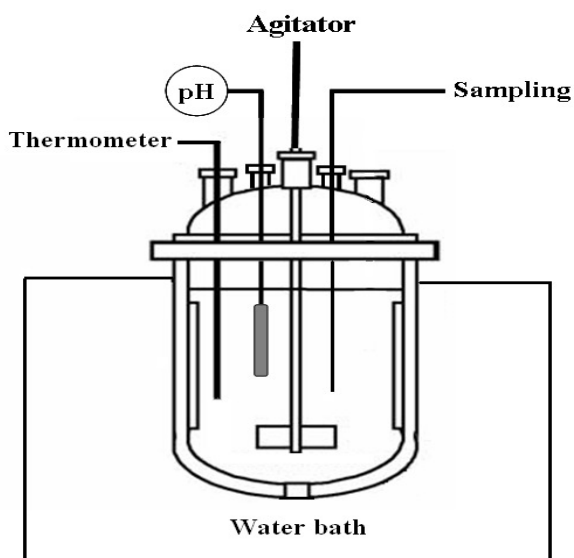
- โซเดียมไทโอซัลเฟต Sodium thiosulfate, $Na_2S_2O_3$ 0.1 N (99.5-100.5%, Merck)

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

- ปฏิกรณ์ทำจากแก้วขนาด 2.5 l พร้อมใบกวน
- เทอร์โมมิเตอร์
- กระจกถักยว
- อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
- ปิเปตขนาด 2, 5 และ 10 ml
- บิวเรตขนาด 25 และ 50 ml
- ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml
- กรวยแก้ว
- หลอดหยด

3.1.3 วิธีการทดลองและการออกแบบการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง H_2S กับ $KMnO_4$ ดำเนินการในห้องปฏิบัติการโดยใช้ปฏิกรณ์แบบแบทช์ที่ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ขนาด 2.5 l ที่ติดตั้งใบกวน ชุดควบคุมความเร็วของใบกวน เครื่องมือวัด pH และเทอร์โมมิเตอร์ ไดอะแกรมแสดงปฏิกรณ์และอุปกรณ์ประกอบแสดงในภาพประกอบที่ 3-1 และลักษณะของปฏิกรณ์แบบแบทช์ที่ใช้ในการศึกษาจริงดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-2



ภาพประกอบที่ 3-1 แสดงชุดอุปกรณ์การทดลองสำหรับปฏิกรณ์แบบแบทช์



ภาพประกอบที่ 3-2 แสดงชุดอุปกรณ์การทดลองปฏิกิริยาแบบแบทซ์ในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาระหว่าง H_2S กับ KMnO_4 มีการดำเนินการที่ pH คงที่ ภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิคงตัวและมีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ โดยในแต่ละการทดลอง มีการดำเนินการดังนี้

1. เตรียมสารละลายของ H_2S ในน้ำโดยการเติมแก๊ส H_2S ลงในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) จนได้ความเข้มข้นของ H_2S เริ่มต้นที่ต้องการ เติมสารละลายของ H_2S ลงในถังปฏิกิริยาปริมาตร 2.5 l

2. เตรียมสารละลายออกซิแดนซ์ KMnO_4 โดยละลาย KMnO_4 ในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ให้มีความเข้มข้นของ KMnO_4 ตามต้องการแล้วนำสารละลายออกซิแดนซ์เติมลงไปผสมกับสารละลายของ H_2S ในถังปฏิกิริยาที่ใช้ทำปฏิกิริยา

3. ทำการปรับอุณหภูมิ (T) และ pH ควบคุม pH ด้วยสารละลาย 0.1 N ของสารละลาย NaOH ให้ได้ตามต้องการ เมื่อระบบมีค่า pH และ อุณหภูมิคงตัว จึงเริ่มนับเวลา (t) ของ

การเกิดปฏิกิริยาและเก็บตัวอย่างที่เวลา $t=0$ เพื่อทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ ที่สถานะเริ่มต้น

4. ปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยทำการเก็บตัวอย่างสารทำปฏิกิริยาเพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาที่เวลา $t=2, 5, 10, 30$ และ 60 นาที

สถานะเริ่มต้น (Initial condition) ของการทดลองที่ใช้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S กับ $KMnO_4$ ซึ่งศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ H_2S ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ อุณหภูมิ และ pH ที่มีผลต่ออัตราปฏิกิริยา แสดงในตารางที่ 3-1 ถึง ตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของ H_2S ต่ออัตราปฏิกิริยาที่ $T=303.15\text{ K}$ และ $pH=7$

Run	Initial concentration (mM)	
	H_2S	$KMnO_4$
1	2.94	1.89
2	4.68	1.89
3	4.68	1.89

ตารางที่ 3-2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ต่ออัตราปฏิกิริยาที่ $T=303.15\text{ K}$ และ $pH=7$

Run	Initial concentration (mM)	
	H_2S	$KMnO_4$
4	2.94	2.53
5	2.94	3.79
6	2.94	5.06

ตารางที่ 3-3 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราปฏิกิริยาที่ pH =7

Run	Initial concentration (mM)		T (K)
	H ₂ S	KMnO ₄	
7	2.94	1.89	303.15
8	2.94	1.89	308.15
9	2.94	1.89	313.15
10	2.94	1.89	318.15
11	2.94	1.89	323.15

ตารางที่ 3-4 ศึกษาผลของ pH ต่ออัตราปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 303.15 K

Run	Initial concentration (mM)		pH
	H ₂ S	KMnO ₄	
12	2.94	1.89	5
13	2.94	1.89	7
14	2.94	1.89	9
15	2.94	1.89	11

ผลการทดลองศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นของ H₂S ความเข้มข้นของ KMnO₄ อุณหภูมิ และ pH ที่มีผลต่ออัตราเร็วปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H₂S และ KMnO₄ จะถูกนำมาวิเคราะห์ หาสมการอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยา โดยมีรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์หากฎอัตราปฏิกิริยา ดังอธิบายในหัวข้อ 3.1.3.1

3.1.3.1 การวิเคราะห์หาอัตราการเกิดปฏิกิริยา

1. การหาอันดับของปฏิกิริยา

อันดับปฏิกิริยาของ H₂S และ KMnO₄ หาได้จากข้อมูลความเข้มข้นกับเวลาที่ได้จากการทดลองโดยใช้วิธี Initial rate method โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของ H₂S มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นเริ่มต้นของ H₂S และ KMnO₄ ดังแสดงสมการที่ (3-1)

$$\left(\frac{-dC_{H_2S}}{dt} \right)_0 = -(r_{H_2S})_0 = kC_{H_2S,0}^{\alpha} C_{KMnO_4,0}^{\beta} \quad (3-1)$$

จากข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S กับเวลาจะถูกนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ H_2S กับเวลาโดยใช้การฟิตข้อมูลแบบโพลีโนเมียลและสามารถนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เวลาเริ่มต้นของแต่ละการทดลองได้และจากการที่ทราบความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S และ $KMnO_4$ ของแต่ละการทดลองก็จะสามารถนำชุดข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่าคงที่ k , α และ β ของสมการ (3-1) ได้ โดยใช้เทคนิค non linear regression ได้แสดงรายละเอียดการวิเคราะห์ในภาคผนวก จ

2. การหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาและค่าพลังงานกระตุ้น

ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆคำนวณได้จากข้อมูลอัตราเร็วปฏิกิริยาเริ่มต้นและข้อมูลอันดับปฏิกิริยาดังสมการ (3-2)

$$k = \frac{-r_{H_2S_0}}{[H_2S]_0^\alpha [KMnO_4]_0^\beta} \quad (3-2)$$

และค่า k ที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการของอาร์เรเนียสดังแสดงในสมการที่ (3-3)

$$k = A \exp(-Ea / RT) \quad (3-3)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่เฉพาะปฏิกิริยา

R คือ ค่าคงที่ของแก๊สสมมติ

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

Ea คือ พลังงานกระตุ้น ($J.mol^{-1}$)

A คือ ความถี่ของการชนของอาร์เรเนียส

ซึ่งสามารถเขียนในรูป ลอการิทึมได้ ดังสมการที่ (3-4)

$$\ln k = \ln A - \frac{Ea}{RT} \quad (3-4)$$

จากค่า k ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถหาค่า A และ Ea ของปฏิกิริยาระหว่าง H_2S กับ $KMnO_4$ ได้

3. การสมการอัตราเร็วปฏิกิริยา

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาได้จากการแทนค่าอันดับปฏิกิริยาและค่า k ลงในสมการที่ (3-1) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการปฏิกิริยาที่เวลาใดๆ ได้ดังสมการ (3-5)

$$-r_{H_2S} = k C_{H_2S}^\alpha C_{KMnO_4}^\beta \quad (3-5)$$

โดยค่า α และ β ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่แสดงรายละเอียดในข้อ 1 ส่วนค่า k เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิตามสมการ (3-3) ดังนั้น สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาสำหรับช่วงอุณหภูมิ 303.15 ถึง 323.15 K ที่ pH 7 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-6)

$$-r_{H_2S} = A \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) C_{H_2S}^\alpha C_{KMnO_4}^\beta \quad (3-6)$$

สำหรับที่ pH ค่าอื่นๆ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วปฏิกิริยากับ pH แสดงดังสมการที่ (3-7)

$$-r_{H_2S} = f(pH) \quad (3-7)$$

เมื่อควรวรรวมสมการที่ (3-7) ลงในในสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาโดยอาศัยกฎการคูณเข้าไปในสมการ จะสามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาสำหรับ pH ใดๆ ในช่วง pH 7-11 และช่วงอุณหภูมิ 303.15 – 323.15 K ได้ดังสมการที่ (3-8) ซึ่งแสดงสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ, pH และความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาได้

$$-r_{H_2S} = A \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) \times f(pH) \times C_{H_2S}^\alpha C_{KMnO_4}^\beta \quad (3-8)$$

3.1.4 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างสำหรับสารละลาย H_2S

เก็บตัวอย่างสารทำปฏิกิริยาปริมาตร 5 ml จากถังปฏิกรณ์ บรรจุในขวดแก้วขนาด 15 ml ที่ภายในบรรจุด้วยสารละลาย Zinc acetate ปริมาตร 2 ml จากนั้นจึงเติมสารละลาย NaOH 6 N ปริมาตร 5 ml เติมน้ำกลั่น ให้เต็มปริมาตรของขวดเก็บตัวอย่าง ความถี่ในการเก็บตัวอย่าง คือ เก็บที่เวลา 0, 2, 5, 10, 30 และ 60 นาที

การเก็บตัวอย่างสำหรับสารละลาย $KMnO_4$

เก็บตัวอย่างสารทำปฏิกิริยาปริมาตร 5 ml จากถังปฏิกรณ์ บรรจุในขวดแก้วขนาด 15 ml ที่ภายในบรรจุด้วยสารละลาย $Na_2S_2O_3$ 0.1 N ปริมาตร 5 ml ความถี่ในการเก็บตัวอย่าง คือ เก็บที่เวลา 0, 2, 5, 10, 30 และ 60 นาที

การวิเคราะห์ความเข้มข้น ของ H_2S และ $KMnO_4$

การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของ H_2S ในตัวอย่างใช้วิธี Iodometric (APHA-AWWA. WPCF, 1971)

การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ในตัวอย่างใช้วิธี Persulfate (APHA-AWWA. WPCF, 1971)

3.2 สารเคมี อุปกรณ์ วิธีการทดลองของการศึกษาศึกษาการกำจัด H_2S ด้วยคอลัมน์บรรจุร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันในระดับห้องปฏิบัติการ

3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมแก๊ส H_2S

- แก๊ส H_2S 40% ในแก๊ส N_2 (บริษัท Thai Industrial Gas)
- แก๊ส N_2 (บริษัท Thai Industrial Gas)

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย $KMnO_4$

- 99% $KMnO_4$ (บริษัท Merck, AR grade)
- น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

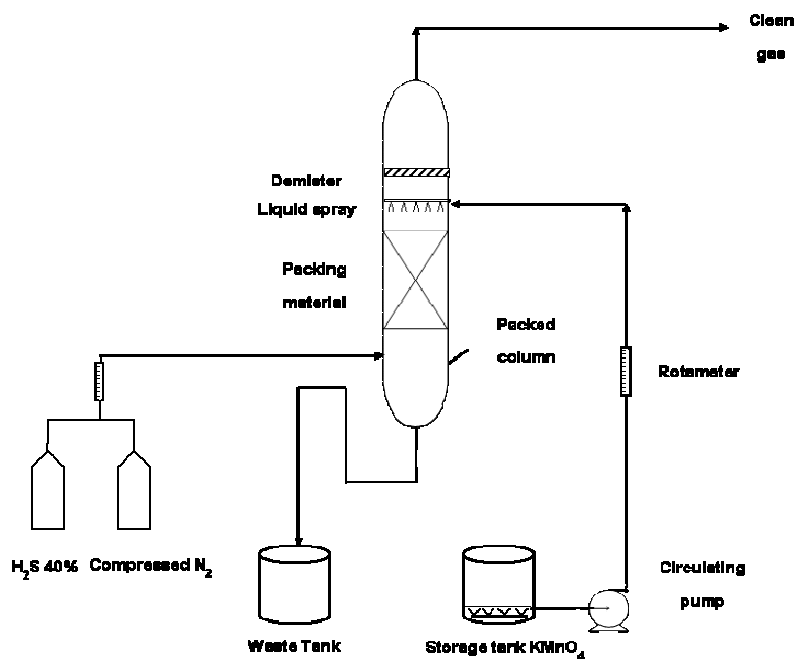
สารเคมีที่ใช้เก็บตัวอย่าง

- $CdSO_4$ (บริษัท VWR, AR grade)

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

อุปกรณ์สำหรับการศึกษาการกำจัด H_2S โดยใช้คอลัมน์บรรจุร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันในระดับห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-3



ภาพประกอบที่ 3-3 แสดงชุดอุปกรณ์การทดลองของคอลัมน์บรรจุสำหรับการกำจัด H_2S

จากภาพประกอบที่ 3-3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย 1) คอลัมน์บรรจุที่บรรจุด้วยวัสดุตัวกลาง (Packing material) 2) ถังแก๊ส H_2S 40% ในแก๊ส N_2 และ 3) ระบบเก็บและป้อนสารละลาย $KMnO_4$ โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดต่างๆดังนี้

1. คอลัมน์บรรจุ

คอลัมน์บรรจุที่ใช้ศึกษามีลักษณะรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และความสูง 35 เซนติเมตร ภายในคอลัมน์บรรจุทำการบรรจุด้วยวัสดุตัวกลางแบบ Raschig ring ที่ทำจากพวกโพลีเอทิลีนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm

2. ระบบผลิตแก๊สที่ปนเปื้อนด้วย H_2S

ระบบสร้างแก๊สปนเปื้อนด้วย H_2S ประกอบด้วยถังแก๊ส H_2S (ความเข้มข้น 40% ในแก๊ส N_2) ถังแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ทำการผลิตแก๊สที่ปนเปื้อนด้วย H_2S โดยนำแก๊สผสมของ H_2S มาผสมกับแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ด้วยอัตราการไหลที่กำหนดเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของ H_2S ในแก๊สผสมตามต้องการ

3. ระบบเก็บสารละลาย $KMnO_4$ และป้อนสารละลาย $KMnO_4$

ระบบเก็บและป้อนสารละลาย $KMnO_4$ ประกอบด้วย

- ถังเก็บสารดูดซึม (Storage tank) เป็นถังพลาสติกสีขาวขนาด 4 ลิตร ใช้สำหรับเตรียมสารละลายของเหลวดูดซึมให้มีความเข้มข้นตามต้องการ โดยทำการเตรียมสารละลายครั้งละ 2 ลิตร เพื่อป้อนเข้าคอลัมน์ และรองรับสารดูดซึมที่ผ่านการใช้งานแล้วจากระบบ

- โรตاميเตอร์ (Rotameter) ใช้วัดอัตราการไหลของสารดูดซึมที่ป้อนเข้าสู่หอดูดซึม

- หัวพ่นฝอย (Spray nozzle) ติดตั้งอยู่ที่ปลายท่อป้อนของเหลวดูดซึมภายในคอลัมน์

- วาล์วควบคุมอัตราการไหล ใช้ควบคุมอัตราการไหลของของเหลวที่ส่งออกจากเครื่องสูบลำที่มีค่าอัตราการไหลตามที่ต้องการ

- เครื่องสูบน้ำ (Pump) ใช้ส่งสารดูดซึมจากถังเก็บให้ไหลไปยังคอลัมน์ เครื่องสูบน้ำมีการเดินเครื่องตลอดเวลาของการดำเนินการเพื่อส่งสารดูดซึมวนกลับเข้าสู่คอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่มีส่วนประกอบทั้ง 3 ระบบที่ติดตั้งที่ห้องปฏิบัติการ แสดงดังภาพประกอบที่ 3-4



ภาพประกอบที่ 3-4 แสดงชุดการทดลองของคอลัมน์บรรจุที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.2.2.2 อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง

อุปกรณ์การเก็บตัวอย่างประกอบด้วย

- Sampling pump (Aircheck sampler รุ่น Model 224-PCXR8)
- Imprinter
- สายยางซิลิโคน

3.2.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ประกอบด้วย

- ปิเปต
- บิวเรต
- หลอดหยด

- เครื่องวัดค่าพีเอช ดังภาพประกอบที่ 3-4
- เครื่อง UV- VIS Spectrophotometer (รุ่น Hewlett Packard 8453) ดังภาพประกอบที่ 3-5 ใช้วิเคราะห์แอมโมนีแอส
- นาฬิกาจับเวลา (Stop watch)
- ตู้ควัน (Hood)



ภาพประกอบที่ 3-5 แสดงเครื่อง UV-Spectrophotometer

3.2.3 วิธีการทดลองและการออกแบบการทดลอง

3.2.3.1 การออกแบบสภาวะการทดลอง

การออกแบบสภาวะการทดลองทำโดยใช้เทคนิค RSM โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ ความเข้มข้นของ H_2S ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ และสัดส่วนอัตราการไหลของเหลวต่อแก๊ส เทคนิค RSM เป็นเครื่องมือสำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ โดยใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบการทดลองอย่างเหมาะสม สำหรับการทดลองที่มีหลายตัวแปร RSM จะช่วยในการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยไม่จำเป็นต้องทำการทดลองในทุกความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดที่เป็นไปได้ ขั้นตอนการออกแบบการทดลองโดยใช้ RSM มีขั้นตอน ดังนี้

1. กำหนดตัวแปรที่จะศึกษาซึ่งประกอบด้วย

1.1 ตัวแปรอิสระ ประกอบด้วย

- ความเข้มข้นของ H_2S 600-5000 ppm)
- ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ (200-2000 ppm)
- สัดส่วนการไหลของของเหลวต่อแก๊ส L/G ratio (x_3 , 10-20 ml/l)

1.2 ตัวแปรตาม ประกอบด้วย

- ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ

2. กำหนดรหัส (Code) ของช่วงตัวแปรอิสระที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการออกแบบสถานะในการทำการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3-5
3. ออกแบบสถานะของการทดลองจาก Code ของตัวแปรอิสระที่ได้กำหนดไว้ โดยใช้วิธีการ Central Composite Design (CCD) โดยได้สถานะต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-5 แสดงรหัสตัวแปรและขอบเขตของตัวแปรที่ทำการศึกษา

การทดลอง	x_1	x_2	x_3
1	0	0	0
2	-0.59	0.59	-0.59
3	0	0	1
4	-0.59	-0.59	-0.59
5	-0.59	-0.59	-0.59
6	0	1	0
7	0.59	0.59	0.59
8	0.59	0.59	-0.59
9	0.59	-0.59	0.59
10	0	0	0
11	0	-1	0
12	0	0	-1
13	1	0	0
14	-0.59	-0.59	0.59
15	0	0	0
16	-1	0	0
17	0	0	0
18	0.59	-0.59	-0.59

จากตารางที่ 3-5 ที่แสดงรหัสตัวแปรและขอบเขตของตัวแปรที่ทำการศึกษา เมื่อแปลงค่ารหัสตัวแปรค่าที่ได้เป็นค่าของตัวแปรดำเนินการจะได้สถานะการทดลองสำหรับการ

ทดลองทั้งหมด 18 การทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-6 และเพื่อให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆควบคู่ไปกับการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค RSM จึงได้เพิ่มเติมสภาวะการทดลองนอกเหนือจากการออกแบบด้วย RSM อีก 2 สภาวะการทดลอง คือ สภาวะที่ 19 และ 20

ตารางที่ 3-6 แสดงสภาวะการทดลองสำหรับศึกษาการกำจัด H_2S ด้วย $KMnO_4$ ในคอลัมน์บรรจุ

การทดลองที่	H_2S (ppm)	$KMnO_4$ (ppm)	I/G (ml/l)	$KMnO_4$ (ml/min)
1	2828	200	15	30
2	1644	600	10	40
3	2856	1100	15	30
4	4111	600	10	40
5	1636	600	20	40
6	2870	1100	15	30
7	1543	1600	20	40
8	3680	1600	20	40
9	2811	1100	15	30
10	2586	2000	15	30
11	4236	1600	10	40
12	1740	1600	10	40
13	2796	1100	15	30
14	667	1100	15	30
15	2652	1100	10	20
16	4071	600	20	40
17	2712	1100	20	40
18	4839	1100	15	30
19	2816	1600	15	30
20	1646	1100	15	30

3.2.3.2 วิธีการทดลอง

การทดลองกำจัด H_2S โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันร่วมกับคอลัมน์บรรจุตามสภาวะการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ นั้นมีวิธีการทดลองในแต่ละการทดลองที่เหมือนกัน โดยมีขั้นตอนการดำเนินการในแต่ละการทดลองดังนี้

1. เตรียมสารละลาย $KMnO_4$ ให้มีความเข้มข้นตามต้องการตามโปรแกรมที่ออกแบบการทดลอง บรรจุสารละลาย $KMnO_4$ ลงใน Storage tank ปริมาตร 4 ลิตร จากนั้นปั๊มสารละลาย $KMnO_4$ ให้ไหลเข้าทางด้านบนของคอลัมน์และปรับอัตราการไหลของสารละลาย $KMnO_4$ ให้มีอัตราการไหลที่กำหนดตามโปรแกรมที่ได้ออกแบบการทดลองไว้

2. เตรียมแก๊ส H_2S โดยการเปิดวาล์วของถังแก๊ส H_2S และปล่อยแก๊ส N_2 เข้าผสมกับกระแสแก๊ส H_2S จนได้อัตราการไหลของแก๊สผสมและความเข้มข้นของ H_2S ตามที่ต้องการตามโปรแกรมการทดลองและปล่อยกระแสแก๊สให้ไหลเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์บรรจุให้มีอัตราการไหลตามที่ต้องการ

3. กระแสของแก๊ส H_2S และสารดูดซับไหลสวนทางกัน (Counter current) ผ่านตัวกลาง (Packing) ภายในคอลัมน์ทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างเฟสแก๊สและเฟสของเหลวทำให้เกิดการดูดซับและปฏิกิริยาเคมีขึ้นภายในคอลัมน์บรรจุ

4. ทำการเก็บตัวอย่างแก๊ส H_2S ที่ทางเข้า (Inlet) และที่ทางออก (Outlet) ของคอลัมน์บรรจุ โดยใช้ปั๊มเก็บตัวอย่าง (Sampling pump) ที่ต่อเข้ากับอิมพิงค์เจอร์ที่บรรจุด้วยสารละลาย $CdSO_4$ และทำการเก็บตัวอย่างสารละลาย $KMnO_4$ ใน Storage tank โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 30 นาที

3.2.4 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างแก๊ส

การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่าง H_2S ในเฟสแก๊สมีความยุ่งยากกว่าการเก็บตัวอย่าง H_2S ในเฟสของเหลว ในที่นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดสำหรับชุดเก็บตัวอย่างแก๊ส H_2S และวิธีการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ H_2S ในกระแสแก๊ส ชุดเก็บตัวอย่างแก๊สที่ใช้แสดงดังภาพประกอบที่ 3-6 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้



ภาพประกอบที่ 3-6 แสดงชุดเก็บตัวอย่างแก๊ส H_2S

1. อิมพิงเจอร์ เป็นขวดแก้วที่ประกอบด้วยท่อทางเข้า ท่อทางออก และหัวกระจายแก๊ส ภายในขวดแก้วบรรจุสารละลาย $CdSO_4$ ปริมาตร 25 ml โดยแก๊สตัวอย่างจะไหลเข้าท่อทางเข้าของ อิมพิงเจอร์ผ่านหัวกระจายแก๊ส เพื่อให้แก๊สกระจายตัวผ่านสารละลาย $CdSO_4$ ซึ่งทำหน้าดูดซึม H_2S ที่อยู่ในแก๊สให้อยู่สารละลาย $CdSO_4$ ในรูปของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ซึ่งเป็นตะกอนสีเหลืองเข้มหลังจากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ H_2S ด้วยวิธี Iodometric Method โดยการไทเทรตด้วยสารละลาย 0.025 N $Na_2S_2O_3$

2. ปัมป์เก็บตัวอย่างแก๊ส (Gas sampling pump) ใช้ดูดแก๊สจากท่อแก๊สที่ทางเข้าและที่ทางออกของคอลัมน์บรรจุ เพื่อส่งแก๊สตัวอย่างเข้าสู่ Impinger ปัมป์เก็บอากาศสามารถปรับอัตราการไหลของแก๊สตัวอย่างและกำหนดระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างได้ตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ H_2S ในแก๊ส สำหรับในการทดลองนี้ทำการเก็บตัวอย่างแก๊สที่อัตราการไหลเท่ากับ 1 l/min โดยใช้เวลาในการเก็บ 2 นาที

3. Calibrator ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-7 ใช้สำหรับการตรวจสอบค่าอัตราการไหลของแก๊สที่ไหลผ่านปั๊มเก็บตัวอย่าง



ภาพประกอบที่ 3-7 แสดงอุปกรณ์ Calibrator

4. สายยางซิลิโคน ใช้เป็นท่อทางไหลของแก๊สตัวอย่างที่ต่อระหว่างท่อเก็บตัวอย่างของคอลัมน์บรรจุกับชุดเก็บตัวอย่าง

วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

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

การวัดค่าความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีเปอร์ซัลเฟต (Persulfate method) ดังรายละเอียดการวิเคราะห์ที่แสดงในภาคผนวก ก (APHA-AWWA. WPCF, 1971)

การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัด H_2S

เมื่อทราบความเข้มข้นแก๊ส H_2S ที่ทางเข้าและที่ทางออกของคอลัมน์บรรจุ ก็จะ สามารถหาประสิทธิภาพในการกำจัด H_2S ของคอลัมน์ได้ โดยประสิทธิภาพการกำจัด คำนวณได้จาก สมการที่ (3-9)

$$H_2S \text{ removal efficiency (\%)} = \frac{\text{Inlet } H_2S \text{ conc.} - \text{Outlet } H_2S \text{ conc.}}{\text{Inlet } H_2S \text{ conc.}} \times 100 \quad (3-9)$$

เมื่อ Inlet H_2S conc. = ความเข้มข้นของ H_2S ในกระแสเข้า หน่วย (ppm)

Outlet H_2S conc. = ความเข้มข้นของ H_2S ในกระแสออก หน่วย (ppm)

3.3 สารเคมี อุปกรณ์ วิธีการทดลองของการศึกษาศึกษาการบำบัด H_2S จากแก๊สชีวภาพด้วย $KMnO_4$ ในคอลัมน์บรรจุ

สารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ วิธีการทดลองการเก็บตัวอย่างและวิธีวิเคราะห์จะดำเนินการ ในลักษณะเดียวกับหัวข้อ 3.2 ชุดคอลัมน์บรรจุที่นำไปใช้ศึกษากำจัด H_2S จากแก๊สชีวภาพ แสดงดัง ภาพประกอบที่ 3-8 เนื่องจากการศึกษาการกำจัด H_2S จากแก๊สชีวภาพจะใช้แก๊สชีวภาพที่ผลิตจาก ฟาร์มสุกรทำให้สามารถต่อท่อของแก๊สชีวภาพแยกจากท่อแก๊สชีวภาพของฟาร์มเข้าสู่ชุดทดลอง โดยตรง ชุดกำจัด H_2S ในแก๊สชีวภาพจึงประกอบด้วยคอลัมน์บรรจุที่บรรจุด้วยวัสดุตัวกลาง (Packing material) และระบบเก็บและหมุนเวียนสารละลาย $KMnO_4$ เท่านั้น โดยระบบเก็บและ หมุนเวียนสารละลาย $KMnO_4$ ถูกออกแบบเป็นถังทรงกระบอกใส 2 ชั้นที่กั้นด้วยตะแกรง ชั้นล่าง เป็นส่วนที่รับสารละลายที่ไหลกลับมาจากคอลัมน์บรรจุ และติดตั้งปั๊มเพื่อสูบสารละลายหมุนเวียน กลับไปใช้ใหม่โดยจะปั๊มจากชั้นบนของถังเพื่อป้องกันไม่ให้มีตะกอนกลับเข้าไปในคอลัมน์



ภาพประกอบที่ 3-8 แสดงชุดการทดลองของคอลัมน์บรรจุที่ใช้สำหรับบำบัดแก๊สชีวภาพ ติดตั้งที่ มงคลฟาร์ม อ. กวนขุน จ. พัทลุง

ขั้นตอนการดำเนินเพื่อศึกษาการกำจัด H_2S จากแก๊สชีวภาพ ดำเนินการในทำนองเดียวกับการศึกษาการกำจัด H_2S ในห้องปฏิบัติการ โดยมีขั้นตอนและสภาวะการทดลองดังนี้

1. เตรียมสารละลาย $KMnO_4$ ที่ความเข้มข้นตามต้องการใน Storage tank ปริมาตร 28 l จากนั้นปั๊มสารละลาย $KMnO_4$ ให้ไหลเข้าทางด้านบนของคอลัมน์และปรับอัตราการไหลของสารละลาย $KMnO_4$ ด้วยอัตราการไหล 50 l/hr.

2. ป้อนแก๊สชีวภาพที่ปนเปื้อนด้วยแก๊ส H_2S ไหลเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์บรรจุด้วยอัตราการไหล 5 l/min

3. เมื่อแก๊สชีวภาพที่ปนเปื้อนด้วยแก๊ส H_2S และสารดูดซึ่มไหลสวนทางกัน (Counter current) ผ่านวัสดุบรรจุ (Packing) ภายในคอลัมน์ทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างเฟสแก๊สและเฟสของเหลวทำให้เกิดการดูดซึ่มและปฏิกิริยาเคมีขึ้นภายในคอลัมน์บรรจุ

4. ทำการเก็บตัวอย่างแก๊ส H_2S ที่ทางเข้า (Inlet) และที่ทางออก (Outlet) ของคอลัมน์บรรจุ โดยใช้ปั๊มเก็บตัวอย่าง (Sampling pump) ที่ต่อเข้ากับอิมฟังก์เจอร์ที่บรรจุด้วยสารละลาย $CdSO_4$ และทำการเก็บตัวอย่างสารละลาย $KMnO_4$ ใน Storage tank

5. ทำการทดลองทั้งหมด 4 การทดลอง โดยมีสภาวะการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 สภาวะของการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแก๊ส H_2S จากแก๊สชีวภาพ โดยควบคุมอัตราการของแก๊สคงที่ที่ 5 l/min และอัตราการไหลของสารดูดซึ่ม 50 l/hr.

การทดลองที่	สารดูดซึ่ม
1	น้ำ
2	$KMnO_4$ 50 ppm
3	$KMnO_4$ 200 ppm
4	$KMnO_4$ 600 ppm

บทที่ 4

ผลการทดลองและบทวิจารณ์

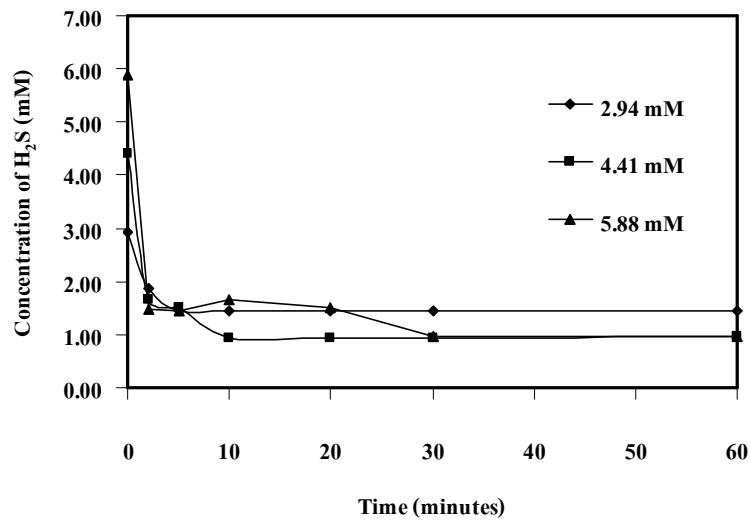
ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันและผลการกำจัด H_2S ด้วย $KMnO_4$ จะแบ่งการอภิปรายออกเป็น 3 ตอน คือ ตอนที่ 1 เป็นผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ ในปฏิกรณ์แบบแบทช์ (Batch) ตอนที่ 2 เป็นผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส H_2S ด้วยคอลัมน์บรรจุ (Packed column) ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันในระดับห้องปฏิบัติการ และ ตอนที่ 3 เป็นผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพจากฟาร์มสุกร โดยใช้คอลัมน์บรรจุร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยแต่ละตอนมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S และ $KMnO_4$ ในปฏิกรณ์แบบแบทช์

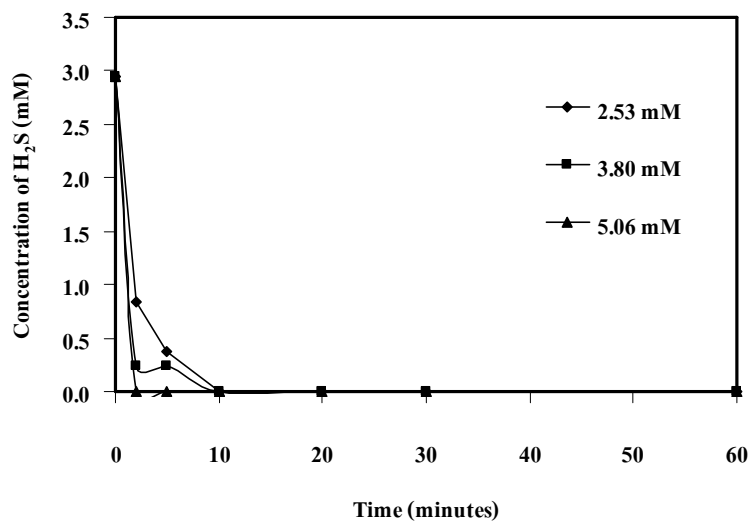
ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของ H_2S ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ อุณหภูมิ และ pH ซึ่งมีผลการศึกษาของแต่ละตัวแปรดังนี้

4.1.1 ผลของความเข้มข้นของ H_2S และความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ต่อปฏิกิริยาระหว่าง H_2S และ $KMnO_4$

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นใช้ความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ ในช่วงความเข้มข้น 2.94 – 5.88 mM และ 1.89 – 5.06 mM ตามลำดับ ความเข้มข้นของ H_2S ที่เวลาต่าง ๆ ตามสภาวะที่ศึกษาสามารถแสดงดังภาพประกอบที่ 4-1 และ 4-2 โดยข้อมูลของความเข้มข้นกับเวลาสำหรับการทดลองอื่น ๆ แสดงในภาคผนวก ข-1



ภาพประกอบที่ 4-1 กราฟแสดงความเข้มข้นของ H₂S กับเวลา เมื่อศึกษาผลความเข้มข้นของ H₂S โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ KMnO₄ เท่ากับ 1.90 mM T = 303.15 K และ pH = 7



ภาพประกอบที่ 4-2 กราฟแสดงความเข้มข้นของ H₂S กับเวลา เมื่อศึกษาผลความเข้มข้นของ KMnO₄ โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ H₂S เท่ากับ 2.94 mM T = 303.15 K และ pH = 7

จากภาพประกอบที่ 4-1 และ 4-2 สามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นด้วยการนำข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S กับ เวลาไปพิดในสมการโพลีโนเมียลจาก โปรแกรม Polymath 5.1 หากใช้เฟอเรนเชียลสมการที่เวลาเท่ากับศูนย์ และได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น สามารถแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของ H_2S เมื่อทำการศึกษาความเข้มข้นของ H_2S และ

$KMnO_4$

Run No.	H_2S conc. (m M)	$KMnO_4$ conc. (m M)	T (K)	pH	$-r_{H_2S,0}$ (m M.min ⁻¹)
1	2.94	1.89	303.15	7	0.79
2	4.41	1.89	303.15	7	1.33
3	5.88	1.89	303.15	7	2.31
4	2.94	2.53	303.15	7	1.49
5	2.94	3.79	303.15	7	2.16
6	2.94	5.06	303.15	7	2.35

เมื่อนำข้อมูลอัตราปฏิกิริยาเริ่มต้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารทำปฏิกิริยาในตารางที่ 4-1 มาวิเคราะห์เพื่อหาพารามิเตอร์ของกฎอัตรา คือ ค่า k , α และ β โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของโปรแกรม Polymath 5.1 โดยกำหนดแบบสมการกฎอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (4-1)

$$-r_{H_2S,0} = kC_{H_2S,0}^\alpha C_{KMnO_4,0}^\beta \quad (4-1)$$

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมดังกล่าวแสดงไว้ในภาคผนวก จ พบว่าสามารถแสดงสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาระหว่าง H_2S และ $KMnO_4$ ได้ดังสมการที่ (4-2)

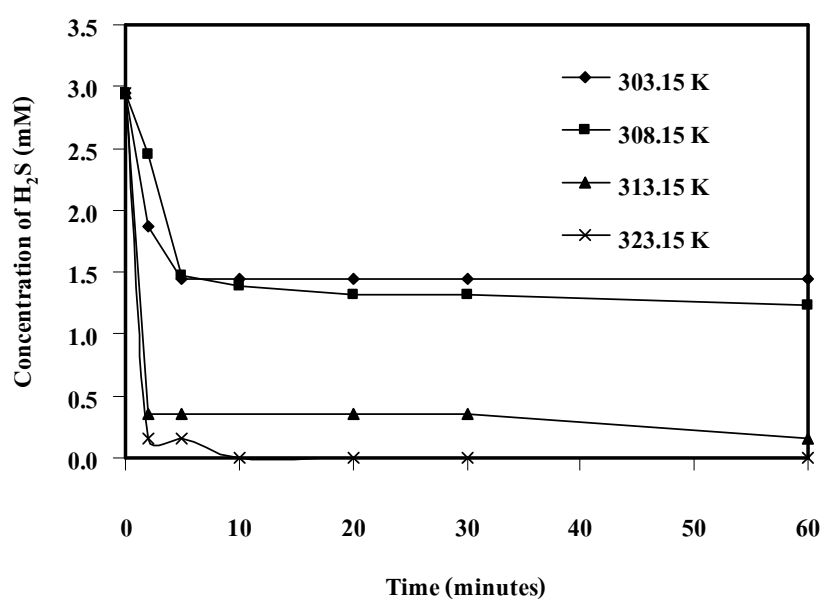
$$-r_{H_2S} = 1.13 \times 10^{-3} C_{H_2S}^{1.1} C_{KMnO_4}^{0.92} \quad (4-2)$$

จากสมการที่ (4-2) จะได้ว่าอันดับปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S และ $KMnO_4$ มีค่าเท่ากับ 1.1 และ 0.92 ตามลำดับ และค่าคงที่สำหรับสมการอัตราปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเท่ากับ 303.15 K มีค่าเท่ากับ $1.13 \times 10^{-3} M^{-1.02} \cdot \text{min}^{-1}$ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.90 และค่าความน่าเชื่อถือ 95% ของพารามิเตอร์น้อยกว่าค่าประมาณของพารามิเตอร์ซึ่งแสดงถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองในการที่จะใช้อธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S ด้วย $KMnO_4$ ได้ อันดับของปฏิกิริยาของเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ H_2S เพิ่มขึ้นเล็กน้อยคือ จาก 1 เป็น 1.1

เมื่อเปลี่ยนสารออกซิเดนต์จาก Fe(EDTA) (Wubs *et al*, 1994) เป็น KMnO_4 ซึ่งหมายความว่าหากใช้สารละลาย KMnO_4 เป็นสารออกซิเดนต์ทำปฏิกิริยากับ H_2S จะได้ว่าปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ H_2S มากขึ้น

4.1.2 ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาระหว่าง H_2S และ KMnO_4

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยา จะได้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นกับเวลาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังภาพประกอบที่ 4-3



ภาพประกอบที่ 4-3 กราฟแสดงความเข้มข้นของ H_2S กับเวลาที่อุณหภูมิช่วง 303.15 ถึง 323.15 K เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S เท่ากับ 2.94 mM ความเข้มข้นเริ่มต้นของ KMnO_4 เท่ากับ 1.89 mM และ pH = 7

จากภาพประกอบที่ 4-3 เมื่อนำข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S กับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ ไปหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของ H_2S เมื่อทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ

Run No.	H_2S conc. (mM)	$KMnO_4$ conc. (mM)	T (K)	pH	$-r_{H_2S,0}$ (mM.min ⁻¹)
7	2.94	1.89	303.15	7	0.79
8	2.94	1.89	308.15	7	1.00
9	2.94	1.89	313.15	7	2.07
10	2.94	1.89	323.15	7	2.23

จากตารางที่ 4-2 ข้อมูลอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นและข้อมูลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่แสดงในตารางที่ 4-2 ทำให้สามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยการแทนค่าข้อมูลอัตราเร็วปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารทำปฏิกิริยาและอันดับปฏิกิริยาในสมการที่ (4-3) ทำให้สามารถคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ ดังตารางที่ 4-3

$$k = \frac{-r_{H_2S,0}}{[H_2S]_0^{1.1}[KMnO_4]_0^{0.92}} \quad (4-3)$$

ตารางที่ 4-3 แสดงค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Run No.	T (K)	$-r_{H_2S,0}$ (mM.min ⁻¹)	k (mM ^{-1.02} .min ⁻¹)	ln k	$1/T \times 10^5 (K^{-1})$
11	303.15	0.79	0.14	-2.03485	329.9
12	308.15	1.00	0.16	-1.80424	324.5
13	313.15	1.54	0.25	-1.07499	319.3
14	323.15	2.23	0.37	-1.00103	309.5

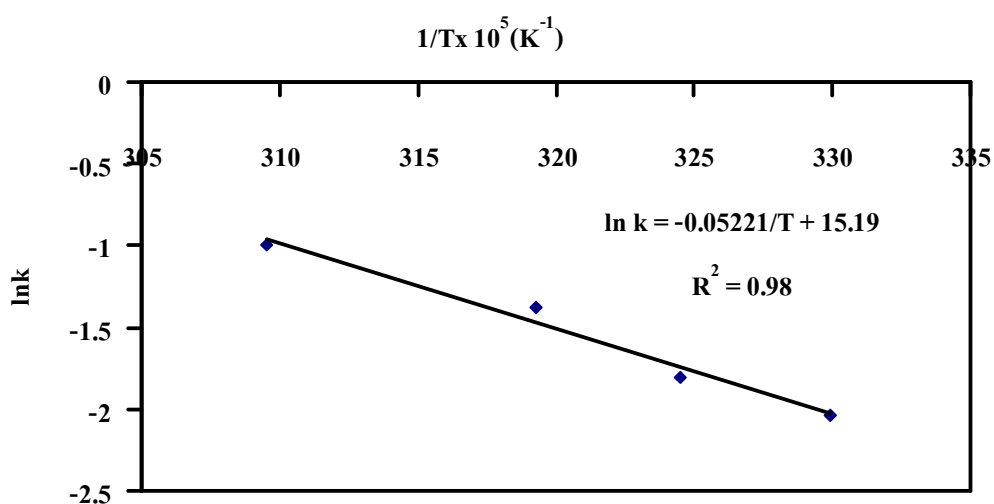
จากตารางที่ 4-3 จากข้อมูลค่า k ที่อุณหภูมิต่าง ๆ นำมาหาค่า A และ E_a ของปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วยสารละลาย $KMnO_4$ ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ln k กับ $1/T$ ดังสมการที่ (4-4)

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (4-4)$$

จากข้อมูลของ k ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ จะได้กราฟเป็นเส้นตรง ดังภาพประกอบที่ 4-4 แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่าง k และ T สอดคล้องกับสมการที่ (4-4) จากความสัมพันธ์เชิงเส้นของกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ สามารถหาค่า A และ Ea ได้จากจุดตัดแกน y และความชันของเส้นกราฟ พบว่าจะได้ค่า Ea และ A เท่ากับ 43,327 J.mol⁻¹ และ 3.68×10^6 ตามลำดับ และสามารถเขียนค่าคงที่ปฏิกิริยาระหว่าง H₂S และ KMnO₄ ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิตามสมการอาร์เรเนียส ดังแสดงด้วยสมการที่ (4-5)

$$k = 3.68 \times 10^6 \exp\left(\frac{-43,237}{RT}\right) \quad (4-5)$$

เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 303.15 ถึง 323.15 K

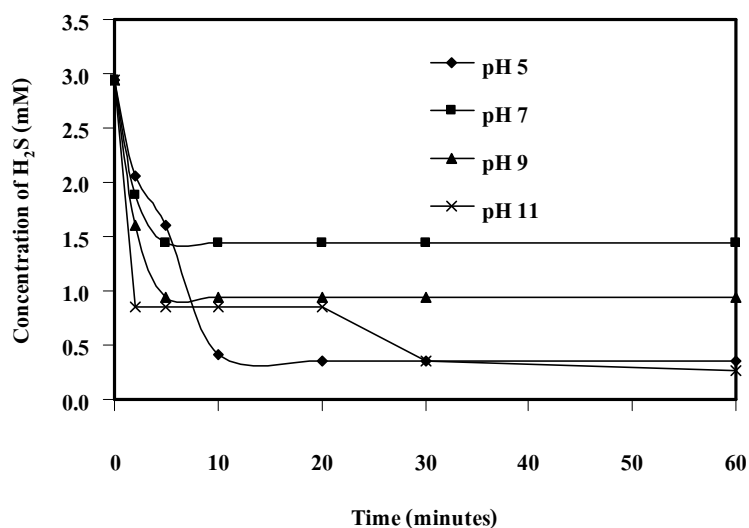


ภาพประกอบที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชัน H₂S ด้วย KMnO₄

จากสมการที่ (4-5) พบว่าค่า Ea ของปฏิกิริยาระหว่าง H₂S กับ KMnO₄ อยู่ในช่วงขนาดอันดับ (order of magnitude) และช่วงอุณหภูมิเดียวกันกับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ MEK ด้วย KMnO₄ ที่มีค่า Ea เท่ากับ 25,393 J mol⁻¹ (Thakatkaew, 2004) ค่าที่ได้น้อยกว่า Ea ของ H₂S กับ KMnO₄ แสดงว่าการเพิ่มอุณหภูมิจึงมีผลต่ออัตราปฏิกิริยา มากกว่า ซึ่งสังเกตได้จากตารางที่ 4-3 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิ 5 K ส่งผลให้อัตราปฏิกิริยาระหว่าง H₂S กับ KMnO₄ เพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 เท่า ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิ 5 K อัตราปฏิกิริยาระหว่าง MEK กับ KMnO₄ เพิ่มขึ้นเพียง 0.013 เท่า

4.1.3 ผลของ pH ต่อปฏิกิริยาระหว่าง H_2S และ KMnO_4

ผลของ pH ต่อปฏิกิริยาได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ H_2S กับเวลาที่ pH ต่าง ๆ ดังภาพประกอบที่ 4-5



ภาพประกอบที่ 4-5 กราฟแสดงความเข้มข้นของ H_2S กับเวลาในช่วง pH 5 ถึง 11 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S 2.94 mM ความเข้มข้นเริ่มต้นของ KMnO_4 เท่ากับ 1.89 mM และอุณหภูมิ 303.15 K

จากภาพประกอบที่ 4-5 นำข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S กับเวลาที่ pH ต่าง ๆ สามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นที่ pH ต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของ H_2S เมื่อทำการศึกษาผลของ pH

Run No.	H_2S conc. (mM)	KMnO_4 conc. (mM)	T (K)	pH	$-r_{\text{H}_2\text{S},0}$ (mM.min ⁻¹)
15	2.94	1.89	303.15	5	0.61
16	2.94	1.89	303.15	7	0.79
17	2.94	1.89	303.15	9	0.92
18	2.94	1.89	303.15	11	1.65

จากตารางที่ 4-4 พบว่าเมื่อ pH ของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 11 ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นมากกว่า 60 % ที่ pH สูงกว่าหรือเท่ากับ 8 ซัลไฟด์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ HS^- และ S^{2-} และมี H_2S อยู่ น้อยมาก และที่ pH เท่ากับหรือต่ำกว่า 7 ซัลไฟด์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ H_2S (Bowker *et al.*, 1989) การที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อ pH มีค่ามากกว่า 7 แสดงให้เห็นว่า KMnO_4 ทำปฏิกิริยาได้ดีกับซัลไฟด์ในรูปของ HS^- และ S^{2-} มากกว่าในรูปของ H_2S และเมื่อนำข้อมูลอัตราการเกิดปฏิกิริยากับ pH ไปฟิตแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Polymath 5.1 พบว่าสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาและ pH แบบเอกโพเนนเชียลได้ดังสมการที่ (4-6)

$$-r_{\text{H}_2\text{S}} = (6.40 \times 10^{-4} (\exp(\text{pH})^{0.83}) + 0.62) \quad (4-6)$$

โดยสมการที่ (4-6) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.98 และเมื่อรวมสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิ และ pH กับกฎอัตราจะได้สมการอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาที่สามารถแสดงทั้งผลของความเข้มข้น ผลของอุณหภูมิ และผลของ pH ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของ H_2S ดังสมการที่ (4-7)

$$-r_{\text{H}_2\text{S}} = \left(3.68 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-43,237}{RT}\right) \right) \times \left[(6.40 \times 10^{-4} (\exp(\text{pH})^{0.83}) + 0.62) \right] C_{\text{H}_2\text{S}}^{1.1} C_{\text{KMnO}_4}^{0.92} \quad (4-7)$$

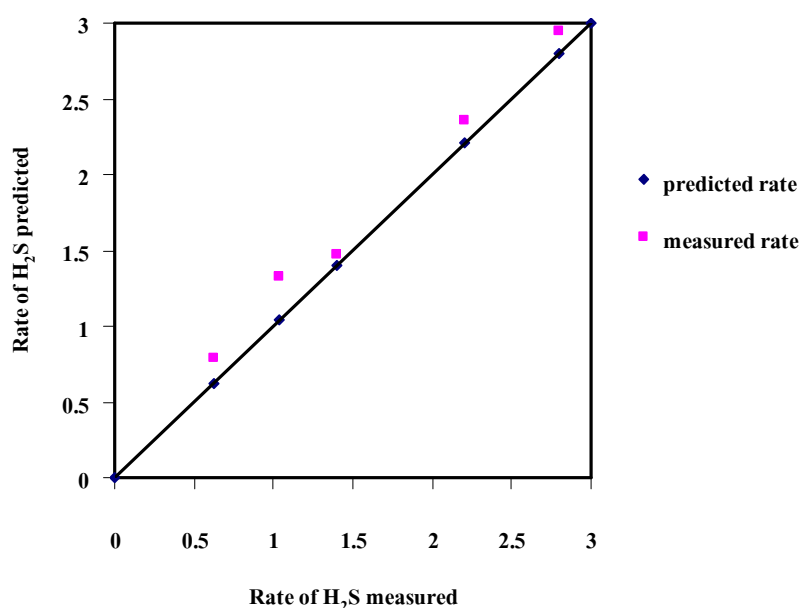
4.1.4 การทดสอบความน่าเชื่อถือของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S ด้วยสารละลาย KMnO_4

เพื่อทดสอบว่าสมการที่ (4-7) สามารถอธิบายปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S กับ KMnO_4 ในช่วงสภาวะต่าง ๆ ที่ศึกษาได้จริง จึงได้ทำการศึกษาเพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของสมการดังกล่าว โดยทำการทดลองวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง H_2S และ KMnO_4 เพิ่มเติม นอกเหนือจากชุดข้อมูลที่ใช้ในการหากฎอัตรา โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S และ KMnO_4 อยู่ในช่วง 2.94 ถึง 5.88 mM และ 1.26 ถึง 3.78 mM อุณหภูมิอยู่ในช่วง 303.15 ถึง 323.15 K และ pH ในช่วง 5 ถึง 11 ผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับที่ได้จากการทดลองกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ (4-7) แสดงดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 การเปรียบเทียบค่าอัตราการปฏิกิริยาที่วัดได้จากการทดลองกับการคำนวณ

Initial concentration (mM)		T(K)	pH	$-r_{H_2S,0}$	$-r_{H_2S,0}$	% Error
H ₂ S	KMnO ₄			Predicted (mM. min ⁻¹)	Measured (mM.min ⁻¹)	
5.42	2.21	315.15	5.5	2.208	2.356	6.70
7.35	1.35	308.15	6	1.40	1.47	5.00
6.47	1.14	318.15	8	2.798	2.952	5.52
2.94	1.89	303.15	7	0.622	0.794	27.65
4.68	1.89	303.15	11	1.038	1.328	27.93

จากข้อมูลตารางที่ 4-5 สามารถเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่วัดได้จากการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (4-7) ได้ดังภาพประกอบที่ 4-6



ภาพประกอบที่ 4-6 กราฟระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่วัดได้จากการทดลองและการทำนาย

จากภาพประกอบที่ 4-6 สังเกตข้อมูลของอัตราปฏิกิริยาที่วัดได้กับการทำนายมีการกระจายตัวรอบเส้น แสดงว่าสมการแบบจำลองที่ (4-7) สามารถใช้ทำนายอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง H₂S และ KMnO₄ ได้ เนื่องจากอัตราปฏิกิริยาที่วัดได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าการทำนายจากแบบจำลอง

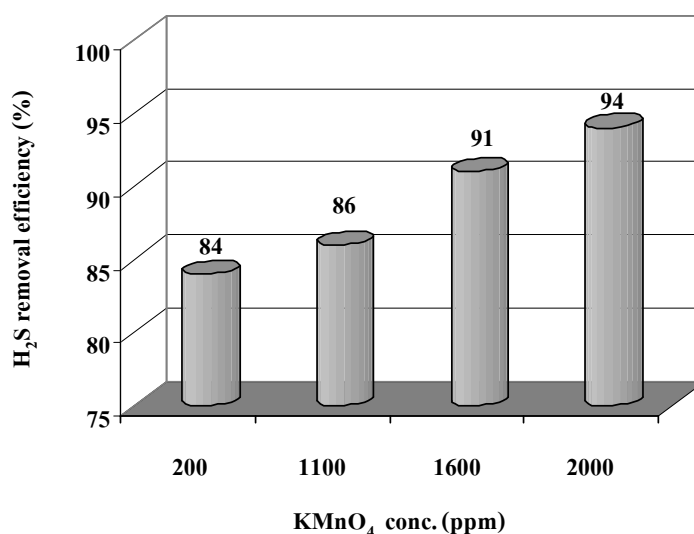
4.2 ศึกษาการกำจัด H_2S ด้วยสารละลาย $KMnO_4$ ในคอลัมน์บรรจุในระดับห้องปฏิบัติการ

การศึกษาเพื่อใช้สารละลาย $KMnO_4$ เป็นสารดูดซับในการกำจัดแก๊ส H_2S โดยใช้คอลัมน์บรรจุ ในระดับห้องปฏิบัติการนั้น ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของแก๊ส H_2S , L/G ratio และ ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S และหาค่าที่เหมาะสมในการดำเนินการ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

4.2.1 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S โดยใช้คอลัมน์บรรจุ

4.2.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย $KMnO_4$ ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S

การศึกษานี้ได้กำหนดให้ความเข้มข้นของ H_2S คงที่ที่ 2828 ppm อัตราการไหลของ N_2 เท่ากับ 2 ml/min และ L/G ratio เท่ากับ 15 ml liq / 1 gas โดยทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย $KMnO_4$ ในช่วง 200-2000 mg/l ควบคุมอัตราการไหลของสารละลาย $KMnO_4$ ให้คงที่เท่ากับ 30 ml/min ตลอดการทดลอง ได้ผลการทดลองดังกราฟในภาพประกอบที่ 4-7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด H_2S กับความเข้มข้นของ $KMnO_4$

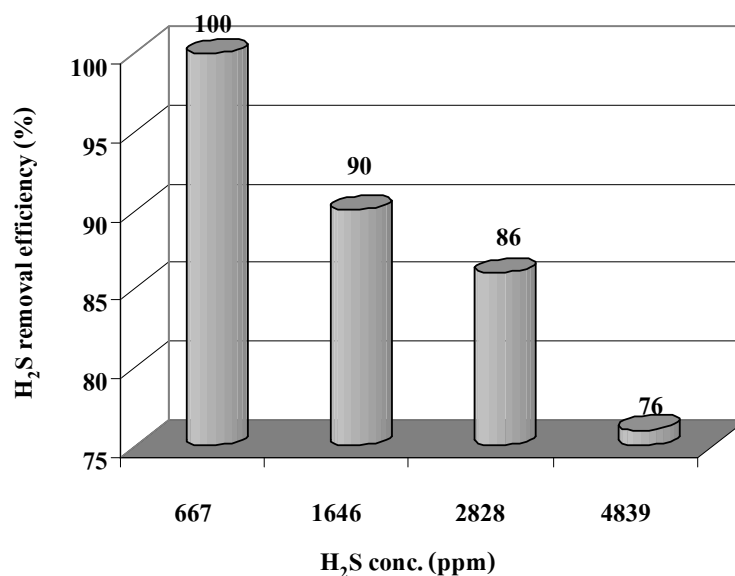


ภาพประกอบที่ 4-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด H_2S กับความเข้มข้นของ $KMnO_4$

จากภาพประกอบที่ 4-7 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ KMnO_4 เพิ่มขึ้นจาก 200 ppm ถึง 2000 ppm ให้ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S เพิ่มขึ้นประมาณ 10 % การเพิ่มความเข้มข้นของ KMnO_4 เป็นการเพิ่มปริมาณของสารดูดซึมในคอลัมน์ส่งผลให้เกิดการดูดซึมและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกฎอัตราในสมการที่ (4-7) ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ KMnO_4 และจากสมการปริมาณสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยาระหว่าง H_2S กับ KMnO_4 พบว่าอัตราส่วนเชิงโมลของการทำปฏิกิริยาพอดีกันระหว่าง H_2S และ KMnO_4 มีค่าเท่ากับ 1 : 6 (Pisarczyk, 1982) ในขณะที่ผลจากการศึกษานี้พบว่าจำเป็นต้องใช้อัตราส่วนเชิงโมลสูงกว่าความต้องการทางทฤษฎีโดยอัตราส่วนโมล H_2S ต่อ KMnO_4 เท่ากับ 1:8 ที่ความเข้มข้น KMnO_4 1600 ppm ให้ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ประมาณ 90% แสดงว่ามีปัจจัยอย่างอื่นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S นอกเหนือจากอัตราส่วนเชิงโมลโดยปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้ต้องใช้อัตราส่วนเชิงโมลสูงกว่าที่ต้องการทางทฤษฎีคือประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลในระบบและการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง

4.2.1.2 ผลของความเข้มข้นของ H_2S ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S

ในการทดลองนี้ควบคุมความเข้มข้นของสารละลาย KMnO_4 เท่ากับ 1100 mg/l อัตราการไหลของ N_2 เท่ากับ 2 l/min และ L/G ratio 15 ml liq/l gas คงที่ตลอดการทดลอง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของ H_2S ในช่วง 667-4839 ppm ได้ผลการทดลองแสดงในภาพประกอบที่ 4-8



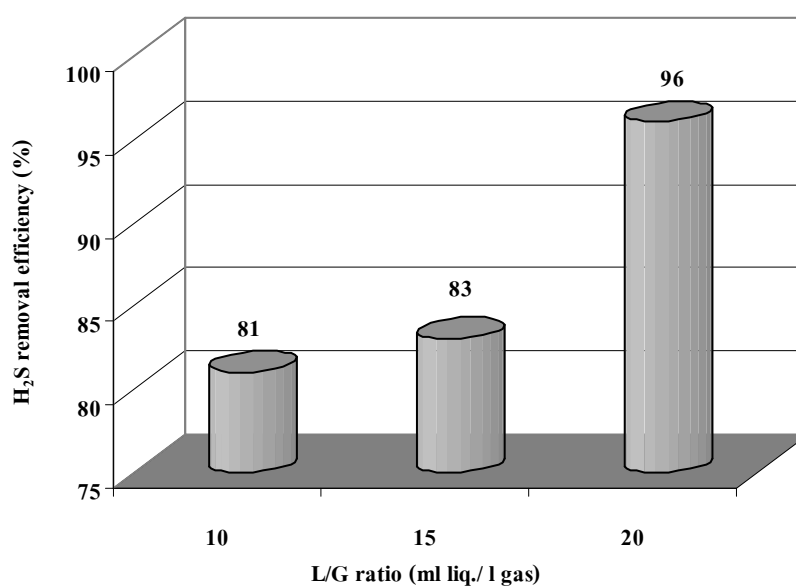
ภาพประกอบที่ 4-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด H₂S โดยใช้สารละลาย

KMnO₄ ความเข้มข้น 1100 mg/l เป็นสารดูดซึม สัดส่วนของอัตราการไหลของสารละลาย KMnO₄ และของแก๊ส 15 ml liq/l gas และความเข้มข้นของ H₂S ในช่วง 667-4839 ppm

จากภาพประกอบที่ 4-8 พบว่า เมื่อความเข้มข้น H₂S เพิ่มจาก 667 ppm จนถึง 4839 ppm ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด H₂S ลดลงประมาณ 30% และตามทฤษฎีอัตราส่วนโมลของ H₂S ต่อ KMnO₄ ในอัตราส่วน 1 : 6 เป็นอัตราที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอดีกัน (Pisarczyk, 1982) ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพประกอบที่ 4-8 พบว่าความเข้มข้น H₂S 1646 ppm เป็นอัตราส่วนเชิงโมลที่มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัด H₂S ประมาณ 90% ซึ่งยอมรับได้ ปัจจัยการถ่ายโอนมวลในระบบและการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงเป็นปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด H₂S ไม่ถึง 100% แม้จะมีอัตราส่วนจำนวนโมลเป็นไปตามที่ต้องการทางทฤษฎี ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าในการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันร่วมกับคอลัมน์บรรจุนั้นจำเป็นต้องใช้อัตราส่วนเชิงโมลของสารทำปฏิกิริยาที่สูงกว่าความต้องการทางทฤษฎี

4.2.1.3 ผลของ L/G ratio ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด H₂S

การทดลองได้ควบคุมความเข้มข้นของ H₂S ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเท่ากับ 2828 ppm อัตราการไหลของ N₂ เท่ากับ 2 l/min และความเข้มข้นของสารละลาย KMnO₄ เท่ากับ 1100 mg/l ให้คงที่ตลอดการทดลอง และทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ L/G ratio ในช่วง 10 ถึง 20 ml liq/1 gas ผลของ L/G ratio ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H₂S แสดงดังกราฟในภาพประกอบที่ 4-9



ภาพประกอบที่ 4-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด H₂S กับ L/G ratio

จากภาพประกอบที่ 4-9 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด H₂S มีค่าระหว่าง 81 ถึง 96% ในช่วง L/G ratio เพิ่มขึ้นจาก 10 จนถึง 20 ml liq/ 1 gas เนื่องจาก L/G ratio ที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วน โมลของ H₂S ต่อ KMnO₄ ที่เข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้น รวมทั้งเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนในระบบ ทำให้ ประสิทธิภาพการกำจัด H₂S ในคอลัมน์บรรจุเพิ่มขึ้นตาม L/G ratio ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด H₂S ได้ โดยการเพิ่ม L/G ratio แต่การเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายดูดซึมเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งของคอลัมน์บรรจุ การใช้อัตราการไหลของสารดูดซึมที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดการท่วมขึ้นภายในคอลัมน์บรรจุ ในขณะที่การลดอัตราการไหลของสารดูดซึมลงต่ำเกินไปจะทำให้เกิด Channeling ในคอลัมน์บรรจุ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง ดังนั้นการกำหนดช่วงอัตราการไหลที่เหมาะสมของสารละลายจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด โดยทั่วไปเลือกใช้อัตราการไหล 60-80% ของอัตราการไหลที่ทำให้เกิดการท่วมในคอลัมน์

4.2.2 ผลของสภาวะดำเนินการต่อประสิทธิภาพการกำจัด H₂S ด้วย KMnO₄ ในคอลัมน์บรรจุ

จากการศึกษาการกำจัด H₂S ด้วยสารละลาย KMnO₄ ในคอลัมน์บรรจุ ที่ออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD ซึ่งมีการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง ได้ประสิทธิภาพการกำจัด H₂S ของแต่ละสภาวะการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-6 โดยข้อมูลรายละเอียดของแต่ละชุดการทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก ข-2

ตารางที่ 4-6 แสดงประสิทธิภาพการกำจัด H₂S ด้วยคอลัมน์บรรจุตามสภาวะต่าง ๆ ที่ออกแบบ

การทดลองด้วยเทคนิค RSM

การทดลองที่	H ₂ S (ppm)	KMnO ₄ (ppm)	L/G (ml/l)	Efficiency (%)
1	2828	200	15	83.62
2	1644	600	10	74.60
3	2856	1100	15	86.09
4	4111	600	10	62.52
5	1636	600	20	90.51
6	2870	1100	15	82.97
7	1543	1600	20	81.04
8	3680	1600	20	87.67
9	2811	1100	15	85.34
10	2586	2000	15	94.00
11	4236	1600	10	80.28
12	1740	1600	10	87.84
13	2796	1100	15	82.62
14	667	1100	15	100.00
15	2652	1100	10	81.30
16	4071	600	20	79.41
17	2712	1100	20	95.63
18	4839	1100	15	75.68
19	2816	1600	15	90.82
20	1646	1100	15	89.51

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4-6 สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัด H_2S กับตัวแปรดำเนินการที่ศึกษาได้โดยใช้เทคนิค RSM ได้แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ (4-8) ($R^2 = 0.76$)

$$y = 73.36 - 1.35 \times 10^{-2} x_1 + 1.96 \times 10^{-2} x_2 + 1.86 x_3 + 4.33 \times 10^{-6} x_1 x_2 + 3.13 \times 10^{-4} x_1 x_3 - .65 \times 10^{-3} x_2 x_3 \quad (4-8)$$

โดยมีข้อจำกัด $600 \leq x_1 \leq 5000$, $200 \leq x_2 \leq 2000$, $10 \leq x_3 \leq 20$

เมื่อ y = ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S (ร้อยละ)

x_1 = ความเข้มข้นของ H_2S (ppm)

x_2 = ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ (mg/l)

x_3 = สัดส่วนอัตราการไหลของสารดูดซึมและของแก๊ส (ml liq/l gas)

สมการที่ (4-8) แสดงให้เห็นถึงตัวแปรดำเนินการที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ตัวแปรดำเนินการเหล่านี้ ได้แก่ ความเข้มข้นของ H_2S ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ และ L/G ratio ซึ่งในการพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองที่ได้จะพิจารณาจากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของสมการที่ (4-8) สำหรับรายละเอียดในการวิเคราะห์สมการแบบจำลองด้วยวิธี ANOVA ของแบบจำลองนั้น อธิบายได้ในตารางที่ 4-7

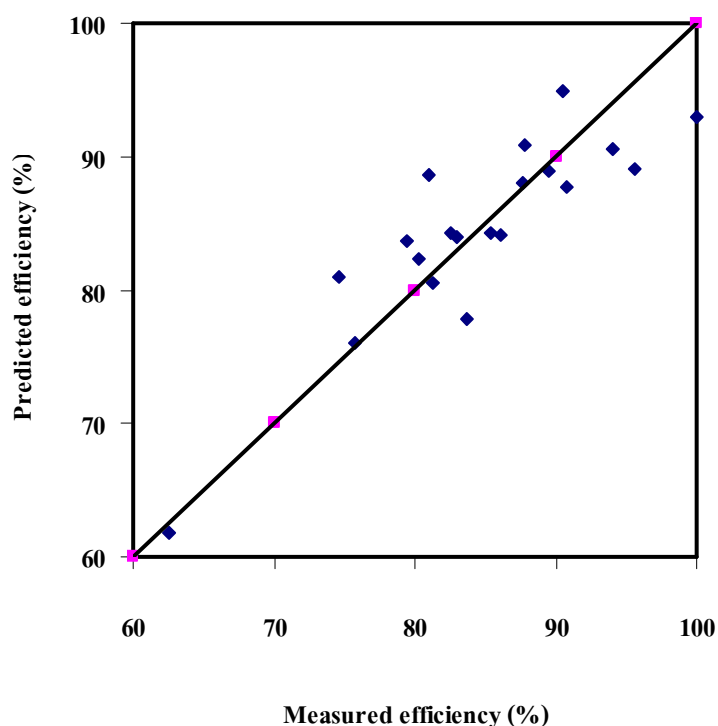
ตารางที่ 4-7 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองที่มีรูปแบบสมการแบบ

Linear interaction

ANOVA						
Source	SS	SS%	MS	F	F Signif	df
Regression	1001.9	76	166.99	7.015	0.00169	6
Residual	309.46	24	23.80			13
Total	1311.4	100				19

จากตารางที่ 4-7 F significant หรือ P value เท่ากับ 0.002 แสดงว่านัยสำคัญของตัวแปรที่ศึกษามีผลอย่างมีนัยสำคัญ เพราะค่า P value ของแบบจำลองต่ำกว่า 0.05 มาก ๆ พิจารณา ค่า P value แต่ละเทอมโดยแต่ละเทอมในแบบจำลองที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญจะให้ค่า P value ที่ต่ำ

กว่า 0.05 และถ้าเทอมใดมีค่า P value ต่ำกว่า 0.05 มาก ๆ แสดงว่าเทอมนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญมาก ส่วนเทอมที่มี P value สูงกว่า 0.05 จะตัดทิ้ง รายละเอียดของ P value ในแต่ละเทอม ดังแสดงในภาคผนวก ข จากการศึกษาระสิทธิภาพการกำจัด H_2S พิจารณาจากสัมประสิทธิ์ของแต่ละเทอมจะพบว่าผลของตัวแปรเดี่ยวจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S มากกว่าผลของ interaction คือ ความเข้มข้นของ H_2S ความเข้มข้น ของ $KMnO_4$ และ L/G ratio นอกจากนี้ค่า P value แล้ว ค่า R^2 เป็นค่าที่มีความสำคัญในการพิจารณาความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง ซึ่ง R^2 มากกว่า 0.75 เป็นค่าที่ยอมรับได้ (Seyedeh et al, 2007) ส่วนค่า R^2_{adj} หากมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 แสดงว่าแต่ละเทอมในแบบจำลองที่ได้ล้วนส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมด จากการทดลองพบว่า R^2 และ R^2_{adj} เท่ากับ 0.76 และ 0.65 พบว่าเมื่อพิจารณาความน่าเชื่อถือของแบบสมการแบบจำลองได้จากภาพประกอบที่ 4-10



ภาพประกอบที่ 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง Linear interaction

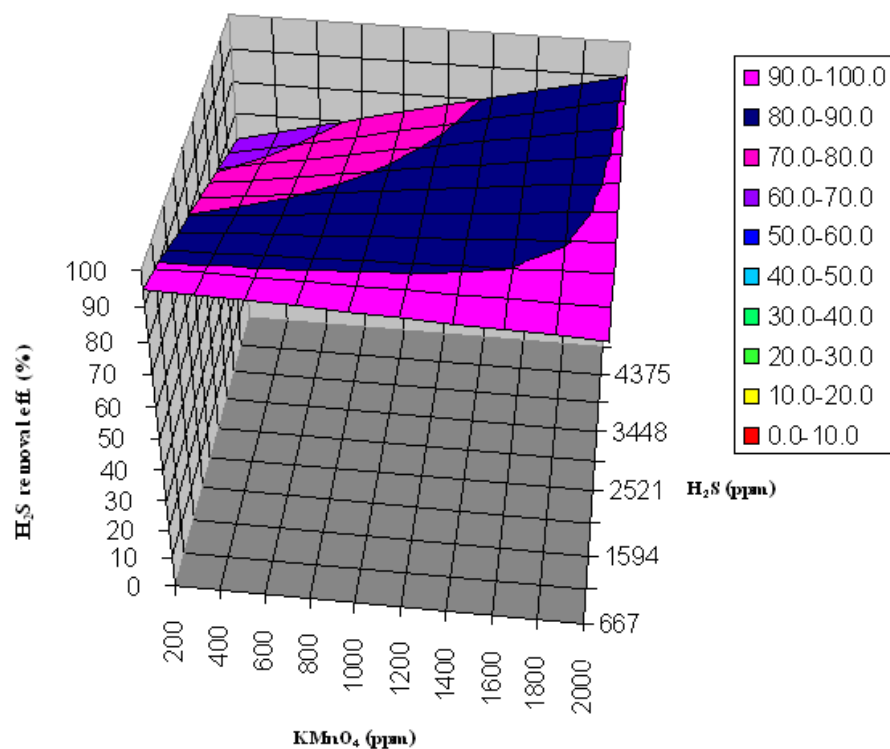
จากภาพประกอบที่ 4-10 สังเกตเห็นว่าข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจากสมการ (4-8) มีการกระจายตัวรอบเส้นตรงแสดงว่าแบบจำลอง Linear interaction สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ในคอลัมน์บรรจุได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลอง โดยเทอม interaction ระหว่างสองตัวแปร คือ x_1x_2 , x_1x_3 และ x_2x_3 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ กับประสิทธิภาพในการกำจัด H_2S ในรูปของกราฟพื้นผิว ได้ดังภาพประกอบที่ 4-11 ถึง 4-13

4.2.3 พื้นผิวตอบสนองต่อผลตัวแปรดำเนินการต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S

จากสมการแบบจำลองสำหรับการทำนายประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ที่ได้สามารถแสดงการพล็อตกราฟพื้นผิวสามมิติจากสมการ Regression ของความสัมพันธ์ตัวแปรต่าง ๆ เพื่อคาดคะเนสถานะที่เหมาะสมได้ (Mohamed and Nadji, 2008) ในการพล็อตค่าจะพิจารณาได้ครั้งละสองตัวแปร ในการศึกษาที่น่าสนใจ 3 ตัวแปร ดังนั้นจะให้ตัวแปรหนึ่งมีค่าคงที่ แล้วพิจารณาค่าตัวแปรอีกสองตัวที่เหมาะสมได้จากสมการที่ (4-8) กราฟพื้นผิวที่ได้แสดงดังได้ดังภาพประกอบที่ 4-11 ถึง 4-13

4.2.3.1 ผลของความเข้มข้นของ H_2S (x_1) และ $KMnO_4$ (x_2)

ผลของความเข้มข้นของ H_2S และความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S แสดงด้วยกราฟพื้นผิวดังภาพประกอบที่ 4-11



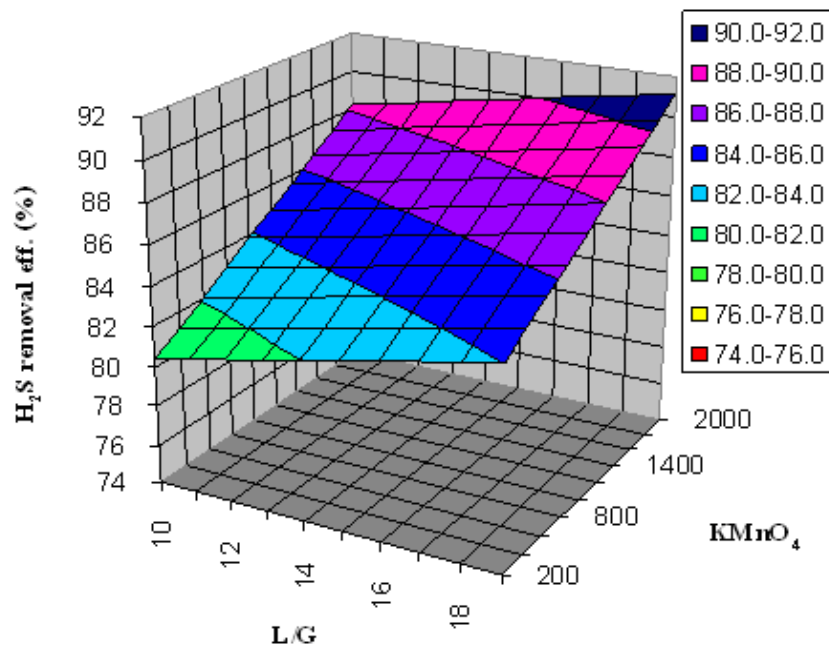
ภาพประกอบที่ 4-11 ผลของความเข้มข้นของ H_2S และ ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S

จากภาพประกอบที่ 4-11 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ H_2S และ ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S มีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับกฎอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แสดงในสมการที่ (4-2) และเมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ ซึ่งแทนด้วย x_1 และ x_2 พบว่าแม้ว่าสัมประสิทธิ์ของ x_1 จะมีค่าเป็นลบแต่เทอมของ interaction ระหว่าง x_1 กับตัวแปรอื่นคือ x_1x_2 และ x_1x_3 และเทอมของ x_2 มีเครื่องหมายเป็นบวกเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัด H_2S เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ ตามสมการที่ (4-2) แล้ว การเพิ่มความเข้มข้นของ H_2S ในกระแสแก๊สและการเพิ่มความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ในสารละลายที่อัตราการไหลของแก๊สและอัตราการไหลของของเหลวใด ๆ จะช่วยเพิ่มแรงขับเคลื่อนในการถ่ายโอนมวลของ

H₂S จากกระแสแก๊สไปยังกระแสของเหลวจึงเป็นเพิ่มโอกาสในการสัมผัส และเพิ่มโอกาสการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารทั้งสองด้วย

4.2.3.2 ผลของ L/G (x_3) และความเข้มข้นของ KMnO₄ (x_4)

ผลของ L/G และความเข้มข้นของ KMnO₄ ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H₂S แสดงด้วยกราฟพื้นผิวดังภาพประกอบที่ 4-12



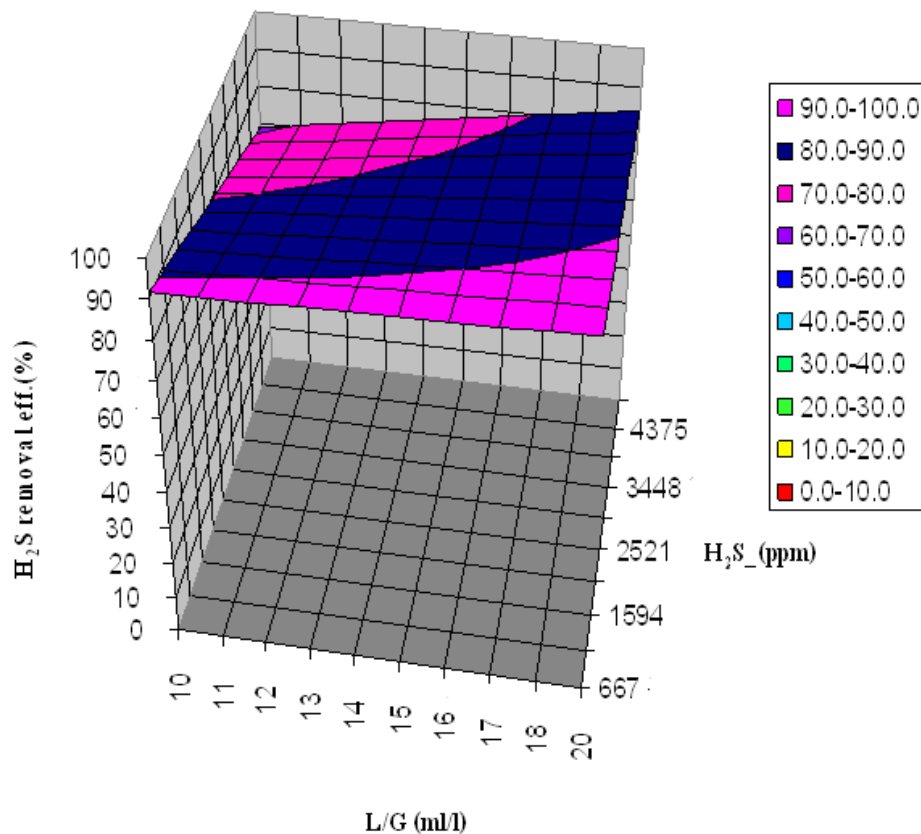
ภาพประกอบที่ 4-12 ผลของของ L/G และ ความเข้มข้นของ KMnO₄ ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H₂S

จากภาพประกอบที่ 4-12 พบว่าการเพิ่ม L/G และความเข้มข้นของ KMnO₄ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด H₂S มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน การเพิ่ม L/G เป็นการเพิ่มปริมาณของสารดูดซับในระบบส่งผลให้การดูดซับของ H₂S เข้าสู่สารละลายเกิดขึ้นได้ดีจึงสามารถดูดซับ H₂S เข้าสู่สารละลายได้มากขึ้น การเพิ่มความเข้มข้นของ KMnO₄ พร้อม ๆ กับการเพิ่ม L/G ratio จึงทำให้ปฏิกิริยาระหว่าง H₂S กับ KMnO₄ ดังอธิบายด้วยสมการที่ (4-2) สามารถเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด H₂S เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มของ L/G และ ความเข้มข้นของ KMnO₄ ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุดถึง 92% นอกจากนี้แล้วการที่ประสิทธิภาพการกำจัด H₂S เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของ L/G และความเข้มข้นของ KMnO₄ L/G แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของ L/G และความเข้มข้นของ

KMnO₄ เดี่ยว ๆ จะมีผลมากกว่า interaction ระหว่าง L/G กับความเข้มข้นของ KMnO₄ ดังจะเห็นได้จากสมการที่ (4-8) เพราะแม้ว่าสัมประสิทธิ์ของ x_2x_3 จะมีค่าเป็นลบแต่การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพในการกำจัด H₂S กับเพิ่มขึ้นของ L/G และความเข้มข้นของ KMnO₄ มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีแนวโน้มที่จะลดลงอันเนื่องจากการถ่วงด้วยเทอม interaction ระหว่าง L/G กับความเข้มข้นของ KMnO₄ แต่อย่างใด

4.2.3.3 ผลของ L/G (x_3) และความเข้มข้นของ H₂S (x_1)

ผลของ L/G และความเข้มข้นของ H₂S ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H₂S แสดงด้วยกราฟพื้นผิวดังภาพประกอบที่ 4-13



ภาพประกอบที่ 4-13 ผลของของ L/G และ ความเข้มข้นของ H₂S ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H₂S

จากภาพประกอบที่ 4-13 การเพิ่ม L/G ratio อย่างเดียวส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่ม L/G ratio ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลได้ดีขึ้นและการเพิ่ม L/G ratio ยังเป็นการเพิ่มปริมาณของสารดูดซึมในระบบทำให้เพิ่มความสามารถในการดูดซึมและความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ แต่การเพิ่ม L/G ratio และความเข้มข้นของ H_2S ขึ้นประมาณ 85% กลับพบว่าทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ลดลงประมาณ 10% ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-13 ทั้งนี้เพราะเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ H_2S ปริมาณของแก๊ส H_2S ที่เข้ามาในระบบเพิ่มขึ้นในและแม้ว่าปริมาณของ $KMnO_4$ จะเพิ่มขึ้นตาม L/G ratio ที่เพิ่มขึ้นแต่ไม่เพียงพอกับปริมาณของ H_2S ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของ H_2S โดยตรง ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ลดลงเล็กน้อยตลอดช่วงความเข้มข้นของ H_2S ที่ศึกษา แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ H_2S มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S มากกว่า L/G ratio และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ระหว่างผลการเพิ่ม L/G กับความเข้มข้นของ H_2S และผลการเพิ่ม L/G กับความเข้มข้นของ $KMnO_4$ พบว่ากรณีแรกจะให้ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S สูงกว่าเพราะอันดับปฏิกิริยาระหว่าง H_2S กับ $KMnO_4$ เมื่อเทียบกับ H_2S มีค่าสูงกว่า เมื่อเทียบกับ $KMnO_4$ ดังแสดงในสมการที่ (4-2) ผลการเปรียบเทียบนี้แสดงถึงความสอดคล้องของผลการศึกษากำจัด H_2S ในคอลัมน์บรรจุในกับผลการศึกษาทางจลพลศาสตร์ของปฏิกิริยาระหว่าง H_2S กับ $KMnO_4$ ในปฏิกรณ์แบบแบทช์ที่มีรายงานในหัวข้อ 4.1

จากภาพประกอบที่ 4-11, 4-12 และ 4-13 เมื่อพิจารณาผลของ L/G ratio ผลของความเข้มข้นของ H_2S และผลของ $KMnO_4$ ต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ H_2S มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการกำจัด H_2S อย่างชัดเจน และปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดในลำดับที่รองลงมาคือ ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ และ L/G ratio ตามลำดับ แสดงว่าประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ในคอลัมน์บรรจุในช่วงค่าของตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนการควบคุม การเพิ่มความเข้มข้นของ H_2S และความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นตามกลไกอัตราที่แสดงในสมการ (4-2) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัด H_2S เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามที่ความเข้มข้นของ H_2S และความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ต่ำ ๆ แม้ว่าค่า L/G ratio จะสูงแต่ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ไม่ได้สูงขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-11, 4-12 และ 4-13

4.2.4 การหาค่าสภาวะดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับการกำจัด H₂S ในคอลัมน์บรรจุ

การหาค่าสภาวะดำเนินการที่เหมาะสมของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัด H₂S สูงสุด ทำได้โดยควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดที่ตั้งไว้ และการกำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) แสดงดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ฟังก์ชันเป้าหมาย และขอบเขตในการหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัด H₂S

Objective function	$f(x) = 73.36 - 1.35 \times 10^{-2} x_1 + 1.96 \times 10^{-2} x_2 + 1.86 x_3 + 4.33 \times 10^{-6} x_1 x_2 + 3.13 \times 10^{-4} x_1 x_3 - 1.65 \times 10^{-3} x_2 x_3$
Subject to	Boundary limit
	$0 \leq f(x) \leq 0$
	$600 \leq x_1 \leq 5000$
	$200 \leq x_2 \leq 2000$
	$10 \leq x_3 \leq 20$

ผลการคำนวณหาสภาวะดำเนินการที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการกำจัด H₂S สูงสุดที่ได้จากแบบจำลอง Linear interaction แสดงดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 แสดงสภาวะดำเนินการที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการกำจัด H₂S ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้เทคนิค RSM

H ₂ S concentration (ppm)	KMnO ₄ concentration (mg/l)	L/G ratio (ml liq./l gas)	H ₂ S removal eff. (%)
≤ 1500	200	20	100
2000	200	20	95
2500	200	20	91
3000	200	20	89

จากตารางที่ 4-9 สภาวะดำเนินการที่เหมาะสมให้ประสิทธิภาพการกำจัด H₂S 100% ต้องควบคุมความเข้มข้นของแก๊ส H₂S อยู่ในช่วงไม่เกิน 1500 ppm และเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้น H₂S เป็น 3000 ppm ให้ประสิทธิภาพการกำจัดประมาณ 90% ซึ่งประสิทธิภาพยังน่าพอใจ

4.2.5 การทดสอบสถานะดำเนินการที่เหมาะสม

เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการที่ (4-8) สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ได้ จึงต้องทำการทดสอบแบบจำลองโดยการนำสถานะที่เหมาะสมจากตารางที่ 4-9 มาทดลองศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัด H_2S จริง ผลการทดลองที่ได้แสดงใน ตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H_2S ก่อนกำจัด 1264 ppm อัตราการไหลของ N_2 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H_2S 1 l/min ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ 200 mg/l ที่อัตราการไหล 20 ml/min และ L:G ratio 15ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H_2S in N_2 (ppm)		H_2S removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
10	1200.20	20.22	98.31
20	1332.23	25.15	98.11
30	1261.31	20.25	98.39
Average	1264.58		98.27

จากตารางที่ 4-10 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ที่ได้จากการทดลองโดยใช้สถานะที่ใกล้เคียงกับสถานะที่เหมาะสมที่แสดงในตาราง 4-9 ให้ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ประมาณ 98% โดยคลาดเคลื่อนจากการทำนายด้วยแบบจำลองประมาณ 2% ดังนั้นสมการแบบจำลองที่แสดงด้วยสมการ (4-8) มีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ทำนายประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ด้วยสารละลาย $KMnO_4$ ในคอลัมน์บรรจุ

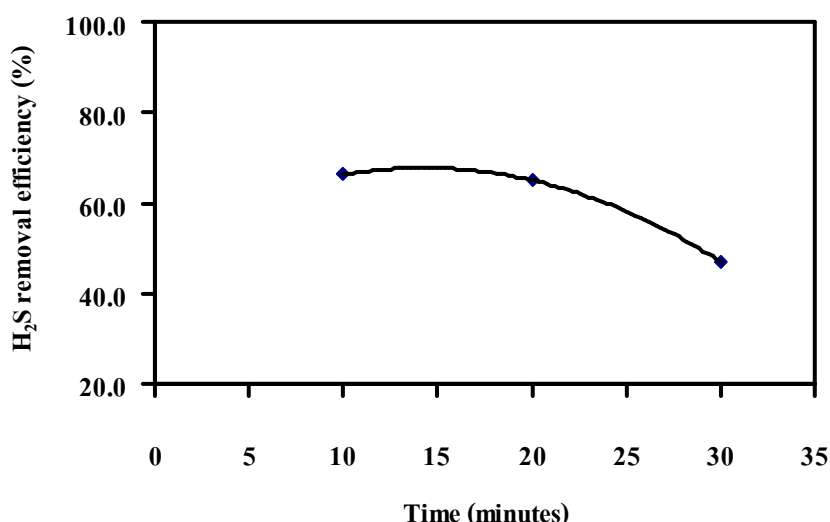
4.3 การกำจัดแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพจากฟาร์มสุกรโดยใช้คอลัมน์บรรจุร่วมกับ $KMnO_4$

จากการทดลองศึกษาประสิทธิภาพกำจัด H_2S ในกระแสแก๊สโดยใช้สารละลาย $KMnO_4$ ในปฏิกรณ์แบบคอลัมน์บรรจุจากหัวข้อที่ 4.2 เป็นการยืนยันว่าสารละลาย $KMnO_4$ สามารถกำจัด H_2S ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้ทดลองกำจัด H_2S ในแก๊สชีวภาพจริง โดยมีผลการศึกษาดังนี้

4.3.1 ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ด้วยน้ำ โดยใช้คอลัมน์บรรจุ

การศึกษากำจัด H_2S ด้วยน้ำ ทำการทดลองที่ความเข้มข้นของ H_2S ในแก๊สชีวภาพ และอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพเท่ากับ 1240 ppm และ 5 l/min ตามลำดับ โดยควบคุม L/G เท่ากับ 20 ml liq/l gas คงที่ตลอดการทดลอง ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพประกอบที่

4-14



ภาพประกอบที่ 4-14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัด H_2S จากแก๊สชีวภาพโดยใช้น้ำเป็นสารดูดซับ ความเข้มข้นของ H_2S ในแก๊สชีวภาพเท่ากับ 1240 ppm สัดส่วนอัตราการไหลของน้ำและของอากาศ 20 ml liq/l gas. และเวลา

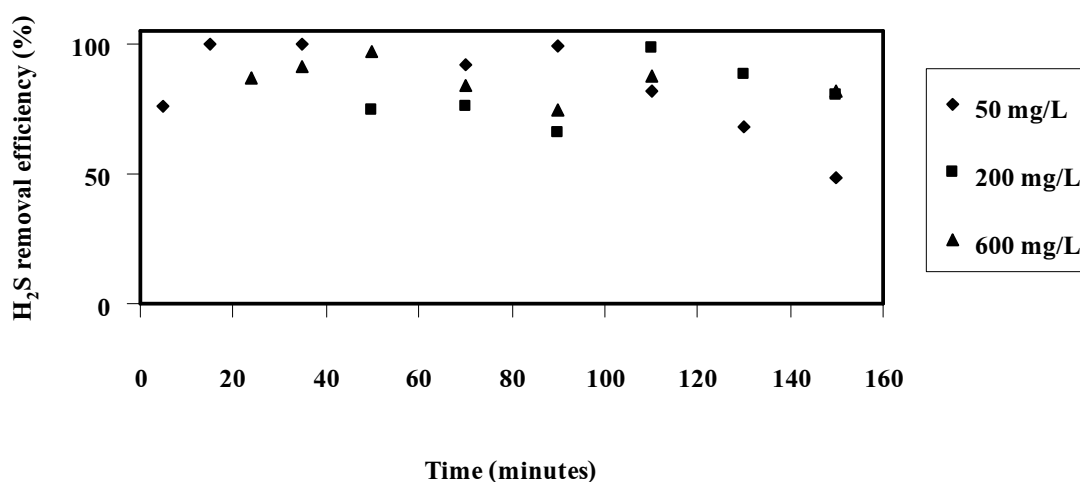
จากภาพประกอบที่ 4-14 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ในแก๊สชีวภาพมีแนวโน้มลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากน้ำในระบบค่อย ๆ ดูดซับและอิ่มตัวด้วย H_2S ทำให้ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของ H_2S ในแก๊สและในน้ำลดลงส่งผลให้แรงขับเคลื่อนลดลง ดังนั้นเพื่อให้การบำบัดแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพโดยใช้น้ำเป็นสารดูดซับมีประสิทธิภาพสูง

ตลอดเวลาจะต้องใช้น้ำใหม่ ไม่สามารถวนน้ำกลับมาใช้อีกรอบได้ ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำและเกิดเป็นน้ำเสียในปริมาณมากซึ่งผลที่ตามมาคือต้องมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการ

4.3.2 ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ด้วยสารละลาย $KMnO_4$ โดยใช้

คอลัมน์บรรจุ

ในการทดลองครั้งนี้จะควบคุมอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพที่ทางเข้าเท่ากับ 5 l/min และ L:G ratio 20 ml liq./l gas ให้คงที่ตลอดการทดลอง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ในช่วง 50 ถึง 600 mg/l ได้ผลการทดลองดังกราฟในภาพประกอบที่ 4-15 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัด H_2S และเวลา



ภาพประกอบที่ 4-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด H_2S เมื่อใช้สารละลาย $KMnO_4$ ในสัดส่วนความเข้มข้น (mg/l) ต่าง ๆ

จากภาพประกอบที่ 4-15 ซึ่งเป็นการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด H_2S กับเวลา พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ $KMnO_4$ เพิ่มขึ้นจาก 50 mg/l ถึง 600 mg/l จะให้ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ในช่วง 60 นาทีไม่แตกต่างกันมากตลอดช่วงความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ที่ศึกษา และพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด H_2S มีค่าคงที่ตลอดช่วงการทดลองแสดงว่าความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ในระบบยังมีเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับ H_2S

และเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมจากตารางที่ 4-9 ไปทดลองกำจัดแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพจากฟาร์มสุกร โดยพบว่าที่สภาวะของการทดลองที่มีความใกล้เคียงกับสภาวะที่เหมาะสมคือ ที่ความเข้มข้นของ H_2S เท่ากับ 2102 ppm อัตราการไหล 5 l/min ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ 200

mg/l และ L/G ratio 20 ml/l ให้ประสิทธิภาพการบำบัด H_2S เฉลี่ยที่ได้ประมาณ 81% ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ทำนายจากแบบจำลองประมาณ 20% โดยปัจจัยที่เป็นสาเหตุที่ทำให้ผลการทดลองไม่สอดคล้องกับแบบจำลองน่าจะมาจากปัจจัยหลัก ๆ 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยความต้านทานในการถ่ายโอนมวลที่แตกต่างกัน และ การเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงเพราะแก๊สชีวภาพจริงมีองค์ประกอบที่แตกต่างไปจากแก๊สผสมที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง

4.3.3 ผลการวิเคราะห์แก๊สมีเทน (CH_4) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในแก๊สชีวภาพก่อนและหลังการกำจัด H_2S

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพก่อนและหลังการบำบัดด้วยสารละลาย $KMnO_4$ แสดงดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จุดเก็บตัวอย่างแก๊สชีวภาพ	% CH_4	% CO_2
ทางเข้าคอลัมน์บรรจุ	75.92	24.08
ทางออกคอลัมน์บรรจุ	76.79	23.21

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4-11 พบว่าปริมาณ CH_4 และ CO_2 ก่อนและหลังการบำบัดมีค่าใกล้เคียงมาก จึงเป็นการยืนยันได้ว่า $KMnO_4$ ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับ CH_4 และ CO_2 ดังนั้นการใช้สารละลาย $KMnO_4$ ในการบำบัด H_2S ไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณแก๊ส CH_4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของแก๊สชีวภาพแต่อย่างใด

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชัน H₂S ด้วย KMnO₄ ในปฏิกรณ์แบบแบทช์

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชัน H₂S ด้วย KMnO₄ สามารถสรุปผลการทดลอง ได้ดังนี้

1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารทำปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H₂S ด้วย KMnO₄ สามารถแสดงในรูปของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาได้ดังสมการ

$$-r_{H_2S} = 1.13 \times 10^{-3} C_{H_2S,0}^{1.1} C_{KMnO_4,0}^{0.92}$$

โดยที่ค่าคงที่ปฏิกิริยา อันดับของปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับ H₂S และอันดับปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับ KMnO₄ เป็น $1.13 \times 10^{-3} \text{ M}^{-1.02} \text{ min}^{-1}$, 1.1 และ 0.92 ตามลำดับ

2 ผลของอุณหภูมิจะได้ ค่าพลังงานกระตุ้น (Ea) และแฟกเตอร์ความถี่ของการชน (A) เท่ากับ $43,327 \text{ J mol}^{-1}$ และ 3.68×10^6 ตามลำดับ

3 ผลของ pH จะได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นฟังก์ชันกับ pH ดังแสดงดังสมการ

$$-r_{H_2S} = \left(3.68 \times 10^6 \exp \left(\frac{-43,237}{RT} \right) \right) \times \left[(6.40 \times 10^{-4} (\exp (pH)^{0.83}) + 0.62) \right] C_{H_2S}^{1.1} C_{KMnO_4}^{0.92}$$

และผลการศึกษายังสามารถสรุปได้ว่าสมการข้างต้น ซึ่งได้รวมทั้งผลความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยา ผลของอุณหภูมิ และ ผลของ pH สามารถใช้ทำนายอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน H₂S ด้วย KMnO₄ ได้ดี

5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด H₂S ด้วย KMnO₄ ในคอลัมน์บรรจุ

จากการศึกษาการกำจัด H₂S ด้วย KMnO₄ ในคอลัมน์บรรจุ โดยการใช้การเทคนิค RSM ในการออกแบบการทดลองแบบ CCD ได้ทั้งหมด 18 การทดลอง จากการวิเคราะห์ผลการทดลองและหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด H₂S ด้วยเทคนิคนี้ได้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการกำจัด H₂S ที่สภาวะต่าง ๆ ได้ดังสมการ

$$y = 73.36 - 1.35 \times 10^{-2} x_1 + 1.96 \times 10^{-2} x_2 + 1.86 x_3 + 4.33 \times 10^{-6} x_1 x_2 + 3.13 \times 10^{-4} x_1 x_3 - 1.65 \times 10^{-3} x_2 x_3$$

โดยที่ y = ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S (ร้อยละ)

x_1 = ความเข้มข้นของ H_2S (ppm)

x_2 = ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ (mg/l)

x_3 = สัดส่วนอัตราการไหลของสารดูดซึมและของแก๊ส (ml / L)

และได้สถานะที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ด้วย $KMnO_4$ ในสูงสุด

ดังตาราง 5-1

ตารางที่ 5-1 สถานะที่เหมาะสมในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ด้วย $KMnO_4$ ในคอลัมน์บรรจุ

H_2S concentration (ppm)	$KMnO_4$ concentration (mg/l)	L/□ratio (ml liq./l gas)	H_2S removal efficiency (%)
≤ 1500	200	20	100

และจากการทดสอบสถานะที่เหมาะสมพบว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5% สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองแบบ Linear interaction สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ได้ดี

สำหรับการบำบัดแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพนั้นให้ประสิทธิภาพในระดับที่น่าพอใจ และเมื่อนำสถานะที่เหมาะสมไปทดสอบกับแก๊สชีวภาพจะเกิดความคลาดเคลื่อนประมาณ 20% และยังสามารถสรุปได้ว่าการใช้สารละลาย $KMnO_4$ ในการกำจัด H_2S จากแก๊สชีวภาพนั้นไม่มีผลต่อปริมาณของ CH_4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของแก๊สชีวภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

1 ศึกษาผลของตะกอน MnO_2 ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและต่อประสิทธิภาพการกำจัด H_2S ด้วยสารละลาย $KMnO_4$

2 ศึกษาการ regenerate ตะกอน MnO_2 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นของปฏิกิริยาระหว่าง H_2S กับ $KMnO_4$ กลับมาใช้ใหม่

3 ศึกษาการใช้ $KMnO_4$ ในรูปของของแข็งแทนการใช้ในรูปของสารละลายสำหรับการกำจัด H_2S

บรรณานุกรม

- จรรยา อินทมณี. 2546. การวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียเบื้องต้น. สงขลา:มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- จันทิมา ชั่งสิริพร. อัครพล เพชรมาลา และ อัสมา หะยีมะ. 2548. การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ใน
แก๊สชีวภาพโดยใช้ wet scrubber ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ชาคริต ทองอุไร. 2544. หลักปฏิบัติการเฉพาะหน่วย 2. สงขลา:มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธรรมวิทย์ ศรีกรีกกริช. 2540. การควบคุมไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยการเติมไนเตรดในถังกรองไร้อากาศสำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชน วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าธนบุรี. 145 หน้า
- ประเสริฐ บุญเจริญ. 2536. การกำจัดซัลเฟอร์ออกจากถ่านหินโดยวิธีไบโอดิกซ์ซิง วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 120 หน้า
- ไพศาล วีรกิจ. 2549. การผลิตน้ำสำหรับอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : เอ็มแอนด์อี
- วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. 2544. จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ.
- ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์ . 2546. เคมีวิเคราะห์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- ศุภเวท มานิชม. 2542. การศึกษาและออกแบบเครื่องปฏิกรณ์การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ โดยเชื้อ *Thiobacillus ferrooxidans* วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าธนบุรี. 169 หน้า
- สุดธิดา โรจนเมธินทร์. 2545. ปฏิกรณ์หมุนเวียนอัตโนมัติสำหรับกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 103 หน้า
- ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ กรมควบคุมมลพิษ. 2001. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS). สืบค้นจาก. <http://msds.pcd.go.th>
- APHA, AWWA. and WPCF. 1971. Standard methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA, Inc. New York. 232-233.

- Bunyakan, C., Akuru, □ and Chungsiriporn, J. 2005. Kinetics of the oxidation of methyl ethyl ketone by potassium permanganate. □he 14th National Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference. 1-3 December 2004, Bangkok.
- Committee On Medical and Biologic Effects of Environmental Pollutants (Subcommittees On Hydrogen Sulfide). 1979. "Hydrogen Sulfide," Report by Division of Medical Sciences. National Research Council, Washington, D.C.
- Damm, H.J., Hardacre, C., Kalin, M.R and Walsh, P.K. 2002. Kinetics of the oxidation of methyl tert-butyl ether by potassium permanganate. *Water Research*. 36: 3638-3646.
- Fogler, H.S. 1999. *Elements of chemical reaction engineering* (3rd ed.). New Jersey: Prentice Hall, Inc.
- Gao, L., Keener, □C., Zhuang, L. and Siddiqui, K.F. 2001. A □echnical and Economic Comparison of Biofiltration and Wet Chemical Oxidation (Scrubbing) for Odor Control at Wastewater □reatment Plants. *Environ Eng Policy*. 2: 203-212.
- Haraden, J., 1991. Production Rated for Geothermal Resources. *Energy*. 16:1185-1190.
- R. Weast, and M. Astle, *Handbook of Chemistry and Physics*, 63rd ed., CRC press, 1983, Chap. D.
- Huang, K.C., Hoag, G.E., Chheda, P., Woody, B.A. and Dobbs, G.M. 2002. Kinetics and mechanism of oxidation of tetrachloroethylene with potassium permanganate. *Chemosphere*. 46: 815-825.
- Huang, K.C., Hoag, G.E., Chheda, P., Woody, B.A. and Dobbs, G.M. 2001. Oxidation of chlorinatedethenes by potassium permanganate: a kinetics study. *J. Hazardous Materials*. B87: 155-169.
- Hood, E.D., □homson, N.R., Grossi, D and Farquhar, G.J. 2000. Experimental determination of the kinetics rate law for the oxidation of perchloroethylene by potassium permanganate. *Chemosphere*. 40: 1383-1388.
- I.W.A. □an, A.L. Ahmad and B.H. Hameed. 2007. Optimization of preparation conditions for activated carbons from coconut husk using response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*. 137: 462-470.

- Joseph, G. and Beachler, D.S. 1981. Control of Gaseous Emission : Student Manual New York, Northrop Service, p. 1080.
- Joseph, G. and David S. 1998. "Scrubber Systems Operation Review" A IPI Course SI:412C.
- Katz, D, L. 1959. Handbook of Natural Gas Engineering, New York, McGraw-Hill, p. 802.
- Khan, A.S., Kumar, P., Saleem, K. and Khan, Z. 2007. A kinetic study of water-soluble colloidal MnO₂ formed by the reduction of permanganate by thiourea. Article in Press.
- Kobayashi, Y., Ichimaru, S., Hashimoto, M. 1987. Air-purifying agent. JP62-091225 . PA EN ABS RAC S OF JAPAN
- Li, Z. 2004. Surfactant – enhanced oxidation of trichloroethylene by permanganate proof of concept. Chemosphere. 54: 419-423.
- McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P. 1993. Unit Operation of Chemical Engineering, 5th ed. McGraw-Hill International Edition. 686-730.
- Mohamed, M., Nadji, M.M. 2008 Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method. J. Hazardous Materials. 158: 107-115.
- Moosavi, R.G., Naddafi, K., Mesdaghinia, A., Vaezi, F. and Mahmoudi, M. 2005. H₂S Removal in an oxidation packed bed scrubber using different chemical oxidation. J. Applied Sciences. 5(4): 651-654.
- National Institute for Occupation Safety and Health. 1990. Hydrogen Sulfide. NIOSH Pocket Guide to chemical Hazard. 14.
- Pagella, C and Faveri De M. D. 2000. H₂S gas treatment by iron bioprocess. *Chemical Engineering Science*. 55: 2185-2194.
- Perry, J.H. 1973. "Chemical Engineers Handbook", 5th ed McGraw Hill book Company. 21-29
- Piscarczyk, K. 1982. "Odor Control with Potassium Permanganate," Presented at Ohio Water Pollutant Control Conference, Dayton, OH, June 1982, pp. 16-18.
- Seyedeh, F.G.O., Fatemeh, M., Bagher, Y., and Fereshteh, E. 2007. Biochemical Engineering Journal. 39: 37-42.
- Okashi, Y., Masaki, I., Komio, M., Yasuyuki, Y., Koki, O. 2007 Liquid absorbent, and device and method for removing CO₂ or H₂S, or both JP 2007-000702 PA EN ABS RAC S OF JAPAN

- Histhethwayte, D.K.B. 1972. *The Control of Sulfides in Sewerage Systems*, Washington, D.C., Ann Arbor, Science, MI.
- Tomio, M., Shigeru, S., Masaki, I., Shigeaki. 1995. method for removing hydrogen sulfide and carbon dioxide in gas JP 07-258665 PA EN ABS RAC S OF JAPAN
- Welty, J. R., Wicks, C.E. and Wilson, R.E. 1984. *Fundamentals of Momentum Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, New York, p. 803.
- Wubs, H. J., Beenackers and Antonic A.C.M. 1994. Kinetics of H₂S absorption into aqueous ferric solution of ED A and HED A. *AIChE Journal*. 40: 433-444
- Yan, Y.E. and Schwartz, F.W. 2000. Kinetics and mechanisms for CE oxidation by permanganate. *Environ.Sci.Techno l4*: 2535-2541.
- Yoshiro, W., Minoru, H., Yoshinori, M. 1982. Simultaneous removal of malodorant components JP 57-171421. PA EN ABS RAC S OF JAPAN
- Yukihiko, I., Masazumi, I, Noriko, W., Hideji, F., Mitsuru, S., and aro, I. 2006. Absorption liquid, and CO₂ or H₂S removal apparatus and method employing it JP 2006-150298. PA EN ABS RAC S OF JAPAN

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลเบื้องต้นของสารเคมี

ก-1 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) (MSDS, 2000)

สูตรโมเลกุล	: H ₂ S
น้ำหนักโมเลกุล	: 34.08 g/mol
ชื่อเรียกอื่น	: Hydrogen sulfide, sulfane
เฟสของแข็ง	: จุดหลอมเหลว -86 องศาเซลเซียส : ความร้อนแฝงของการแตกตัว (Latent heat of fusion) 69.75 kJ/kg
เฟสของเหลว	: ความหนาแน่น 914.9 kg/m ³ : Liquid/gas equivalent (1.013 bar, at triple point) 638 vol/vol : จุดเดือด (1.013) -60.2 : Latent heat of vaporization 547.58 kJ/mol : ความดันไอ (Vapor pressure at 21 °C or 70 °F) 18.2 bar จุดวิกฤต (Critical point) : อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) 100 °C : ความดันวิกฤต (Critical pressure) 89.37 bar
เฟสแก๊ส	: ความหนาแน่น (gas density 1.013 bar at boiling point) 1.93 kg/m ³

ก-2 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium Permanganate) (MSDS, 2001)

สูตรโมเลกุล	: KMnO ₄
น้ำหนักโมเลกุล	: 158.03
ชื่อเรียกอื่น	: Permanganic acid potassium salt, chameleon mineral
จุดหลอมเหลว	: 240 องศาเซลเซียส
คุณสมบัติ	: ผลึกสีม่วงเข้ม ไม่มีกลิ่น คงตัวในอากาศ

ตารางที่ ก-1 ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของแมงกานีส (Mn) ที่ 25 °C (สุภชัย ใจเทียมวงศ์, 2546)

ครึ่งปฏิกิริยา	E° (โวลต์)
$Mn^{2+} + 2e \Leftrightarrow Mn(s)$	-1.11
$MnO_2(s) + 4H^+ + 2e \Leftrightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$	+1.23
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \Leftrightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$	+1.51
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e \Leftrightarrow MnO_2(s) + 2H_2O$	+1.70
$MnO_4^- + e \Leftrightarrow MnO_4^{2-}$	+0.56

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ข-1 ผลการทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง H_2S และ $KMnO_4$ ในปฏิกรณ์แบบเบทซ์

ข-1.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของ H_2S ต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย $KMnO_4$

ตารางที่ ข-1.1 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ ที่อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7.06

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of $KMnO_4$ (mM)
0	2.94	1.90
2	1.88	0.07
5	1.45	0.07
10	1.45	0.07
20	1.45	0.06
30	1.45	0.06
60	1.45	0.06

ตารางที่ ข-1.2 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ ที่อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7.11

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of $KMnO_4$ (mM)
0	4.41	1.90
2	1.65	0.48
5	1.51	0.27
10	0.94	0.00
20	0.94	0.00
30	0.94	0.00
60	0.98	0.00

ตารางที่ ข-1.3 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ที่อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 6.89

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	5.88	1.90
2	1.49	0.14
5	1.46	0.11
10	1.65	0.11
20	1.51	0.00
30	0.98	0.00
60	0.98	0.00

ตารางที่ ข-1.4 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ที่อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7.04

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	10.29	1.90
2	8.08	0.03
5	7.28	0.03
10	3.39	0.00
20	2.86	0.00
30	2.77	0.00
60	2.77	0.00

ข-1.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของ KMnO_4 ต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย KMnO_4

ตารางที่ ข-1.5 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ที่อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7.10

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	2.94	1.27
2	1.66	0.20
5	1.66	0.20
10	1.30	0.03
20	1.30	0.03
30	0.93	0.03
60	0.91	0.04

ตารางที่ ข-1.6 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ที่อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7.15

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	2.94	2.53
2	0.84	0.74
5	0.38	0.72
10	0.00	0.67
20	0.00	0.52
30	0.00	0.52
60	0.00	0.62

ตารางที่ ข-1.7 มวลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ที่อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7.15

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	2.94	3.80
2	0.24	0.87
5	0.24	0.87
10	0.00	0.74
20	0.00	0.74
30	0.00	0.74
60	2.94	3.80

ตารางที่ ข-1.8 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ที่อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7.04

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	2.94	5.06
2	0.00	1.21
5	0.00	1.10
10	0.00	1.09
20	0.00	1.09
30	0.00	1.09
60	0.00	1.09

ข-1.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย KMnO_4

ตารางที่ ข-1.9 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ที่อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7.04

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	2.94	1.90
2	1.88	0.07
5	1.45	0.07
10	1.45	0.07
20	1.45	0.07
30	1.45	0.06
60	1.45	0.06

ตารางที่ ข-1.10 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ที่อุณหภูมิ 308.15 K และ pH 7.04

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	2.94	1.90
2	2.45	0.66
5	1.47	0.30
10	1.39	0.30
20	1.31	0.08
30	1.31	0.00
60	1.24	0.00

ตารางที่ ข-1.11 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ที่อุณหภูมิ 313.15 K และ pH 7.04

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	2.94	1.90
2	0.35	0.29
5	0.35	0.26
10	0.35	0.14
20	0.35	0.00
30	0.15	0.00
60	0.15	0.00

ตารางที่ ข-1.12 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ที่อุณหภูมิ 323.15 K และ pH 7.04

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	2.94	1.90
2	0.15	0.47
5	0.15	0.30
10	0.00	0.08
20	0.00	0.00
30	0.00	0.00
60	0.00	0.00

ข-1.4 ศึกษาผลของ pH ต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย KMnO_4

ตารางที่ ข-1.13 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ที่อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 5

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	2.94	1.90
2	2.06	0.64
5	1.60	0.64
10	0.41	0.42
20	0.35	0.13
30	0.35	0.13
60	0.35	0.13

ตารางที่ ข-1.14 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ที่อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	2.94	1.90
2	1.88	0.07
5	1.45	0.07
10	1.45	0.07
20	1.45	0.07
30	1.45	0.06
60	1.45	0.06

ตารางที่ ข-1.15 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ที่อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 9

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	2.94	1.90
2	1.60	0.05
5	0.94	0.00
10	0.94	0.00
20	0.94	0.00
30	0.94	0.00
60	0.94	0.00

ตารางที่ ข-1.16 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ที่อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 11

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	2.94	1.90
2	0.86	0.38
5	0.86	0.34
10	0.86	0.15
20	0.86	0.11
30	0.35	0.11
60	0.26	0.11

ข-1.5 การศึกษาเพื่อทดสอบแบบจำลองสำหรับใช้ทำนายสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย $KMnO_4$

ตารางที่ ข-1.17 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S เท่ากับ 5.42 mM ความเข้มข้นเริ่มต้น $KMnO_4$ เท่ากับ 2.21 mM อุณหภูมิ 315.15 K และ pH 5.5

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of $KMnO_4$ (mM)
0	5.42	2.21
2	0.75	0.92
5	0.71	0.75
10	0.524	0
20	0.524	0
30	0.524	0
60	0.524	0

ตารางที่ ข-1.18 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ $KMnO_4$ กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S เท่ากับ 7.35 mM ความเข้มข้นเริ่มต้น $KMnO_4$ เท่ากับ 1.35 mM อุณหภูมิ 308.15 K และ pH 6

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of $KMnO_4$ (mM)
0	7.35	1.35
2	5.06	0.31
5	3.85	0.29
10	3.85	0
20	3.85	0
30	3.85	0
60	3.85	0

ตารางที่ ข-1.19 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S เท่ากับ 6.47 mM ความเข้มข้นเริ่มต้น KMnO_4 เท่ากับ 1.14 mM อุณหภูมิ 318.15 K และ pH 8

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	6.47	1.14
2	0.91	0.48
5	0.82	0
10	0.82	0
20	0.72	0
30	0.71	0
60	0.72	0

ตารางที่ ข-1.20 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S เท่ากับ 2.94 mM ความเข้มข้นเริ่มต้น KMnO_4 เท่ากับ 1.14 mM อุณหภูมิ 303.15 K และ pH 7

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	2.94	1.89
2	1.62	0.71
5	1.05	0.09
10	1.05	0.09
20	1.05	0.09
30	1.05	0.09
60	1.05	0.09

ตารางที่ ข-1.20 ข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S และ KMnO_4 กับเวลาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2S ด้วย KMnO_4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S เท่ากับ 4.68 mM ความเข้มข้นเริ่มต้น KMnO_4 เท่ากับ 1.89 mM อุณหภูมิ 313.15 K และ pH 11

Time (minutes)	Concentration of H_2S (mM)	Concentration of KMnO_4 (mM)
0	4.68	1.90
2	2.21	1.02
5	1.07	0.01
10	1.07	0.01
20	1.07	0.01
30	1.07	0.01
60	1.07	0.01

ข-2 ผลการทดลองศึกษาการกำจัด H_2S ด้วยคอลัมน์บรรจุร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันในระดับห้องปฏิบัติการ ด้วยการออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM ซึ่งมีทั้งหมด 20 การทดลอง

ตารางที่ ข-2.1 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H_2S ก่อนกำจัด 2828 ppm อัตราการไหลของ N_2 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H_2S 3 l/min ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ 200 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H_2S in N_2 (ppm)		H_2S removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
10	2853.15	403.69	85.85
20	2911.11	521.36	82.09
30	2720.21	464.30	82.93
Average	2828.08		83.62

ตารางที่ ข-2.2 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H_2S ก่อนกำจัด 1644 ppm อัตราการไหลของ N_2 4 l/min อัตราการไหลแก๊ส H_2S 2.5 l/min ความเข้มข้นของ $KMnO_4$ 600 mg/l ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 10 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H_2S in N_2 (ppm)		H_2S removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
10	1885.31	390.07	79.31
20	1442.23	370.79	74.29
30	1604.46	497.70	68.98
Average	1644.04		74.6

ตารางที่ ข-2.3 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 2856 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 2.5 l/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 1100 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	Outlet	
10	2722.04	335.36	87.68
20	3112.68	466.50	85
30	2733.28	393.31	85.61
Average	2856.11		86.09

ตารางที่ ข-2.4 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 4111 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 600 mg/l ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 10 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	Outlet	
10	2722.04	335.36	87.68
20	3112.68	466.50	85
30	2733.28	393.31	85.61
Average	2856.11		86.09

ตารางที่ ข-2.5 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 1636 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 1 l/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 600 mg/l ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 20 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	Inlet	outlet	
10	1728.52	112.70	93.48
20	1668.21	153.47	90.80
30	1511.51	147.52	90.24
Average	1636.08		90.51

ตารางที่ ข-2.6 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 2870 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 1100 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	Inlet	outlet	
10	2921.12	442.84	84.84
20	2738.61	485.83	82.26
30	2950.60	536.71	81.81
Average	2870.11		82.97

ตารางที่ ข-2.7 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 1543 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 2 l/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 1600 mg/l ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 20 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
10	1964.01	362.16	81.56
20	1262.85	261.45	79.35
30	1402.62	249.24	82.23
Average	1543.07		81.04

ตารางที่ ข-2.8 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 3680 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 1600 mg/l ที่อัตราการไหล 20 ml/min และ L/G ratio 20 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
10	4036.21	434.14	89.12
20	3467.27	436.52	87.41
30	3538.11	477.64	86.5
Average	3680.51		87.67

ตารางที่ ข-2.9 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 2811 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 1100 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	Outlet	
10	2912.58	365.24	87.46
20	2822.04	411.74	85.41
30	2698.47	454.15	83.17
Average	2811.03		85.34

ตารางที่ ข-2.10 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 2586 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 2000 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	Outlet	
10	2692.52	192.51	92.85
20	2811.05	187.22	93.34
30	2256.09	84.11	96.27
Average	2586.22		94

ตารางที่ ข-2.11 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 4236 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 1600 mg/l ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 10 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
10	4551.17	776.88	82.93
20	3995.21	779.07	80.5
30	4161.95	939.79	77.42
Average	4236.11		80.28

ตารางที่ ข-2.12 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 1740 ppm อัตราการไหลของ N₂ 4 l/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 2.5 l/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 1600 mg/l ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 10 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
10	1891.03	221.25	88.3
20	1707.87	204.26	88.04
30	1621.46	207.55	87.2
Average	1740.12		87.84

ตารางที่ ข-2.13 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 2796 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 3 l/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 1100 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15 ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
10	2903.53	436.11	84.98
20	2701.02	501.04	81.45
30	2783.93	516.42	81.45
Average	2796.16		82.62

ตารางที่ ข-2.14 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 667 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 l/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 1 l/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 1100 mg/l ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15ml/l ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
10	898.69	0	100
20	512.22	0	100
30	590.42	0	100
Average	667.11		100

ตารางที่ ข-2.15 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 2652 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 L/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 3 L/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 1100 mg/L ที่อัตราการไหล 20 ml/min และ L/G ratio 10 ml/L ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	Inlet	Outlet	
10	2712.12	333.59	87.7
20	2669.91	517.96	80.6
30	2574.78	628.44	75.6
Average	2652.27		81.3

ตารางที่ ข-2.16 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 4071 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 L/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 3 L/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 600 mg/L ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 20 ml/L ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	Outlet	
10	3919.98	809.08	79.36
20	4144.05	851.24	79.45
30	4149.63	853.99	79.42
Average	4071.22		79.41

ตารางที่ ข-2.17 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 2712 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 L/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 3 L/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 1100 mg/L ที่อัตราการไหล 40 ml/min และ L/G ratio 20 ml/L ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
10	2848.49	117.93	95.86
20	2701.31	126.15	95.33
30	2586.23	117.72	95.68
Average	2712.01		95.62

ตารางที่ ข-2.18 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 4839 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 L/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 2.5 L/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 1100 mg/L ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15ml/L ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
10	4898.69	985.32	75.91
20	4777.17	976.16	76.13
30	4814.59	1022.56	75
Average	4839.15		75.68

ตารางที่ ข-2.19 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 2816 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 L/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 3 L/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 1600 mg/L ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15ml/L ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	outlet	
10	2828.21	210.14	92.57
20	2797.56	258.49	90.76
30	2823.91	306.39	89.15
Average	2816.56		90.82

ตารางที่ ข-2.20 แสดงผลการทดลองเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ H₂S ก่อนกำจัด 1644 ppm อัตราการไหลของ N₂ 2 L/min อัตราการไหลแก๊ส H₂S 1 L/min ความเข้มข้นของ KMnO₄ 1100 mg/L ที่อัตราการไหล 30 ml/min และ L/G ratio 15ml/L ที่อุณหภูมิห้อง

Time (minutes)	Concentration of H ₂ S in N ₂ (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	inlet	Outlet	
10	1701.78	143.63	91.56
20	1622.21	185.74	88.55
30	1609.27	186.35	88.42
Average	1644.42		89.51

ข-3 ผลการทดลองกำจัดแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพจากฟาร์มสุกรโดยใช้สารละลาย $KMnO_4$ ในคอลัมน์บรรจุ

ในส่วนนี้ได้แสดงผลการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่แรกเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด H_2S ในแก๊สชีวภาพด้วยสารละลาย $KMnO_4$ และส่วนที่สุดท้ายเป็นผลการวิเคราะห์ปริมาณ CH_4 และ CO_2 ในกระแสแก๊สชีวภาพด้วยเครื่อง GC

ข-3.1 ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแก๊ส H_2S ในแก๊สชีวภาพด้วยสารละลาย $KMnO_4$

การทดลองที่ 1

วันที่ทำการทดลอง: 29 เมษายน 2552

ความเข้มข้นทางเข้าเฉลี่ยของ H_2S ในแก๊สชีวภาพ	=	1240	ppm
อัตราการไหลเฉลี่ยของแก๊สชีวภาพ	=	5	l/min
ปริมาตรของน้ำที่ใช้	=	30	l
อัตราการไหลของน้ำ	=	50	l/hr.

ผลการทดลองกำจัด H_2S จากแก๊สชีวภาพ โดยใช้สภาวะการดำเนินการดังรายละเอียดข้างต้นแสดงดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ ข-3.1 แสดงผลการกำจัด H_2S ของการทดลองที่ 1

Time (min)	H_2S concentration (ppm)		H_2S removal efficiency (%)
	Inlet	Outlet	
10	1326.4	451.8	66.2
20	1348.8	468.1	65.0
30	1337.6	708.6	47.0

จากผลการทดลองในตารางที่ ข-3.1 พบว่า % H_2S Removal มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากน้ำในระบบค่อยๆ คูดซิมและอิมตัวด้วยไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สและในน้ำลดลงส่งผลให้แรงขับเคลื่อนลดลง ดังนั้นเพื่อให้การบำบัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สโดยใช้น้ำเป็นสารคูดซิมมีประสิทธิภาพสูงตลอดเวลาจะต้องใช้น้ำใหม่ ไม่สามารถวนน้ำกลับมาใช้อีกรอบ

ได้ ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำและเกิดเป็นน้ำเสียในปริมาณมากซึ่งผลที่ตามมาคือต้องมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการ

การทดลองที่ 2

วันที่ทำการทดลอง: 29 เมษายน 2552

ความเข้มข้นทางเข้าเฉลี่ยของ H ₂ S ในแก๊สชีวภาพ	=	1240	ppm
อัตราการไหลเฉลี่ยของแก๊สชีวภาพ	=	5	l/min
ปริมาตรของ KMnO ₄ ที่ใช้	=	30	l
ความเข้มข้นเริ่มต้นของ KMnO ₄	=	50	mg/l
อัตราการไหลของ KMnO ₄	=	50	l/hr.

ผลการทดลองกำจัด H₂S จากแก๊สชีวภาพ โดยใช้สภาวะการดำเนินการดังรายละเอียดข้างต้นแสดง ตารางที่ ข-3.2

ตารางที่ ข-3.2 แสดงผลการกำจัด H₂S ของการทดลองที่ 2

Time (min)	H ₂ S concentration (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	Inlet	Outlet	
5	1090.7	260.4	76.1
15	1090.7	-47.9	104.4
35	1090.7	-32.4	103.0
70	1327.0	104.1	92.2
90	1474.5	16.4	98.9
110	1620.7	291.8	82.0
130	1526.2	482.6	68.4
150	1403.8	718.8	48.8

การทดลองที่ 3

วันที่ทำการทดลอง: 29 เมษายน 2552

ความเข้มข้นทางเข้าเฉลี่ยของ H ₂ S ในแก๊สชีวภาพ	=	2102	ppm
อัตราการไหลเฉลี่ยของแก๊สชีวภาพ	=	5	l/min
ปริมาตรของ KMnO ₄ ที่ใช้	=	30	l
ความเข้มข้นเริ่มต้นของ KMnO ₄	=	200	mg/l
อัตราการไหลของ KMnO ₄	=	50	l/hr.

ผลการทดลองกำจัด H₂S จากแก๊สชีวภาพ โดยใช้สภาวะการดำเนินการดังรายละเอียดข้างต้นแสดงดังตารางที่ ข-3.3

ตารางที่ ข-3.3 แสดงผลการกำจัด H₂S ของการทดลองที่ 3

Time (min)	H ₂ S concentration (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	Inlet	Outlet	
50	1819.5	533.8	74.6
70	2325.5	499.2	76.3
90	2800.4	724.2	65.6
110	1731.3	31.4	98.5
130	1835.0	238.6	88.7

การทดลองที่ 4

วันที่ทำการทดลอง: 29 เมษายน 2552

ความเข้มข้นทางเข้าเฉลี่ยของ H ₂ S ในแก๊สชีวภาพ	=	1527	ppm
อัตราการไหลเฉลี่ยของแก๊สชีวภาพ	=	5	l/min
ปริมาตรของ KMnO ₄ ที่ใช้	=	30	l
ความเข้มข้นเริ่มต้นของ KMnO ₄	=	600	mg/l
อัตราการไหลของ KMnO ₄	=	50	l/hr.

ผลการทดลองกำจัด H₂S จากแก๊สชีวภาพ โดยใช้สภาวะการดำเนินการดังรายละเอียดข้างต้นแสดงดังตารางที่ ข-3.4

ตารางที่ ข-3.4 แสดงผลการกำจัด H₂S ของการทดลองที่ 3

Time (min)	H ₂ S concentration (ppm)		H ₂ S removal efficiency (%)
	Inlet	Outlet	
24	1419.2	189.6	86.6
35	1155.9	100.5	91.3
50	1477.0	42.4	97.1
70	1270.7	204.6	83.9
90	1458.7	374.7	74.3
110	1663.9	202.1	87.9
150	2249.1	417.0	81.5

ข-3.2 ผลการวิเคราะห์แก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพก่อนและหลังการกำจัด H₂S ด้วย GC

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพก่อนและหลังการบำบัดด้วยสารละลาย KMnO₄ แสดงดังตารางที่ 4-15

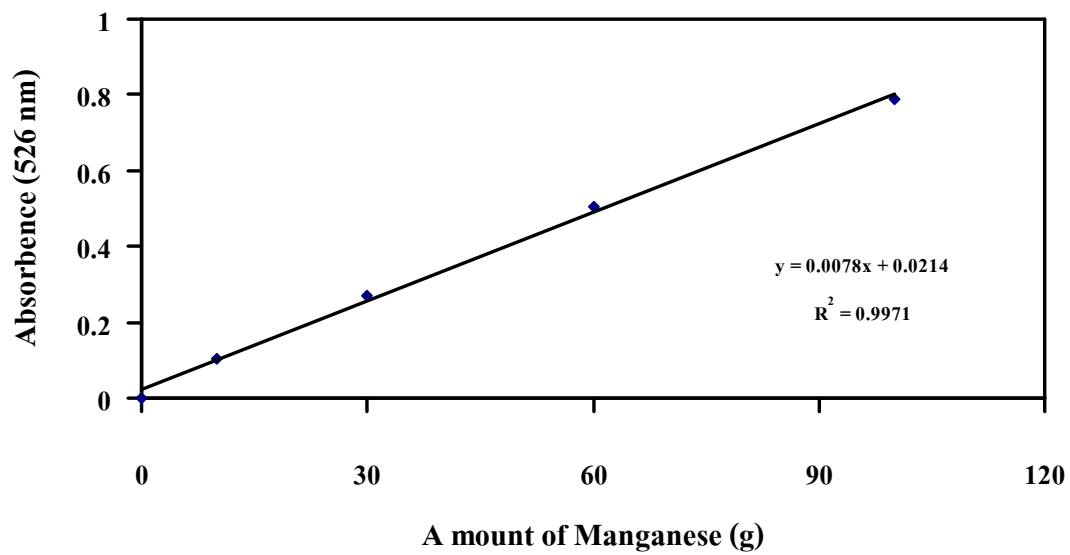
ตารางที่ ข-3.5 ผลการวัดปริมาณแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จุดเก็บตัวอย่างแก๊สชีวภาพ	% CH ₄	% CO ₂
ทางเข้าคอลัมน์บรรจุ	75.92	24.08
ทางออกคอลัมน์บรรจุ	76.79	23.21

ภาคผนวก ค

กราฟมาตรฐานของแมงกานีส

ภาคผนวก ค-1



กราฟมาตรฐานของแมงกานีส

ภาพประกอบที่ ค-1 แสดงกราฟมาตรฐานของแมงกานีส

ภาคผนวก ง

การเตรียมสารเคมีและวิเคราะห์ตัวอย่าง

ง-1 การเตรียมสารเคมี

1. การเตรียมสารละลายสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)

ละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 25 g ในน้ำ DI 1 l หลังจากนั้นจึงต้มให้เดือด ตั้งให้เย็นแล้ว
ใส่ Chloroform (CHCl_3) 2-3 หยด

หมายเหตุ ตั้งสารละลายที่เตรียมไว้ประมาณ 2 อาทิตย์ก่อนจึงนำมาใช้

การหาค่ามาตรฐานสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)

วิธีการหาค่ามาตรฐานสารละลายสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

1. ปิเปต 0.1 N ของสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 1 ml ใส่ในขวด
รูปชมพู่ขนาด 250 ml

2. เติมน้ำปราศจากไอออน (deionized water)

3. เติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4 (1+4) คือ เจือจางกรด 1 ส่วน ลงในน้ำปราศจากไอ
ออน 4 ส่วน) 10 ml

4. เติมผลึกโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 1 g หลังจากนั้นเขย่าให้ผลึกละลายจน
หมด

5. ตั้งไว้ในที่มีดประมาณ 6 นาที

6.ไทเทรตตัวอย่างด้วยสารละลาย ใช้น้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์ จะได้จุดยุติเป็น
สารละลายใสไม่มีสี

สูตรการคำนวณ

$$\text{นอร์มาลิตี (Normality) ของ } \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = \frac{0.1 \times 1}{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 (\text{ml})}$$

2. การเตรียมสารละลายสารละลายไอโอดีน (I_2)

ละลายผลึกไอโอดีน 13 g ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 40 g ในน้ำ 25
ml แล้วปรับด้วยน้ำ DI ให้ได้ปริมาตร 1 l

หมายเหตุ ตั้งสารละลายที่เตรียมไว้ประมาณ 1 คืน ก่อนจึงนำมาใช้

การหาค่ามาตรฐานสารละลายไอโอดีน (I_2)

วิธีการหาค่ามาตรฐานสารละลายสารละลาย I_2

1. ปิเปตสารละลาย I_2 10 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml

2. เติมสารละลาย HCl 6 N 1 ml

3. ไทเทรตด้วยสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จะได้จุดยุติเป็นสารละลายใสไม่มีสี

สูตรการคำนวณ

นอร์มาลิตี (Normality) ของ I_2 =

$$\frac{\text{นอร์มอลของ สารละลาย } \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times \text{ปริมาตรของ สารละลาย } \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}{\text{นอร์มอลของ สารละลาย } \text{I}_2}$$

3. การเตรียมสารละลายซิงค์อะซิเตต (Zinc acetate) 2 N

ละลาย $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 220 g ในน้ำ DI 870 ml

4. การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 0.1 N

อบผลึก $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ประมาณ 2 ชั่วโมง ชั่งผลึก $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 4.904 g

5. การเตรียมสารละลายแคดเมียมซัลเฟต (CdSO_4)

ชั่ง $\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 41 g ละลายในน้ำ DI หลังจากนั้นเติม 0.1 M H_2SO_4 15 ml ปรับปริมาตรเป็น 1 l ซึ่งสารละลายที่เตรียมได้ต้องมี pH เท่ากับ 3 ± 0.1

ง-2 การวิเคราะห์ตัวอย่างและการคำนวณความเข้มข้นของสารตัวอย่าง

ง-2.1 วิธีวิเคราะห์ H_2S ด้วยวิธีไอโอดิเมตริก (Iodometric method) (APHA, 1998)

ง-2.1.1 การวิเคราะห์และคำนวณความเข้มข้น H_2S ในเฟสของเหลว

1. เติมสารละลายซิงค์อะซีเตต 2 ml ลงในขวดแก้ว ใส่สารตัวอย่าง 5 ml เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 N ปริมาตร 5 ml ปิดฝาขวดให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที
2. ตั้งส่วนที่ใสทิ้งไป โดยกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C
3. ตะกอนมาละลายในน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 100 ml
4. ทดสอบตามวิธี Iodometric

การไทเทรตโดยวิธีของ Iodometric Method

1. เติมสารละลายมาตรฐาน I_2 0.025 N ลงในขวดรูปชมพู่ โดยบันทึกจำนวนมิลลิลิตรของสารละลาย I_2 ที่เติมลงไปในตัวอย่งที่วิเคราะห์
2. เติมสารละลายกรด HCl 6 N 2 ml
3. ตั้งทิ้งไว้ในที่มีดประมาณ 30 นาที
4. ไทเทรตด้วยสารละลาย $Na_2S_2O_3$ 0.025 N โดยใช้น้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติที่ได้เป็นสารละลายใสไม่มีสี

สูตรการคำนวณความเข้มข้นของ H_2S ในเฟสของเหลว

$$\text{ความเข้มข้นของ } H_2S \text{ (mg/l)} = \frac{[(A \times B) - (C \times D)] \times 16000}{\text{ml of sample}}$$

- เมื่อ
- A = ปริมาตรของสารละลาย I_2 (ml)
 - B = ความเข้มข้นของสารละลาย I_2 (N)
 - C = ปริมาตรของสารละลาย $Na_2S_2O_3$ (ml)
 - D = ความเข้มข้นของสารละลาย $Na_2S_2O_3$ (N)

ง-2.1.2 การวิเคราะห์และคำนวณความเข้มข้น H_2S ในเฟสของแก๊ส

1. เติมสารละลาย $CdSO_4$ 25 ml ลงในImpringer ใส่สารตัวอย่าง 5 ml เก็บตัวอย่างแก๊สด้วยปั๊มอากาศต่อกับ Calibrator แล้วต่อผ่านสารละลายแคดเมียมซัลเฟตจนสารละลายเปลี่ยนสีจากสารละลายใสเป็นสารละลายสีเหลือง บันทึกเวลาและอ่านอัตราการไหลแก๊สจาก Calibrator

2. ไทเทรตตามวิธี Iodometric

สูตรการคำนวณความเข้มข้นของ H_2S ในเฟสของแก๊ส

$$\text{ความเข้มข้นของ } H_2S \text{ (mg/L)} = 17.04 \times 10^3 \frac{[(V_{IT} N_I \times V_{IT} N_T)_{\text{sample}} - (V_{IT} N_I \times V_{IT} N_T)_{\text{blank}}]}{V_{\text{mstd}}}$$

เมื่อ V_{IT} = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน (ml)

N_I = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (N)

V_{IT} = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต (ml)

N_T = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต (N)

V_{mstd} = ปริมาตรแก๊สมาตรฐาน (l)

ง-3 วิธีวิเคราะห์ แมงกานีส ด้วยวิธีเปอร์ซัลเฟต (Persulphate method) (APHA, 1998)

ง-2.2 การคำนวณความเข้มข้นแมงกานีส

ใช้วิธี Persulfate โดยใช้เครื่อง UV-vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 526 nm

อุปกรณ์

- สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ความยาวคลื่น 525 นาโนเมตร วิธีแสง 1 ซม
- ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml.
- ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml.
- บีกเกอร์ขนาด 100 ml.
- ปิเปตขนาด 10 ml.
- กระจกดวงขนาด 100 ml.

สารเคมี

- สารละลายพิเศษ (special reagent) เตรียมโดยละลายเมอร์คิวริซัลเฟต (HgSO_4) 75 g ในน้ำปราศจากไอออน 200 ml. ซึ่งมีไนตริกเข้มข้นละลายอยู่ 400 ml. แล้วเติมกรดซัลฟิวริก (H_3PO_4 85%) 200 ml. และซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) 35 mg. ทิ้งไว้ให้เย็น เจือจางให้เป็น 1 l
- ผลึกแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต [ammonium persulfate ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$)]
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 30 %
- สารละลายมาตรฐานแมงกานีส 1000 ppm

วิธีการหาความเข้มข้น

ซึ่งผลึกโซเดียมออกซาเลต (sodium oxalate) ให้ทราบน้ำหนักแน่นอนหลายๆ ชุด ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 400 ml. เติมน้ำปราศจากไอออน 100 ml. คนให้สารละลายจนหมดแล้วเติมกรดซัลฟิวริกเจือจาง (H_2SO_4 (1+1)) 10 ml. อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 90-95 °C ไทเทรตด้วยสารละลาย KMnO_4 จุดยุติ (end point) เป็นสีชมพู ความเข้มข้นของสารละลาย KMnO_4 (N)

$$= \frac{\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4 \text{ (mg.)}}{(A \times B) \times 0.067}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของ KMnO_4 ซึ่งไทเทรตตัวอย่าง

B = ปริมาตรของ KMnO_4 ซึ่งไทเทรตแบลนค์ (blank)

จากข้อมูลเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองไตเตรทหลายๆ ชุด นำมาหาค่าเฉลี่ยคำนวณหาปริมาตรของสารละลาย KMnO_4 เพื่อนำมาเตรียมสารละลาย 1 ml. = 50 μg ของ Mn จำนวน 1 l

$$\text{KMnO}_4 \text{ (ml)} = \frac{4.55}{\text{KMnO}_4 \text{ (N)}}$$

สมมติ ml. ที่คำนวณได้จากสูตร = X ml. จะต้องนำสารละลาย KMnO_4 มา X ml. เจือจางเป็น 1 l เตรียมโดย นำ KMnO_4 ปริมาตร X ml. มาเติมกรด H_2SO_4 2-3 ml. และเติมโซเดียมไบซัลเฟต (NaHSO_3) ที่ละหยดพร้อมกับคนสารละลายดังกล่าวไปด้วย จนกระทั่งสีของ KMnO_4 หายไปนำสารละลายนี้ไปต้มเพื่อให้ SO_2 ทิ้งไว้ให้เย็นเจือจางเป็น 1 l

สารละลายนี้ 1 ml. = 50.0 μg ของ Mn

วิธีการวิเคราะห์

1. ตวงตัวอย่างสารละลาย 1 ml.
2. เติมน้ำปราศจากไอออน 100 ml.
3. เติมสารละลายพิเศษ 5 ml. แล้วนำไปทำให้เข้มข้นโดยการต้มให้เป็น 90 ml. หรือเจือจางให้เป็น 90 ml. ตามความเหมาะสม
4. เติมผลึก $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ 1 ml. ต้มสารละลายให้เดือด 1 นาที ขยวงลงไว้ 1 นาที ทำให้เย็นโดยนำไปแช่น้ำทันที
5. เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ปริมาตรเป็น 100 ml. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 525 nm โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นแบลนด์
 ถ้าหากตัวอย่างมีสีหรือความขุ่น ให้หลีกเลี่ยงการกรอง ซึ่งให้ทำดังนี้หลังจากอ่านค่าการดูดกลืนแสงด้วยวิธีข้างต้นแล้ว นำเซลล์ซึ่งใส่ตัวอย่างมาเติม H_2O_2 0.05 ml. นำไปอ่านค่าการดูดกลืนแสงใหม่ อ่านค่าการดูดกลืนแสงได้จาก กราฟมาตรฐาน
6. นำค่าที่อ่านได้ครั้งหลังนี้ไปลบออกจากค่าที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐานของครั้งแรก

การคำนวณ

$$\text{แมงกานีส (mg./l)} = \frac{\text{ไมโครกรัมแมงกานีส}}{\text{มล. ของตัวอย่างที่ใช้}}$$

ภาคผนวก จ**การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Polymath 5.1**

จ-1 การวิเคราะห์ข้อมูลอัตราเร็วของปฏิกิริยา

การวิเคราะห์อัตราเร็วปฏิกิริยานำข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S กับเวลาฟิตในสมการ polynomial จากโปรแกรม Polymath 5.1 รูปแบบสมการมีดังนี้

$$C_{H_2S} = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5$$

จากนั้นทำการหาค่า Polynomial Derivative เทียบกับเวลาเท่ากับศูนย์ ซึ่งค่าที่ได้เป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น ดังสมการ

$$\left(\frac{dC_{H_2S}}{dt} \right)_{t=0}$$

ต่อไปเป็นตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาอัตราเร็วปฏิกิริยา

ตัวอย่าง ผลของการใช้โปรแกรม Polymath 5.1 ในการหาอัตราเร็วปฏิกิริยาเริ่มต้นจากข้อมูลความเข้มข้น และการหาค่า Polynomial Derivative เทียบกับเวลาที่ศูนย์

Model: $CH_2S = a_0 + a_1*t + a_2*t^2 + a_3*t^3 + a_4*t^4 + a_5*t^5$

Variable	Value	95% confidence
a0	279.2015	946.9232
a1	-148.0081	765.6916
a2	23.0873	154.2004
a3	-1.39431	10.69968
a4	0.0344567	0.2868663
a5	-0.0002828	0.0024667

Analytical polynomial integration

$$CH_2S = 279.2015 - 148.0081 *t + 23.0873 *t^2 - 1.39431 *t^3 + 0.0344567*t^4 - 0.0002828*t^5$$

$$\text{Integ}(CH_2S, t, 1, 2) = 279.2015 *t - 74.00407 *t^2 + 7.695767 *t^3 - 0.3485776*t^4 +$$

$$0.0068913*t^5 - 4.713E-05*t^6$$

$$t(1) = 0$$

$$t(2) = 60$$

$$\text{Integ}(CH_2S, t1, t2) = 5.484E+04$$

Analytical polynomial derivative

$$\text{CH}_2\text{S} = 279.2015 - 148.0081 *t + 23.0873 *t^2 - 1.39431 *t^3 + 0.0344567*t^4 - 0.0002828*t^5$$

$$d(\text{CH}_2\text{S})/d(t) = -148.0081 + 46.1746 *t - 4.182931 *t^2 + 0.1378268*t^3 - 0.0014139*t^4$$

Time	D(CH ₂ S)/d(t)
0	-148.0081
2	-71.31067
5	-5.363752
10	19.13244
20	-21.30033
30	48.64523
60	-989.8243

General

Degree of polynomial = 5

Regression including a free parameter

Number of observations = 7

Statistics

R ²	0.9167222
R ² adj	0.5003331
Rmsd	11.05254
Variance	5985.777

Source data points and calculated data points

	Time	K	K calc	Delta K
1	0	300	279.2015	20.79846
2	2	11.56	64.92223	-53.36223
3	5	11.11	-37.2937	48.4037
4	10	11.11	29.82862	-18.71862
5	20	11.11	7.64359	3.46641
6	30	8.86	9.454242	-0.5942418
7	60	8.86	8.85348	0.0065199

อัตราเร็วเริ่มต้นของปฏิกิริยาหาได้จากนำข้อมูลความเข้มข้นของ H_2S กับเวลาที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ มาวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีข้างต้น การวิเคราะห์หาค่า k , α และ β โดยป้อนข้อมูลอัตราเร็วปฏิกิริยากับความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2S และ $KMnO_4$.ในโปรแกรม Polymath 5.1 วิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น รูปแบบสมการที่กำหนดดังแสดง

$$-r_{H_2S} = k C_{H_2S}^\alpha C_{KMnO_4}^\beta$$

จ-2 ผลการวิเคราะห์หาค่าคงที่และอันดับปฏิกิริยา

POLYMATH Results

06-24-2551

Nonlinear regression (L-M)

Model: rate = $k \cdot (H^a) \cdot K^b$

<u>Variable</u>	<u>Ini guess</u>	<u>Value</u>	<u>95% confidence</u>
k	0.001	0.0011326	6.938E-05
a	0.001	1.1009981	0.0126764
b	0.001	0.9207144	0.0099066

Precision

R^2 = 0.8800503

R^2_{adj} = 0.8000838

Rmsd = 2.7738665

Variance = 92.332021

General

Sample size = 6

Model vars = 3

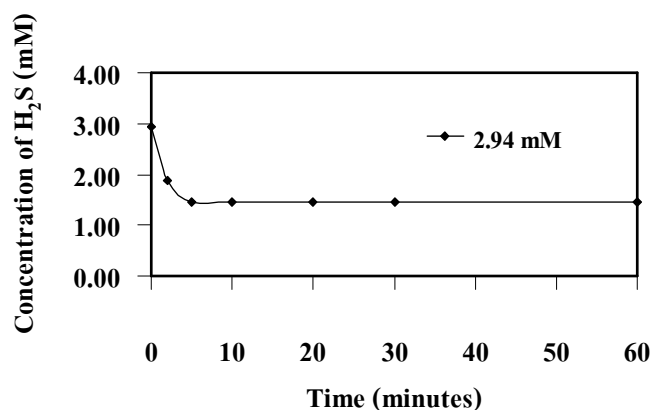
Indep vars = 2

Iterations = 64

ภาคผนวก

ตัวอย่างการคำนวณพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์

ฉ-1 การคำนวณอัตราปฏิกิริยาเริ่มต้น ($-r_{H_2S,0}$) สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย $KMnO_4$
ตัวอย่าง การคำนวณการทดลองที่ ข-1



ภาพประกอบที่ ฉ-1 กราฟแสดงความเข้มข้นกับเวลาของปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย $KMnO_4$
(การทดลองที่ ข-1)

จากความสัมพันธ์อัตราปฏิกิริยาเริ่มต้นมีความสัมพันธ์กับข้อมูลของสารทำ
ปฏิกิริยากับเวลาดังสมการที่ (ฉ-1)

$$-r_{H_2S,0} = \left(\frac{d(C_{H_2S})}{dt} \right)_{t=0} \quad (\text{ฉ-1})$$

นำข้อมูลความเข้มข้น H_2S กับเวลาจากภาพประกอบที่ ฉ-1 ไปหาอัตราปฏิกิริยา
เริ่มต้นโดยการฟิตข้อมูลดังกล่าวในสมการโพลิโนเมียลอันดับ 5 ดังแสดงในสมการที่ (ฉ-2)

$$C_{H_2S} = 2.91 - 0.791t + 0.09t^2 - 0.01t^3 + 1.23 \times 10^{-4}t^4 - 9.93 \times 10^{-7}t^5 \quad (\text{ฉ-2})$$

จากนั้นหาดิฟเฟอเรนเชียลของสมการที่ (ฉ-2) และแทนค่าที่ t เท่ากับ 0 จะได้
อัตราปฏิกิริยาเริ่มต้นของ H_2S ด้วย $KMnO_4$ ดังสมการที่ (ฉ-3)

$$-r_{H_2S,0} = \left(\frac{d(C_{H_2S})}{dt} \right)_{t=0} = 0.79 \quad (\text{ฉ-3})$$

ดังนั้นอัตราปฏิกิริยาเริ่มต้นสำหรับการทดลองที่ ข-1 มีค่าเท่ากับ $0.79 \text{ mM} \cdot \text{min}^{-1}$

ฉ-2 การคำนวณค่าคงที่อัตราปฏิกิริยา k สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย $KMnO_4$

สามารถหาค่า k ได้จากสมการกฎอัตราในรูปทั่วไปดังแสดงในสมการที่ (ฉ-4)

$$k = \frac{-r_{H_2S,0}}{(C_{H_2S,0}^\alpha)(C_{KMnO_4,0}^\beta)} \quad (\text{ฉ-4})$$

ตัวอย่าง การทดลองที่ ข-1

$$C_{H_2S,0} = 2.94 \text{ mM}, C_{KMnO_4,0} = 1.89 \text{ mM}$$

$$-r_{H_2S,0} = 6.40 \text{ mM min}^{-1}, \alpha = 1.1 \text{ และ } \beta = 0.92$$

หลังจากนั้นแทนค่า $C_{H_2S,0}$, $C_{KMnO_4,0}$, $-r_{H_2S,0}$, α และ β ในสมการที่ (ฉ-4)

$$k = \frac{6.40}{(2.94^{1.1})(1.89^{0.92})}$$

จะได้ค่าคงที่ปฏิกิริยา

$$k = 1.40 \text{ mM}^{-1.02} \text{ min}^{-1}$$

ดังนั้นค่า k สำหรับการทดลองที่ ข-1 เท่ากับ $1.40 \text{ mM}^{-1.02} \text{ min}^{-1}$

ฉ-2 การคำนวณพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย $KMnO_4$

ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (E_a) ของปฏิกิริยา และแฟกเตอร์ความถี่ (A) หาได้จากความสัมพันธ์ของค่า k ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้สมการของอาร์เรเนียส ดังสมการ

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (\text{ฉ-5})$$

เมื่อ E_a คือ พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (เท่ากับ $8.314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

e คือ ฐานของลอการิทึมธรรมชาติ

A คือ ความถี่ของการชน เรียกว่าแฟกเตอร์ความถี่

(Frequency Factor) มีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา 303.15 K ถึง 323.15 K

เขียนสมการนี้ใหม่ในรูปของลอการิทึมธรรมชาติ ดังนี้

$$\ln k = \ln Ae^{-E_a/RT}$$

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (\text{ฉ-6})$$

สังเกตว่าสมการที่ (ฉ-6) เขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ คือ

$$\ln k = \left(-\frac{E_a}{R}\right)\frac{1}{T} + \ln A \quad (\text{ฉ-7})$$

$$y = mx + b \quad (\text{ฉ-8})$$

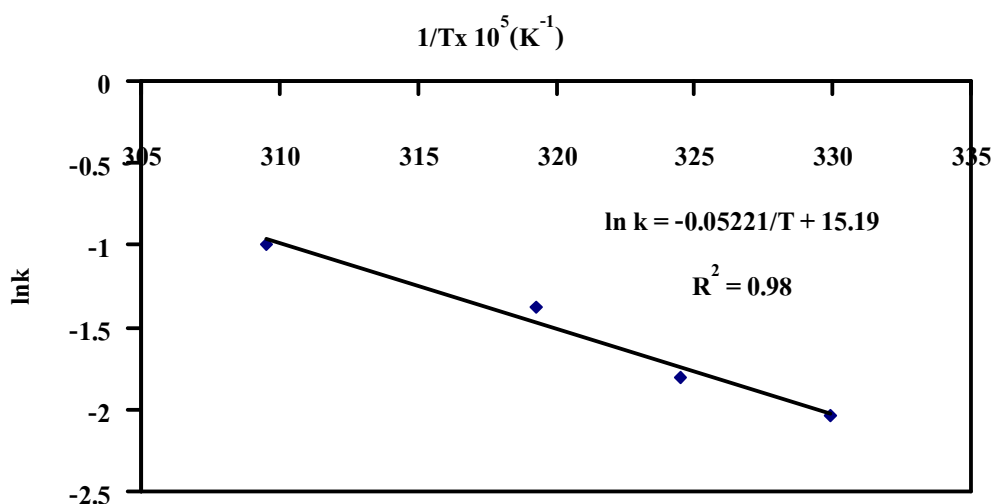
โดยที่ $y = \ln k, m = \left(-\frac{E_a}{R}\right), x = \frac{1}{T}, b = \ln A$ ดังนั้น เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $\frac{1}{T}$ จะ
ได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\left(-\frac{E_a}{R}\right)$ และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $\ln A$

ตัวอย่าง การคำนวณ E_a และ A

ตารางที่ ฉ-1 ข้อมูลค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

T (K)	$-r_{H_2S,0}$ (mM.min ⁻¹)	k (mM ^{-1.02} .min ⁻¹)	$\ln k$	$1/T \times 10^5 (K^{-1})$
303.15	0.79	0.14	-2.03485	329.9
308.15	1.00	0.16	-1.80424	324.5
313.15	1.54	0.25	-1.07499	319.3
323.15	2.23	0.37	-1.00103	309.5

จากข้อมูลในตารางที่ ฉ-1 นำค่า k ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาพล็อตกราฟ
ความสัมพันธ์ตามสมการอาร์เรเนียส



ภาพประกอบที่ ฉ-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$

จากภาพประกอบที่ ฉ-1 สามารถหา E_a และ A ได้จากสมการที่ (ฉ-9)

$$\ln k = 15.19 - 0.0522 \frac{1}{T} \quad (\text{ฉ-9})$$

การคำนวณ A

$$\ln A = 15.19$$

$$A = e^{15.19} = 3.68 \times 10^6$$

การคำนวณ E_a

$$-\frac{E_a}{R} = -5220, R = 8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$E_a = (5220) \times 8.314$$

$$= 43327.57 \text{ J mol}^{-1}$$

$$= 43.37 \text{ kJ mol}^{-1}$$

สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชัน H_2S ด้วย KMnO_4 ให้ค่า E_a และ A เท่ากับ $43,327 \text{ J mol}^{-1}$ และ 3.68×10^6

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Regression

1. ข้อมูลสถิติของแบบจำลอง

1.1 ประสิทธิภาพการกำจัด H₂S

จากแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกับตัวแปร
 คำเนินการต่างๆ ที่ได้จากสมการที่ (4-8) สร้างได้จากสมการที่ (ซ-1) โดยใช้โปรแกรม Regression
 และข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองและข้อมูล ANOVA ของแบบจำลองดังตารางที่ ซ-1

ตารางที่ ซ-1 ข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองของประสิทธิภาพการกำจัด H₂S

		P value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF
b0	73.36	0.00338	20.51	29.05	117.67	3.577	
b1	-0.01349	0.03070	0.00557	-0.02552	-0.00147	2.423	28.15
b2	0.01956	0.182	0.01389	-0.01044	0.04956	1.408	31.25
b3	1.858	0.137	1.171	-0.671	4.388	1.587	14.40
b4	4.32602E-06	0.157	2.87983E-06	-1.89546E-06	1.05475E-05	1.502	19.69
b5	0.000313	0.298	0.000289	-0.000311	0.000937	1.084	23.32
b6	-0.00165	0.03384	0.000694	-0.00314	-0.000146	2.371	24.69

โดยแบบจำลองที่ได้มีค่า $R^2 = 0.76$ และ R^2 adjusted = 0.65

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวปัทมา อรุณราช		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4910120024		
วุฒิการศึกษา			
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา	
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2548	

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน พ.ศ. 2552 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Pattama Arunraj, Charun Bunyakarn and Juntima Chungsiriporn. 2008. Kinetics of the Oxidation of Hydrogen sulfide by Potassium permanganate. Proceedings of the 18th Thailand Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference (TICHE18). Pattaya, Thailand, Oct 20-21 2008, 132.

ปัทมา อรุณราช จรรย์ บุญกาญจน์ และ จันทิมา ชั่งสิริพร. 2552. การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยการดูดซับปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในหลอดดูดซับแบบแพค. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 7. (The 7th PSU-Engineering Conference (PEC-7)). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 21-22 พฤษภาคม 2552 หน้า 100.